

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

MESTRADO EM ENGENHARIA DO SOLO E DA ÁGUA

***DESENVOLVIMENTO, POR AUTOMATIZAÇÃO, DUM
SISTEMA DE CABO-REGA***

Shakib Shahidian

*Évora
1996*

BIBLIOGRAFIA EM FALTA

- Cardoso, J.V.J.C. (1965) *Os solos de Portugal ; sua classificação, caracterização e génese; I- A sul do rio Tejo*. Direcção Geral dos Serviços Agrícolas, Lisboa.
- Christiansen, J.E., A.A. Bishop, F.W. Kiefer Jr., e Y.S. Fok (1966) *Evaluation of intake rate constants as related to advance of water in surface irrigation*. Transactions of the ASAE 9(5): 671-674.
- Kincaid, D.C.(1991) *Cablemet.bas: Cablegation automatic surface irrigation design program with surface flow components using SCS equations*. USDA-ARS, Kimberly, Idaho.
- Kincaid, D.C. e W.D.Kemper (1982) *Cablegation: II. Simulation and Design of the Moving-Plug Gated Pipe Irrigation System*. Transactions of the ASAE 25 (2): 388-395.
- Sakkas, J.G. e T.Strelkoff (1974) *Hydrodynamics of surface irrigation- advance phase*. ASCE J. Irrig. Drain. Div. 100: 31-48.
- Sakkas, J.G., C.V.Bellos e M.N.Klonaraki (1994) *Numerical computation of surface irrigation*. Irrigation Science 15 (2/3): 83-100.
- Sousa, P.L., M.R.Cameira e A. Monteiro (1992) *Funcionamento e gestão do sistema Cabo-Rega*, in Desenvolvimento de equipamentos mecanizados para rega de gravidade, Actas do Seminário, Lisboa, ISA.
- Strelkoff T. e F. Sousa (1984) *Modelling Effect of Depth on Furrow Infiltration*. J. of Irrigation and Drainage. Eng. ASCE 110 (4): 375-387.
- Strelkoff, T.S. e A.J.Clemmens (1994) *Dimensional analysis in surface irrigation*. Irrigation Science 15 (2/3):57-82.
- Trout, T.J. (1991) *Furrow Geometric Parameters*. J. of Irrigation and Drainage Eng. ASCE 117, (5):613-633.
- Trout, T.J. (1992) *Flow velocity and wetted perimeter effects on furrow infiltration*. Transactions of the ASAE 35 (3):855-863.
- Walker W.R. e A.S. humpherys (1983) *Kinematic-wave furrow irrigation model*. J.of Irrigation and Drainage Eng. ASCE 109 (IR4): 377-392.
- Wilke, O.C. (1973) *Theoretical irrigation tailwater volumes*. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASAE 99 (IR3):415-420.

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

MESTRADO EM ENGENHARIA DO SOLO E DA ÁGUA

**DESENVOLVIMENTO, POR AUTOMATIZAÇÃO, DUM
SISTEMA DE CABO-REGA**

Shakib Shahidian

*Dissertação apresentada na Universidade de
Évora para satisfação parcial dos requisitos
para a obtenção do grau de Mestre.*

**Évora
1996**

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

MESTRADO EM ENGENHARIA DO SOLO E DA ÁGUA

**DESENVOLVIMENTO, POR AUTOMATIZAÇÃO, DUM SISTEMA
DE CABO-REGA**



86 162

Shakib Shahidian

*Dissertação apresentada na Universidade de
Évora para satisfação parcial dos requisitos
para a obtenção do grau de Mestre.*

*Évora
1996*

*A REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO FOI SUBSIDIADA PELA JUNTA NACIONAL DE INVESTIGAÇÃO
CIENTÍFICA - JNICT*

AGRADECIMENTOS

Para a elaboração do presente trabalho beneficiei da colaboração e do apoio de várias pessoas, sem as quais não teria sido possível concretizar-lo. De entre estes destaco, por o seu contributo ter sido relevante:

O meu orientador, professor Ricardo Paulo Serralheiro, pela ideia original do trabalho, pela disponibilidade e ajuda, e seu optimismo, flexibilidade e confiança nas pessoas.

Os colegas Filomena Michaens e Pedro Quartim, pela colaboração na preparação e desenvolvimento do material e na execução dos ensaios de campo. A força de vontade dum e o génio criativo de outro foram essências para a realização deste ensaio.

As Engenheiras Luísa Guterres e Isabel Laranjeira pelo apoio no desenvolvimento do material, e a realização dos ensaios do campo e especialmente pelo bom ambiente de trabalho proporcionado.

O amigo Luís Leopoldo Silva, pela disponibilidade sempre demonstrada e pela primeira revisão do texto.

O amigo Rui Machado, pela amizade, encorajamento e revisão do texto final.

O Senhor Freixa por ter disponibilizado o campo, o seu tempo e as suas máquinas para a realização do ensaio.

A Técnica do laboratório Beatriz Castor pela sua alegria, coragem e boa vontade.

Por fim, más em primeiro, a Neda pelo encorajamento e paciência ao longo dos últimos dois anos e meio.

Expresso ainda, toda a minha gratidão a todos aqueles que colaboraram de alguma forma para a realização deste trabalho, e que não necessitam de menção aqui.

DEDICATÓRIA

*Este trabalho é dedicado
aos agricultores,
como o Sr. Freixa e o Sr. António,
últimos destinatários
de toda investigação agrária.*

RESUMO

Pretendeu-se conceber, desenvolver e testar um sistema computadorizado de controlo da velocidade de funcionamento do Cabo-rega num campo organizado em blocos de contorno, que utilize informações relativas ao escoamento nos sulcos para otimizar a rega em tempo real.

Para este efeito, foi desenvolvido um método que utiliza os tempos de avanço e a profundidade do escoamento em dois pontos dum sulco seleccionado para determinar a equação de infiltração e a rugosidade do sulco, e com base nestes parâmetros modela o avanço no resto do campo, utilizando um modelo de simulação do escoamento criado para o efeito.

Foi desenvolvido um programa de gestão da rega em tempo real, CaboGest, que utilizando o método acima descrito, simula o avanço em todos os sulcos a serem regados e determina as velocidades do êmbolo, de modo a aplicar a dotação pretendida.

O controlador hidráulico do Cabo-rega foi substituído por um motor eléctrico comandado por um computador instalado no campo, recorrendo para o efeito a um variador de velocidades.

O equipamento e o programa CaboGest foram ensaiados em duas regas realizadas num campo organizado em blocos de contorno, onde os comprimentos dos sulcos variavam de 180 a 280 metros. Devido a irregularidades existentes no declive dos sulcos, foi necessário refazer os mesmos depois da primeira rega.

Foi possível concluir que tanto o equipamento, como o modelo e o programa desenvolvido são viáveis num solo pertencente a ordem dos argiluiados pouco insaturados, embora seja necessário mais ensaios para aperfeiçoar a modelação do escoamento.

Por outro lado, verificou-se que a geometria transversal dos sulcos influencia a velocidade do escoamento, e que o perímetro molhado tem um papel preponderante no volume infiltrado em cada troço de sulco. Verificou-se também que a medida que a profundidade do escoamento diminui, a rugosidade do fundo do sulco exerce uma influência crescente na velocidade do escoamento, ou seja, o coeficiente de rugosidade de Manning depende também do caudal.

Palavras chave: *Cabo-rega, modelação do escoamento, automação, solos argiluiados, sulcos de contorno.*

ÍNDICE

	<i>Pág.</i>
1. Introdução e Objectivos	1
1.1.Introdução	2
1.2. Objectivos	3
2. Avanços no desenvolvimento do Cabo-rega	4
2.1.O Cabo-rega	5
2.1.1.Descrição do sistema	5
2.1.2.Introdução ao funcionamento do sistema	7
2.1.3.Gestão da rega com o Cabo-rega	9
2.2.Dimensionamento do Cabo-rega utilizando o programa Cable	9
2.2.1.Dimensionamento do sistema	10
2.2.2.Modelação do avanço e da infiltração	11
2.2.3.Experiência de utilização do Cable	13
2.3.Ensaio com Cabo-rega	13
2.3.1.Utilizando o controlador hidráulico	13
2.3.2.Utilizando controladores electrónicos	14
2.3.3.Utilizando retorno da informação do campo em tempo real	14
2.4.Cabo-rega: Passado e presente	15
3.Avanços na Modelação da rega de superfície e da infiltração em sulcos	16
3.1.Modelação matemática do escoamento	17
3.1.1.Modelo Hidrodinâmico completo	18
3.1.2.Modelo de Inércia nula	19
3.1.3.Modelo de Onda Cinemática	19
3.1.4.Modelo do Balanço Volumétrico	20
3.2.Estudo da infiltração em sulcos	20
3.2.1.Factores que afectam a infiltração	20
3.2.1.1.O Perímetro molhado e a velocidade do escoamento	20

3.2.1.2.Geometria da secção transversal	21
3.2.1.3.Rugosidade do sulco	21
3.2.2.Equações de infiltração	22
3.2.3.Métodos para determinação das equações de infiltração	23
3.2.3.1.O Método do balanço volumétrico	23
3.2.3.2.Determinação da Equação de Kostiakov pelo método de Elliot e Walker	24
4. Material	28
4.1.Caracterização do campo de ensaio	29
4.1.1.Localização	29
4.1.2.Caracterização do solo	29
4.2.Implantação do ensaio	29
4.2.1.O Sistema Cabo-rega	30
4.2.2.Alimentação do Cabo-rega	31
4.3.Material de Medição e de ensaio	32
4.3.1.Sensores de avanço	32
4.3.2.Limnigrafos	32
4.3.3.Sondas de Ultrasons	33
4.3.4.Determinação da Secção hidráulica dos sulcos	34
4.4.Descrição do Equipamento desenvolvido	34
4.4.1.O Controlador	33
4.4.2.Calibração do controlador	36
4.4.3.Detectores do avanço	37
4.5.Avaliação	37
5. Métodos	39
5.1.Desenvolvimento de um programa de gestão de Cabo-rega: CaboGest	40
5.2.O Princípio do Método CaboGest	41
5.3.O Modelo de escoamento elaborado	42
5.4.O Programa CaboGest	43
5.4.1.Determinação da Equação de Infiltração	43
5.4.2.Determinação da dotação pretendida	45
5.4.3.Determinação do coeficiente de rugosidade de Manning	45
5.4.4.Rotina gestora da rega	46
5.4.4.1.Cálculo da velocidade de avanço	46
5.4.4.2.Cálculo do volume infiltrado	47

5.4.4.3.Cálculo do armazenamento superficial	48
5.4.4.4.Caudal disponível para o incremento seguinte	48
5.4.4.5.Algumas considerações sobre a determinação do Perímetro molhado	49
5.4.5.Comunicação das velocidades do êmbolo ao Micromaster	50
5.5.Parâmetros introduzidos no CaboGest	50
6. Resultados e Discussão	52
6.1.Ensaio preliminar	53
6.1.1.Preparação dos dados para o CaboGest	53
6.1.2.Condução do ensaio	54
6.1.3.Resultados obtidos	55
6.1.3.1.Equação de infiltração e os tempos de avanço	55
6.1.3.2.Uniformidade de aplicação	58
6.1.3.3.Equações da geometria e do avanço	58
6.2.Ensaio definitivo	60
6.2.1.Preparação do campo	60
6.2.2.Preparação dos dados para o CaboGest	60
6.2.3.Condução do ensaio	61
6.2.4.Resultados obtidos	61
6.2.4.1.Equação de infiltração e os tempos de avanço	61
6.2.4.2.Uniformidade de aplicação	63
6.2.4.3.Equações da geometria e do avanço	64
6.3. Discussão dos resultados	64
6.3.1.Influência da geometria do sulco sobre o avanço	64
6.3.2.Simulações de avanço realizados pelo CaboGest	65
6.3.3.Equações de infiltração	66
6.3.4.Efeito do perímetro molhado sobre a modelação do avanço	67
6.3.5.Evolução da profundidade do escoamento no sulco	67
6.3.6.Caudais de entrada e excedentes	68
6.3.7.Influência dos tempos de rega nos sulcos adjacentes	69
7. Conclusões	70
7.1.Propostas para trabalhos futuros	72

Bibliografia

Anexos

1. Análise físico-química do campo de ensaio
2. Os comprimentos dos sulcos e a distância entre os orifícios do Cabo-rega.
3. Listagem do programa CaboGest
4. Listagem dos variáveis do CaboGest
5. Derivação da equação da área da secção transversal, a partir da equação de fluxo uniforme de Manning
6. Descrição do Micromaster
7. Geometria média dos sulcos
8. Tempos de avanço e de recessão a longo dos sulcos
9. Área molhada dos sulcos
10. Programa CaboGest.Exe e CaboGest.Bas em suporte magnético, bem como o Manual de Utilização

Capítulo 1

Introdução e Objectivos

1. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

1.1. INTRODUÇÃO

A rega de superfície continua a ser a mais praticada em todos os perímetros de rega. Nos últimos anos têm-se testemunhado um avanço rápido na tecnologia de rega em sulcos compridos com a modelação hidráulica da rega de superfície e o desenvolvimento de métodos de diminuição de caudal.

O Cabo-rega (*Cablegation*) é um sistema relativamente recente de automatização da rega por sulcos, consistindo basicamente num tubo com janelas que é percorrido interiormente por um êmbolo cujo movimento permite a abertura das janelas que regam os sulcos.

Este sistema para além de ter um custo inicial relativamente baixo, permite uma boa uniformidade de rega através da diminuição gradual e contínua dos caudais, adequável à taxa decrescente da infiltrabilidade do solo.

No entanto, o Cabo-rega não conseguiu até agora consagrar-se como um sistema importante de rega, talvez pelo facto do seu controlo ser feito por um sistema manual e inadequado às necessidades dos agricultores e o custo da mão.

A armação do terreno em blocos de contorno permite ter sulcos com declives constantes e uniformes sem necessitar de grandes trabalhos de nivelamento que para além de terem elevados custos removem a camada arável e põem à superfície horizontes inferiores.

No entanto, num terreno armado em blocos de contorno, os sulcos podem resultar com comprimentos diferentes, necessitando, portanto de tempos de admissão diferentes, o que dificulta bastante a rega de superfície.

Este problema tem sido um grande obstáculo à utilização de sistemas de Cabo-rega neste tipo de sulcos, pois obriga a um reajuste constante da velocidade do funcionamento do Cabo-rega. Com o desenvolvimento que se tem verificado na electrónica, torna-se interessante desenvolver sistemas automáticos de controlo e operação do Cabo-rega que possam operar com sulcos de comprimentos variáveis.

1.2.OBJECTIVOS

O presente trabalho pretende conceber, desenvolver e testar um sistema computadorizado de controlo da velocidade de funcionamento do Cabo-rega, que utilize informações relativas ao escoamento em sulcos seleccionados para otimizar a rega em tempo real. Este objectivo divide-se em quatro vertentes inter-relacionadas:

- Desenvolvimento dum método que possa cumprir os objectivos propostos, sem interferir com a condução normal da rega com Cabo-rega, e que possa determinar em tempo real certas características importantes da rega.

- Desenvolvimento dum modelo matemático de escoamento que possa, a partir das referidas informações, modelar a rega no remanescente do campo.

- Desenvolvimento do equipamento controlador propriamente dito, que deve ser fiável e económico.

- Desenvolvimento dum programa gestor da rega em tempo real.

Este sistema deve, para além de reduzir a necessidade de intervenção humana durante a rega, proporcionar melhores qualidades de rega e maior economia de água em relação a sistemas semelhantes com controlo manual.

O equipamento e o método desenvolvido serão validados num campo armado em blocos de contorno, onde resultam sulcos com comprimentos de 180 a 280 m.

Capítulo 2

Avanços no desenvolvimento do Cabo-verde

2. AVANÇOS NO DESENVOLVIMENTO DO CABO-REGA

Com a intensificação da competitividade no sector agrícola torna-se necessário aos agricultores reduzirem a utilização de mão de obra e os custos da rega. Os sistemas de rega por aspersão, tais como o center-pivot, permitem a muitos agricultores reduzirem a mão de obra necessária e aumentar a eficiência da aplicação. Enquanto os custos de energia são reduzidos e a aquisição dos equipamentos subsidiado, a sua viabilidade económica é garantida. Quando se alterarem estes factores, será necessário ter alternativas viáveis técnica e economicamente.

Estima-se que até 50% de total de energia gasta para produzir milho nos Estados Unidos é dispendida nos sistemas de rega. A energia gasta em rega por aspersão é normalmente três a cinco vezes aquela gasta para a operação dos tractores e camiões no campo (Kemper et al. 1985).

As reservas limitadas de combustíveis fósseis e a sua taxa de esgotamento prevêem eventuais aumentos de preços. Considerando que em 1980 o barril de crude custava 35 dólares e considerando uma inflação anual de 4% ao ano, é fácil calcular que hoje o barril deveria custar 68 dólares ou seja quatro vezes o preço actual (cerca de 17 dólares). Observando que os preços baixos devem-se principalmente a conjunturas políticas facilmente reversíveis, a investigação agrícola deve incidir sobre sistemas de rega com menores gastos energéticos.

2.1.0 CABO-REGA

O Cabo-rega, desenvolvido originalmente no Snake River Conservation Research Centre em Kimberly, Idaho, suscitou desde logo um grande interesse junto de agricultores e investigadores. Este sistema engenhoso de automatização da rega de superfície propunha desde início as seguintes vantagens: baixo custo de instalação, boas uniformidades de aplicação devido a uma redução progressiva de caudais, e pouca necessidade de mão de obra.

2.1.1. Descrição do Sistema

O sistema é constituído por um tubo de PVC, assente à cabeceira dos sulcos com um declive preciso e com um diâmetro que permite o transporte do caudal em superfície livre. As saídas são abertas ao longo de uma linha que em conjunto com o eixo longitudinal do tubo define um plano que faz um ângulo diedro de trinta graus com o plano vertical.

No interior do tubo, por acção da pressão dinâmica da própria água, desloca-se um êmbolo que, seguro por um cabo, impede a passagem da água para jusante. O cabo é desenrolado com uma velocidade pequena regulada por um mecanismo controlador.

Atrás do êmbolo forma-se uma onda de compressão e o respectivo regolfo. A água escoava portanto, com caudal máximo no orifício situado imediatamente a montante do êmbolo, pois aí a pressão é mais elevada. À medida que o mecanismo regulador de velocidade vai desenrolando o cabo, o êmbolo vai-se deslocando para jusante, a pressão diminui e, por conseguinte, o caudal no orifício vai decrescendo até se anular, por o regolfo já não atingir-lo. Cada vez que o êmbolo ultrapassa um orifício, este começa a funcionar e o caudal no último orifício de montante cessa.

Para evitar o escorrimento contínuo ou demasiado prolongado dos orifícios a montante do êmbolo, não é recomendado utilizar caudais superiores a 85% da capacidade do tubo. O tubo deve ser colocado e mantido com um declive preciso, de modo a obter a uniformidade desejada. Quando o declive é pequeno ($< 0,005$ m/m), a elevação do tubo deve ser mantido a ± 1 cm da cota desejado (Kemper et al, 1985).

O mecanismo controlador da velocidade do êmbolo pode ser de vários tipos. Os métodos manuais de controlo do Cabo-rega baseiam-se principalmente num sistema de relojoaria consistindo numa roda com o diâmetro de cerca de 1 m, constituída por um tubo que é preenchido até ao meio com água (fig.2.1). No interior do tubo existem duas válvulas

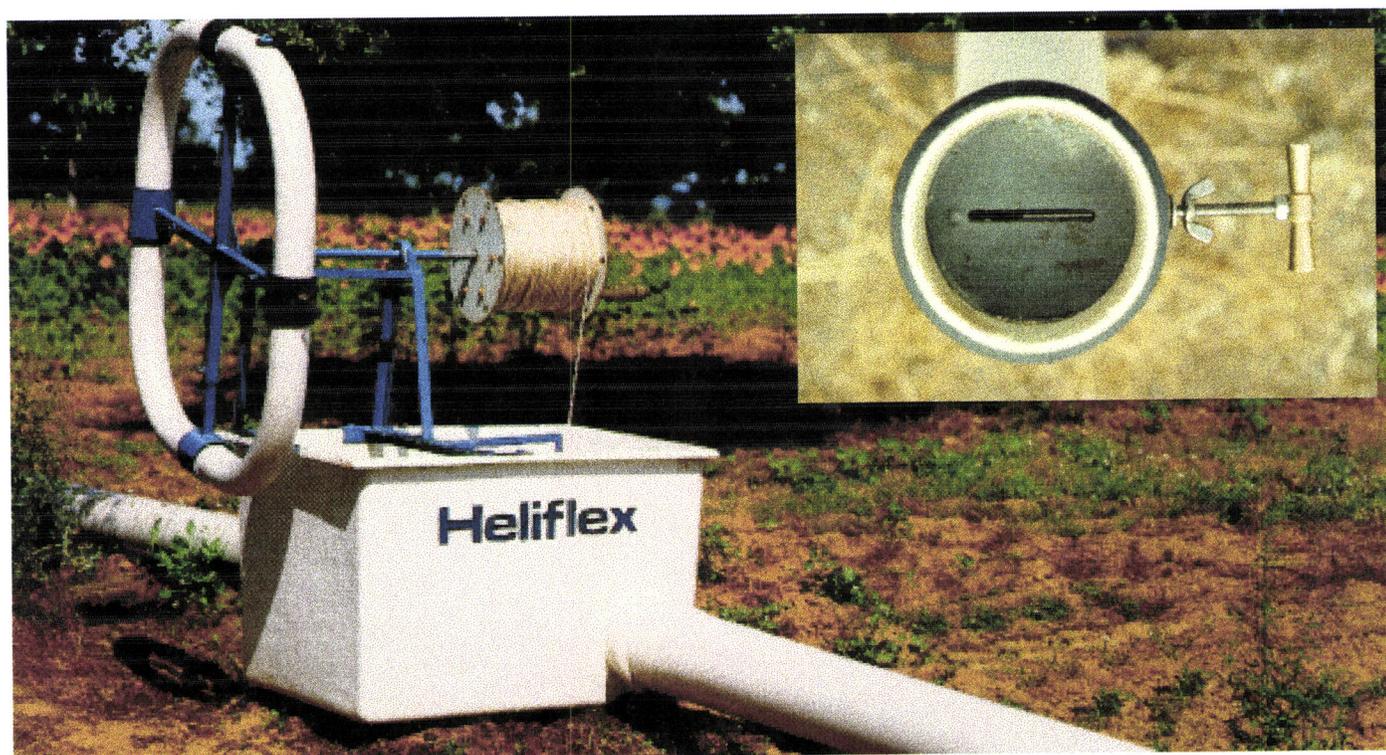


Figura 2.1. Sistema Cabo-rega com controlador hidráulico. Ao lado pode-se ver a válvula do controlo de fluxo localizada no interior do controlador Hidráulico.

colocadas a 180° que controlam o fluxo da água. A água a passar lentamente pelas válvulas limita a sua velocidade de rotação. O operador ajusta a velocidade do avanço do êmbolo ajustando a abertura das válvulas. Como não existe nenhum indicador da sua abertura, este método é impreciso e trabalhoso.

Outros sistemas mais sofisticados incluem motores eléctricos regulados por relés, reóstatos ou aparelhos electrónicos, acoplados a mecanismos redutores. Estes sistemas, embora mais caros, permitem uma regulação precisa da velocidade pretendida.

2.1.2. Introdução ao funcionamento do sistema

Como no Cabo-rega a água é aplicada simultaneamente a um grupo de sulcos, a rega é iniciada normalmente com o êmbolo estacionado não no primeiro sulco, mas alguns sulcos mais abaixo. O êmbolo é mantido nesta posição durante cerca de 2/3 do tempo de rega habitual, de modo a permitir a rega dos primeiros sulcos. Do mesmo modo, quando se alcança o fim do tubo, o êmbolo é mantido durante o tempo suficiente para regar os últimos sulcos.

O procedimento descrito provoca uma rega deficiente nos primeiros sulcos e excessiva nos últimos. Para ultrapassar este problema, pode-se utilizar uma derivação em paralelo (*bypass*) que ao conduzir o excesso de água no início de rega para os últimos sulcos, permite iniciar a rega com o êmbolo a movimentar-se com a velocidade normal, obtendo-se assim uma melhor uniformidade de aplicação (Kincaid e Kemper, 1984).

Outra questão prende-se com o facto de que, a partir de certa altura o caudal debitado pelos orifícios pode ser muito pequeno, resultando numa recessão de jusante para montante, diminuindo a uniformidade de aplicação. Uma solução possível é a instalação de válvulas de corte, que fazem o corte automático do caudal quando este se torna pequeno.

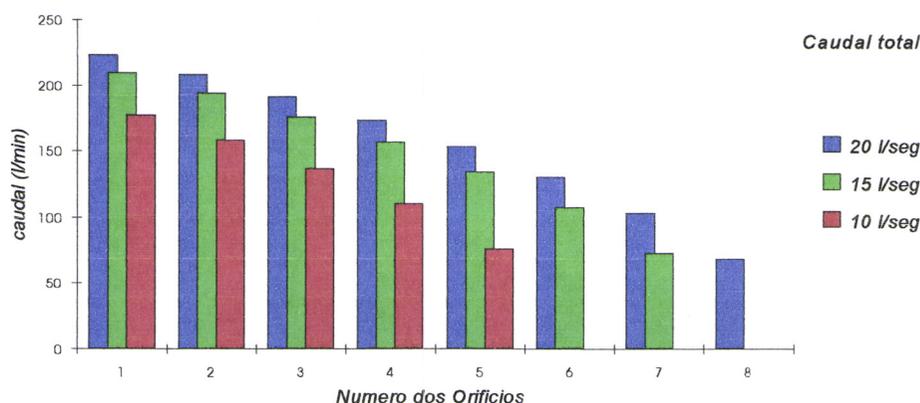


Figura 2.2. Efeito do caudal total sobre o número de orifícios debitando em simultâneo, e o caudal debitado por cada um. (Caudais totais de 10, 15 e 20 l/segundo, declive = 0,002 m/m. diâmetro equivalente dos orifícios = 47.7 mm. O êmbolo está logo a jusante do orifício 1. Simulação feita com o programa Cablemet.)

Na figura 2.2 pode-se ver a influência do caudal total sobre o número de orifícios a debitar simultaneamente e também o caudal debitado por cada um dos orifícios.

Verifica-se que um caudal total maior não implica apenas caudais maiores em cada sulco, resultando num aumento da velocidade de avanço, mas também um maior número de sulcos regados simultaneamente.

Por sua vez, a velocidade do êmbolo determina a distribuição temporal dos caudais, ou seja o tempo durante o qual cada caudal é aplicado ao sulco. Um aumento da velocidade do êmbolo, implica uma redução mais rápida dos caudais, pelo que a quantidade total de água aplicada aos sulcos é inversamente proporcional à velocidade do êmbolo.

A figura 2.3 mostra os volumes totais admitidos num mesmo sulco, quando a velocidade do êmbolo passa de 0,3 m/min para 0,25 m/min. e para 0,21 m/min. Verifica-se que à medida que diminui a velocidade do êmbolo aumenta não só o volume total aplicado, como também o tempo de aplicação passa de 25 para 35 minutos.

A abertura das janelas influencia o caudal máximo aplicado nos sulcos e portanto o número de sulcos regados simultaneamente (fig.2.4.). Para um mesmo caudal total e velocidade do êmbolo, o aumento da dimensão dos orifícios aumenta o caudal inicial e diminui o tempo de aplicação em cada sulco, sem, no entanto, alterar o volume total de água aplicado ao sulco (Kemper et al. 1981).

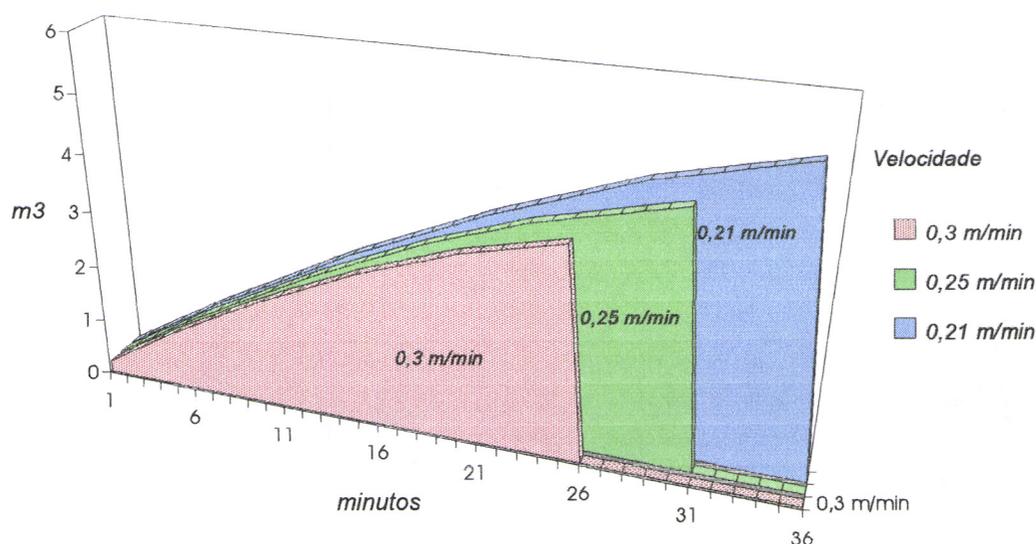


Figura 2.3. Influência da velocidade do êmbolo sobre o volume total aplicado em cada sulco, mantendo-se constantes os outros parâmetros (Caudal total = 10 l/seg, declive = 0,002 m/m, diâmetro dos orifícios = 47.7 mm. Simulação realizada com Cablemet).

