

INVESTIGAÇÃO ANALÍTICA E EXPERIMENTAL
SOBRE JATOS COAXIAIS E SUA APLICAÇÃO
NA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

003 / 86

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FRANCISCO MANUEL RUAS PEREIRA COELHO

TESE APRESENTADA A COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE
ENGENHARIA DE CAMPINAS, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTEN
ÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Prof. Dr. KAMAL ABDEL RADI ISMAIL

Orientador

Este exemplar corresponde a
redação final da tese defendida por
Francisco Manuel Ruas Pereira Coelho
e aprovada pela comissão julgadora
em 06/01/1986.

CAMPINAS - 1985

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

S U M Á R I O

O presente trabalho encara a irrigação por aspersão sob o ponto de vista do escoamento de fluidos.

Inicia-se por um levantamento da situação de pesquisa na área de irrigação por aspersão.

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos pelos estudos teóricos e práticos desenvolvidos acerca de sistemas de irrigação por aspersão, encarados sob a ótica do escoamento de fluidos.

O estudo concentra-se então sobre bocais coaxiais para irrigação e determina-se a influência da geometria dos bocais sobre o perfil de distribuição produzido.

Os resultados assim obtidos permitiram concluir sobre os valores que deverão assumir as variáveis geométricas do bocal de um aspersor de irrigação, em função do sistema específico a que se destina, de modo a que se obtenham melhores padrões de distribuição de água.

Com este novo enfoque dado ao tema se mostra como a mecânica de fluidos ainda tem muito a contribuir com a irrigação e se apontam novos caminhos para a pesquisa.

Í N D I C E

	Pág.
APRESENTAÇÃO	1
CAPÍTULO 1 - A IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO	3
Vantagens da irrigação por aspersão	3
Os sistemas de irrigação por aspersão	4
O aspersor rotativo	5
O perfil de distribuição de um aspersor rotati <u>v</u> o	8
A qualidade da aplicação de água	8
Os perfis de distribuição ideais para asperso <u>r</u> es rotativos estacionados	11
Colocação do problema	16
CAPÍTULO 2 - ASPERSORES ROTATIVOS COM DESLOCAMENTO LINEAR .	18
A procura do perfil de distribuição ideal para auto-propelidos	22
Simulação do padrão de distribuição de água produzido por aspersores rotativos com deslo <u>c</u> amento linear	23
A operação simultânea de aspersores rotativos estacionados e impelidos de deslocamento linear	33
O perfil de distribuição ideal para aspersores rotativos animados de deslocamento linear	42

	Pág.
CAPÍTULO 3 - O JATO COAXIAL LÍQUIDO-EM-AR.....	56
O problema de Rayleigh para a estabilidade de um jato circular	56
A desintegração de um líquido	67
O movimento de uma gota de líquido	68
A distribuição do tamanho de gotas	71
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE BOCAIS CO- AXIAIS	75
Os bocais coaxiais	77
A metodologia de ensaio e análise dos resulta- dos	80
A aderência dos perfis experimentais aos per- fis ideais	87
O efeito da variação da proporção entre as â- reas das secções de saída	90
O efeito da variação da conicidade do jato ex- terno	100
O efeito da variação da pré-circulação do jato externo	105
Discussão da metodologia e dos resultados obti- dos	109
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	111
Sugestões	112
BIBLIOGRAFIA CITADA	113
APÊNDICE A	115
APÊNDICE B	119
APÊNDICE C	136

A G R A D E C I M E N T O

Agradeço sinceramente às pessoas e entidades pela colaboração que delas recebi e sem a qual teria sido impossível concretizar este trabalho.

A CHANG-YU LIU, pela orientação dada ao longo de meu curso de mestrado.

A KAMAL ABDEL RADI ISMAIL, pela orientação do trabalho de tese.

A EDMAR JOSÉ SCALLOPI, pelas frutíferas discussões sobre irriga-ção.

A UBIRATAN D'AMBROSIO, pelo apoio dado durante o trabalho.

Ao MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, pelo uso das instalações que permitiram a concretização da parte experimental e o processamento dos dados obtidos durante os ensaios.

A ANIVALDO PEDRO COBRA, pelo apoio dado à realização do trabalho.

A ALBERTO COLOMBO, pelo auxílio inestimável prestado durante a fase experimental e a discussão técnica.

A FATIMA CONCEIÇÃO REZENDE, pela ajuda amigável durante os experimentos.

A DENILSON RIBAS, pelos equipamentos construídos e pelos desenhos executados.

A GELSON LUIS FANTINI ROMAN e a ALEXANDRE PANAYOTO, pelos dese-nhos cuidadosamente executados.

A JOÃO BATISTA DE OLIVEIRA, pelas inúmeros dias e noites que pas-sou trabalhando no campo experimental.

A TAKA OTA PERRONI, pela ajuda sempre pronta desde os meus anos de graduação e pela datilografia.

A RENATO FERREIRA COELHO, pela orientação matemática.

A SALOMÃO SCHATTAN, pela orientação estatística e pela leitura paciente dos manuscritos.

A CARLOS VON WIESER, por ter facilitado enormemente a conclusão do trabalho.

A VERA SCHATTAN RUAS PEREIRA COELHO, que comigo viu esta ideia nascer e se concretizar.

A P R E S E N T A Ç Ã O

Temos a mania de levantar questões.

Tão logo um pequeno fenômeno nos desperta a atenção, passamos a inventar, a seu respeito, uma série de perguntas cuja resolução nos traz gratos prazeres.

Desta vez tudo começou com um sistema de irrigação auto-propelido.

Em meados de 82, convenci-me que poderiam ser melhorados.

Iniciei então uma série de experimentos no campo de ensaio de aspersores de irrigação do Centro Nacional de Engenharia Agrícola (CENEA-MA) - Sorocaba, S.P.

O ensaio de um sistema de irrigação auto-propelido é, no entanto, demorado.

Para que as condições atmosféricas se mantivessem estáveis ao longo de todo o período do ensaio, era necessário realizar os experimentos durante a madrugada, período durante o qual normalmente pouco venta.

Na mesma época, elaborei um programa de computador, compatível com um micro HP-85, que permitia simular a operação de aspersores de irrigação ao longo de uma faixa de terreno de comprimento variável.

Com o auxílio destes dois instrumentos, consegui levantar algumas informações acerca do sistema operacional de auto-propelidos.

Uma questão tomou então conta de meu pensamento: como deveria funcionar um aspersor rotativo para satisfazer, da melhor forma possível, as necessidades de um sistema de irrigação auto-propelido ?

Procurei, então, determinar analiticamente o perfil de

distribuição ideal para um aspersor de irrigação destinado a ser instalado num sistema de irrigação auto-propelido.

Algum tempo depois, e já de posse de um sistema de equações que descrevia analiticamente a função procurada, procurei determinar de que forma alterações na geometria do bocal de um aspersor de irrigação poderiam provocar melhorias no seu desempenho.

Munido do perfil de distribuição ideal para sistemas de irrigação auto-propelidos, recém determinado, e de dois perfis de distribuição ideais para sistemas estacionados, desenvolvidos por Christiansen, elaborei um método de análise de dados experimentais que permitisse comparar os perfis de distribuição de vários aspersores de irrigação, que na época pretendia construir, com os perfis de distribuição ideais mencionados.

Projetei e construí, então, uma série de bocais coaxiais com características geométricas diferentes e pude assim avaliar de que forma algumas das variáveis envolvidas no projeto de um bocal influem no perfil de distribuição de um aspersor rotativo.

É o trabalho desenvolvido ao longo destes 3 anos que passo a apresentar.

CAPÍTULO 1

A IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

A aspersão tem sido utilizada como sistema de irrigação desde o começo deste século. Durante as duas primeiras décadas, no entanto, esteve limitada à irrigação de pequenas frutas, de viveiros e de culturas em estufas. A partir de 1920 a irrigação por aspersão passou também a ser utilizada, na Califórnia, no fornecimento de água a pomares cítricos por meio de sistemas estacionários de aspersores distribuídos regularmente entre as árvores.

Muitos dos sistemas instalados nessa época mostraram-se ineficientes pois tiveram a sua implantação motivada mais pelos interesses econômicos de fabricantes e vendedores que por uma preocupação em se obter uma alta eficiência no processo de irrigação.

A aspersão era, então, anunciada como algo milagroso que permitia economizar grandes quantidades de água e energia, que controlava insetos, geadas e moléstias, e que aumentava enormemente a produção agrícola [8].

Muito do que foi dito nessa época provou-se não ter qualquer consistência ou ter apenas uma pequena importância prática. A aspersão, contudo, possui vantagens definidas sobre os métodos de irrigação por sulcos, algumas das quais se verificam somente sob certas condições.

Vantagens da irrigação por aspersão

A principal diferença entre os sistemas de irrigação por aspersão e os sistemas de irrigação por sulcos reside no fato de que aqueles produzem uma distribuição de água no solo independente de suas características edáficas. Em todos os sistemas de irrigação superficial, o solo é o meio final de distribuição de água, seja pela completa inundação da superfície, seja pelo escoamento em canais suficientemente próximos para que todo o solo possa ser

umedecido. Uma grande parte da água pode ser assim perdida por percolação profunda. A não ser que o campo seja preparado cuidadosamente e que a irrigação seja operada com extrema cautela, é difícil obter-se uma distribuição razoavelmente uniforme da água pelos métodos de irrigação superficial. Pelo contrário, a uniformidade da distribuição produzida pelos sistemas de irrigação por aspersão depende unicamente das características do equipamento utilizado e das condições operacionais.

A aspersão elimina os canais espalhados pelo meio do campo e permite o plantio da quase totalidade da área. Dessa forma, tornando possível o trabalho em blocos de maior extensão, a irrigação por aspersão facilita o cultivo.

Em terrenos com superfícies muito irregulares, a irrigação por aspersão elimina os trabalhos de sistematização necessários aos sistemas de irrigação por superfície. Em solo pouco profundo, a remoção de uma pequena camada superficial de solo, para nivelamento, pode tornar-se desastrosa [8].

Outra das vantagens dos sistemas de irrigação por aspersão é que eles podem ser utilizados como um método econômico de aplicação de fertilizantes e agro-tóxicos solúveis na água.

Os sistemas de irrigação por aspersão convencional

De acordo com o tipo de operação, os sistemas de irrigação por aspersão podem ser classificados em estacionários, semi-portáteis e portáteis.

Os sistemas estacionários são aqueles onde todo o equipamento utilizado é fixo. A maioria dos sistemas originais de irrigação por aspersão utilizados em pomares era deste tipo, com aspersores rotativos montados em longas hastes verticais cuja altura passava a da copa das árvores. São utilizados também para a irrigação de gramados e de plantas ornamentais, embora neste caso a pulverização da água se produza normalmente por meio de bocais fixos. Devido à sua interferência com as práticas agrícolas e à grande quantidade de equipamento necessário, os sistemas estacionários têm a sua aplicação limitada a alguns tipos de cultura e a condi-

ções especiais como viveiros e estufas.

Uma solução intermediária adotada com vista à redução do investimento inicial consiste em se utilizarem tubulações fixas, normalmente enterradas. A essas tubulações são acopladas linhas laterais providas de aspersores que, após terem irrigado uma determinada área, são transferidas de posição passando a irrigar uma nova porção de terreno. Estes sistemas recebem o nome de semi-portáteis e têm uma utilização muito restrita.

Com o desenvolvimento de tubulações de diâmetro adequados e de peso muito reduzido, providas de conexões de engate rápido, os sistemas portáteis passaram a ter, a partir de 1930, o seu uso extremamente difundido. Com um comprimento padrão de 6 metros, um tubo de irrigação pode facilmente ser transportado por uma pessoa ao longo do campo. Assim se consegue, com uma quantidade de equipamento bastante reduzida, irrigar grandes áreas pela movimentação periódica da tubulação e dos aspersores. São os sistemas mais difundidos no Brasil e se utilizam numa grande variedade de culturas como hortaliças, milho, batata, tomate, feijão, ervilha e alho.

Com a finalidade de se usufruir das vantagens proporcionadas pelos sistemas de irrigação portáteis e de reduzir o custo de mão-de-obra necessária à sua movimentação pelo campo, os fabricantes de equipamentos para irrigação passaram a produzir, a partir da década de 50, sistemas de irrigação com movimentação mecânica, nos quais um ou mais aspersores se deslocam contínua e lentamente pelo campo animados de movimento retilíneo ou de movimento circular [6].

Todos estes sistemas, porém, têm características comuns: a água é conduzida sob pressão, através de uma tubulação rígida ou flexível, até um ou mais aspersores. Ao deixar o aspersor, sob a forma de jato livre turbulento, a água se distribui sobre o solo na forma de uma nuvem de gotas de tamanho variado [14].

O tipo mais comum de aspersor de irrigação é o aspersor rotativo por impacto.

O aspersor rotativo por impacto

Responsáveis pela pulverização da água sobre o solo, os aspersores rotativos disponíveis no mercado nacional operam com vazões de $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ a $5,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ e pressões de 10^2 kPa a 10^3 kPa . Os raios dos círculos irrigados por tais aspersores variam de 5m a 80m. Os diâmetros de saída dos seus bocais variam de $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ a $5,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$. Em geral, para se obter uma boa distribuição de água sobre o solo, quanto maior o diâmetro de saída do bocal maior deverá ser a pressão de operação do aspersor.

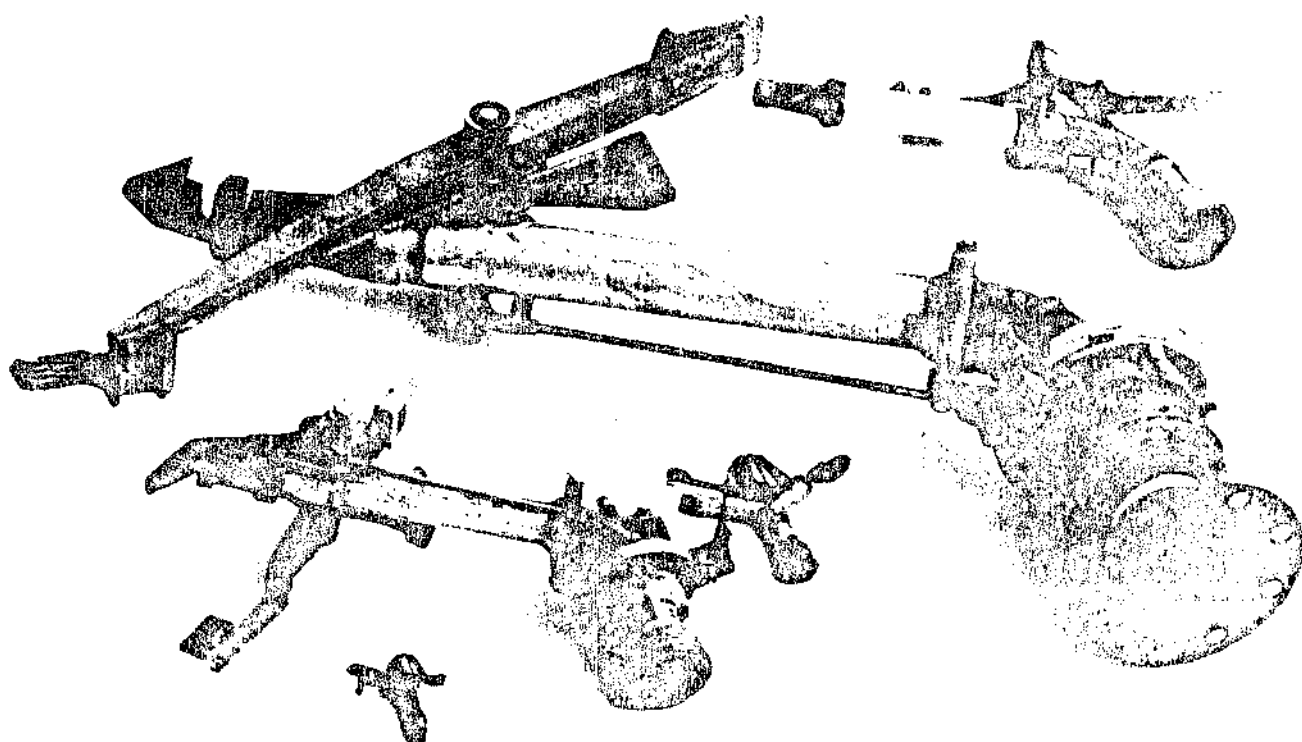


Figura 1.1 - Alguns tipos de aspersores rotativos de irrigação.

Existem dois tipos de aspersores rotativos: os de alta velocidade de rotação (acima de 5 rpm) e os de baixa velocidade de rotação (abaixo de 1 rpm). Quanto mais rápido girar um aspersor menor será a área por ele irrigada [5]. A rotação lenta reduz o desgaste e, portanto, aumenta a vida do equipamento. Por outro lado, estes aspersores sofrem variações maiores na sua velocidade de rotação que afetam consideravelmente a homogeneidade da distribuição de água por eles produzida [8].

Um aspersor rotativo é constituído por uma base, que o fixa à tubulação adutora, ligada por uma junta giratória ao corpo do aspersor. Este apresenta uma curvatura tal que o jato de água abandona o aspersor com um ângulo que assume normalmente os valores de 6° , 21° , 24° , 27° ou 30° em relação a um plano normal ao eixo do duto da base.

A água abandona o aspersor passando por um ou mais bocais de formatos extremamente diversos. As características do escoamento na secção de entrada do bocal e a sua geometria condicionam a forma como o jato se desintegra em gotas de tamanho variado, caso se consideram invariáveis as condições atmosféricas.

A rotação do corpo do aspersor resulta normalmente do momento da quantidade de movimento produzido por um ou mais jatos de água não-radiais. Alguns aspersores possuem um ou mais bocais com o seu eixo orientado tangencialmente ao movimento rotativo, enquanto outros têm um de seus jatos periodicamente desviado de sua direcção radial por meio de um braço oscilante. A intersecção do jato de água pelo mecanismo de rotação produz alterações na forma como o jato se desintegra no seio do ar, aumentando a intensidade da precipitação na região junto ao aspersor [5].

A verificação da forma como um aspersor rotativo distribui a água sobre o solo se faz usualmente operando o aspersor sobre uma malha quadrangular de pluviômetros durante um período de tempo pré-estabelecido, em condições de vento fraco [1], [2], [3], [4].

A distribuição de água produzida pelo aspersor rotativo pode ser apresentada sob a forma da matriz de precipitação obtida nos pluviômetros ou pela curva "intensidade de precipitação" ver-

sus "distância do aspersor" que mais se aproxima daquela matriz e que recebe o nome de "perfil de distribuição" do aspersor.

O perfil de distribuição de um aspersor rotativo

Em 1976, Shull e Dylla [20] permitiram que se estabelecesse um novo procedimento, para a determinação do perfil de distribuição de aspersores rotativos.

Com base na matriz de precipitação do aspersor obtida nos pluviômetros espalhados regularmente pelo campo de ensaio, determina-se uma matriz auxiliar, denominada "matriz padrão", na qual se atribui a cada pluviômetro o valor médio das precipitações coletadas por todos os pluviômetros a igual distância do aspersor. Com base na matriz padrão obtêm-se perfis de distribuição onde as distorções produzidas pelo vento se minimizam.

O perfil de distribuição assim obtido para um aspersor rotativo isolado e estacionado no campo torna-se extremamente útil pois permite prever a qualidade da distribuição de água produzida por qualquer sistema de irrigação que se utilize de um ou mais aspersores a ele semelhantes, tanto estacionados como em movimento ao longo do campo.

A qualidade da aplicação de água

O objetivo da irrigação é aplicar uniformemente, uma determinada quantidade de água.

A primeira medida da uniformidade de uma distribuição foi estabelecida, em 1942, por Christiansen [8] por meio de um coeficiente de uniformidade - UC obtido pela equação

$$UC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |D_i - \bar{D}|}{n \cdot \bar{D}} \right) \quad (1.1)$$

onde n representa o número de pluviômetros que receberam água durante o ensaio do aspersor, D_i a precipitação obtida no i-ésimo pluviômetro e $\bar{D}$ a média das precipitações obtidas nos pluviômetros.

Posteriormente, Wilcox e Swailes [24] em 1947, Criddle [9] em 1956 e Hart [12] em 1961 propuseram novas expressões para o cálculo de um coeficiente de uniformidade. Apesar de não ser, sob o ponto de vista estatístico, o mais eficiente, o coeficiente de uniformidade de Christiansen-UC é ainda hoje o mais difundido, por motivos de tradição.

Durante o cálculo de qualquer um dos coeficientes de uniformidade, para que todos os pluviômetros representem a mesma fração de área é necessário que se simule uma sobreposição parcial da matriz de precipitação do aspersor sobre si própria, de forma a que não existam regiões de fronteira. Vemos assim que um mesmo aspersor funcionando nas mesmas condições operacionais produzirá diferentes uniformidades de distribuição em função da sobreposição a que estiver submetido no campo. Hart [12] postulou que a distribuição de valores obtidos por sobreposição se aproxima da distribuição Gaussiana (curva normal) e mostrou ser essa uma suposição adequada para alguns espaçamentos usuais.

A quantidade de água que deve ser aplicada depende da quantidade requerida pela cultura, normalmente expressa em termos de lâmina de água requerida, e da eficiência de aplicação do sistema considerado. A lâmina requerida é determinada em função do déficit de água disponível no solo, até à profundidade definida pelo sistema radicular da cultura, e eventuais exigências de lixiviação para remoção do excesso de sais solúveis da zona radicular. A eficiência de aplicação de água-EA é definida pela razão entre a quantidade de água incorporada ao solo, até à profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, e a quantidade de água aplicada. Um dimensionamento adequado de sistemas de irrigação por aspersão não deve permitir perdas de água por deflúvio superficial. Assim, a eficiência de aplicação de água é função apenas das perdas por evaporação e deriva, causada pelo vento, e das perdas por percolação profunda, dependentes da uniformidade de distribuição de água e da razão entre a lâmina de água requerida e a lâmina média aplicada [19].

Para uma visualização dos parâmetros, plotou-se, na figura 1.2, a lâmina aplicada adimensional ($D_i/\bar{D}$) versus a fração de área (x/X) irrigada com uma lâmina igual ou superior a $D_i/\bar{D}$.

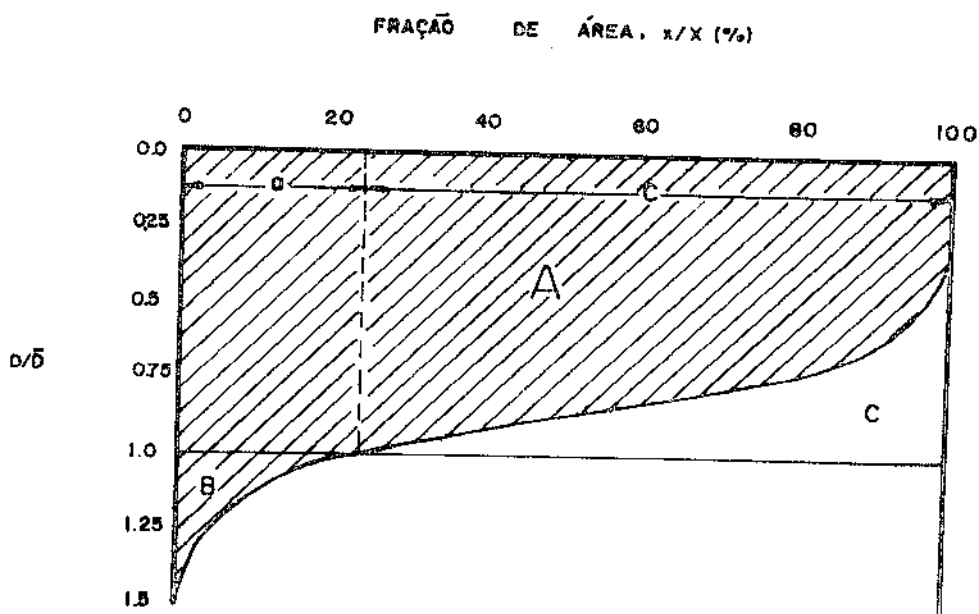


Figura 1.2 - Frequência acumulada de uma lâmina adimensional aplicada.

Admita-se, numa primeira análise, que a lâmina requerida seja igual à lâmina média aplicada, isto é

$$\frac{D_r}{\bar{D}} = 1,0 .$$

A quantidade total de água aplicada durante a irrigação é dada pelas áreas A+B. A fração de área a recebeu excesso de água, que foi perdido por percolação profunda numa quantidade dada pela área B. A quantidade de água dada pela área A ficou armazenada no solo, na zona radicular da cultura. Por outro lado, a fração de área c foi insuficientemente irrigada, representando a área C o déficit de água verificado naquela fração de área.

A eficiência da distribuição, conforme definida anteriormente, é dada em função das áreas da figura 1.2 pela relação

$$EA = \frac{\text{área A}}{\text{área A+B}} \quad (1.2)$$

Por outro lado, a eficiência de armazenamento-ED é definida como a razão entre a quantidade de água armazenada na zona radicular da cultura e o déficit de água verificado nessa região antes de ser iniciada a irrigação. Em termos das áreas representadas na figura 1.2, podemos escrever

$$ED = \frac{\text{área A}}{\text{área A+C}} \quad (1.3)$$

A eficiência da distribuição-EA representa portanto a proporção de água aplicada que foi benéficamente aproveitada pela cultura e a eficiência de armazenamento-ED representa a proporção do déficit de água da zona radicular da cultura que foi efetivamente suprido pela irrigação. Uma boa irrigação deverá apresentar eficiências de aplicação e de armazenamento elevadas. Para que isso se verifique a curva de frequência acumulada deve ser o mais possível aderente à reta que define a lâmina requerida.

Torna-se, portanto, evidente que a qualidade de uma aplicação de água por aspersão se encontra intrinsecamente relacionada com a uniformidade da distribuição produzida pelo sistema de irrigação considerado.

Os perfis de distribuição ideais para aspersores rotativos estacionados

Como foi visto anteriormente, a uniformidade da distribuição de água produzida por um sistema de irrigação por aspersão depende do perfil de distribuição dos aspersores e da disposição dos aspersores no campo.

É evidente que um conjunto de aspersores idênticos trabalhando nas mesmas condições operacionais produzirá padrões de distribuição de água diferentes se os aspersores forem dispostos no campo com diferentes espaçamentos. Ou, por outras palavras, um

determinado perfil de distribuição produzirá melhores ou piores padrões de distribuição em função de sua disposição relativa no campo.

A determinação do perfil de distribuição que melhor se adapta a sistemas de irrigação com aspersores rotativos estacionados no campo com disposições quadrangulares e triangulares equilateras foi estudada por Christiansen [8].

Sem prejuízo da uniformidade da distribuição, devem procurar-se aspersores que, para um determinado arranjo, possam trabalhar com o maior espaçamento possível pois isso significa uma redução no custo da mão-de-obra necessária à sua operação.

Para sistemas com disposição quadrangular, por imposições geométricas, o espaçamento, normalmente definido em termos da razão entre a distância entre dois aspersores adjacentes e o diâmetro irrigado por um aspersor, não pode exceder 0,707 sem que surjam áreas com precipitação nula, quaisquer que sejam os perfis de distribuição dos aspersores. A figura 1.3 mostra os perfis de distribuição que apresentam coeficientes de uniformidade máximos, para diferentes espaçamentos entre aspersores dispostos numa malha quadrangular, segundo Christiansen. A tabela 1.1 fornece os

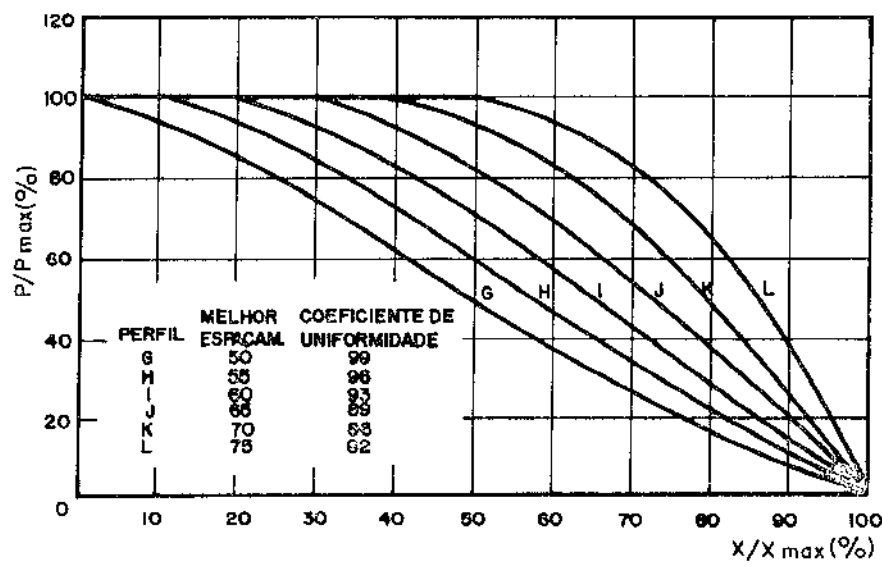


Figura 1.3 - Perfis de distribuição de aspersores que, numa disposição quadrangular, produzem coeficientes de uniformidade máximos.

valores dos vários UC obtidos quando os perfis G, I e K se distribuem no campo numa malha quadrangular com espaçamentos que variam de 0,35 a 0,75.

Para o caso da distribuição dos aspersores no campo segundo uma malha triangular equilátera, as limitações geométricas impõem que o espaçamento máximo seja de 0,866 para que não ocorram áreas com precipitação nula.

TABELA 1.1
COEFICIENTES DE UNIFORMIDADE PARA OS
PERFIS G, I e K (segundo Christiansen)

Espaçamento	Coeficientes de uniformidade (%)		
	G	I	K
0,35	99	97	97
0,40	96	96	95
0,45	97	92	87
0,50	99	98	86
0,55	93	96	87
0,60	85	93	87
0,65	78	87	85
0,70	69	80	86
0,75	--	72	80

A figura 1.4 mostra vários perfis de distribuição que permitem obter UC máximos para vários espaçamentos numa disposição triangular equilátera. Os valores obtidos para os UC das distribuições produzidas por vários espaçamentos dos perfis M, O, Q e S constam da tabela 1.2.

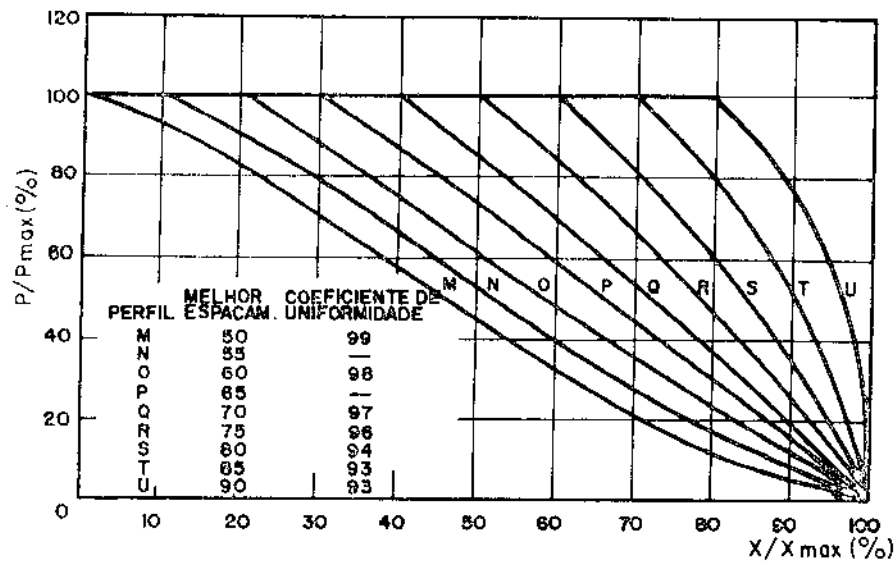


Figura 1.4 - Perfis de distribuição que, numa distribuição triangular equilátera, produzem UC máximos.

TABELA 1.2
COEFICIENTES DE UNIFORMIDADE PARA OS
PERFIS M, O, Q e S (segundo Christiansen)

Espaçamento	Coeficientes de uniformidade (%)			
	M	O	Q	S
0,30	99	99	99	99
0,35	97	98	98	94
0,40	99	98	99	95
0,45	99	98	94	97
0,50	99	96	89	89
0,55	97	96	87	82
0,60	91	98	88	78
0,65	82	94	92	78
0,70	72	87	97	82
0,75	--	77	90	89
0,80	--	67	79	94
0,85	--	--	68	86
0,90	--	--	--	73

Temos assim que a disposição triangular equilátera permite obter maiores uniformidades de aplicação que a disposição quadrangular dos aspersores, especialmente para maiores espaçamentos.

A figura 1.5 compara a uniformidade da distribuição obtida com ambos os arranjos.

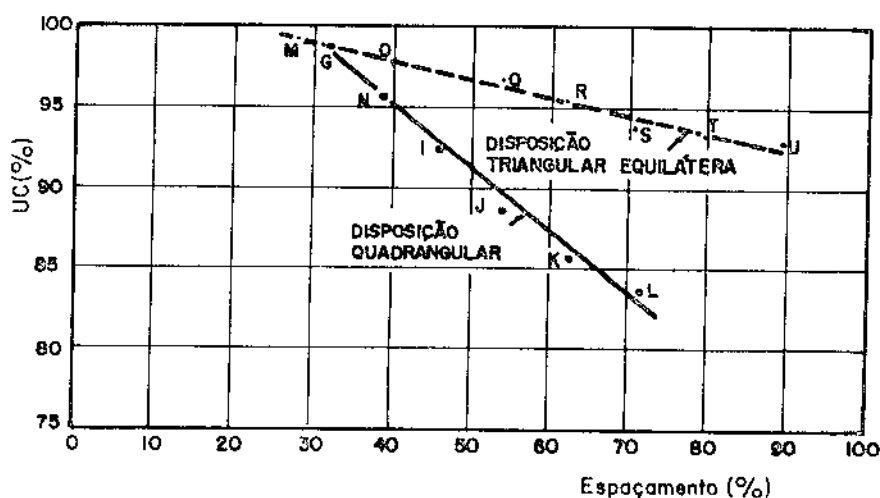


Figura 1.5 - Comparação entre os maiores valores dos coeficientes de uniformidade obtidos com disposições quadrangulares e triangulares equiláteras.

Em condições de vento fraco, o perfil de distribuição de um aspersor rotativo depende intrinsecamente da forma como o jato de água que abandona o aspersor se desintegra no seio do ar.

Assim, modificando a geometria e as condições operacionais do aspersor podemos alterar o modo de desintegração do jato de água em gotas de tamanho variado obtendo perfis de distribuição que mais se adaptem a uma aplicação específica.

Colocação do problema

Podemos verificar que a metodologia empregada e as questões que têm sido debatidas até o momento, embora se prestem para o desenvolvimento do aspecto agrônômico da irrigação por aspersão, são insuficientes para uma abordagem mais ampla do problema, na qual se levem em conta os aspectos relativos à mecânica de fluidos.

De fato, o enfoque que tem sido dado ao desenvolvimento da irrigação por aspersão nada nos permite concluir acerca do comportamento da fase líquida de tal escoamento.

Na realidade, as características do escoamento líquido no instante em que ele abandona o bocal de um aspersor condicionam a forma como ele se propagará no seio do ar até à sua completa deposição sobre o solo. Isto é, o perfil de distribuição de um aspersor de irrigação está intimamente relacionado com o escoamento gerado em seu bocal.

Coloca-se então o problema de saber quais deverão ser as características dos bocais dos aspersores de irrigação para que se obtenham perfis de distribuição ideais.

Como vimos, em 1942 Christiansen definiu os perfis de distribuição ideais para sistemas de irrigação estacionários. Torna-se ainda necessário determinar o perfil de distribuição ideal para sistemas de irrigação impelidos de deslocamento linear.

De posse desses três perfis de distribuição ideais poder-se-á iniciar uma pesquisa sistemática através da qual se venha a determinar de que forma a variação da geometria dos bocais dos aspersores de irrigação permite produzir perfis de distribuição mais próximos dos que seriam teoricamente desejáveis.

São estes os problemas que passaremos a trabalhar e analisar nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO 2

ASPERSORES ROTATIVOS COM DESLOCAMENTO LINEAR

A crescente mecanização dos processos de produção agrícola levou os fabricantes de equipamentos de irrigação a produzir sistemas de irrigação mecanizados nos quais um ou mais aspersores se movimentam lentamente ao longo do campo com movimento uniforme e trajetórias retilíneas ou circulares.

Neste capítulo, serão abordados os pontos até o momento analisados pelos pesquisadores da área agrícola no que se refere ao deslocamento linear de um aspersor rotativo (figura 2.1).

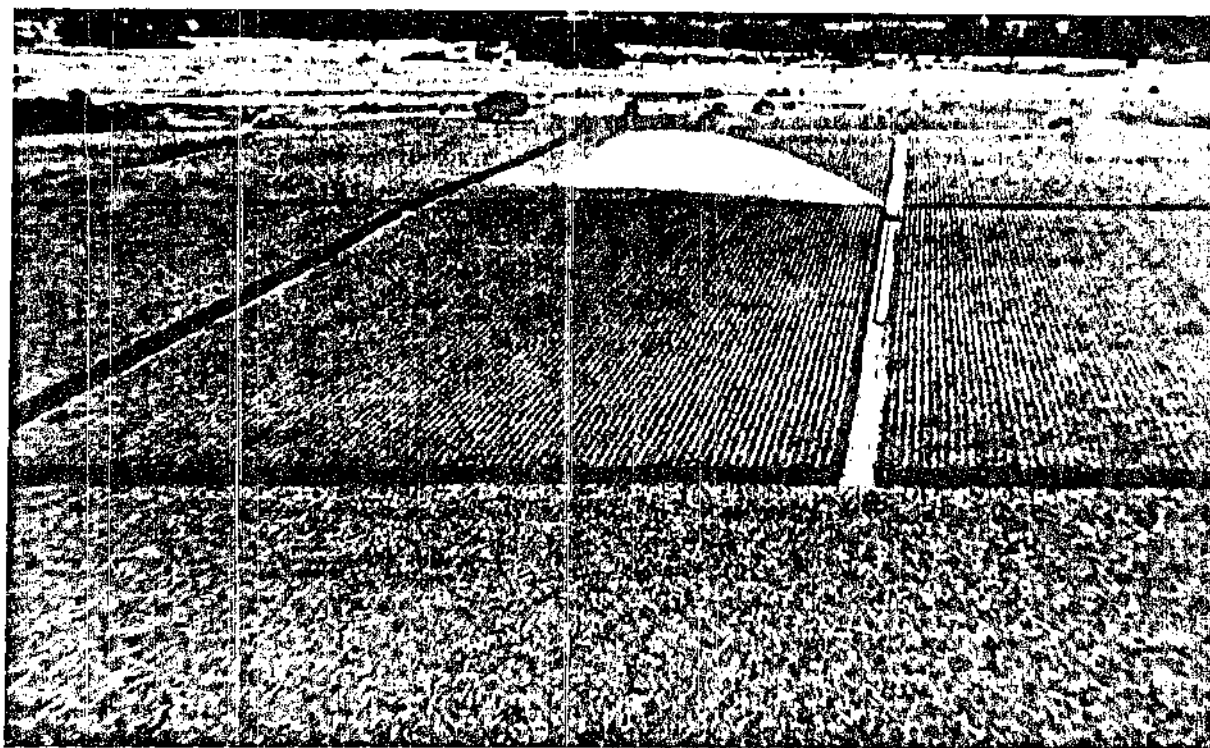


Figura 2.1 - Sistema de irrigação auto-propelido irrigando campo de milho.

Em seguida, apresentam-se a metodologia e os resultados obtidos durante o processo que levou à determinação do perfil de distribuição ideal para sistemas de irrigação por aspersão impelidos de deslocamento linear.

Esses sistemas são conhecidos sob o nome de auto-propelidos e os seus principais componentes são: conjunto moto-bomba, linha de adução, mangueira flexível, unidade transportadora, sistema de tração e aspersor. A água é conduzida sob pressão pela linha de adução e pela mangueira flexível até à unidade transportadora. Nessa unidade, a água aciona o mecanismo de tração (uma turbina, um pistão ou um torniquete hidráulico) e dirige-se para o aspersor rotativo sendo então aspergida sobre o campo (figura 2.2).

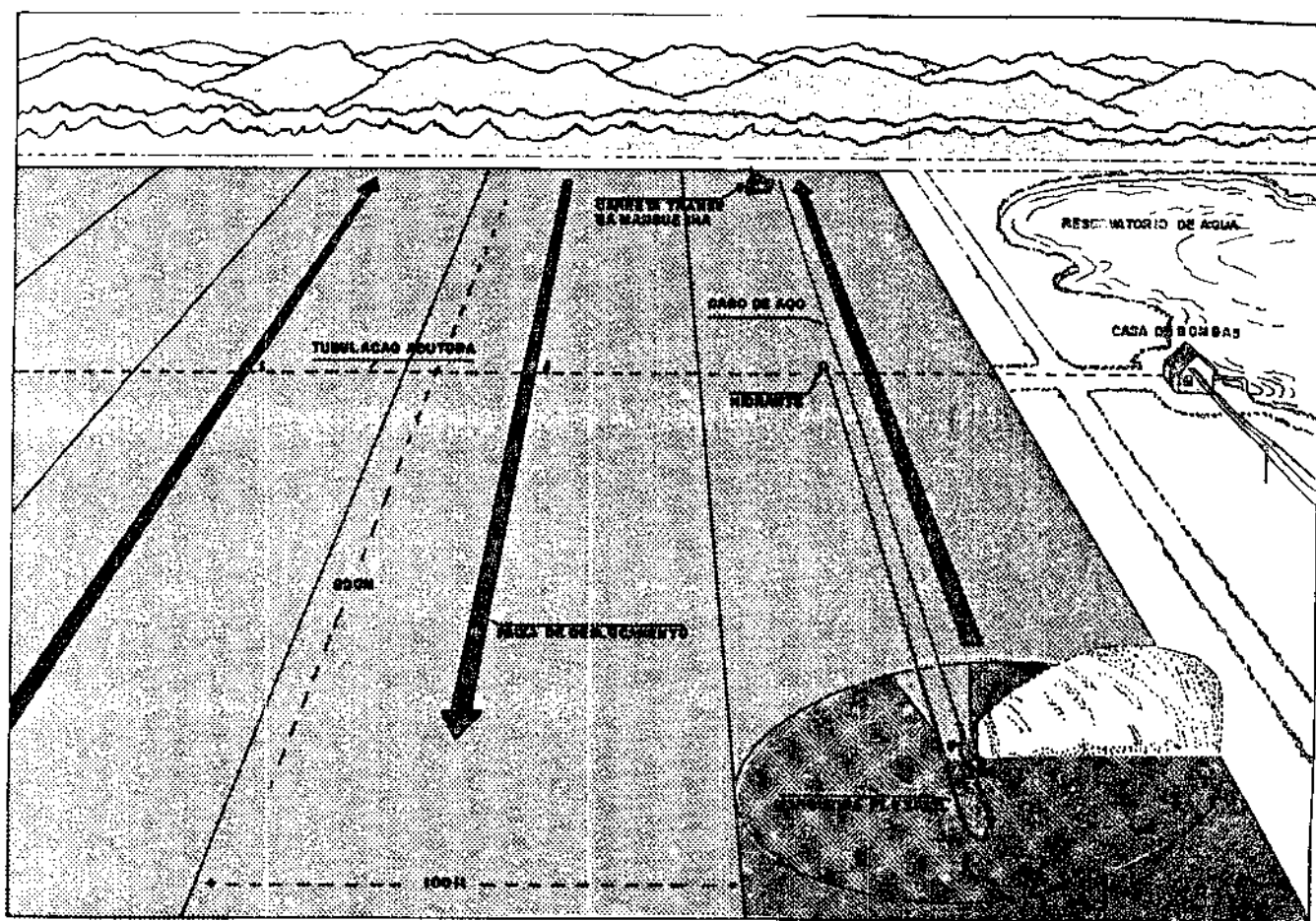


Figura 2.2 - Esquema de funcionamento de um sistema auto-propelido.

A distribuição teórica de água produzida por estes sistemas para alguns perfis de distribuição foi estudada por Bittinger e Longenbaugh [6], Hanson [11] e Solomon [22]. Os dois primeiros autores analisaram a distribuição de água produzida por aspersores rotativos com perfis de distribuição triangulares e elípticos quando se movimentam pelo campo, segundo uma trajetória retilínea, com velocidade constante.

Para o primeiro caso (perfil de distribuição triangular) obtiveram o resultado mostrado na figura 2.3 para a precipitação total obtida num corte da área irrigada normal ao percurso do auto-propelido.

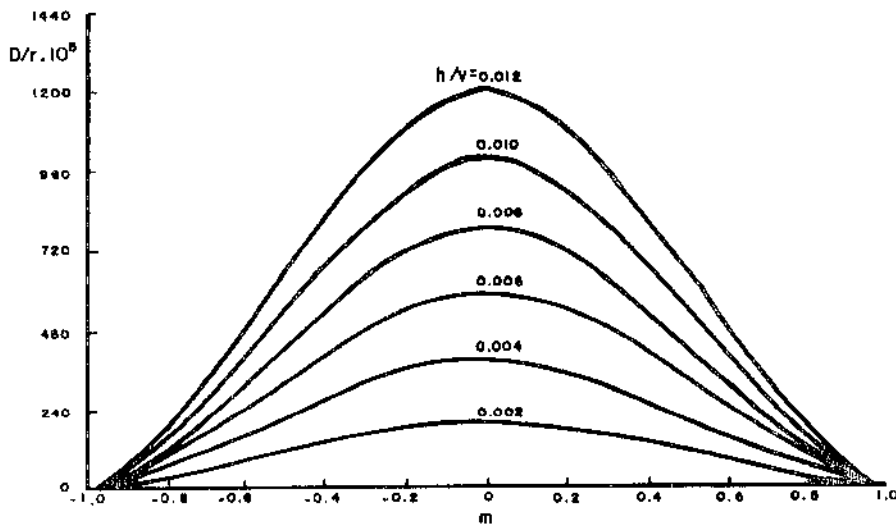


Figura 2.3 - Padrão de distribuição teórica verificado num corte da área irrigada normal ao percurso de um auto-propelido provido de aspersor com perfil de distribuição triangular, segundo Bittinger e Longenbaugh.

Nesta figura, foi plotada a razão entre a lâmina coletada e o raio irrigado, D/r , versus a razão entre a distância do ponto considerado à trajetória do auto-propelido e o raio irrigado, m , para vários valores de h/v , onde h representa a intensidade de precipitação máxima produzida pelo aspersor (para $m=0$) e v

representa a velocidade de translação do auto-propelido.

Análogo resultado teórico foi obtido, pelos mesmos autores, para o deslocamento linear de aspersores rotativos com perfil de distribuição elíptico, conforme se pode observar na figura 2.4.

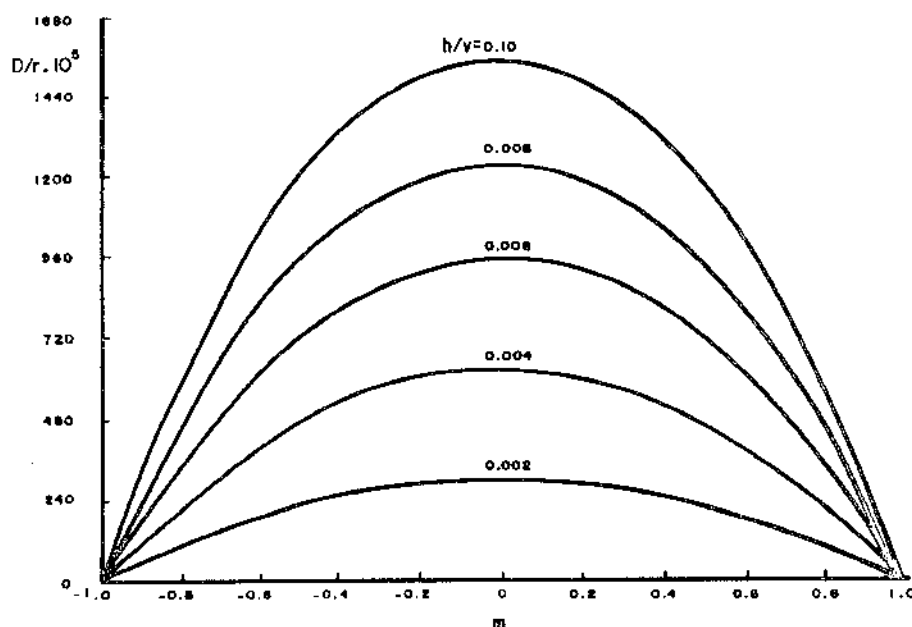


Figura 2.4 - Padrão de distribuição teórico verificado num corte da área irrigada normal ao percurso de um auto-propelido provido de aspersor com perfil de distribuição elíptico, segundo Bittinger e Longenbaugh.

Solomon [22] obteve a distribuição teórica de água produzida por oito diferentes perfis de distribuição de aspersores rotativos animados de deslocamento linear e calculou os seus coeficientes de uniformidade para várias sobreposições das faixas irrigadas, expressas em termos de porcentagens do diâmetro irrigado. Essa análise foi feita em função do ângulo de giro do aspersor, dado que alguns aspersores rotativos possuem um dispositivo para operação setorial que lhes permite operar em setores circulares de abertura variável. Com ângulos de rotação de 210° e 240° , Solomon obteve valores de UC de 88% para espaçamentos entre as traje-

tórias do auto-propelido de 95% do diâmetro irrigado.

Shull e Dylla [21] analisaram, em 1976, o efeito do vento no padrão de distribuição de água de auto-propelidos. Para tal, realizaram 7 testes nos quais a precipitação produzida pelo sistema de irrigação era coletada numa malha quadrangular de pluviômetros dispostos a uma distância de 6,1 metros uns dos outros. Em seus testes, a área de coleta estava situada de tal forma que só começava a ser atingida pela água aspergida pelo auto-propelido algum tempo após este ter iniciado o seu movimento e só cessava de receber água quando a área periodicamente irrigada pelo auto-propelido a ela não mais se sobrepunha. Dessa forma os autores analisaram, em função do comportamento do vento, a distância máxima que deve existir entre os percursos do auto-propelido para que se obtenham, na região central da área irrigada, coeficientes de uniformidade de 85% (UC) e compararam os resultados obtidos com os valores fornecidos pela equação

$$S = 52,42 - 6,48.U + 0,0453.P + 8.\text{sen}\theta \quad (2.1)$$

onde S representa o espaçamento máximo para que se obtenha um UC de 85% (m)

U a velocidade média do vento a 4,0m do solo (m/s)

P a pressão de operação do aspersor (Pa), e

θ a direção do vento em relação à trajetória do auto-propelido (graus).