2.1.3. Gestão da rega com o Cabo-rega

O dimensionamento do Cabo-rega está dependente da conjugação de factores tais como o declive do tubo e dos sulcos, o diâmetro interno do tubo do Cabo-rega, o caudal total, a rugosidade do tubo, a dimensão e o espaçamento entre as janelas e o comprimento dos sulcos.

Com o sistema já instalado no campo, a optimização das qualidades da rega só pode ser feita em função da abertura dos orifícios, do caudal total de entrada e da velocidade do êmbolo. Por outro lado, durante a rega esta optimização só pode ser feita pela regulação correcta da velocidade do êmbolo.

A alteração da velocidade do êmbolo modifica completamente as características do avanço da frente de humedecimento no sulco. Como já foi referido, à medida que o intervalo entre sulcos diminui, não só diminui a velocidade de avanço da frente de humedecimento, como também a duração total da fase de admissão. Este facto aumenta a sensibilidade do sistema a velocidade do êmbolo, dificultando o seu acerto.

2.2. DIMENSIONAMENTO DO CABO-REGA UTILIZANDO O PROGRAMA CABLE

Kincaid (1984) desenvolveu um método simplificado de dimensionamento do Cabo-rega utilizando uma série de relações adimensionais. Ele elaborou um modelo completo de simulação em Fortran e um modelo simplificado em Basic. Os programas definitivos para o dimensionamento do Cabo-rega, denominados Cable, e Cablemet, surgiram em 1989- 91 e são os mais divulgados entre nós, especialmente a última pois utiliza o sistema métrico.

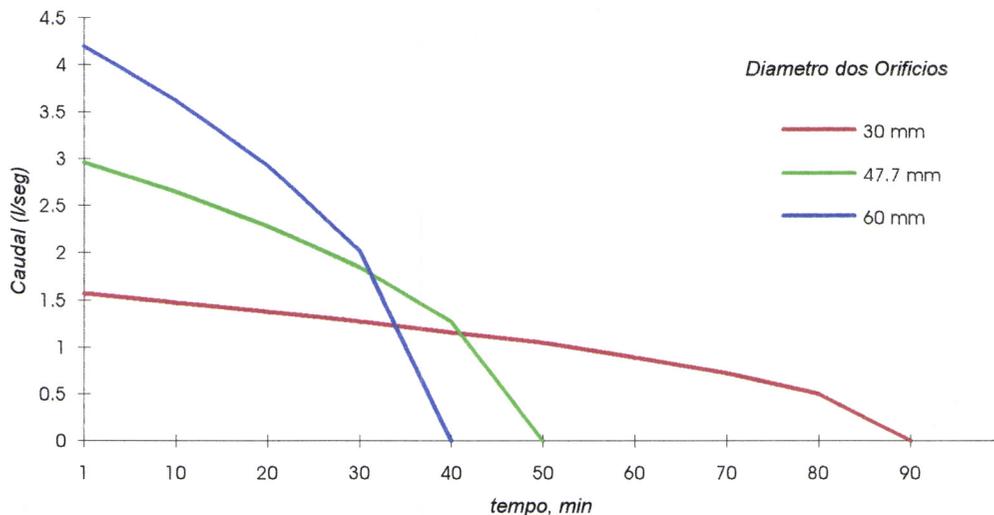


Figura 2.4. Influência do diâmetro equivalente dos orifícios nos caudais aplicados e o tempo da sua aplicação em cada sulco (mantendo-se constante o caudal total e os outros parâmetros: Caudal total = 10 l/seg., declive = 0,002m/m, velocidade êmbolo = 9m/hora, dis.entre orifícios = 1,5 m. Simulação realizada com Cablemet.)

O programa Cable é constituído basicamente pelas seguintes rotinas:

- 1- Dimensionamento do sistema;
- 2- Cálculo da pressão máxima e do número de orifícios a debitar simultaneamente;
- 3- Dimensionamento do Controlador (roda hidráulica);
- 4- Dimensionamento dum sistema de derivação em paralelo (para acertar os volumes aplicados no primeiro e último conjunto de sulcos);
- 5- Modelação do avanço e da infiltração.

De seguida apresenta-se resumidamente os procedimentos de calculo mais relevantes do Cable, ou seja os utilizados no dimensionamento do sistema e na modelação do avanço e da infiltração.

2.2.1. Dimensionamento do sistema

A capacidade de transporte do tubo é determinada através da equação de Hazen-Williams:

$$Q_t = C \cdot \left(\frac{D_i^{4.865} \cdot S}{6077145} \right)^{.54054} \quad (2.1)$$

sendo,

- Q_t - capacidade do tubo, l/min;
- D_i - diâmetro interno do tubo, mm;
- C - coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams;
- S - declive do tubo, m/m.

Em seguida o programa apresenta a fracção do tubo realmente utilizado P , para se poder otimizar o diâmetro do mesmo:

$$P = \frac{Q}{Q_t} \quad (2.2)$$

sendo,

- Q - caudal admitido no Cabo-rega, l/min.

A pressão máxima no tubo H , é determinada por:

$$H = 13.8 \cdot D_i \cdot \left(\frac{C}{150} \right)^{.76} \cdot S^{1.03} \cdot \left(\frac{Q}{Q_t} \right)^{.46} \cdot \left(\frac{F_{mm} \cdot D_i}{D^2} \right)^{.56} \quad (2.3)$$

sendo,

H - pressão máxima no tubo, mm;

Fmm - distância entre os orifícios, mm;

D - diâmetro equivalente das janelas, mm.

O caudal debitado por cada orifício Q_o , é dado por:

$$Q_o = 0.00429 \cdot D^2 \cdot \sqrt{h} \quad (2.4)$$

sendo,

Q_o - caudal debitado pelo orifício, l/min;

h - carga piezométrica no orifício, mm.

Kemper et al. (1992) observaram que num sistema com desvios de ± 3 cm em relação à cota pretendido, os caudais debitados pelos orifícios estavam a $\pm 13\%$ dos previstos. Por outro lado verificaram que 80% dos desvios dos caudais debitados em relação aos calculados se deviam à irregularidades na cota do tubo.

A velocidade do êmbolo C_s , é determinada dividindo o caudal pelo produto da dotação e do comprimento dos sulcos

$$C_s = \frac{Q_i \cdot 60}{G \cdot Fl} \quad (2.5)$$

sendo,

C_s - velocidade do êmbolo, m/hora;

Q_i - caudal total no Cabo-rega, l/min;

G - dotação real, mm;

Fl - comprimento dos sulcos, m.

2.2.2. Modelação do Avanço e da Infiltração

Cable utiliza o modelo de balanço volumétrico para a determinação do avanço e da infiltração no sulco. O procedimento é semelhante ao apresentado por Kincaid e Kemper 1982, no entanto já considera armazenamento superficial e perímetro molhado variáveis. A seguir descreve-se sussintamente o procedimento utilizado no Cablemet para calcular o avanço ao longo do sulco, utilizando o intervalo de tempo entre dois sulcos como unidade de tempo.

É iniciado um ciclo de tempo, com incrementos iguais ao tempo que o êmbolo leva para percorrer a distância entre dois orifícios. Durante cada um destes incrementos o caudal debitado no sulco será constante, pelo que o volume admitido no sulco v_i , durante o incremento do tempo j será:

$$\forall i = Q_i \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

sendo,

Q_i - caudal médio, l/min;

ΔT - incremento de tempo, min.

Por sua vez existe um ciclo de distâncias, em que o sulco é dividido em 10 células de comprimentos iguais. O programa percorre as células desde o montante do sulco, e para cada um determina o volume infiltrado e o volume armazenado superficialmente. Realizando um balanço volumétrico, o programa sabe qual é o volume disponível para a célula seguinte. Assim as células são percorridas até o volume admitido nesse incremento de tempo se esgotar.

Uma vez esgotado o volume inicial, há um incremento de tempo, e um novo volume admitido no sulco. O programa continua a percorrer as células constituintes do sulco e o ciclo repete-se até se completar a fase de avanço, ou o regolfo já não alcançar o orifício que alimenta o sulco.

O volume total infiltrado numa célula do sulco, num determinado intervalo de tempo, é o produto da duração do intervalo de tempo T , em minutos, pela taxa média de infiltração no incremento. Esse valor é por sua vez multiplicado pelo perímetro molhado e o comprimento do incremento, produto que define a área infiltrante.

$$V_{inf} = P_m \cdot T \cdot L \cdot (k' \cdot t^{a'}) \quad (2.7)$$

sendo,

V_{inf} -volume infiltrado, m³;

P_m - perímetro molhado, determinado pelo método de SCS, no entanto para uma geometria de secção transversal diferente (ver eq. 5.19), m;

T - intervalo de tempo desde o início da rega na célula, min;

L - comprimento da célula, m;

k' e a' - parâmetros da derivada da equação de infiltração (infiltrabilidade média no instante t);

t - duração média da oportunidade de infiltração, T/2.

O volume armazenado superficialmente é o produto do comprimento do incremento pela área molhada. Esta, por sua vez, é determinada a partir do perímetro molhado, utilizando a equação de Manning para o escoamento uniforme:

$$A^5 = \left(\frac{Q \cdot n}{\sqrt{s}} \right)^3 \cdot P_m^2 \quad (2.8)$$

2.2.3 Experiência de utilização do Cable

O programa tem-se provado fiável para o dimensionamento de sistemas de Cabo-rega. Os valores obtidos para os diâmetros de tubo, caudais dos orifícios, etc. permitem dimensionar com precisão um novo sistema.

Santos (1992) verificou que os dados relativos à gestão da rega obtidos através do programa Cablemet eram de "difícil aplicação" pelo que optou por efectuar as primeiras regas "por tentativas". De facto, a metodologia de cálculo indicado por Kincaid (1981), não otimiza por si o sistema de Cabo-rega e deixa ao utilizador a tarefa de variar os parâmetros de rega de modo a maximizar a sua eficiência. Por exemplo a determinação da velocidade do êmbolo, ou seja o parâmetro mais importante de todo o sistema, é feita em função da área regada por cada sulco e do caudal total (Eq. 2.5), não contabilizando a equação de infiltração, ou o declive dos sulcos. A optimização terá que ser feita, portanto, por tentativas, tendo em atenção as eficiências de infiltração obtidas.

Por outro lado, e talvez para tornar expedita a utilização do programa, os autores utilizam uma geometria de sulco pré-estabelecida. Embora este facto simplifique bastante a preparação dos dados para a utilização do programa, perde-se rigor quando este é utilizado em situações específicas.

É interessante referir aqui que se a equação de infiltração for calculada sem se ter em atenção o Perímetro molhado (P_m), ou seja, por exemplo pelo método de Elliot e Walker, onde Z é a infiltração no sulco todo, não se deve multiplicar os valores de infiltração obtidos a partir da equação pelo P_m . Em vez disso, e se de facto se pretender contabilizar o P_m deverá utilizar-se o coeficiente P_m/P_{max} , ou seja a relação entre o P_m no troço, com o P_m máximo, para a qual a equação foi determinada.

2.3. ENSAIOS COM CABO-REGA

Em Portugal a introdução de Cabo-rega é relativamente recente, embora exista já uma empresa privada a comercializar os diversos componentes necessários. A investigação sobre o Cabo-rega está a bom ritmo, com equipas a trabalhar no Dept. de Regadio do INIA em Coruche (DER, ISA) e em solos Argiluvitados do perímetro de Rega do Divor (DER, UEV).

2.3.1. Utilizando o controlador hidráulico

Cameira (1991) instalou e experimentou em Coruche um sistema de Cabo-rega com derivação (by-pass) e obteve resultados satisfatórios. Esta autora obteve tempos de avanço com "variações substanciais", o que atribuiu ao facto do "declive dos sulcos não ser constante".

Santos (1992) montou e testou um sistema Cabo-rega em sulcos de "terra plana", num solo argiluiado no Alentejo. Esta autora conclui que é difícil "de se conhecer antecipadamente... as qualidades de rega.." Por outro lado e em termos do manejo salienta "a dificuldade e o grande dispêndio de tempo no ajuste da abertura da válvula à velocidade do êmbolo desejada." A dificuldade encontrada por Santos no manejo da rega deve-se em grande parte à baixa infiltrabilidade dos solos, o que torna a fase de avanço e da permanência relativamente rápidas, e sensíveis às variações na velocidade do êmbolo.

Por outro lado não lhe foi possível aplicar as dotações úteis pretendidas inicialmente "devido à reduzida infiltrabilidade (do solo)."

2.3.2. Utilizando controladores electrónicos

Em 1981, no primeiro duma série de artigos que viriam a divulgar tanto o Cabo-rega, como a metodologia utilizada para o seu dimensionamento, Kemper et al. referem a utilização dum reostato ajustado manualmente acoplado a um motor eléctrico de 12V para o controlo da velocidade do êmbolo. Estes autores obtiveram resultados satisfatórios num campo rectangular com declives constantes.

Em Portugal, Sousa et al. (1992) desenvolveram um sistema semelhante, utilizando um programador electrónico, onde é introduzida a velocidade do êmbolo e o comprimento a percorrer, para além de algumas outras indicações. Trabalhando num campo rectangular e em sulcos bloqueados obtiveram eficiências de aplicação da ordem dos 80%, tendo optimizado o caudal total e a velocidade do êmbolo duma rega para outra. Estes autores concluem "..que o Cabo-rega permite uma fácil e eficaz optimização da gestão do sistema, apresentando elevadas eficiências de aplicação e uniformidades de distribuição.."

O desafio de instalar este sistema em blocos de contorno prende-se com a variação dos comprimentos dos sulcos, pois torna-se necessário que o controlador ajuste constantemente a velocidade do êmbolo ao comprimento dos sulcos.

2.3.3. Utilizando retorno da informação do campo em tempo real

Humpherys e Trout (1990), apresentaram um sistema de Cabo-rega com controlo por retorno de informação do campo. Estes autores instalaram sensores de caudais no fim duma vala colectora do excedente final dos sulcos. O controlo do Cabo-rega era feito através dum computador que recebia a informação dos sensores. O computador ajustava a velocidade do êmbolo de modo a tentar manter o excedente dentro de limites pré-estabelecidos. No ensaio realizado num campo irregular com sulcos de comprimentos variáveis, eles obtiveram

resultados satisfatórios. Durante o ensaio houve um aumento de caudal para o dobro e o sistema foi capaz de reduzir os excedentes para um nível aceitável em 400 minutos.

Este sistema de retorno relativamente simples adapta-se bem a regas prolongadas em terrenos com boa infiltrabilidade, onde um tempo de resposta de várias horas não prejudica as qualidades da rega. Por outro lado é necessário que o armazenamento superficial seja reduzido e todo o excedente seja colectado num único canal sem grandes demoras.

Um sistema de rega em sulcos por retorno dos tempos de avanço (*ARFIS - Advance Rate Feed-back Irrigation System*) foi desenvolvido por Reddell e Latimer (1987) e Latimer e Reddell (1989). ARFIS comunica automaticamente o avanço e a recessão da água em dois pontos ao longo do sulco regado por rega intermitente.

Latimer e Reddell (1990) aperfeiçoaram um modelo de balanço volumétrico que utiliza dados de dois avanços (dois *surge*) para determinar os dois parâmetros da equação de Kostiaikov e o armazenamento superficial, a partir das quais determinam a diminuição dos caudais a realizar. Eles obtiveram resultados satisfatórios e concluem que o controlo conseguido sobre a rega através do retorno da informação não teria sido possível de outra forma.

2.4. CABO-REGA: PASSADO E PRESENTE

Depois da grande expansão verificada nos EUA, houve um abrandamento na instalação de novos sistemas de Cabo-rega. Isto, segundo Trout et al., (1990) deve-se principalmente aos seguintes factores:

- Os inventores e promotores principais do Cabo-rega, ou seja os investigadores do SCS, em Kimberly receberam novas responsabilidades e orientações em 1987, pelo que praticamente tiveram de abandonar todas as actividades relacionadas com a rega de superfície.
- Falhas dos componentes, nomeadamente do controlador e do êmbolo, diminuindo a confiança dos agricultores no sistema e aumentando a necessidade de supervisão.
- O terreno ideal para este tipo de sistemas é rectangular e obedece a certos declives. Tem-se provado difícil adaptá-los a outros tipos de terreno.
- Diminuição da qualidade de rega quando se aumenta as dotações para além das capacidades pré-estabelecidas do sistema.
- Conhecimento técnico exigido para a sua instalação e optimização.

No entanto os mesmos autores prevêem um bom futuro para o Cabo-rega com a introdução de sistemas computadorizados de controlo e especialmente se houver aumentos de preços de combustíveis e da mão de obra.

Capítulo 3

Avanços na modelação da rega de superfície e da infiltração em sulcos

3. AVANÇOS NA MODELAÇÃO DA REGA DE SUPERFÍCIE E DA INFILTRAÇÃO EM SULCOS

A rega por sulcos é um método pouco dispendioso de rega, em que a superfície do solo é utilizada para transportar e receber a água aplicada. Para facilitar a elaboração de projectos de rega por sulcos, tem-se desenvolvido, nas últimas décadas, modelos matemáticos, que vão desde a simples conservação de massa até modelos mais complexos como o modelo hidrodinâmico completo.

3.1. MODELAÇÃO MATEMÁTICA DO ESCOAMENTO

O escoamento da água na superfície do solo durante a rega de superfície é governado pelas leis do movimento de fluídos em canais abertos, que são baseados nos princípios gerais da conservação de massa e de movimento. A sua expressão matemática constitui o que é geralmente conhecido como as *equações de Saint-Venant* (Equação de continuidade e equação da quantidade de movimento):

Equação da continuidade, ou Equação da conservação de massa:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

Equação da quantidade de movimento ou equação da conservação do movimento:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f + \frac{iV}{gA} \quad (3.2)$$

sendo,

dx - elemento do comprimento;

dt - intervalo do tempo;

z - volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco;

Q - caudal;

A - área da secção transversal;

y - profundidade do escoamento;

V - velocidade média;

g - aceleração da gravidade;

S_0 - declive do fundo do sulco;
 S_f - declive da superfície livre da água;
 i - taxa de infiltração.

A resolução simultânea destas duas equações é complicada pelo facto de não se conhecer *a priori* a velocidade de avanço e de recessão, pelo que as fronteiras da região do fluxo devem ser encontradas como parte da solução (Sakkas e Strelkoff, 1974). Pelo que, embora essas equações tenham sido descritas pela primeira vez em 1871, foi só na década de 70, que autores como Strelkoff iniciaram técnicas de cálculo para a sua resolução.

Todos os modelos matemáticos da rega de superfície utilizam a equação do balanço volumétrico em conjunto com alguma forma de estimar o armazenamento superficial.

Os modelos mais rigorosos têm utilizado o princípio de conservação da quantidade de movimento para determinar o armazenamento superficial. A maior parte das vezes têm-se introduzido simplificações na equação da quantidade de movimento. Consoante a natureza desta simplificação, os modelos designam-se por: hidrodinâmico completo, de inércia nula, de onda cinemática e de balanço volumétrico..

Holzapfel et al. (1984) compararam os quatro modelos apresentados com os dados de campo e concluíram que os três primeiros modelos apresentam resultados excelentes. Por outro lado eles comentam que a precisão das previsões dos modelos dependia mais da precisão dos dados.

3.1.1. Modelo Hidrodinâmico Completo

Neste modelo as equações de Saint-Venant são resolvidas sem considerar qualquer aproximação simplificativa.

A resolução dessas equações tem-se baseado no chamado *método das características*, que aliás é usado também noutros modelos. As *características* são curvas no plano espaço-tempo, ao longo das quais as equações diferenciais parciais tornam-se equações diferenciais ordinárias. O procedimento de cálculo consiste em adimensionalizar as equações, dividindo-as por "parâmetros característicos", reduzindo assim o número de dados de entrada para o modelo.

Sakkas e Strelkoff (1974) resolveram numericamente a forma característica das equações de Saint-Venant, sem simplificações, de modo a poder prever a fase de avanço.

Mais tarde, outros autores (Strelkoff e Clemmens, 1994; Sakkas et al. 1994; Strelkoff, 1985) desenvolveram métodos para a simulação completa da rega.

Outros autores (Souza, 1981; Haie, 1984) tem utilizado "células" de fluido que se formam a montante e se deslocam para jusante do sulco, ao mesmo tempo que se deformam. Este método é conhecido como o *método do volume deformável de controlo*.

3.1.2. Modelo de Inércia Nula

No modelo de inércia nula a equação da quantidade de movimento é simplificada, desprezando-se os termos da aceleração, pois considera-se que as velocidades que ocorrem na rega de superfície são pequenas, tornando as alterações à velocidade completamente desprezáveis.

Assim, a equação 3.2 resume-se a:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (3.3)$$

mantendo-se a equação da continuidade.

Elliot et al. (1982) utilizaram o modelo de inércia nula para prever o avanço da frente de humedecimento, descrevendo o formato do sulco com equações tipo potência que relacionavam a área com a profundidade e o perímetro molhado.

Os mesmos autores utilizaram o método do volume deformável de controlo para modelar matematicamente o avanço em sulcos. Um ano mais tarde, os mesmos autores desenvolveram soluções adimensionais para o avanço em sulcos, utilizando o modelo de inércia nula. Eles elaboraram famílias de curvas de avanço adimensionais que podem ser utilizadas para determinar os parâmetros de infiltração a partir dos dados de avanço.

3.1.3. Modelo de Onda Cinemática

Se na equação da quantidade de movimento já simplificada em 3.1.2., se desprezar a variação da profundidade da água $\partial y/\partial x$, a equação resumir-se-á a:

$$S_0 = S_f \quad (3.4)$$

O que representa um movimento uniforme: em cada momento há uma compensação do declive geométrico pelas perdas de energia devido ao atrito. Verifica-se uma relação única entre o caudal e as dimensões da secção transversal do escoamento. Esta relação é traduzida por uma equação do regime permanente, sendo geralmente usada a de Manning, que assim substitui a equação de quantidade de movimento.

3.1.4. Modelo do Balanço Volumétrico

Este modelo ignora totalmente a equação da quantidade de movimento. Em sua substituição, admite a hipótese empírica de que a área média da secção transversal \bar{A} é constante em qualquer momento, e igual a:

$$\bar{A} = \sigma_y A_0 \quad (3.5)$$

sendo,

A_0 - Secção transversal do fluxo à entrada do sulco, m²;

σ_y - factor de forma superficial.

Walker e Humphreys (1983) utilizaram o modelo do balanço volumétrico para prever o avanço em sulcos.

3.2. ESTUDO DA INFILTRAÇÃO EM SULCOS

3.2.1. Factores que afectam a infiltração

3.2.1.1. O Perímetro molhado e a velocidade do escoamento

A teoria de infiltração mostra que a infiltração nos sulcos aumenta com o perímetro molhado. Desde que Fangmeier e Ramsey, no seu já clássico ensaio em 1978, mediram diminuições quase proporcionais da infiltração com o perímetro molhado utilizando a diminuição do caudal em sulcos com declives e secções transversais precisos, muitos autores têm verificado a relação entre a infiltração e o perímetro molhado. No entanto existem ainda resultados controversos.

Izadi e Wallender (1985) observaram uma correlação significativa entre o perímetro molhado e a taxa de infiltração. No entanto, verificaram que essa correlação diminui a medida que a taxa de infiltração estabilizava, pois o fluxo torna-se menos radial e portanto menos dependente do perímetro molhado e mais dependente do solo.

Strelkof e Souza (1984) estudaram, entre outros, um modelo que considerava o tempo de infiltração em cada troço do perímetro molhado, Pm. Eles concluíram que este modelo não era mais preciso do que aquele que considerava o Pm como um todo. Serralheiro (1988) trabalhando dados obtidos em infiltrómetros de sulco bloqueados e com retorno, encontrou uma relação de proporcionalidade entre as quantidades infiltradas e o perímetro molhado.

Por outro lado, Trout (1992), estudou o efeito da velocidade do fluxo e do perímetro molhado sobre a infiltração em sulcos. Utilizando sulcos infiltrómetros, ele não conseguiu obter a relação prevista do aumento da infiltração com o perímetro molhado.

Verificou, no entanto, uma relação inversa entre a infiltração e a velocidade, e concluiu que esta diminuição da infiltração deve-se ao efeito do escoamento sobre a destruição das partículas, e a formação de crosta (seal) devido à deposição de sedimentos.

De qualquer forma, a quase totalidade dos programas e métodos de simulação do escoamento já incluem a relação infiltração-perímetro molhado. O método do Soil Conservation Service assume que a infiltração aumenta linearmente com o perímetro molhado (USDA-SCS, 1983). O programa SIRMOD (Surface Irrigation Simulation Model), desenvolvido em Utah, assume uma relação de potência entre a infiltração e o Pm. O programa SRFR, desenvolvido por Strelkoff et al. permite a selecção duma taxa de infiltração proporcional ao perímetro molhado e considera a diferença do tempo de infiltração ao longo do perímetro.

3.2.1.2. Geometria da secção transversal

Trout (1991) estudou a variação da secção transversal ao longo da rega. Ele comparou o modelo de forma da secção transversal actualmente utilizado (Sakkas e Strelkoff, 1974; Elliot e Walker, 1982; Walker e Skogerboe, 1987), que designou por *Modelo do Perímetro Rígido*, com o que designou por *Modelo de Forma Constante*.

No primeiro modelo supõe-se que o perímetro do sulco é rígido e que a medida que aumenta a capacidade do sulco, apenas a profundidade muda e a cama original mantém-se. No segundo modelo supõe-se que como a profundidade varia proporcionalmente à largura, então o sulco vai alargando de modo a manter as proporções hidráulicas mais favoráveis, seja qual for o caudal.

Este autor conclui que embora o Modelo de Forma Constante seja mais fácil de utilizar, ambos representam bem as relações entre os parâmetros da geometria do sulco. Por outro lado verificou que o mais importante era a razão largura do topo/ profundidade e não o tipo de modelo utilizado.

3.2.1.3. Rugosidade do sulco

A rugosidade da superfície do sulco, normalmente expressa através do coeficiente de rugosidade de Manning, têm influência directa sobre as características do escoamento e consequentemente da infiltração. Diversos autores (Fangmeier e Ramsey, 1978; Serralheiro, 1988) utilizaram os dados da rega e alguma forma da equação do escoamento uniforme de Manning para o determinar.

Bassett et al. (1980) afirmam que ao contrário do conceito subjacente à equação de Manning, em que o valor do n deveria estar apenas em função da rugosidade absoluta, nos

sulcos pouco fundos e por vezes cobertos com vegetação utilizados na rega de superfície, o seu valor depende muito da profundidade da água no sulco.

Izadi e Wallender (1985) verificaram que ao longo da rega a rugosidade diminui e a geometria torna-se mais eficiente. Serralheiro (1988) trabalhando em solos argiluvitados obteve valores de 0,073 e 0,055 para a primeira e segunda rega, respectivamente. O coeficiente de rugosidade aumentou nas regas seguintes devido ao crescimento das infestantes.

3.2.2. Equações de Infiltração

Para se poder aumentar as eficiências de aplicação é necessário poder prever-se as qualidades de rega. A determinação da equação de infiltração permite em princípio fazer essa previsão.

As equações que têm sido utilizadas com êxito para caracterizar a infiltração em sulcos são as de Philip, Kostiakov-Lewis e Kostiakov, apresentadas a seguir:

$$\text{Philip} \quad Z = st^{0.5} + ct \quad (3.6)$$

$$\text{Kostiakov-Lewis ou K. Modificado} \quad Z = kt^a + f_0t \quad (3.7)$$

$$\text{Kostiakov} \quad Z = kt^a \quad (3.8)$$

em que Z é a profundidade da infiltração acumulada, ou volume por unidade de comprimento, t é o tempo de infiltração, k e a são constantes empíricas, f_0 é a taxa de infiltração estabilizada, s é uma constante característica do solo denominada "sorptivity" por Philip e c é a condutividade do solo saturado.

A equação de Kostiakov é relativamente mais fácil de obter (Fangmeier e Ramsey 1978; Serralheiro, 1988), e fornece uma descrição adequada da infiltração, desde que os tempos não sejam muito longos (Strelkoff e Sousa, 1985; Philip, 1957), a profundidade não varie muito ao longo do sulco e da rega, e as constantes k e a sejam determinadas para caudais semelhantes áqueles para os quais se irá prever a infiltração (Strelkoff e Souza, 1985; Samani et al. 1985).

Serralheiro (1995) após analisar vinte regas completas em solos argiluvitados, conclui que a equação do tipo Kostiakov, determinada pelo método de balanço volumétrico, é aquela que melhor descreve a infiltração nesses solos.

3.2.3. Métodos para determinação das equações de infiltração

A taxa de infiltração pode ser determinada por métodos experimentais e analíticos. Experimentalmente a infiltração tem sido medida por diversos métodos, entre os quais o duplo anel, infiltrómetro de sulco bloqueado e infiltrómetro de sulco com retorno.

Bautista e Wallender (1985) compararam os dados obtidos por cada um dos métodos citados e concluíram que os infiltrómetros de sulco com retorno são preferíveis pois simulam melhor as condições do campo. Serralheiro (1988) chegou à mesma conclusão.

Por outro lado e após realizar um grande número de determinações de taxas de infiltração utilizando infiltrómetros de duplo-anel e de sulco, Elliot e Walker (1982) verificaram que nenhum deles fornecia uma simulação satisfatória da infiltração em sulcos. Eles concluíram que, para se poder fazer "uma simulação satisfatória do avanço ... e dos caudais de excedentes, ...a metodologia mais efectiva de avaliação é medir as taxas de avanço, a secção hidráulica e os volumes de excedentes."

Com base nestes dados é possível determinar a infiltração utilizando o método do Balanço Volumétrico.

3.2.3.1. O Método do Balanço Volumétrico

De acordo com o método do balanço volumétrico, o volume total aplicado é igual ao somatório do volume armazenado superficialmente com o volume infiltrado. Pressupondo uma equação tipo potência para o avanço

$$x = p \cdot t^r \quad (3.9)$$

obtém-se:

$$Q_0 \cdot t = \sigma_y \cdot A_0 \cdot x + \sigma_z \cdot kt^a \cdot x + \frac{f_0 \cdot t \cdot x}{1+r} \quad (3.10)$$

sendo,

Q_0 - Caudal de entrada, m³/min;

σ_z -factor de forma subsuperficial, (obtido a partir do factor de correcção do Kiefer¹);

1. O factor de correcção de Kiefer F , é dado por Christiansen (1965) a partir da integração da equação de Kostiakov ao longo do sulco (cada ponto com o seu tempo de avanço e portanto seu tempo de infiltração), e é determinado pela seguinte equação:

$$F = \frac{a+r(1-a)+1}{r+1} \quad \text{e} \quad \sigma_z = \frac{F}{r+1}$$

- t - tempo desde o início da rega, min;
- σy - factor de forma de armazenamento superficial, que é definido como uma constante (0,7 a 0,8);
- f_0 - taxa de infiltração estabilizada em unidades de volume por unidade de comprimento por unidade de tempo;
- $p e r$ - coeficientes da equação do avanço determinados pelo método dos dois pontos;
- x - distância percorrida, m.

Christiansen et al. (1966) apresentaram um método de balanço volumétrico para determinar as constantes da equação 3.8.

Wilke (1973) utilizou um método baseado em dados relativos a dois pontos para determinar a equação do avanço. Elliot e Walker (1982), e Walker e Skogerboe (1987) estenderam este método para determinar os parâmetros da equação de Kostiakov-Lewis, o que ficou conhecido como *o método dos dois pontos*.

Embora esta metodologia utilize uma equação do tipo Kostiakov modificado ou Kostiakov-Lewis, segundo Serralheiro (1988) a equação de Kostiakov pode tratar-se como a de Kostiakov-Lewis com $f_0 = 0$. Portanto, desprezando o último membro da equação 3.10 obtém-se:

$$\sigma z . kt^a . x = Q_0 . t - \sigma y . A_0 . x \quad (3.11)$$

ou seja:

$$kt^a = \frac{1}{\sigma z} \left(\frac{Q_0 . t}{x} - \sigma y . A_0 \right) \quad (3.12)$$

O método dos dois pontos apresenta as vantagens de requerer um número reduzido de dados e ser relativamente expedito, pelo que este método será utilizado no capítulo 5 para a determinação das equações de infiltração. Por isso será descrito aqui com algum pormenor.

3.2.3.2. Determinação da Equação de Kostiakov pelo Método de Elliot e Walker

O método de balanço volumétrico, proposto por Elliot e Walker (1982) requer as equações de geometria do sulco (largura em função da altura desde o fundo do sulco, perímetro molhado em função da altura), e sobretudo, a área do escoamento que multiplicada pelo comprimento e um factor de forma, fornece o armazenamento superficial. Este método determina a equação do avanço e a equação da infiltração utilizando o método de dois pontos. Por outro lado, o volume infiltrado pode ser estimado a partir do factor de forma.

A seguir apresenta-se uma breve descrição dos passos necessários para a obtenção da equação de infiltração, utilizando este método:

a) *Determinação da equação da largura do sulco em função da altura desde o fundo do mesmo, pelo método dos dois pontos.*

$$T = a_1 \cdot y^{a_2} \quad (3.13)$$

com:

$$a_2 = \frac{\ln\left(\frac{T_f}{T_m}\right)}{\ln\left(\frac{y_f}{y_m}\right)} \quad \text{e} \quad a_1 = \frac{T_f}{(y_f)^{a_2}} \quad (3.14 \text{ e } 3.15)$$

sendo,

T - largura do sulco;

y - altura desde o fundo do sulco;

a_1 e a_2 - constantes;

T_f, T_m - largura máxima e do meio, respectivamente;

y_f, y_m - profundidade máxima e do meio, respectivamente.

b) *Determinação da equação da área da secção transversal em função da altura desde o fundo do sulco, utilizando os coeficientes da equação anterior.*

$$A = \sigma_1 \cdot y^{\sigma_2} \quad (3.16)$$

com:

$$\sigma_1 = \frac{a_1}{a_2 + 1} \quad \text{e} \quad \sigma_2 = a_2 + 1 \quad (3.17 \text{ e } 3.18)$$

sendo,

A - área molhada;

σ_1 e σ_2 - constantes;

c) *Determinação da equação do perímetro molhado, utilizando o método dos dois pontos, com o perímetro molhado calculado a partir dos pares de dados referentes ao perfil transversal do sulco.*

$$Pm = \gamma_1 \cdot y^{\gamma_2} \quad (3.19)$$

com:
$$Pm|_y = \sum_{i=1}^y \left\{ 2 \left[(y_i - y_{i-1})^2 + [0.5(T_i - T_{i-1})]^2 \right]^{0.5} \right\} \quad (3.20)$$

sendo,

Pm - perímetro molhado;

γ_1 e γ_2 - constantes.

É de referir que recorrendo a técnica de digitalização, consegue-se chegar directamente aos valores dos constantes σ_1 e σ_2 , bem como γ_1 e γ_2 (Serralheiro, 1988).

d) Determinação da área do perfil transversal, para o caudal máximo A_0 , utilizando uma derivação da equação de Manning Strickler.

$$A_0 = C_1 \left(\frac{Q_0 \cdot n}{60 \cdot \sqrt{S_0}} \right)^{C_2} \quad (3.21)$$

com:
$$C_2 = \frac{3\sigma_2}{5\sigma_2 - 2\gamma_2} \quad \text{e} \quad C_1 = \sigma_1 \left(\frac{\gamma_1^{0.67}}{\sigma_1^{1.67}} \right) \quad (3.22 \text{ e } 3.23)$$

sendo,

Q_0 - caudal aplicado;

S_0 - declive do terreno;

C_1 e C_2 - constantes;

n - coeficiente de rugosidade.

e) Determinação da equação do avanço em função do tempo desde o início da rega, pelo método dos dois pontos.

$$x = p \cdot t^r \quad (3.24)$$

sendo,

x - distância percorrida;

t_a - tempo desde o início da rega;

p e r - coeficientes determinados pelo método dos dois pontos.

f) A equação da infiltração propriamente dita, em função do tempo desde o início da rega, pelo método dos dois pontos.

$$Z' = k' \cdot t^a \quad (3.25)$$

com:

$$a = \frac{\ln\left(\frac{V_l}{V_m}\right)}{\ln\left(\frac{t_l}{t_m}\right)} \quad \text{e} \quad k' = \frac{V_l}{t_l^a} \quad (3.26 \text{ e } 3.27)$$

sendo,

V_m , V_l - volume infiltrado durante o avanço até ao meio e até ao fim do sulco;

t_m , t_l - tempo de avanço até ao meio e até ao fim do sulco.

Aqui é preciso determinar o volume infiltrado até dois momentos do avanço, geralmente quando a frente de avanço atinge o meio e o fim do sulco. Para este efeito, é necessário subtrair ao volume aplicado o volume de água armazenado superficialmente.

Para a determinação do armazenamento superficial, Elliot e Walker, utilizam o valor do factor de forma de armazenamento superficial σ_y , recomendado por Fok e Bishop (1965), e dão-lhe valores de 0,7-0,8. Ao multiplicar este factor pela área da secção transversal máxima, A_0 , obtém-se o volume da água armazenada superficialmente no sulco.

O volume médio infiltrado durante o avanço até ao meio e até ao fim do sulco, V_l e V_m , são obtidos através da realização de balanço volumétrico.

$$V_l = \frac{Q_0 \cdot t_l}{l} - \sigma_y \cdot A_0 \quad (3.26)$$

$$V_m = \frac{Q_0 \cdot t_m}{0.5l} - \sigma_y \cdot A_0 \quad (3.27)$$

Por fim, a infiltração é dividida pelo factor de forma subsuperficial, σ_z :

$$k = \frac{k'}{\sigma_z} \quad (3.28)$$

com:

$$\sigma_z = \frac{a + r(1-a) + 1}{(1+a) \cdot (1+r)} \quad (3.29)$$

Verifica-se assim, que o número total de dados de campo necessários é relativamente reduzido.

Capítulo 4

Material

4. Material

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE ENSAIO

4.1.1. Localização

Este ensaio foi realizado numa parcela da Herdade do Cabido e anexas, situada no distrito de Évora, conselho de Arraiolos, freguesias de S. Gregório, Igreja e Sta. Justa, onde Pereira (1992) já tinha realizado um ensaio de rega em sulcos de contorno.

Em parcelas adjacentes e no mesmo tipo de solo, outros autores realizaram ensaios com Cabo-rega (Santos, 1992) e rega em sulcos de contorno com redução manual do caudal (Braz, 1990).

4.1.2. Caracterização do solo

O ensaio realizou-se num solo pertencente á ordem dos Argiluvitados pouco insaturados, os quais assumem particular importância, visto que ocupam uma grande área à sul do Tejo, e é neles que se pratica grande parte dos regadios Alentejanos.

Nestes solos a argiluviação é o principal processo pedogenético e as suas principais características são a presença de um horizonte B tipo "textural" e um grau de saturação elevado, de que é responsável o clima pouco húmido em que se situam (Cardoso, 1965). Uma nítida diferença de permeabilidade entre os horizontes A e B resulta do processo pedogenético de argiluviação. A infiltração é rápida no horizonte A, até a frente de humedecimento atingir o horizonte B. A partir desse momento, a infiltração quase só se dará horizontalmente.

Em anexo 1 apresenta-se a análise físico-química do solo do campo, realizado por Pereira (1992) e Odeland (1996).

4.2. IMPLANTAÇÃO DO ENSAIO

Sobre um levantamento topográfico detalhado (1/1000), o terreno foi organizado em três blocos de contorno com declive longitudinal de 0,2% e transversal de 2,22%.

Os blocos foram marcados com estacas e abriram-se com um derregador sulcos distanciados de 1,5 metros. No fim dos mesmos foi aberto uma vala de recolha de excedentes. Assim, os comprimentos dos sulcos variavam entre os 280 e 180 metros (ver anexo 2). Na figura 4.1 pode ver-se o formato dos blocos e a localização do sistema Cabo-rega.

O campo foi semeado de girassol; no entanto devido aos sucessivos atrasos verificados no desenvolvimento do equipamento, apenas o ensaio preliminar foi realizado com a cultura instalada e já na fase final do seu ciclo.

4.2.1.O Sistema Cabo-rega

Foi instalado um sistema Cabo-rega, constituído por tubos de janelas de PVC rígido com o diâmetro interno de 194 mm. As janelas são rectangulares, medindo 60 x 30 mm e distanciadas de 1.5 metros. O tubo do Cabo-rega é constituído por troços de 6 metros que uma vez encaixados, apresentam um comprimento útil de 5.85 metros, resultando em distâncias ligeiramente mais curtas entre dois orifícios de extremos de dois troços adjacentes.

A determinação do declive médio do tubo e a sua regularização a um declive de 2.22%, (precisão de $\pm 5\text{mm}$), foi realizada através dum emissor laser. Estas operações foram realizadas com a máxima precisão dada a sua importância, pois delas depende a uniformidade do débito das janelas e portanto a uniformidade da rega nos diferentes sulcos.

As janelas foram colocadas a um ângulo de 30° com a vertical. Para esta operação colou-se um nível a um tubo de ferro quadrângular cuja extremidade superior tinha sido

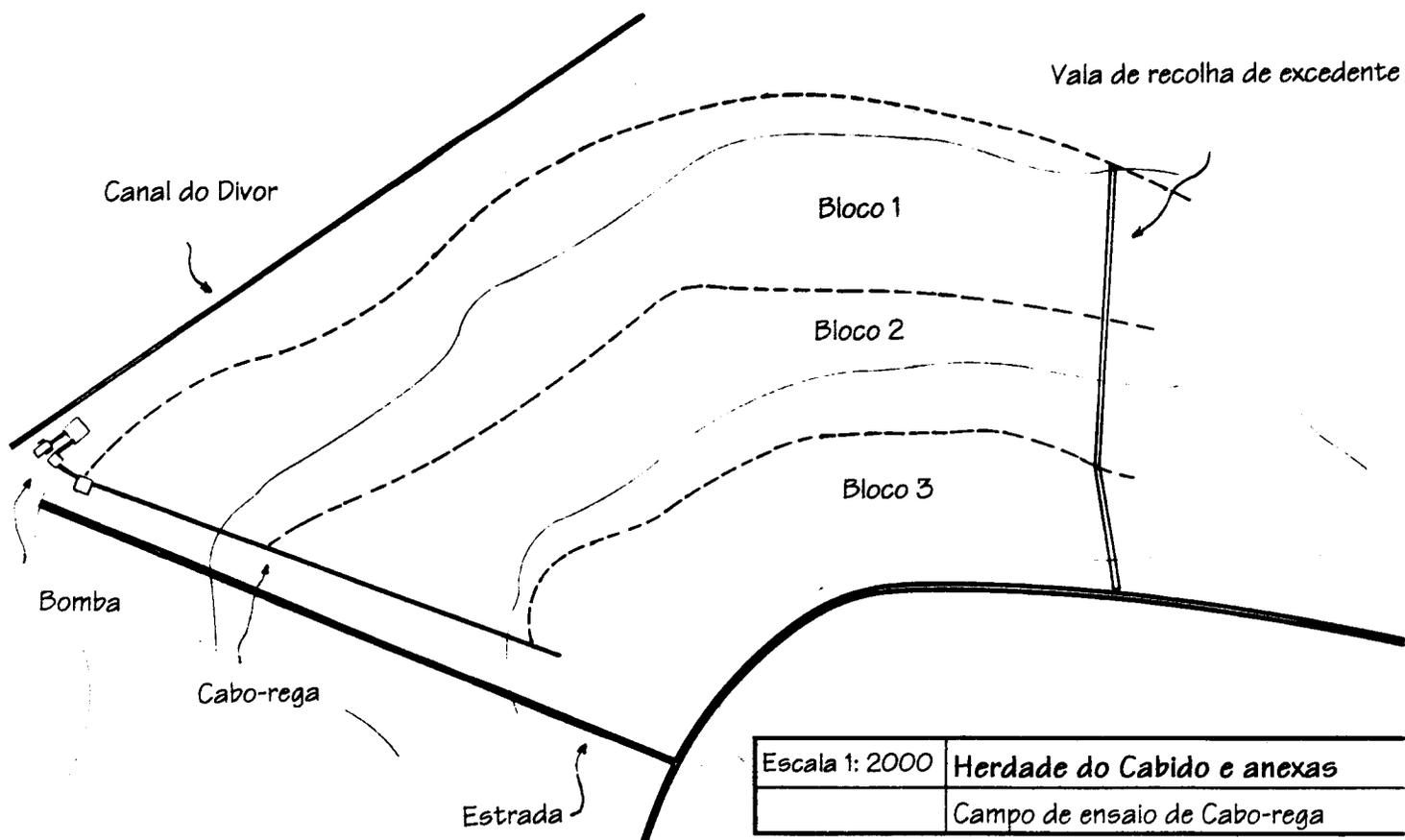


Figura 4.1. Esquema do campo de ensaio organizado em blocos de contorno

cortado a 60° com o horizontal. O ferro era inserido nas janelas e o tubo de Cabo-rega rodado de modo a que o nível ficasse no horizontal (fig. 4.2.). Mais uma vez, este aspecto é de extrema importância para a obtenção dum caudal regular em todos os sulcos.

Os orifícios do Cabo-rega foram munidos de janelas corredeiras, abertas na posição máxima. Para evitar a erosão dos taludes dos sulcos à saída da água das janelas, instalaram-se pequenas mangas, com o comprimento de 75 cm, de modo a servir de dissipador de energia e colocar a água no fundo do sulco.

O controlador hidráulico do Cabo-rega foi substituído por um mecanismo eléctrico descrito no ponto 4.4.1.

4.2.2. Alimentação do Cabo-rega

A água utilizada para a rega provinha do canal do perímetro de rega do Divor, a qual, em anos anteriores era conduzida por gravidade para o campo, com resultados pouco satisfatórios, (Pereira, 1992), o que se deve ao facto do campo se localizar no fim do canal de rega, que apresenta cotas sensivelmente iguais às do campo. Assim tomou-se a opção de utilizar uma moto-bomba para aspirar a água, tendo-se constatado que esta tem a vantagem de assegurar um caudal constante.



Figura 4.2. Aspecto do tubo do Cabo-rega, com as janelas rectangulares abertas na posição máxima. Ao lado pode-se ver o nível utilizado para a colocação das janelas a um ângulo de 30°.

A água era atirada primeiro para uma caixa receptora munida de uma chicana, para promover a perda de turbulência, passando depois por gravidade, para uma segunda caixa munida dum descarregador triangular de soleira delgada, previamente calibrada, onde se podia fazer a leitura do caudal total, sendo conduzida até ao Cabo-rega em tubo.

A filtragem era feita no próprio canal, utilizando uma caixa plástica cujos lados eram constituídos por uma rede de malha grossa. O próprio chupador também servia de filtro, não se tendo verificado a necessidade de incluir outros filtros.

4.3 MATERIAL DE MEDIÇÃO E DE ENSAIO

4.3.1. Sensores de Avanço

O acompanhamento da frente de avanço num campo em que estão a ser regados simultaneamente vários sulcos com comprimentos de mais de 200 m, é trabalhoso. Assim optou-se por desenvolver sensores com mecanismos de registo automático, baseados na paragem do relógio por acção da água, que uma vez instalados no meio do sulco indiquem o momento exacto da chegada de água ao local (fig. 4.3).

Este equipamento é composto por um tubo de PVC, com diâmetro de 5 cm, dentro da qual está instalado uma bola de ping-pong colada a uma cana. A extremidade inferior do tubo, instalado no meio do sulco, está furada de modo a permitir a entrada da água para o seu interior. Assim, quando a água da frente de avanço entra no tubo, faz levantar a bola que através da cana desliga a fonte de energia do relógio analógico instalado na parte superior do tubo.

Estes sensores têm a vantagem de permitir a leitura posterior do avanço de todas as estações.

4.3.2. Limnígrafos

Para a leitura dos caudais dos sulcos, instalou-se na extremidade a montante e a jusante desses, limnígrafos compostos por um canaleta-medidor e por uma sonda de ultra-sons (fig. 4.3.). Os canaletes eram triangulares de soleira espessa, do tipo projectado por Replogle e Bos (1982), e adaptado por Serralheiro (1988).

As sondas de ultra-sons, cuja descrição se apresenta a seguir, foram instaladas em poços de estabilização que comunicam com os canaletes através dum tubo de plástico.

Todos os limnígrafos utilizados foram previamente calibrados no canal de testes do Laboratório de Hidrologia do Departamento de Engenharia Rural. A calibração foi feita simultaneamente para leitura visual e com sondas de ultra-sons.

4.3.3. Sondas de Ultra-sons

De modo a poder fazer a leitura contínua da altura de água nos canaletes, estes foram equipados com sondas de ultra-sons do tipo UST1016. Estas medem a altura da água pelo tempo de emissão-retorno de ultra-sons (frequência de 1 MHz) em tubos próprios que proporcionam um meio estabilizado para a medição. A altura de água H , é calculada pela seguinte expressão:

$$H = Z + \left(\frac{T.C}{2} \right) \quad (4.1)$$

sendo,

Z- correcção do zero introduzido pelo operador;

T- tempo de emissão-retorno de ultra-sons;

C- velocidade do som.

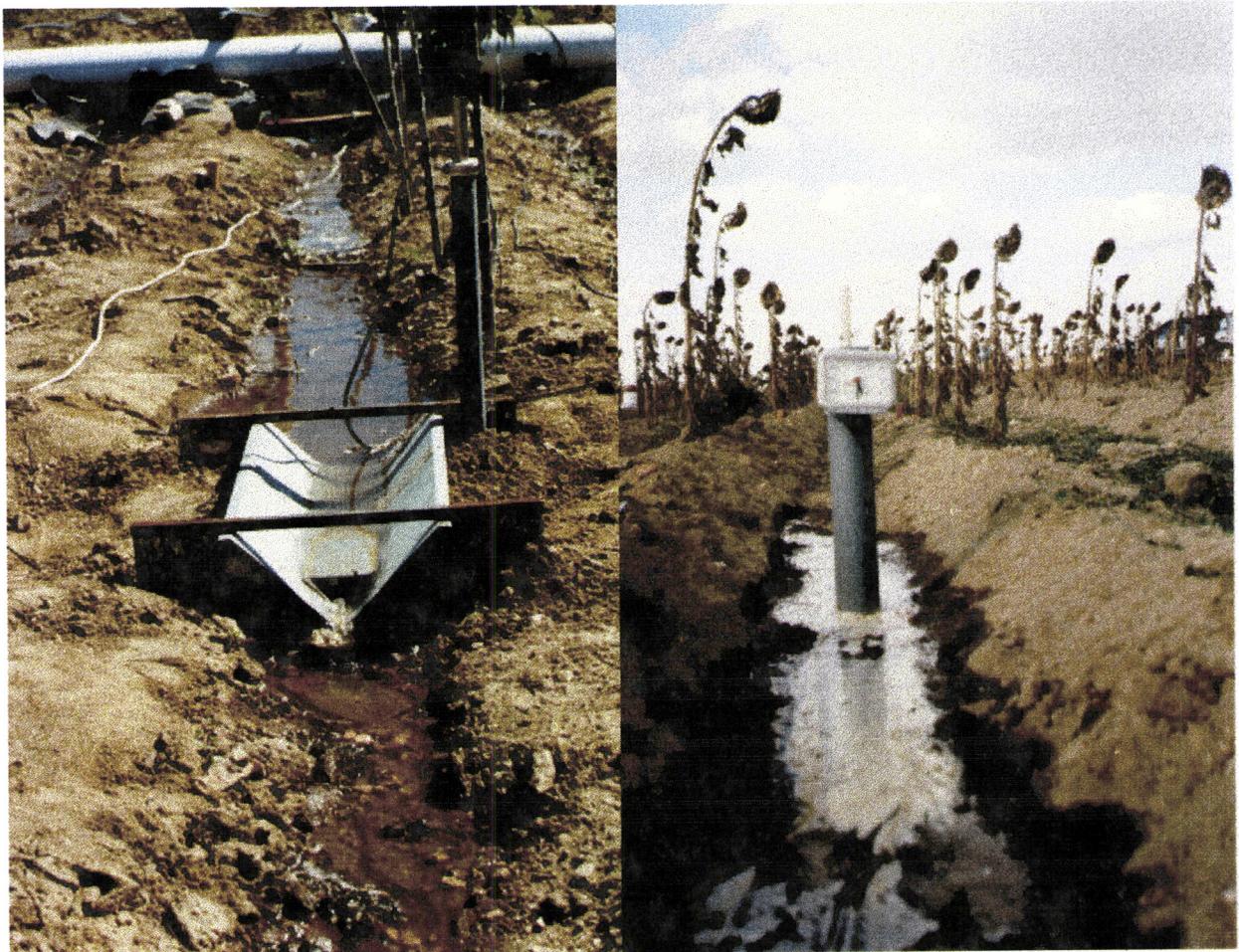


Figura 4.3. Esquerda: Um limnígrafo composto por um canaleta-medidor e por uma sonda de ultra-sons. A sonda está inserida no tubo de plástico visível à direita do canaleta. Direita: Aspecto dum sensor de avanço no momento da paragem do relógio devido a chegada da frente do avanço

A velocidade do som C , é dependente da temperatura da água e é calculada pela expressão:

$$C = C_0 + k \theta \quad (4.2)$$

sendo,

C_0 - velocidade do som a 0°C , 1397 m/s;

θ - temperatura em graus Celcio;

k - constante.

Estas sondas tem uma precisão de um milímetro, e medem uma altura mínima de 5 centímetros, pelo que se adaptam perfeitamente às medições pretendidas.

A frequência das leituras é determinada pelo operador, podendo ser feitas por exemplo de minuto a minuto. Estas são armazenadas num datalogger SAB600 LMU, do tipo 4HP, o que permite a sua leitura instantânea bem como posterior, podendo-se ligar o datalogger a qualquer PC e recolher as leituras efectuadas.

4.3.4. Determinação da secção hidráulica dos sulcos

Para fazer o levantamento dos perfis transversais dos sulcos, utilizou-se um perfilómetro de barras, do tipo descrito por Walker e Skogerboe (1982), o qual possui uma prancheta por detrás das barras, onde se colocam folhas de papel permitindo traçar os perfis no próprio local.

O perfilómetro era inserido em estações de medição, colocadas em sulcos seleccionados, permitindo realizar as leituras sempre na mesma posição. As estações de medição eram constituídas por estacas inseridas nos lados do sulco de modo a definirem transversalmente ao sulco uma linha horizontal.

4.4. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

4.4.1. O Controlador

Para o presente trabalho foi desenvolvido um controlador electrónico constituído por um computador e o respectivo programa, um inversor de velocidade, um pequeno motor eléctrico e a respectiva engrenagem.

A rega é gerida pelo programa "*CaboGest*" desenvolvido neste trabalho e descrito em pormenor no ponto 5.4. Este programa recebe os dados do avanço de um sulco controle, processa-os e calcula a velocidade do êmbolo do Cabo-rega.

O computador instalado à cabeceira do tubo de alimentação comunica através duma porta série RS485, com um inversor "Micromaster MM75" da SIEMENS (fig. 4.4). O Micromaster é um inversor de frequência com circuito intermédio de tensão, podendo ser comandado localmente ou através dum computador (Em anexo 6 apresenta-se uma breve descrição do funcionamento e da programação do Micromaster).

O "Micromaster" comanda um pequeno motor eléctrico de 0.12 Kwh, alterando a frequência da corrente que lhe fornece. A ligação eléctrica entre o motor e o Micromaster é trifásica permitindo a este comandar com precisão a velocidade, bem como o sentido de rotação do motor.

Assim, foi montada a caixa controladora habitual, tendo-se tirado a roda hidráulica, Em seu lugar foi instalado um motor eléctrico e o respectivo sistema de redução (fig.4.5.).

A velocidade nominal do motor utilizado é de 1350 rpm, pelo que este está acoplado a um redutor de 1500 vezes, resultando numa velocidade máxima final de 0.9 rpm; o que, tendo em conta o perímetro da bobine onde está enrolado o cabo, dá uma velocidade máxima de 39 metros/hora para o êmbolo, o que cobre perfeitamente qualquer necessidade de rega.

É de salientar que, tratando-se do primeiro ano e para permitir uma certa flexibilidade aos ensaios, optou-se por utilizar corrente alterna, trazendo energia eléctrica para o campo. No entanto, todo este sistema pode ser montado de modo a trabalhar com corrente contínua, nomeadamente através duma bateria de automóvel, para a qual pode utilizar-se motores muito menos potentes. Eventualmente, pode-se acoplar um espelho solar e tornar o equipamento totalmente autónomo.



Figura 4.4. O Micromaster M75.

4.4.2. Calibração do Controlador

O controlador Micromaster foi calibrado no campo, utilizando uma gama de frequências de 7,5 até 50 Hz. Mediu-se o tempo que o êmbolo demorava a percorrer um determinado espaço (0,75m) e calculou-se assim a velocidade do êmbolo. É de salientar que esta calibração foi realizada com uma pressão de água constante sobre o êmbolo, muito semelhante às condições normais da rega. Com os resultados obtidos determinou-se a equação da velocidade em função da frequência (fig. 4.6.)

É necessário que o sistema controlador conheça a posição exacta do êmbolo. Uma opção seria utilizar uma roldana e um mecanismo conta-rotações para medir o cabo desenrolado.

Sabendo que a bobine do controlador tem um diâmetro de 17.5 cm., e que a última fiada de cabo (150 m) descreve um círculo com o diâmetro de 20 cm, é possível, pelo menos teoricamente, saber a posição exacta do êmbolo à medida que o cabo é desenrolado. Optou-se portanto, por enrolar cuidadosamente o cabo sobre a bobine do controlador, conseguindo-se assim uma relação precisa entre o número de voltas da bobine e o comprimento do cabo enrolado.