A tabela 2.1 mostra os valores obtidos por Shull e Dylla. Exceto para o teste E, afirmam que os valores experimentais e os dados pela equação de regressão se apresentam bastante coerentes.

Pode-se observar que durante o teste E a direção predominante do vento foi quase paralela à trajetória do auto-propelido.

TABELA 2.1
DADOS DE ENSAIOS DE AUTO-PROPELIDOS,
(segundo Shull e Dylla)

Teste	Pressão (Pa.10 ⁵)	Velocidade média do vento (m/seg)	Direção média do vento (graus)
A	6,9	4,7	84
B	5,8	7,1	75
C	6,4	2,7	244
D	6,1	3,7	103
E	6,9	4,9	11
F	6,6	3,3	67
G	5,9	2,0	211

Concluem Shull e Dylla que a medida que a velocidade do vento aumenta a sobreposição das faixas irrigadas deve aumentar também, para se obter a uniformidade desejada. Mais ainda, que se a direção predominante do vento se aproxima da direção do movimento do auto-propelido, a sobreposição deve ser ainda mais aumentada. No entanto, para que se apliquem iguais quantidades de água, quando se aumenta a sobreposição deve ser aumentada também a velocidade do auto-propelido. O que, sem dúvida nenhuma, é indesejável pois acarreta um aumento na mão-de-obra necessária à operação do sistema.

A procura do perfil de distribuição ideal para auto-propelidos

O estudo do padrão de distribuição de água produzido por um sistema de irrigação auto-propelido recebeu atenção especial.

Esse estudo compreendeu basicamente três fases:

Inicialmente foi elaborado um programa de computador que simulava a precipitação produzida no campo por um aspersor rotativo impelido de deslocamento linear. A finalidade desse programa foi de permitir visualizar de que modo as variáveis "perfil de

distribuição" e "velocidade de deslocamento linear" influíam no padrão de distribuição de água produzido por um sistema auto-propelido.

Numa segunda fase, foram realizados 15 ensaios de campo com aspersores rotativos animados de deslocamento linear. Durante esta fase foram estudadas as mesmas variáveis, de modo a permitir uma aferição do programa de computador.

Finalmente, efetuou-se a dedução matemática do perfil de distribuição ideal para um aspersor rotativo impelido de deslocamento linear.

Em seguida apresentam-se a metodologia e os resultados obtidos durante essas três fases de pesquisa efetuada.

Simulação do padrão de distribuição de água produzido por aspersores rotativos com deslocamento linear

Foi elaborado um programa de computador em linguagem BASIC e compatível com um computador pessoal com capacidade para 32 kbytes.

Dados o perfil de distribuição de um aspersor operando estacionado, a sua velocidade de deslocamento linear e o seu período de rotação, o computador simulava a precipitação que esse aspersor produziria sobre uma malha quadrangular de pluviômetros regularmente espalhados por um campo de ensaios.

Dessa forma se tornou possível prever o padrão de distribuição de água que produziriam quando em movimento tanto aspersores rotativos disponíveis no mercado de produtos nacionais como aqueles com perfis de distribuição teóricos, que iam sendo pesquisados.

A título de referência, o diagrama de blocos do programa elaborado encontra-se no Apêndice A.

Inicialmente foi simulada a distribuição de água produzida por um aspersor disponível no mercado cujas características de distribuição, quando estacionado, foram determinadas experimentalmente [1], [3].

A figura 2.5.a mostra o perfil de distribuição de um aspersor rotativo comercial com um bocal cônico de $9,5 \cdot 10^{-3}$ m de diâmetro operado a 490 kPa. Na figura 2.5.b vemos a simulação do padrão de distribuição de água produzido por esse aspersor quando se deslocasse ao longo do campo com uma velocidade de $3,47 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Como a distribuição se admitiu simétrica, e por motivos de economia de tempo de processamento, as isoietas (curvas de igual precipitação) são traçadas unicamente em metade do campo.

Na figura 2.5.b torna-se evidente a existência de três regiões distintas na faixa irrigada por um auto-propelido: duas regiões circulares cujos centros se localizam nas âncoras de partida e de chegada do auto-propelido e uma região central onde as isoietas se mantêm paralelas.

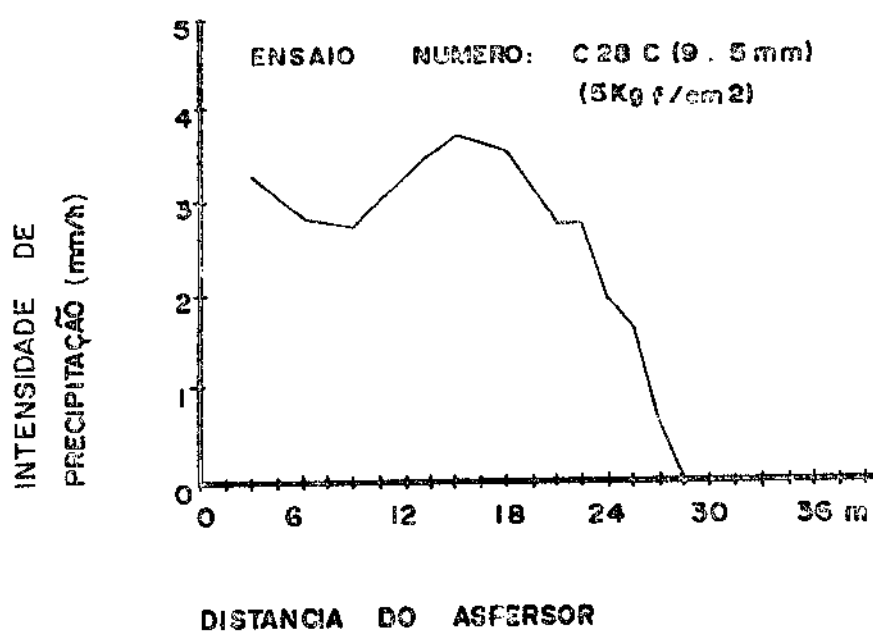
As duas regiões circulares das extremidades da faixa irrigada apresentam uma precipitação inferior à da região central. As isoietas das regiões circulares apresentam um formato curvilíneo, de tal forma que se torna difícil a procura da solução para a obtenção de uma precipitação uniforme nas extremidades da faixa irrigada por um auto-propelido.

Na região central da faixa irrigada, por outro lado, as isoietas deverão manter-se paralelas se desprezarmos o efeito do vento.

A figura 2.6 mostra a lâmina adimensional "coletada" numa linha de pluviômetros normal ao percurso do auto-propelido, na região central da faixa irrigada, durante a mesma simulação.

Verifica-se, que nos pontos situados a mais de $R_{\max}/2$ do carreador, a lâmina aplicada começa a diminuir rapidamente à medida que nos afastamos do carreador.

Para se obter uma boa uniformidade com este aspersor seria necessária uma elevada sobreposição das faixas irrigadas, o que, como vimos, é indesejável.



a)

CAMPO DE TESTE DO AUTO-PROPELIDO

----- CARREADOR
..... PLUVIOMETROS

E
80

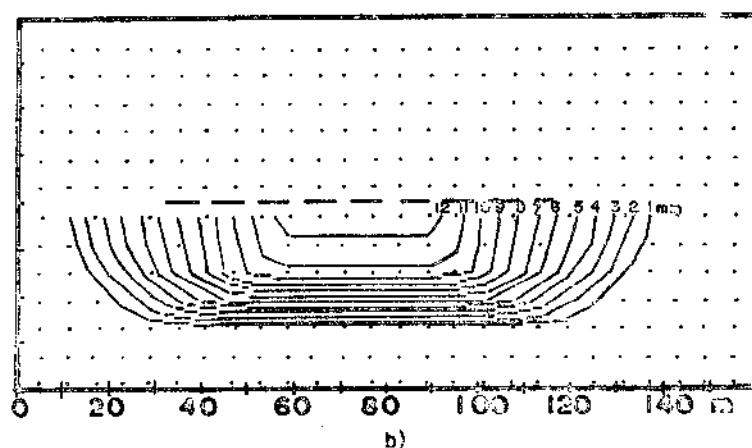


Figura 2.5 - a) Perfil de distribuição de um aspersor comercial com um bocal cônico de $9,5 \cdot 10^{-3}$ m de diâmetro, operado a 490 kPa; b) Simulação do padrão de distribuição produzido por esse aspersor quando se desloca com uma velocidade de $3,47 \cdot 10^{-3}$ m/s.

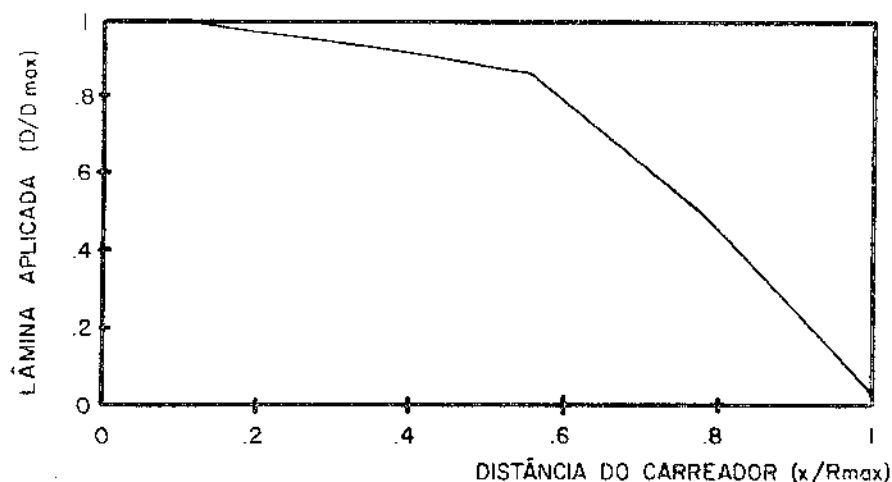


Figura 2.6 - Secção transversal da lâmina aplicada por um auto-propelido.

Na figura 2.7 apresenta-se um perfil de distribuição teórico e o padrão de distribuição de água produzido por um aspersor rotativo com esse perfil de distribuição, quando impelido de deslocamento linear com uma velocidade de $5,56 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Novamente se podem observar as duas regiões circulares nas extremidades da faixa irrigada e a região central com as isoietas paralelas.

Verifica-se mais uma vez que, mesmo na região central da faixa irrigada, não existe uma uniformidade da distribuição de água.

Este fato se torna mais claro se observarmos a figura 2.8.

Nessa figura podemos visualizar a precipitação adimensional obtida numa linha de pluviômetros normal ao percurso do auto-propelido, na região central da faixa irrigada.

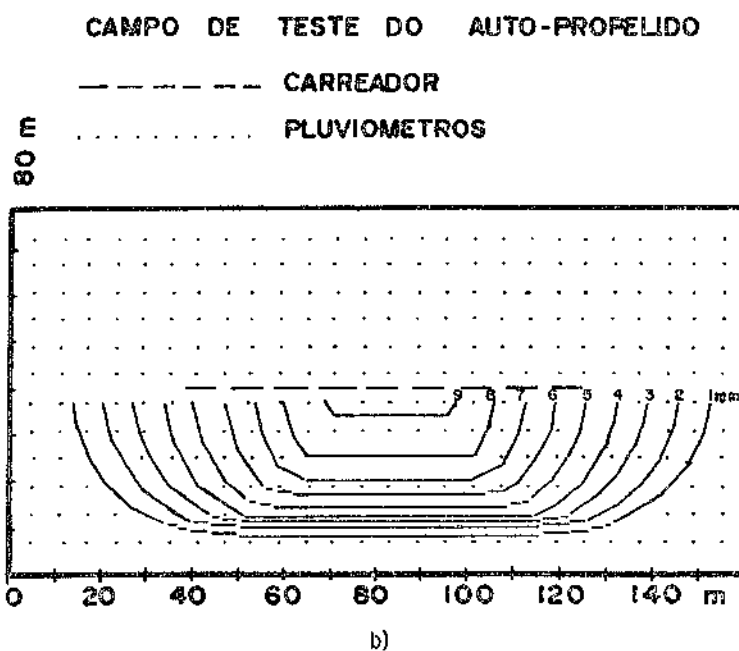
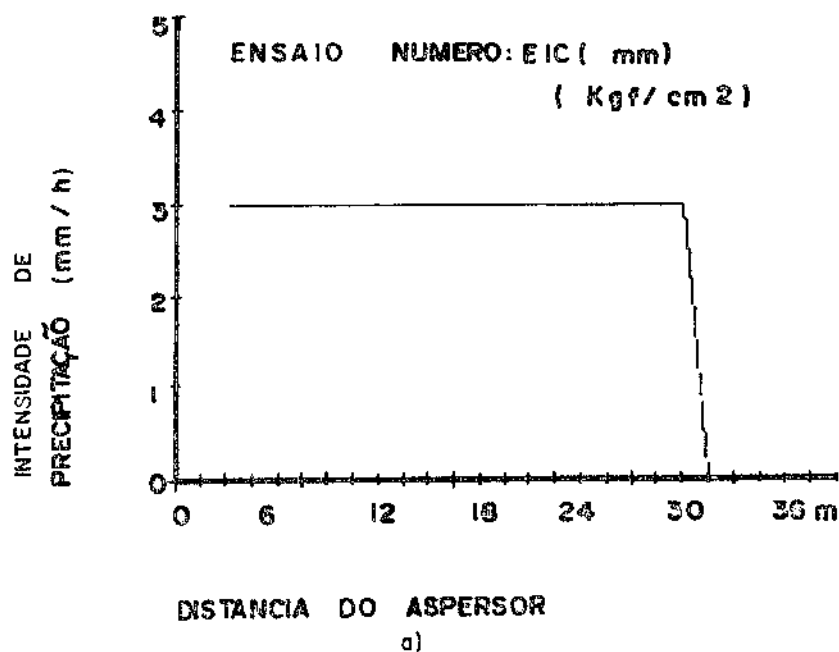


Figura 2.7 - a) Perfil de distribuição teórico; b) Simulação do padrão de distribuição produzido por um aspersor com esse perfil de distribuição quando se deslocar com uma velocidade de $5,56 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

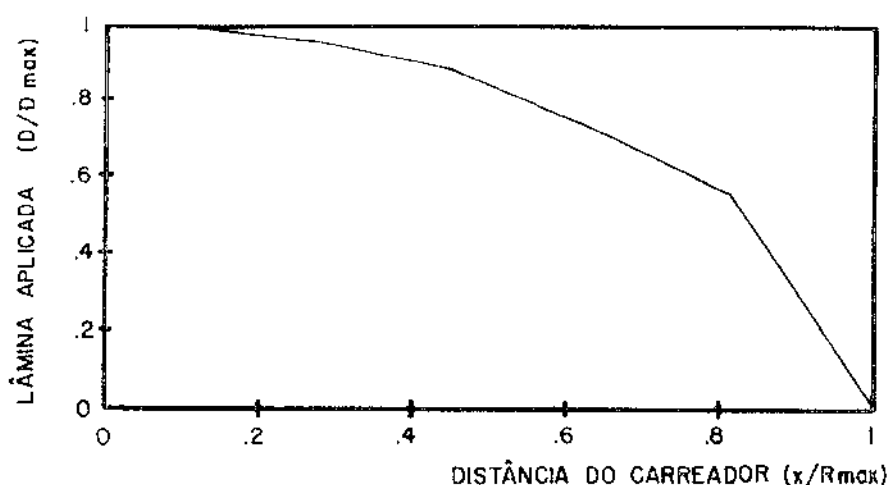


Figura 2.8 - Secção transversal da faixa irrigada mostrada na figura 2.7.

Vários perfis de distribuição teóricos tiveram o seu padrão de distribuição simulado.

A figura 2.9 mostra o padrão de distribuição de água produzido por um outro perfil de distribuição teórico deslocando-se com uma velocidade de $5,56 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Pela distribuição das isoietas, pode verificar-se um aumento na uniformidade do padrão de distribuição de água. Esse facto torna-se mais claro na figura 2.10 onde se observa a lâmina adimensional obtida numa linha de pluviômetros normal ao carreador, na região central da faixa irrigada.

Torna-se clara portanto a existência de uma relação estreita entre o perfil de distribuição de um aspersor, obtido quando operado estacionariamente, e a uniformidade do padrão de distribuição de água produzido por esse aspersor quando instalado num sistema de irrigação auto-propelido.

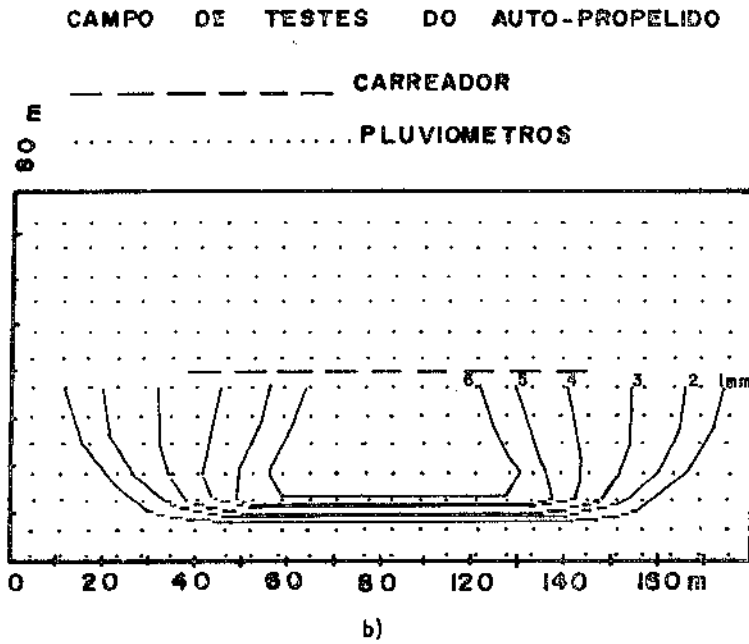
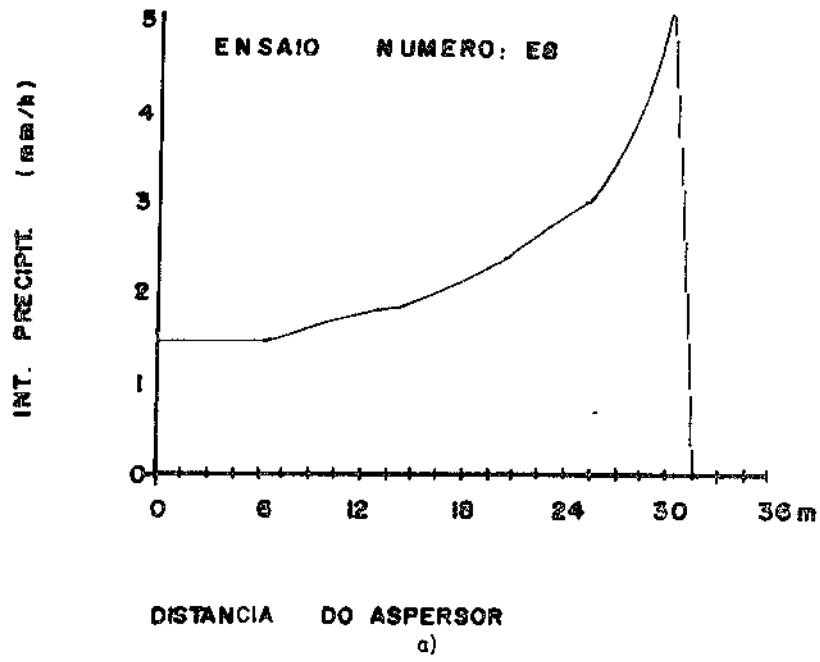


Figura 2.9 - a) Perfil de distribuição teórico; b) Simulação do padrão de distribuição produzido por um aspersor com esse perfil de distribuição quando se deslocar com uma velocidade de $5,56 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

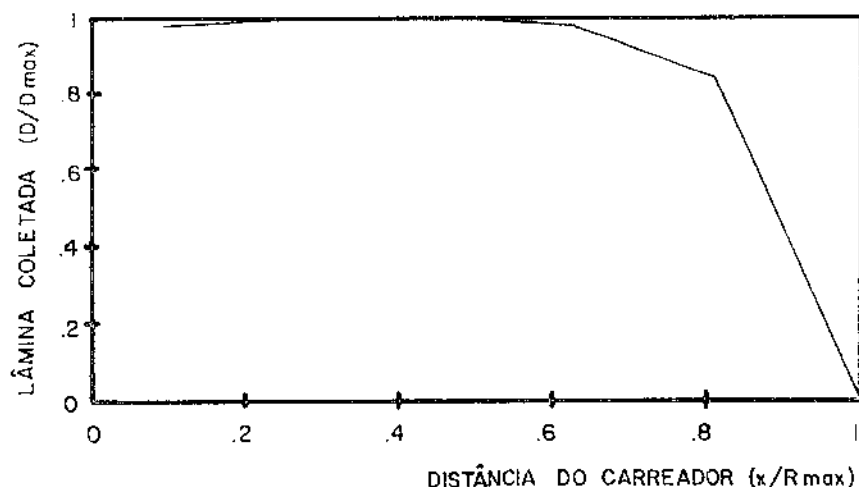


Figura 2.10 - Secção transversal da faixa irrigada mostrada na figura 2.9.

Por esse motivo se justifica a procura do perfil de distribuição ideal para um aspersor de irrigação que opere animado de deslocamento linear.

Com auxílio do programa de simulação puderam ainda obter-se informações acerca da influência da velocidade de deslocamento linear do aspersor sobre o padrão de distribuição de água em toda a faixa irrigada.

A figura 2.11 mostra os padrões de distribuição de um perfil teórico quando se desloca com velocidades de $5,56 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $2,78 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Podemos observar, além de um aumento da lâmina coletada em toda a faixa irrigada, que as isoietas mantêm o mesmo aspecto em ambas as simulações.

A figura 2.12 mostra a lâmina obtida com esse mesmo perfil animado de ambas as velocidades de deslocamento linear, num corte transversal da região central da faixa irrigada.

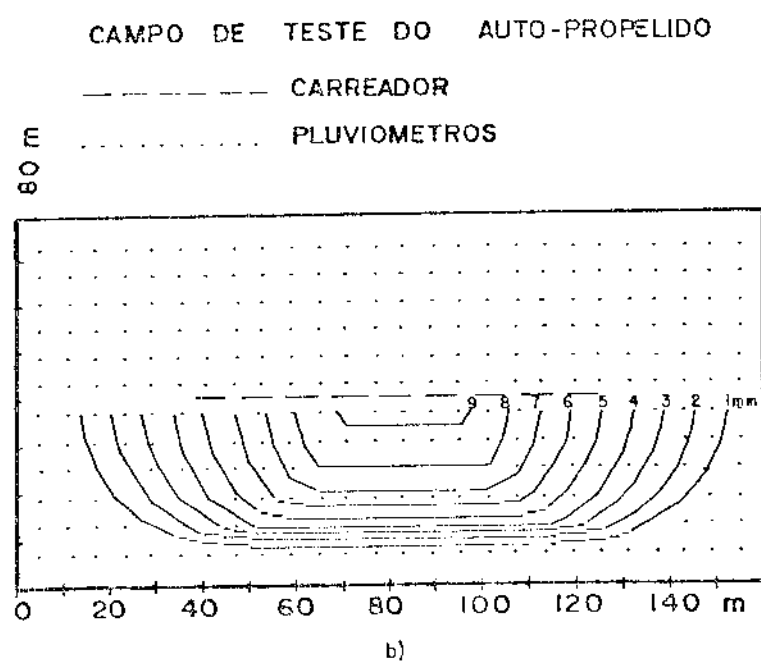
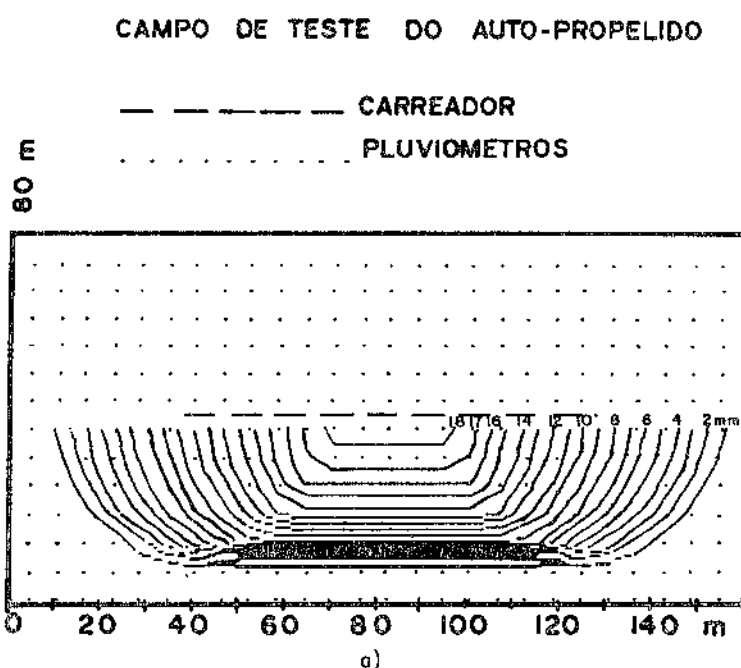


Figura 2.11 - a) Simulação do padrão de distribuição produzido por um perfil de distribuição teórico quando se desloca com uma velocidade de $2,78 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$; b) Idem, para o mesmo perfil de distribuição deslocando-se com uma velocidade de $5,56 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

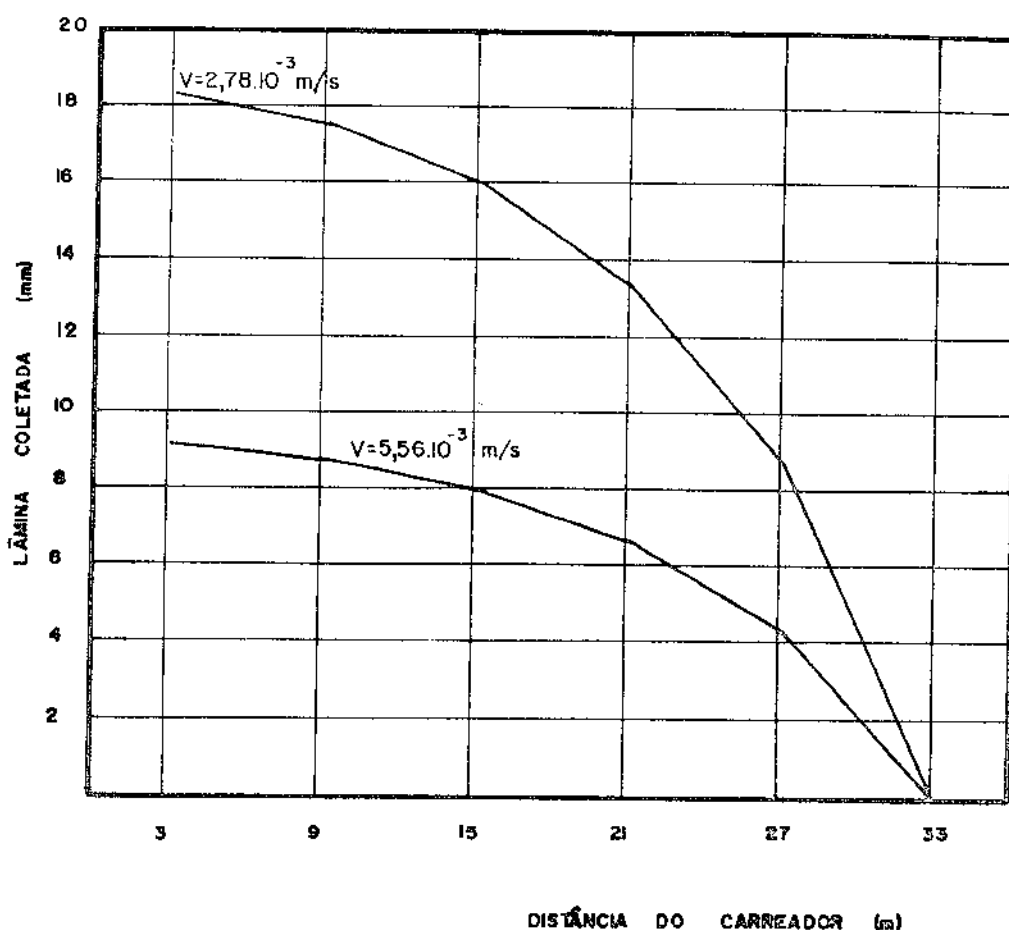


Figura 2.12 - Secção transversal das faixas irrigadas mostradas na figura 2.11.

Verifica-se que, em cada um dos pontos da faixa irrigada, a lâmina obtida por simulação é inversamente proporcional à velocidade de deslocamento linear do auto-propelido.

Algumas conclusões podem assim ser tiradas:

Caso se consiga obter um aspersor que produza uma distribuição quase uniforme na região central da faixa irrigada, a razão entre o comprimento do carreador e o diâmetro irrigado deverá ser bastante maior que a unidade. Dessa forma se consegue reduzir o efeito da não-uniformidade das duas regiões circulares da faixa irrigada que apresentam isoietas curvilíneas.

O padrão de distribuição adimensionalizado não depende da velocidade de deslocamento linear do aspersor.

O que depende da velocidade de deslocamento linear do aspersor é a lâmina aplicada.

O padrão de distribuição adimensionalizado, no entanto, varia com o perfil de distribuição do aspersor.

Desta forma, se nos preocupamos com a uniformidade do padrão de distribuição produzido por sistemas auto-propelidos, devemos procurar obter aspersores com perfis de distribuição adequados.

A quantidade real de água aplicada durante uma irrigação será, então, função de velocidade de deslocamento linear do aspersor.

A operação simultânea de aspersores rotativos estacionados e impelidos de deslocamento linear.

Procurou-se obter dados que permitissem visualizar o padrão de distribuição real de água produzido por um aspersor rotativo animado de deslocamento linear.

Nesse sentido foram operados simultaneamente, no campo, dois aspersores rotativos de características idênticas.

Em cada experimento realizado, um desses aspersores era mantido estacionado no campo de ensaios enquanto o outro aspersor (figura 2.13.a) se deslocava continuamente sobre uma outra parcela do mesmo campo.

Como as condições operacionais de ambos os aspersores eram idênticas em cada um dos experimentos, a matriz de intensidade de precipitação do aspersor estacionário servia como referência.

Durante os ensaios realizados procuraram estudar-se as variáveis "perfil de distribuição" e "velocidade de deslocamento linear".

Para fazer variar a velocidade de deslocamento linear do aspersor móvel bastava controlar a rotação do motor do dispositivo de tração (figura 2.13.b).

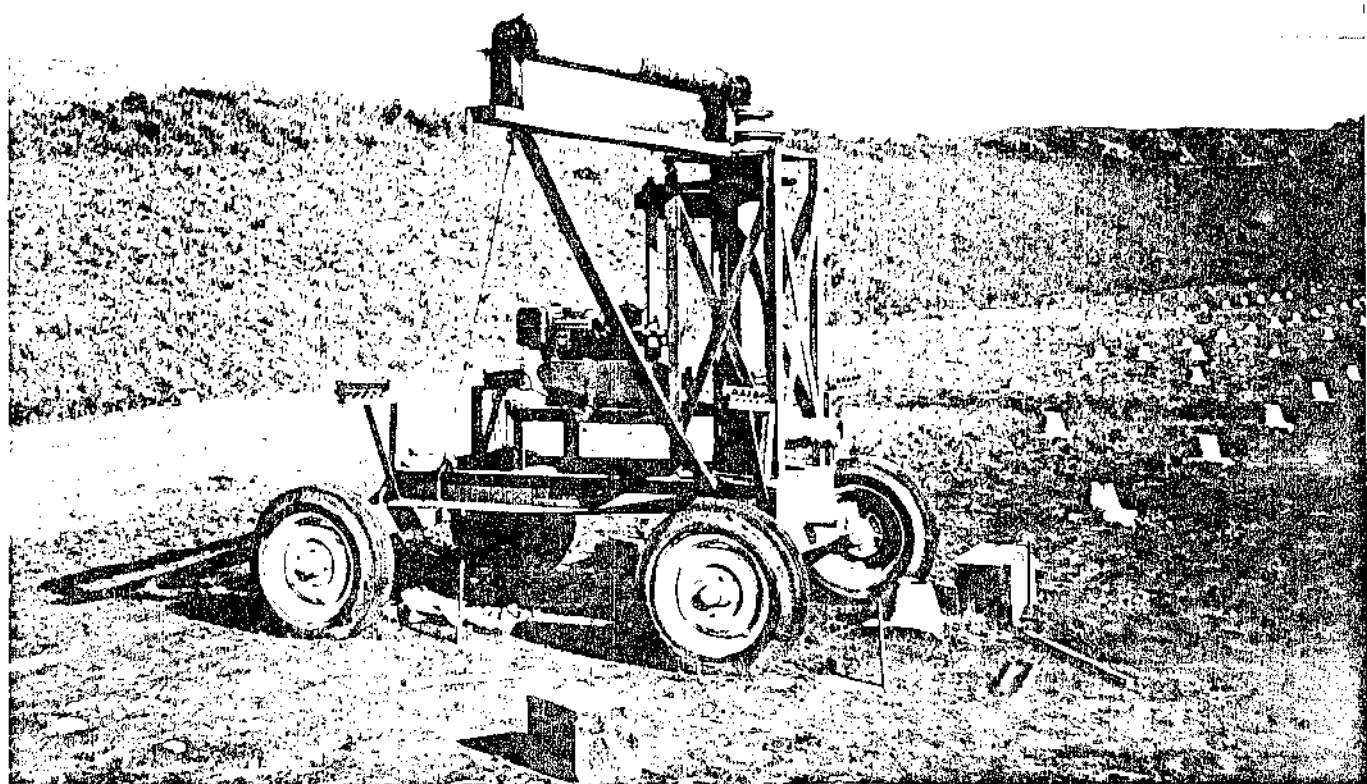
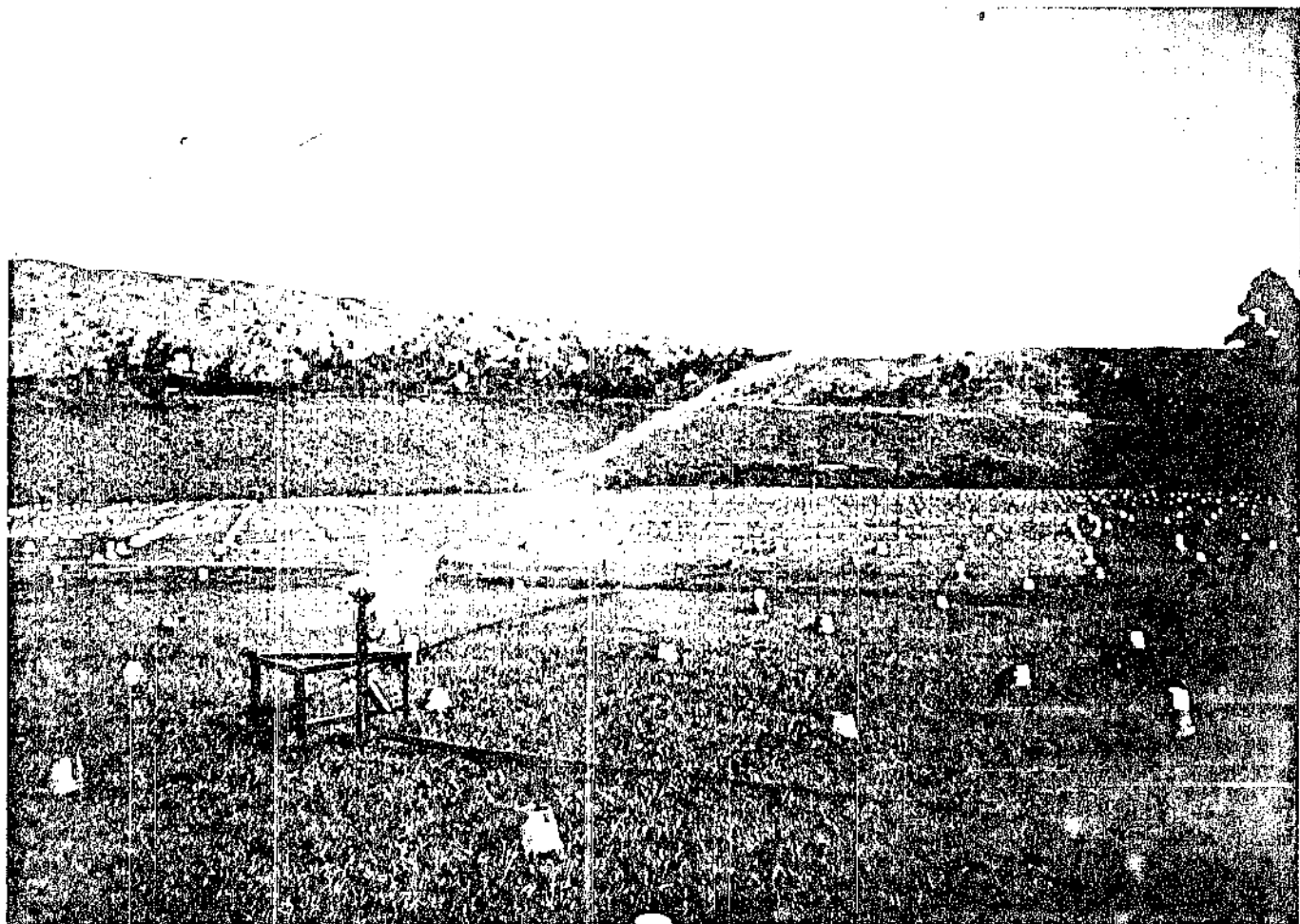


Figura 2.13 - a) O aspersor impelido de deslocamento linear; b) O sistema de tração.

A variação do perfil de distribuição, por seu lado, era obtida pela variação da pressão de operação dos aspersores.

As figuras 2.14 a 2.16 mostram vários aspectos do ensaio simultâneo de aspersores.

No Apêndice B encontram-se os resultados obtidos em todos os experimentos realizados nesta fase da pesquisa.

Os aspersores utilizados para a realização dos experimentos possuíam um único bocal cônico com diâmetro de saída de $9,5 \cdot 10^{-3}$ m e tinham o seu movimento de rotação produzido por meio de um braço oscilante provido de mola helicoidal.

A figura 2.17 mostra os padrões de distribuição de água obtidos experimentalmente com ambos os aspersores operando com uma pressão de 340 kPa.

Durante esse ensaio o aspersor móvel deslocou-se com uma velocidade de $4,94 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Podemos observar uma grande semelhança entre o padrão de distribuição real de água obtido com o aspersor animado de deslocamento linear e os padrões de distribuição inicialmente simulados com o auxílio do computador.

Verificam-se igualmente três regiões distintas na faixa irrigada: duas regiões de formato aproximadamente circular nas extremidades da faixa irrigada, nas quais as isoietas apresentam um aspecto curvilíneo, e uma região central, na qual as isoietas tendem a manter-se linhas retas paralelas.

Para se visualizar o efeito da variação da velocidade de deslocamento linear do aspersor móvel no padrão de distribuição de água por ele produzido, mostram-se nas figuras 2.18 e 2.19 os resultados obtidos com os mesmos aspersores funcionando com a mesma pressão porém quando o aspersor móvel apresentava uma velocidade de deslocamento linear de $6,86 \cdot 10^{-3}$ m/s e $9,92 \cdot 10^{-3}$ m/s, respectivamente.

Nessas figuras, podemos observar que, excetuando as deformações aleatórias produzidas pelo vento, se obtêm padrões de distribuição semelhantes no formato.

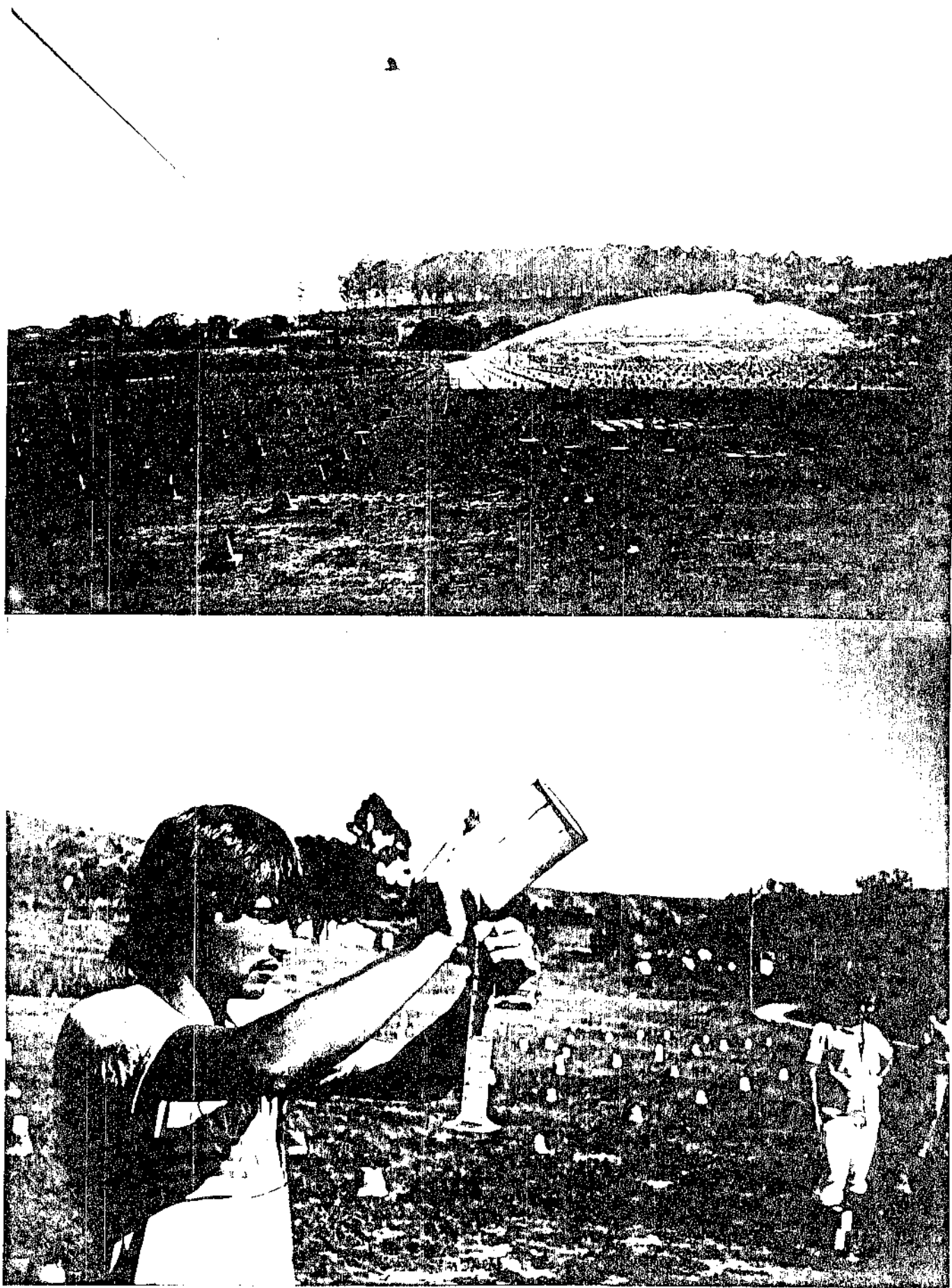


Figura 2.14 - a) O aspersor deslocando-se sobre o campo de ensaio, tracionado pelo cabo de aço; b) Levantando o padrão de distribuição de água.



Figura 2.15 - As medições periódicas: a) da umidade relativa;
b) da direção e intensidade do vento.

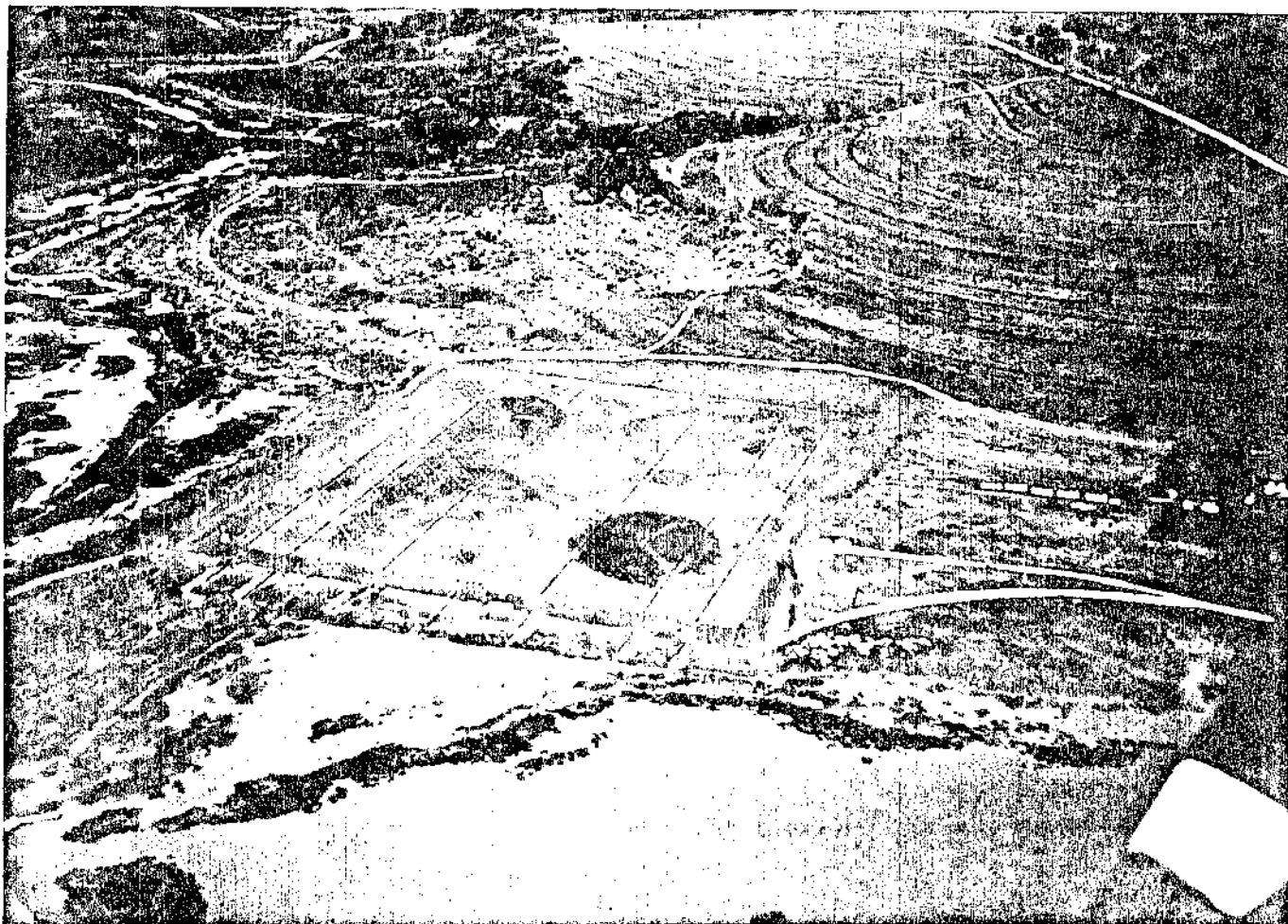


Figura 2.16 - Vista aérea do campo de ensaios onde se podem visualizar as duas faixas de terreno irrigadas durante um ensaio: uma faixa circular sobre a qual operou o aspersor estacionado e uma faixa retangular sobre a qual operou o aspersor animado de deslocamento linear.

200 —
180 —
160 —
140 —
120 —
100 —
80 —
60 —
40 —
20 —

VELOCIDADE DO VENTO (m/min)



15 30 45 60 80

DISTANCIA PERCORRIDA (m)

vento predominante

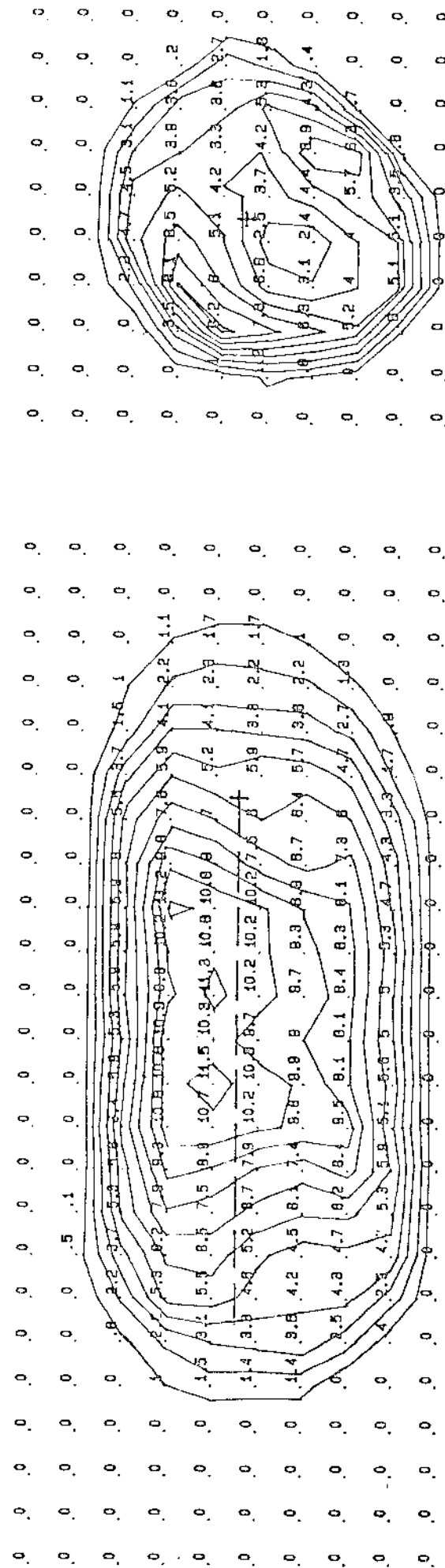
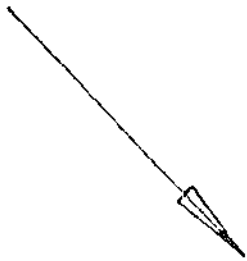


Figura 2.17 - Operação simultânea de dois aspersores, a 340 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $4,94 \cdot 10^{-3}$ m/s.