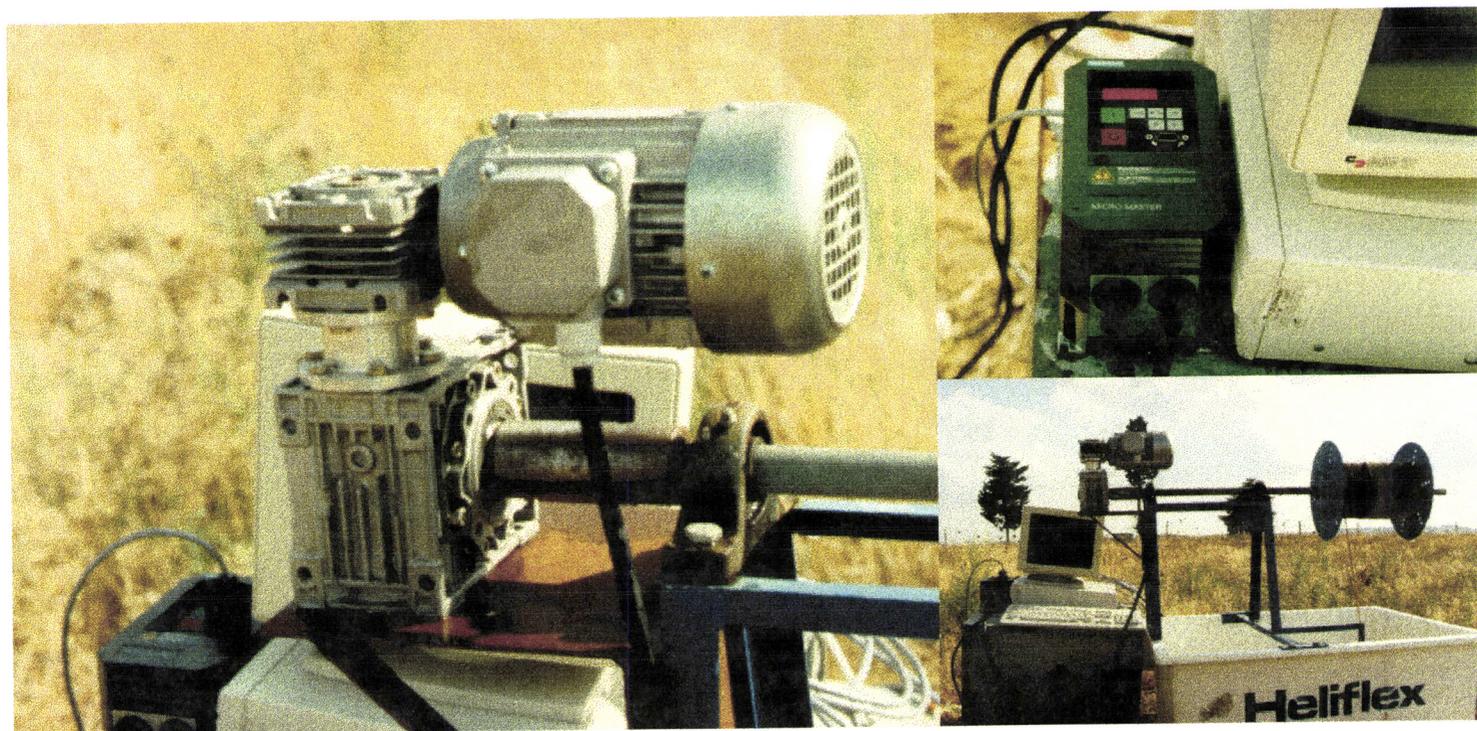


Figura 4.5. Controlador electrónico desenvolvido no presente trabalho. O computador comunica com o Micromaster, que comanda o motor eléctrico, substituindo assim o controlador hidráulico.

O único obstáculo previsível é a dilatação do cabo, o que, dados a sua grossura e os caudais utilizados, não deve afectar grandemente o seu comprimento.

4.4.3. Detectores do avanço

O controlador recebe os tempos de avanço da rega em dois pontos do sulco de controlo, nomeadamente a 50% e 100% do seu comprimento. Contudo, devido a dificuldades de comunicação entre o controlador e as sondas de ultra-sons, não foi possível a utilização das últimas para detectar a frente de avanço. Assim foi necessário introduzir manualmente os dados do avanço no controlador.

Está-se a desenvolver, embora tardiamente, um sistema de detecção da frente de avanço, baseado num relé de falta de água, RFA 101 SIM, fabricado por MicroControle utilizado normalmente nas electrobombas. Este relé é provido de duas sondas que o ligam e desligam na presença ou ausência de água. A chegada da frente de avanço à primeira sonda activa o relé e um mecanismo de bóia desliga seguidamente a corrente, desactivando-o.

4.5. AVALIAÇÃO

Em cada rega, para além do sulco-controlo utilizado pelo CaboGest para determinar a equação do avanço, existem vários sulcos denominados sulcos-medição, nos quais se mediram os seguintes parâmetros:

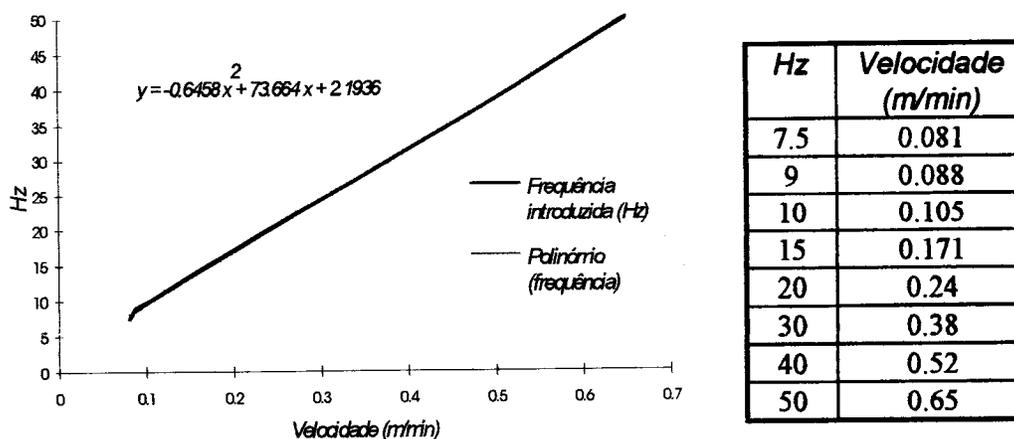


Figura 4.6. Calibração do Micromaster, e a equação de velocidades obtida

- *Tempos de avanço e de recessão* - Para a rega preliminar, os sulcos foram divididos em 10 segmentos iguais através da colocação de estacas. Na rega definitiva optou-se pela divisão dos sulcos em segmentos de 20 metros, de modo a facilitar a análise conjunta dos resultados.

No início de cada segmento foram colocados sensores automáticos de avanço, os quais indicavam o momento exacto da chegada da frente de avanço. Os tempos de recessão foram determinados por observação.

- *O andamento do êmbolo do Cabo-rega*- Registaram-se as horas do início e do fim de rega em cada sulco.

- *Caudal de entrada e de saída em sulcos-medição*- Para a sua medição, os sulcos-medição foram munidos de limnígrafos nas suas extremidades. A montante, os canaletes foram colocados a cerca de 10 metros da cabeceira do sulco e a jusante a cerca de 5 metros antes da vala colectora dos excedentes. Como existiam apenas 2 dataloggers, cada um com 4 sondas, estas passavam dum canaleta para outro de modo a acompanhar a rega.

- *Perfil dos sulcos antes e depois de cada rega*- Para a sua medição foram estabelecidas três estações de medição (a 15 metros da cabeceira, no meio e na parte final do sulco), nas quais se inseria o perfilómetro.

- *Geometria da secção molhada* - A altura da água sobre o talvegue, bem como a largura da secção molhada foi determinada em três pontos de cada sulco-medição utilizando uma régua. No ensaio definitivo fizeram-se estas leituras sempre que o êmbolo do Cabo-rega alcançava um novo orifício. Assim obteve-se a variação do armazenamento superficial ao longo do sulco e ao longo da rega.

A uniformidade de infiltração em sulcos seleccionados foi estabelecida através de determinação de teores de humidade de amostras de solo tiradas a diferentes profundidades na cabeceira, no meio e na parte final dos sulcos.

O caudal de entrada foi medido através duma caixa munida de descarregador triangular, e mantido relativamente constante a 10 litros/seg. através duma torneira colocada à saída da moto-bomba.

Capítulo 5

Métodos

5. MÉTODOS

5.1. DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA DE GESTÃO DO CABO-REGA: CABOGEST

O desafio de "*desenvolver, por automatização, um sistema de Cabo-rega*", em solos Argiluvitados de baixa infiltrabilidade armado em sulcos de contorno, obrigou a uma análise cuidada de muitos métodos de condução de rega para por fim se optar por um que fosse prático, fiável e que pudesse ser utilizado por agricultores.

Verifica-se que, para uma gestão correcta, os sistemas de Cabo-rega necessitam de dados relativos ao escoamento no campo. Alguns, como por exemplo o sistema com controlador electrónico desenvolvido por Sousa et al. (1992), utilizam dados de infiltração e/ou de avanço determinados antes da rega, ou observados em regas anteriores. Outros sistemas utilizam dados do campo em tempo real, procurando ajustar o sistema de modo a obter as melhores eficiências. Entre estes pode-se mencionar o sistema apresentado por Humphries e Trout (1990), que utiliza dados de caudais na vala de recolha de excedentes para acertar a velocidade do êmbolo.

Inicialmente procurou-se desenvolver um sistema semelhante a este último. No entanto observaram-se algumas limitações:

- Tempos de resposta relativamente longos. Este sistema exige que todos os excedentes passem por um único sensor, o que implica a sua localização no extremo oposto do campo. Portanto a água teria de percorrer o comprimento dos sulcos, e a largura do campo para alcançar o sensor.

Considerando que um determinado volume de excedente demora t minutos para percorrer o campo e chegar ao sensor, qualquer correcção feita à rega em consequência desse excedente demoraria outros t minutos para se reflectir de novo no sensor. Estes tempos são demasiado longos para serem utilizados em solos argiluvitados onde grande parte da dotação é infiltrada em poucos minutos.

- Utilização com sulcos de comprimentos variáveis, o que aumenta a necessidade de ajustamento constante da velocidade do êmbolo. Por outro lado, como o número de sulcos regados simultaneamente e os respectivos caudais são constantes, uma diminuição do comprimento dos sulcos implica um aumento do volume total de excedentes, sem que haja necessidade de alguma correcção por parte do sistema.

Posto isto, e por não se pretender utilizar valores extrapolados de outras regas, pois existe uma variação de comprimento de sulcos, optou-se por recorrer a outro parâmetro que pudesse representar com fiabilidade o escoamento e ao mesmo tempo ser utilizado em tempo real para gerir a rega.

Como a fase de avanço é de grande importância pois determina, em grande parte, a uniformidade de infiltração, e como a duração da rega em sulcos longos t , é determinada por (desprezado a recessão):

$$t = t_L + \tau \quad (5.1)$$

sendo,

t_L - tempo de avanço até ao fim do sulco;

τ - tempo de infiltração da dotação útil.

então o tempo de avanço até ao fim do sulco será naturalmente o parâmetro mais importante para a gestão da rega em sulcos longos.

Por outro lado e segundo Elliot e Walker (1982), "os dados mais importantes do campo são as taxas de avanço, que podem variar consideravelmente ao longo da época de rega, pelo que será necessário a sua determinação em tempo real para poder gerir a rega."

5.2. O PRINCÍPIO DO MÉTODO CABOGEST

O Princípio do método de operação do sistema computarizado de gestão do Cabo-rega, CaboGest, resume-se ao seguinte:

Como o sistema de Cabo-rega instalado não possui derivação em paralelo, é necessário um compasso de espera no primeiro conjunto de sulcos, para permitir que estes sejam regados (Kincaid e Kemper, 1984). Este compasso de espera é necessário a despeito da existência ou não do sistema de automação utilizado neste trabalho. O método proposto aproveita este avanço de rega com um caudal constante (pois o êmbolo está estacionário) para determinar a equação de infiltração, utilizando o modelo de balanço volumétrico.

Para este efeito, o CaboGest, recebe em tempo-real os tempos de avanço até ao meio e ao fim do sulco e como foi referido, determina a equação de infiltração.

Com base na equação de infiltração determinada e utilizando um modelo de balanço volumétrico desenvolvido neste trabalho, o CaboGest calcula os tempos de avanço para o sulco. Estes tempos calculados, são comparados com os observados, e o ajustamento é feito através da determinação do coeficiente de rugosidade de Manning.

Com base nestes dados, o programa CaboGest modela o avanço nos restantes sulcos e calcula a velocidade do êmbolo de modo a permitir a infiltração da dotação pretendida.

5.3. O MODELO DE ESCOAMENTO ELABORADO

Devido à diminuição gradual dos caudais de entrada e a variação do comprimento dos sulcos, torna-se necessário realizar a modelação do escoamento em cada sulco de modo a obter os respectivos tempos de avanço.

O modelo a utilizar deveria obedecer aos seguintes condicionalismos:

- Não exigir dados para além daqueles utilizados para a determinação da equação de infiltração.
- Realizar uma modelação do escoamento harmonioso com o método da determinação da equação de infiltração.
- Ser simples de modo a ser utilizado em tempo real em computadores menos potentes.

Optou-se por um modelo de Balanço Volumétrico, com a utilização da equação de Manning para a determinação do armazenamento superficial e a velocidade do escoamento. É de lembrar que na determinação da equação de infiltração, o armazenamento superficial é estimado também pelo uso da mesma equação.

O modelo utiliza um ciclo de tempos, e para cada intervalo de tempo t , determina o espaço percorrido pela frente de avanço. Por sua vez o sulco é dividido em n células correspondentes aos espaços percorridos pela frente de avanço em cada um dos intervalos de tempo sucessivos. Para cada incremento de tempo de um minuto, o espaço percorrido é numericamente igual à velocidade, e é determinado através da seguinte expressão:

$$V_{el} = a_v \cdot Q \left(Q \cdot \frac{n}{\sqrt{S}} \right)^{-3u/(5u-2)} \quad (5.2)$$

com:

$$a_v = a^{2/(5u-2)} \quad (5.3)$$

sendo,

- V_{el} - velocidade do avanço em m/min., (com $t=1$ minuto, a V_{el} será numericamente igual ao espaço percorrido);
- Q - caudal no incremento em m^3/min ;
- a e u - coeficientes da equação da geometria do sulco (Eq.5.9);
- S - declive da fricção (m/m).

Em cada célula o armazenamento superficial é determinado recorrendo a uma equação semelhante:

$$A = a_a \left(Q \cdot \frac{n}{\sqrt{S}} \right)^{3u / (5u-2)} \quad (5.4)$$

onde:

$$a_a = a^{-2 / (5u-2)} \quad (5.5)$$

O volume infiltrado na célula é determinado multiplicando a infiltração instantânea pelo comprimento da célula.

No fim de cada incremento do tempo, o volume de água disponível para o incremento de tempo seguinte $t + 1$, é determinado através da realização dum balanço volumétrico relativo a todas as células do sulco percorridas até ao instante t . Assim o ciclo repete-se até se alcançar o fim do sulco ou terminar a alimentação do mesmo.

5.4. O PROGRAMA CABOGEST

CaboGest é um programa em Basic desenvolvido com uma estrutura aberta de modo a ser passível de adaptações e melhoramentos por terceiros. O programa é totalmente novo, excepto a sub-rotina de cálculo dos caudais debitados pelos orifícios, que foi adoptado do programa CABLEmet desenvolvido por D.C. Kincaid em Kimberly, Idaho (1991).

Em anexo 3 apresenta-se a listagem do código fonte do programa. O anexo 4 é a listagem das variáveis utilizadas, a sua descrição, origem e as variáveis associadas. O anexo 10 contém o programa em suporte magnético e um pequeno manual de instruções.

A estrutura do programa está apresentada no quadro 5.1.

5.4.1. Determinação da Equação de Infiltração

A equação de infiltração, do tipo Kostiaikov, é calculada segundo o método do balanço volumétrico de Elliot e Walker, utilizando o método dos dois pontos apresentado em 3.2.3.1.

No referido método, proposto por Elliot e Walker (1982) o armazenamento superficial é determinado através do factor de forma σ_y , que uma vez multiplicado pela secção transversal normal A_0 , isto é, a área molhada na secção de cabeceira, dará a área média da secção transversal, \bar{A} .

Linha início Rotina Principal

100	Leitura dos dados e dos diversos pãrametros
930	Determinação dos caudais debitados pelos diferentes orifícios do Cabo- rega
1730	Movimentação do êmbolo e acerto da posição física do êmbolo com a do primeiro sulco regado. Início da rega no primeiro sulco.
1735	Registo da hora do início da rega
1740	Fim da rega no primeiro sulcos, recolha de informações de avanço. Movimentação do êmbolo para o segundo sulco.
1750	Determinação da equação de infiltração segundo o método do balanço volumétrico de Elliot e Walker
1900	Desenho da curva de infiltração e determinação da dotação pretendida
2000	Início da rotina de modelação do avanço
2050	Ciclo dos incrementos do tempo
2055	Velocidade de avanço, espaço percorrido
2070	Volume infiltrado ao longo do sulco
2075	Armazenamento superficial
2080	Acerto da velocidade do avanço e do armazenamento superficial
2090	Apresentação dos cálculos

Linha início Sub-Rotinas

2100	Determinação do coeficiente de rugosidade de Manning
2200	Determinação da velocidade do êmbolo, hora de início de rega em cada sulco e da frequência do Micromaster
2300	Acerto do intervalo de tempo entre dois orifícios
4000	Introdução da dotação pretendida pelo operador
5000	Elaboração e envio de telegramas ao Micromaster
5150	Preparação de novas velocidades a enviar ao Micromaster
6000	Controlo final da rega

Quadro 5.1. Estrutura do programa CaboGest

Como o armazenamento superficial varia com o tipo de solo, é preferível utilizar dados medidos no campo em vez de valores pré-estabelecidos. Utilizando as medições da altura de água no início, meio e fim do sulco, respectivamente y_i , y_m e y_f , e conhecendo as constantes da relação:

$$A = a \cdot y^b \quad (5.6)$$

as secções transversais a meio e fim do sulco A_m e A_f serão:

$$A_m = a \left(\frac{y_i + y_m}{2} \right)^b \quad \text{e} \quad A_f = a \left(\frac{y_i + y_m + y_f}{3} \right)^b \quad (5.7)$$

Assim, nas equações 3.26 e 3.27, o membro $\sigma_y A_0$ é substituído pelos valores de A_m e de A_f , respectivamente.

5.4.2. Determinação da dotação pretendida

Uma vez determinada a equação de infiltração, a curva correspondente é traçada no écran, fornecendo uma noção visual da evolução da taxa de infiltração. A dotação pretendida deve ser escolhida criteriosamente, de modo a não alongar demasiado o tempo de admissão, resultando em perdas excessivas por escorrimento. O programa sugere a dotação que otimiza a eficiência da rega, no entanto permite ao operador introduzir outros valores, se desejado.

A determinação da dotação óptima é feita em função do declive da curva de infiltração, ou seja da infiltração instantânea, e corresponde a um valor pré-estabelecido (0.5 mm/min), a partir da qual se julga que os acréscimos de infiltração obtidos não justificam o alongamento do tempo da aplicação (fig. 5.1).

5.4.3 Determinação do coeficiente de rugosidade de Manning

No presente trabalho a equação de infiltração é determinada independentemente do coeficiente de rugosidade de Manning, no entanto, a averiguação do seu valor exacto é essencial para uma boa modelação do escoamento. Por outro lado, como o seu valor evolui ao longo das várias regas não seria recomendável utilizar valores tabelados.

Para a sua determinação o programa compara os valores observados dos tempos de avanço no sulco controlo com os valores calculados e ajusta o coeficiente n de modo a obter valores semelhantes, com um erro de $\pm 3\%$.

Isto é feito por um processo iterativo, começando com o valor de $n = 0.04$. Este valor será aumentado ou diminuído de 0.005 se o programa sobre calcular ou sub calcular os tempos de avanço.

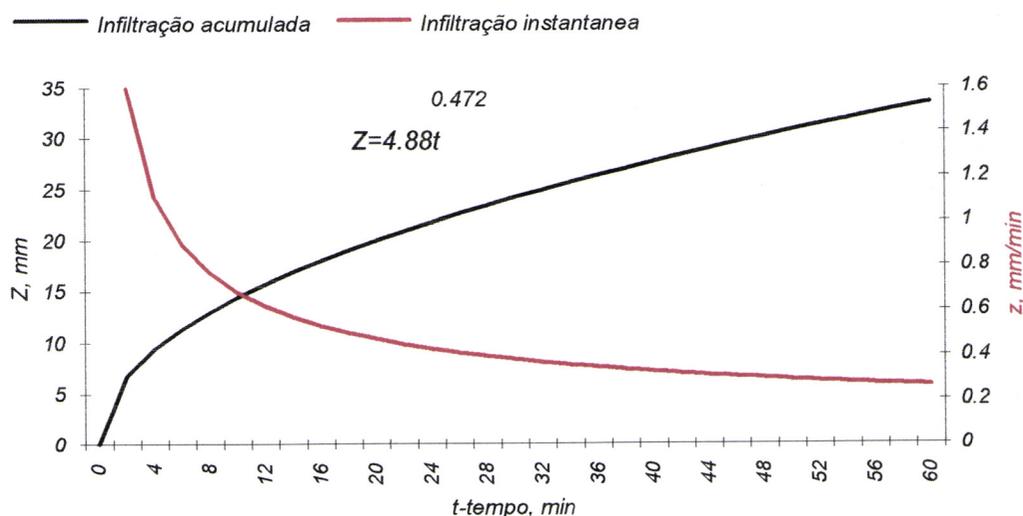


Figura 5.1. Variação da infiltração acumulada e instantânea com o tempo. A equação de infiltração foi determinada por Pereira (1992), no mesmo campo que o presente ensaio.

5.4.4. Rotina gestora da Rega

A seguir descreve-se resumidamente o procedimento para a modelação do avanço realizada individualmente para cada um dos sulcos, utilizando uma malha espaço-tempo.

É de salientar que se optou pela utilização de incrementos de tempo constantes e iguais à unidade (1 minuto). Esta opção tem a vantagem de igualar numericamente os valores de velocidade (m/min) com os espaços (m), e o valor de caudais (m³/min) com volumes (m³). Esta opção resulta bastante feliz pois simplifica o algoritmo de cálculo.

O programa recorre a um processo iterativo, calculando os seguintes parâmetros para cada incremento de tempo desde o início da rega no sulco:

- A velocidade do avanço, ou seja o espaço percorrido no incremento;
- A infiltração acumulada em todos os incrementos anteriores;
- O armazenamento superficial em todos os incrementos anteriores;
- O caudal disponível para o incremento seguinte.

5.4.4.1. Cálculo da velocidade de avanço

Sob condições uniformes, e se se presumir um perfil regular no sulco, pode-se estabelecer uma relação generalizada entre o caudal aplicado Q , a geometria do sulco e o seu declive. De acordo com a equação do fluxo uniforme de Manning:

$$Q = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (5.8)$$

sendo,

A - área da secção transversal, m^2 ;
 R - raio hidráulico ($R=A/Pm$) em m^2/m .

Se se presumir uma relação de potência entre a área A , e o Perímetro molhado Pm :

$$A = a \cdot Pm^u \quad (5.9)$$

em que a e u são coeficientes empíricos dependentes do formato dos sulcos, então a velocidade de avanço pode ser determinada pela equação 5.2 (Trout, 1991).

$$V_{el} = a_v \cdot Q \left(Q \cdot \frac{n}{\sqrt{S}} \right)^{-3u/(5u-2)} \quad (5.2)$$

com:

$$a_v = a^{2/(5u-2)} \quad (5.3)$$

Como o incremento de tempo é um minuto, a distância percorrida no incremento (metros) é numericamente igual à velocidade do avanço (m/minuto) e fica armazenado em memória.

Verifica-se pelo exposto que a determinação da velocidade do avanço depende da determinação exacta do caudal no último incremento.

5.4.4.2. Cálculo do volume infiltrado

O volume infiltrado em cada instante, V_{inf} , é determinado pela derivada da equação de infiltração. Portanto, o volume V_{inf} , infiltrado no espaço $E(s)$, será:

$$V_{inf} = E(s) \cdot k' \cdot \tau^{a'} \quad (5.10)$$

sendo,

- V_{inf} - volume infiltrado, m^3 ;
- $E(s)$ - espaço percorrido no incremento, m;
- k' e a' - parâmetros da equação de infiltração na forma derivada;
- τ - tempo de infiltração.

O tempo de infiltração τ , num ponto localizado a uma distância s do início do sulco é dado por:

$$\tau = t - ts \quad (5.11)$$

sendo,

t - tempo desde o início da rega no sulco;

t_s - tempo de avanço até ao ponto s .

O volume infiltrado em cada incremento de tempo, V_{infl} , ao longo de todo o sulco, será, portanto, determinado por:

$$V_{infl} = \int_0^s E(s) \cdot k' \cdot \tau^{a'} \cdot \frac{d\tau}{d_s} \quad (5.12)$$

E o volume total infiltrado desde o início da rega no sulco, V_{infttl} :

$$V_{infttl} = \int_0^t \int_0^s E(s) \cdot k' \cdot \tau^{a'} \cdot \frac{d\tau}{d_s} \cdot \frac{d_s}{d_t} \quad (5.13)$$

5.4.4.3. Cálculo do armazenamento superficial

A área da secção transversal do armazenamento superficial A , é calculada a partir do caudal e pode ser determinada de duas maneiras:

a) Directamente, utilizando a expressão 5.4. obtida a partir da equação do fluxo uniforme de Manning (A dedução dessa expressão está apresentada em anexo 5).

b) Em função do P_m , utilizando a expressão 5.9, obtendo-se exactamente os mesmos resultados.

O volume armazenado superficialmente V_{sup} , é determinado multiplicando em cada incremento a área da secção transversal pelo comprimento do incremento $E(s)$.

$$V_{sup} = E(s) \cdot A \quad (5.14)$$

O volume total armazenado superficialmente V_{supttl} , será o volume armazenado durante este intervalo do tempo e neste troço do sulco, mais o volume armazenado nos troços anteriores.

$$V_{supttl} = \int_0^s A(s) \cdot E(s) \cdot \frac{ds}{dx} \quad (5.15)$$

5.4.4.4. Caudal disponível para o incremento seguinte

O Caudal disponível para o incremento seguinte é obtido realizando um balanço volumétrico dos volumes admitidos, infiltrados e armazenados superficialmente desde o início da rega no sulco:

$$Q_{(s+1)} = (V_{ttl} - V_{infttl} - V_{supttl})/t_{inc} \quad (5.16)$$

sendo,

$Q_{(s+1)}$ - caudal disponível para o incremento $i+1$;

V_{ttl} - volume total admitido no sulco;

V_{infttl} - volume total infiltrado;

t_{inc} - tempo desde o início da rega no sulco.

Devido à grande infiltrabilidade inicial dos solos, e porque o espaço percorrido no incremento é calculado antes da contabilização da infiltração no incremento, podem surgir casos em que o $Q_{(s+1)}$ resulte negativo. Nestes casos o programa reduz o espaço percorrido no incremento e diminui o armazenamento superficial, disponibilizando este para ser infiltrado.

5.4.4.5. Algumas considerações sobre a determinação e utilização do Perímetro molhado

O perímetro molhado é calculado de acordo com a seguinte expressão deduzida da equação de Manning:

$$Pm = a_p \left(Q \frac{n}{\sqrt{S}} \right)^{3/(5u-2)} \quad (5.17)$$

com:

$$a_p = a^{-5/5u-2} \quad (5.18)$$

sendo a e u os coeficientes da equação 5.9

O método de dimensionamento de sulcos de Soil Conservation Service, SCS, acrescenta um valor fixo ao Pm calculado pela equação 5.17:

$$Pm = 0.265 \left(Q \frac{n}{\sqrt{S}} \right)^{0.425} + 0.227 \quad (5.19)$$

Por sua vez, Kemper et al., no seu programa Cablemet, acrescentam 0,21 m. ao valor do Pm calculado, chamando Pm mínimo ao acrescento.

No presente trabalho o Pm não é acrescido dum valor fixo, mas sim um valor relacionado com a rugosidade do sulco, pois ambos são denominadores da equação de Manning e influenciam a velocidade do escoamento de forma semelhante. Assim para valores de n superiores á 0,04, Pm é acrescido de 0,02 m por cada incremento de 0,01 do n .

Como a equação da infiltração é determinada para o sulco todo, sem considerações da influência do perímetro molhado, talvez não seria coerente, para efeitos do cálculo dos volumes infiltrados, multiplicar a equação da infiltração pelo P_m .

Dada a sua importância na literatura, e para estudar o seu efeito, o CaboGest possui a opção de calcular a infiltração em função do P_m . Porém, em vez de simplesmente multiplicar a infiltração (Eq. 5.10) pelo P_m , optou-se por utilizar a relação P_m/P_{m0} , (sendo P_{m0} , o perímetro molhado para o caudal máximo) pois relaciona a infiltração num determinado P_m com a infiltração máxima verificada a cabeceira do sulco.

5.4.5. Comunicação das velocidades do êmbolo ao Micromaster

De modo a garantir a aplicação da dotação pretendida, o tempo de duração de rega em cada sulco t , é calculado pela expressão 5.1.

A comunicação entre o computador e o Micromaster é feita através da porta RS485, obedecendo ao protocolo USS. Os comandos são transmitidos em pequenos *telegramas* e devem obedecer aos padrões do protocolo. Em anexo 6 apresenta-se sucintamente o procedimento de comunicação com o protocolo USS, e as rotinas necessárias para a sua realização. É de referir que através deste protocolo um computador pode controlar simultaneamente até 31 Micromasters.

5.5. Parâmetros introduzidos no CaboGest

De entre os parâmetros relativos ao campo e ao próprio sistema Cabo-rega introduzidos no CaboGest antes da rega podem-se destacar os seguintes:

- Comprimentos dos sulcos, m;
- Pares de dados referentes ao perfil do sulco (t e y);
- Caudal total do Cabo-rega, l/s;
- Declive dos sulcos e do tubo do Cabo-rega, m/m;
- Distância entre os sulcos, mm;
- Rugosidade e diâmetro interno do tubo, bem como o diâmetro equivalente dos orifícios, mm.

No decorrer da rega, ou seja, logo após a finalização do avanço no primeiro sulco, são introduzidos no programa os seguintes parâmetros relativos ao sulco controlado:

- Tempos de avanço até um ponto no meio e outro no fim do sulco, min. (t_m e t_f)
- Profundidade do escoamento no início e meio do sulco, m. (opção)
- Dotação Pretendida (opção)

Os tempos de avanço até ao meio e fim do sulco, bem como a profundidade do escoamento no sulco são introduzidos manualmente no computador. Pelo que neste método é necessária a intervenção humana durante o compasso de espera. Uma vez determinadas as equações, o CaboGest "rega" automaticamente os sulcos seguintes.

Capítulo 6

Resultados e Discussão

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

É de referir que é a primeira vez em Portugal que um Micromaster é comandado directamente por um computador, pelo que o desenvolvimento do equipamento provou ser um desafio maior do que inicialmente previsto. Apesar de toda a boa vontade demonstrada pelos diversos técnicos da Siemens, estes não puderam ajudar na instalação e programação do controlador, pelo que a sua utilização neste trabalho só foi possível graças a material informativo encomendado de Inglaterra.

6.1. ENSAIO PRELIMINAR

Em consequência de atrasos sucessivos no desenvolvimento do controlador e no fornecimento dos seus componentes, a primeira rega só foi realizada no dia 5 de Outubro de 95, com o girassol já no fim do seu ciclo vegetativo.

6.1.1 Preparação dos dados para o CaboGest

Devido à importância da geometria do sulco, tanto para a determinação da equação de infiltração, como para a modelação do escoamento, determinou-se o perfil transversal médio a partir dum número razoável de levantamentos de perfis realizados nos sulcos 14, 17, 34 e 44. Em anexo 7 estão apresentados os perfis médios das estações no início, meio e fim dos sulcos.

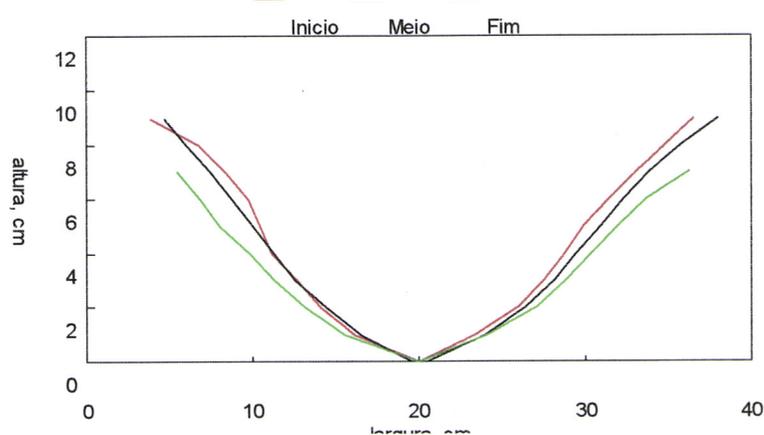


Figura 6.1. Comparação dos perfis transversais médios no início, meio e fim dos sulcos, antes da rega.

Optou-se pelos valores da geometria da parte central do sulco por melhor representarem o sulco todo (fig. 6.1).

Os parâmetros da geometria obtidos foram introduzidos no CaboGest antes do início da rega. Durante a rega, foram fornecidos ao programa os parâmetros respeitantes à rega observados no campo (quadro 6.1.).

6.1.2. Condução do Ensaio

Neste ensaio foram regados os sulcos 7 a 34. Assim, a rega foi iniciada com o êmbolo parada no sulco 11 até ao fim do avanço nesse sulco. No fim do avanço, os parâmetros da rega foram introduzidos no CaboGest e iniciada a rega no sulco seguinte. O CaboGest realizou os cálculos necessários para a determinação das velocidades do êmbolo no resto do campo.

O caudal total foi mantido relativamente constante nos 10 l/seg., o que se provou ser fácil, desde que o filtro estivesse limpo.

Verificou-se que já existia uma certa quantidade de detritos vegetais nos sulcos, bem como alguma vegetação espontânea.

Os sensores de avanço funcionaram bem, parando os relógios cerca de meio minuto depois da frente ter atingido o sensor, embora os relógios utilizados não se tenham mostrado muito precisos.

Os caudais debitados pelos orifícios variaram cerca de $\pm 0,2$ l/seg. dos calculados pelo CaboGest, o que não deverá prejudicar significativamente os resultados obtidos.

<i>Parâmetros da Geometria</i>	
Geometria do sulco	Pares de valores <i>y-b</i>
<i>a</i> - parâmetro da equação da área	0.1818
<i>u</i> - parâmetro da equação da área	2.9515
<i>Parâmetros da Rega</i>	
Primeiro sulco regado	11
Último sulco regado	34
<i>t_m</i> - tempo do avanço até ao meio do sulco	73 min.
<i>t_f</i> - tempo do avanço até ao fim do sulco	149 min.
<i>y_i</i> - profundidade do escoamento no início do sulco	0.083 m.
<i>y_m</i> - profundidade do escoamento no meio do sulco	0.035 m.

Quadro 6.1. Parâmetros introduzidos no CaboGest

As mangas dissipadoras de energia foram úteis, diminuindo a projecção da água para fora do sulco (fig.6.2.). Recomenda-se, no entanto, o aumento do seu comprimento para cerca de 1 metro.

6.1.3. Resultados obtidos

6.1.3.1. Equação de infiltração e os tempos de avanço

A partir dos tempos de avanço e das alturas da água no sulco introduzidos no computador, o CaboGest calculou a seguinte equação de infiltração, em m³ por metro de sulco, com t em minutos (para transformar em l/m, basta dividir o k por 1000):

$$Z = 0.050705 \cdot t^{0.074552} \quad (6.1)$$

Para esta equação de infiltração, o programa recomenda uma dotação de 40mm, à qual corresponde um tempo de infiltração de 9 minutos (para ser mais exacto, em 9 minutos infiltram-se



Figura 6.2. Aspecto das mangas dissipadoras durante a rega preliminar

60 mm, no entanto este valor têm de ser dividido pela distância entre sulcos para se obter a infiltração em mm/m).

O CaboGest determinou um coeficiente de rugosidade de 0,11, o que reflecte a existência de detritos vegetais e de vegetação espontânea nos sulcos.

As horas calculadas do início de rega em cada sulco, o tempo de avanço previsto e os tempos observados estão resumidos no quadro 6.2. Apenas é de referir, que devido a um corte da alimentação no canal durante a rega dos sulcos 18-19, a rega dos sulcos seguintes teve de ser realizada no dia seguinte. Apenas por uma razão de conveniência, as horas de início do quadro 6.2. foram adaptadas de modo a existir uma continuidade.

Como seria de esperar o avanço foi mais rápido no sulco-controlo (sulco 11), regado com um caudal constante.

Sulco	Comprimento metros	Hora início previsto	Hora início efectivo	Duração do avanço, minutos	
				Calculado	Observado
11	280.5	-	9:17	146	149
12	278	-	11:46	169	
13	275.5	12:17	-	167	
14	273	12:47	-	167	167
15	125	13:17	-	66	
16	124	13:45	-	72	
17	124	14:00	-	72	
18	123	14:14	-	72	
19	255	14:28	-	153	
20	253.8	14:57	-	155	
21	251.3	15:25	-	153	
22	249.1	15:52	-	150	
23	246.9	16:20	-	148	
24	244.7	16:47	-	149	148
25	220	17:14	-	129	171
26	240.3	17:39	-1 min.	145	119*
27	238.1	18:06	-1 min.	143	286
28	235.9	18:32	-1 min.	141	231
29	233.7	18:54	-1 min.	142	194
30	231.5	19:24	-1 min.	140	131*
31	229.3	19:50	-2 min.	138	170
32	227.1	20:15	-2 min.	136	184
33	224.9	20:41	-2 min.	136	
34	222.7	21:05	-2 min.	134	171

* Avanço incompleto. O tempo indicado corresponde ao da posição máxima alcançada

Quadro 6.2 Tempos de avanço observados e calculados na rega preliminar

Embora o campo tivesse sido objecto dum levantamento topográfico detalhado, verificou-se a existência de declives negativos a cerca de 100 metros do início dos sulcos. Devido a esta irregularidade verificaram-se, em quase todos os sulcos, velocidades de avanço rápidas até aos 80 metros, seguidos de velocidades decrescentes (fig. 6.3.).

Assim, a subida do fundo dos sulcos provocava a acumulação da água no troço inicial e o seu transbordamento para os sulcos adjacentes, sendo os talwegues reconstruídos de imediato com o uso de enxadas.

Na figura 6.4. pode observar-se a comparação entre os tempos de avanço calculados e observados em quatro sulcos arbitrários, bem como as cotas dos sulcos 14 e 34 (Os tempos de avanço ao longo de todos os sulcos estão apresentados em anexo 8). A influência do declive sobre os tempos de avanço observados é nítida nestes sulcos. Por exemplo no sulco 14, verifica-se um abrandamento do avanço entre os 80 e os 100 metros, correspondendo a um declive negativo, seguido dum avanço rápido até aos 160 metros provocado por um declive favorável.

Por outro lado, e provavelmente devido às obras de drenagem subterrânea realizadas no Inverno anterior, constataram-se buracos nos sulcos que podiam absorver indefinidamente caudais relativamente grandes. Embora os buracos fossem tapados de imediato, o avanço lento em alguns sulcos, como por exemplo no 27 deve-se a este factor.

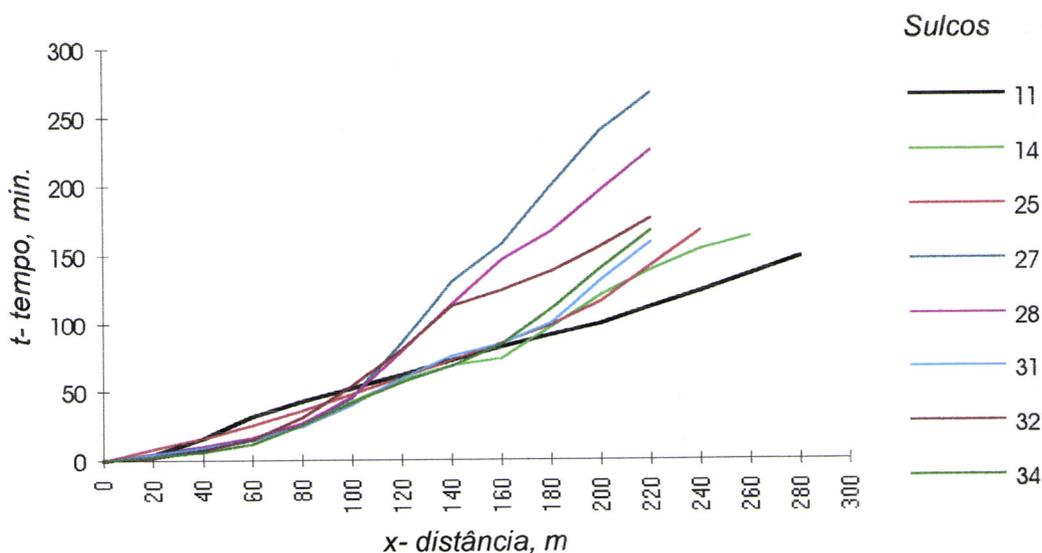


Figura 6.3. Comparação dos tempos de avanço observados no ensaio preliminar

Naturalmente a equação de infiltração foi afectada pelos buracos e pelos transbordamentos, pois os volumes perdidos foram considerados como infiltrados.

6.1.3.2. Uniformidade de aplicação

Para verificar a uniformidade de aplicação, tiraram-se amostras de solo em três locais ao longo de dois sulcos, 24 horas depois da rega. Através da análise da figura 6.5. pode-se constatar que o solo se encontrava inicialmente abaixo do coeficiente de emurchecimento, tendo ficado, após a rega, com partes acima da capacidade do campo. Verifica-se para os sulcos 25 e 34, uniformidades de aplicação de, respectivamente, 43 e 41%.

A dotação aplicada no sulco 34 ficou aquém da pretendida pois este pertenceu ao último conjunto de sulcos regados.

6.1.3.3. Equações da geometria e do avanço

O método dos dois pontos é utilizado extensivamente no programa CaboGest, nomeadamente na determinação das equações da geometria do sulco, da equação do avanço bem como da equação de infiltração propriamente dita. Na figura 6.6. compara-se os valores observados com os valores obtidos pelo referido método no ensaio preliminar.

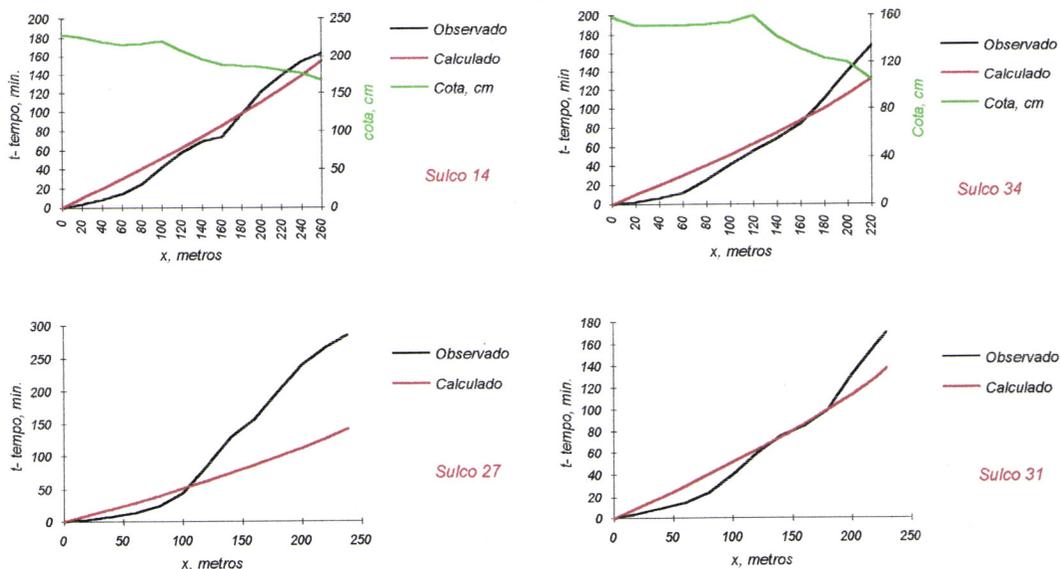
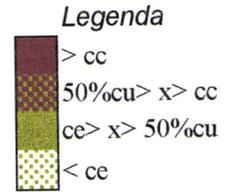


Figura 6.4. Tempos de avanço observados e calculados em quatro sulcos

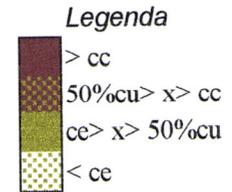
Sulco 25

	44 metros	110 metros	198 metros	
Prof. 0-10cm	37.3	20.1	22.4	cc=26.2, ce=15.1
Prof. 10-20cm	24.1	23.7	22.2	
Prof. 20-30cm	29.4	26.7	4.3	cc=29.7, ce=21.3
Prof. 30-40cm	30.1	29.4		
Prof. 40-50cm	19.8			
Z total, mm	116.2	79.9	33	



Sulco 34

	44 metros	110 metros	198 metros	
Prof. 0-10cm	23.8	15.6	22.5	cc=26.2, ce=15.1
Prof. 10-20cm	20.1	13.1		
Prof. 20-30cm	25.6			cc=29.7, ce=21.3
Prof. 30-40cm				
Prof. 40-50cm				
Z total, mm	56.6	20.1	12.2	



Nota: Teores de humidade em $\text{g/cm}^3 \times 100$ (percentagens). Para o cálculo do Z total, considerou-se o teor de humidade inicial igual à 4.3. Cc, ce e cu são, respectivamente, capacidade do campo, coeficiente de emurhecimento e a capacidade utilizável.

Figura 6.5. Teores de Humidade de amostras tiradas 24 horas depois da rega preliminar.

Verifica-se pela simples observação, que a equação de tipo potência obtida pelo método dos dois pontos representa bastante bem a geometria do sulco, e os tempos de avanço.

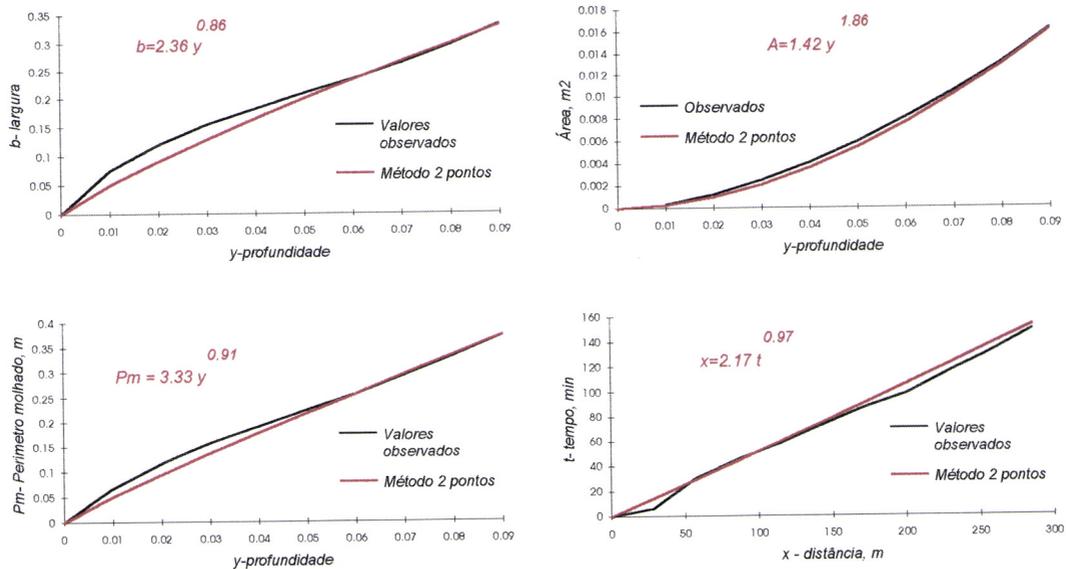


Figura 6.6. Comparação das equações da geometria do sulco e do avanço obtidos pelo CaboGest utilizando o método dos dois pontos, com os valores observados.

6.2. ENSAIO DEFINITIVO

6.2.1. Preparação do campo

Dadas as irregularidades existentes no declive dos sulcos, existindo mesmo, em alguns declives negativos, optou-se por fazer a colheita do girassol e abrir novamente os sulcos, tendo-se conseguido regularizar melhor o declive e obter sulcos mais fundos.

É de referir que o tractor passou duas vezes no mesmo sulco, conseguindo desta forma esmiuçar bastante bem o solo. Como resultado, o problema verificado com buracos nos sulcos foi resolvido.

O espaçamento entre sulcos foi aumentado para 3 metros de modo que possíveis transbordamentos não afectassem a rega nos sulcos adjacentes.

A rega foi realizada no dia 13 de Outubro, tendo utilizado o sulco 25 como controlo e o 55 como último sulco medição.

6.2.2. Preparação dos dados para o CaboGest

Para a determinação do perfil médio tiraram-se dados da geometria dos sulcos 25, 31, 35, 40, 46, 50 e 55. Mais uma vez utilizou-se o perfil da parte central dos sulcos por ser mais representativo do sulco todo. A comparação entre os perfis médios do ensaio preliminar e do ensaio definitivo (fig. 6.7) permite-nos constatar que estes sulcos são mais fundos e largas que os primeiros.

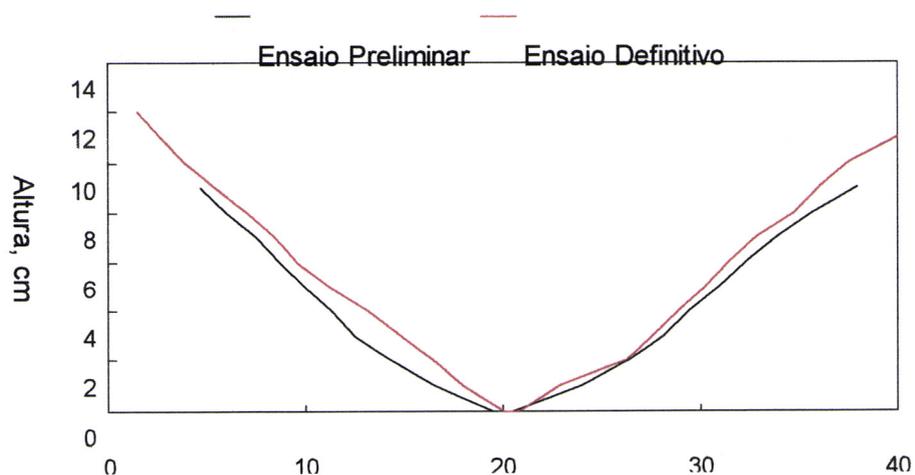


Figura 6.7. Comparação entre os perfis médios do ensaio preliminar e do ensaio definitivo.

Os parâmetros introduzidos no CaboGest para a rega definitiva estão apresentados no quadro 6.4.

<i>Parâmetros da Geometria</i>	
Geometria do sulco	Pares de valores $y-b$
a - parâmetro da equação da área	0.1403
u - parâmetro da equação da área	2.1621
<i>Parâmetros da Rega</i>	
Primeiro sulco regado	25
Último sulco regado	60
t_m - tempo do avanço até ao meio do sulco	14 min.
t_f - tempo do avanço até ao fim do sulco	37 min.
y_i - profundidade do escoamento no início do sulco	0.105 m.
y_m - profundidade do escoamento no meio do sulco	0.033 m.

Quadro 6.4. Parâmetros da geometria e da rega introduzidos no CaboGest..

6.2.3. Condução do Ensaio

Com o caudal mantido constante e igual a 10 l/seg , iniciou-se a rega. Desta vez, o avanço foi muito mais rápido, tendo atingido o final do sulco 25 em apenas 37 minutos. A rega continuou para os sulcos seguintes, e embora persistissem algumas irregularidades nos declives, não se verificaram muitos transbordamentos, para o que contribuiu também o facto dos sulcos serem mais fundos.

6.2.4. Resultados obtidos

6.2.4.1. Equação de infiltração e os tempos de avanço

Para esta rega, realizada com o mesmo caudal, CaboGest determinou a seguinte equação de infiltração, em m^3 por metro de sulco, com t em minutos:

$$Z = 0.005819 \cdot t^{0.486522} \quad (6.2)$$

O CaboGest recomendou a dotação de 10.15 mm, o que corresponde a um tempo de infiltração de cerca de 30 minutos.

Desta vez, o coeficiente de rugosidade determinado foi 0,04, o que reflecte os sulcos relativamente lisos e livres de detritos.

Sulco	Comprimento metros	Hora início previsto	Hora início efectivo	Duração do avanço, minutos	
				Calculado	Observado
25	220	-	9:54	38	37
27	238.1	-	10:31	60	
29	233.7	10:49	-1 min.	50	
31	229.3	11:08	-1 min.	57	62
33	224.9	11:27	-1 min.	43	
35	220	11:45	-1 min.	42	60
38	155.8	12:03	-1 min.	27	
40	207	12:17	-2 min.	44	63*
42	203.3	12:33	-2 min.	39	
44	202.1	12:49	-2 min.	38	
46	198	13:05	-2 min.	37	42*
48	195	13:21	-2 min.	40	
50	191	13:36	-2 min.	36	55
53	185.5	13:51	-2 min.	34	
55	182.5	14:06	-2 min.	36	67

* Avanço incompleto. O tempo indicado corresponde ao da posição máxima alcançada

Quadro 6.5. Tempos de avanço observados e calculados na rega definitiva

Os tempos de avanço observados e calculados, bem como as horas de início de rega em cada sulco determinadas pelo CaboGest, estão representados no quadro 6.5.

Verifica-se a partir dos tempos de avanço apresentados no quadro 6.5., que o avanço nos diferentes sulcos demorou entre 55 e 67 minutos. Por outro lado nos sulcos 40 e 46 a frente de avanço não conseguiu passar do meio dos sulcos, não se tendo completado o avanço.

Na figura 6.8. pode ver-se a evolução do avanço nos vários sulcos. Verifica-se que existe uma distinção nítida entre o sulcos de controlo (25), e os restantes sulcos regados com caudal decrescente típico do Cabo-rega. Existe uma certa variação nos tempos de avanço dos sulcos medição, o que é devido aos diferentes tempos de admissão, e também em parte à heterogeneidade do campo.

Na figura 6.9. estão apresentados os tempos de infiltração calculados e observados bem como o tempo de recessão em alguns sulcos.

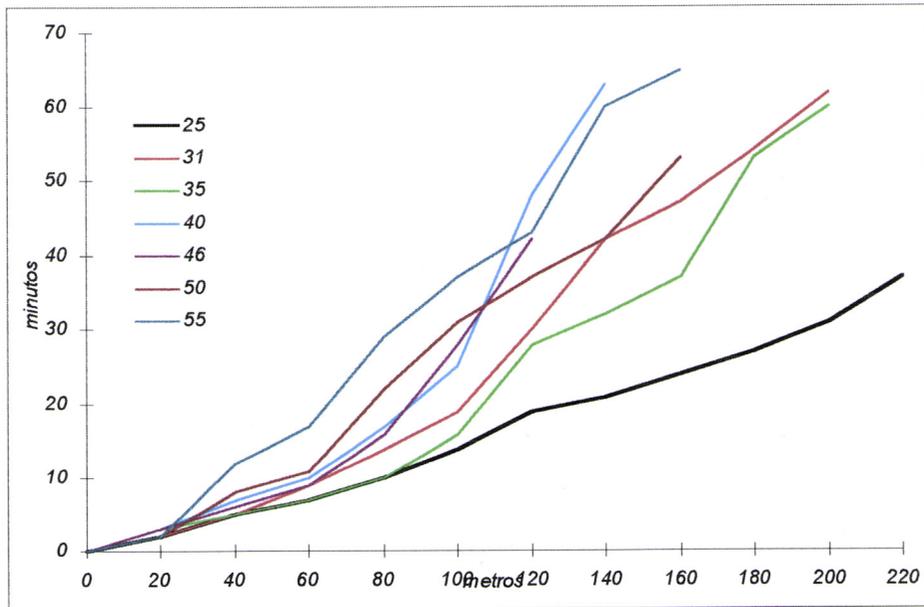


Figura 6.8. Comparação dos tempos de avanço observados no ensaio definitivo

6.2.4.2. Uniformidade de aplicação

Para o seu cálculo procedeu-se à colheita de amostras de solo cerca de 48 horas depois do fim da rega, apresentando-se na figura 6.10 os teores de humidade ao longo do sulco 35.

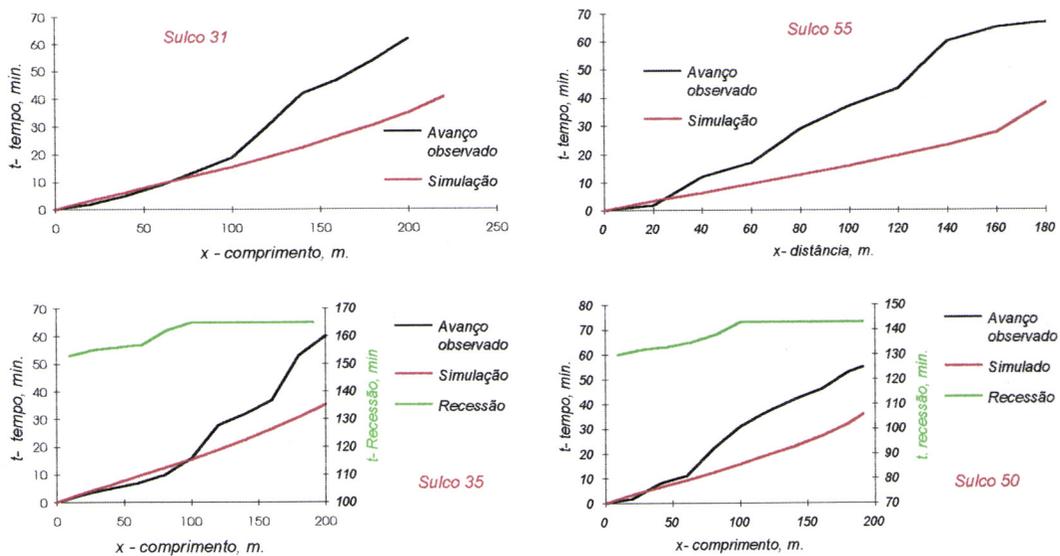


Figura 6.9. Tempos de avanço e de recessão medidos e calculados em alguns sulcos no ensaio definitivo.