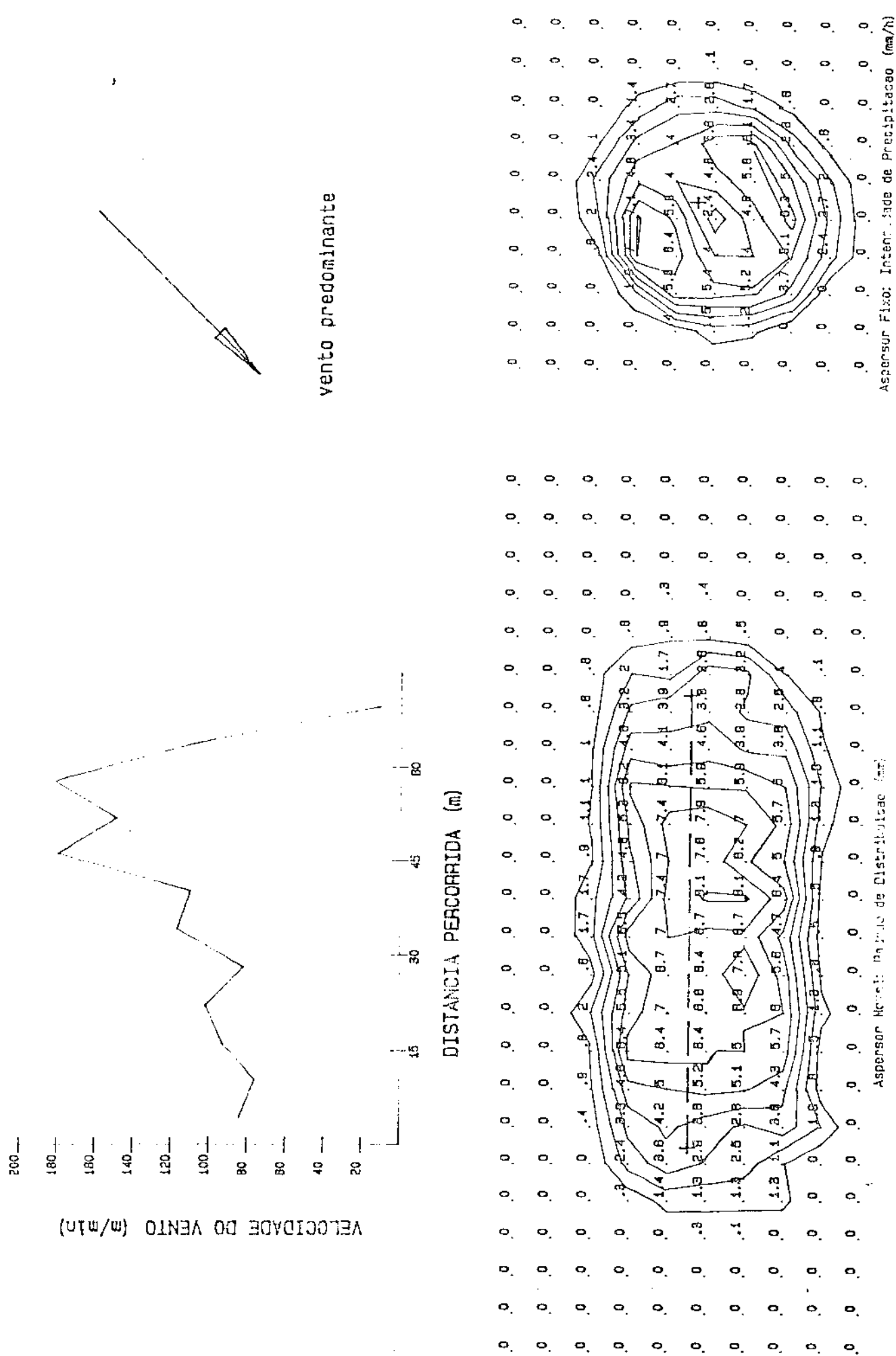


Figura 2.18 - Operação simultânea de dois aspersores a 340 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $6,86 \cdot 10^{-3}$ m/s.

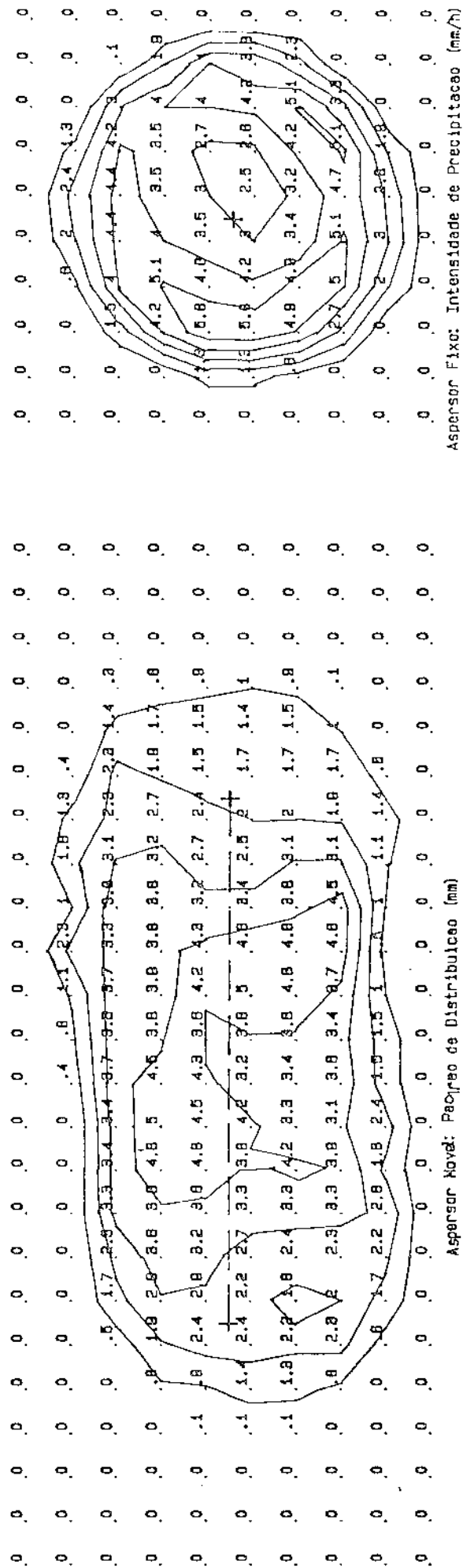
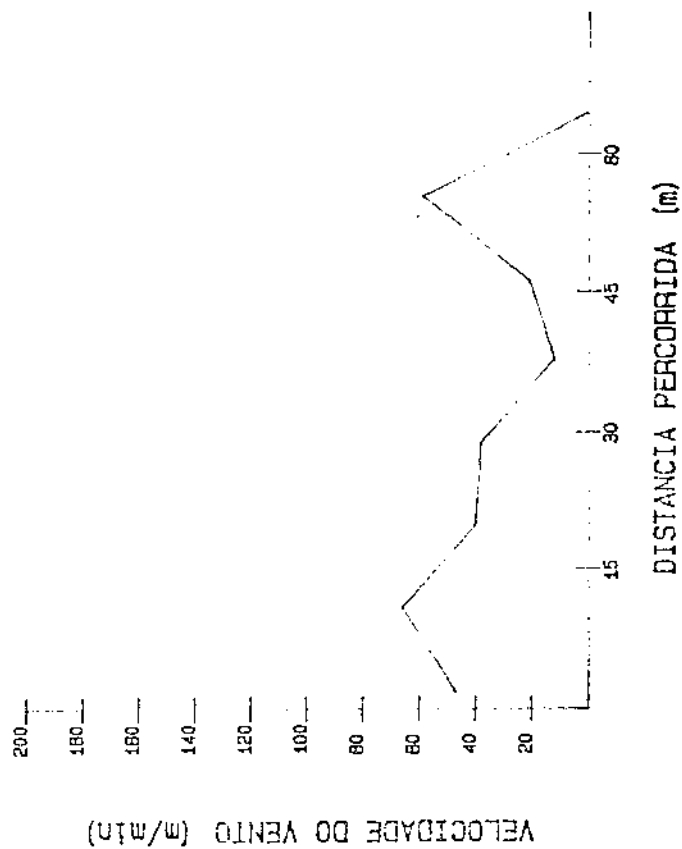


Figura 2.19 - Operação simultânea de dois aspersores a 340 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $9,92 \cdot 10^{-3}$ m/s.

As lâminas de água coletadas variam, no entanto, na razão inversa da velocidade de deslocamento linear do aspersor móvel, confirmando a previsão obtida pela simulação no computador.

Nas figuras 2.20, 2.21 e 2.22 observamos os mesmos aspersores operando com pressões de 440 kPa, 340 kPa e 245 kPa, respectivamente.

Nestes três experimentos a velocidade de deslocamento linear do aspersor móvel foi mantida constante e igual a 10^{-2} m/s.

Podemos verificar que as variações na pressão de operação dos aspersores produziram perfis de distribuição diferentes que se refletiram no padrão de distribuição de água produzido pelo aspersor móvel, como era de se esperar.

Sabendo-se que a uniformidade da distribuição obtida na região central da faixa irrigada por um auto-propelido é unicamente função do formato do perfil de distribuição de seu aspersor, uma pergunta fica no ar: Qual o perfil de distribuição que deve ter um aspersor de irrigação para que, ao ser instalado sobre um sistema de irrigação auto-propelido, produza um padrão de distribuição de água absolutamente uniforme?

O perfil de distribuição ideal para aspersores rotativos animados de deslocamento linear.

Consideremos o caso em que a matriz de precipitação de um aspersor de irrigação, cujo perfil de distribuição é dado por $P(x)$, inicia a sua passagem por uma linha perpendicular à direção do deslocamento linear do aspersor, como mostra a figura 2.23, onde v representa a velocidade de deslocamento linear do aspersor, w a sua velocidade angular e θ_0 o valor do ângulo formado entre o raio móvel e a direção do deslocamento linear.

Tentemos inicialmente determinar os instantes em que o raio móvel passa pelo ponto de ordenada y .

No instante $t=0$ o aspersor encontra-se na posição indicada na figura 2.23 e o ponto A vai deslocar-se desde a origem até

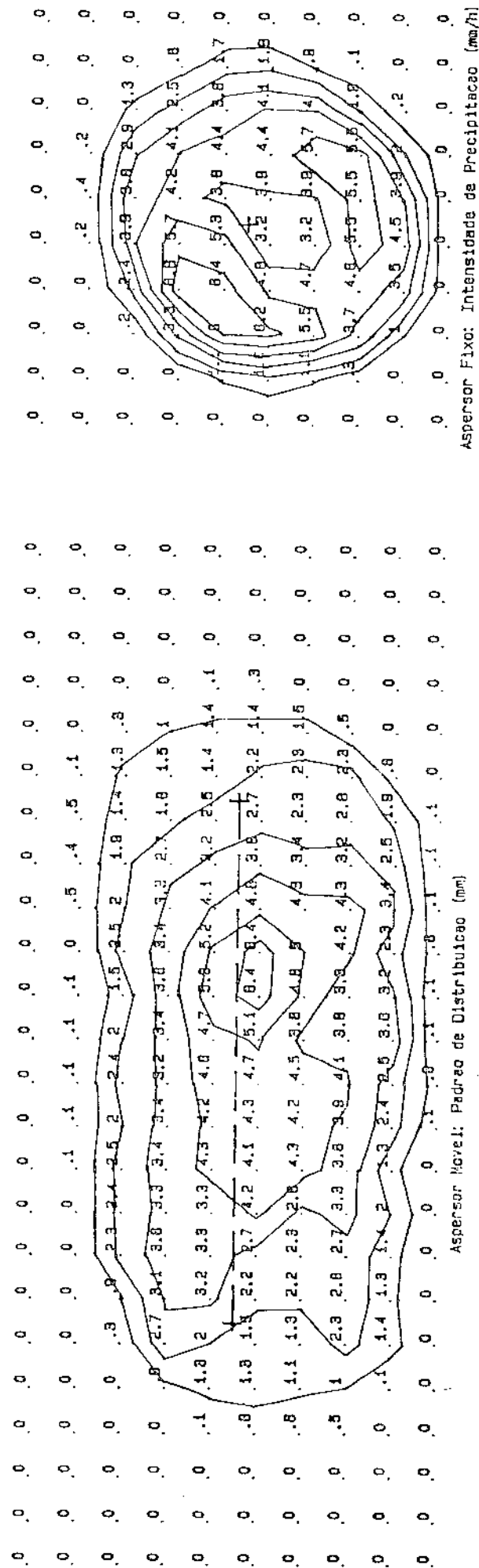
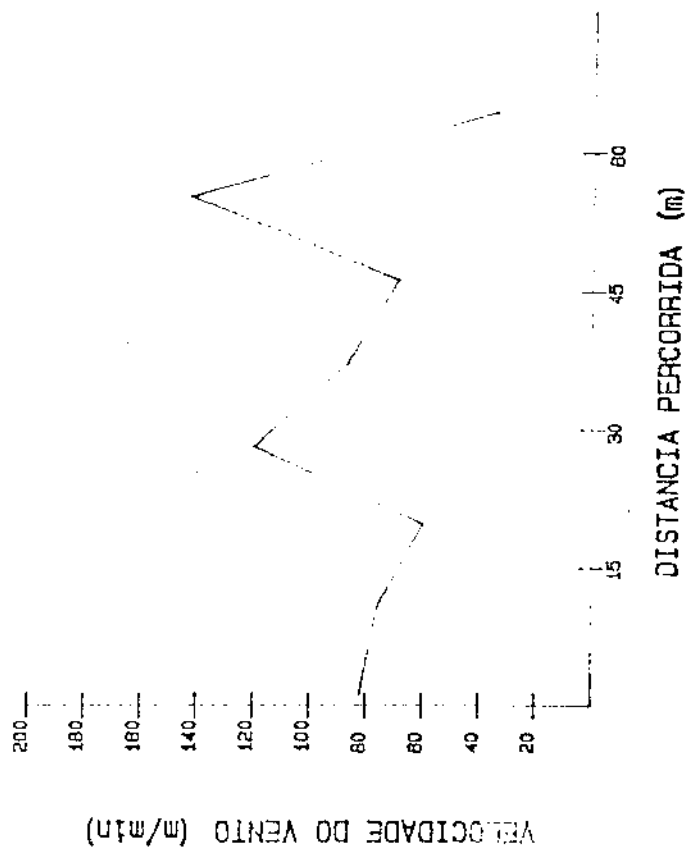


Figura 2.20 - Operação simultânea de dois aspersores a 440 kPa. Velocidade do aspersor móvel: 10^{-2} m/s.

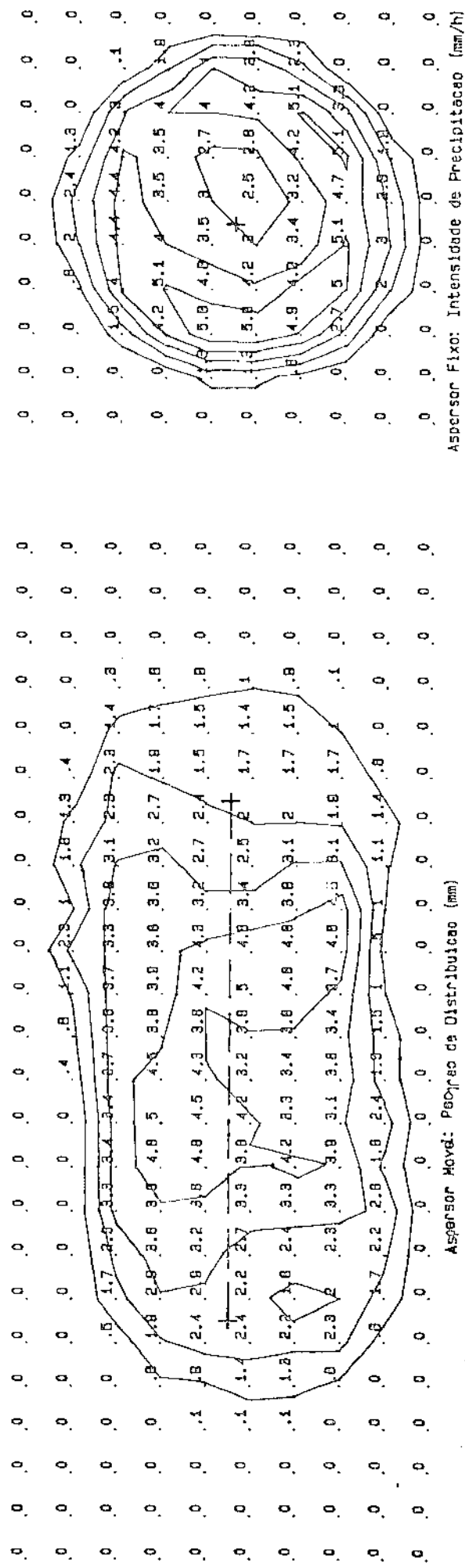
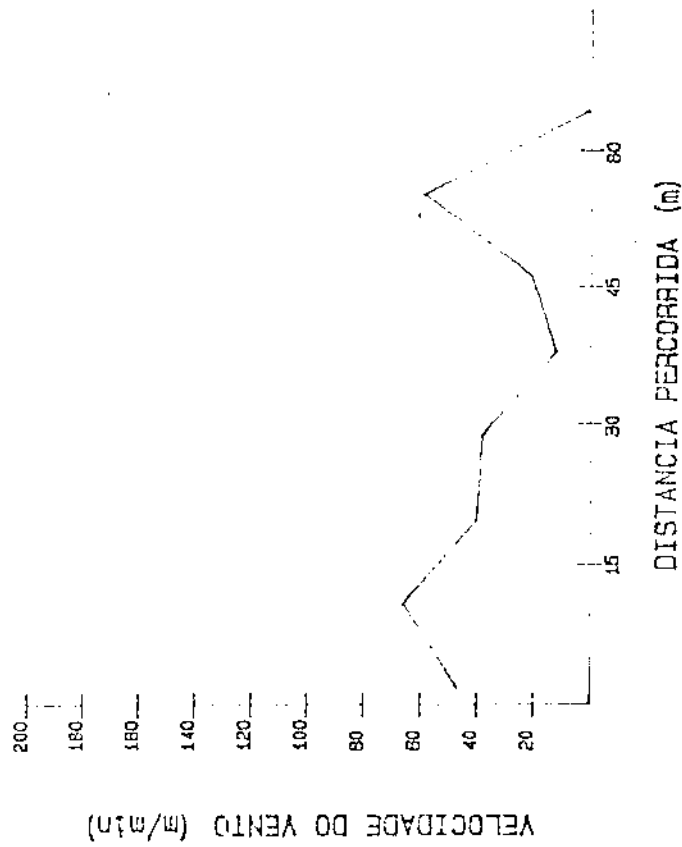


Figura 2.21 - Operação simultânea de dois aspersores a 340 kPa. Velocidade do aspersor móvel: 10^{-2} m/s.

200 —
180 —
160 —
140 —
120 —
100 —
80 —
60 —
40 —
20 —

VELOCIDADE DO VENTO (m/min)



vento predominante

15 30 45 80

DISTANCIA PERCORRIDA (m)

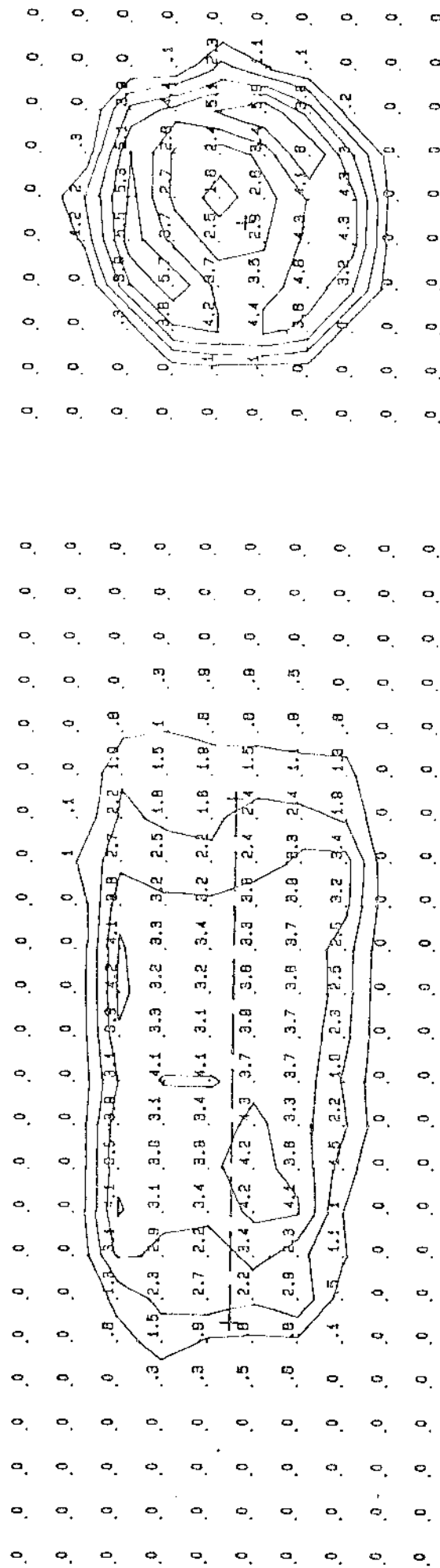


Figura 2.22 - Operação simultânea de dois aspersores a 245 kPa. Velocidade do aspersor móvel: 10^{-2} m/s.

ao ponto $(2.R,0)$, onde R representa o alcance (raio irrigado) do aspersor.

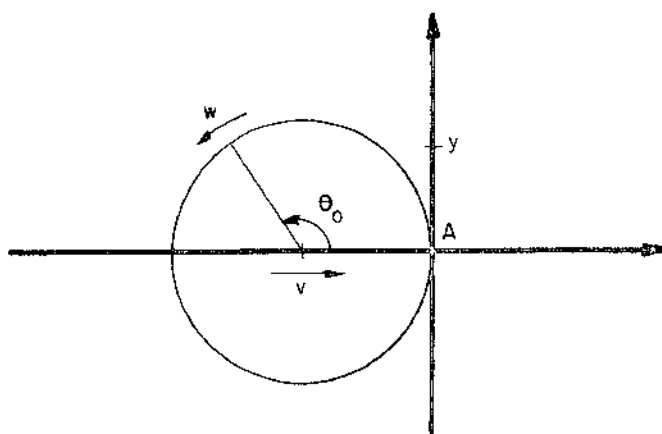


Figura 2.23 - Momento em que o aspersor rotativo inicia sua passagem por uma linha perpendicular à direção do seu deslocamento.

No instante t , o ponto A estará em $(v.t,0)$ e o centro do círculo em $(v.t-R,0)$. O raio móvel estará na posição $\theta = \theta_0 + w.t$ e passa por $(0,y)$ se $\theta = \arctg(y/(R-v.t))$.

Então, o raio móvel passará pelo ponto $(0,y)$ quando

$$\theta_0 + w.t = \arctg \frac{y}{R-v.t} \quad (2.2)$$

ou quando

$$R-v.t = y.\cotg(\theta_0 + w.t) \quad (2.3)$$

A equação obtida é uma equação transcendente cujas raízes só podem ser determinadas aproximadamente, por métodos numéricos, portanto só para um número finito de valores de $y_1, \dots, y_n$. A cada y_i corresponde um número finito de soluções da equação (2.3) $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}$. A estes valores de t_{ij} correspondem valores de r_{ij} dados por

$$r_{ij} = \sqrt{(R - v \cdot t_{ij})^2 + y^2} \quad (2.4)$$

e pretenderíamos que fosse constante (independente de i)

$$D_i = \sum_{j=1}^{n_i} P(r_{ij})$$

Verificamos porém que desta forma se obteria um certo número de equações lineares entre somas de valores de $P(x)$ em certos pontos r_{ij} , mas como o número de incógnitas é muito maior que o número de equações não ficam determinados os valores de $P(r_{ij})$.

Existe, no entanto, uma simplificação que pode ser feita e que conduz a resultados práticos importantes.

Basta para isso que, como $\omega \gg v/2\pi r$, se admita que no instante t , ou no intervalo $[t + \Delta t]$, são irrigados todos os pontos, sobre a reta perpendicular à direção do deslocamento, desde $(0, -y)$ até $(0, y)$, proporcionalmente aos respectivos valores de $P(r)$.

Assim, obtem-se uma fórmula para $P(r)$ do seguinte modo:

Por questões de simetria, basta considerar a passagem do aspersor sobre o segmento que vai da origem ao ponto $(0, R)$ de um quadrante que no instante $t=0$ se encontra na posição indicada na figura 2.24.

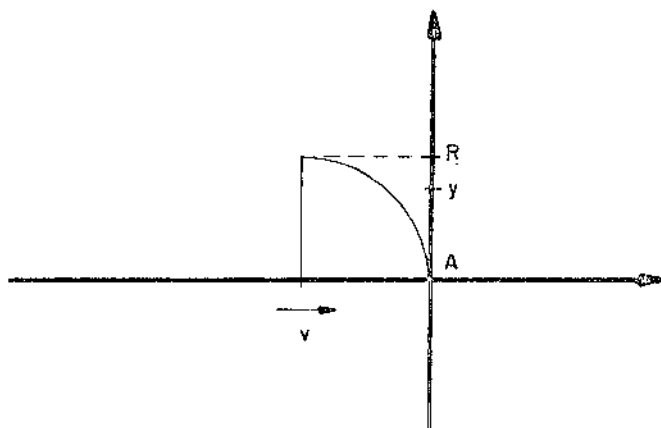


Figura 2.24 - Variáveis envolvidas na análise simplificada.

Para variável independente podemos tomar a abscissa $x=v.t$ do ponto A (móvel). O ponto $(0,y)$ começa a ser irrigado quando $R^2=(R-x)^2+y^2$, isto é, quando $x=R-\sqrt{R^2-y^2}$, e continua sendo irrigado até $x=R$, com intensidade variável dada por $P(r)$ onde $r=\sqrt{(R-x)^2+y^2}$. A precipitação total em $(0,y)$, $D(y)$, será dada por

$$D(y) = \frac{1}{v} \int_{R-\sqrt{R^2-y^2}}^R P(\sqrt{(R-x)^2+y^2}) dx \quad (2.5)$$

Pela equação (2.5) fica claro que, caso não se considere sobreposição das faixas irrigadas, $D(R)=0$. Portanto não haverá $D(y)$ constante a não ser $D(y) \equiv 0$.

Fazendo, na expressão de $D(y)$, uma mudança de variável dada por $r=\sqrt{(R-x)^2+y^2}$, temos

$$x = R - \sqrt{R^2 - y^2} \rightarrow r=R \quad (2.6a)$$

$$x = R \rightarrow r=y \quad (2.6b)$$

e, de $r^2 = (R-x)^2 + y^2$, obtemos $2.r.dr = -2.(R-x).dx$, de onde

$$dx = - \frac{r.dr}{R-x} = - \frac{r.dr}{\sqrt{r^2 - y^2}} \quad (2.7)$$

A equação (2.5) pode então ser escrita como

$$D(y) = \frac{1}{v} \int_R^y \frac{P(r).r}{\sqrt{r^2 - y^2}} dr = \frac{1}{v} \int_y^R \frac{P(r).r}{\sqrt{r^2 - y^2}} dr \quad (2.8)$$

Obtivemos assim um integral impróprio porque a função integranda tende para infinito quando r tende para y . Isso, no entanto, não nos trará problemas porque se pode ver que a função é convergente, integrando por partes, desde que $P'(r)$ seja contínua.

Façamos agora uma simplificação que nos permitirá obter valores discretos para a função $P(r)$. Para isso, divida-se o intervalo $[0, R]$ em n partes por meio dos pontos $y_0=0, \dots, y_j = \frac{j.R}{n}, \dots, y_n=R$.

No ponto genérico y_m (com $m=0, 1, \dots, n-1$) temos

$$D(y_m) = \frac{1}{v} \int_{y_m}^R \frac{P(r).r}{\sqrt{r^2 - y_m^2}} dr = \frac{1}{v} \sum_{j=m}^{n-1} \int_{y_j}^{y_{j+1}} \frac{P(r).r}{\sqrt{r^2 - y_m^2}} dr \quad (2.9)$$

Pelo 2º teorema do valor médio do cálculo integral, sendo $P(r)$ uma função contínua, existe em cada intervalo $[y_j, y_{j+1}]$ um ponto r_{j+1} tal que

$$\int_{y_j}^{y_{j+1}} \frac{P(r).r}{\sqrt{r^2 - y_m^2}} dr = P(r_{j+1}) \int_{y_j}^{y_{j+1}} \frac{r}{\sqrt{r^2 - y_m^2}} dr \quad (2.10)$$

Então, pelas equações (2.9) e (2.10), podemos escrever

$$\begin{aligned}
v.D(y_m) &= \sum_{j=m}^{n-1} \left[P(r_{j+1}) \int_{y_j}^{y_{j+1}} \frac{r}{\sqrt{r^2 - y_m^2}} dr \right] = \\
&= \sum_{j=m}^{n-1} \left\{ P(r_{j+1}) \left[\sqrt{r^2 - y_m^2} \right]_{r=y_j}^{r=y_{j+1}} \right\} = \\
&= \sum_{j=m}^{n-1} \left[P(r_{j+1}) \left(\sqrt{y_{j+1}^2 - y_m^2} - \sqrt{y_j^2 - y_m^2} \right) \right] = \\
&= \sum_{j=m}^{n-1} \left\{ P(r_{j+1}) \left[\sqrt{\frac{(j+1)^2 \cdot R^2}{n^2} - \frac{m^2 \cdot R^2}{n^2}} - \sqrt{\frac{j^2 \cdot R^2}{n^2} - \frac{m^2 \cdot R^2}{n^2}} \right] \right\} = \\
&= \frac{R}{n} \sum_{j=m}^{n-1} \left\{ P(r_{j+1}) \left[\sqrt{(j+1)^2 - m^2} - \sqrt{j^2 - m^2} \right] \right\}
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Para termos $D(y_m)$ constante, desprezando o fator $\frac{R}{n}$ e escrevendo P_{j+1} em vez de $P(r_{j+1})$ e D_m em vez de $D(y_m)$, têm que ser iguais as n expressões

$$v.D_m = \sum_{j=m}^{n-1} \left\{ P_{j+1} \cdot \left[\sqrt{(j+1)^2 - m^2} - \sqrt{j^2 - m^2} \right] \right\} \tag{2.12}$$

com $m=0,1,\dots,n-1$.

Note-se que em D_{n-1} só figura a incógnita P_n , em D_{n-2} só figuram P_n e P_{n-1} , etc., e que em D_0 figuram todos os $P_1, P_2, \dots, P_n$.

Podemos assim formar o sistema

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{n-1} - D_{n-2} = 0 \\ D_{n-2} - D_{n-3} = 0 \\ \dots \\ D_1 - D_0 = 0 \end{array} \right. \quad (2.13)$$

de $n-1$ equações a n incógnitas $(P_1, \dots, P_n)$

É um sistema homogêneo, como era de se esperar, porque obviamente se podem multiplicar todos os P_i por qualquer constante. Pela primeira equação do sistema podemos obter o valor de P_{n-1} em função de P_n . Substituindo o valor de P_{n-1} na segunda equação do sistema obtemos o valor de P_{n-2} em função de P_n , e assim por diante até se obter o valor de P_1 em função de P_n .

É interessante notar que o sistema (2.13) é independente de v , ω e R , salvaguardada a observação inicial de que deveremos ter $\omega \gg v/2\pi r$, o que ocorre em todos os sistemas de irrigação auto-propelidos disponíveis no mercado.

Este fato permite justificar o nosso desacordo em relação ao que afirmam Heermann e Kohl [13] com respeito à relação entre a velocidade dos sistemas de irrigação auto-propelidos e a uniformidade por eles produzida.

Analisemos agora o que acontece com $P(r)$ quando se admite uma sobreposição das faixas irrigadas. Este problema passa então a coincidir com a operação prática de sistemas de irrigação auto-propelidos e nele, sem prejuízo de uniformidade, podemos assumir $D_n=0$ o que está de acordo com a equação (2.5).

A sobreposição das faixas irrigadas se verifica quando a distância entre os carregadores dessas faixas é inferior a $2.R$. Assim, se a distância entre os carregadores for de $R + \frac{p.R}{n}$, a fronteira inferior de segunda faixa irrigada passará pelo ponto $y_p = (p.R)/n$ (com $p \leq n-1$), conforme se verifica na figura 2.25.

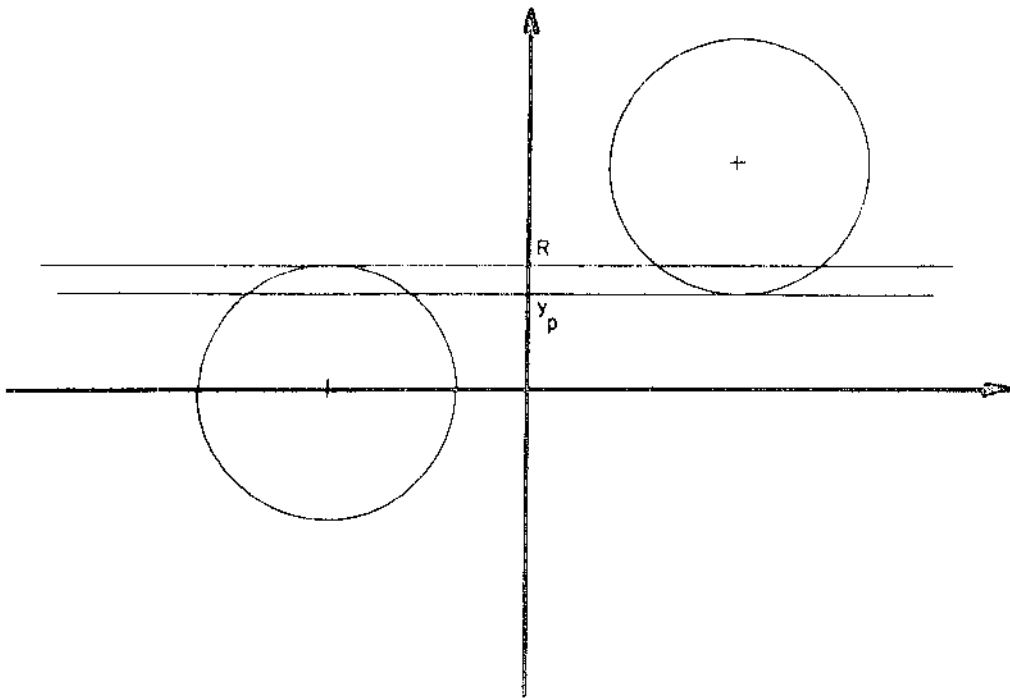


Figura 2.25 - Disposição das faixas irrigadas quando existe sobreposição.

No sistema de equações (2.13) em vez dos termos $D_0, D_1, \dots, D_{n-1}$ aparecerão os termos (com $D_n=0$)

$$D_0, D_1, \dots, D_p+D_n (=D_p), D_{p+1}+D_{n-1}, D_{p+2}+D_{n-2}, \dots, D_{n-1}+D_{p+1}, D_n+D_p (=D_p).$$

A relação entre p e n determina o número de equações do novo sistema. Para $p=n-1$, o sistema terá $n-1$ equações e os seus termos serão $D_0, D_1, \dots, D_{n-1}$. Para $p=n-2$, o sistema terá também $n-1$ equações e os seus termos serão $D_0, D_1, \dots, D_{n-2}, 2 \cdot D_{n-1}, D_{n-2}$.

Para sobreposições maiores o número de equações diminuirá. Isso se deve ao fato de os termos $D_p+D_n, D_{p+1}+D_{n-1}, \dots, D_{n-1}+D_{p+1}, D_n+D_p$ serem todos (ou todos menos um) iguais dois a dois. Mais precisamente, se estes $n-p+1$ termos são em número par obtemos $p+(n-p+1)/2 = (n+p+1)/2$ termos a igualar desde D_0 até

$D_{(n+p-1)/2} + D_{(n+p+1)/2}$; se são em número ímpar obtemos $p+(n-p+2)/2 = (n+p+2)/2$ termos a igualar desde D_0 até $D_{(n+p-2)/2} + D_{(n+p+2)/2}$ e a $D_{(n+p)/2}$.

Para $p=n-3$ ou $p=n-4$ obtêm-se $n-2$ equações que permitem determinar $P_1, \dots, P_{n-2}$ em função de P_{n-1} e P_n , podendo-se tentar determinar P_{n-1} de modo a fixar os quocientes $P_1/P_n, \dots, P_{n-2}/P_n$ dentro de limites razoáveis.

Do número de intervalos considerados, isto é, do valor de n , depende a aderência da curva obtida àquela que se obteria por integração.

Tomando $p=n-1$ e $n=10$, obtemos o sistema (2.14) onde figuram os termos $D_0, \dots, D_9$.

$$\left\{ \begin{array}{l} D_9 - D_8 = 0 \\ D_8 - D_7 = 0 \\ \dots \\ D_1 - D_0 = 0 \end{array} \right. \quad (2.14)$$

onde, pela equação (2.12),

$$D_m = \frac{1}{v} \sum_{j=m}^{n-1} \left\{ P_{j+1} \left[\sqrt{(j+1)^2 - m^2} - \sqrt{j^2 - m^2} \right] \right\}$$

com $m=0, 1, \dots, 9$.

Assim, temos

$$P_9 = 0,602 \cdot P_{10}$$

$$P_8 = 0,465 \cdot P_{10}$$

$$P_7 = 0,397 \cdot P_{10}$$

$$P_6 = 0,322 \cdot P_{10}$$

$$P_5 = 0,310 \cdot P_{10}$$

$$P_4 = 0,298 \cdot P_{10}$$

$$P_3 = 0,289 \cdot P_{10}$$

$$P_2 = 0,283 \cdot P_{10}$$

$$P_1 = 0,281 \cdot P_{10}$$

A curva obtida, mostrada na figura 2.26 é o perfil de distribuição adimensional que deverá ter um aspersor para que, animado de deslocamento linear e operando com uma distância entre carregadores de 95% do diâmetro irrigado, produza, na região central da faixa irrigada, a lâmina adimensional mostrada na figura 2.27.

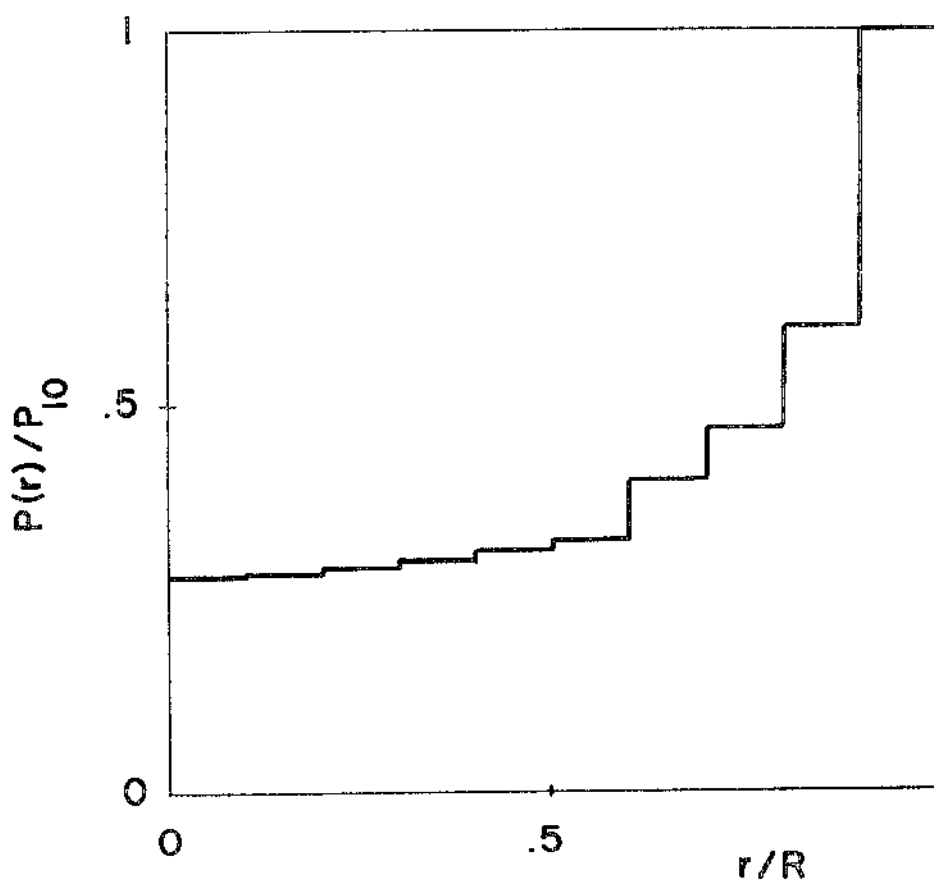


Figura 2.26 - Perfil de distribuição calculado pelo sistema de equações (2.14).

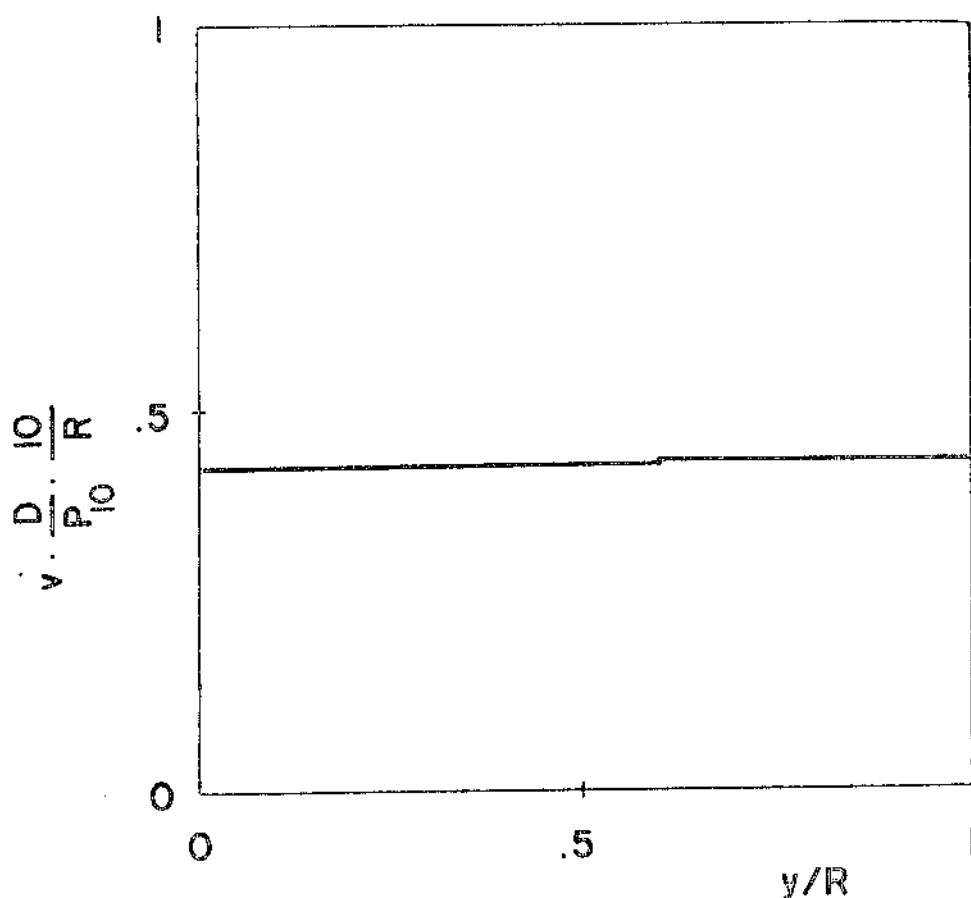


Figura 2.27 - Lâmina obtida na secção transversal da faixa irrigada por um sistema auto-propelido cujo aspersor tenha o perfil de distribuição indicado na figura 2.26.

Analogamente se podem obter perfis de distribuição para outros valores de sobreposição.

Tendo assim ficado resolvida a primeira das duas questões que me propus abordar, passei a analisar a influência que tem sobre o perfil de distribuição de um aspersor relativo a geometria de seu bocal.

CAPÍTULO 3

O JATO COAXIAL LÍQUIDO-EM-AR

Imediatamente após a passagem da água pela secção de saída do bocal de um aspersor ela penetra no seio de uma imensa massa de ar, rasgando-a devido à sua quantidade de movimento.

É um escoamento bifásico no qual um dos fluidos, o líquido, ocupa um volume muito inferior ao do outro. Neste caso, a mistura não pode ser tratada como uma mistura de dois meios contínuos e as propriedades de ambos os fluidos são importantes, revestindo-se de grande importância a formação de gotas de líquido e os seus efeitos no escoamento como um todo. Devido à complexidade do problema prático, muitos dos tratamentos assumem um caráter semi-empírico.

Neste capítulo procuram discutir-se os principais aspectos da desintegração de um jato líquido no seio de um gás através de um tratamento analítico da dinâmica dos fluidos e apresentam-se dados obtidos com o uso de aspersores de irrigação pelos pesquisadores da área.

A desintegração de um jato líquido é um processo que se inicia com a formação de gotas, que têm sua origem em problemas de estabilidade na superfície livre de um jato.

O problema de Rayleigh para a estabilidade de um jato circular

As características do escoamento de um líquido que é descarregado por meio de um bocal na atmosfera dependem muito da pressão dinâmica com que o líquido abandona o bocal.

Se a velocidade é muito pequena formam-se gotas de líquido na saída do bocal. O tamanho das gotas depende de um balanço entre a tensão superficial do líquido e o peso da gota de líquido.

Quando a velocidade se eleva acima de um certo valor crítico, forma-se um jato de líquido a partir da secção de saída do bocal. O comprimento desse jato depende da velocidade com que a água abandona o bocal. Inicialmente o comprimento do jato aumenta com o aumento da velocidade de saída, até atingir um valor máximo. Após esse valor, o comprimento do jato passa a diminuir com o aumento da velocidade de saída. A partir de uma certa distância do bocal a coluna líquida passa a desintegrar-se completamente em gotas de tamanho variado. Para velocidades de saída muito altas o jato se desintegra completamente na saída do bocal. Este último processo recebe o nome de atomização de um jato líquido. A região de velocidades para as quais o comprimento do jato diminui com o aumento da velocidade de saída recebe o nome de região sinuosa e nela se verifica a formação de uma superfície livre do jato com a aparência de um tecido grosseiro. Essa aparência se deve à propagação, ao longo do jato, de pequenas perturbações que se manifestam a nível de superfície. Este fenómeno foi inicialmente estudado por Rayleigh, no final do século XIX [18].

Rayleigh considerou o que ocorre com um corpo cilíndrico de líquido com uma ligeira perturbação em relação ao equilíbrio, quando é abandonado a si próprio no seio de uma grande massa de ar. Este fenómeno é bastante independente do movimento longitudinal comum a todas as suas partes. Numa primeira aproximação, a equação da superfície do jato circular ligeiramente perturbada pode ser escrita em coordenadas cilíndricas como

$$r = r_0 + f(\theta, z) \quad (3.1)$$

onde r_0 é um raio médio do cilindro que pode ser determinado pela equação da continuidade. A função $f(\theta, z)$ assume valores pequenos pois se assumiu que a perturbação é pequena. Podemos portanto linearizar a equação fundamental da perturbação desprezando os termos de ordem superior. A função $f(\theta, z)$ pode ser expressa em termos de série de Fourier com termo geral $r_n \cos n\theta \cos mz$.

Como veremos ao longo do problema, cada um dos termos pode ser considerado independentemente dos outros. Os cossenos po

dem ser substituídos por senos e os somatórios se estendem a todos os valores positivos de k e a todos os valores inteiros não negativos de n .

Durante o movimento, a quantidade r_0 não permanece absolutamente constante; o seu valor deve ser determinado pela condição de que o volume de líquido contido dentro da superfície é invariável. Portanto, para a superfície

$$r = r_0 + r_n \cdot \cos n\theta \cdot \cos kz \quad (3.2)$$

obtemos

$$\text{Volume} = \frac{1}{2} \iint r^2 d\theta dz = z(\pi r_0^2 + \frac{1}{4} \pi r_n^2)$$

de tal forma que, se r_c indicar o raio da secção do cilindro não perturbado, temos

$$r_c^2 = r_0^2 + \frac{1}{4} \cdot r_n^2$$

de onde, aproximadamente

$$r_0 = r_c \left(1 - \frac{r_n^2}{8 \cdot r_c^2} \right) \quad (3.3)$$

A equação (3.3) é válida para $n=1,2,3,\dots$. Para $n=0$, em vez de (3.3), a equação (3.2) origina

$$r_0 = r_c \left(1 - \frac{r_0^2}{4 \cdot r_c^2} \right) \quad (3.4)$$

A energia potencial do sistema em qualquer configuração, devida à tensão superficial, é diretamente proporcional à superfície. Pela equação (3.2) temos

$$\begin{aligned} \text{Superfície} &= \iint \left[1 + \left(\frac{dr}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dr}{r d\theta} \right)^2 \right]^{1/2} r \cdot d\theta \cdot dz = \\ &= 2(2\pi r_o + \frac{1}{4} \pi k^2 r_n^2 r + \frac{1}{4} \pi n^2 \frac{r_n^2}{r_c}) \end{aligned}$$

de tal forma que por (3.3)

$$\sigma = 2\pi r_c + \frac{1}{4} \pi (k^2 \cdot r_c^2 + n^2 - 1) \frac{r_n^2}{r_c} \quad (3.5)$$

onde σ representa a superfície média por unidade de comprimento.

A energia potencial por unidade de comprimento P , devida à perturbação é

$$P = \frac{1}{4} \pi T (k^2 \cdot r_c^2 + n^2 - 1) \frac{r_n^2}{r_c} \quad (3.6)$$

onde T representa a tensão superficial.

Na equação (3.6) supomos que tanto k como n são diferentes de zero. Se $k=0$, o valor dado pela equação (3.6) deve ser multiplicado por dois para se obter o valor da energia potencial correspondente a

$$r = r_o + r_n \cdot \cos n\theta \quad (3.7)$$

e, por outro lado, se n for igual a zero, teremos

$$P = \frac{1}{2} \pi T (k^2 r_c^2 - 1) \frac{r_0^2}{r_c} \quad (3.8)$$

correspondente a

$$r = r_0 (1 + \cos kz) \quad (3.9)$$

Pela equação (3.6) observamos que quando n é maior ou igual à unidade, o valor de P é positivo, pelo que, em todas as perturbações deste tipo, o equilíbrio original é estável. Para o caso de perturbações axi-simétricas ($n=0$) vemos pela equação (3.8) que a condição de estabilidade é dada pelo fato do produto $k.r_c$ assumir valores maiores ou menores que a unidade, isto é, o escoamento será estável em função do comprimento de onda $(2.\pi/k)$ da deformação.

Consideremos agora a energia cinética do movimento. Rayleigh assumiu um escoamento incompressível irrotacional, que, portanto, satisfaz a equação de Laplace. Sendo ϕ o potencial de velocidades do escoamento, podemos escrever

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

ou, assumindo que, por ser uma função harmônica, ϕ é proporcional a $\cos n\theta, \cos kz$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} - \left(\frac{n^2}{r^2} + k^2 \right) \phi = 0 \quad (3.10)$$

A solução da equação (3.10) que satisfaz as condições de contorno indicadas por (3.2) é

$$\phi = c_n \cdot J_n(i.k.r) \cdot \cos n\theta \cdot \cos kz \quad (3.11)$$

A constante c_n é determinada pela condição de que a velocidade radial para $r=r_c$ deve coincidir com a dada pela equação (3.2). J_n representa a função de Bessel de n -ésima ordem. Assim

$$i.k.c_n.J'_n(i.k.r_c) = \frac{dr_n}{dt} \quad (3.12)$$

Sendo ρ a densidade do fluido, a energia cinética do movimento, dada pelo teorema de Green, é

$$\frac{1}{2} \rho \iint \left(\phi \frac{\partial \phi}{\partial r} \right)_{r=r_c} \cdot r_c \cdot d\theta \cdot dz = \frac{1}{4} \pi \cdot \rho \cdot z \cdot i.k.r_c \cdot J_n(ikr_c) \cdot J'_n(ikr_c) \cdot c_n^2$$

de tal forma que se K representar a energia cinética por unidade de comprimento, temos

$$K = \frac{1}{4} \pi \cdot \rho \cdot r_c^2 \frac{J_n(ikr_c)}{i.k.r_c \cdot J'_n(ikr_c)} \left(\frac{dr_n}{dt} \right)^2 \quad (3.13)$$

Para $n=0$, teremos, em vez de (3.13),

$$K = \frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot r_c^2 \frac{J_0(ikr_c)}{i.k.r_c \cdot J'_0(ikr_c)} \left(\frac{dr_0}{dt} \right)^2 \quad (3.14)$$

A equação do movimento pode ser obtida pelo método de Lagrange para movimento livre com a coordenada generalizada r_n .

$$\frac{d^2 r_n}{dt^2} + \frac{T}{\rho r_c^3} \frac{i.k.r_c \cdot J'_n(ikr_c)}{J_n(ikr_c)} (n^2 + k^2 \cdot r_c^2 - 1) r_n = 0 \quad (3.15)$$

e aplica-se para $n=0,1,2,\dots$

No caso de um jato estável, se assumirmos que r_n varia com $\cos(\omega t - \alpha)$, temos, por (3.15),

$$\omega^2 = \frac{T}{\rho r_c^3} \frac{i.k.r_c.J'_n(ikr_c)}{J_n(ikr_c)} (n^2 + k^2.r_c^2 - 1) \quad (3.16)$$

onde ω é a frequência das perturbações.

Se $n=0$ e $k.r_c < 1$, o jato é instável e a solução muda de forma. Se supusermos que r_0 é proporcional a $e^{\pm q.t}$, temos

$$q^2 = \frac{T}{\rho r_c^3} \frac{i.k.r_c.J'_0(ikr_c)}{J_0(ikr_c)} (1 - k^2.r_c^2) \quad (3.17)$$

onde q é o fator de amplificação do jato instável.

Se n é maior que a unidade, o movimento pode ser considerado unicamente em duas direções. Podemos assim introduzir na equação (3.16) a simplificação $k^2.r_c^2 < 1$, temos portanto

$$\omega^2 = n.(n^2 - 1 + k^2.r_c^2) \frac{T}{\rho r_c^3} \left[1 + \frac{k^2.r_c^2}{n.(2n+2)} \right] \quad (3.18)$$

Assumindo $k^2.r_c^2 \ll 1$, obtemos

$$\omega^2 = (n^3 - n) \frac{T}{\rho r_c^3} \quad (3.19)$$

que é a expressão bidimensional da frequência das perturbações.

Se tivermos $n=1$, não existirá uma força de restituição num escoamento puramente bidimensional. Se λ representar o compri

mento de onda medido perimetralmente, $\lambda = 2 \cdot \pi \cdot r_c / n$. Então pela equação (2.19), se n e r_c forem infinitos, obtemos

$$\omega^2 = \frac{T}{\rho} \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \right)^3 \quad (3.20)$$

que coincide com a teoria de ondas capilares numa superfície plana, exposta por Rayleigh. Uma conclusão semelhante se obtém para ondas cujo comprimento de onda é medido axialmente. Assim, se $\lambda = 2 \cdot \pi / k$, $r_c = \infty$ e $n = 0$, a equação (3.16) se reduz a (3.20).

Se o formato da secção de saída do bocal não é circular, as características geométricas da secção de saída transmitem-se ao longo do jato. Assim, se a secção de saída de um bocal tiver, por exemplo, o formato de uma elipse com seu eixo maior horizontal, verifica-se que, caminhando para jusante, a secção transversal do jato vai perdendo gradualmente o seu formato elíptico até se transformar num círculo. Mais para jusante, a secção transversal continua se modificando até formar uma elipse semelhante à original porém com seu eixo maior agora ocupando a posição vertical. Essa oscilação pode repetir-se ao longo do comprimento do jato ou, dependendo das condições operacionais, o jato pode assumir o formato de uma lâmina delgada com o eixo maior vertical. Essa lâmina pode preservar o seu formato até uma certa distância do bocal onde é finalmente penetrada pelo ar. Se a secção de saída tiver um formato triangular equilátero, o jato evolui para um formato de três lâminas de água dispostas simetricamente ao longo do eixo do escoamento, com seus planos dispostos perpendicularmente às paredes da saída do bocal. Da mesma forma, se a abertura for um polígono regular com um determinado número de lados, formar-se-ão lâminas com a mesma disposição e em número igual ao dos lados do polígono.

Rayleigh afirma terem sido Magnus [16] e Buff [7] os primeiros a sugerir que a causa da contração das lâminas líquidas após a sua primeira formação é encontrada na tensão superficial, em virtude da qual o líquido permaneceria como que envolvido por uma película de tensão constante; o decorrente formato do jato é

provocado por vibrações da coluna líquida em torno de uma posição circular de equilíbrio, sobrepostas ao movimento geral do escoamento. Como a fase da vibração em que se encontram as partículas de líquido que, em determinado momento, atravessam certa secção transversal do escoamento depende do tempo percorrido entre esse momento e o instante de sua passagem pela secção de saída do bocal, as secções de jato, fixas no espaço, terão sempre o mesmo formato físico; o movimento será estacionário no sentido hidrodinâmico do termo e a superfície do jato será uma superfície fixa. Em relação à água, as perturbações se propagam para montante com uma velocidade igual à do escoamento, de tal forma que se mantêm fixas em relação a um observador estacionado em relação ao bocal.

Se as perturbações a partir do círculo forem pequenas, terão as suas frequências dadas pelas equações (3.16), (3.18) e (3.19). A distância entre dois pontos correspondentes consecutivos, ou seja, o comprimento de onda da figura é o espaço percorrido pelo jato durante uma vibração. Temos assim uma relação entre o comprimento de onda e o período. Se o perímetro do jato é pequeno em relação ao comprimento de onda, de tal forma que a equação (3.19) se aplica, o período a que se encontram sujeitas as perturbações é independente do comprimento de onda; o comprimento de onda torna-se então diretamente proporcional à velocidade do escoamento, ou à raiz quadrada da pressão.

Rayleigh testou essa teoria e observou que para baixas pressões as relações indicadas se verificam. Para pressões maiores observou que os comprimentos de onda das perturbações cresciam muito mais rapidamente que a velocidade do jato. A vibração estritamente isocrônica só deve portanto ser esperada quando as perturbações são infinitesimais. Sob pressões elevadas, os desvios do formato circular são consideráveis e não há razão para se esperar que essas vibrações possuam as mesmas frequências que as perturbações infinitesimais.

O aumento de amplitude sob pressões elevadas pode ser explicado pelo fato de que as velocidades radiais variam proporcionalmente à velocidade longitudinal do jato. Conseqüentemente, a amplitude varia aproximadamente com a raiz quadrada da pressão,

ou com o comprimento de onda.

Para uma comparação com a teoria é necessário que as perturbações sejam isocrônicas. O tratamento torna-se mais prático, por outro lado, se os cálculos, em vez de referido a r_c , vierem referidos à área $A = \pi \cdot r_c^2$.

Assim, a equação (3.19) pode ser escrita como

$$\omega = \pi^{3/4} \cdot T^{1/2} \cdot \rho^{-1/2} \cdot A^{-3/4} \cdot (n^3 - n) \quad (3.21)$$

Para o caso da água no seio do ar, podemos tomar, em unidades do S.I., $T = 74 \cdot 10^{-3}$ e $\rho = 10^3$, de tal forma que a frequência da perturbação mais grave ($n=2$) assume a forma

$$\frac{\omega}{2 \cdot \pi} = 7,91 \cdot 10^{-3} \cdot A^{-3/4} \quad (3.22)$$

Para uma área da secção de saída de 10^{-4} m^2 teríamos portanto cerca de 8 vibrações por segundo. Para o caso geral de n , temos

$$\frac{\omega}{2 \cdot \pi} = 3,23 \cdot 10^{-3} \cdot A^{-3/4} \cdot (n^3 - n)^{1/2} \quad (3.23)$$

Sendo $(2 \cdot g \cdot h)^{1/2}$ a velocidade na secção de saída do bocal e λ o comprimento de onda, temos

$$\lambda = \frac{(2 \cdot g \cdot h)^{1/2} \cdot A^{3/4}}{3,23 \cdot 10^{-3} \cdot (n^3 - n)^{1/2}} \quad (3.24)$$

Nos seus experimentos, Rayleigh obteve para uma abertura elíptica ($n=2$) o valor de $\lambda = 39,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ enquanto o valor calculado por (3.24) forneceu $\lambda = 39,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. No caso de uma abertura

triangular ($n=3$) o valor observado foi de $\lambda=23.10^{-3}\text{m}$ e o valor calculado foi de 21.10^{-3}m . Para uma abertura quadrada ($n=4$) o valor observado foi de $18,5.10^{-3}\text{m}$ e o calculado por (3.24) foi de $17,8.10^{-3}\text{m}$. Rayleigh afirma que as diferenças entre os valores observados e calculados, especialmente nos últimos dois casos, se devem a desvios iniciais excessivos em relação à forma circular.

A teoria da estabilidade acima descrita é verdadeira para pequenas perturbações. Se a pressão de saída é elevada, o comprimento de onda aumenta mais rapidamente que a velocidade do jato. Como uma teoria geral da estabilidade para perturbações finitas ainda não foi suficientemente desenvolvida, podemos obter alguma informação acerca do caso geral por similaridade dinâmica com a ajuda da análise dimensional.

Para um dado formato da secção de saída do bocal, o comprimento de onda λ da vibração do jato pode ser encarado como função da tensão superficial T , da densidade do líquido ρ , da área do jato A e da pressão de saída p_s . Podemos então escrever

$$\lambda \sim T^{a_1} \cdot \rho^{a_2} \cdot A^{a_3} \cdot p_s^{a_4} \quad (3.25)$$

onde os a_i devem ser determinados por análise dimensional. Temos assim

$$\lambda \sim A^{1/2} \cdot (T \cdot A^{-1/2} \cdot p_s^{-1})^{a_1} \quad (3.26)$$

A constante a_1 continua no entanto indeterminada. Se reescrevermos a equação (3.26) na forma

$$\lambda = A^{1/2} \cdot f(T \cdot A^{-1/2} \cdot p_s^{-1}) = T^{-1/2} \cdot p_s^{1/2} \cdot A^{3/4} \cdot F(p_s \cdot A^{1/2} \cdot T^{-1}) \quad (3.27)$$

onde f e F são funções arbitrárias, verificamos que, para um dado líquido e uma determinada secção transversal de saída do jato, o comprimento de onda deverá ser proporcional à raiz quadrada de p_s

se o parâmetro adimensional $(p_s \cdot A^{1/2} \cdot T^{-1})$ é mantido constante.

A desintegração de um líquido

Como vimos, a formação de uma gota de líquido no seio de um gás pode ocorrer quando a velocidade de saída do líquido é muito baixa ou quando ela é suficientemente alta para que este se desintegre em pequenas gotas. Pela teoria geral da estabilidade do escoamento sabemos que essa estabilidade depende de vários fatores entre os quais (i) a amplitude da perturbação ser infinitesimal ou finita, (ii) a configuração das linhas de fluxo e (iii) as forças do escoamento que se tornam importantes em cada caso específico como por exemplo a tensão superficial, a viscosidade, a força centrífuga, etc.

A teoria matemática para a estabilidade de um escoamento só foi bem desenvolvida para o caso de perturbações infinitesimais. Um desses casos é o referido problema de Rayleigh. Os resultados dessa teoria nos indicam quando uma perturbação tende a crescer ou quando ela tende a amortecer. Esses resultados, porém, não são válidos para perturbações maiores, cujas amplitudes assumam valores finitos. Ainda não se conta com uma teoria rigorosa para a estabilidade de um escoamento com superfície livre sujeito a perturbações finitas arbitrárias [17].

Em vista disso, a maioria das pesquisas feitas com o intuito de estudar o problema da desintegração de jatos líquidos têm sido empíricas. Podemos no entanto, relacionar os dados experimentais obtidos nessas pesquisas com alguns parâmetros adimensionais que dependem das forças envolvidas no processo de desintegração do jato.

Dado que a tensão superficial se encontra sempre envolvida na formação de gotas, o número de Weber-We, dado pela relação

$$We = \frac{L \cdot U^2 \cdot \rho}{T} \quad (3.28)$$

onde L é um comprimento de referência, U uma velocidade de referência e T a tensão superficial do líquido, é um dos mais importantes parâmetros relacionados com a desintegração de um líquido. Por exemplo, se considerarmos a desintegração de uma gota de grandes dimensões, cujo diâmetro é representado por d , no seio de um gás de densidade ρ_g , podemos tomar $L=d$, $\rho=\rho_g$ e $U=U_g-U_L$, que é a velocidade relativa da gota em relação ao gás. Verifica-se que, para números de Weber maiores que 12, a gota se desintegrará em pequenas gotas esféricas.

O movimento de uma gota de líquido

Após a sua formação, uma gota de líquido, pelo efeito da gravidade e pela velocidade de suas partículas, inicia um movimento no seio do gás que a rodeia. Se o número de gotas por unidade de volume não é muito grande, podemos considerar o movimento de cada gota como se ela evoluísse isoladamente.

A gota com geometria mais simples é a gota esférica. Para uma gota esférica de diâmetro d , temos $A_d=\pi.d^2/4$ e $V_d=\pi.d^3/6$, onde A_d representa a área projetada da gota e V_d o seu volume. Quando uma gota esférica é abandonada no seio de um grande meio gasoso, ela inicia um movimento acelerado até atingir uma velocidade terminal v_t que pode ser determinada por meio de um balanço entre as forças gravitacional, de arrasto e de empuxo, da seguinte forma

$$C_d \cdot A_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot v_t^2 = V_d \cdot (\rho_L - \rho_g) \cdot g \quad (3.29)$$

onde C_d representa o coeficiente de arrasto da gota, ρ_L a densidade do seu líquido e ρ_g a densidade do gás que a circunda. O coeficiente de arrasto C_d é função do número de Reynolds - ($Re=v_t.d/\nu_g$), das viscosidades do líquido e do gás μ_L e μ_g e de efeitos de superfície que se verificam na interface. Se se assumir que uma gota líquida esférica se comporta como uma gota sólida esférica, o coeficiente de arrasto é dado diretamente pelo diagrama de arrasto de Reynolds (Figura 3.1).

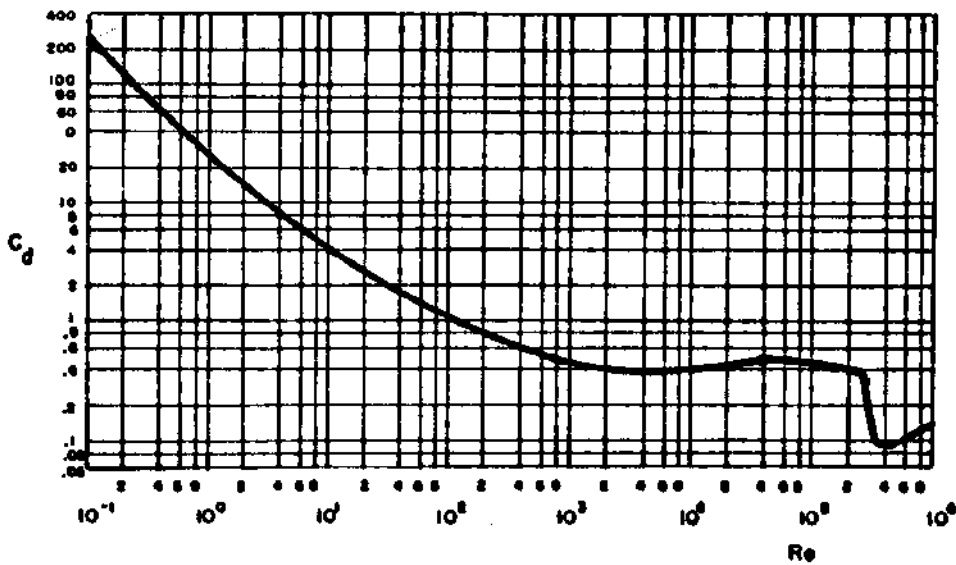


Figura 3.1 - Coeficiente de arrasto de esferas sólidas em função do número de Reynolds.

Na região de escoamento de Stokes, temos $C_d = 24/Re$. A velocidade terminal da equação (3.29) vem então dada por:

$$v_t = \frac{d^2 \cdot (\rho_L - \rho_g) \cdot g}{18 \cdot \mu_g} \quad (3.30)$$

Caso se considerasse a esfera constituída por um líquido de viscosidade μ_L , o seu coeficiente de arrasto na região de Stokes ($Re < 1$), é dado por Hadamard e Rubczynski

$$C_{df} = \frac{24}{Re} \cdot \frac{2 \cdot \mu_g + 3 \cdot \mu_L}{3 \cdot \mu_g + 3 \cdot \mu_L} = \frac{24}{Re} \cdot H_r \quad (3.31)$$

Neste caso a velocidade terminal da gota será dada por v_t/H_r com v_t dado pela equação (3.30).

Existe ainda um outro efeito que contribui para alterar o coeficiente de arrasto da gota de líquido e que tem origem no movimento superficial das partículas de líquido durante o movimento.

mento da gota. O que acontece [15], é que a gota tende a entrar em circulação devido à ação do cisalhamento. Para a mesma faixa de valores de Re , o coeficiente de arrasto passa então a ser dado por

$$C_{dc} = \frac{24}{Re} \frac{2 \cdot \mu_g + 3 \cdot \mu_L + m}{3 \cdot \mu_g + 3 \cdot \mu_L + m} = \frac{24}{Re} \cdot H_c \quad (3.32)$$

onde m é um fator que depende da circulação e do número de Reynolds e é proporcional a $\frac{1}{d}$. Não se obtiveram ainda [17] valores definidos para m . Considerada a circulação, o valor da velocidade terminal de uma gota líquida esférica é dado por v_t/H_c .

Se o formato da gota não for esférico, o valor de C_d que deverá ser utilizado depende da forma da gota.

Fordham [10], apresentou a equação da superfície de uma gota descendente como sendo

$$\frac{1}{\frac{R_c}{b}} + \frac{\sin \theta}{\frac{x}{b}} = 2 + \frac{z}{b} \quad (3.33)$$

onde x e z representam as coordenadas em relação à origem O , R_c o raio de curvatura no ponto (x,y) , b o raio de curvatura na origem O e θ o arco da tangente à curva no ponto (x,z) .

O fator $\beta = \rho_L \cdot b^2 \cdot g / T$ determina o formato da gota e o valor de b determina o seu tamanho.

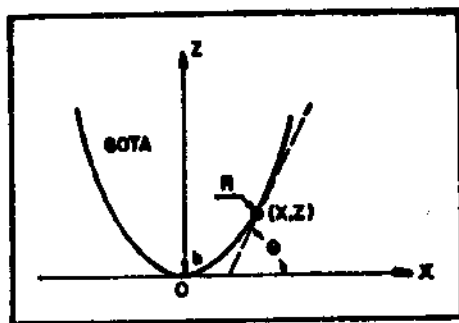


Figura 3.2 - Formato de uma gota de líquido, segundo Fordham.

Para valores de β menores que 0,4, a gota permanecerá esférica. O formato de uma grande gota de líquido varia durante o seu movimento descendente. A gota torna-se cada vez mais achatada, o coeficiente de arrasto aumenta e a sua velocidade terminal diminui. As grandes gotas de líquido são aceleradas até uma velocidade crítica e então desintegram-se em várias gotas pequenas.

A distribuição do tamanho de gotas

Dado o elevado número de gotas de diferentes tamanhos que se formam durante a desintegração de um jato líquido devemos esperar uma distribuição normal de seus tamanhos. Por definição, a função de distribuição $f(x)$ representa o número de gotas com tamanhos compreendidos entre r e $r+dr$, onde r é uma dimensão de referência da gota. Deveríamos ter, então

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \exp \left[- \frac{(r - \bar{r})^2}{2 \cdot s^2} \right] \quad (3.34)$$

onde $\bar{r}$ representa a dimensão característica média e s^2 a variância da distribuição. As propriedades da curva de distribuição normal são bem conhecidas, de forma que um tratamento analítico baseado nessa distribuição ficaria enormemente simplificado. A função de distribuição de tamanho de gotas obtida em aspersores de irrigação foi analisada por Kohl em 1974 [14]. A figura 3.3 mostra o efeito da variação de pressão na distribuição do tamanho das gotas produzidas por um aspersor rotativo. No eixo vertical foi representada a vazão por unidade de diâmetro da gota $\Delta Q / \Delta D$, em l/s.mm, de forma a se obter uma área sob a curva proporcional à vazão do aspersor. Verifica-se que o volume de água aplicado sob a forma de gotas de grande diâmetro diminui com o aumento de pressão e que o contrário é verdadeiro em relação às gotas de diâmetro pequeno. À luz da teoria exposta isso é facilmente entendido, pois um aumento na pressão de operação do aspersor implica num aumento da velocidade relativa entre a água e o ar. Dessa forma o diâmetro limite, imposto pela condição de não desintegração dada pelo número de Weber, diminui com o aumento de pressão, e

então deverá verificar-se uma diminuição na vazão produzida por gotas de elevado diâmetro.

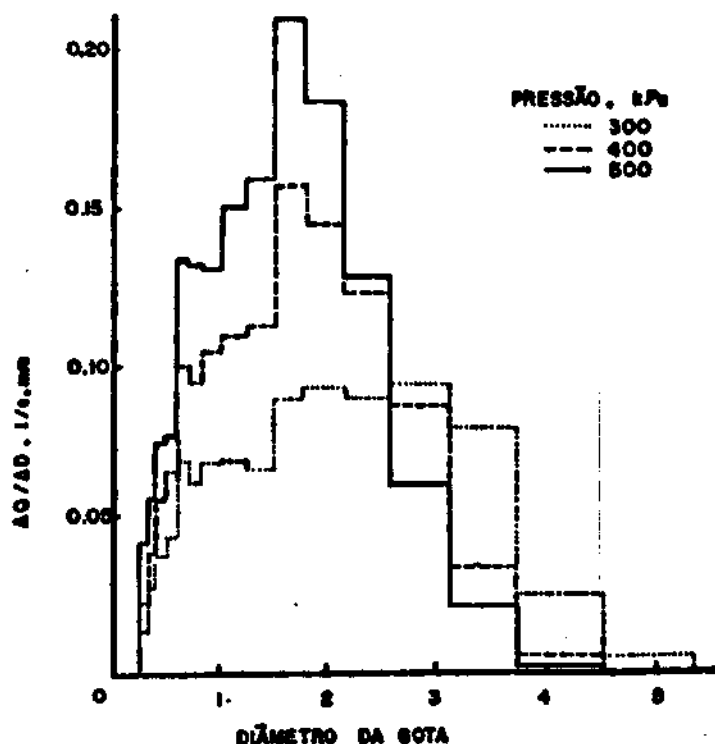


Figura 3.3 - Efeito da variação da pressão na distribuição do tamanho de gotas de um aspersor, segundo Kohl.

A figura 3.4 mostra-nos a relação, obtida experimentalmente por Kohl, entre as porcentagens acumuladas de volume para diversos tamanhos de gotas, obtidas a diferentes distâncias do aspersor. Nessa figura podemos observar que distribuições aderentes à distribuição normal, dada pela equação (3.34), se verificam para cada distância do aspersor e que o tamanho médio das gotas coletadas aumenta com a distância dos pontos de coleta ao aspersor. Mais ainda, vemos que o diâmetro médio é aproximadamente proporcional ao quadrado da distância dos pontos de coleta ao aspersor. Isso também seria de se esperar pois pela equação (3.29) obtemos

$$d \sim C_d \cdot v_t^2 \quad (3.35)$$

onde d representa um diâmetro característico da gota líquida. Pelas equações da balística elementar temos que

$$x \sim v \quad (3.36)$$

onde x representa o alcance de um projétil e v a sua velocidade. Portanto, combinando as equações (3.35) e (3.36) obtemos

$$d \sim C_d \cdot x^2 \quad (3.37)$$

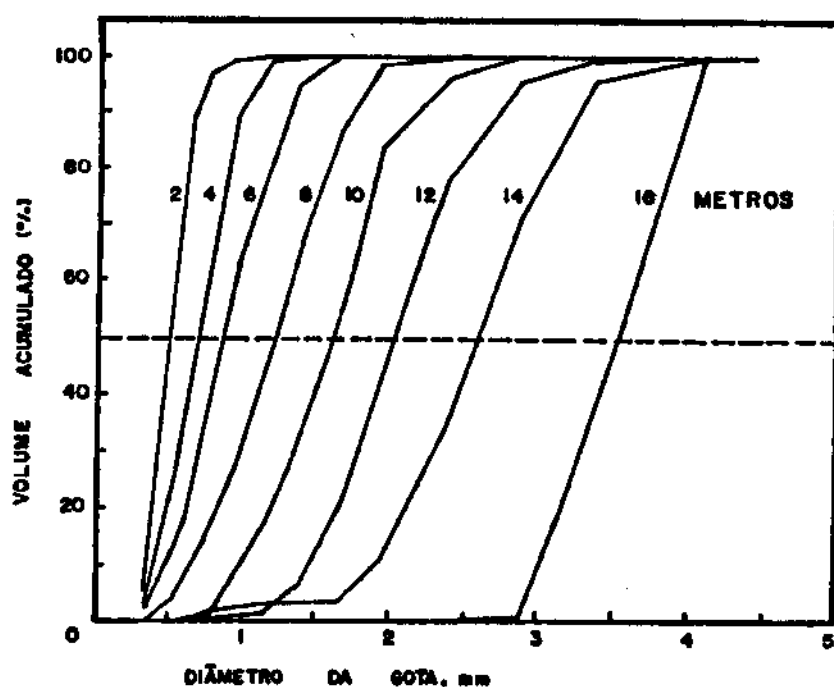


Figura 3.4 - Distribuição do tamanho das gotas coletadas a intervalos de 2 metros de um aspersor com bocal de 3,97 mm de diâmetro, operado a 400 kPa, segundo Kohl.

Finalmente, a figura 3.5 mostra a relação que existe entre o diâmetro do bocal, a pressão de operação e o tamanho médio das gotas.

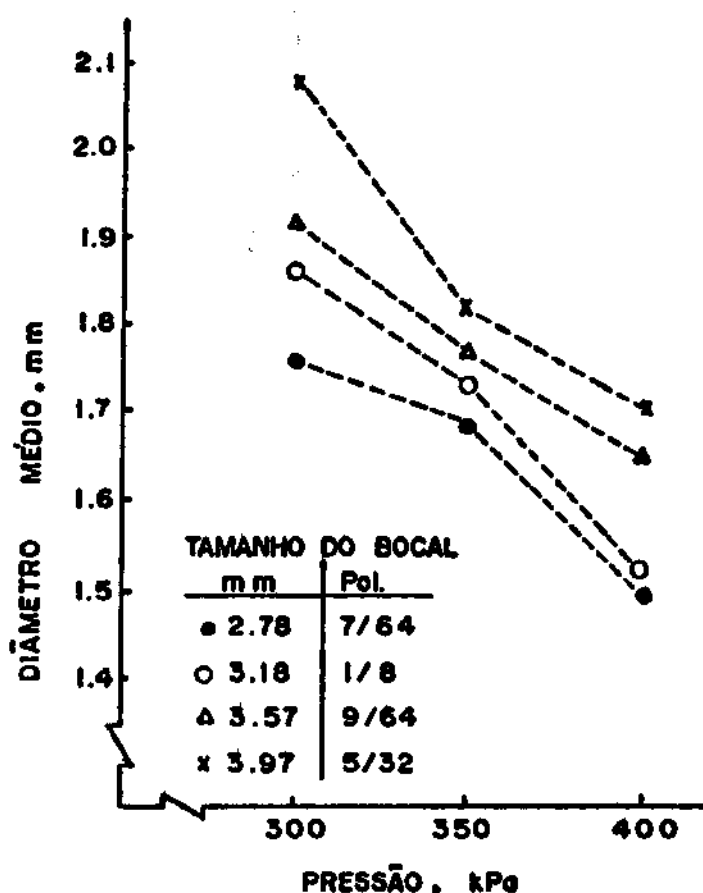


Figura 3.5 - Diâmetro médio das gotas como função da pressão de operação e do diâmetro do bocal, segundo Kohl.

Podemos verificar que, mantendo constante a pressão de operação, a diminuição do diâmetro da secção de saída do bocal implica numa diminuição do tamanho de gota, e que, mantendo constante o diâmetro do bocal, um aumento de pressão acarreta também uma diminuição no diâmetro médio das gotas. Ambos os fatos são facilmente explicáveis à luz das considerações feitas acerca da relação existente entre a velocidade relativa ar-água e o tamanho das gotas.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE BOCAIS COAXIAIS

O que torna um aspersor, de características construtivas e operacionais definidas, apropriado (ou não) para um determinado sistema de irrigação é o formato do seu perfil de distribuição.

Este, por sua vez, está intrinsecamente ligado à forma como se processa a desintegração do jato líquido.

Dessa forma se torna evidente a importância que tem, para a irrigação por aspersão, o estudo do controle da desintegração de um jato de água no seio do ar.

Especialmente para o caso de jatos de alta velocidade, devido à complexidade do escoamento que se origina, não existe ainda uma teoria que descreva adequadamente o processo de desintegração.

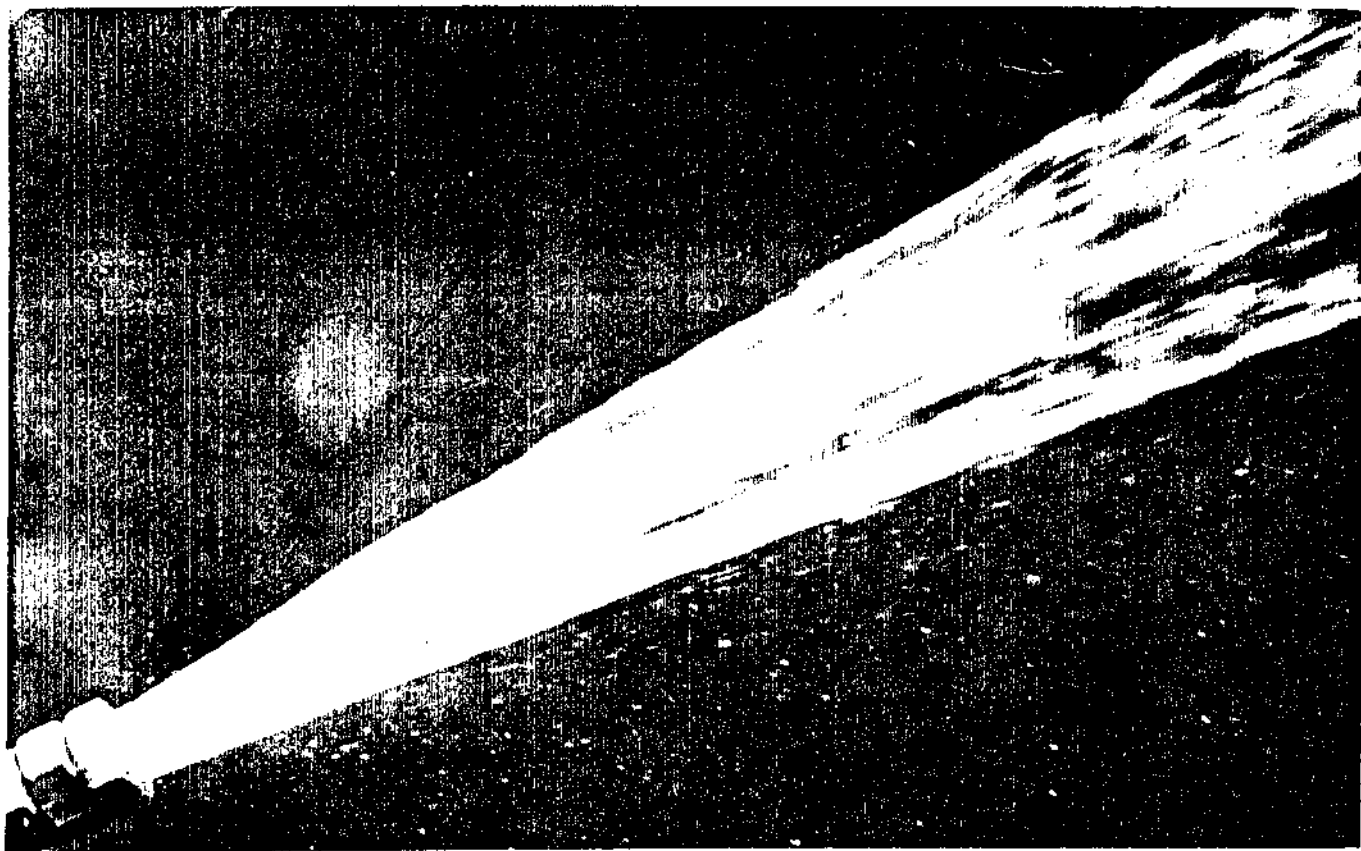


Figura 4.1 - Jato coaxial de água no seio do ar.

Assim, a pesquisa assume, por enquanto, um aspecto descritivo, o que a reveste de um caráter empírico.

No presente estudo estabelecem-se controles experimentais de desintegração de um jato coaxial de água no seio do ar.

Para tanto, fizeram-se variar as condições iniciais do escoamento de uma fina lâmina de água que fluía coaxialmente com um jato de água cilíndrico central (figura 4.1). Tal variação foi obtida por meio de mudanças na geometria do bocal de um aspersor rotativo de irrigação.

Apresentam-se agora a metodologia e os resultados obtidos durante esta fase da pesquisa efetuada.

Inicialmente, selecionaram-se 3 variáveis que seriam objeto do estudo:

- i) a proporção entre as áreas das secções de saída do jato externo e do jato interno (A_e/A_i),
- ii) a conicidade do jato externo (α) e
- iii) a pré-circulação do jato externo (γ).

Em seguida, foram projetados e construídos 28 bocais coaxiais cujas diferentes características geométricas permitiram fazer variar as condições iniciais dos escoamentos obtidos.

Dessa forma, as três variáveis estudadas puderam ter sua influência determinada dentro das seguintes faixas:

$$0,5 \leq A_e/A_i \leq 1,5$$

$$0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$$

$$0^\circ \leq \gamma \leq 50^\circ$$

Durante este capítulo, é apresentado o procedimento completo de ensaio e processamento dos dados obtidos com um dos bocais pesquisados. (O conjunto completo dos resultados obtidos nos 28 ensaios com bocais coaxiais encontra-se no Apêndice C).

Em seguida, as equações obtidas, por aproximação numérica, para os perfis de distribuição adimensionais produzidos por cada um dos bocais coaxiais são comparadas com as equações dos perfis de distribuição definidos por Christiansen e daquele definido pelo sistema de equações (2.14).

Para se proceder a essa comparação, foi elaborado um coeficiente de aderência cujo valor reflete de que forma uma distribuição de água obtida no campo se aproxima de uma distribuição teórica, tomada como referência.

No decorrer deste capítulo, esse coeficiente é colocado em discussão.

A análise da relação entre os valores assumidos pelo coeficiente da aderência e os valores correspondentes das 3 variáveis de controle, constitui o tópico final do capítulo.

Os bocais coaxiais

Todos os bocais projetados foram construídos em três partes: um corpo cilíndrico externo, uma peça central que, envolvida pelo corpo cilíndrico, promovia a separação da corrente líquida em dois jatos distintos e, finalmente, um anel sextavado rosqueado que mantinha o corpo e a peça central unidos (figura 4.2).

Pela variação do diâmetro interno da peça central, fez-se variar a proporção entre as áreas de saída do jato externo e do jato interno.

A variação da conicidade do jato externo foi conseguida pela variação da inclinação tanto da superfície interna do corpo do bocal como da superfície externa da peça central.

A pré-circulação do jato externo, por sua vez, foi controlada com o auxílio de 6 direcionadores de fluxo que se dispunham axissimetricamente entre a peça central e o corpo do bocal (figura 4.3).

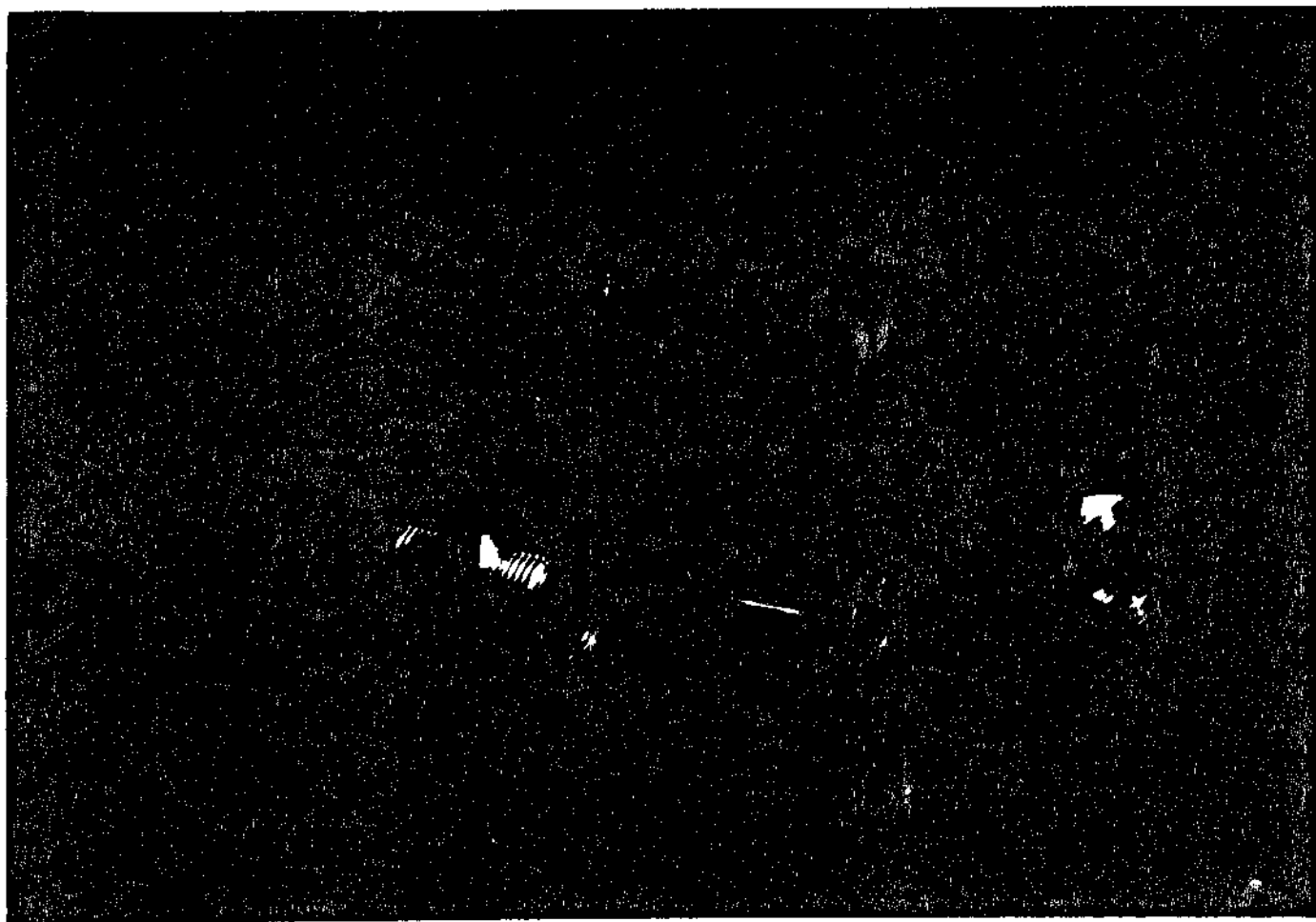


Figura 4.2 - As três partes componentes de um bocal coaxial.

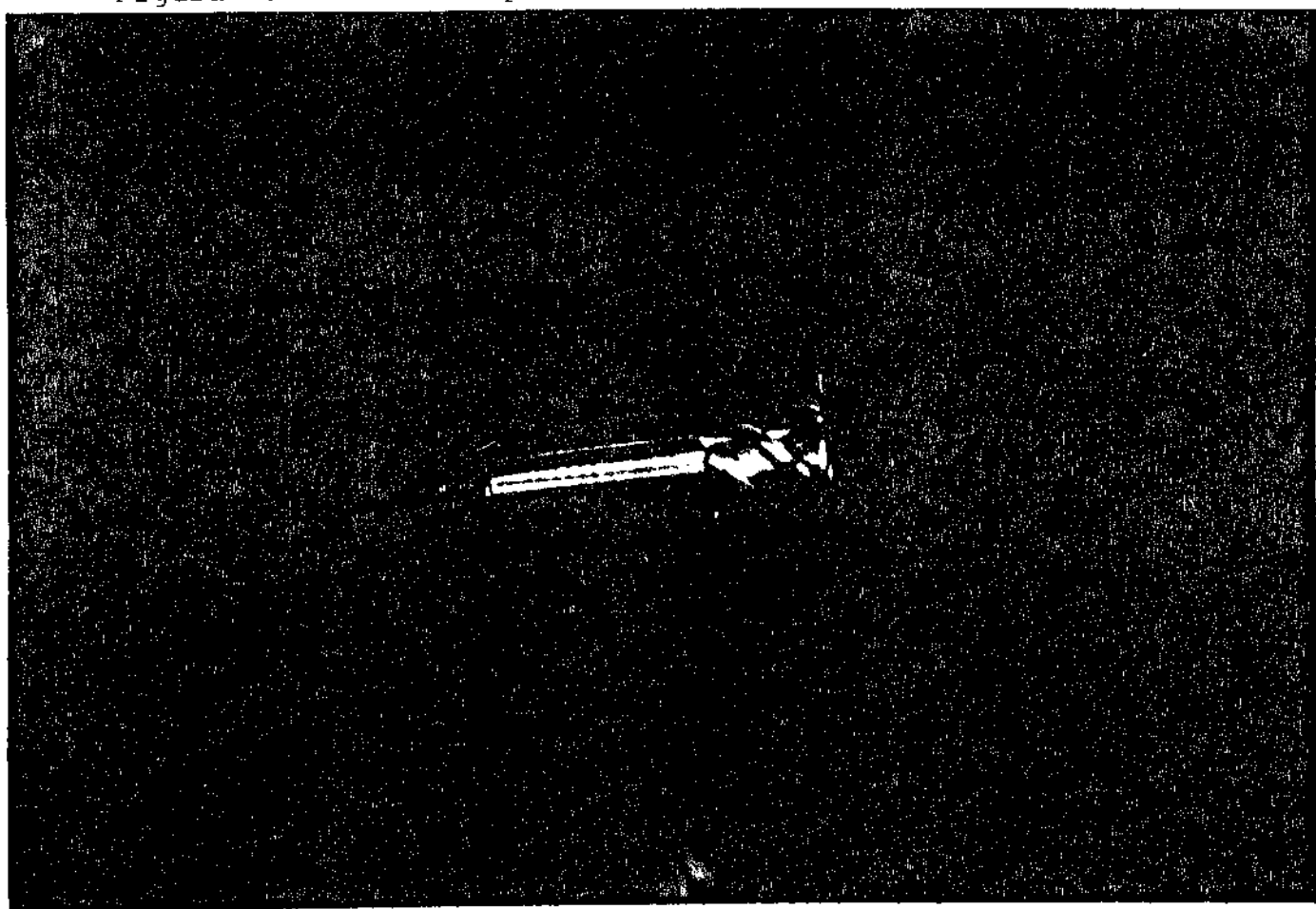


Figura 4.3 - Peça central que permitia obter jato coaxial com pré-circulação.

Variando o passo da hélice formada pelos direcionadores de fluxo se conseguia controlar a componente tangencial da velocidade de saída do jato externo.

A secção de saída de todos os bocais construídos era sempre semelhante (figura 4.4). O jato central abandonava o bocal por um orifício circular cujo centro se situava no eixo de simetria do escoamento.

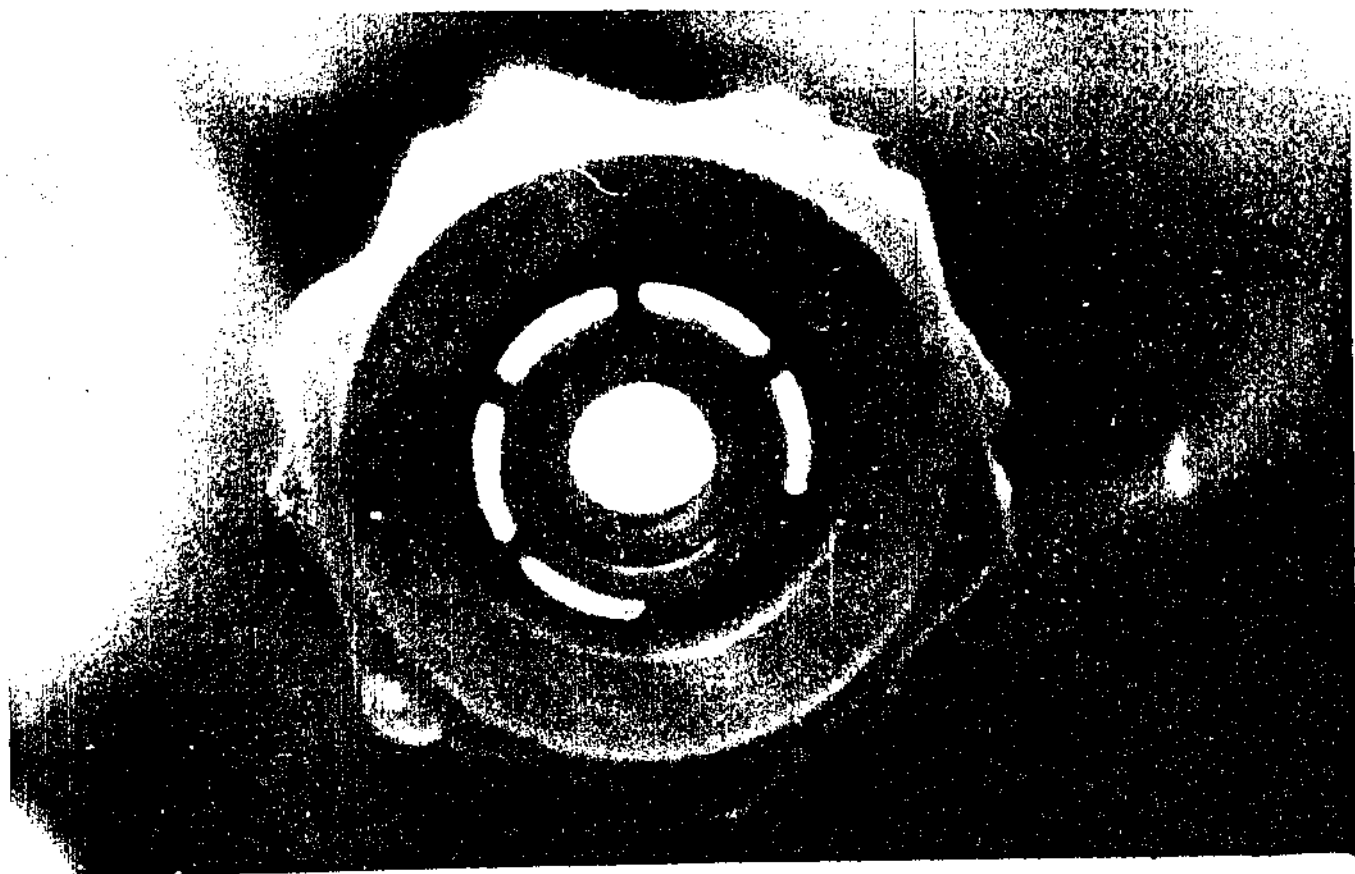


Figura 4.4 - A secção de saída dos bocais coaxiais.

O jato externo saía do bocal por 6 orifícios, com o formato de setores de arco circular, radial e simetricamente dispostos em torno do orifício do jato interno.

Os bocais coaxiais construídos foram acoplados a um aspersor de irrigação cujo movimento rotativo era produzido com o auxílio de um pequeno motor elétrico, de forma a eliminar a influência do braço oscilante (normalmente utilizado como dispositivo de rotação) sobre o perfil de distribuição do aspersor .

A metodologia de ensaio e análise dos resultados

Todos os bocais projetados e construídos durante esta fase da pesquisa foram ensaiados num campo experimental de aspersores de irrigação construído de acordo com as normas ABNT-NBR 8980 e ASAE-S398T.

Para ilustrar o procedimento utilizado na coleta e processamento dos dados obtidos com cada um dos bocais coaxiais construídos, apresenta-se em seguida, a título de exemplo, a metodologia empregada na análise da distribuição produzida por um bocal coaxial com as seguintes características: $A_e/A_i=1,0$; $\alpha=0^\circ$; $\gamma=0^\circ$.

O procedimento utilizado em relação a todos os outros bocais coaxiais foi semelhante.

Após ter sido projetado e construído, cada bocal recebeu um número de identificação. No caso do bocal que serve de exemplo, esse número foi C-08.

O bocal foi então levado para o campo de ensaios e operado durante 60 minutos, a uma pressão de 390 kPa, sobre uma malha quadrangular de 100 pluviômetros colocados a uma distância de 6 metros uns dos outros.

No centro geométrico da malha quadrangular ficava o aspersor rotativo ao qual se acoplou o bocal a ser ensaiado.

Durante o decorrer do ensaio, foram levantados os seguintes dados:

- 1) velocidade e direção do vento (com auxílio de um

anemômetro totalizador, tipo turbina), a cada 10 minutos.