Sulco 35

Posição	44 metros	110 metros	198 metros	
Oportunidade de Infiltração, min.	153	149	128	
Prof. 0-10cm	25.5	16.2	20	cc=26.2, ce=15.1
Prof. 10-20cm	25.1	21.9	21.5	
Prof. 20-30cm	35.4	26.2		
Prof. 30-40cm	38.3			cc=29.7, ce=21.3
Prof. 40-50cm	29.7			
Z total, mm	130.5	51.4	32.9	

Legenda

- > cc
- 50%cu > x > cc
- ce > x > 50%cu
- < ce

Nota: Teores de humidade em $g/cm^3 \times 100$ (percentagens). Para o cálculo do Z total, considerou-se o teor de humidade inicial igual à 4.3. Cc, ce e cu são, respectivamente, capacidade do campo, coeficiente de emurchecimento e a capacidade utilizável.

Figura 6.10. Teores de Humidade de amostras tiradas 48 horas depois da rega definitiva.

Embora os tempos de infiltração não sejam muito diferentes ao longo do sulco, verifica-se que o volume infiltrado foi muito menor a jusante. Este aspecto deve-se a caudais mais pequenos nessa parte, infiltrando através dum perímetro molhado mais reduzindo confirmando o papel do perímetro molhado sobre a infiltração. A uniformidade de aplicação no sulco foi de 46%, sendo ligeiramente melhor do que as obtidas no ensaio preliminar.

6.2.4.3. Equações da geometria e do avanço

Para o cálculo da equação de infiltração, determinaram-se diversas equações de geometria do sulco, utilizando o método dos dois pontos. Na figura 6.11. apresentam-se gráficos comparativos dos valores reais e os calculados pelo CaboGest utilizando o método dos dois pontos, tanto para a geometria, como para a equação do avanço. Verifica-se mais uma vez que o método reproduz fielmente os valores observados.

6.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.3.1. Influência da Geometria do sulco sobre o avanço

A figura 6.7. mostra a diferença entre os perfis médios dos dois ensaios. Esta diferença reflecte-se nos parâmetros da geometria, particularmente os parâmetros a e u da equação da área em função do Pm (Eq.5.9), o que implica velocidades de avanço diferentes, como se pode constatar na figura 6.12. Verifica-se, assim, que é possível, para um mesmo caudal e declive,

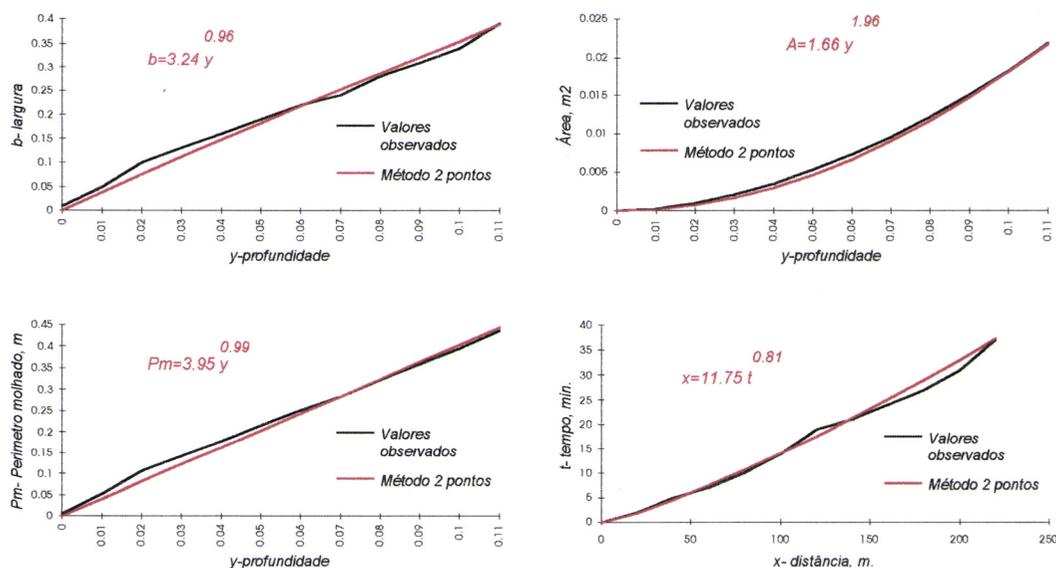


Figura 6.11. Comparação das equações da geometria do sulco e do avanço obtidos pelo CaboGest utilizando o método dos dois pontos, com os valores observados.

aumentar a velocidade do escoamento, e portanto a uniformidade de aplicação, alterando a relação A/Pm .

6.3.2. Simulações de avanço realizados pelo CaboGest

O programa determinou satisfatoriamente os coeficientes de rugosidade de Manning num e noutra ensaio, o que é importante para uma simulação adequada do escoamento.

Por outro lado, e desprezando a influência de irregularidades topográficas, observa-se que os tempos de avanço são subestimados pelo CaboGest (Quadros 6.3. e 6.5). Duma forma geral, pode-se afirmar que o modelo não conseguiu reproduzir o avanço lento verificado na parte jusante dos sulcos. Este facto põe em evidência um aspecto particular da utilização da equação de Manning com caudais pequenos em sulcos, nomeadamente a dependência do valor do coeficiente de rugosidade, n , do caudal. Ou seja, a medida que a profundidade da água no sulco diminui, a rugosidade exerce maior influência sobre o escoamento.

O CaboGest determina a velocidade do avanço na célula terminal utilizando a equação 5.2., derivada da equação de fluxo uniforme de Manning. É fácil verificar que as velocidades calculadas variarão pouco em função do caudal (fig.6.12).

$$V_{el} = a_v \cdot Q \left(Q \cdot \frac{n}{\sqrt{S}} \right)^{-3u/(5u-2)} \quad (5.2)$$

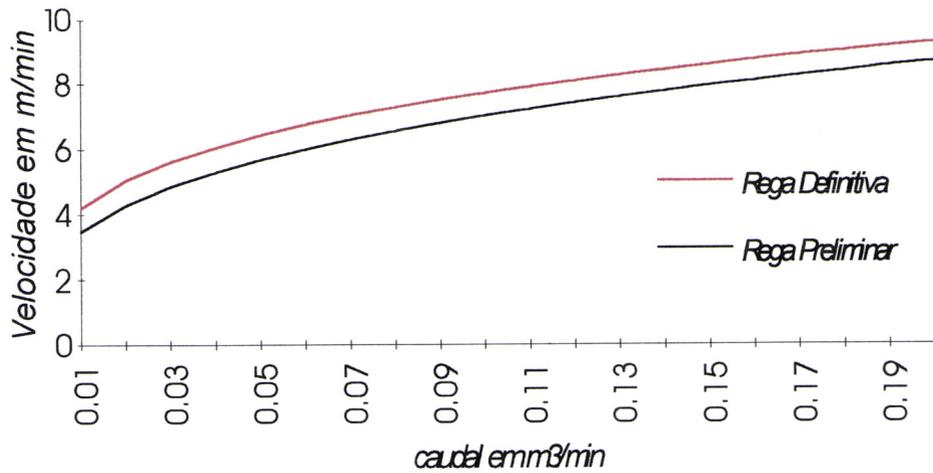


Figura 6.12. Variação da velocidade do avanço em função da geometria do sulco e do caudal disponível na frente do avanço.

6.3.3. Equações de Infiltração

A equação de infiltração obtida na primeira rega, indica uma infiltração excessiva para os solos Argiluiados. Este facto deve-se, como já foi referido, à existência de buracos e irregularidades no declive do sulco que prolongaram em demasia os tempos do avanço.

A equação de infiltração obtida pelo CaboGest no ensaio definitivo, pelo contrário, é uma equação típica e semelhante às encontradas no mesmo campo por Pereira (1992) para a primeira rega (fig. 6.13).

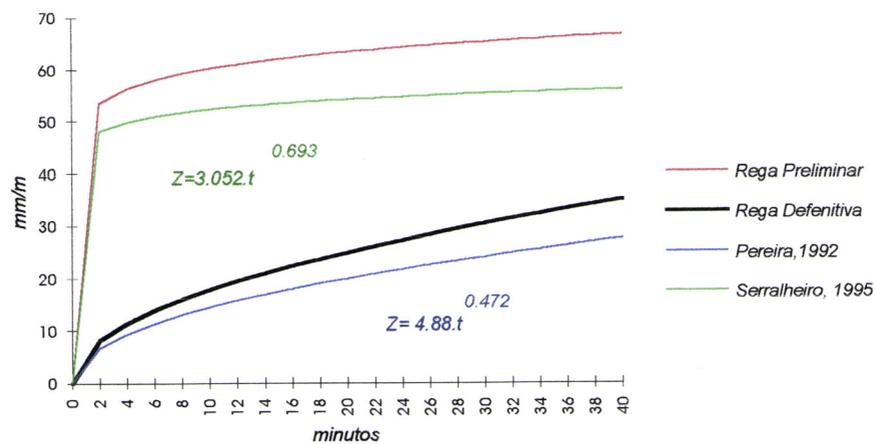


Figura 6.13. Representação gráfica de várias equações de infiltração obtidas em solos Argiluiados.

6.3.4. Efeito do perímetro molhado sobre a modelação do avanço

Como já foi referido no ponto 5.4.4.6, nos ensaios realizados, o CaboGest desprezou o efeito do Pm sobre a infiltração.

Na figura 6.14. apresentam-se simulações de avanço para os sulcos 31 e 35, realizados com o CaboGest, considerando o efeito do Pm sobre a infiltração. Verifica-se, pela análise das figuras que os avanços calculados pelo CaboGest numa maneira e outra são muito semelhantes.

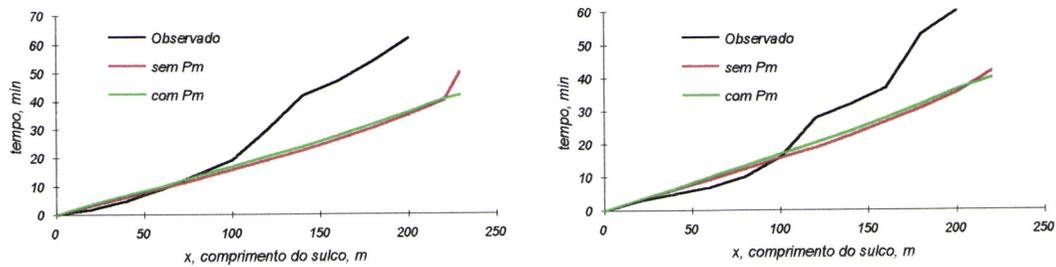


Figura 6.14. Simulações do escoamento com CaboGest, com e sem a utilização do Perímetro molhado.

6.3.5. Evolução da profundidade do escoamento no sulco

A profundidade do escoamento no sulco, bem como a largura da parte molhada foi medida em diversos sulcos ao longo da rega (anexo 9). Na figura 6.15. apresenta-se a evolução da profundidade do escoamento no sulco 35 durante a rega definitiva.

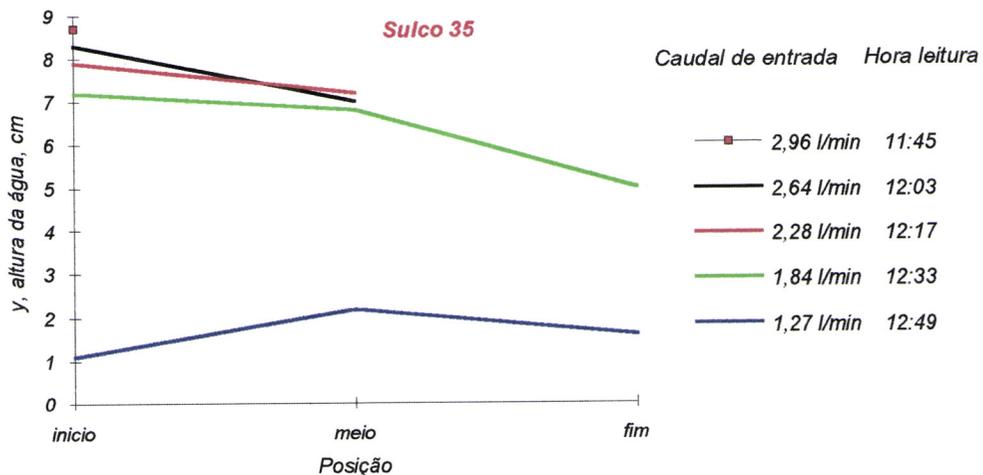


Figura 6.15. Evolução da profundidade do escoamento ao longo do sulco 35

Verifica-se, como seria de esperar, que a altura é maior à cabeceira e diminui para jusante do sulco. Por outro lado verifica-se uma diminuição da profundidade do escoamento ou seja do armazenamento superficial ao longo da rega, correspondendo a uma diminuição gradual do caudal de entrada.

Analisando esta figura conjuntamente com a figura 6.10, verifica-se que a profundidade do escoamento no sulco, ou seja o perímetro molhado, influencia a infiltração, pois embora os tempos de infiltração não sejam muito diferentes ao longo do sulco, verifica-se que a infiltração foi menor a jusante, onde a profundidade do escoamento era mais pequena.

6.3.6. Caudais de entrada e excedentes

Foram medidos os caudais à entrada e saída dos diferentes sulcos, utilizando canaletes e sondas de ultra-sons. Na figura 6.16. estão apresentados os hidrogramas de entrada e saída no sulco 35.

Verifica-se que embora a admissão tenha cessado às 13:05 h., continuaram-se a medir caudais excedentes até às 14:20 h. e que a recessão só terminou passadas 165 minutos do início da rega, ou seja às 14:30. Estes aspectos reflectem a baixa infiltrabilidade final do solo, bem como velocidades de escoamento no sulco relativamente pequenas na parte final da rega.

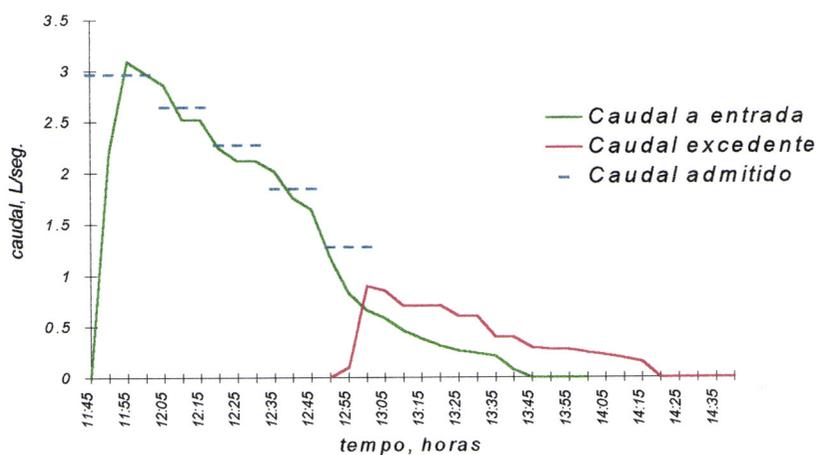


Figura 6.16. Hidrograma de entrada e saída no sulco 35. O caudal admitido representa o caudal debitado pelo Cabo-rega, enquanto que o caudal de entrada é o medido no canaleta.

6.3.7. Influência dos tempos de rega nos sulcos adjacentes

Devido às características inerentes ao sistema Cabo-rega, a rega em cada sulco é influenciada pelos tempos de admissão nos sulcos imediatamente a jusante. Ou seja, embora o método determine a velocidade do êmbolo para cada sulco, logo que o êmbolo passe para o sulco seguinte, o primeiro sulco fica sujeito aos tempos calculados para esse sulco. Por exemplo, o sulco 38 (Quadro 6.5), sendo mais curto que os restantes, provoca uma diminuição do tempo efectivo de admissão nos quatro sulcos a sua montante.

Capítulo 7

Conclusões

7. CONCLUSÕES

A análise dos resultados permite-nos tirar as seguintes conclusões:

- O equipamento electrónico de controlo desenvolvido funciona satisfatoriamente nas condições do ensaio. A adaptação futura de alimentação solar deverá permitir a sua autonomia total e utilização em qualquer campo.

- O princípio do método CaboGest mostra-se funcional e prático. A automação da observação dos tempos de avanço e das alturas de água deverá dispensar a intervenção humana desde o início da rega (considerando que se aceita a dotação recomendada.) Verifica-se que o maior inconveniente do método é a utilização dum único sulco para gerir a rega, o que dadas as variações inerentes aos próprios sulcos, poderá prejudicar as eficiências da rega. Assim, sugere-se a utilização de outros sulcos controlo, situados no início de alguns dos blocos de contorno que possam reajustar a velocidade do êmbolo. A versão do programa CaboGest fornecida com o presente trabalho já incorpora esta função.

- O programa CaboGest determinou satisfatoriamente as equações de infiltração nos dois ensaios. No primeiro, as irregularidades existentes no declive do sulco controlo afectaram a equação, o que não foi prejudicial, visto que o resto do campo apresentava as mesmas irregularidades.

- A modelação do escoamento realizada subestima sistematicamente os tempos de avanço na segunda metade dos sulcos. Este facto deve estar relacionado com um aspecto particular da equação utilizada para a determinação da velocidade do avanço, que se mostra pouco sensível às alterações do caudal, verificando-se, por exemplo, que a velocidade de avanço diminui apenas 50%, para uma diminuição do caudal de 90% (fig. 6.12).

Esta insensibilidade aparente da velocidade á diminuição da caudal, deve-se, como já foi referido por Bassett et al. (1980) à dependência do valor do coeficiente de rugosidade n , da profundidade da água no sulco. Por outras palavras, á medida que diminui o caudal, a rugosidade do sulco assume um papel mais importante no escoamento, pelo que o valor do n deve ser ajustado. Este aspecto é de extrema importância, visto que a maior parte dos modelos matemáticos de escoamento recorrem à equação de Manning para alguma parte da simulação do escoamento em sulcos.

Tudo indica que uma vez contabilizada a variação do n com o caudal, o programa CaboGest poderá modelar melhor o escoamento.

- A área infiltrante, ou seja o perímetro molhado afecta o volume infiltrado, e pode prejudicar a uniformidade de aplicação, caso os caudais na parte a jusante do sulco sejam pequenos.

- A geometria transversal do sulco tem grande influência sobre a velocidade do escoamento, e a sua manipulação pode melhorar a uniformidade de aplicação.

- Com parâmetros do campo semelhantes, e utilizando caudais iguais podem-se obter qualidades de rega muito diferentes. Isto justifica a determinação *in situ* da equação de infiltração e/ ou tempos do avanço para a realização duma rega com boas eficiências.

- Os sistemas electrónicos de Cabo-rega desenvolvidos até a data, incluindo o do presente trabalho, têm procurado de certa forma reproduzir o movimento contínuo do êmbolo obtido com a roda hidráulica. No entanto, uma abordagem mais desprendida revela que de facto não existe nenhuma necessidade desse movimento contínuo a velocidades variáveis. O que de facto é preciso é que o êmbolo "abra" os orifícios do Cabo-rega na altura pré-determinada. Por outras palavras é possível utilizar um sistema electrónico em que o êmbolo tenha uma única velocidade, passando rapidamente por cada orifício, parando no espaço entre dois orifícios aguardando a hora de "abrir" o orifício seguinte.

Um sistema deste tipo apresentará duas vantagens: simplificação do mecanismo de controlo, pois o motor eléctrico estará ou parado ou em funcionamento, não sendo necessário um variador de velocidades, e, como o êmbolo passa rapidamente pelos orifícios, parando no espaço entre eles, a abertura dos mesmos será mais regular.

- O aumento da popularidade do Cabo-rega passa certamente pela automação do seu sistema de controlo, associado a um aumento da economia de água. Os custos de instalação do equipamento descrito neste trabalho, ou do tipo desenvolvido por Sousa et al. (1992), nunca ultrapassam duas centenas de contos, o que é facilmente rentabilizado, considerando que o mesmo equipamento controlador poderá ser utilizado em vários campos.

7.1. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A experiência adquirida através da realização deste ensaio, bem como as conclusões tiradas, permitem sugerir como trabalhos importantes a desenvolver, os seguintes:

- Continuação da presente linha de investigação, não só através do desenvolvimento do equipamento, nomeadamente dos sensores do avanço, e medidores automáticos dos caudais de entrada, mas sim também, através do desenvolvimento e aperfeiçoamento do modelo CaboGest.

- Estudo da variação do coeficiente de rugosidade de Manning com a altura da toalha de água em sulcos. Visto a equação de Manning ser utilizada quase sempre na modelação do escoamento, este estudo é de grande importância, e está aparentemente negligenciada.

- Estudo da influência da geometria transversal dos sulcos sobre a velocidade do escoamento e portanto sobre a uniformidade da aplicação.

- Substituição do computador por um programador electrónico, do tipo normalmente utilizado na indústria, de modo a tornar o equipamento mais acessível aos agricultores. Estes programadores possuem memória, relógio de tempo real, para além de entradas analógicas, o que os torna capazes de gerir sistemas de rega. Este equipamento poderá ser desenvolvido em parceria com um fabricante de equipamento electrónico.

Bibliografia

BIBLIOGRAFIA

Basset, D.L., D.D. Fangmeier e T. Strelkoff (1983) *Hydraulics of surface irrigation*, in Design and operation of farm irrigation systems, ed. JENSEN, M.E., cap.12, St. Joseph, MI. ASAE.

Bautista, E. e W.W. Wallander (1985) *Spatial Variability of Infiltration in Furrows*. Transactions of the ASAE 28(6):1846-1851.

Cameira, M.R. (1991) *Sistema Cabo-rega aplicado a sulcos. Funcionamento, avaliação e gestão*. Relatório do Trabalho de Fim de Curso de Engenharia Agronómica. Lisboa, ISA.

Elliot R.L, W.R. Walker (1982) *Field Evaluation of Furrow Infiltration and advance functions*. Trans. of the ASAE, 25(2):396-400

Elliot R.L, W.R. Walker e G.V. Skogerboe (1982) *Zero inertia modeling of furrow irrigation advance*. Jor. of Irrig. and Drainage division, ASCE 108(IR3):179-195.

Elliot R.L, W.R. Walker e G.V. Skogerboe (1983a). *Furrow Irrigation Advance Rates: A dimensionless Approach*. Transactions of the ASAE 26(6):1722-1725,1731.

Elliot R.L, W.R. Walker e G.V. Skogerboe (1983b) *Infiltration parameters from furrow Irrigation advance data*. Transactions of the ASAE 26(6):1726-1731.

Fangmeier, D.D e M.K. Ramsey (1978) *Intake Characteristics of Irrigation furrows*. Transactions of the ASAE, 221(4):671-674.

Fok, Y.S. e A.A. Bishop (1965) *Analysis of water advance in surface irrigation*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 91 (IR1):99-117.

Goel M.C, W.D. Kemper, R. Worstell e J. Bondurant (1982) *Cablegation: III. Field assessment of performance*. Transactions of the ASAE 25(5): 388-395.

Haie, N. (1984). *Hydrodynamic simulation of continuous and surged surface flow*. Ph.D. Thesis, University of Utah, Logan.

Holzapfel, E.A., M.A. Mariño, e J. Chavez-Morales (1984) *Comparison and selection of furrow irrigation models*. Agric. Water Management 9:105-125.

Humphreys, M. e T.J. Trout (1990) *Feedback control of Cablegation systems*. Proceedings of the third national irrigation symposium, ASAE: 667-674.

Izadi, B. e W.W. Wallander (1985) *Furrow hydraulic characteristics and infiltration*. Transactions of the ASAE 28(6): 1901-1908.

Kemper, W.D. (1981) *Cablegation: I. Cable controlled plugs in perforated supply pipes for automatizing furrow irrigation*. Transactions of the ASAE 24(6): 1526-1532.

Kemper, W.D, e D.C. Kincaid (1982) *Cablegation: II. Simulation and Design of the moving-plug gated pipe irrigation system*. Transactions of the ASAE 25(2): 388-395.

Kincaid, D.C., e W.D.Kemper (1984) *Cablegation: IV. The bypass method and cutoff outlets to improve water distribution*. Transactions of the ASAE 27(3): 752-768.

Kincaid D.C. (1984) *Cablegation: V. Simulation and Design of the moving-plug gated pipe irrigation system*. Transactions of the ASAE 27(3): 769-772.

Kincaid D.C. (1985) *Cablegation: VI. The waterbrake controller*. Transactions of the ASAE 28(6): 1957-1960.

Kemper W.D, D.C. Kincaid D.C, R.V.Worstell, W.H.Heinemann, T.J.Trout, J.E.Chapman, F.W.Kemper e M.Wilson. (1985) *Cablegation type irrigation systems: Description, design installation and performance*. Draft copy, Kimberly, Idaho, USDA.

Kemper, W.D, T.J.Trout e D.C. Kincaid (1987) *Cablegation automated supply for surface irrigation*. In: Advance in Irrigation, Vol.4,D. Hillel, Ed. Academic Press, Inc.,:1-66.

Latimer, E. A. e D.L. Reddell (1989) *A real time automated control system for surface irrigation*. Eleventh International Congress on Agricultural Engineering at Dublin, Ireland. Citado por Latimer e Reddell, 1990.

Latimer, E.A. e D.L. Reddell (1990) *Real time automated furrow Irrigation system*. In: Visions of the Future, Proceedigs of the Third National Irrigation Symposium, ASAE, Phoenix, Atrizona:13-20.

Moller-Nehring W. e W. Bohrer (1994) *Universal Serial Interface protocol, USS protocol*. Siemens.

Odeland, N.(1996) *Análise Química dos solos da Herdade do cabido e Anexas*. Trabalho laboratorial realizado na Universidade de Évora.

Pereira, C.B. (1992) *Controlo computadorizado da rega por sulcos de contorno com "cut-back" em tubo de janelas*. Trabalho de fim de curso de Engenharia Agrícola. Évora, Universidade de Évora.

Reddell, D.L. e E.A. Latimer (1987) *Field Evaluation of an advance rate feedback irrigation system*. In: Irrigation Systems for the 21st Century, Proceedings/Irrigation & Drainage Div., ASCE, Portland, Oregon: 317-324.

Santos, A.M.M. (1992) *Desenvolvimento, Montagem e teste de um equipamento de Cabo-Rega para rega por sulcos*, trabalho de fim de curso, UEv. Évora.

Scaloppi, E.J, G.P. Merkle, e L.S.Willardson (1985) *Intake parameters from advance and wetting phase of surface irrigation*. Jour.of Irrigation and drainage engineering 121 (1): 57-70.

Serralheiro, R.P. e M.R. Oliveira (1994) *Furrow irrigation on a subsoiled brown mediterranean soil: Water balance and root growth*. Relatório N° 94-A-022 apresentado a AGENG'94, Milano.

Serralheiro, R.P. (1988) *Um estudo da rega por sulcos num solo argiluvado*. Tese apresentada na Universidade de Évora para a obtenção do grau de Doutor. Évora.

- Serralheiro, R.P.(1995) *Furrow Irrigation Advance and infiltration equations for a mediteranean soil*. J. agricultural .Engeneering Research. 62, 117-126.
- Siemens plc.(1995) *Micromaster operating instructions*. Siemens, Inglaterra.
- Silva, L.L. (1994) *Estudo de síntese das condições de projecto da rega por sulcos em terreno ondulado*. Tese apresentada no Instituto Superior de Agronomia para a obtenção do grau de Mestre. Lisboa.
- Skogerboe G.V., R.L.Elliot e W.R. Walker (1983) *Infiltration parameteres from furrow irrigation advance data*. Transactions of the ASAE 26(6): 1726-1731.
- Soil Conservation Service USDA (1979) *Furrow irrigation*. Soil Conservation National Engeneering Handbook.
- Tabuada, M.A., Z.J.C.Rego, G.Vachaud e L.S.Pereira (1995) *Modelling of furrow irrigation. Advance with two-dimentional infiltration*, Agricultrual Water Management 28, (3): 201-221.
- Trout, T.J. (1988) *Evaluation of cablegation system performance*. Kimberly, ID, USDA leaflet.
- Trout T.J., e D.C. Kincaid (1987) *Feedback control of cablegation irrigation systems*.ASAE Paper #87-2642 presented at the 1987 Winter meeting ASAE. St. Joseph, MI 49085-9659.
- Trout, T.J., D.C.Kincaid e W.D. Kemper (1990) *Cablegation: A review of the past decade and prospects for the next*. In: Visions of the Future. Proceedings of the third national irrigation symposium, ASAE: 21-27.
- Utah State University Foundation (1989) *SIRMOD - The surface irrigation simulation model, user's guide*. Logan, Utah State University.
- Walker, W.R. e R.L. Elliot (1982) *Field evaluation of furrow infiltration and advance functions*. Transactions of the ASAE 25(2): 396-400.
- Walker, W.R. e G.V. Skogerboe (1987) *Surface Irrigation. Theory and practice*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Anexos

ANEXO 1. ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DO CAMPO DE ENSAIO

Retenção de água no solo e a Densidade Aparente

	Profundidade		
	0-35 cm	35-55 cm	55-90 cm
Dap (g/cm ³)	1.72	1.74	1.83
CC (% de volume)	26.2	29.7	*
CE (% de volume)	15.1	21.3	*
U (% de volume)	11.1	8.4	*

* Valores não disponíveis

Análise Granulométrica da Terra fina

	Profundidade		
	0-35 cm	35-cm	55-90 cm
Argila	23.6	29.0	15.3
Limo	0.5	6.3	7.9
Areia fina	35.0	24.5	24.6
Areia grossa	40.9	40.2	52.2
Classificação, segundo Costa (1975)	franco-argilo-arenoso	franco-argilo-arenoso	franco-argilo-arenoso

Análise Química

	Profundidade		
	0-30 cm	30-50 cm	50-75 cm
pH	6.47	7.03	7.70
Cond. Eléctrica (mmhos cm ⁻¹)	0.031	0.042	0.036
Cálcio (meq/100g)	6.31	12.03	17.36
Magnésio (meq/100g)	3.60	12.08	16.80
Sódio (meq/100g)	0.22	0.37	0.63
Potássio (meq/100g)	0.14	0.18	0.17
CTC	10.80	20.80	36.10

ANEXO 2. OS COMPRIMENTOS DOS SULCOS E A DISTÂNCIA ENTRE OS ORIFÍCIOS DO CABO-REGA.