- ii) temperatura de bulbo seco e bulbo úmido do ar atmosférico (com auxílio de um psicrômetro rotativo manual), a cada 15 minutos.
- iii) período de rotação do aspersor (com auxílio de um cronômetro de acionamento manual), a cada 10 minutos.
- iv) evaporação verificada durante o ensaio (com auxílio de 10 amostradores graduados), no final do ensaio.
- v) pressão de operação do aspersor (com auxílio de manômetro de precisão acoplado à base do aspersor) a cada 15 minutos.
- vi) vazão total do aspersor (com auxílio de um medidor de vazão tipo placa de orifício instalado na tubulação adutora), a cada 15 minutos.

Após 60 minutos de funcionamento, o aspersor teve a sua operação interrompida e iniciou-se a leitura da precipitação produzida em cada um dos pluviômetros do campo. Essa leitura foi feita manualmente, com auxílio de provetas calibradas, e o volume de água coletado em cada pluviômetro foi anotado na folha de campo (figura 4.5).

O conjunto ordenado das lâminas de água obtidas no pluviômetros constitui o que se denomina "matriz de precipitação" do aspersor.

Os dados coletados no ensaio foram, em seguida, introduzidos num micro-computador HP 85 através de um programa especialmente elaborado para o efeito.

A primeira fase do processamento constitui-se no armazenamento dos dados do ensaio em discos flexíveis de memória (diskettes).

CENEA/MA - CAMPO DE ENSAIO DE ASPERCORES

ENSAIO Nº C-086

RESPONSÁVEL: _____

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
6									5	10	1							
7							2	35	49	53	39	9						
8							40	44	40	41	50	46						
9						7	44	35	13	10	32	57	17					
10						11	40	32	8	2	24	55	18					
11						4	36	40	26	20	35	50	5					
12							23	34	39	38	43	39						
13								14	30	31	21							
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		

A) Indique os quatro QUADRANTES utilizados na medida de rotação e velocidade do vento.

B) indique a direção dos raios, a partir do aspersor,

Figura 4.5 - Folha de campo do ensaio C-08.

Como o tempo de duração de cada ensaio era exatamente de uma hora, bastava efetuar-se a divisão da matriz de precipitação pela área de coleta de um pluviômetro (comum a todos os pluviômetros) para que se obtivesse a "matriz intensidade de precipitação", cujos valores vêm expressos em mm/h.

O programa elaborado forneceu, então, uma representação gráfica dos valores da matriz "intensidade de precipitação" e determinou, por interpolações lineares, os pontos por onde passam as isoietas (linhas de igual intensidade de precipitação) obtidas no ensaio (figura 4.6).

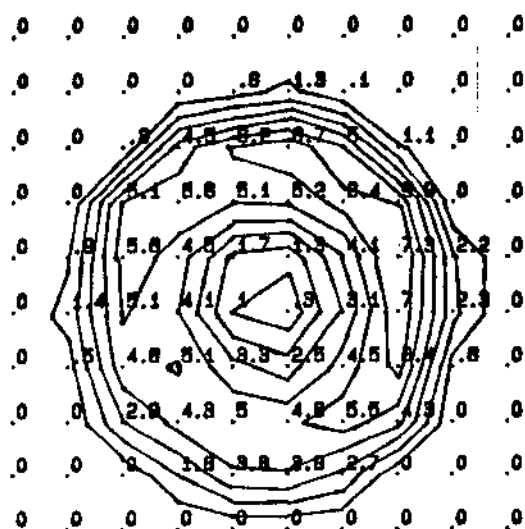


Figura 4.6 - Matriz intensidade de precipitação produzida pelo bocal C-08 (mm/h).

A matriz intensidade de precipitação assim obtida fornece-nos uma visão da distribuição de água produzida pelo aspersor.

Esta forma de representação, no entanto, tem dois inconvenientes: ser dimensional e assimétrica.

Por esse motivo, o programa elaborado prossegue com o cálculo da matriz padrão C (que é simétrica) e, em seguida, a adimensionaliza.

Possuímos agora um conjunto de valores médios obtidos para a intensidade de precipitação adimensional ($P/P_{\max}$) coletada a diversas distâncias (conhecidas) do aspersor.

Procedendo a uma adimensionalização do raio irrigado pelo aspersor, do tipo $X/X_{\max}$, passamos a estar de posse de um conjunto de pontos do perfil de distribuição adimensional produzido pelo bocal.

A questão que se coloca em seguida é a determinação da função que melhor se aproxima dos pontos determinados experimentalmente.

Essa função deverá possuir um coeficiente de correlação curvilínea tão próximo da unidade quanto possível.

Esse fato, por si só, não se torna suficiente para a seleção da melhor função aproximadora: é necessário, também, que o formato da função aproximadora corresponda à expectativa criada pela análise visual da disposição dos pontos experimentais.

Por esse motivo, foram incluídos no programa dois métodos numéricos de aproximação: o método de Lagrange e a aproximação polinomial de grau variável pelo método dos mínimos quadrados.

O programa prossegue então fornecendo-nos, pelo plotter, a representação gráfica de todos os polinômios aproximadores desde o 3º grau até ao grau $(n-1)$, onde n representa o número de pontos obtidos experimentalmente (figura 4.7).

Pela seleção visual, foi, no caso do bocal C-08, escolhido o polinômio do 5º grau como sendo o que melhor se adapta aos pontos experimentais obtidos (figura 4.8).

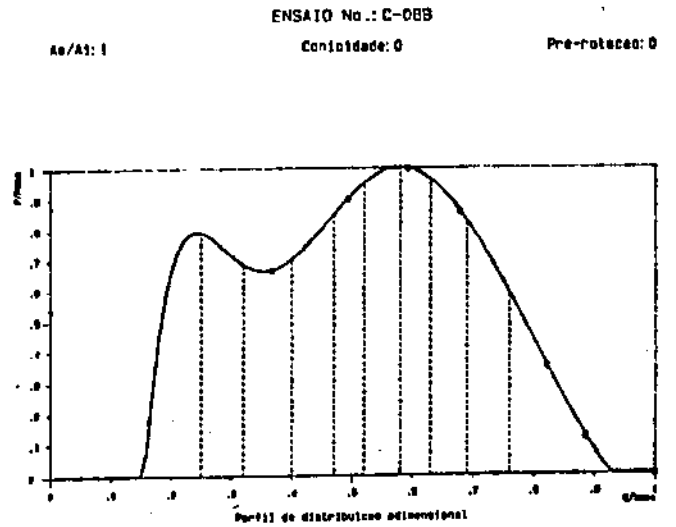
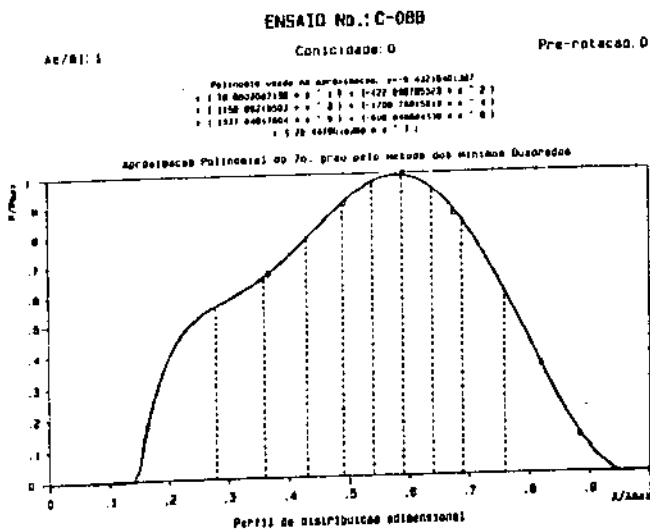
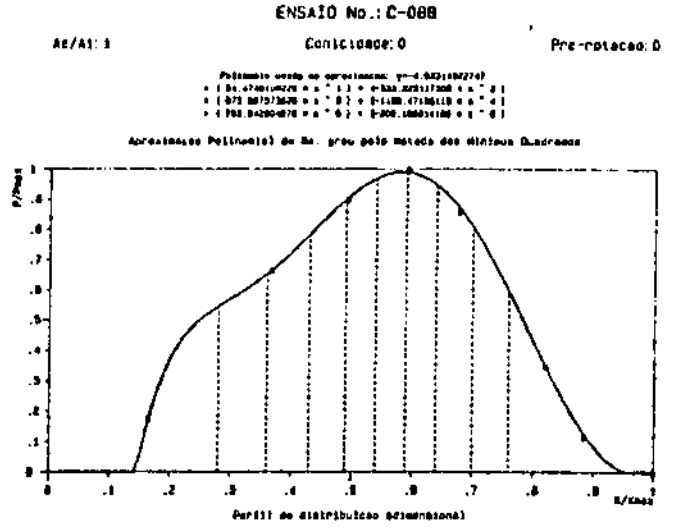
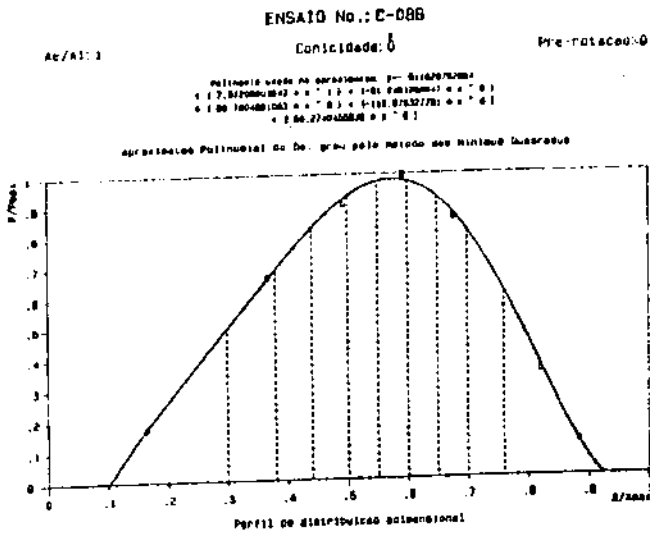
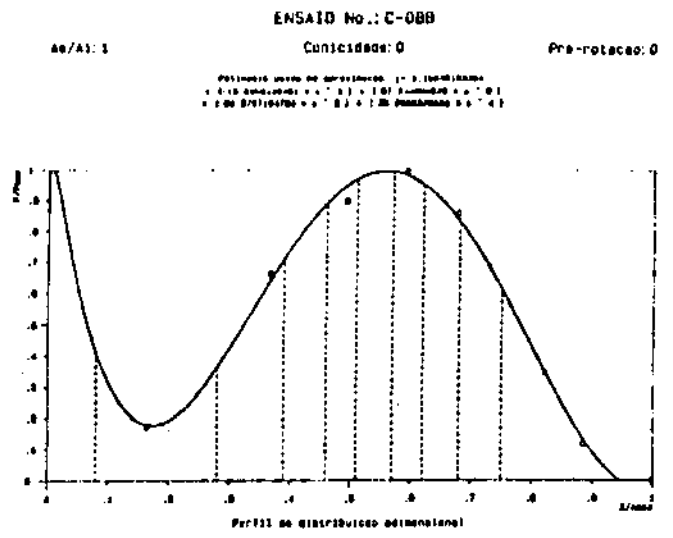
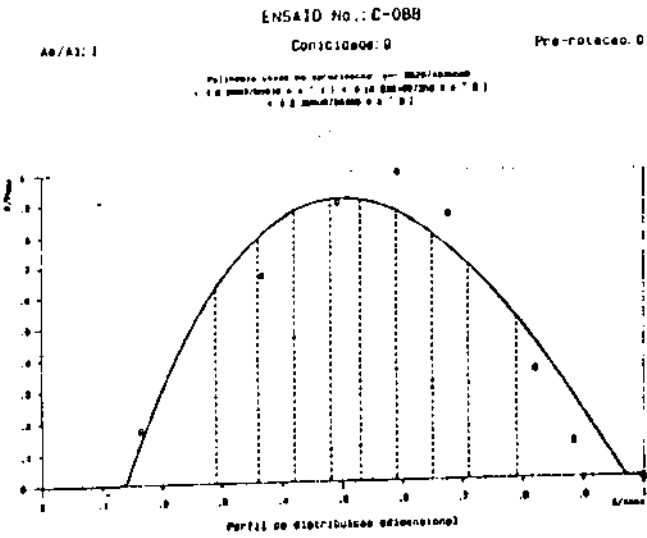


Figura 4.7 - Aproximações polinomiais para o perfil de distribuição do bocal C-08.

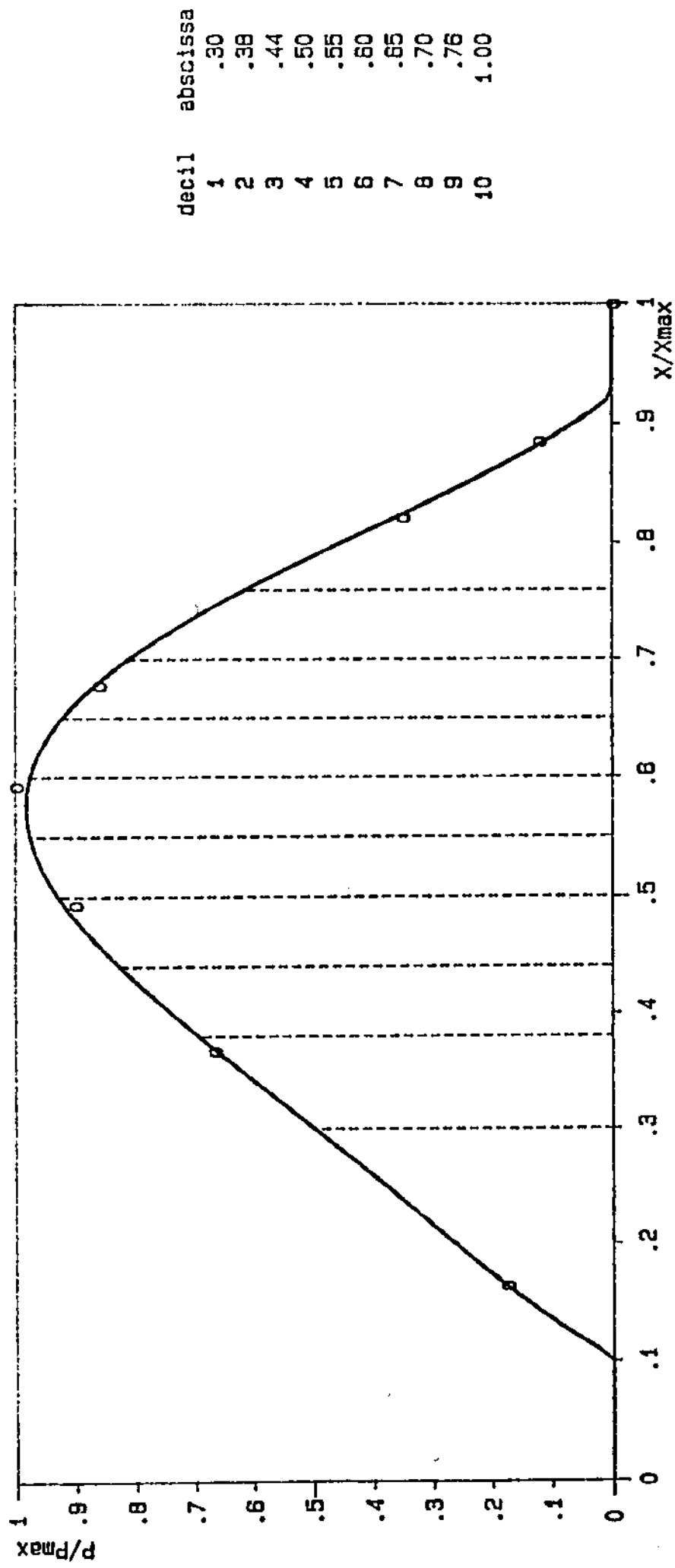
Ae/Ai: 1

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -.511629752884$
 $+ (7.37206803842 * x^1) + (-31.2451288947 * x^2)$
 $+ (89.7904981053 * x^3) + (-115.678327791 * x^4)$
 $+ (50.2740455935 * x^5)$

Aproximacao Polinomial do 5o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



Perfil de distribuicao adimensional

Figura 4.8 - Aproximacao polinomial selecionada para o perfil de distribuicao adimensional do bocal C-08.

A aderência dos perfis experimentais aos perfis ideais

As equações, obtidas por aproximação numérica, para os 28 perfis de distribuição adimensionais passaram então a ser comparadas com as equações dos perfis de distribuição adimensionais definidos por Christiansen e pelo sistema de equações (2.14).

Com o intuito de quantificar a aderência entre os perfis de distribuição obtidos experimentalmente e os 3 perfis de distribuição teóricos citados, foi desenvolvido um coeficiente de aderência, que agora se apresenta.

Dizemos que duas curvas, no nosso caso dois perfis de distribuição adimensionais, são perfeitamente aderentes se coincidirem em todos os seus pontos.

É evidente que, se

i) as curvas forem geometricamente semelhantes e

ii) as integrais $\int_0^1 (P/P_{\max}) \cdot d(X/X_{\max})$ de ambas as curvas possuírem o mesmo valor,

verificar-se-á uma aderência perfeita entre os dois perfis de distribuição adimensionais.

Definiram-se, então, dois fatores que relacionam os perfis de distribuição obtidos experimentalmente com os perfis de distribuição teóricos.

O primeiro fator definido foi o fator que relaciona a semelhança geométrica das duas curvas, do seguinte modo:

$$F_f = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{10} z_i}{10} \quad (4.1)$$

onde F_f representa o fator de forma entre os dois perfis e os z_i são as diferenças entre os i -ésimos decís das integrais $\int_0^1 (P/P_{\max}) \cdot d(X/X_{\max})$ de ambas as curvas, ou seja

$$\int_0^{i\text{-ésimo decil}} (P/P_{\max}) \cdot d(X/X_{\max}) = \frac{i}{10} \int_0^1 (P/P_{\max}) \cdot d(X/X_{\max}) \quad (4.2)$$

Como no caso de uma aderência perfeita entre as duas curvas os z_i serão todos nulos e no caso de uma disparidade máxima entre o formato dos dois perfis de distribuição todos os z_i terão valores próximos de unidade, verificamos que, se as curvas forem perfeitamente aderentes, teremos

$$F_f = 1 \quad (4.3a)$$

e, no caso contrário, teremos,

$$F_f < 1 \quad (4.3b)$$

Ocorre, porém, que o fato de termos duas curvas que apresentem um fator de forma unitário não significa que elas sejam perfeitamente aderentes.

Isso se verifica, por exemplo com as curvas E e T da figura 4.9 que, apesar de possuírem um fator F_f unitário, não apresentam uma aderência perfeita.

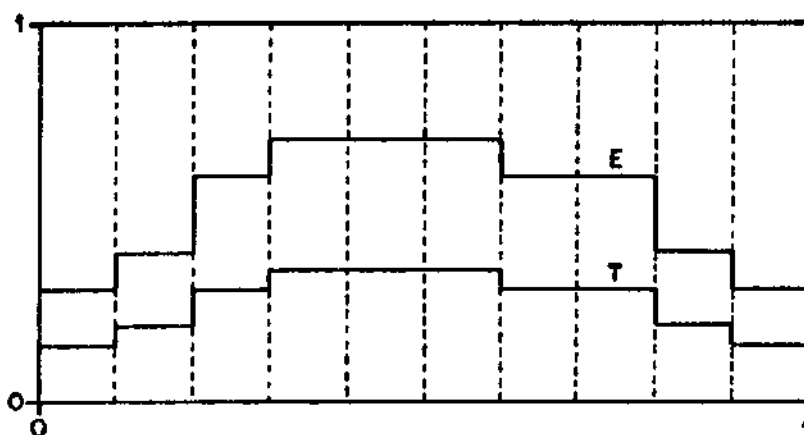


Figura 4.9 - Caso em que duas curvas não aderentes apresentam fator de forma, F_f , unitário.

O fator de forma, F_f , relaciona apenas a semelhança geométrica entre as duas curvas.

Por este motivo se introduziu, em seguida, um outro fator que relaciona as áreas compreendidas entre cada uma das curvas e os eixos coordenados.

Seja F_a o fator de área definido por

$$F_a = \frac{\min(S_T, S_E)}{\max(S_T, S_E)} \quad (4.4)$$

onde

$$S_T = \left[\int_0^1 (P/P_{\max}) \cdot d(X/X_{\max}) \right]_{\text{Teórico}} \quad (4.5)$$

e

$$S_E = \left[\int_0^1 (P/P_{\max}) \cdot d(X/X_{\max}) \right]_{\text{Experimental}} \quad (4.6)$$

Verifica-se que o fator de área, F_a , somente assumirá um valor unitário se as áreas compreendidas entre cada uma das curvas e os eixos coordenados forem iguais.

Analogamente ao que ocorre com o fator de forma, definido pela equação (4.1), o fator de área F_a varia entre os valores extremos $F_a \rightarrow 0$ e $F_a = 1$.

O coeficiente de aderência, C_a , definido como

$$C_a = F_f \cdot F_a \quad (4.7)$$

assumirá os valores

$$C_a = 1$$

no caso das duas curvas serem perfeitamente aderentes, e

$$C_a \rightarrow 0$$

no caso de uma disparidade máxima entre os dois perfis de distribuição adimensionais.

Na prática, verificou-se que tanto os fatores de forma como os fatores de área, obtidos por comparação dos perfis de distribuição experimentais com os perfis de distribuição teóricos variaram para cada um dos 28 bocais coaxiais ensaiados.

É com base nos valores assumidos pelo coeficiente de aderência definido pela equação (4.7) que se passará a analisar a influência que têm, sobre o perfil de distribuição de cada um dos bocais estudados, as 3 variáveis objeto deste estudo, a saber: proporção entre as áreas das secções de saída dos dois jatos, conicidade do jato externo e pré-circulação do jato externo.

O efeito da proporção entre as áreas das secções de saída (A_e/A_i)

Para se estudar o efeito da variação da proporção entre as áreas das secções de saída do jato externo e do jato interno, na faixa compreendida entre

$$0,5 < A_e/A_i < 1,5$$

foram construídas duas séries de 10 bocais com as seguintes características:

Nº do bocal	α (graus)	γ (graus)	A_e/A_i
C-10	0	0	0,5
C-04	0	0	0,6
C-06	0	0	0,7
C-05	0	0	0,8
C-08	0	0	1,0
C-09	0	0	1,1
C-07	0	0	1,2
C-02	0	0	1,3
C-03	0	0	1,4
C-01	0	0	1,5
C-0910	10	0	0,6
C-1010	10	0	0,7
C-0810	10	0	0,8
C-0410	10	0	0,9
C-0110	10	0	1,0
C-0610	10	0	1,1
C-0210	10	0	1,2
C-0510	10	0	1,3
C-0710	10	0	1,4
C-0310	10	0	1,5

Os bocais com estas características geométricas foram , em seguida, operados durante 1 hora sobre uma malha quadrangular de pluviômetros disposta num terreno horizontal (figura 4.10).

O tratamento analítico dos dados obtidos nestes 20 ensaios foi aquele anteriormente descrito para o bocal C-08.

Obtivemos assim um conjunto de equações, para os 20 perfis de distribuição adimensionais, que nos permitiram verificar de que forma a variação de A_e/A_i influia na aderência dos vários perfis de distribuição experimentais em relação aos três perfis de distribuição teóricos tomados como referência.

Nas figuras 4.11 a 4.14 podemos observar o conjunto de perfis de distribuição obtidos para estes bocais.

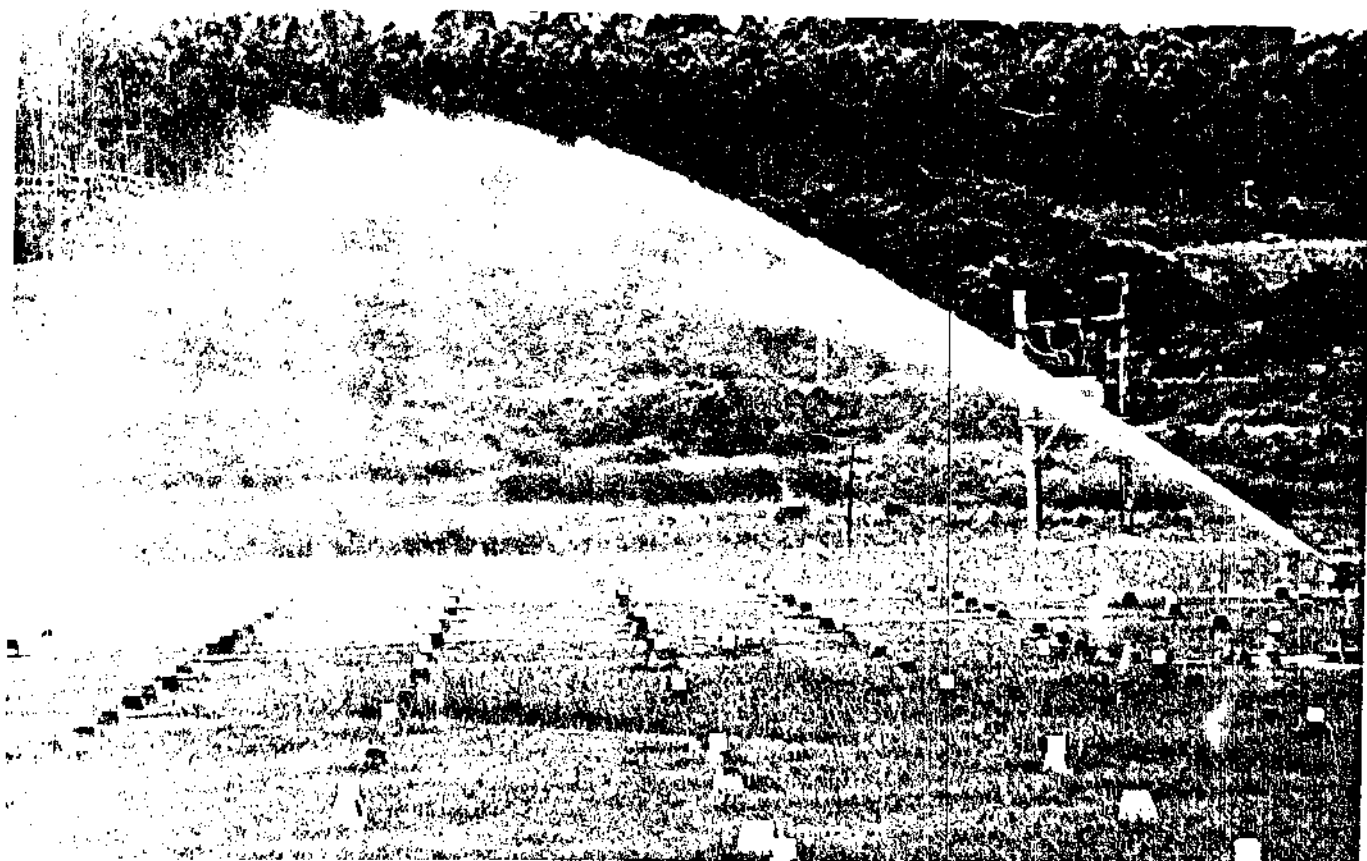


Figura 4.10 - Ensaaiando um bocal coaxial.

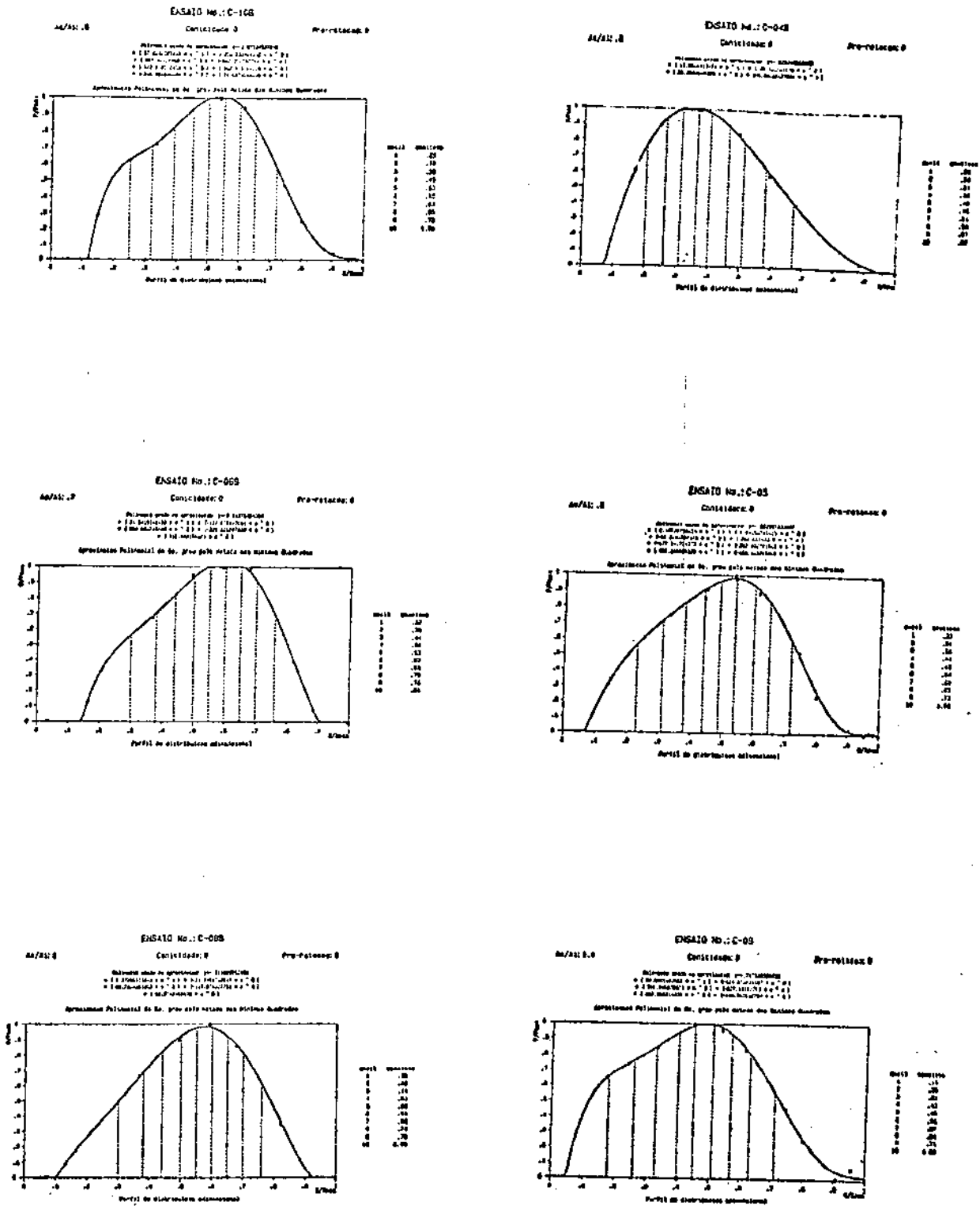


Figura 4.11 - Perfis adimensionais obtidos pela variação de A_e/A_i desde 0,5 a 1,1, mantendo $\alpha=0^\circ$ e $\gamma=0^\circ$.

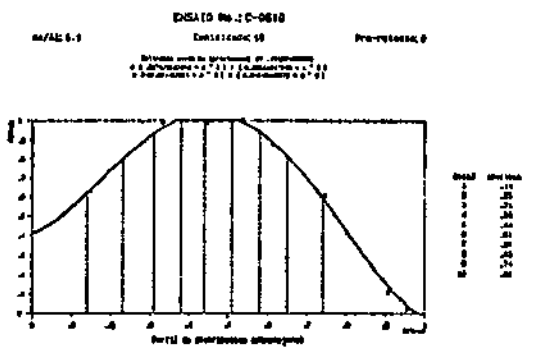
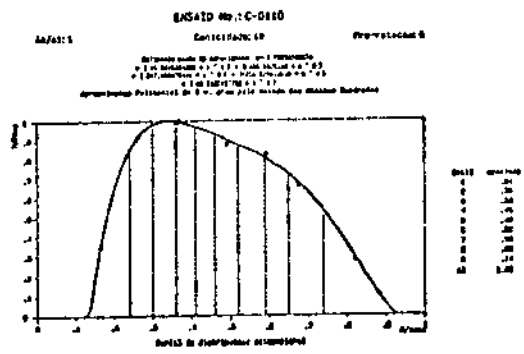
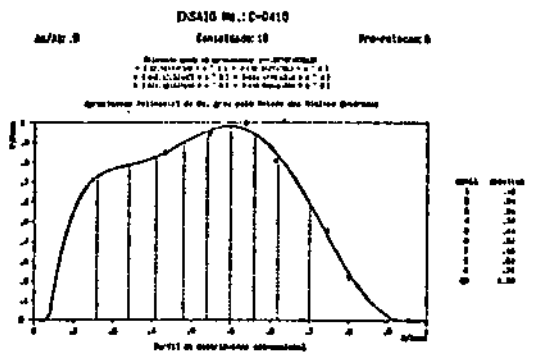
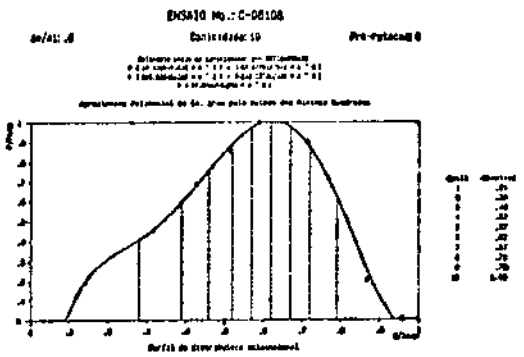
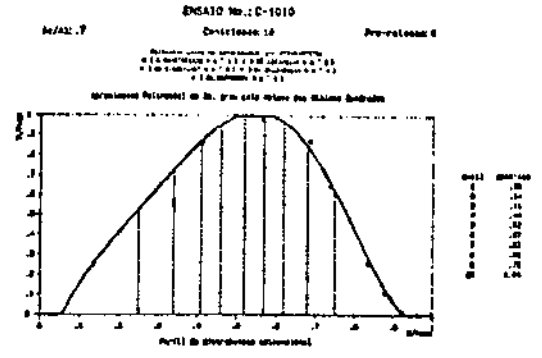
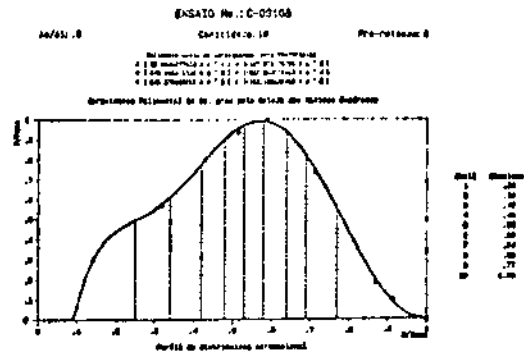


Figura 4.13 - Perfis adimensionais obtidos pela variação de A_e/A_i desde 0,6 a 1,1, mantendo $\alpha=10^\circ$ e $\gamma=0^\circ$.

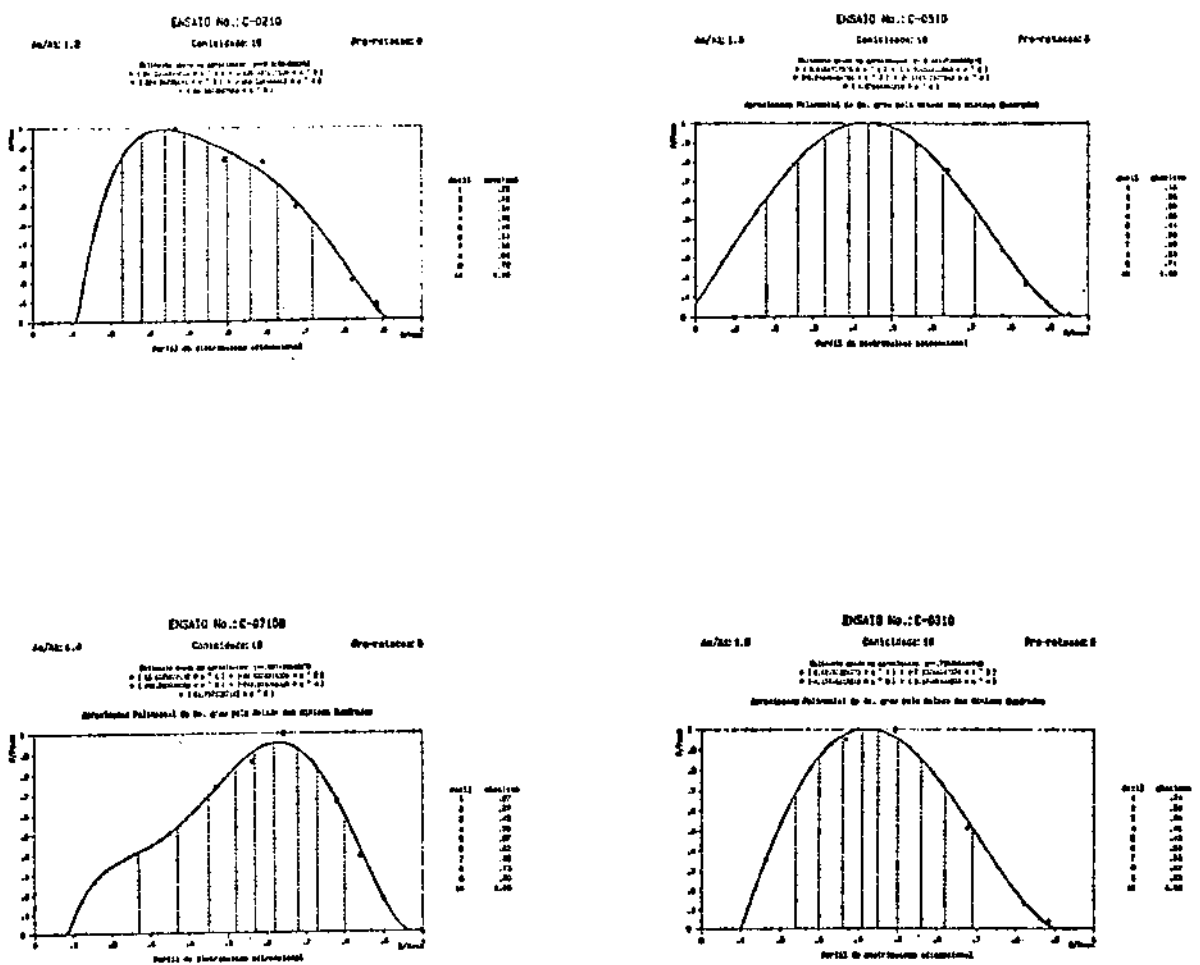


Figura 4.14 - Perfis adimensionais obtidos pela variação de A_e/A_i desde 1,2 a 1,5, mantendo $\alpha=10^\circ$ e $\gamma=0^\circ$.

Plotando-se os valores assumidos pelos coeficientes de aderência em função de A_e/A_i , obtêm-se as curvas mostradas na figura 4.15.

Pela análise dessa figura verifica-se que os perfis de distribuição adimensionais obtidos com estes bocais aderem melhor ao perfil de distribuição Christiansen K que aos outros dois perfis.

Podemos observar também que, para valores de $A_e/A_i < 1,3$, os bocais cujo jato externo possui uma conicidade de 10° possuem perfis de distribuição que se aproximam mais das duas primeiras curvas teóricas.

Esta observação está intrinsecamente relacionada com um fato verificado durante a operação destes bocais:

Imediatamente após a passagem pela secção de saída dos bocais, o jato externo, para valores baixos da sua conicidade, tende a unir-se ao jato interno, formando uma só corrente líquida.

Dessa forma, o efeito protetor do jato externo fica bastante diminuído.

Ao se provocar uma pequena conicidade no jato externo, o efeito aglutinador verificado nos bocais sem conicidade é contrabalanceado, passando então o jato externo a desempenhar um papel mais ativo no escoamento.

As figuras 4.16 e 4.17 mostram o escoamento, logo após a saída do bocal para jatos com conicidade 0° e 10° , respectivamente.

Nessas figuras podemos observar o fato acima exposto.

Se observarmos de novo os gráficos da variação dos coeficientes de aderência em função de A_e/A_i , podemos concluir que, devido ao fato da conicidade do jato externo aumentar a intensidade de precipitação na região próxima ao bocal, a introdução de conicidade no jato externo se mostra vantajosa, para aspersores que operem estacionariamente, para valores de $A_e/A_i < 1,3$.

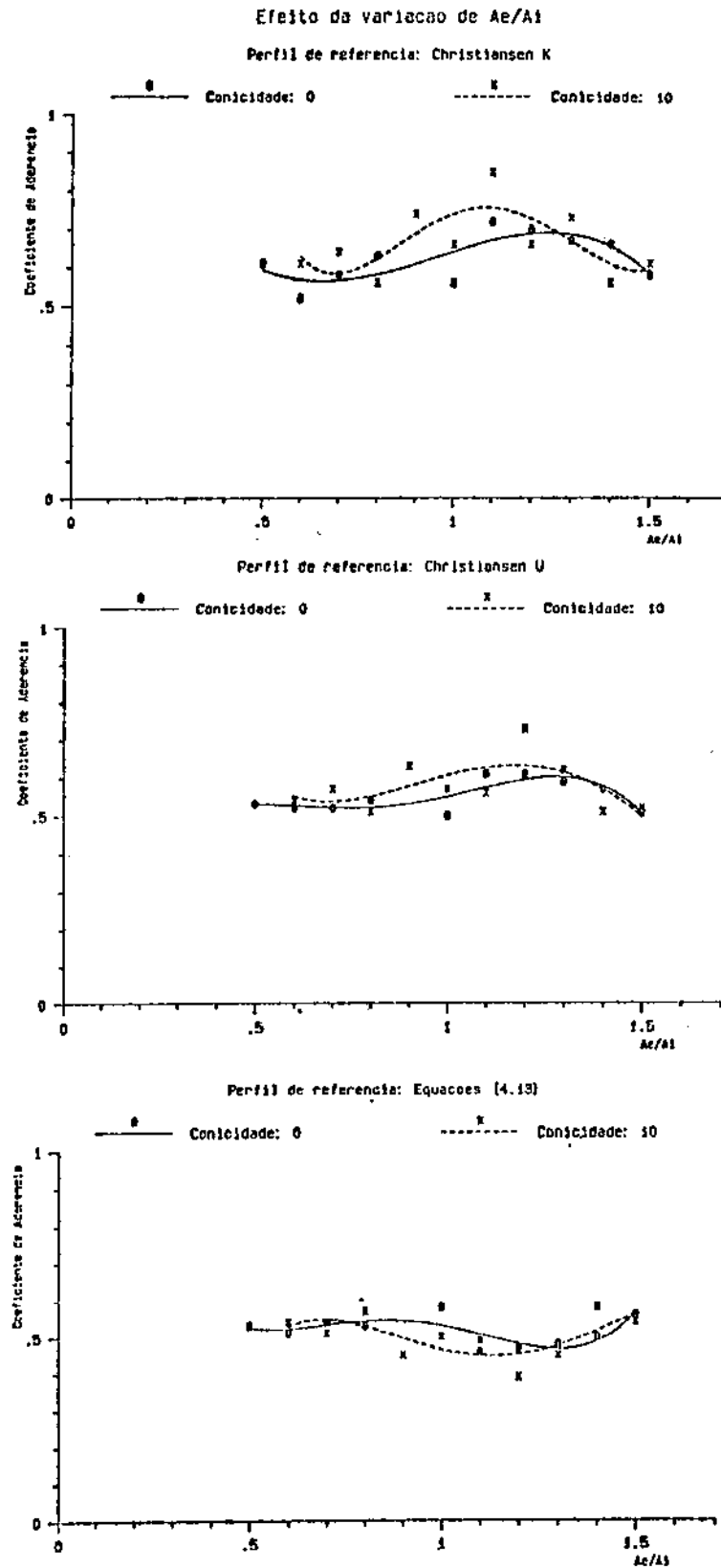


Figura 4.15 - Variação dos coeficientes de aderência em função de A_e/A_i .

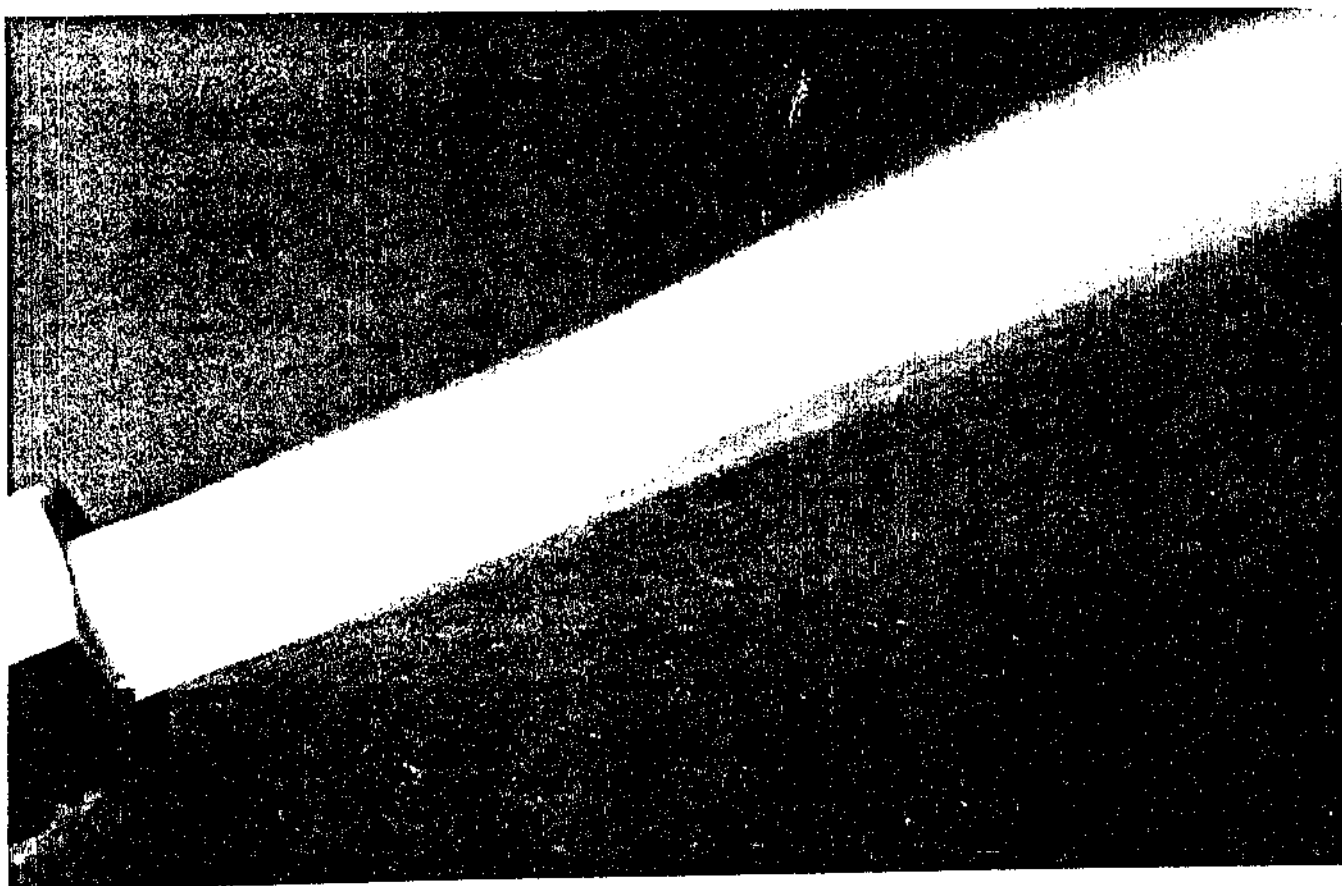


Figura 4.16 - $A_e/A_i = 1,0$; $\alpha=0^\circ$; $\gamma=0^\circ$.

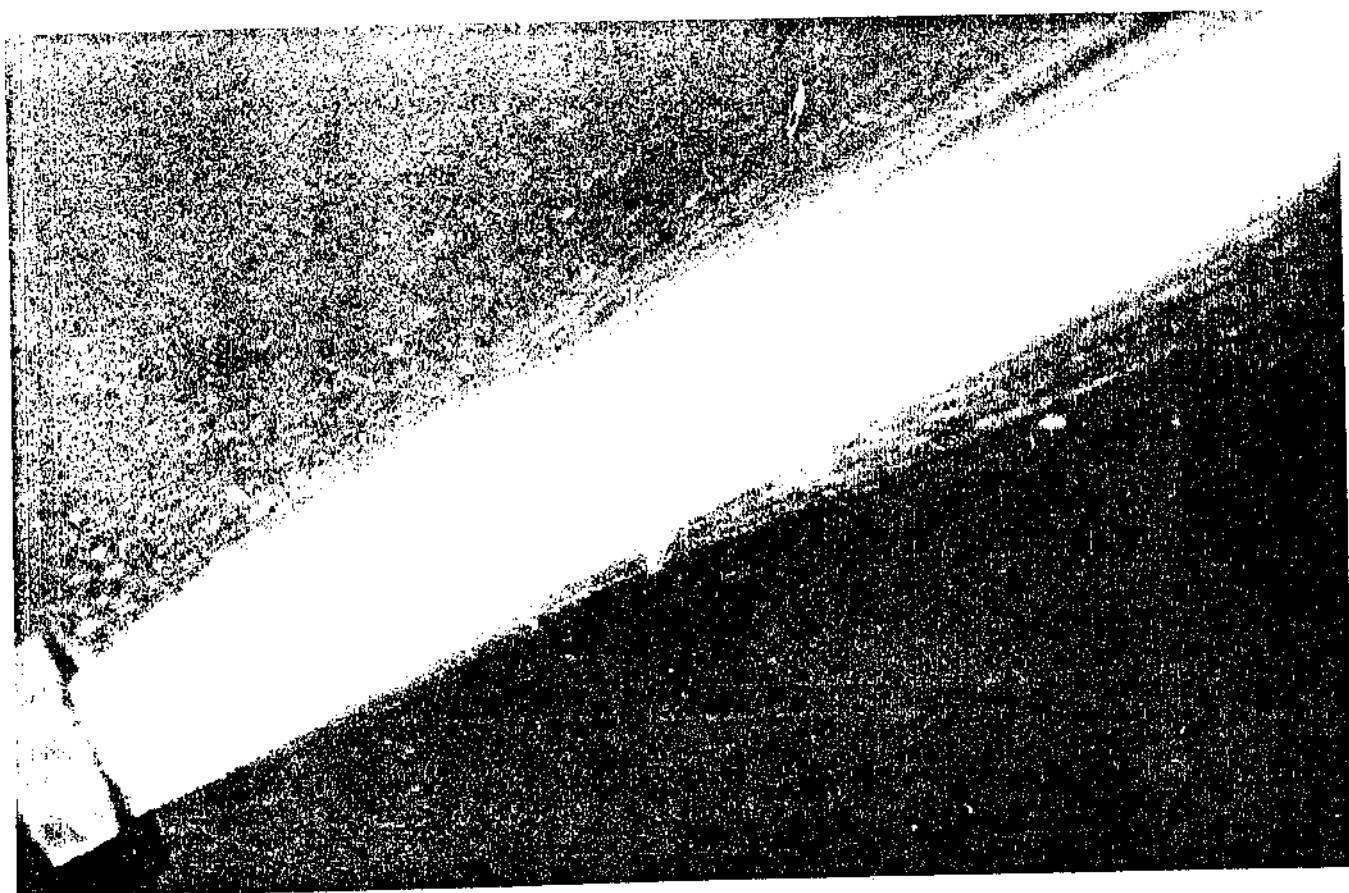


Figura 4.17 - $A_e/A_i = 1,0$; $\alpha=10^\circ$; $\gamma=0^\circ$.

Podemos também concluir que as maiores aderências em relação aos dois primeiros perfis teóricos se verificam para valores de A_e/A_i compreendidos entre 0,9 e 1,2.

Já em relação ao perfil de distribuição deduzido para aspersores impelidos de deslocamento linear, se verifica que é normalmente preferível a ausência de conicidade no jato externo.

Isto é facilmente explicável se nos lembrarmos que este é um tipo de perfil onde se requer uma baixa intensidade de precipitação adimensional junto ao aspersor.

Além disso, pela figura 4.15 podemos concluir que o melhor valor para A_e/A_i de um aspersor que deverá ser instalado num auto-propelido é $A_e/A_i = 1$.

Verifiquemos agora de que forma a variação da conicidade de influi nos perfis de distribuição dos aspersores.

O efeito da variação da conicidade do jato externo

Para se estudar o efeito da variação da conicidade do jato externo sobre o perfil de distribuição adimensional produzido pelo bocal, foram construídos cinco bocais com as seguintes características:

$$A_e/A_i = 1,5; \quad \gamma = 0^\circ; \quad \alpha = \{0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ\}$$

O valor de A_e/A_i , que se manteve constante em todos estes experimentos, foi escolhido igual a 1,5 por ser, entre os valores usados em todo o trabalho, o que permitia que se trabalhasse numa maior gama de valores de α .

Na figura 4.18 podemos observar o formato dos perfis de distribuição obtidos com estes cinco bocais.

Verifica-se que o método de ensaio utilizado se mostrou adequado para valores de $\alpha \leq 15^\circ$.

Para $\alpha = 20^\circ$, no entanto, a elevação da intensidade de precipitação adimensional junto ao aspersor fez com que os métodos de ensaio e, principalmente, de análise dos dados obtidos se mostrassem inapropriados.

O método de ensaio foi, no entanto, mantido para $\alpha=20^\circ$ por se tratar do único método oficializado em nosso país.

Os valores fornecidos pelos coeficientes de aderência devem portanto, ser olhado com restrições no que se refere a $\alpha = 20^\circ$. Este fato, porém, não se deve revestir de grande importância pois, pelo formato do próprio perfil de distribuição adimensional obtido, podemos concluir que se o jato externo apresenta uma conicidade de 20° o perfil resultante afasta-se exageradamente de qualquer um dos perfis de distribuição que pretendíamos reproduzir.

A figura 4.19 mostra os valores assumidos pelos coeficientes de aderência em função de α .

Nesta figura podemos verificar que a maior aderência em relação aos perfis de distribuição teóricos definidos por Christiansen se verifica para o caso de bocais cujo jato externo abandona a secção de saída com uma conicidade de 10° .

Este fato está de acordo com o que anteriormente foi exposto, durante a análise do efeito da variação de A_e/A_i .

Para valores de $\alpha > 15^\circ$ observa-se uma rápida diminuição do valor de C_a .

Isso se deve ao aumento exagerado da intensidade de precipitação verificado junto ao aspersor quando a conicidade do jato externo assumia valores elevados.

Nas figuras 4.20 e 4.21, podemos observar o aspecto do escoamento produzido junto ao bocal para valores da conicidade do jato externo de 15° e 20° .

É nítido, nessas figuras, o rápido aumento da dispersão do jato externo verificado nessa faixa de variação da conicidade.

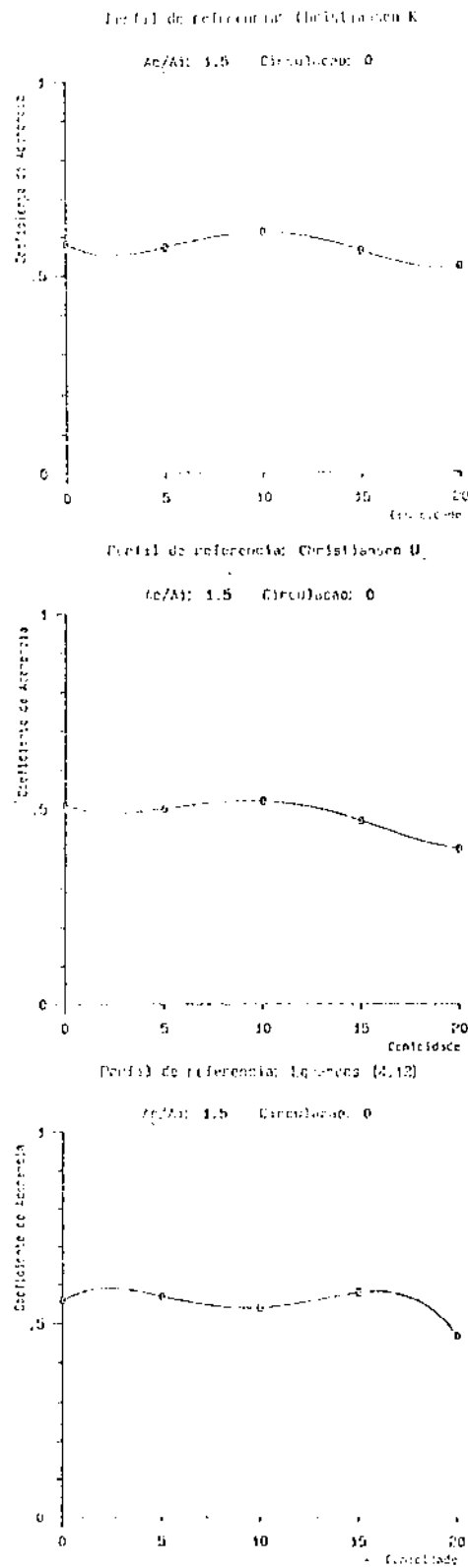


Figura 4.19 - Variação dos coeficientes de aderência em função de α .



Figura 4.20 - $A_e/A_i = 1,5$; $\alpha=15^\circ$; $\gamma=0^\circ$.

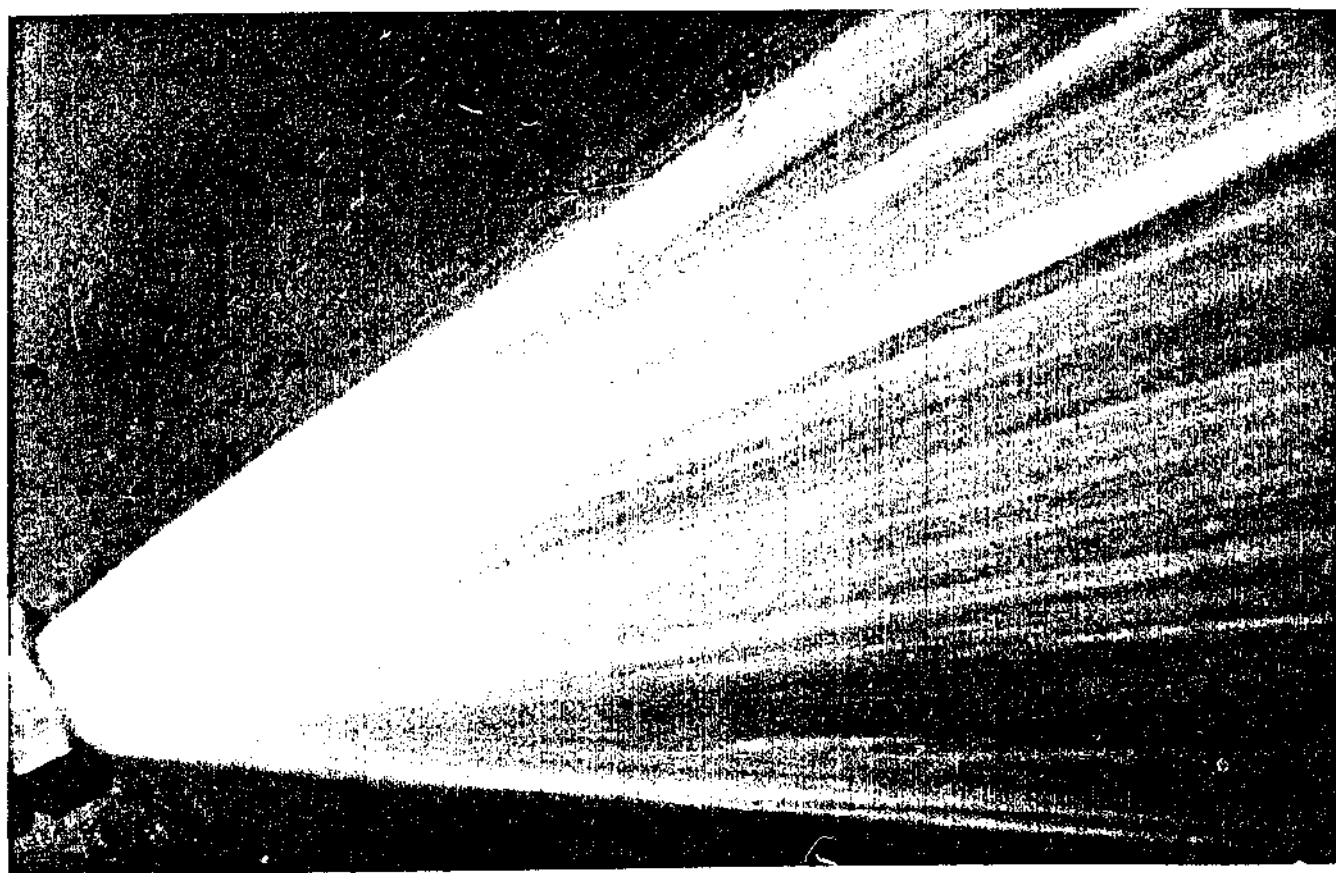


Figura 4.21 - $A_e/A_i = 1,5$; $\alpha=20^\circ$; $\gamma=0^\circ$.

Encontramo-nos já de posse de algumas informações a respeito da influência da variação de A_e/A_i e de α sobre o perfil de distribuição de um aspersor rotativo que nos servirão como indicação para a construção de novos bocais.

Das três variáveis que inicialmente nos propusemos estudar, resta-nos ainda a pré-circulação do jato externo.

O efeito da variação da pré-circulação do jato externo

Para se obter a pré-circulação do jato externo, construiu-se uma série de 6 bocais coaxiais nos quais os direcionadores de fluxo formavam diferentes ângulos com o eixo do escoamento na secção de saída do bocal.

As características geométricas dos bocais construídos nesta fase do trabalho foram:

Nº do bocal	α (graus)	γ (graus)	A_e/A_i
C-10	0	0	0,5
CIR-10	0	10	0,5
CIR-20	0	20	0,5
CIR-30	0	30	0,5
CIR-40	0	40	0,5
CIR-50	0	50	0,5

Desta forma, o efeito da variação da pré-circulação pôde ser avaliado numa faixa de valores γ compreendidos entre 0° e 50° .

Utilizando-se a mesma metodologia de ensaio que anteriormente se tinha empregado para o estudo da variação de A_e/A_i e de α , cada um destes bocais foi operado durante uma hora sobre o campo de testes.

Após o processamento dos dados obtidos experimentalmente, obtiveram-se os perfis de distribuição mostrados na figura 4.22.

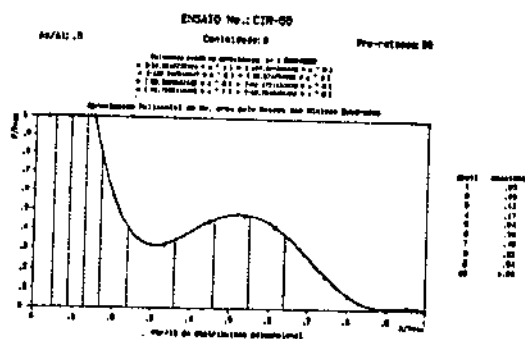
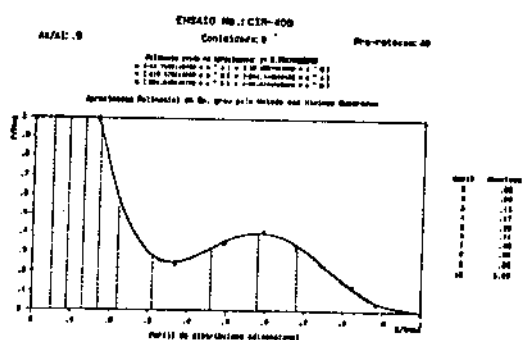
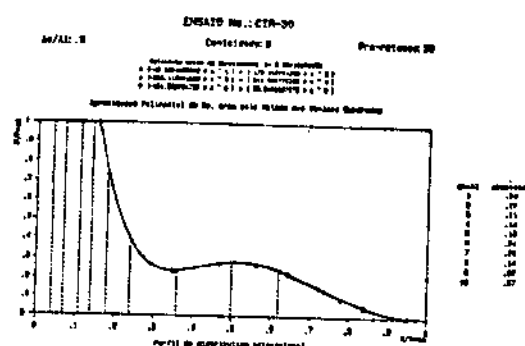
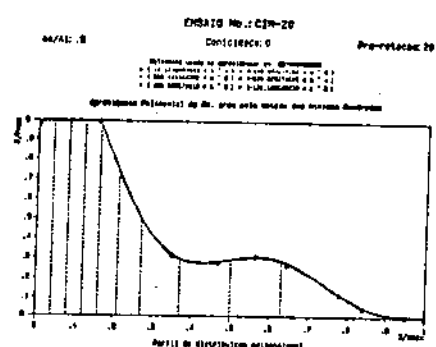
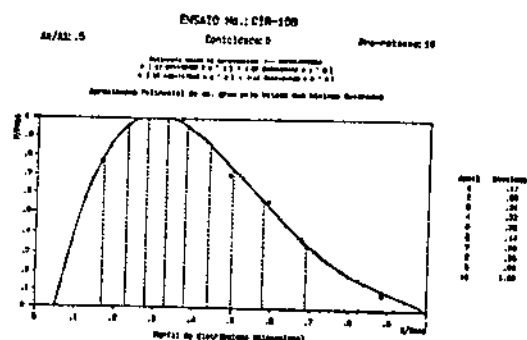
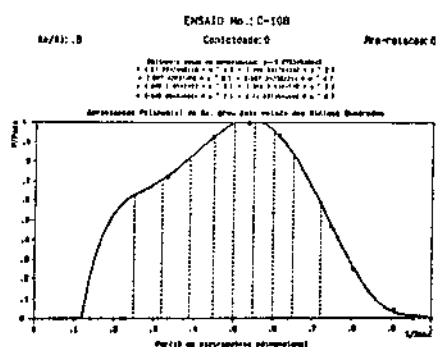


Figura 4.22 - Perfis adimensionais obtidos pela variação de γ desde 0° a 50° , mantendo $A_e/A_i = 0,5$ e $\alpha=0^\circ$.

Verifica-se que, ao se introduzir pré-circulação no jato externo, se obtém um efeito semelhante àquele produzido pela introdução de conicidade no mesmo jato, isto é, o aumento da pré-circulação do jato externo produz uma elevação da intensidade de precipitação adimensional na região próxima ao aspersor.

Para valores de $\gamma \geq 20^\circ$ verifica-se que essa elevação de intensidade de precipitação adimensional junto ao aspersor passa a agir de uma forma contraproducente, na medida em que os perfis de distribuição obtidos se afastam rapidamente das configurações teóricas que pretendíamos reproduzir.

Mais ainda, verifica-se que, para elevados valores de γ , o método de ensaio estabelecido pela norma ABNT-PNB 12:02.08-002/83 se mostra inadequado.

Este fato não deve ser entendido como uma crítica ao método de ensaio preconizado pela referida norma, mas sim como uma indicação clara de que valores muito elevados de γ produzem perfis de distribuição que não são característicos dos aspersores de irrigação normalmente encontrados no mercado de produtos nacionais.

O método de ensaio, no entanto, permitiu verificar que os perfis de distribuição adimensionais obtidos para elevados valores de γ se mostram inadequados para qualquer uma das aplicações que nos propusemos estudar.

Na figura 4.23, plotaram-se os valores que os coeficientes de aderência, em relação aos três perfis de distribuição teóricos tomados como referência, assumem com a variação de γ . Por essa figura podemos observar que a introdução de pré-circulação no jato externo se mostra benéfica para $\gamma = 10^\circ$ em relação aos perfis teóricos definidos por Christiansen.

Convém chamar a atenção para o fato do aumento do valor assumido pelo coeficiente de aderência para valores crescentes de γ a partir de 20° não corresponder à realidade: é fruto da inadequação do método empregado.

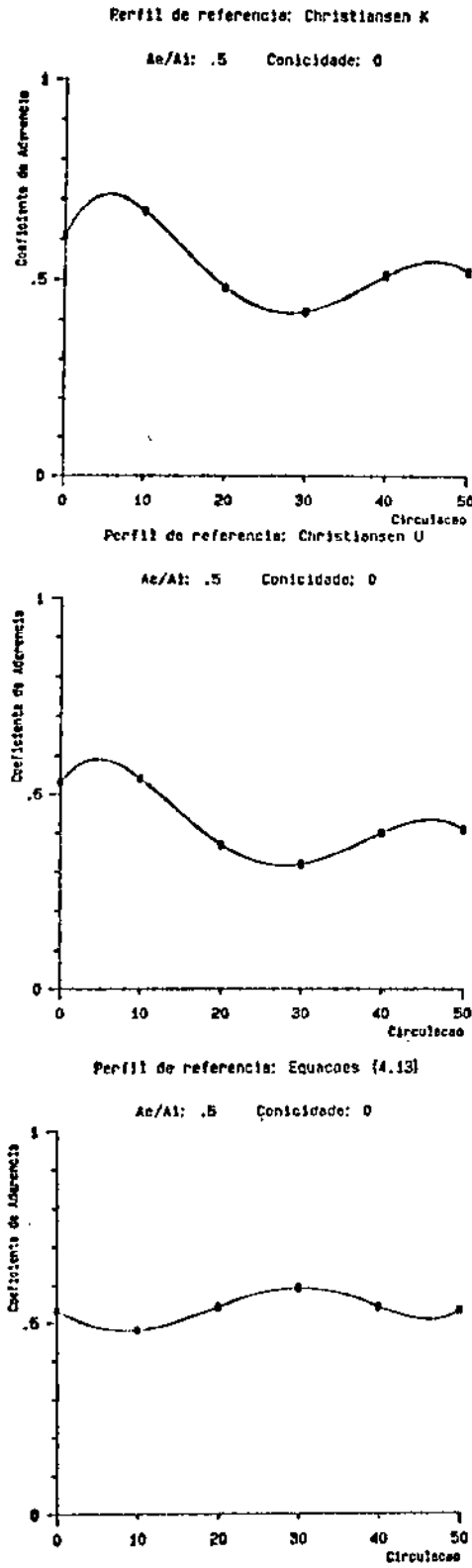


Figura 4.23 - Variação dos coeficientes de aderência em função de γ .

Em relação ao perfil teórico definido pelo sistema de equações (2.14), verifica-se que a introdução de pré-circulação no jato externo é indesejável.

Este fato era de se esperar pois, como vimos, em aspersores para sistemas de irrigação auto-propelidos pretendem-se perfis de distribuição que apresentem intensidades de precipitação máximas na extremidade do raio irrigado.

Discussão da metodologia e dos resultados obtidos

A metodologia utilizada para os ensaios dos bocais coaxiais projetados e construídos ao longo desta parte do estudo foi aquela indicada pela norma ABNT-NBR 8989.

É uma das duas mais difundidas metodologias para ensaio de aspersores que se encontram em todo o mundo.

Em relação a ela os comentários são reduzidos: o método de ensaio mostra-se bastante eficiente para os aspersores de irrigação cujos perfis de distribuição não diferem muito dos padrões usuais.

No entanto, como tivemos oportunidade de observar, quando os perfis de distribuição apresentam elevadas intensidades de precipitação na região próxima ao aspersor, o método de ensaio preconizado pela ABNT mostra-se pouco eficiente.

Este fato, como vimos, não nos causou grandes problemas pois não nos interessavam os casos em que os aspersores de irrigação apresentavam perfis de distribuição cujas máximas intensidades de precipitação se verificavam unicamente na região próxima ao aspersor.

A metodologia para análise dos dados obtidos, no entanto, difere substancialmente da metodologia tradicional.

Após o ensaio de um aspersor no campo, os pesquisadores costumam simular a operação desse aspersor num número bastante elevado de sobreposições (quadrangular com 80% de espaçamento, triangular com 70% de espaçamento, ...) e determinam o valor dos

coeficientes de uniformidade e das eficiências de aplicação e armazenamento produzidas por um conjunto de aspersores idênticos ao ensaiado operando nessas situações.

A metodologia empregada neste trabalho para a análise dos resultados experimentais consistiu na comparação do perfil de distribuição adimensional, obtido a partir dos valores observados no campo, com 3 perfis de distribuição adimensionais teoricamente considerados ideais.

Esta mudança no tratamento dos dados obtidos experimentalmente originou-se do fato de pretendermos verificar de que forma devemos manipular algumas das variáveis geométricas do bocal de um aspersor de irrigação para que se venham a construir aspersores cujas características de distribuição sejam ideais para uma aplicação específica.

O coeficiente de aderência, desenvolvido como forma de relacionar a semelhança entre os perfis de distribuição experimentais e os teóricos, mostrou-se adequado na medida em que realmente quantificava as divergências observadas entre os perfis de distribuição teóricos e os experimentais.

Como, por outro lado, os bocais que foram desenvolvidos ao longo deste trabalho apresentavam características geométricas ainda não empregadas na irrigação por aspersão, o pré-estabelecimento dos valores que deveriam assumir as variáveis objeto deste estudo estendeu-se por uma faixa relativamente ampla dessas variáveis.

Embora não se tenha esgotado toda a possível faixa experimental, os valores testados para A_e/A_i , α e γ nos mostram claramente a existência de tendências no comportamento dos perfis de distribuição obtidos experimentalmente em função da mudança dos valores assumidos por estas três variáveis.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O conjunto de equações obtidas para o perfil de distribuição adimensional desenvolvido apresentou-se plenamente satisfatório, já que se demonstrou teoricamente que um aspersor com tal perfil de distribuição produziria padrões de distribuição de água de altíssima qualidade quando instalado sobre um sistema de irrigação auto-propelido.

Mostrou-se também que, mantendo-se constantes as condições operacionais, a uniformidade do padrão de distribuição de água produzido por um sistema de irrigação auto-propelido é unicamente função do perfil de distribuição de seu aspersor.

Os resultados obtidos, após se terem testado os 28 bocais coaxiais construídos, permitiram determinar quais os valores que deverão ser assumidos (e quais os que deverão ser evitados) pela conicidade e pré-circulação do jato externo e pela proporção entre as áreas das secções de saída dos jatos externo e interno de um bocal coaxial.

Assim, pôde-se concluir que um bocal coaxial para utilização, nas condições operacionais testadas, em sistema de irrigação estacionário deverá possuir, no jato externo, uma conicidade de 10° e deverá possuir também uma proporção A_e/A_i entre 0,9 e 1,2.

Verificou-se também que bocais coaxiais para sistemas de irrigação auto-propelidos deverão, por seu lado, possuir valores de $\alpha=5^\circ$ e $A_e/A_i=1$.

Para o caso de bocais com pré-circulação do jato externo, foram verificadas vantagens na utilização de valores de $\gamma=10^\circ$ para bocais de aspersores estacionados. Não se verificou vantagem na utilização de bocais com pré-circulação em sistemas de irrigação auto-propelidos.

Sugestões

Em relação à metodologia empregada neste trabalho, cabe aconselhar a sua utilização no processamento dos inúmeros dados experimentais disponíveis para bocais de jatos líquidos não-coaxiais, visando determinar de que forma deverão evoluir as características geométricas dos bocais que atualmente são fabricados, já que o novo método de análise empregado nos permite trabalhar diretamente em cima dos perfis de distribuição que vão sendo experimentalmente conseguidos.

Em relação aos resultados obtidos nos experimentos efetuados com bocais coaxiais, podemos observar que a faixa ideal de valores para as três variáveis estudadas ficou claramente definida.

Podemos, assim, concluir que os novos trabalhos que venham a ser realizados nesta área deverão, valendo-se de menores intervalos de variação, detalhar com maior precisão o comportamento do perfil de distribuição nas referidas faixas de valores ideais.

A aparente complexidade construtiva dos bocais coaxiais, que poderia ser levantada como fator limitante à sua utilização, cai irremediavelmente por terra quando se concebe a sua construção em plástico injetado.

Desta forma, por este trabalho se explicita uma nova área de aplicação da mecânica de fluidos pela qual se poderão introduzir grandes melhorias nos sistemas de irrigação por aspersão o que, devido à sua possibilidade de aplicação imediata, poderá trazer a curto prazo uma redução do custo da irrigação por aspersão.

Isto é extremamente importante para a agricultura do país, pois desta forma será viável a irrigação por aspersão em grandes áreas, inclusive para a produção de alimentos, garantindo as safras e reduzindo o custo de produção por unidade de produto.

BIBLIOGRAFIA CITADA

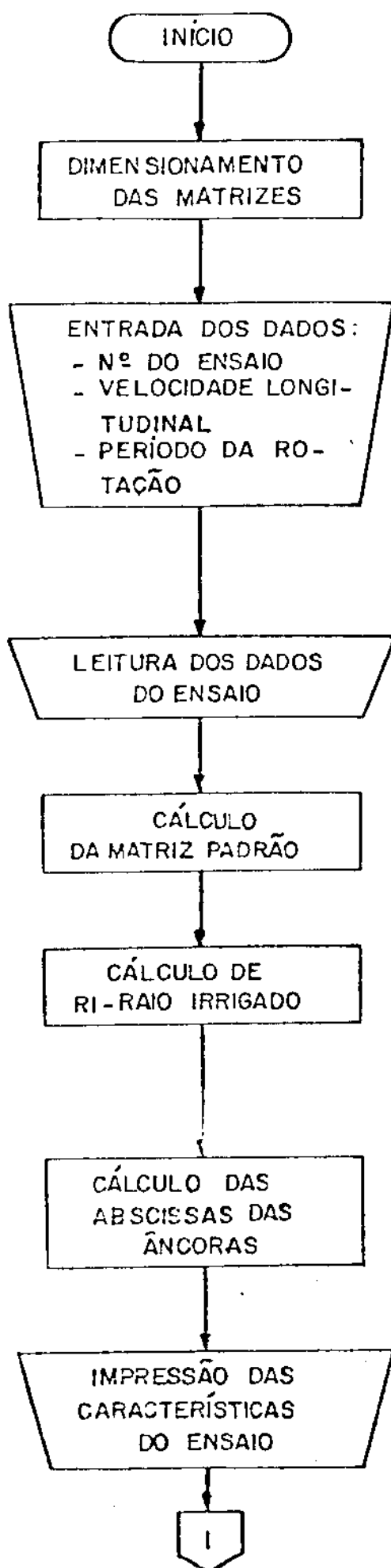
- [1] ABNT - NBR 8988. Aspersores para irrigação - Avaliação de características operacionais - Método de ensaio. 1985.
- [2] ABNT - NBR 8989. Aspersores para irrigação - Avaliação da distribuição de água - Método de ensaio. 1985.
- [3] ASAE - S398T. Procedure for sprinkler testing and performance reporting. 1980.
- [4] ASAE - S330. Procedure for sprinkler distribution testing for research purposes. 1980.
- [5] BILANSKI, W.K. e KIDDER, E.H. Factors that affect distribution of water from medium-pressure rotary irrigation sprinklers. Trans. of the ASAE, 33 (5):271-3. 1952.
- [6] BITTINGER, M.W. e LONGENBAUGH, R.A. Theoretical distribution of water from a moving irrigation sprinkler. Trans. of the ASAE, 1962:26-30.
- [7] BUFF. Pogg. Ann., vol. C, p. 168. 1857. apud RAYLEIGH. Dover Publications. NY. 1945.
- [8] CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by sprinkling. Calif. Agr. Exp. Bull. 670. 1942.
- [9] CRIDDLE, W.D., DAVIS, S., PAIR, C.H. e SHOCKLEY, D.G. Methods for evaluating irrigation systems. USDA Soil Conservation Service Handbook n. 82. 1976.
- [10] FORDHAM, S. On the calculation of the surface tension from measurements of pendant drops. Proc. Roy. Soc. 194A. London. 1948.
- [11] HANSON, R.E. Water distribution with traveling gun sprinklers. ASCE, Natl. Water Res. Meet. Phoenix. 1971.

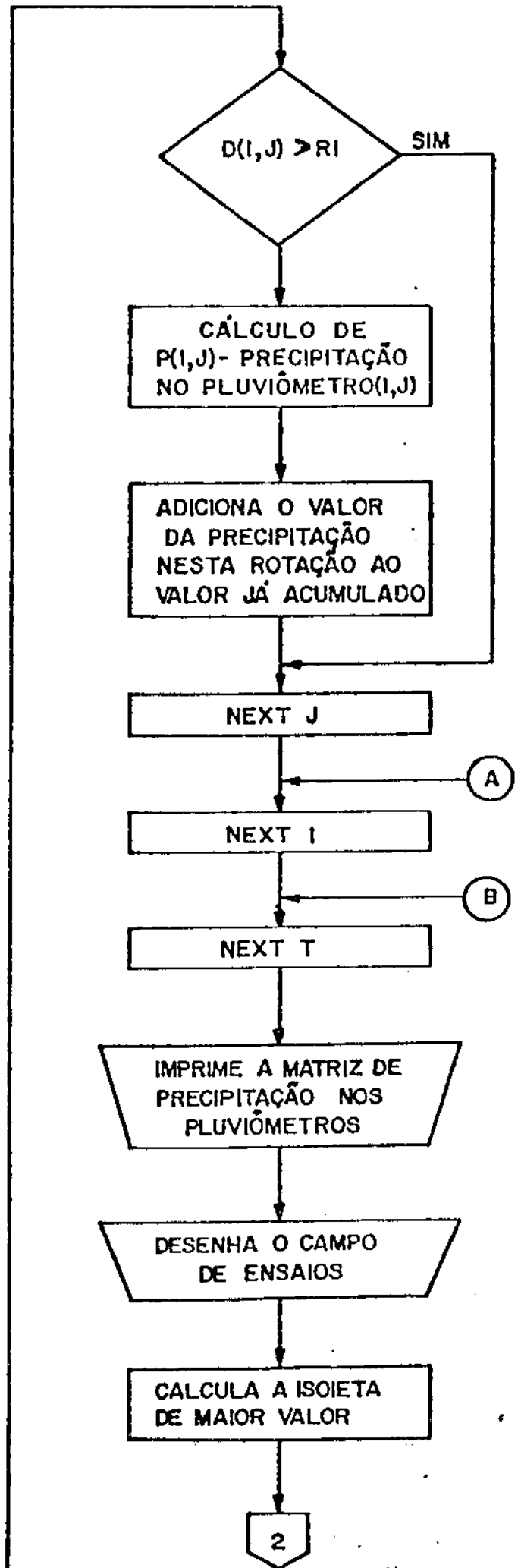
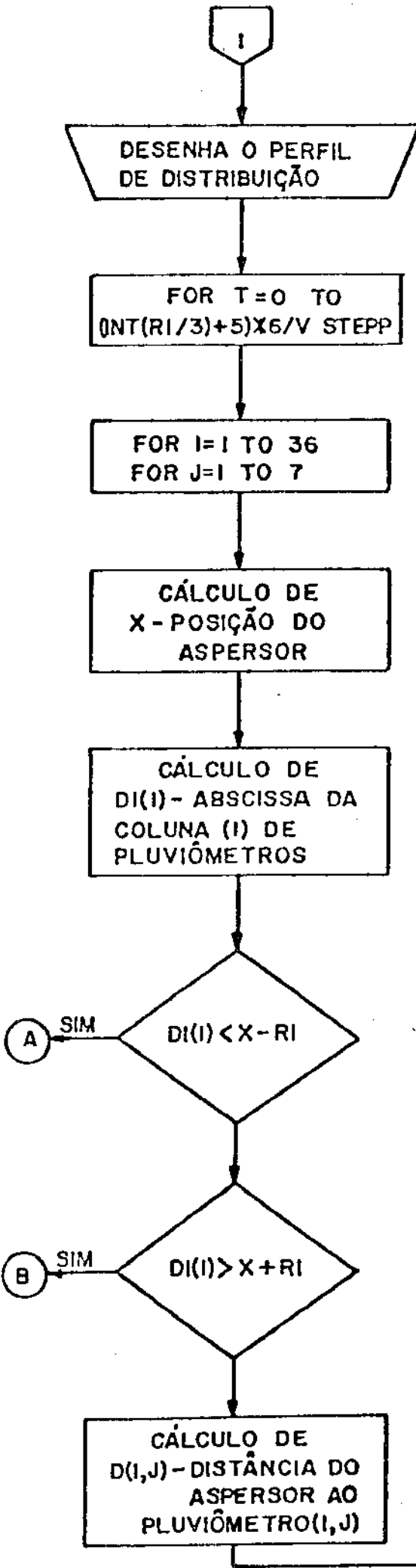
- [12] HART, W.E. Overhead irrigation pattern parameters. Agricultural Engineering 42:(7)354-5. 1961.
- [13] HEERMANN, D.F. e KOHL, R.A. Fluid dynamics of sprinkler systems. in Design and operation of farm irrigation systems. p. 581-618. ASAE 1983.
- [14] KOHL, R.S. Drop size distribution from medium-sized agricultural sprinklers. Trans. of the ASAE, 1974:690-3.
- [15] LANE, W.R. e GREEN, H.L. The mechanics of drops and bubbles. Survey in Mechanics, p. 162-215. Camb. Univ. Press. 1956.
- [16] MAGNUS. Hydraulische Untersuchungen. Pogg. Ann., vol. XCV, p. 1. 1855. apud RAYLEIGH, Dover Publications. N.Y. 1945.
- [17] PAI, S.-I. Two-phase flows. Braunschweig Vieweg. 1977.
- [18] RAYLEIGH, Lord. The theory of sound. Dover Publications. NY. 1945.
- [19] SCALOPPI, E.J. Eficiência de aplicação de água em sistemas de irrigação por aspersão. Rev. ABID, 16:37-40. 1984.
- [20] SHULL, H. e DYLLA, A.S. Wind effects on water application patterns from a large, single nozzle sprinkler. Trans. of the ASAE, 1976. p. 501-4.
- [21] SHULL, H. e DYLLA, A.S. Traveling gun sprinker application uniformity in high winds. Trans. of the ASAE, 19(2):254-8. 1976.
- [22] SOLOMON, K. Traveling sprinkler variables effecting application uniformity. ASAE paper 71-758. St Joseph. 1971.
- [23] SOO. S.L. fluid dynamic of multiphase systems. Cap. 3. Blaisdell Publ. Co., Waltham, 1967.
- [24] WILCOX, J.C. e SWAILES, G.E. Uniformity of water distribution by sole undertree orchard sprinklers. Paper 672, Dominion Dep. of Agr. Ottawa. Canada. 1947.

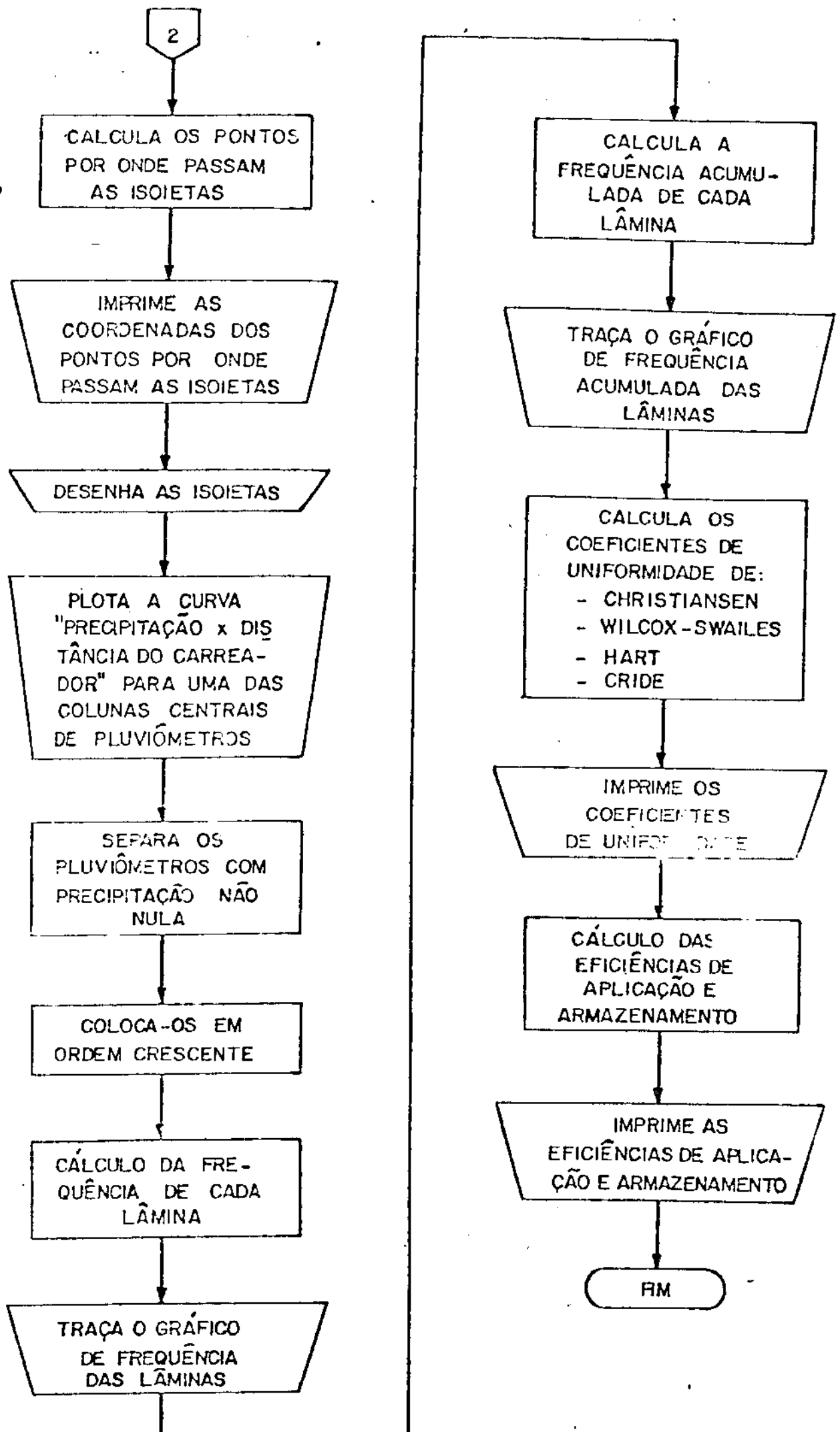
APÊNDICE A

DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO DO DESLOCAMENTO
LINEAR DE ASPERSORES ROTATIVOS DE IRRIGAÇÃO

DIAGRAMA DE BLOCOS





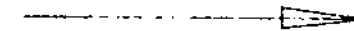
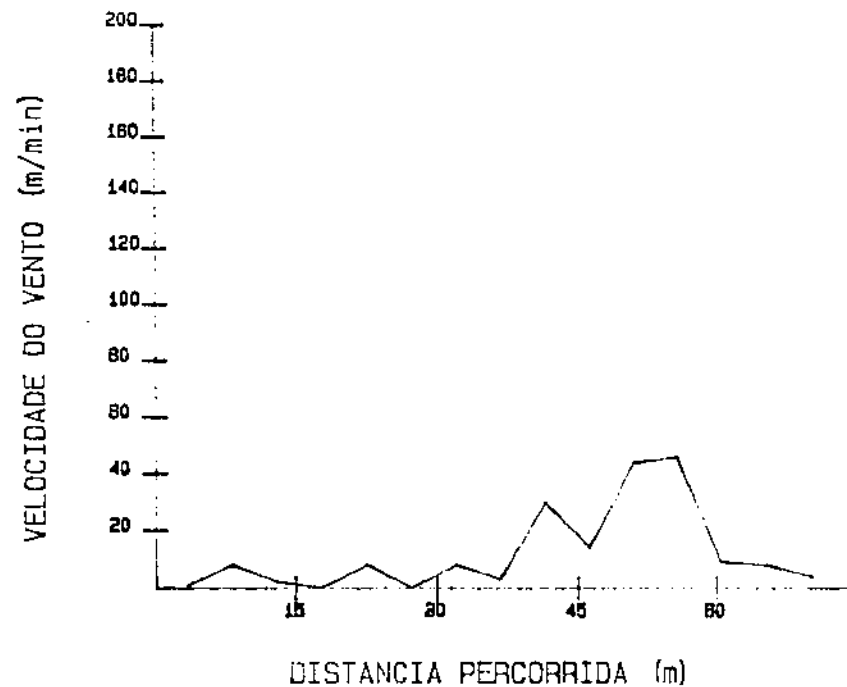


APÊNDICE B

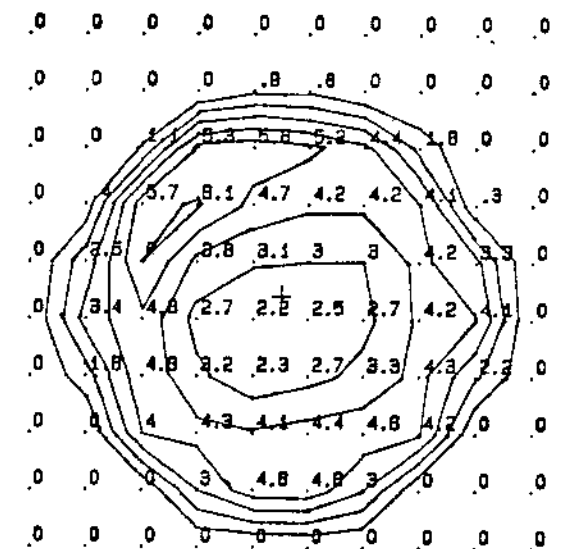
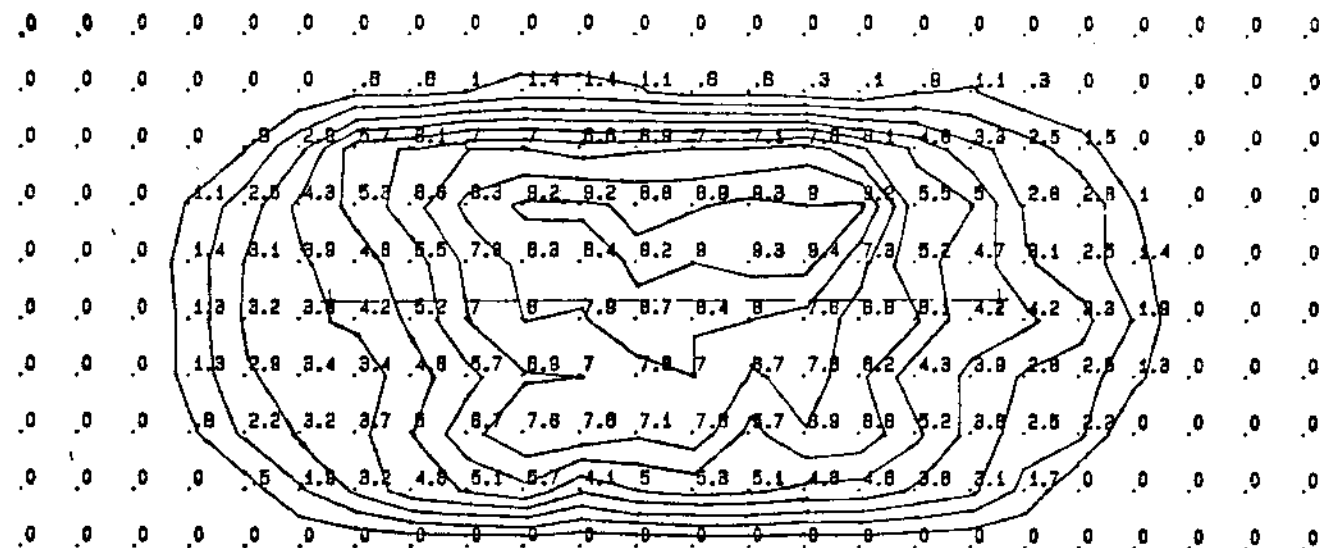
PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PELA
OPERAÇÃO SIMULTÂNEA DE DOIS ASPERORES, UM ASPERSOR ROTATIVO ES-
TACIONÁRIO E UM ASPERSOR ROTATIVO IMPELIDO DE DESLOCAMENTO LINEAR

CONDIÇÕES OPERACIONAIS EXPERIMENTADAS

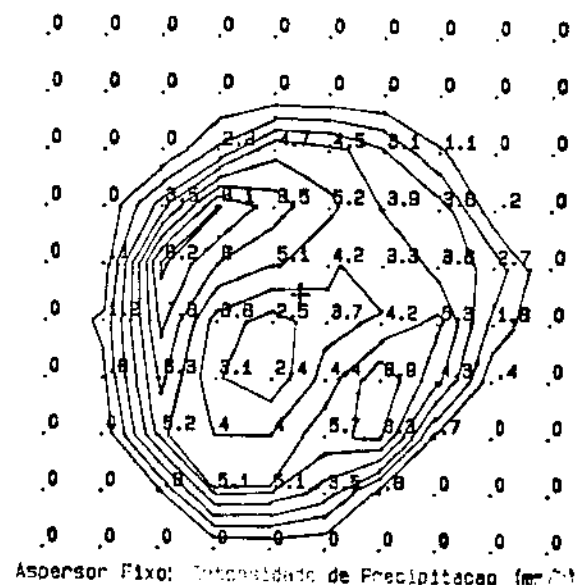
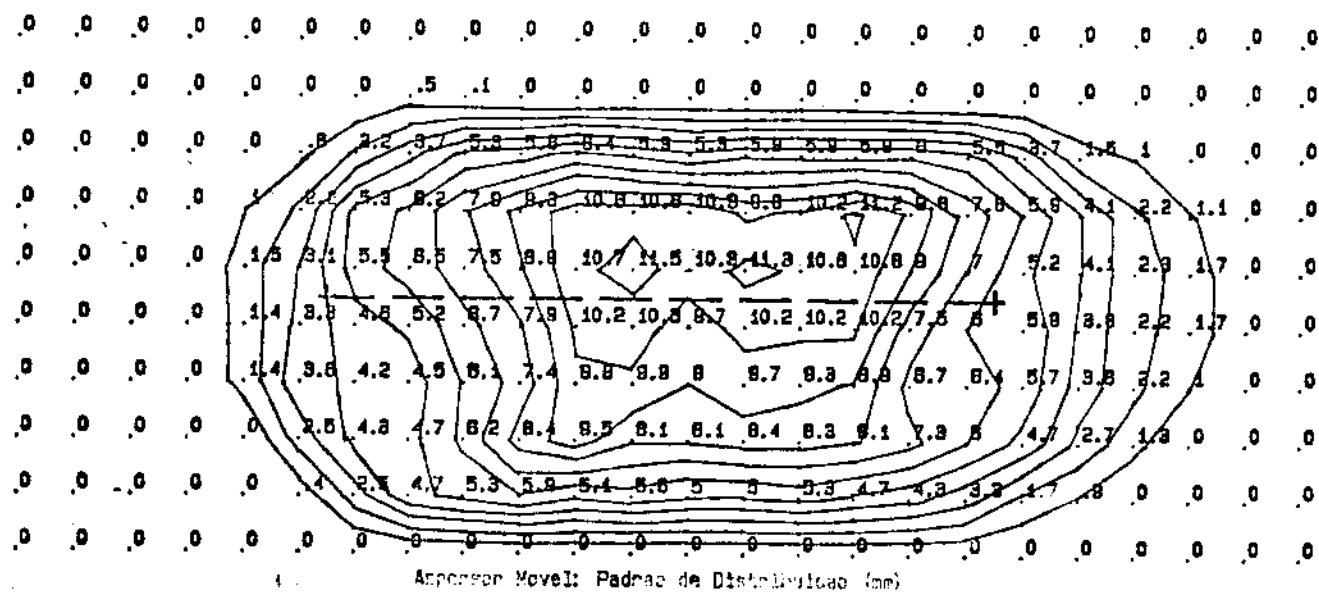
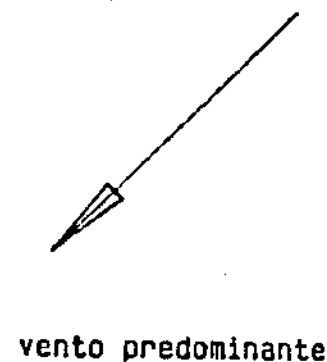
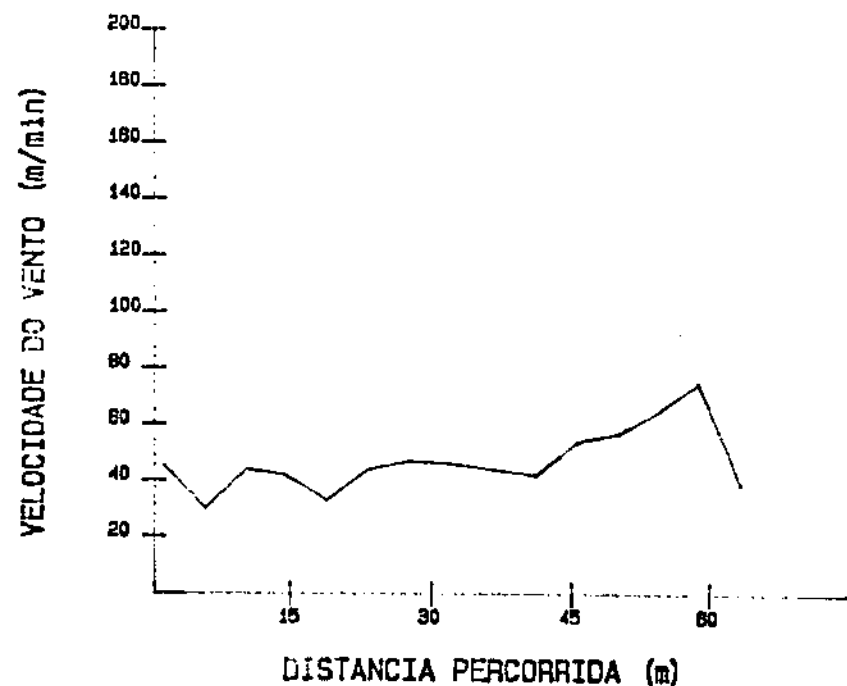
ENSAIO nº	PRESSÃO (kPa)	VELOCIDADE (.10 ⁻³ m/s)	PERÍODO DE RQ TAÇÃO (.10 ² s)
1	340	5,29	
2	340	4,94	
3	340	4,82	1,18
4	340	6,21	1,16
6	340	6,86	1,13
7	340	6,70	1,14
9	340	9,92	1,15
10	340	9,92	1,19
11	340	9,53	1,18
12	440	9,84	1,25
13	440	9,84	1,21
14	440	10,00	1,41
15	245	9,92	1,28
16	245	10,00	1,24
17	245	9,84	1,16



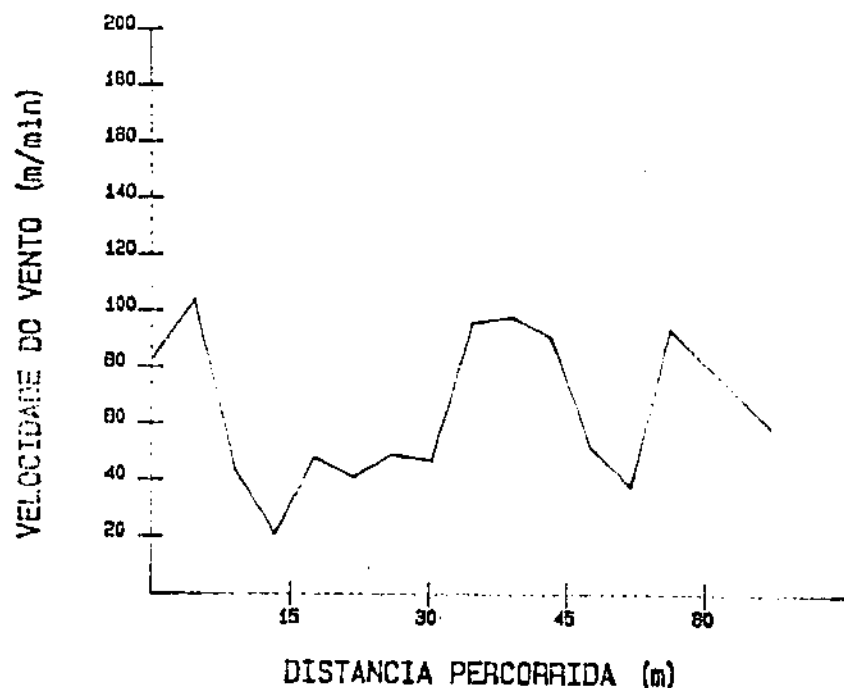
vento predominante



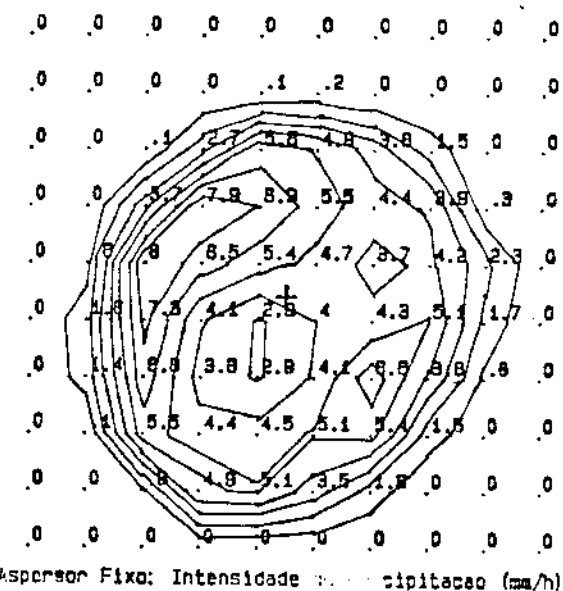
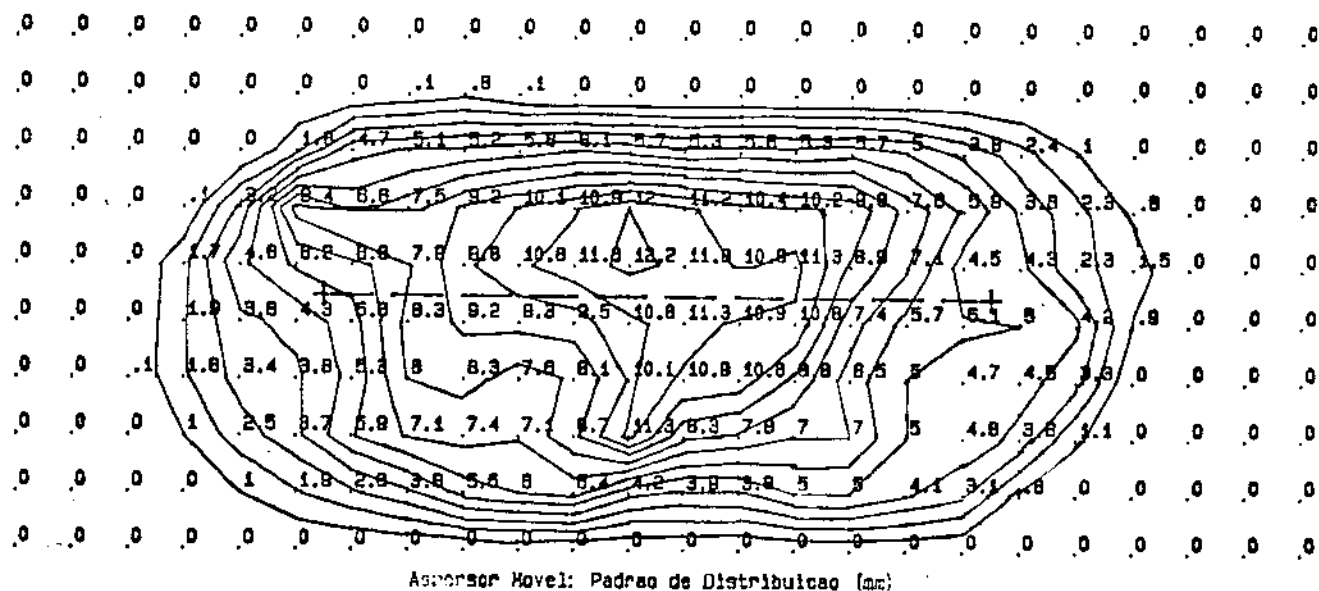
Ensaio nº 1 - Pressão de operação: 340 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $5,29 \cdot 10^{-3}$ m/s.