Sulco	Dis. entre Orifícios, cm	Comprimento, m
11	150	280.5
12	130	278
13	150	275.5
14	150	273
15	150	125
16	134	124
17	150	124
18	150	123
19	150	255
20	130	253.8
21	150	251.3
22	150	249.1
23	150	246.9
24	132	244.7
25	150	220
26	150	240.3
27	150	238.1
28	132	235.9
29	150	233.7
30	150	231.5
31	150	229.3
32	132	227.1
33	150	224.9
34	150	222.7
35	150	220
37	285	215
38	150	155.8
39	150	207.5
40	135	207
41	150	204.5
42	150	203.3
43	150	201.2
44	132	202.1
45	150	200
46	150	198
47	150	196.5
48	132	195
49	150	193
50	150	191
51	150	199.2
53	287	185.5
54	150	184
55	150	182.5
56	150	180
57	132	178.5
58	150	177
59	150	175.8
60	150	175
61	135	175

Nota: Na verdade os número não correspondem aos sulcos, más aos orifícios do Cabo-rega. Como o tubo não está exactamente perpendicular ao campo, e como a distância entre orifícios de tubos adjacentes é ligeiramente menor, resulta que os orifícios número 36 e 52 estão fechados. O Cabogest corrigirá automaticamente a velocidade do êmbolo.

ANEXO 3.LISTAGEM DO PROGRAMA CABOGEST

```
' Cabogest.BAS- 2,10,96
OPEN "COM1:1200,E,7,1,cdO,csO,dsO" FOR RANDOM AS #1: GOSUB 5000
SCREEN 12: CLS : COLOR 8: FOR i = 1 TO 119: PRINT " CaboGest "; "UEv  "; " 96 "; : NEXT i
COLOR 2: LOCATE 2, 6: PRINT " CaboGest - Gestor e Optimizador do Cabo-Rega VERSAO 1.3 "
LOCATE 3, 24: PRINT " Universidade de Evora, 95-96 "
COLOR 7: Col = 7

100 DIM sulc(100), dis(100), Comp(100), Q(50), h(50), Qs(400), Esp(400), t(70), cont(10), tc(100), Hzl(100)
OPEN "COMPRIM.DEM" FOR INPUT AS #2
INPUT #2, prim, num, cntrl
FOR i = prim TO num: INPUT #2, sulc(i), dis(i), Comp(i): NEXT i
FOR i = 1 TO cntrl: INPUT #2, cont(i), cx(i): NEXT i
CLOSE #2

150 VIEW (140, 320)-(490, 410), 0, 10
LOCATE 22, 22: INPUT "Primeiro sulco regado (S.Controlo)"; sulco
Pointer = sulco: pntr = sulco
LOCATE 23, 29: INPUT "Ultimo sulco regado"; ult
IF sulco > sulc(num) OR ult > sulc(num) THEN 150

200 IF sulco >= 25 THEN OPEN "Geomet2.dem" FOR INPUT AS #3: GOTO 202
OPEN "Geomet1.dem" FOR INPUT AS #3
202 INPUT #3, zz$, fmm, zz$, Xm, zz$, aPm, zz$, u

800 VIEW (32, 56)-(600, 410), 0, 2
s = .022: C = 150: Caudal = 600: Dpipe = 194:
s1 = .002: Nm = .04: d = 47.7: sy = .7: pmi$ = "nao "

810 LOCATE 6, 8: PRINT USING "1- Declive do tubo, ### m/m"; s
LOCATE 7, 8: PRINT USING "2- Rugosidade do tubo, ###"; C
LOCATE 8, 8: PRINT USING "3- Caudal total, ### litros/min"; Caudal
LOCATE 9, 8: PRINT USING "4- Diametro interno do tubo, ### mm"; Dpipe
LOCATE 10, 8: PRINT USING "5- Declive dos Sulcos, ### m/m"; s1
LOCATE 11, 8: PRINT USING "6- Diametro Equivalente das janelas, ### mm"; d
LOCATE 12, 8: PRINT USING "7- Factor de forma de armazenagem superficial, ###"; sy
LOCATE 13, 8: PRINT USING "8- N de Manning inicial, ###"; Nm
LOCATE 14, 8: PRINT USING "9- Distancia entre orificios, ### mm"; fmm
LOCATE 15, 8: PRINT USING "10- Localizacao do primeiro controlo, ### m"; Xm
LOCATE 16, 8: PRINT "11- Simulacao "; pmi$: "considera o Pm na modelacao "
COLOR 8: LOCATE 18, 8: PRINT "Os valores dos comprimentos dos sulcos e a sua geometria devem"
LOCATE 19, 8: PRINT "ser alterados a partir dos ficheiros Comprim.dem e Geomet.dem"

820 LOCATE 23, 24: COLOR 7: PRINT " <O> se concorda com os valores "; : COLOR 2
LOCATE 22, 7: INPUT "Para alterar algum valor, digite o numero da respectiva linha"; Z
LOCATE 22, 69: PRINT " "; : LOCATE 23, 24: COLOR 7: IF Z = 0 THEN 900
ON Z GOSUB 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841
GOTO 810
```

```

831 INPUT " Declive do tubo, m/m "; s: RETURN
832 INPUT " Rugosidade do tubo "; C: RETURN
833 INPUT " Caudal total, l/min "; Caudal: RETURN
834 INPUT " Diametro interno tubo, mm "; Dpipe: RETURN
835 INPUT " Declive dos Sulcos, m/m "; s1: RETURN
836 INPUT "Diametro equivalente janelas, mm"; d: RETURN
837 INPUT "Factor forma de Armz.superficial"; sy: RETURN
838 INPUT " N de Manning inicial "; Nm: RETURN
839 INPUT "Distância entre orificios, mm"; fmm: RETURN
840 INPUT "Localização primeiro controlo, m"; Xm: RETURN
841 IF pmi$ = "nao " THEN pmi$ = "": RETURN
    pmi$ = "nao ": RETURN

900 Q5 = C * (Dpipe ^ 4.865 * s / 60771451) ^ .54054
    P1 = Caudal / Q5
    CLS : COLOR 8: FOR i = 1 TO 119: PRINT " CaboGest"; "UEv "; " 96 "; : NEXT i
    VIEW (90, 107)-(540, 450), 0, 2

1320 H3mm = Dpipe * 13.8 * (C / 150) ^ .76 * s ^ 1.03 * P1 ^ .46 * (fmm * Dpipe / d ^ 2) ^ .56
1350 Qm = .00429 * d ^ 2 * SQR(H3mm)
1440 LOCATE 9, 25: COLOR 8: PRINT "Carga Piezométrica e Caudais"
1460 F3 = 60771451 / (C ^ 1.85 * Dpipe ^ 4.865)
1461 V3 = 22939 / Dpipe ^ 4
1470 Orifice = 1: h(1) = 0: Q3 = Caudal
1480 V1mm = Q3 ^ 2 * V3

1500 h1 = h(Orifice) / V1mm: IF h1 < .004 THEN h1 = .004
    Q(Orifice) = d * d * .0066023 * .65 * SQR(h(Orifice))
    IF Qm > 0 GOTO 1540
    Q(Orifice) = QC: h(Orifice) = 0: GOTO 1550
1540 Q(Orifice) = Q(Orifice) * (1 - .28 / (.4 + h1))
1550 Q3 = Q3 - Q(Orifice)
    LOCATE Orifice + 10, 20: PRINT USING "Orificio ### H (mm) ### Q(L/Min) ###.# "; Orifice; h(Orifice); Q(Orifice)

1610 IF Q3 <= 0 THEN 1730
1620 Orifice = Orifice + 1: V2mm = Q3 * Q3 * V3
1630 h(Orifice) = h(Orifice - 1) + fmm * (s - F3 * Q3 ^ 1.85) + V1mm - V2mm
1700 IF h(Orifice) <= 0 THEN h(Orifice) = 1
1710 V1mm = V2mm
1720 GOTO 1500

1730 LOCATE 21, 28: COLOR 7: PRINT "Posicionamento do êmbolo"
    LOCATE 22, 25: PRINT "Iniciar o fornecimento da água"
    LOCATE 24, 14: COLOR 4: PRINT "Premir uma tecla quando o êmbolo alcançar o sulco"; sulco;
    Hz = 50: stw = 127: GOSUB 5150: GOSUB 5150

1735 IF INKEY$ = "" THEN 1735
    time = TIMER: hh = INT(time / 3600): mm = INT((time - hh * 3600) / 60)

```

```
embolo = pntr: tc(embolo) = time / 60 + (dis(embolo) - 2) / 65: Hz = 50
GOSUB 5150
```

```
LOCATE 7, 25: COLOR 4: PRINT " Hora início da Rega"; hh; ":"; mm; ":"; COLOR 7
VIEW (95, 320)-(535, 410), 0, 2
```

```
1740 IF TIMER > tc(embolo) THEN Hz = 0: GOSUB 5150
```

```
COLOR 7: LOCATE 23, 14: PRINT "T.avanço até meio e fim do sulco (min, min)";
INPUT tm, tf
```

```
embolo = embolo + 1: IF fmm = 3000 THEN embolo = embolo + 1
tc(embolo) = time / 60 + tf + dis(embolo) / 15: Hz = 13.23: GOSUB 5150
eembolo = embolo: mudar = tc(embolo)
tcold = tc(embolo)
VIEW (95, 320)-(535, 410), 0, 10: COLOR 7
LOCATE 24, 23: PRINT " (0,0 se não possui esses dados)";
LOCATE 23, 14: INPUT "Prof.escoamento início, meio do sulco,(m,m)"; y1, y2
```

```
1750 VIEW (1, 1)-(639, 479), 0, 0: VIEW (22, 11)-(616, 330), 0, 2
```

```
COLOR 10: LOCATE 1, 30: PRINT " CaboGest Ver.1.3 "
LOCATE 9, 12: COLOR 2: PRINT " Equação de Infiltração pelo metodo de Elliot e Walker ": COLOR 7
INPUT #3, v1: J = INT(v1 / 2): 'Numero de dados disponiveis do perfil do sulco(incluindo y0)
DIM b(v1): DIM y(v1)
FOR i = 0 TO v1 - 1
  y(i) = i / 100: INPUT #3, b(i)
NEXT i
```

```
1770 bm = b(J): bf = b(v1 - 1): ym = y(J): yf = y(v1 - 1)
A2 = (LOG(bf / bm)) / LOG(yf / ym): A1 = (bf / (yf ^ A2))
LOCATE 4, 14: PRINT "Geometria do Sulco:", : COLOR 7
PRINT USING "b (m) = ##.## x y"; A1; : PRINT "^"; : PRINT USING "##.##"; A2
sig1 = A1 / (1 + A2): sig2 = 1 + A2
LOCATE 5, 43: PRINT USING "A (m2) = ##.## x y"; sig1; : PRINT "^"; : PRINT USING "##.##"; sig2
Sm = sig1 * (y1 ^ sig2) / 2: Sttl = (sig1 * (y1 ^ sig2) + 2 * sig1 * (y2 ^ sig2)) / 4
1780 Q0 = Q(Office) / 1000
```

```
1790 FOR i = 1 TO v1 - 1
  wp = 2 * ((y(i) - y(i - 1)) ^ 2 + (.5 * (b(i) - b(i - 1))) ^ 2) ^ .5
  wpf = wpf + wp
  IF i = J THEN wpm = wpf
NEXT i
```

```
g2 = (LOG(wpf / wpm)) / LOG(y(v1 - 1) / y(J)):
g1 = wpf / (y(v1 - 1) ^ g2)
LOCATE 6, 43: PRINT USING "Pm (m) = ##.## x y"; g1; : PRINT "^"; : PRINT USING "##.##"; g2
c2 = (3 * sig2) / (5 * sig2 - 2 * g2)
c1 = sig1 * (((g1 ^ .67) / (sig1 ^ 1.67)) ^ c2)
AO = c1 * ((Q0 * Nm) / (60 * (s1 ^ .5))) ^ c2
```

```
1800 'Calculo da curva de avanço
```

Flm = Comp(sulco):

$r = (\text{LOG}(\text{Flm} / \text{Xm})) / \text{LOG}(\text{tf} / \text{tm}): p = (\text{Flm} / (\text{tf} ^ r))$

1810 Vf = (QO * tf) / Flm - (.7 * AO)

Vm = (QO * tm) / Xm - (.7 * AO)

IF y1 = 0 THEN 1815

Vf = (QO * tf) / Flm - (Sttl)

Vm = (QO * tm) / Xm - (Sm)

1815 A = (LOG(Vf / Vm)) / (LOG(tf / tm))

Sz = (A + r * (1 - A) + 1) / ((1 + A) * (1 + r))

k = Vf / (Sz * (tf ^ A))

ki = k * A: Ai = A - 1

FOR J = 5 TO 100: zz = ki * J ^ Ai: IF zz < .0005 THEN 1816

NEXT J

1816 G = (k * J ^ A) / (fmm / 1000)

1820 LOCATE 10, 23: COLOR 10: PRINT USING "Z (m/min) = ##.##### x t"; k; : PRINT "^"; : PRINT USING "#####"; A

1900 VIEW (150, 166)-(450, 371), 0, 4

LINE (280, 180)-(280, 180)

FOR i = 1 TO 12: DRAW "L20 D3 U3": NEXT i

FOR i = 1 TO 7: DRAW "U20 L3 R3": NEXT i

FOR i = 1 TO 120 STEP .5

J = 2 * (1000 * k * i ^ A) / (fmm / 1000)

LINE (i * 2 + 40, 180 - J)-(i * 2 + 40, 180 - J), 10

NEXT i

LOCATE 13, 20: COLOR 7: PRINT "Z,mm": LOCATE 16, 22: PRINT "50"

LOCATE 23, 37: PRINT "50 100 min.";

LOCATE 25, 4: PRINT USING "Dotação Recomendada = ##.## mm"; G * 1000;

LOCATE 25, 40: PRINT "<1> Outro valor <2> Aceita este";

FOR w = 1 TO 500000: IF INKEY\$ = "1" THEN GOTO 4000

IF INKEY\$ = "2" THEN GOTO 2000

NEXT w

2000 VIEW (23, 50)-(615, 400), 0, 0

tInt = tf: 'Rutina de Simulação do avanço

VIEW (319, 50)-(638, 455), 0, 10: ij = 6

LOCATE 5, 41: COLOR 10: PRINT " Sulco, H.Inicio, T.avanço, Hz": COLOR 7

VIEW (1, 50)-(300, 100), 0, 10

VIEW (1, 120)-(300, 260), 0, 10

2040 Vinfttl = 0: Qttl = 0: Vsupttl = 0: Posi = 0:

ap = aPM ^ (-5 / (5 * u - 2)): c4 = 3 / (5 * u - 2)

av = aPM ^ (2 / (5 * u - 2)): c6 = -(3 * u) / (5 * u - 2)

aa = aPM ^ (-2 / (5 * u - 2)): c8 = (3 * u) / (5 * u - 2)

adv = Orifice

Qs(1) = Q(Orifice) / 1000: Qss = Q(Orifice) / 1000

WetPmax = ap * (Qs(1) * Nm / (60 * (s1 ^ .5))) ^ c4

2050 FOR tinc = 1 TO 500

zz\$ = INKEY\$: IF zz\$ = CHR\$(27) THEN 6200

WetPmin = (Nm - .04) * 4: IF Nm <= .04 THEN WetPmin = 0

IF tinc / INT(tint) <> INT(tinc / INT(tint)) THEN 2055

adv = adv - 1: Qss = Q(adv) / 1000

VIEW (1, 350)-(300, 455), 0, 10

LOCATE 24, 2: PRINT USING "Orificio ##; Caudal entrada=#####; Orifice - adv; Qss;

IF Qss = 0 THEN 2300

2055 Vel = av * Qs(tinc) * (Qs(tinc) * Nm / (60 * (s1 ^ .5))) ^ c6: 'assim Vel vem em m/min

2060 Esp(tinc) = Vel: Posi = Posi + Vel: Vinfl = 0

WetPm = WetPmin + ap * (Qs(tinc) * Nm / (60 * (s1 ^ .5))) ^ c4

IF Posi > Flm THEN 2100

FOR inc = 1 TO tinc

2070 Vinf = Esp(inc) * kl * ((tinc - inc + 1) ^ Al): ' * (WetPm / WetPmax)

Vinfl = Vinfl + Vinf

NEXT inc

IF pmf\$ = "" THEN Vinfl = Vinfl * (WetPm / WetPmax)

2075 Vsupt = Esp(tinc) * aPM * (WetPm ^ u): LOCATE 4, 5

Vsupttl = Vsupttl + Vsupt

Qttd = Qttd + Qss

Vinfddl = Vinfddl + Vinfl

Qs(tinc + 1) = (Qttd - Vinfddl - Vsupttl) / (tinc + 1)

2080 IF Qs(tinc + 1) > 0 THEN 2090

Posi = Posi - Vel: Vel = Vel * .9

Vinfddl = Vinfddl - Vinfl: Qttd = Qttd - Qss

Vsupttl = Vsupttl - Vsupt: Vsupttl = Vsupttl * .995

VIEW (1, 280)-(300, 330), 0, 10: COLOR 8

zz\$ = INKEY\$: IF zz\$ = CHR\$(27) THEN 6200

LOCATE 20, 2: PRINT "Caudal insuficiente. Reducao da Vel."

LOCATE 19, 2: PRINT "Incremento "; tinc: COLOR 7: GOTO 2060

2090 LOCATE 10, 2: PRINT USING "Sulco ### Comprimento ###.##m"; sulco; Flm

LOCATE 12, 2: PRINT USING "tempo= ###min Posicao= ###.##m"; tinc; Posi

LOCATE 13, 2: PRINT USING "Qttd = ###.###m3"; Qttd

LOCATE 14, 2: PRINT USING "Vinfddl= ###.### Vdsupttl= ###.###"; Vinfddl; Vdsupttl

LOCATE 15, 2: PRINT USING "Qs(tinc)=##### Qss= ###.###"; Qs(tinc); Qss

LOCATE 16, 2: PRINT USING "Pm = ###.##m Vel(m/min)= ###.###"; WetPm; Vel;

time = TIMER: h2 = INT(time / 3600): m2 = INT((time - h2 * 3600) / 60)

IF embolo <> eembolo THEN mudar = tc(embolo)

IF time / 60 < mudar THEN 2095

Hz = Hz1(embolo)

pntr = pntr + 1: IF fmm = 3000 THEN pntr = pntr + 1

```

embolo = sulc(pntr): GOSUB 5150

2095 LOCATE 3, 35: COLOR 4: PRINT USING "Hora ##:##"; h2; m2: COLOR 7
NEXT tinc

2100 IF inf$ = "ok" THEN 2200
IF sentido$ = "ok" THEN 2150
LOCATE 5, 2: PRINT USING "Nm= ### -"; Nm; : PRINT " Acertando o N de Manning"
IF tinc > 1.04 * tf AND sentido$ = "aumentar" THEN Nm = Nm - .0025: sentido$ = "ok": GOTO 2040
IF tinc < .96 * tf AND sentido$ = "diminuir" THEN Nm = Nm + .0025: sentido$ = "ok": GOTO 2040
IF tinc > 1.04 * tf THEN sentido$ = "diminuir": Nm = Nm - .005: GOTO 2040
IF tinc < .96 * tf THEN sentido$ = "aumentar": Nm = Nm + .005: GOTO 2040

2150 CLS : COLOR 10: LOCATE 5, 2: PRINT USING "Sulco controle = ### Nm = ### "; sulco; Nm: COLOR 7
IF zc <> 0 THEN zc = 0: Flm = Comp(sulco): inf$ = "ok": GOTO 2040

2200 Tinf = ((G * fmm / (1000 * k)) ^ (1 / A)) / (Orifice - 1)
t(sulco) = tInt + Tinf: VelCR = fmm / (1000 * t(sulco))
Hz = (-.6458 * VelCR ^ 2) + 73.664 * VelCR + 2.1936
tc(sulco) = tcold + t(sulco): Hz1(sulco) = Hz
COLOR 8: LOCATE 6, 2: PRINT USING "temp.nec.p/infiltrar ##mm= ##.#min"; G * 1000; Tinf * (Orifice - 1): COLOR 7
LOCATE ij, 41: ij = ij + 1: IF ij = 29 THEN ij = 7: Col = 2
COLOR Col: PRINT USING " ### ##:## ## ##.#"; sulco; hh; mm; tinc; Hz: COLOR 8
IF inf$ <> "ok" THEN hh = hh + INT((tf + mm) / 60): mm = mm + tf - 60 * INT((tf + mm) / 60)
IF inf$ = "ok" THEN hh = hh + INT((t(sulco) + mm) / 60): mm = mm + t(sulco) - 60 * INT((t(sulco) + mm) / 60)

Pointer = Pointer + 1: IF fmm = 3000 THEN Pointer = Pointer + 1
IF Pointer > ult THEN 6000
tcold = tc(sulco)
sulco = sulc(Pointer):
Flm = Comp(Pointer): inf$ = "ok"

FOR zc = 1 TO cntr:
IF sulco = cont(zc) THEN 2250
NEXT
tInt = INT(tinc / (Orifice - 1)): zc = 0: GOTO 2040

2250 VIEW (1, 35)-(300, 455), 0, 10: COLOR 4
LOCATE 24, 2: INPUT "T. avanco ate posicao controle"; tf
inf$ = "": sentido$ = "": Flm = cx(zc): GOTO 2040

2300 LOCATE 23, 2
IF Posi >= Flm THEN 2200
LOCATE 23, 2: PRINT "O Intervalo entre 2 orificios passa"
tInt = tInt + 1: LOCATE 24, 2: PRINT USING "para ##.# minutos"; tInt;
zz$ = INKEY$: IF zz$ = CHR$(27) THEN 6200
GOTO 2040

4000 LOCATE 20, 60: INPUT "Dotação,mm"; G: G = G / 1000: GOTO 2000

```

```

5000 DATA 2,12,1,0,0,0,0,0,0
      STWh = 12: stw = 126: hsw = 0: hswh = 0
5020 RESTORE 5000: BCC = 0: Z$ = "": COLOR 8: LOCATE 4, 15
      FOR i = 1 TO 9
        READ A: J$ = CHR$(A)
        Z$ = Z$ + J$: BCC = BCC XOR A
      NEXT i
      Z$ = Z$ + CHR$(STWh): BCC = BCC XOR STWh
      Z$ = Z$ + CHR$(stw): BCC = BCC XOR stw
      Z$ = Z$ + CHR$(hswh): BCC = BCC XOR hswh
      Z$ = Z$ + CHR$(hsw): BCC = BCC XOR hsw
      J$ = CHR$(BCC)
      Z$ = Z$ + J$
      PRINT #1, Z$
      RETURN

5150 hsw = INT((Hz * 16384) / 50): hswh = 0
      IF hsw > 255 THEN hswh = INT(hsw / 256): hsw = hsw - hswh * 256
      GOTO 5020

6000 VIEW (1, 50)-(300, 455), 0, 10
      LOCATE 6, 10: COLOR 7: PRINT "Controlo da Rega"

6050 COLOR 4: LOCATE 22, 2: PRINT " <1> Para Controlo Manual "
      time = TIMER: h2 = INT(time / 3600): m2 = INT((time - h2 * 3600) / 60)
      IF embolo <> eembolo THEN mudar = tc(embolo)
      IF time / 60 < mudar THEN 6100
      Hz = Hz1(embolo)
      pntr = pntr + 1: IF fmm = 3000 THEN pntr = pntr + 1
      embolo = sulc(pntr): GOSUB 5150

6100 LOCATE 3, 35: COLOR 4: PRINT USING "Hora ##:##"; h2; m2: : COLOR 7
      COLOR 2: LOCATE 15, 7: PRINT USING "Sulco sendo regado: ##"; embolo
      LOCATE 16, 7: PRINT USING "Frequência: ##.## Hz"; Hz1(embolo)
      IF INKEY$ = " " THEN GOSUB 6120
      GOTO 6050

6120 COLOR 7: LOCATE 22, 4: PRINT "(O para acabar a rega e sair)"
      LOCATE 21, 4: INPUT "Qual a frequencia desejada? ", Hz: Hz1(embolo) = Hz
      GOSUB 5150: IF Hz = 0 THEN 6200
      LOCATE 21, 4: PRINT "
      RETURN

6200 PRINT "Acabar": STOP

```

ANEXO 4- LISTAGEM DOS VARIÁVEIS DO CABOGEST

As colunas indicam a localização do variável no programa, a sua descrição, origem e os variáveis associados.