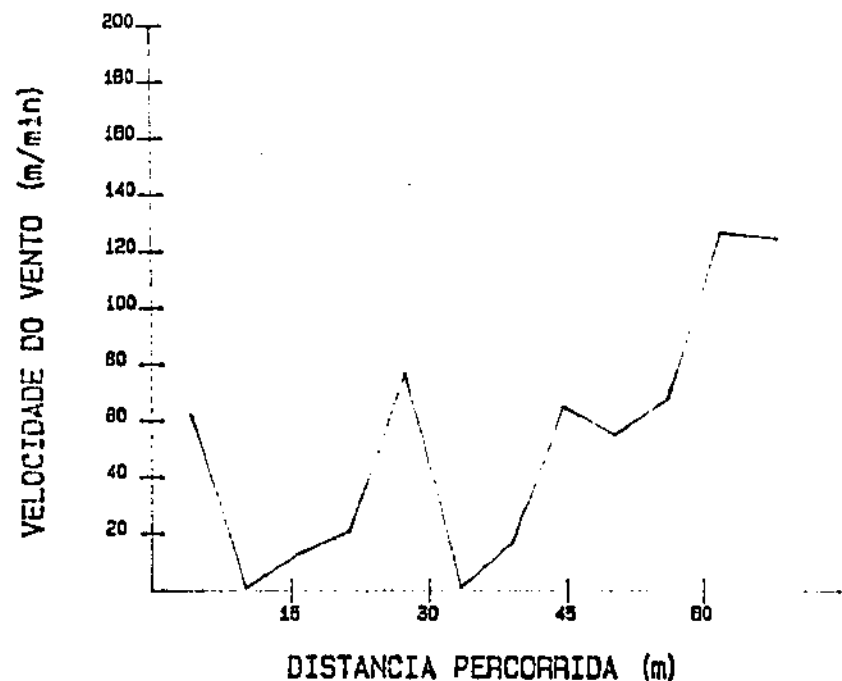
Ensaio nº 2 - Pressão de operação: 340 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $4,94 \cdot 10^{-3}$ m/s.



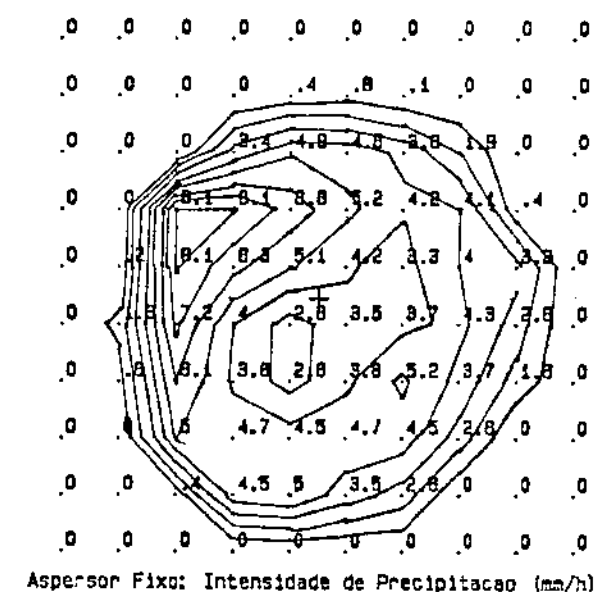
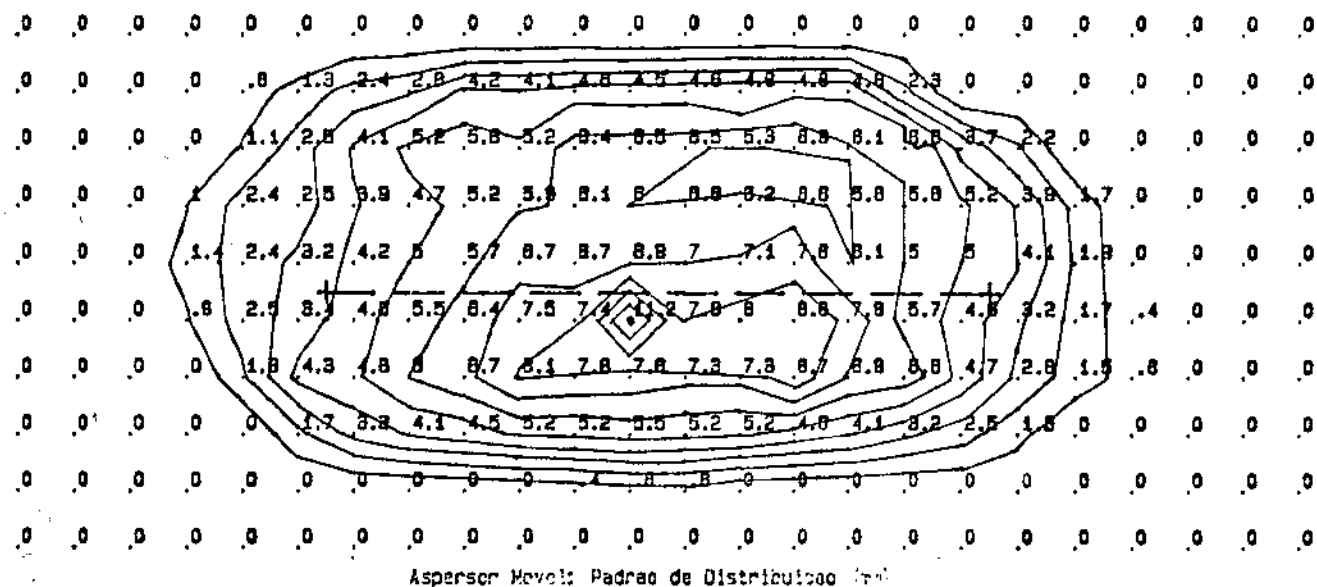
vento predominante



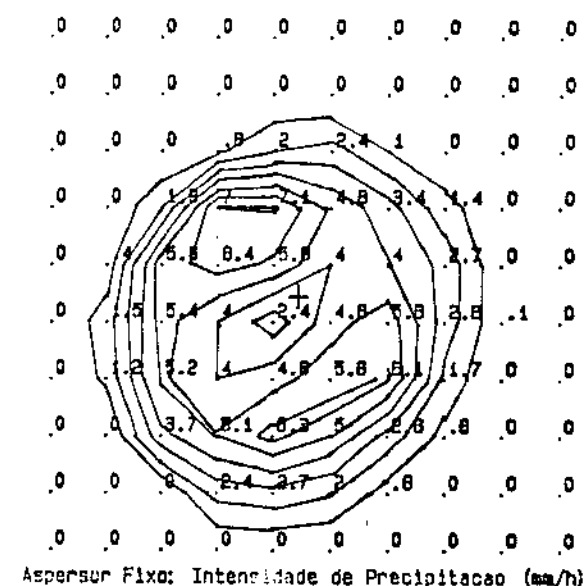
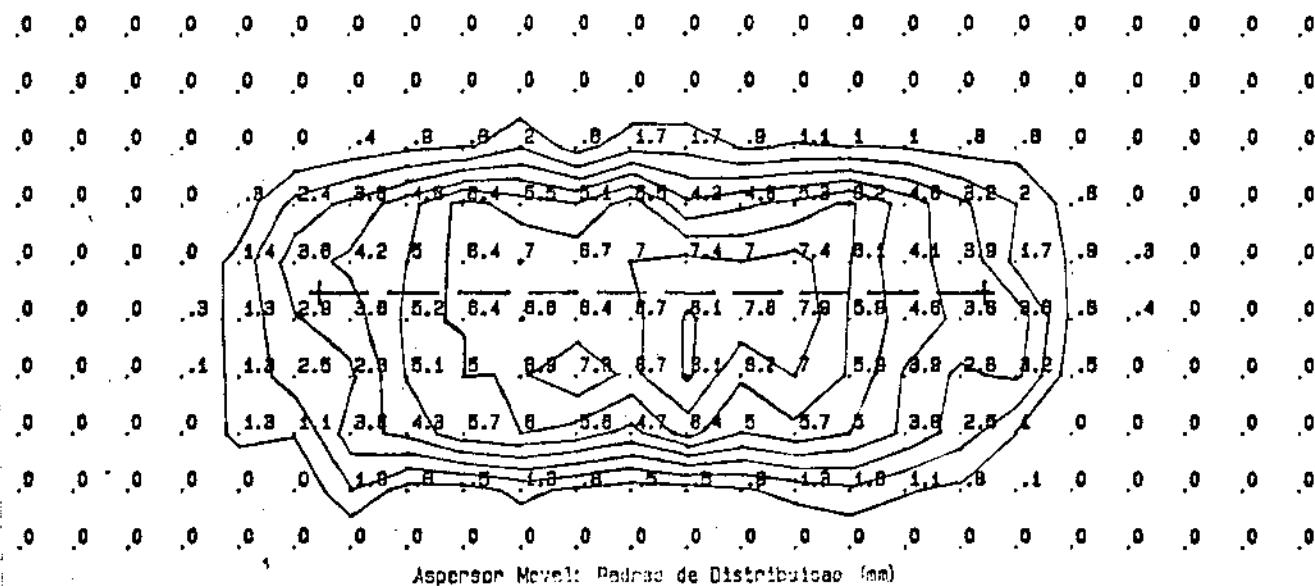
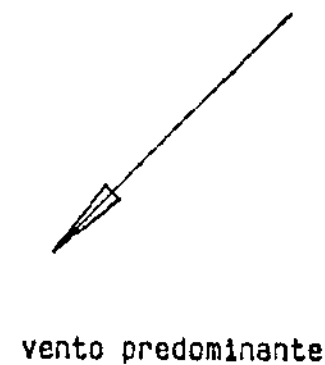
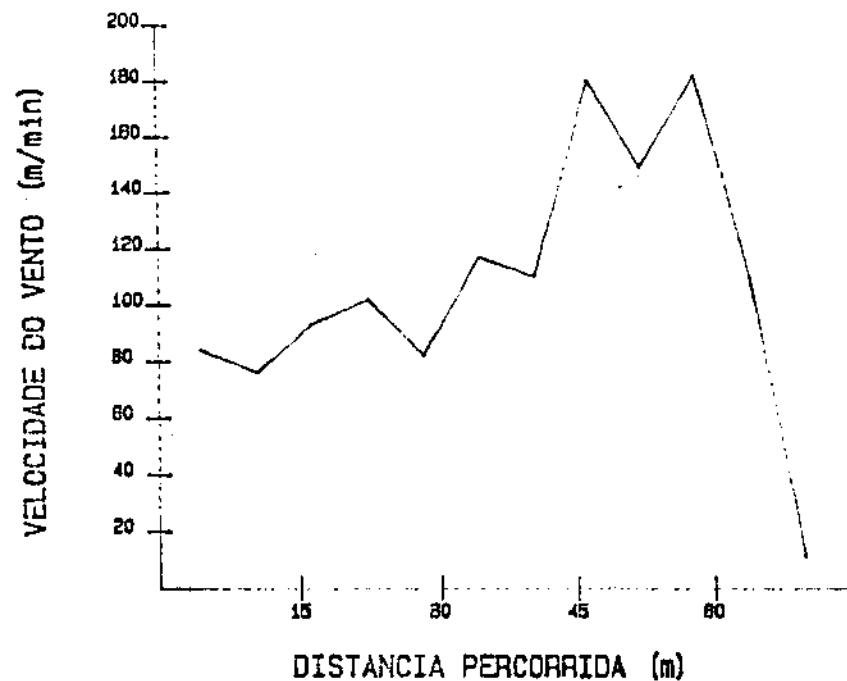
Ensaio nº 3 - Pressão de operação: 340 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $4,82 \cdot 10^{-3}$ m/s.



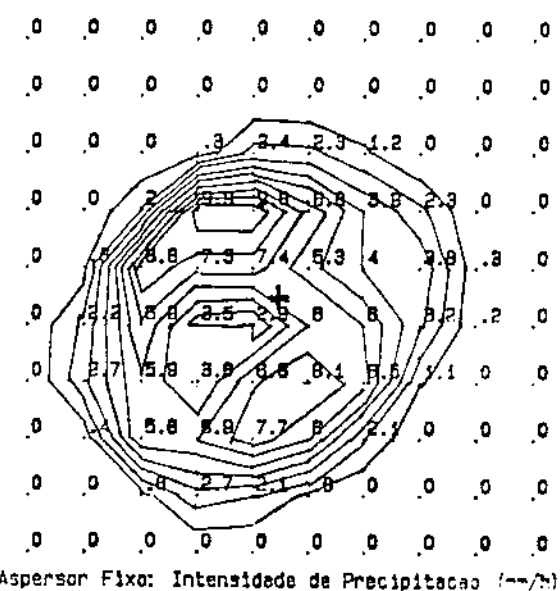
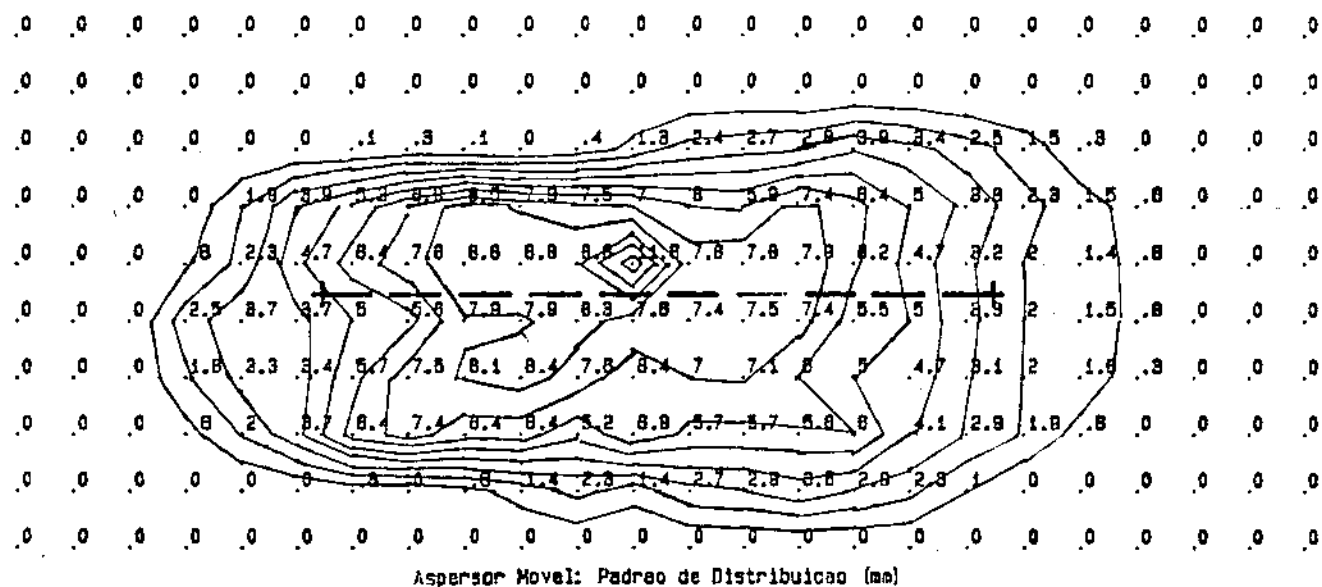
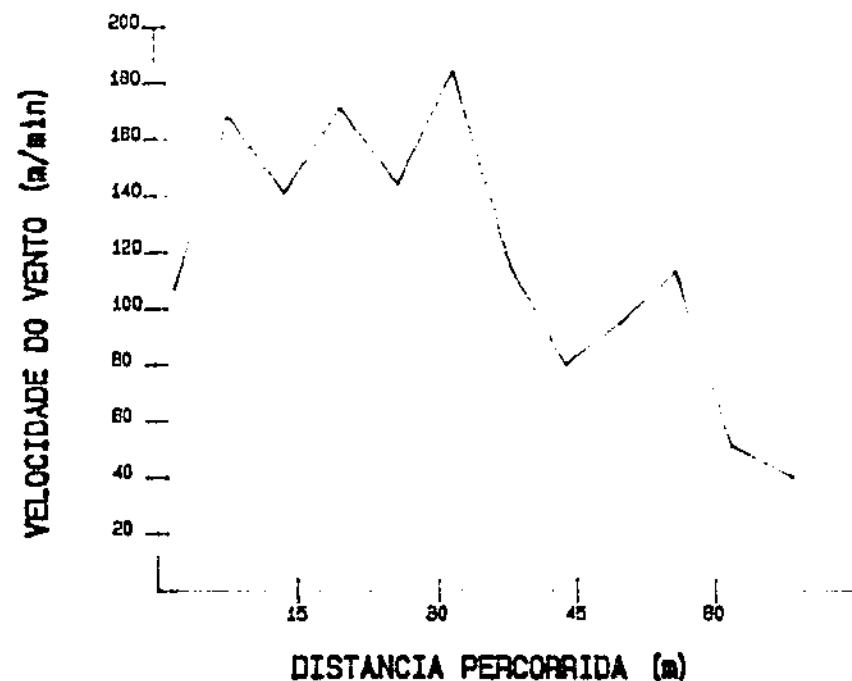
vento predominante



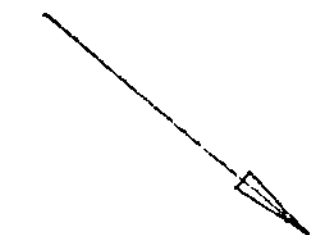
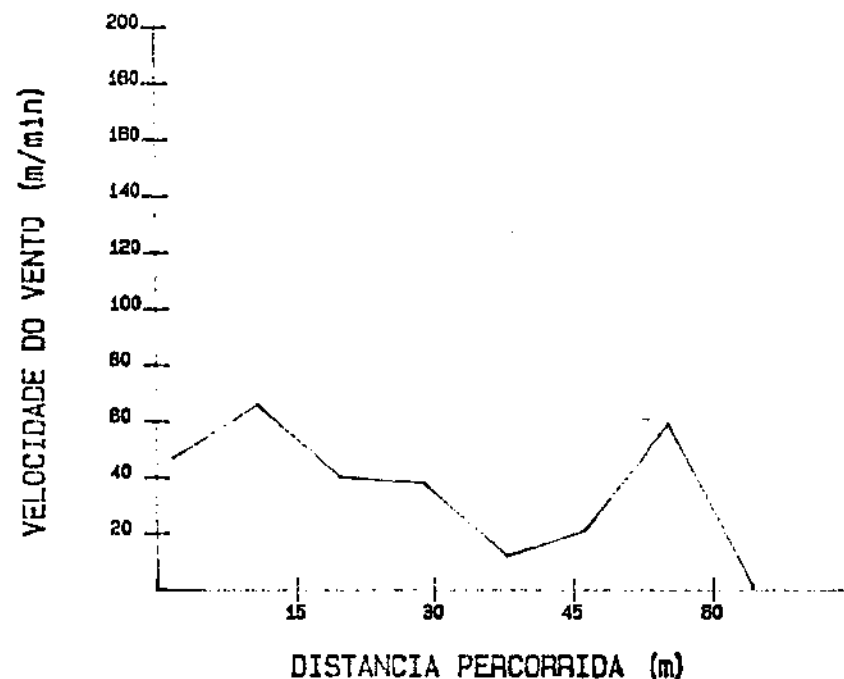
Ensaio nº 4 - Pressão de operação: 340 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $6,21 \cdot 10^{-3}$ m/s.



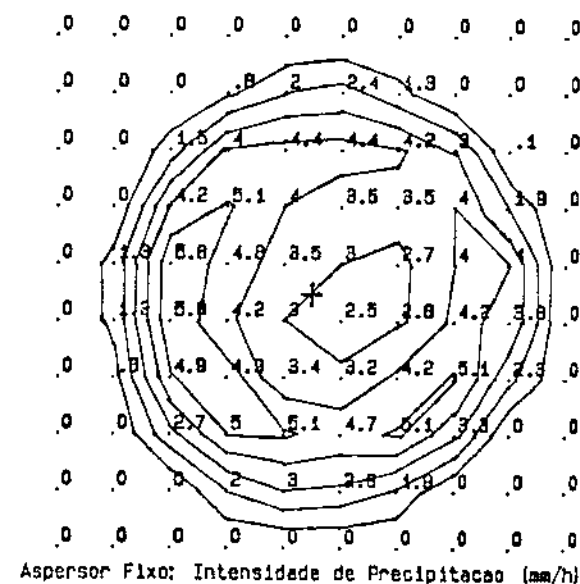
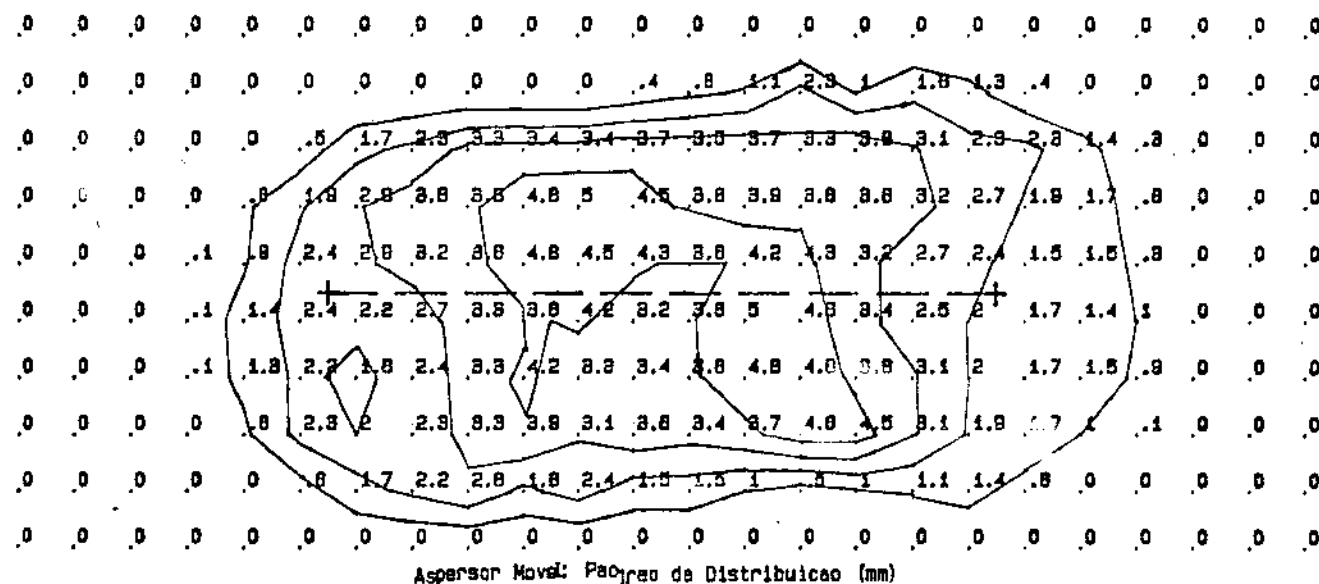
Ensaio nº 6 - Pressão de operação: 340 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $6,86 \cdot 10^{-3}$ m/s.



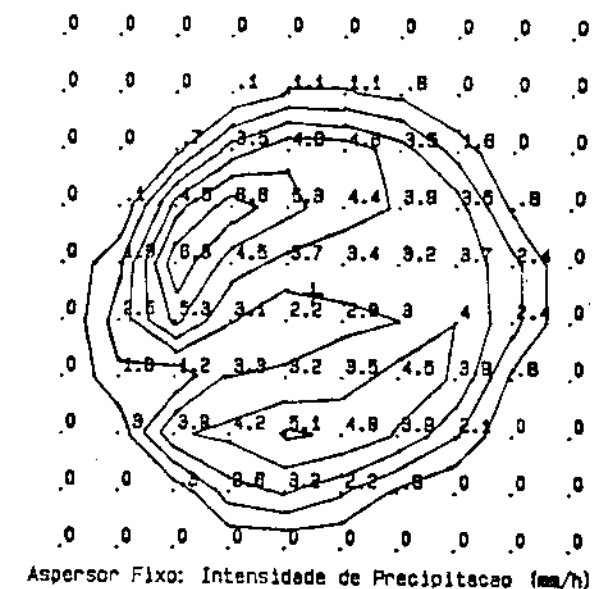
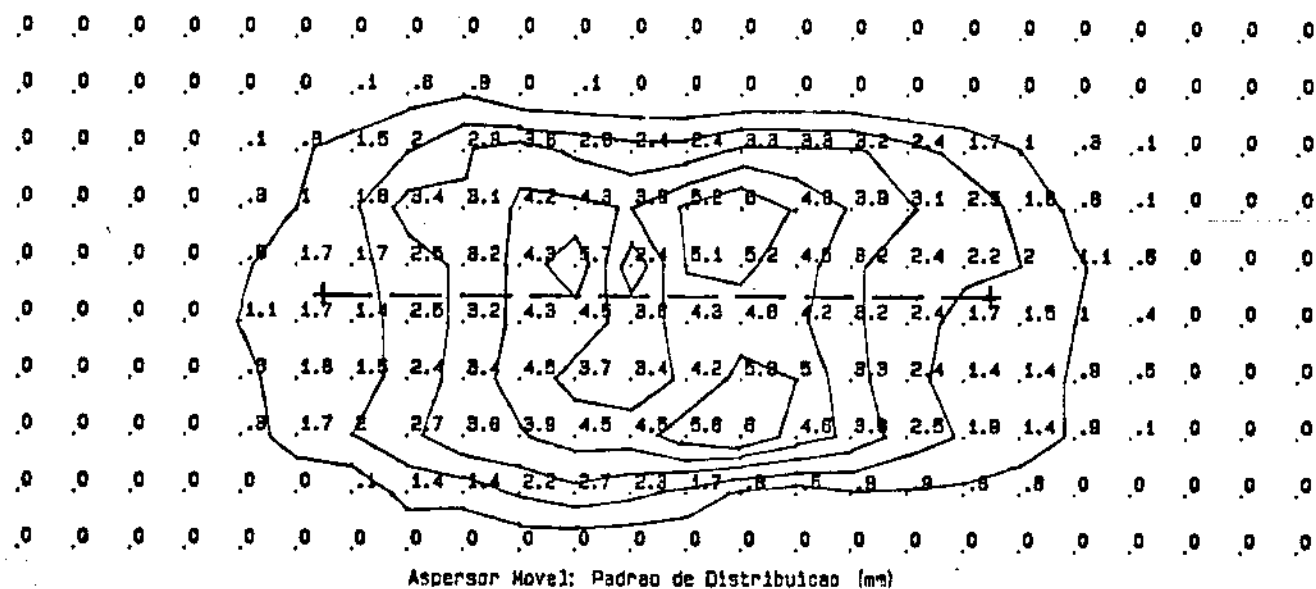
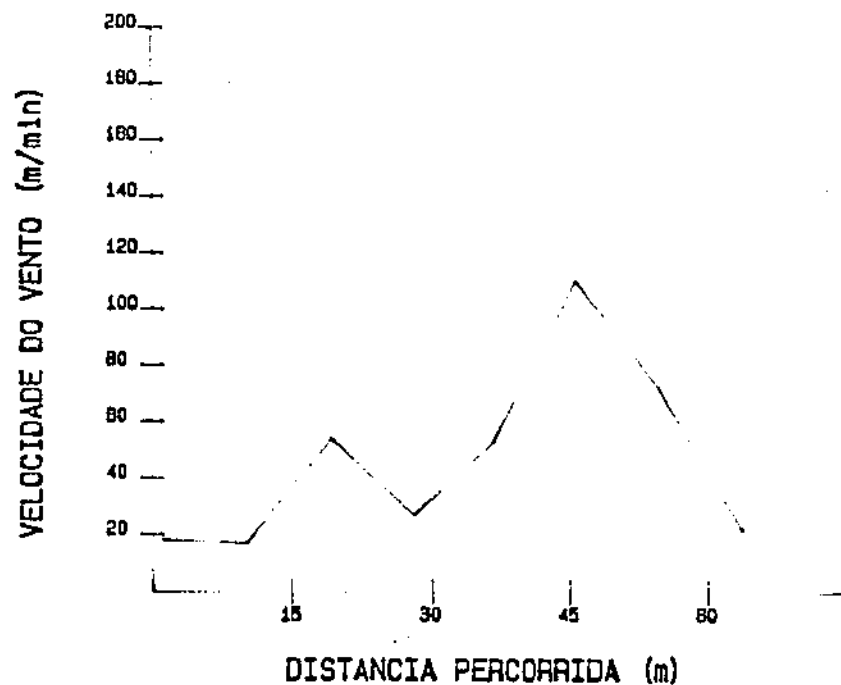
Ensaio nº 7 - Pressão de operação: 340 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $6,70 \cdot 10^{-3}$ m/s.



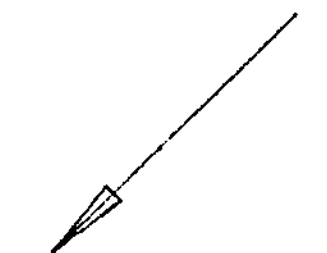
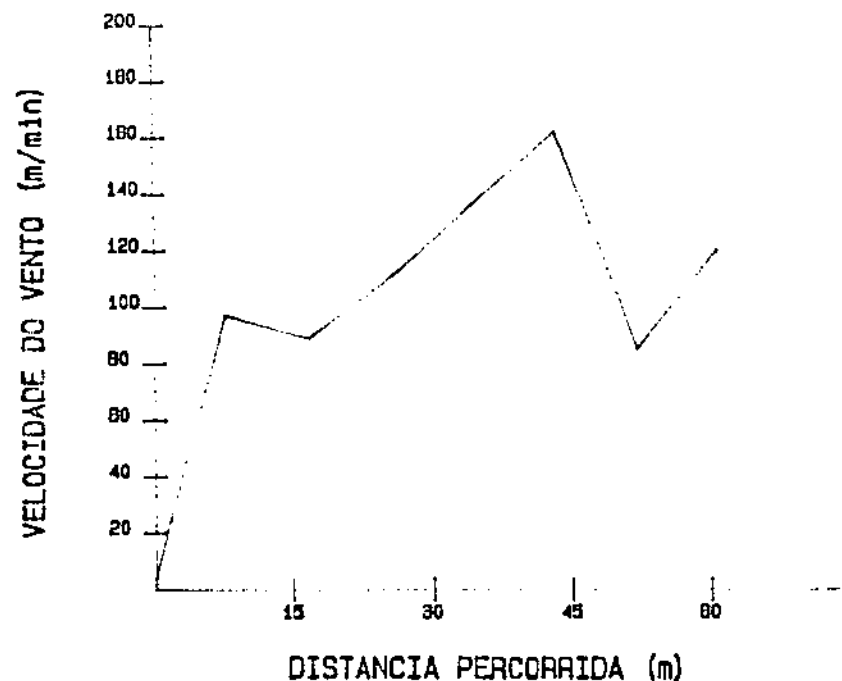
vento predominante



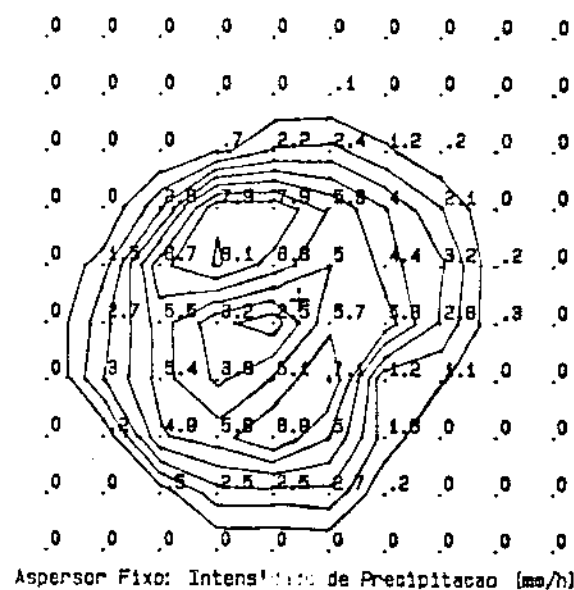
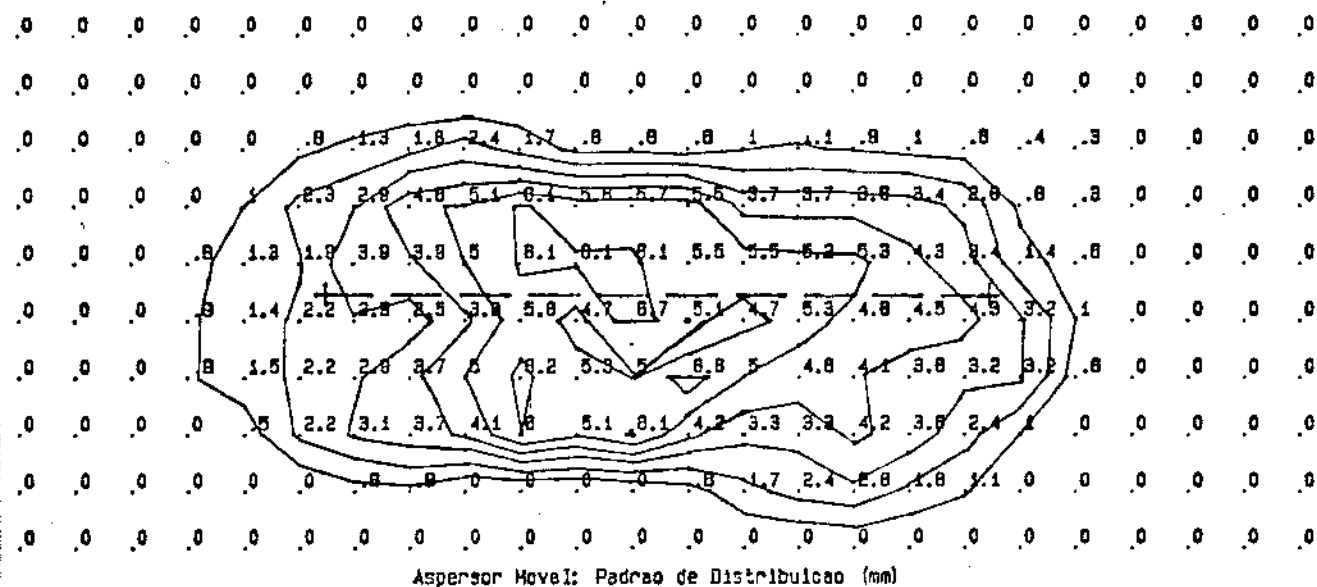
Ensaio nº 9 - Pressão de operação: 340 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $9,92 \cdot 10^{-3}$ m/s.



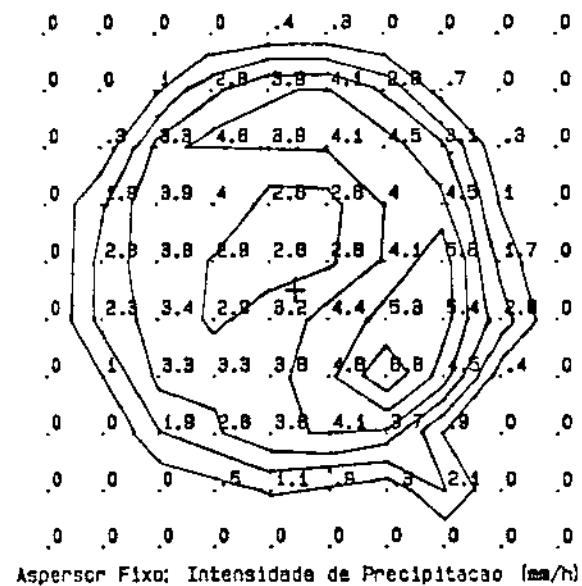
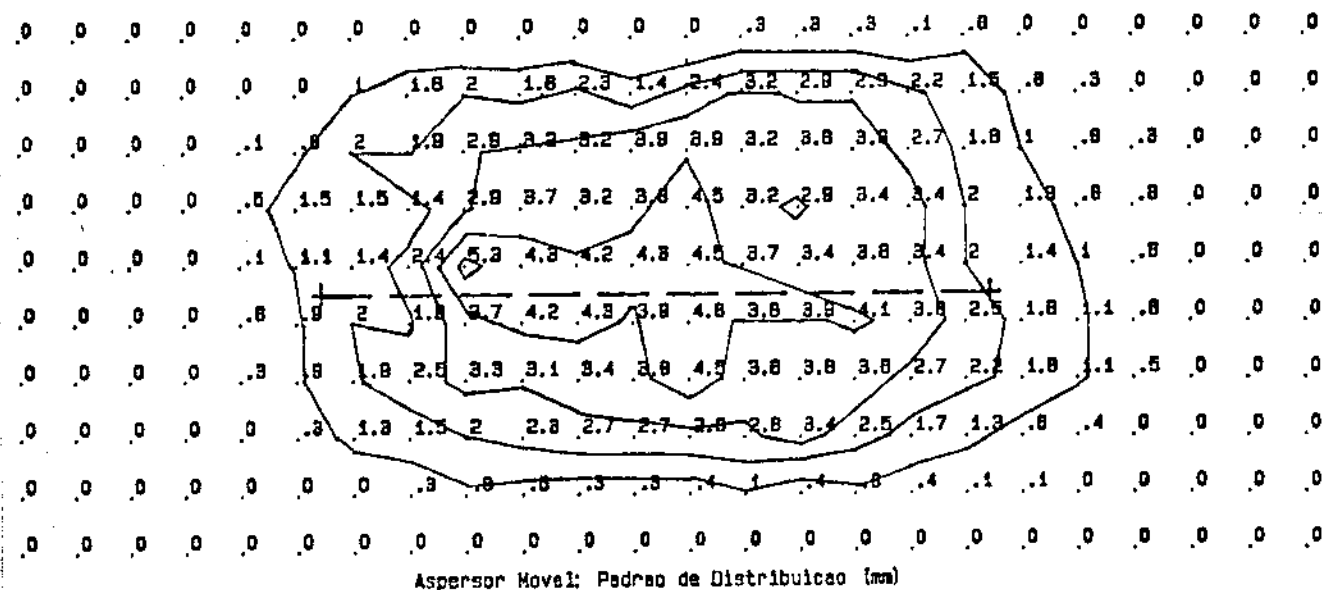
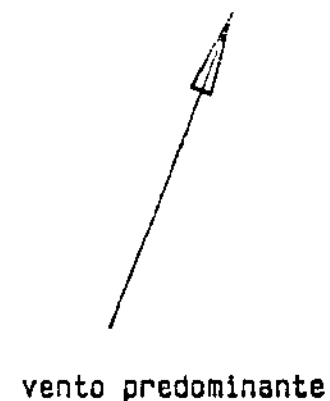
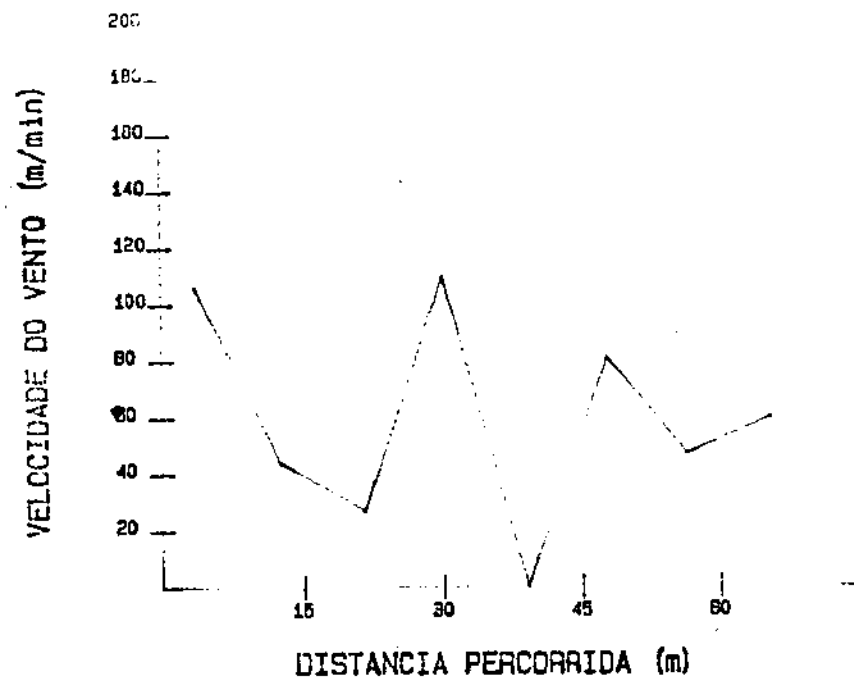
Ensaio nº 10 - Pressão de operação: 340 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $9,92 \cdot 10^{-3}$ m/s.



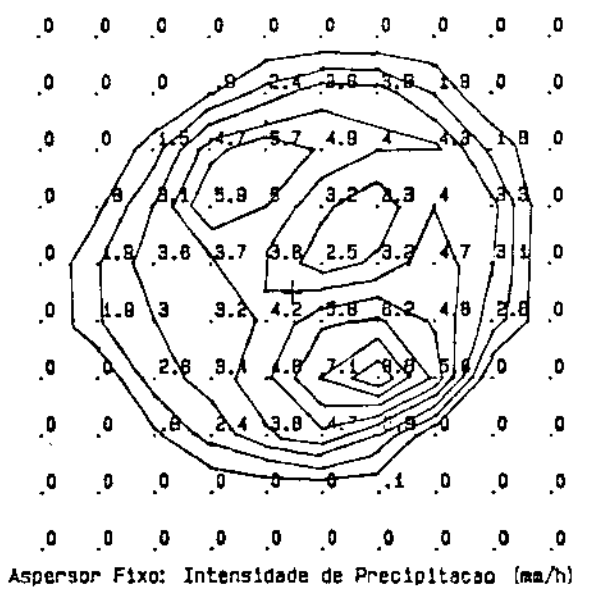
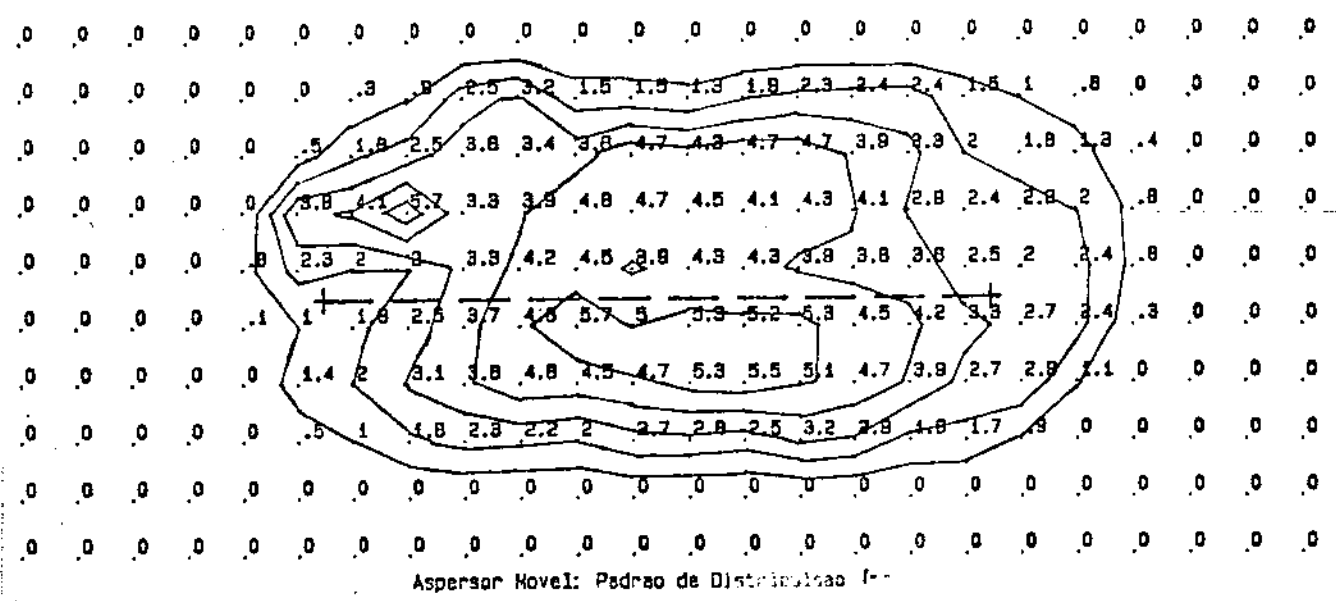
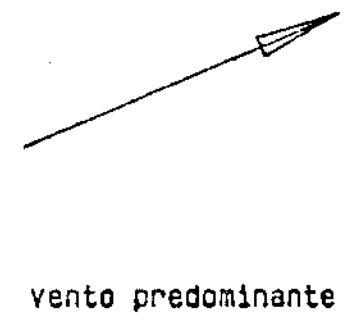
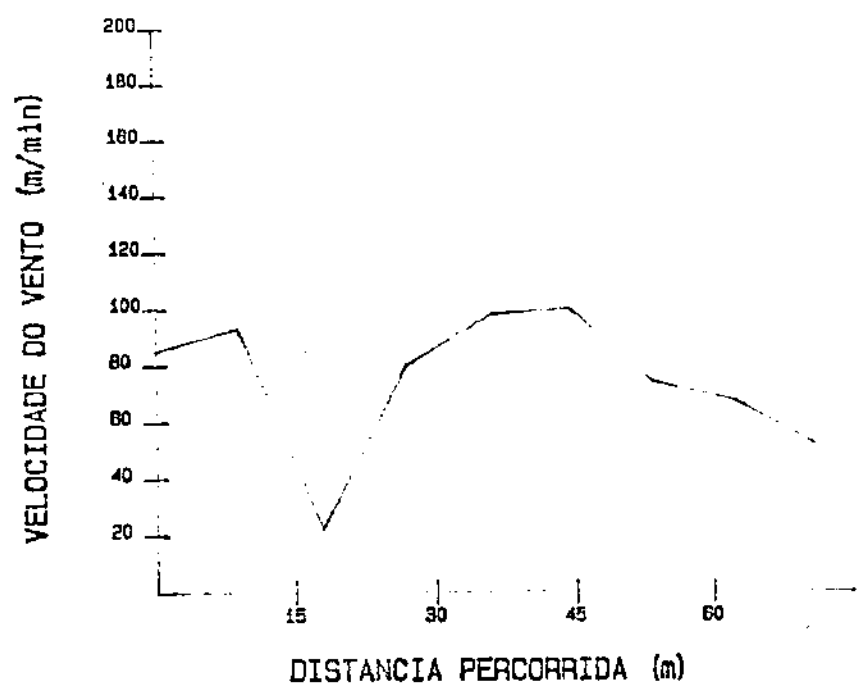
vento predominante



Ensaio nº 11 - Pressão de operação: 340 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $9,53 \cdot 10^{-3}$ m/s.