Variavel	Loc.	Descrição	Origem	Var.Assoc
a	bcd	Coef. da Equação de infiltração	$a = (\text{LOG}(Vf / Vm)) / (\text{LOG}(tf / tm))$	ai
AO	b	Inlet flow area, m2	$AO = c1 * ((QO * Nm) / (60 * (\epsilon1 ^ {Vf, Vm} .5))) ^ c2$	
A1	b	Parametros da equação do b	$A1 = (bf / (yf ^ A2))$	sig1,2
A2	b	Parametros da equação do b	$A2 = (\text{LOG}(bf / bm)) / \text{LOG}(yf / ym)$	
aa	c	Coef. da Eq. da área molhada apartir do caudal	$aa = aPM ^ (-2 / (5 * u - 2))$	c8
adv	c	posição do sulco em relação ao embolo (1 corresponde ao sulco mais afastado)	$adv = \text{Orifice}, adv = adv - 1$	Qss
ai	c	Derivada do a da Eq. infiltração	$ai = a - 1$	a, k, ki
ap	c	Coef. da Eq.do PM apartir do caudal	$ap = aPM ^ (-5 / (5 * u - 2))$	WetPmax, WetPm,c4
aPm	c	coef. da equação $A = aPm.P^u$	Dado	u
av	c	coef. da Eq. da Velocidade apartir do caudal	$av = aPM ^ (2 / (5 * u - 2)):$	Vel, c6
BCC	e	Caráter de verificação do telegrama	XOR	Z\$
b(i)	b	perfil transv. sulco, largura, m	READ	y(i), v1
bf	b	perfil transv. Sulco, largura no topo	$bf = b(v1 - 1)$	
bm	b	perfil transv.Sulco, largura meio	$bm=b(j)$	
C	a	rugosidade do tubo	Dado inicial (=150)	
c1	b	Coef. da Equ. da área do Perfil trans.apartir do caudal	$c1 = sig1 * (((g1 ^ .67) / (sig1 ^ 1.67)) ^ c2)$	AO,c2
c2	b	Coef. da Equ. da área do Perfil trans.apartir do caudal	$c2 = (3 * sig2) / (5 * sig2 - 2 * g2)$	AO,c1
c4	c	Coef da Eq. do PM apartir do Caudal	$c4 = 3 / (5 * u - 2)$	ap
c6	c	Coef. da Eq. da Velocidade apartir do caudal	$c6 = -(3 * u) / (5 * u - 2)$	av, Vel
c8	c	Coef. da Eq. da Área molhada apartir do caudal	$c8 = (3 * u) / (5 * u - 2)$	aa
Caudal	abc	Caudal total, lpm	Dado (=600)	
cntrl	d	quantidade de sulcos controlo	Comprim.dem	
cont(10)	d	número do sulco controlo	Comprim.dem	
comp (1)	c	comprimento dos sulcos,m	Comprim.dem	
cx(10)	d	Posição (em metros) do primeiro sensor de avanço no sulco controlo	Comprim.dat	
D	a	Diametro equivalente das janelas, mm	Dado (=47.7)	

Variavel	Loc.	Descrição	Origem	Var.Assoc
dis(100)	c,d	Distância real entre os orifícios do tubo do cabo	Comprim.dat	
Dpipe	a	Diametro Interno do Tubo, mm	Dado (=194)	
embolo	e	Posição do êmbolo	pntr	tc(embolo)
eembolo	e	segundo sulco, Posição do êmbolo	embolo	tc(embolo)
Esp(tinc)	c	Espaço percorrido no incremento de tempo	Esp(tinc) = Vel	Vinf, Vsup
F3	a	Coeficiente de perdas de carga devido a fricção	$F3 = 60771451 / (C ^ 1.85 * Dpipe ^ 4.865)$	h(orifice)
F1m	b,c	Comprimento do sulco em análise	F1m = Comp(Sulco)	p, Posi, cx(zc)
Fmm	a	'distancia médio entre sulcos, mm	Dado (= 1500)	
G	c	dotação pretendida, mm	Input no campo	
g1	b	Coef.da Eq. do Perimetro molhado	$g1 = wpf / (y(v1 - 1) ^ g2)$	c1,g2
g2	b	Coef. da Eq. do Perimetro molhado	$g2 = (LOG(wpf / wpm)) / LOG(y(v1 - 1) / y(j))$	c2,g1
h()	a	altura piezométrica em cada orificio, mm	$h(Orifice) = h(Orifice - 1) + Fmm * (s - F3 * Q3 ^ 1.85) + V1mm - V2mm$	
h1	a	ratio of piezometric to velocity head	$h1 = h(Orifice) / V1mm$	Q(orifice)
H3mm	a	Maximum head	$H3mm = Dpipe * 13.8 * (C / 150) ^ .76 * s ^ 1.03 * P1 ^ .46 * (Fmm * Dpipe / D ^ 2) ^ .56$	Qm
hh	b,c	hora real, hora movimento embolo	$hh = INT(a / 3600)$	a,mm
hsw	e	Frequência pretendida	$hsw = INT((Hz * 16384) / 50):$	Z\$
hswh	e	Byte alto do hsw		Z\$
Hz	e	frequência actual do inversor	$Hz = (-.6458 * VelCR ^ 2) + 73.664 * VelCR + 2.1936$	hsw
Hz1()	e	Frequências do inversor calculados	Hz	hsw
ij	d	posição do cursor		
inc	c	incremento de espaço, para o cálculo do volume infiltrado no sulco, num dado tinc	ciclo FOR-NEXT	Vinf, Vinf1
inf\$	d	indicador de se ter concluido avanço no sulco	IF THEN	
j	b	Número de dados disponiveis do perfil do sulco/2	$j = INT(v1/2)$	v1
k	b,c	Coef da Eq. de infiltração	$k = Vf / (Sz * (tf ^ a))$	ki
ki	c	derivada do k da Eq. de Infiltração	$ki = k * a$	a,ai,k

Variavel	Loc.	Descrição	Origem	Var.Assoc
Nm	c	Mannings n	Processo iterativo. Valor inicial = 0.04	
mm	b,c	minutos da hora real	$mm = INT((a - hh * 3600) / 60)$	a, hh
mudar	e	hora do êmbolo avançar para um novo orifício	tc(embolo)	time/60
num	c	número de sulcos, total	Comprim.dem	prim
Orifice	a	orifício - ponteiro		adv
p	b	parametro da Eq. de avanço	$p = (Flm / (tf ^ r))$	r
P1	a	fracção caudal ttl/capacidade tubo	$P1 = Caudal / Q5$	H3mm
pntr	e	posição do êmbolo, relativo aos orifícios do tubo do Caborega	$pntr = pntr + 1$	embolo
pointer	d	ponteiro para leitura nº dos sulcos		
Posi	c	Posição da frente de humedecimento	$Posi = Posi + Vel$	Flm
prim	b,c	primerio sulco	Comprim.dem	num
Q0	b,c	caudal do 1º orifício, m³/min	$Q0 = Q(Orifice) / 1000$	AO,Vf,Vm
Q(orifice)	a	caudal em cada orifício, lpm	$Q(Orifice) = D * D * .0066023 * .65 * 5QR(h(Orifice))$	
Q3	a	fluxo no tubo	$Q3 = Caudal$	V1mm, V2mm
Q5	a	Pipe flow capacity, lpm	$Q5 = C * (Dpipe ^ 4.865 * s / 60771451) ^ .54054$	P1
Qm	a	fluxo máximo dos orifícios, lpm	$Qm = .00429 * D ^ 2 * 5QR(H3mm)$	
Qs()	c	caudal disponível para o incremento seguinte, m³/m	$Qs(1) = Q(Orifice) / 1000;$ $Qs(tinc + 1) = (Qttil - Vinfttl - Vsupttl) / (tinc + 1)$	Vel, WetPm, WetPmax
Qss	c	caudal a ser debitado no sulco em análise, m³/m	$Qss = Q(Orifice) / 1000$	Qttil
Qttil	c	Volume ttl administrado no sulco	$Qttil = Qttil + Qss$	Q(s)
r	b	Parametro da Eq. do avanço	$r = (LOG(Flm / Xm)) / LOG(tf / tm)$	p,sz
sentido\$	d	indicador do sentido de correcção do Nm		
sig1	b	Coef. da Eq. da área transversal	$sig1 = A1 / (1 + A2)$	sig2,c1
sig2	b	Coef. da Eq. da área transversal	$sig2 = 1 + A2$	sig1,c2
Sm	b	área Secç.Transv.meio sulco	$Sm = sig1 * (y1 ^ sig2) / 2$	Vm,Sttl
Sttl	b	área secç.Transv.fim sulco	$Sttl = (sig1 * (y1 ^ sig2) + 2 * sig1 * (y2 ^ sig2)) / 4$	Vf,Sm
Stw	e	Área de dados do processo	127, 12	Z\$
Stwh	e	byte alto do Stw		Z\$
Sulc()	a	Número de sulco	Comprim.dem	

Variavel	Loc.	Descrição	Origem	Var.Assoc
sy	b	Factor de forma de armazenagem superficial	Dado (=0.7)	Vf,Ym
Sz	b	factor deforma sub-superficial	$Sz = (a + r * (1 - a) + 1) / ((1 + a) * (1 + r))$	k
tc(embolo)	e	hora de mudança da velocidade do êmbolo	$tc(sulco) = tcold + t(sulco)$	time/60
tcold	e	hora de mudança anterior, tc(embolo)anterior	$tcold = tc(sulco)$	tc(sulco)
t(sulco)	d	tempo ttl nec. entre 2 orificios para realizar o avanço e infiltrar a dotação pretendida	$t(Sulco) = tint + Tinf$	VelCR
time	b,c	leitura do relógio interno	TIMER, Relog.interno do sistema	hh,mm
tinc	c	incremento de tempo (desde o início de rega em cada sulco)	ciclo FOR-NEXT	Esp(),Qs(), Vinf, tint, ciclo inc
Tinf	d	tempo necessário para infiltrar a dotação pretendida/ número de sulcos regados ao mesmo tempo	$Tinf = ((G * Fmm / (1000 * k)) ^ (1 / a)) / (Orifice - 1)$	t()
tint	c,d	intervalo de tempo entre dois orificios	$tint = INT(tinc / (Orifice - 1))$	t(Sulco)
tf	b,d	tempo de avanço até ao fim do sulco, ou até posição controlo	Input do campo	tm
tm	b	tempo de avanço até ao meio do sulco	Input do campo	tf
u	c	coef. da equação $A = aPm.P^u$	Dado	aPM
v1	b	Numero de dados disponiveis do perfil do sulco(incluindo y0)	READ	j
V1mm	a	velocity head	$V1mm = Q3 ^ 2 * V3$	h1, V2mm
V2mm	a	Velocity head	$V2mm = Q3 * Q3 * V3$	V1mm
V3	b	velocity head factor	$V3 = 22939 / Dpipe ^ 4$	V1mm, V2mm
Vel	c,d	velocidade da frente de humedecimento, m/min	$Vel = av * Qs(tinc) * (Qs(tinc) * Nm / (60 * (e1 ^ .5))) ^ c6$	Esp(), Posi
VelCR	d	Velocidade do embolo m/min	$VelCR = Fmm / (1000 * t(Sulco))$	Hz, t()
Vinf	c	Volume infiltrado no incremento do espaço e no incremento do tempo	$Vinf = Esp(inc) * ki * ((tinc - inc + 1) ^ AI) * (WetPm / WetPmax)$	Vinf1
Vinf1	c	somatório dos volumes infiltrados no incremento do tempo	$Vinf1 = Vinf1 + Vinf$	Vinf, Vinf1
Vinf1	c	Volume infiltrado total no sulco,m3	$Vinf1 = Vinf1 + Vinf$	Qs()
Vf	b	volume infiltrado no fim do sulco	$Vf = (QO * tf) / Flm - (Sttl)$	a,Sz,k
Ym	b	volume infiltrado no meio do sulco	$Ym = (QO * tm) / Xm - (Sm)$	a

Variavel	Loc.	Descrição	Origem	Var.Assoc
Vsup	c	Volume de armazenamento superficial no troço	$V_{sup} = Esp(tinc) * a_{PM} * (WetPm \wedge u):$	Vsupttl
Vsupttl	c	Volume ttl de armazen. superficial	$V_{supttl} = V_{supttl} + V_{sup}$	Qs(),Vsup
WetPm	c	perimetro molhado	$WetPm = WetPmin + ap * (Qs(tinc) * Nm / (60 * (s1 \wedge .5))) \wedge c4$	Vinf, Vsup
WetPmax	c	Perimetro molhado máximo	$WetPmax = ap * (Qs(1) * Nm / (60 * (s1 \wedge .5))) \wedge c4$	Vinf
WetPmin	c	Perimetro molhado mínimo (opção), função do Nm, m	$WetPmin = (Nm - .04) * 4: IF Nm <= .04 THEN WetPmin = 0$	WetPm
wp	b	parcela do perimetro molhado	$wp = 2 * ((y(i) - y(i - 1)) \wedge 2 + (.5 * (b(i) - b(i - 1))) \wedge 2) \wedge .5$	wpf,wpm
wpf	b	perimetro molhado ttl	$wpf = wpf + wp$	g2,g1
wpm	b	perimetro molhado até metade do y	$IF i = j THEN wpm = wpf$	g2,
Xm	b	distância até ao meio do sulco, m	Dado (=100 ou 140.25)	
y(i)	b	perfil transversal sulco, altura, m	Pares de dados	b(i), v1
yf	b	perfil trans.sulco, altura ttl,m	$yf = y(v1 - 1)$	
ym	b	perfil trans.sulco, altura no meio	$ym = y(j)$	
y1	b	altura da água no meio do sulco	Input do campo	y2
y2	b	altura da água no fim do sulco	Input do campo	y1
Z\$	e	Telegrama a enviar	$Z\$ = Z\$ + J\$$	print #1
zc	d	número do sulco controlo em análise	ciclo FOR-NEXT	
zz\$		dummy	INPUT	

Legenda:

Linhas

a= Determinação dos caudais,	1- 1730
b= Determinação da Eq.infiltração,	1730- 2000
c= Algoritmo do Avanço,	2000-2100
d= Subrotinas	2100-5000
e = Controlo do Micromaster	5000-6200, e ao longo do programa

**ANEXO 5. DERIVAÇÃO DA EQUAÇÃO DA ÁREA DA SECÇÃO TRANSVERSAL,
A PARTIR DA EQUAÇÃO DE FLUXO UNIFORME DE MANNING**

$$Q = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{S}$$

$$A \cdot R^{2/3} = \frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}}$$

$$A^3 \cdot \left(\frac{A}{P}\right)^2 = \left(\frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}}\right)^3$$

$$A^3 \cdot P^{-2} \cdot A^2 = \left(\frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}}\right)^3$$

Como $A = a \cdot P^u$ vem $P = \left(\frac{A}{a}\right)^{1/u}$

$$A^5 \cdot \left(\frac{A}{a}\right)^{-2/u} = \left(\frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}}\right)^3$$

$$A^{5u} \cdot A^{-2} \cdot a^2 = \left(\frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}}\right)^{3u}$$

$$A^{5u-2} = a^{-2} \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}}\right)^{3u}$$

$$A = a^{-2/(5u-2)} \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}}\right)^{3u/(5u-2)}$$

ANEXO 6. DESCRIÇÃO DO MICROMASTER

A6.1. FUNCIONAMENTO DO MICRO-MASTER

O MicroMaster é um *inversor* de frequência com circuito intermédio de tensão que permite variar a velocidade de motores trifásicos. Existem diferentes versões, desde 250 W até 37Kw. Estes *inversores* estão equipados com microprocessores. Entre as suas características podem-se destacar as seguintes:

- Possibilidade de comando local ou a distância através duma porta série RS485, utilizando o protocolo USS.
- Possibilidade de controlar até 31 inversores a partir dum controlador (computador).
- Possui uma gama completa de parâmetros que lhe permite executar praticamente qualquer função.
- Travaço incorporado através de corrente contínua.
- Compensação automática de carga graças a FCC (*flux current control*)

O funcionamento do Micromaster obedece a uma série de parâmetros pré-estabelecidos que podem adquirir diversos valores. No quadro A6.1. apresentam-se alguns parâmetros relevantes para o presente trabalho, juntamente com os valores utilizados:

Parametro	Descrição	Valores possíveis	Valores utilizados
P001	Visualização do estado	1-6	1
P006	Introdução da frequência	0-2	0
P007	Liga/desliga as teclas do painel frontal	0-1	1
P013	Frequência máxima do motor	0-650	50
P074	Curva de redução da potência no motor para protecção contra sobre-aquecimento	0-3 (3)	0
P077	Modo do controlo	0-2 (0)	1
P081	Frequência nominal do motor (Hz)	0-650	50
P082	Velocidade nominal do motor (rot/min)	0-9999	1350
P083	Corrente nominal do motor (A)	0.1-99.9	0.8
P084	Tensão nominal do motor (V)	0-1000	230
P085	Potência nominal do motor (kW)	0-50	.12
P091	Endreço	0-30	1
P092	Velocidade de transmissão (Baud)	3-7	9 (9600 baud)
P093	Duração da ausência do telegrama (segundos)	0-240	0
P094	Frequência nominal pré-estabelecida para a interface série (Hz)	0-650	50
P095	Compatibilidade USS	0-1	000
P910	Modo Local/Remoto	0-3	1

Quadro A6.1. Alguns parâmetros de controlo relevantes.

A comunicação com o PC é feita através do protocolo USS (*Universal Serial Interface Protocol*), que define uma técnica de acesso de acordo com o princípio de comunicação *Mestre-escravo*. A comunicação em forma de telegramas é feita no modo RS485 em "half-duplex".

A6.2. ESTRUTURA DOS TELEGRAMAS

Os dados são transmitidos em *telegramas* constituídos por um total de 14 caracteres (bytes), de acordo com a figura A6.1.

STX	LGE	ADR	PKE1	PKE1	PWE	STW	HSW	BCC
-----	-----	-----	------	------	-----	-----	-----	-----

Figura A6.1. Constituição dum telegrama

Cada elemento corresponde a um byte, excepto os PKE, PWE e PZD que são constituídos por dois bytes de 8 bits cada (ou seja 16 bits).

Cada *telegrama* começa com o *Carácter de Início*, STX (=02 hex), seguido da especificação do comprimento (LGE) e o *byte de endreço* (ADR). Seguem-se os *bytes úteis*. O telegrama termina com o *byte de verificação do bloco BCC* (*block check character*). (Ver quadro A6.2)

STX	Início da transmissão (02 Hex)
LGE	Comprimento do telegrama, sem STX e LGE, mas com ADR e BCC (12)
ADR	Endreço do variador (1)
Bytes úteis	PKE1, PWE, STW e HSW. Aqui são transmitidos os parâmetros (PKE) e os caracteres de controlo (STW e HSW). Os parâmetros podem ser definidos directamente pelo teclado, pelo que os PKE serão apenas zeros.
BCC	Carácter de verificação do telegrama (EXOR todos os bytes)

Quadro A6.2. Descrição dos elementos dum telegrama

A6.3. CODIFICAÇÃO DOS DADOS

A6.3.1. Início do texto (STX)

Este carácter é sempre o código ASCII 02 hex

A6.3.2. Comprimento do telegrama (LGE)

O comprimento do telegrama pode ser variável, e é especificado no segundo byte do telegrama. Para o tipo de MicroMaster utilizado, o comprimento será 12.

Apenas os *caracteres úteis* (n bytes), o *byte de endreço* (ADR) e o *block check character* (BCC) são incluídos no comprimento do telegrama. Ou seja, o *byte do início do telegrama* (STX) e o próprio *byte do comprimento* (LGE) não são incluídos.

$$LGE = n + 2 \quad (A6.2)$$

A6.3.3. Byte do endereço (ADR)

Este byte indica o número (endereço) do Micromaster, como 31 Micromasters podem estar ligados em rede a apenas um único controlador. Para além deste endereço, este byte inclui outras informações. De salientar apenas o bit 6 que quando igual a 1 indica ao variador que este deve retransmitir a mensagem recebida.

A6.4.4. Dados Uteis

O bloco de *dados uteis* é dividido em três áreas:

PKW - Valores dos Parametros: Aqui é possível estabelecer directamente os valores dos diferentes parametros.

STW- Área dos dados do processo. Estes valores permitem arrancar e parar o Micromaster para além de definir aspectos como a velocidade do arranque e o sentido da rotação do motor. O valor de 127 corresponde ao motor em andamento, enquanto que 12 representa o motor ligado, aguardando instruções.

HSW- Corresponde à frequência (velocidade) pretendida. O valor a introduzir em HSW é calculada a partir da frequência pretendida, pela seguinte expressão:

$$HSW = INT\left(\frac{Hz \cdot 16384}{50}\right) \quad (A6.1)$$

Para uma compreensão melhor das especificações de comunicação deve-se referir ao Universal Serial interface protocol -USS Protocol, da SIEMENS.

A6.3.5. Elaboração do BCC

O byte final, o BCC é uma soma EXOR de todos os bytes precedentes. EXOR é uma soma binário em que

$$0 + 0 = 0$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 0 = 1$$

$$1 + 1 = 0$$

por exemplo:

BCC antigo	=	1 0 0 0 1 0 1 0
Caracter seguinte	=	0 1 0 1 1 0 1 0
<hr/>		
BCC novo	=	1 1 0 1 0 0 0 0

Portanto, os bytes são EXORados um a um e o valor final é transmitido como BCC. A função deste byte é garantir que não há erros de transmissão.

A6.4. TÉCNICA DE TRANSFERÊNCIA DOS DADOS

Para que o *carácter do início*, STX seja reconhecido é necessário que este seja precedido dum intervalo sem caracteres correspondente à duração de envio de pelo menos dois caracteres.

O *Byte Mais Significativo* é sempre transmitido primeiro e depois o *Byte Menos Significativo*.

A6.4.1. Constituição dos caracteres

Cada um dos caracteres transferidos começa com um *bit de início* e termina com um *bit de fim*. São transferidos 8 bits úteis. Para além destes, cada carácter (byte) tem um *bit de paridade* (paridade *par*, ou seja o somatório de uns (1) nos data bits, incluindo o *bit de paridade* é um número par).

O *bit de início* é sempre zero (0), os 8 bits de dados podem ser quaisquer bits, e o *bit de paridade* é 0 ou 1, e o *bit de fim* é sempre 1.

A6.6. LIGAÇÃO FÍSICA COM O COMPUTADOR

Esta ligação é feita através dum placa de I/O RS485, ou então através da utilização dum conversor RS485-RS232. A primeira opção é mais vantajosa, pois nem todos os conversores são capazes de converter para *half duplex*. O Micromaster tem uma ficha de 9 pinos no painel frontal e permite também a ligação directamente nos contactos internos.

A figura A6.2 mostra o modo de ligação em *Half duplex* com o inversor.

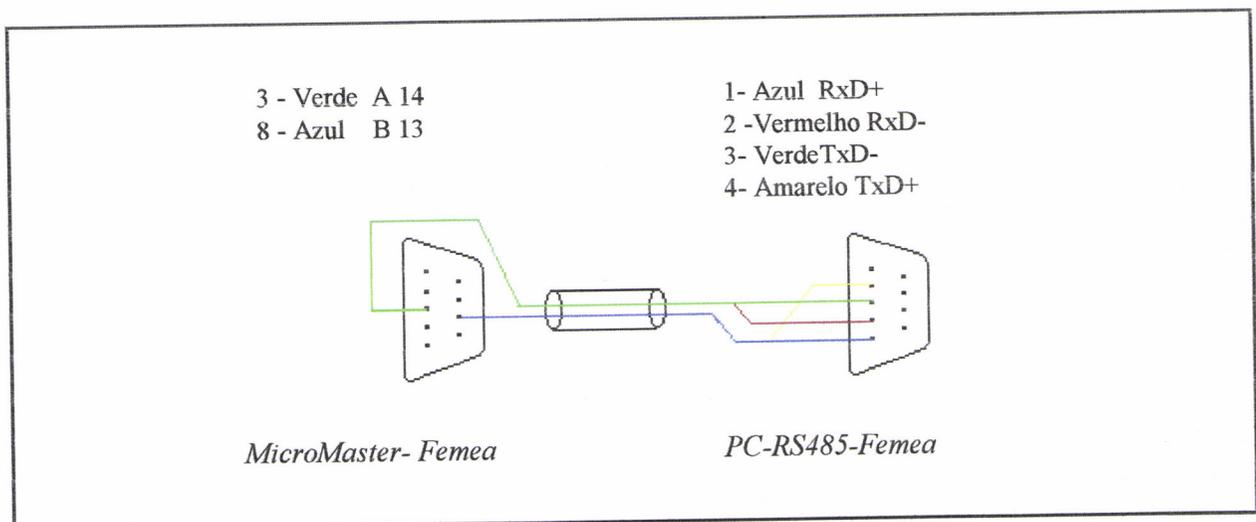


Figura A6.2. Esquema da ligação em *half duplex* com o Micromaster. A ligação pode também ser feita directamente nos conectores 13 e 14, localizados no interior do Micromaster.

ANEXO 7. GEOMETRIA MÉDIA DOS SULCOS

Perfis médios antes da rega preliminar

y, cm	B-largura, cm			área cm ²			perímetro cm		
	Princípio	Meio	Fim	Princípio	Meio	Fim	Princípio	Meio	Fim
0	0	1	0	0	0	0	0	0.01	0
1	7.1	7.5	8.5	3.6	4.2	4.2	7.4	7.8	8.7
2	12.0	12.00	14.0	13.1	14.0	15.4	12.6	12.7	14.6
3	14.8	15.6	17.4	26.5	27.7	31.1	16.1	16.8	18.5
4	17.6	18.2	20.5	42.7	44.6	50.1	19.5	20.1	22.2
5	19.5	20.9	24.0	61.2	64.1	72.3	22.3	23.5	26.3
6	21.7	23.5	26.8	81.7	86.3	97.7	25.3	26.8	29.7
7	24.7	26.4	30.8	104.9	111.3	126.5	28.9	30.3	34.2
8	28.0	29.7		131.3	139.3		32.7	34.1	
9	32.6	33.3		161.6	170.7		37.8	38.2	

Perfis médios antes da rega definitiva

y, cm	B-largura, cm			área cm ²			perímetro cm		
	Princípio	Meio	Fim	Princípio	Meio	Fim	Princípio	Meio	Fim
0	0.0	0.7	0.6	0.0	0.4	0.3	2.0	2.1	2.1
1	6.1	4.9	6.8	3.1	3.1	4.0	8.4	6.7	8.5
2	11.1	9.8	10.1	11.6	10.5	12.4	13.8	12.0	12.4
3	14.1	12.6	14.3	24.3	21.7	24.6	17.4	15.5	17.1
4	16.8	15.7	18.5	39.7	35.8	41.0	20.8	19.2	21.8
5	19.1	18.9	23.4	57.7	53.1	62.0	23.8	22.9	27.1
6	22.3	21.9	28.6	78.4	73.5	87.9	27.6	26.5	32.6
7	25.9	24.4	32.6	102.4	96.6	118.5	31.7	29.8	37.1
8	28.9	27.6		129.8	122.6		35.3	33.6	
9	32.2	30.7		160.3	151.8		39.2	37.2	
10	36.5	33.6		194.7	183.9		43.9	40.7	
11	39.1	37.3		232.5	219.3		47.2	44.9	
12		40.2			258.0				

ANEXO 8. TEMPOS DE AVANÇO E DE RECESSÃO AO LONGO DOS SULCOS

Avanço e Recessão No Ensaio Preliminar

Sulco	11	14	24	25	26	27	28	29	30	31	32	34
Comprimento	280.5	273	224.7	220	240.3	238.1	235.9	233.7	231.5	229.3	227.1	222.3
Duração prevista do avanço, min.		267	148	129	145	143	141	142	140	138	136	171
Hora início	9:17	12:47	16:47	17:14	17:39	18:06	18:32	18:54	19:24	19:50	20:15	21:05
Troço alcançado*												
Troço 1	06	05	03	10	5	4	6	5	3	5	2	3
Troço 2	30	12	7	19	17	10	12	9	9	11	9	7
Troço 3	45	26	12	32	45	19	20	15	21	17	18	14
Troço 4	58	51	19	46	71	37	37	30	39	32	44	33
Troço 5	73	68	36	61	119	85	77	56	90	55	70	51
Troço 6	87	75	51	76		138	118	77	131	75	111	64
Troço 7	98	113	66	92		167	155	95		85	124	79
Troço 8	115	137	85	109		228	174	130		103	139	108
Troço 9	131	158	120	140		262	222	172		144	161	141
Can.	149	167	148	171		286	231	194		170	184	171
Reces			287	283								211

* Cada troço corresponde a 1/10 do comprimento do sulco

Avanço e Recessão No Ensaio Definitivo

Sulco	Avanço, min.							Recessão, min.						
	25	31	35	40	46	50	55	25	31	35	40	46	50	55
Comprimento	220	229,3	220	207	198	191	182,5							
Duração previsto do avanço, min.		57	42	44	37	36	36							
Hora início	9:54	11:08	11:45	12:17	13:05	13:36	14:06	14:29		14:18			15:58	
Distância, m														
0	0	0	0	0	0	0	0	0		0			0	
20	2	2	3	3	3	2	2	30		2			2	
40	5	5	5	7	6	8	12	33		3			3	
60	7	9	7	10	9	11	17			4			5	
80	10	14	10	17	16	22	29	40		11			8	
100	14	19	16	25	28	31	37	50		12			13	
120	19	30	28	48	42	37	43	50		12			13	
140	21	42	32	63		42	60	55		12			13	
160	24	47	37			46	65			12			13	
180	27	54	53			53		63		12				
200	31	62	60											
220	37							65						
Fim do Sulco	37	62	60			55	67							

ANEXO 9. ÁREA MOLHADA DOS SULCOS

A altura de água nos sulcos, bem como a largura da parte molhada foi medida ao longo de toda a rega em sulcos seleccionados. As leituras eram feitas sempre que o êmbolo avançava um sulco.



	Início			Meio			Fim		
	y, cm	b, cm	Pm, cm	y, cm	b, cm	Pm, cm	y, cm	b, cm	Pm, cm
Sulco 25	10,5			3,3			3,6		
Êmbolo no sulco 29	9,6	17,9	42,5	3,1	18,4	23,5	4,2	17,1	21,5
Êmbolo no sulco 31	9,2	26,4	41	3,6	19	22	3,6	16,7	20
Sulco 31									
Êmbolo no sulco	12,6	43,1	51						
Êmbolo no sulco 33	12,4	39,8	50,5	5,1	18,7	22,5			
Êmbolo no sulco 35	11,3	38	47,5	11,3	35	47,5			
Êmbolo no sulco 38	10,5	33,4	44	11,5	34,4	48			
Êmbolo no sulco 40	9,0	28,4	39	2,1	30,3	30,3			
Sulco 35									
Êmbolo no sulco	8,7	28	43						
Êmbolo no sulco 38	8,31	28,2	42	7	28	37,5			
Êmbolo no sulco 40	7,9	25,8	41	7,2	23,9	38,5			
Êmbolo no sulco 42	7,2	27	38,5	6,8	25,4	37,5	5	19,2	22,5
Êmbolo no sulco 44	1,1	11,9	11,9	2,2	22,9	23	1,6	11	11
Sulco 40									
Êmbolo no sulco	10,8	36,6	52						
Êmbolo no sulco 42	12,1	37,8	53						
Êmbolo no sulco 44	11,1	37,7	52,5	1,6	17	17			
Êmbolo no sulco 46	10	35,5	51	2,8	17,1	21			
Êmbolo no sulco 48	9,1	28,8	49	0,8	16,3	16,3			
Sulco 46									
Êmbolo no sulco	8,7	36	44,5						
Êmbolo no sulco 48	8,8	37,3	44,5						
Êmbolo no sulco 50	8,0	37,1	43	1,1	15,4	15,4			
Êmbolo no sulco 53	7,9	36,2	43	1,1	15	15,4			
Êmbolo no sulco 55	5,9	29,8	34,5	0	0	0			
Sulco 50									
Êmbolo no sulco	8,4	36,9		2,0	12,3				
Êmbolo no sulco 53	10,2	40,3		2,5	13,3				
Êmbolo no sulco 55	9,4	37,8		3,0	13,3				
Êmbolo no sulco 57	8,8	35,2		3,1	13,9		3,2	27,2	
Sulco 55									
Êmbolo no sulco									
Êmbolo no sulco 57	13,8	48,8		3,0	15,9				
Êmbolo no sulco 60	14,6	50,6		3,0	17,5				
Êmbolo no sulco 63	13,9	49,7		2,8	16,5		4,1	25,2	