Ensaio nº 12 - Pressão de operação: 440 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $9,84 \cdot 10^{-3}$ m/s.

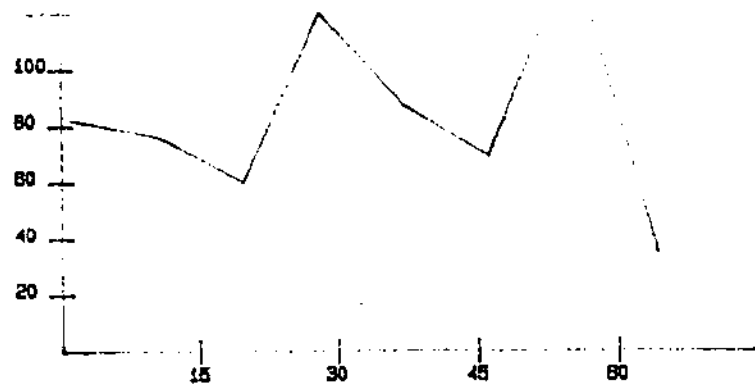


Ensaio nº 13 - Pressão de operação: 440 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $9,84 \cdot 10^{-3}$ m/s.

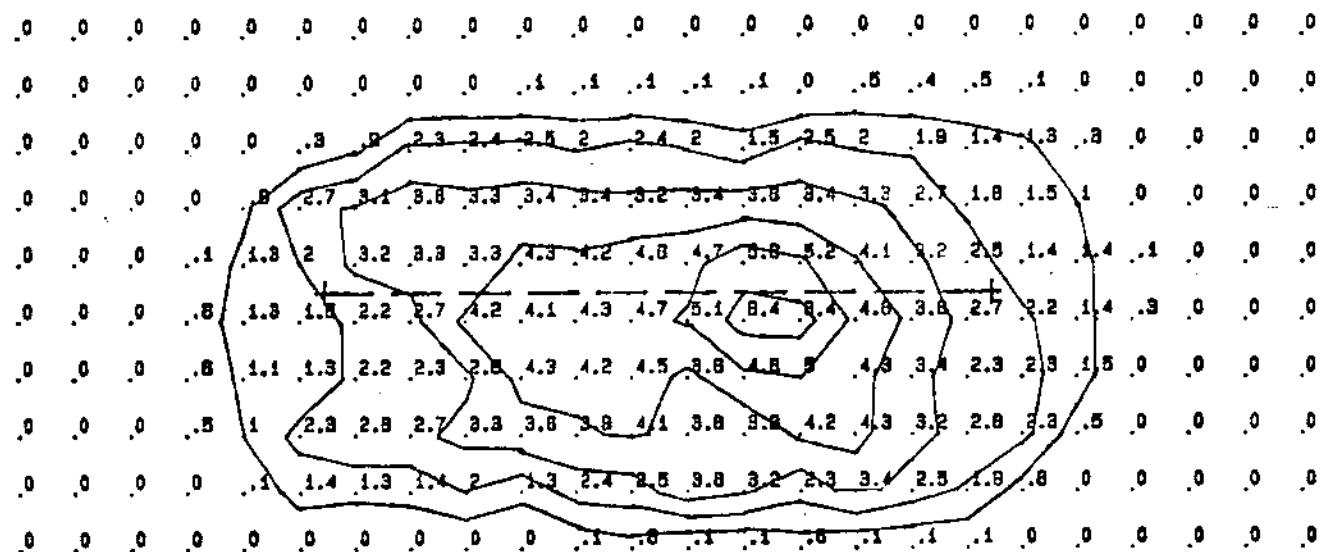
VELOCIDADE DO VENTO (m/min)

100
80
60
40
20

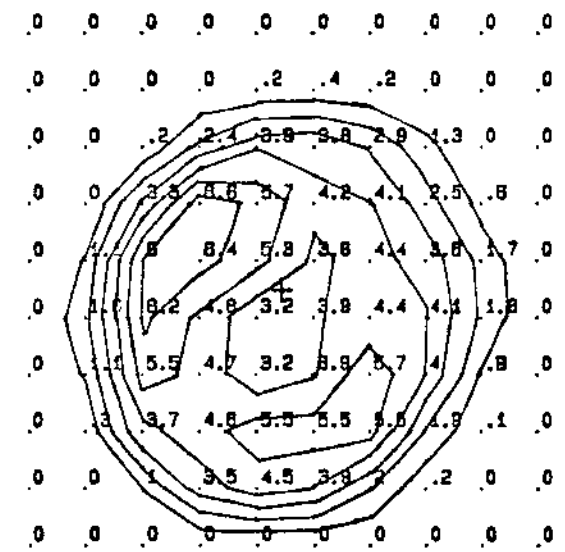
DISTANCIA PERCORRIDA (m)



vento predominante

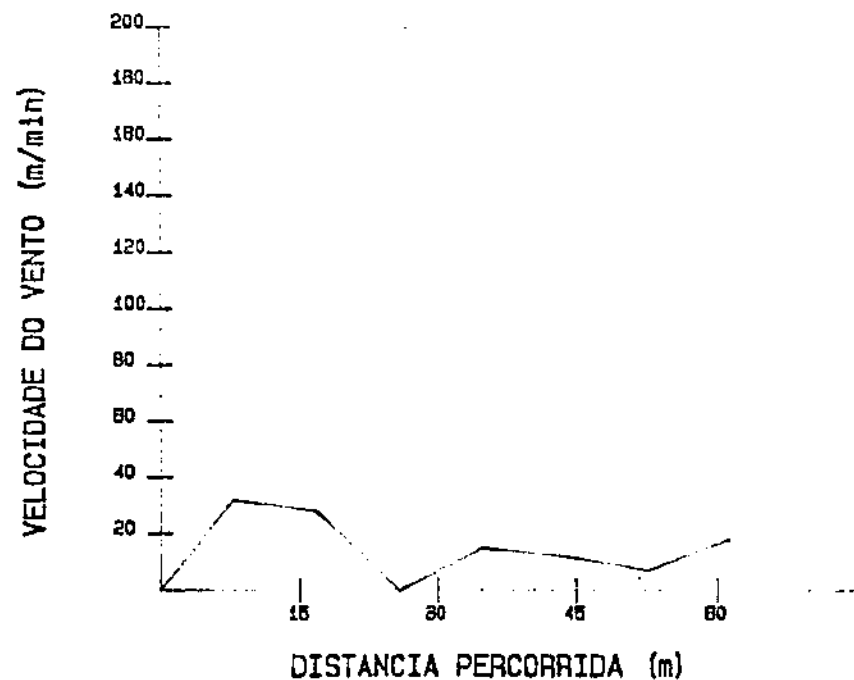


Aspersor Móvel: Padrão de Distribuição (mm)

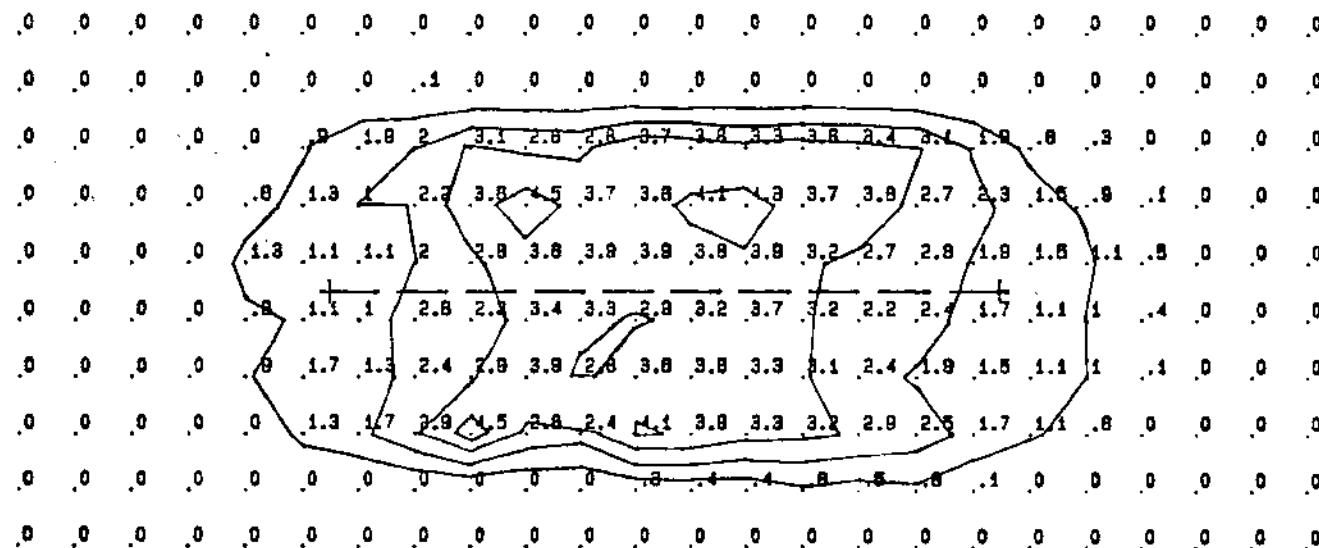


Aspersor Fixo: Intensidade de Precipitação (mm/h)

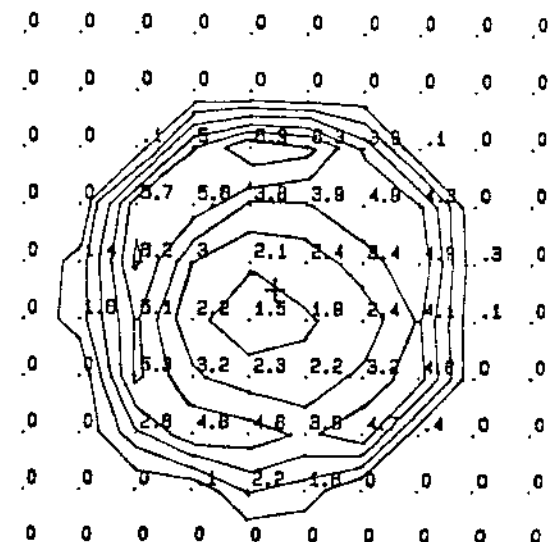
Ensaio nº 14 - Pressão de operação: 440 kPa. Velocidade do aspersor móvel: 10^{-2} m/s.



vento predominante

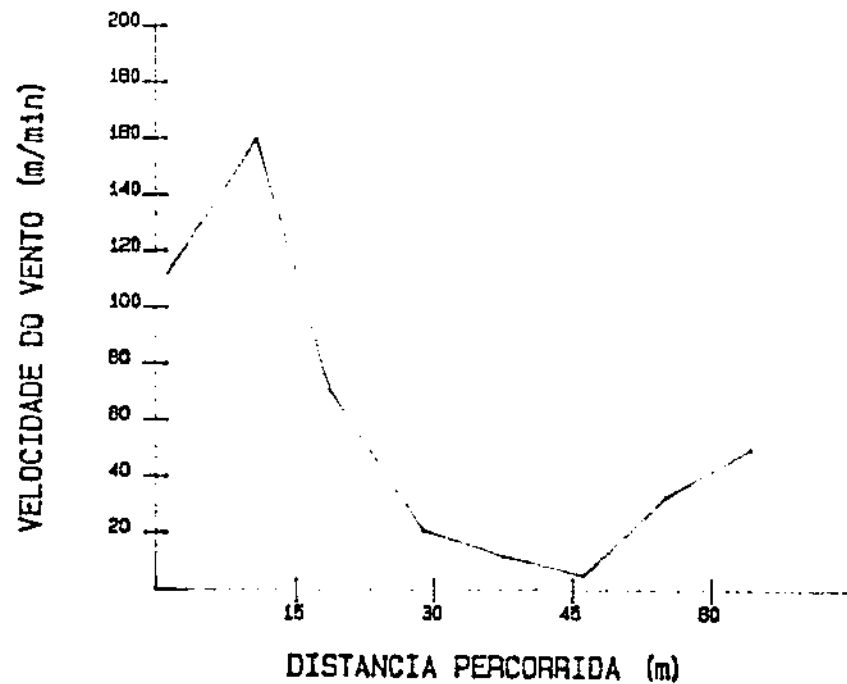


Aspersor Móvel: Padrão de Distribuição (mm)

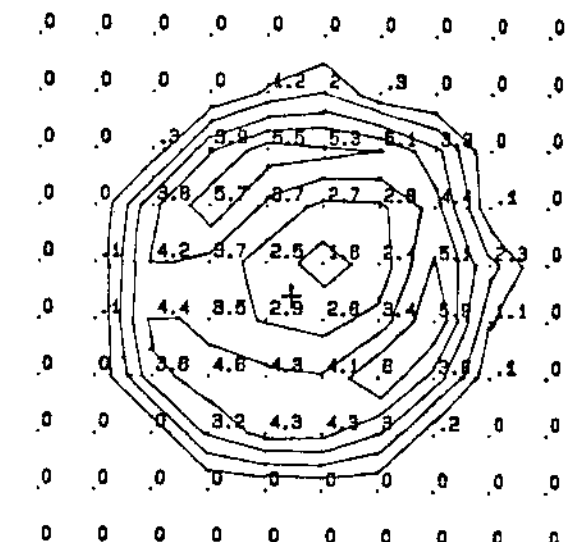
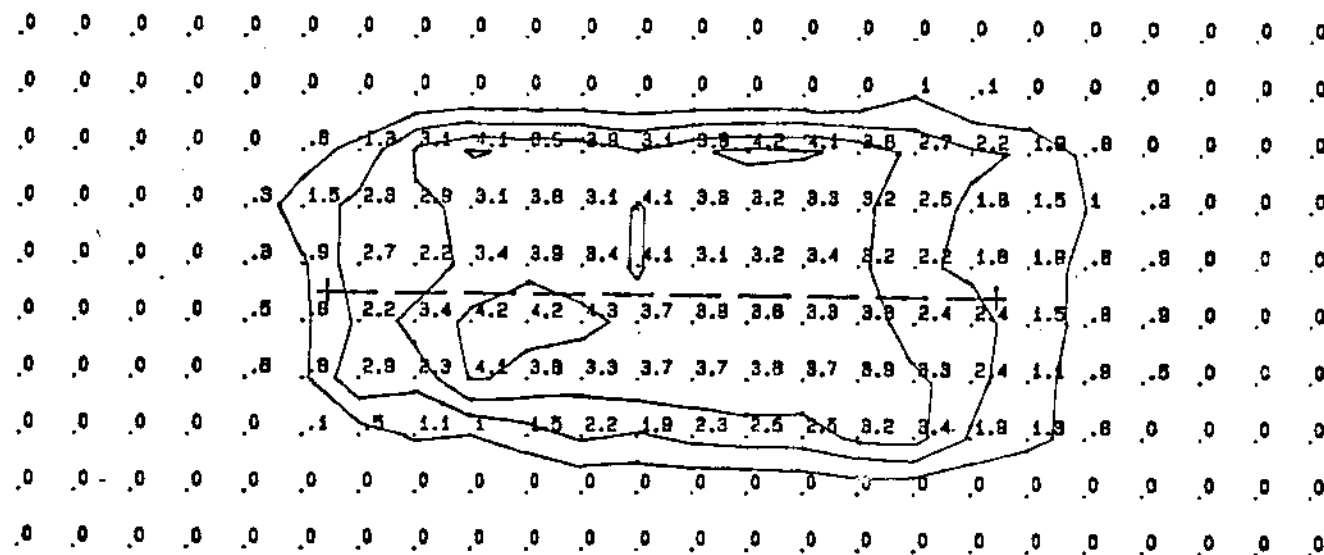


Aspersor Fixo: Intensidade de Precipitação (mm/h)

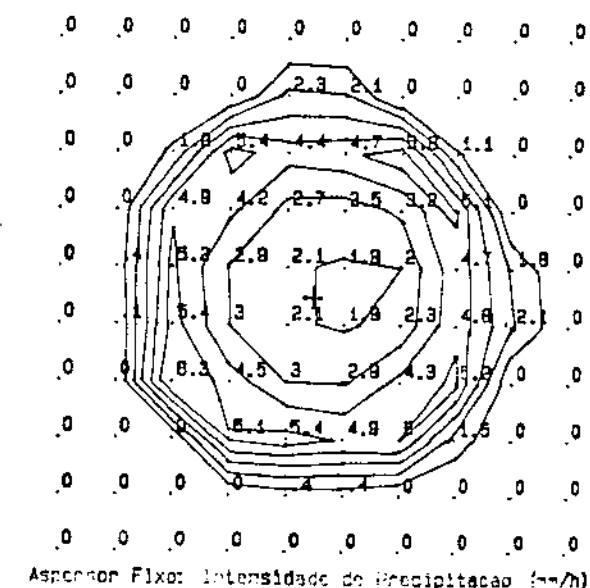
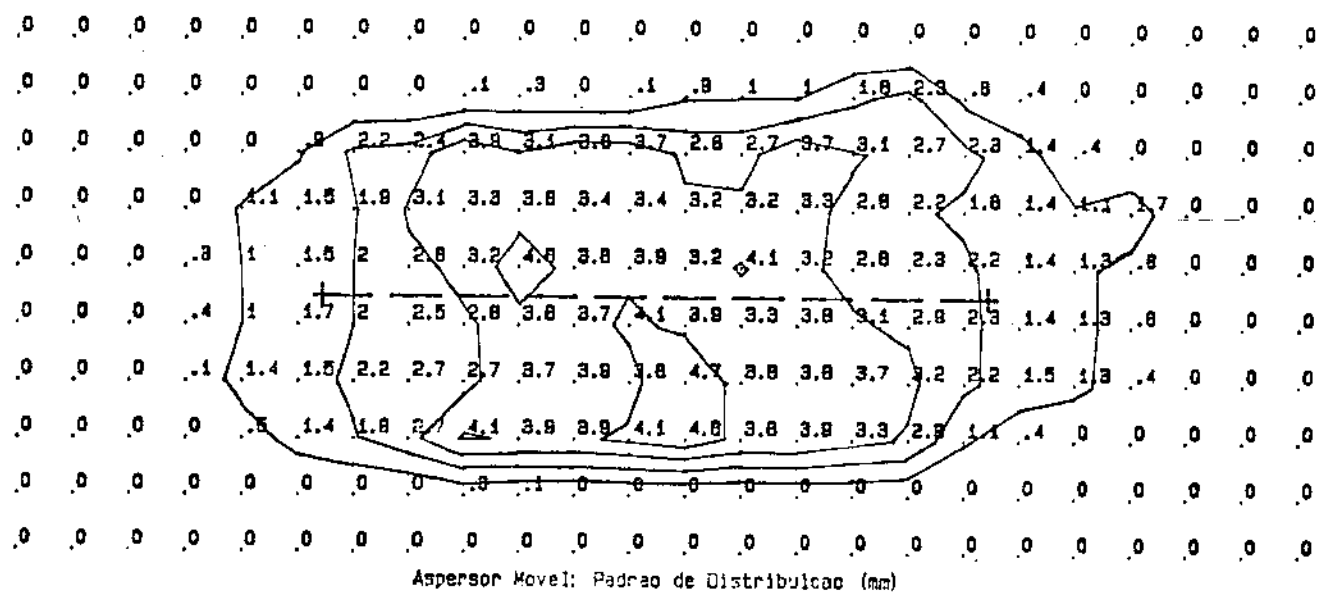
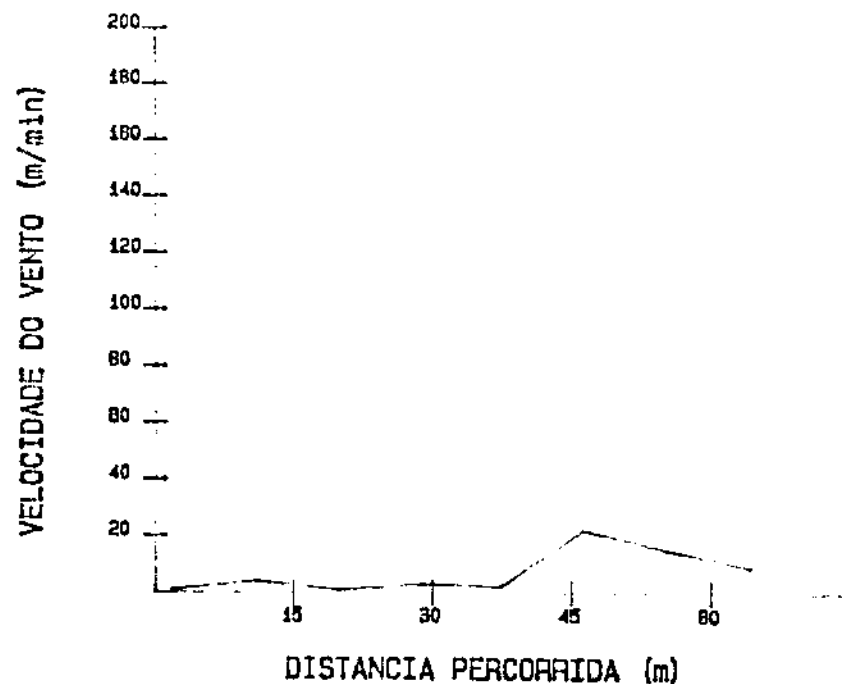
Ensaio nº 15 - Pressão de operação: 245 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $9,92 \cdot 10^{-3}$ m/s.



vento predominante



Ensaio nº 16 - Pressão de operação: 245 kPa. Velocidade do aspersor móvel: 10^{-2} m/s.



Ensaio nº 17 - Pressão de operação: 245 kPa. Velocidade do aspersor móvel: $9,84 \cdot 10^{-3}$ m/s.

APÊNDICE C

PERFIS ADIMENSIONAIS DE DISTRIBUIÇÃO OBTIDOS PELA OPERAÇÃO DE ASPERSORES ROTATIVOS DE IRRIGAÇÃO PROVIDOS DE BOCAIS COAXIAIS

APÊNDICE C.1 - VARIAÇÃO DA PROPORÇÃO ENTRE AS ÁREAS DE SAÍDA DOS
JATOS EXTERNO E INTERNO

BOCAIS ENSAIADOS

Nº do bocal	α (graus)	γ (graus)	A_e/A_i
C-10	0	0	0,5
C-04	0	0	0,6
C-06	0	0	0,7
C-05	0	0	0,8
C-08	0	0	1,0
C-09	0	0	1,1
C-07	0	0	1,2
C-02	0	0	1,3
C-03	0	0	1,4
C-01	0	0	1,5
C-0910	10	0	0,6
C-1010	10	0	0,7
C-0810	10	0	0,8
C-0410	10	0	0,9
C-0110	10	0	1,0
C-0610	10	0	1,1
C-0210	10	0	1,2
C-0510	10	0	1,3
C-0710	10	0	1,4
C-0310	10	0	1,5

ENSAIO No.: C-10B

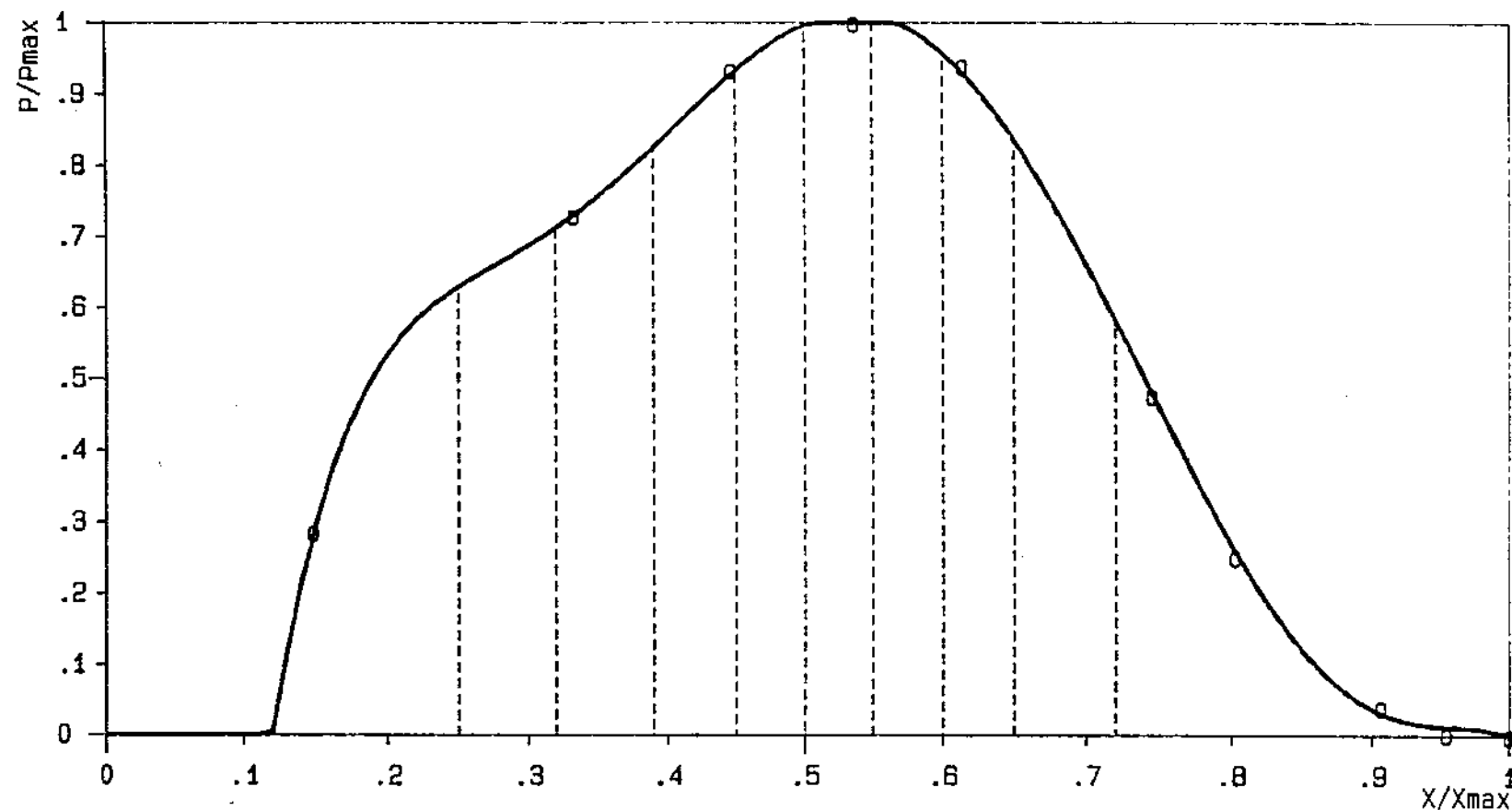
Ae/Ai: .5

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -3.67534530243$
 $+ (57.6342089116 * x ^ 1) + (-308.030784392 * x ^ 2)$
 $+ (807.42637468 * x ^ 3) + (-987.350982214 * x ^ 4)$
 $+ (322.219542463 * x ^ 5) + (382.819104508 * x ^ 6)$
 $+ (-345.081838984 * x ^ 7) + (74.0373589688 * x ^ 8)$

Aproximacao Polinomial do 8o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



Perfil de distribuicao adimensional

decil	abscissa
1	.25
2	.32
3	.39
4	.45
5	.50
6	.55
7	.60
8	.65
9	.72
10	1.00

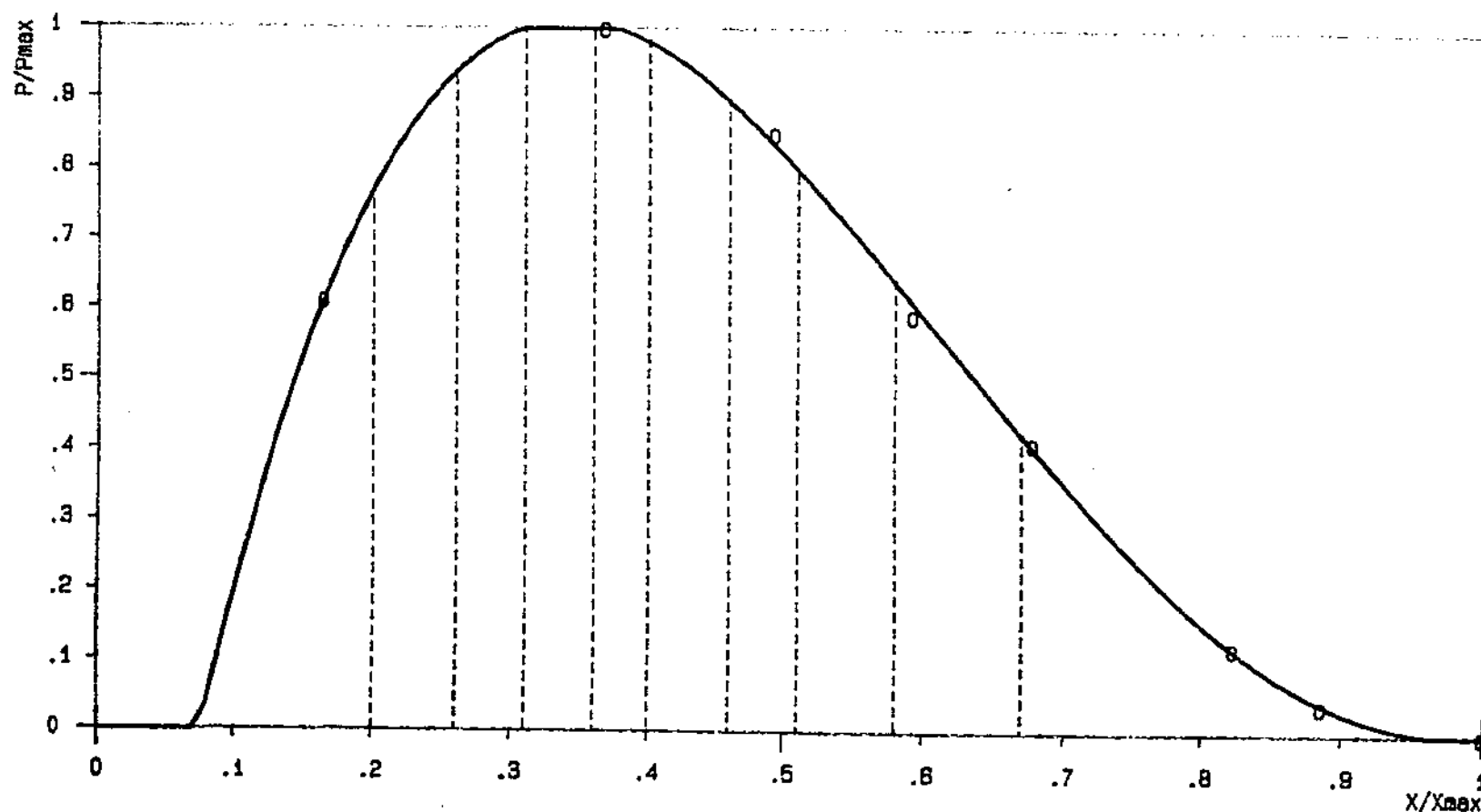
ENSAIO No.: C-04B

Ae/Ai: .6

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -.825046853256$
 $+ (13.0026419474 * x ^ 1) + (-29.599591079 * x ^ 2)$
 $+ (23.3083546225 * x ^ 3) + (-5.88655177904 * x ^ 4)$



decil	abscissa
1	.20
2	.26
3	.31
4	.36
5	.40
6	.46
7	.51
8	.58
9	.67
10	.97

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-06B

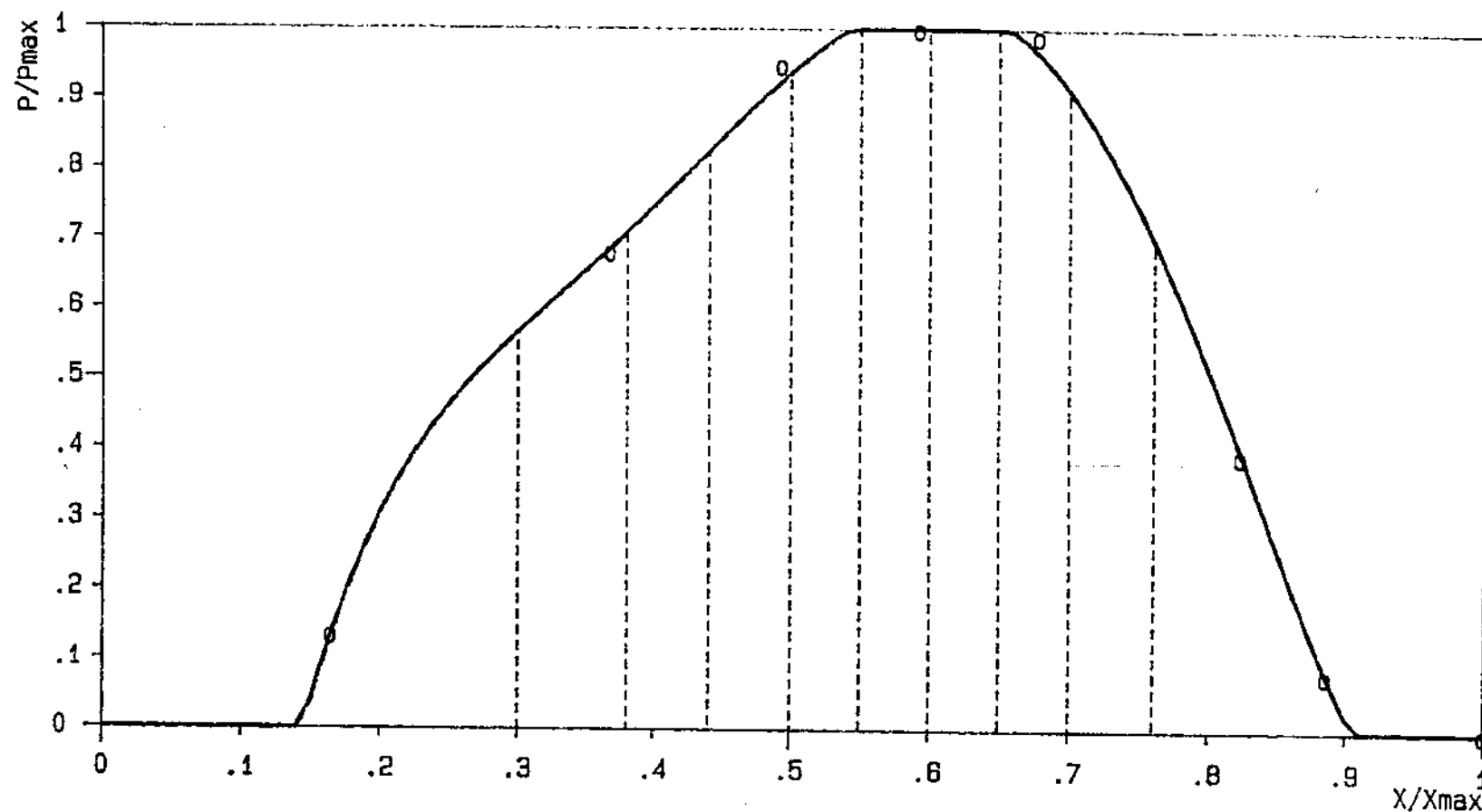
Ae/Ai: .7

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -2.51379484384$
 $+ (31.8415680196 * x ^ 1) + (-137.070912081 * x ^ 2)$
 $+ (298.563719433 * x ^ 3) + (-305.909207332 * x ^ 4)$
 $+ (115.088169869 * x ^ 5)$

Aproximacao Polinomial do 5o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.30
2	.38
3	.44
4	.50
5	.55
6	.60
7	.65
8	.70
9	.76
10	.91

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-05

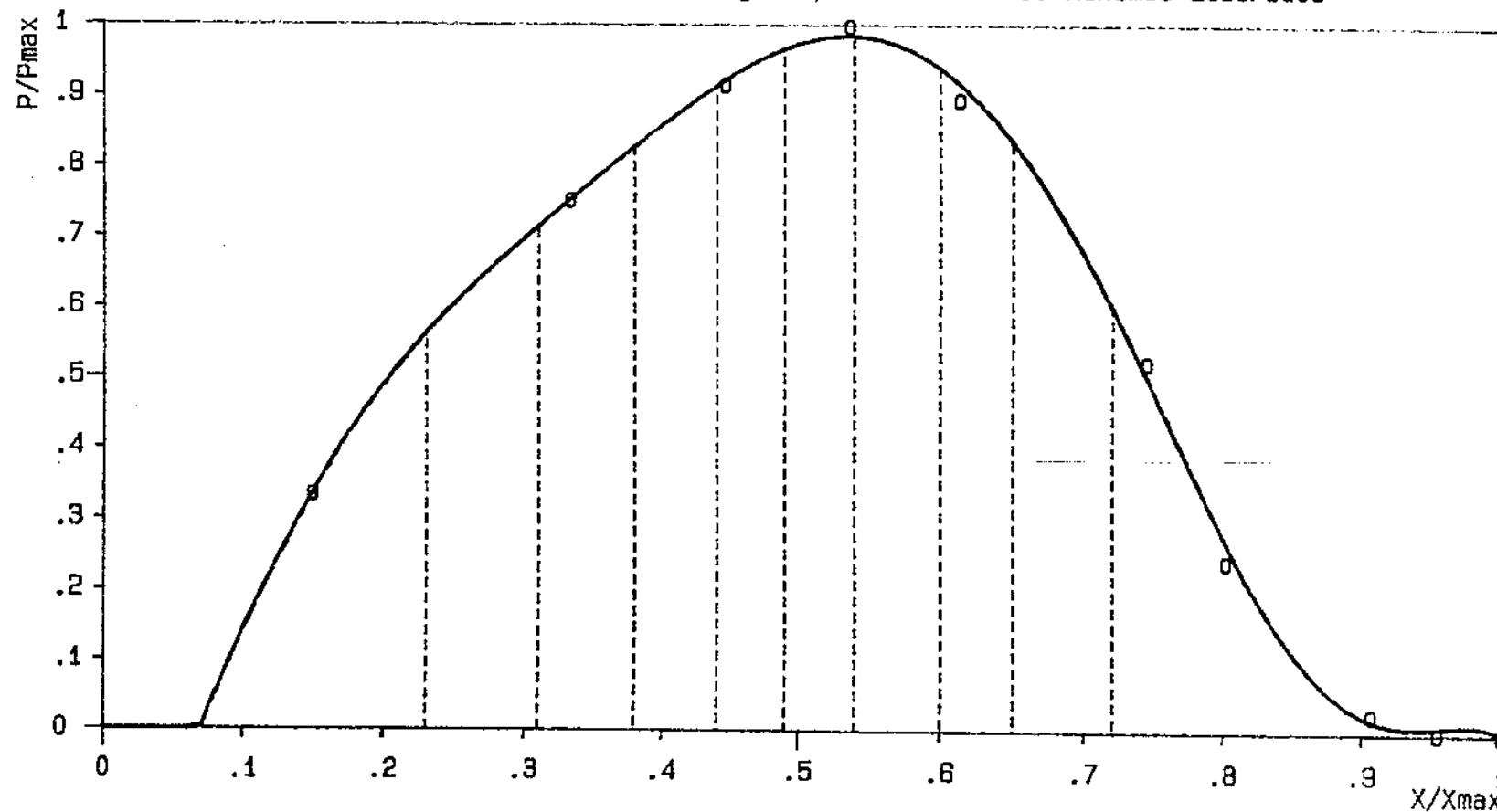
Ae/Ai: .8

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -.359997033567$
 $+ (5.16228790324 * x ^ 1) + (5.94653741655 * x ^ 2)$
 $+ (-96.2259337473 * x ^ 3) + (262.05110329 * x ^ 4)$
 $+ (-177.341731072 * x ^ 5) + (-293.002781502 * x ^ 6)$
 $+ (483.202525522 * x ^ 7) + (-189.433222905 * x ^ 8)$

Aproximacao Polinomial do 8o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.23
2	.31
3	.38
4	.44
5	.49
6	.54
7	.60
8	.65
9	.72
10	1.00

ENSAIO No.: C-08B

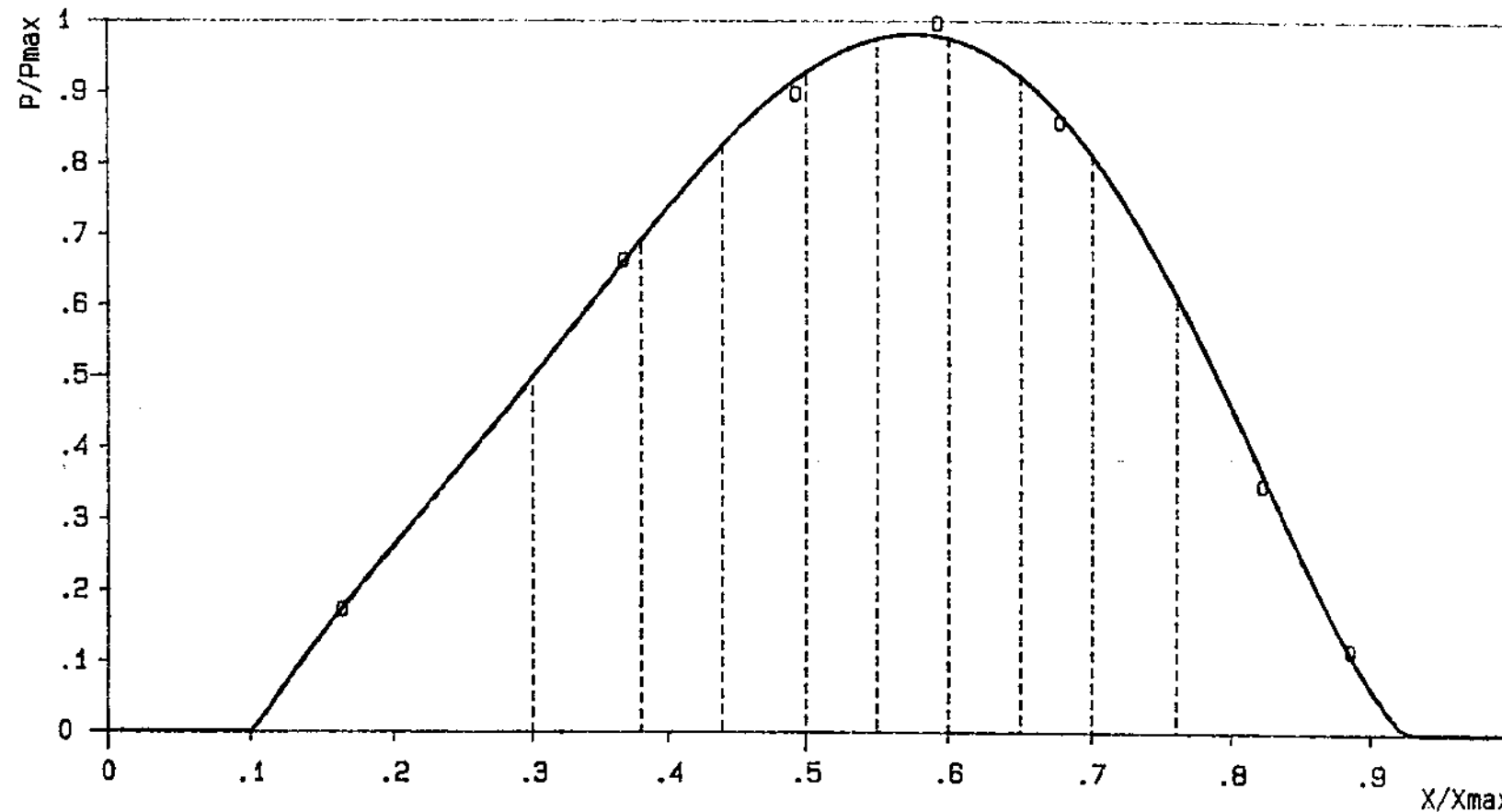
Ae/Ai: 1

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -.511629752884$
 $+ (7.37206803842 * x ^ 1) + (-31.2451288947 * x ^ 2)$
 $+ (89.7904981053 * x ^ 3) + (-115.678327791 * x ^ 4)$
 $+ (50.2740455935 * x ^ 5)$

Aproximacao Polinomial do 5o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.30
2	.38
3	.44
4	.50
5	.55
6	.60
7	.65
8	.70
9	.76
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-09

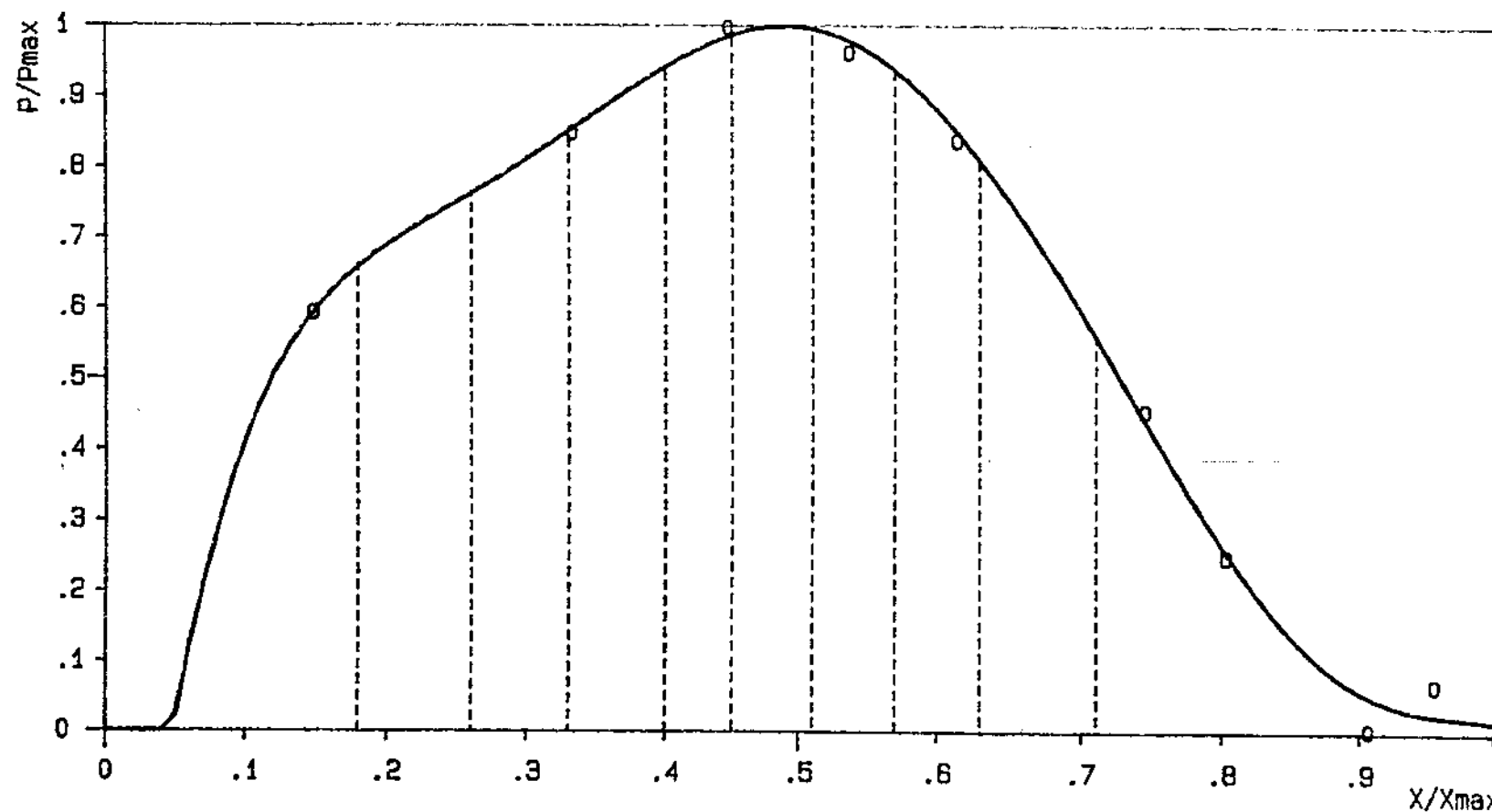
Ae/Ai: 1.1

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -.747330568328$
 $+ (20.6861169953 * x ^ 1) + (-124.076801187 * x ^ 2)$
 $+ (390.049876833 * x ^ 3) + (-627.19181262 * x ^ 4)$
 $+ (482.056211238 * x ^ 5) + (-140.762232784 * x ^ 6)$

Aproximacao Polinomial do 6o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.18
2	.26
3	.33
4	.40
5	.45
6	.51
7	.57
8	.63
9	.71
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-07

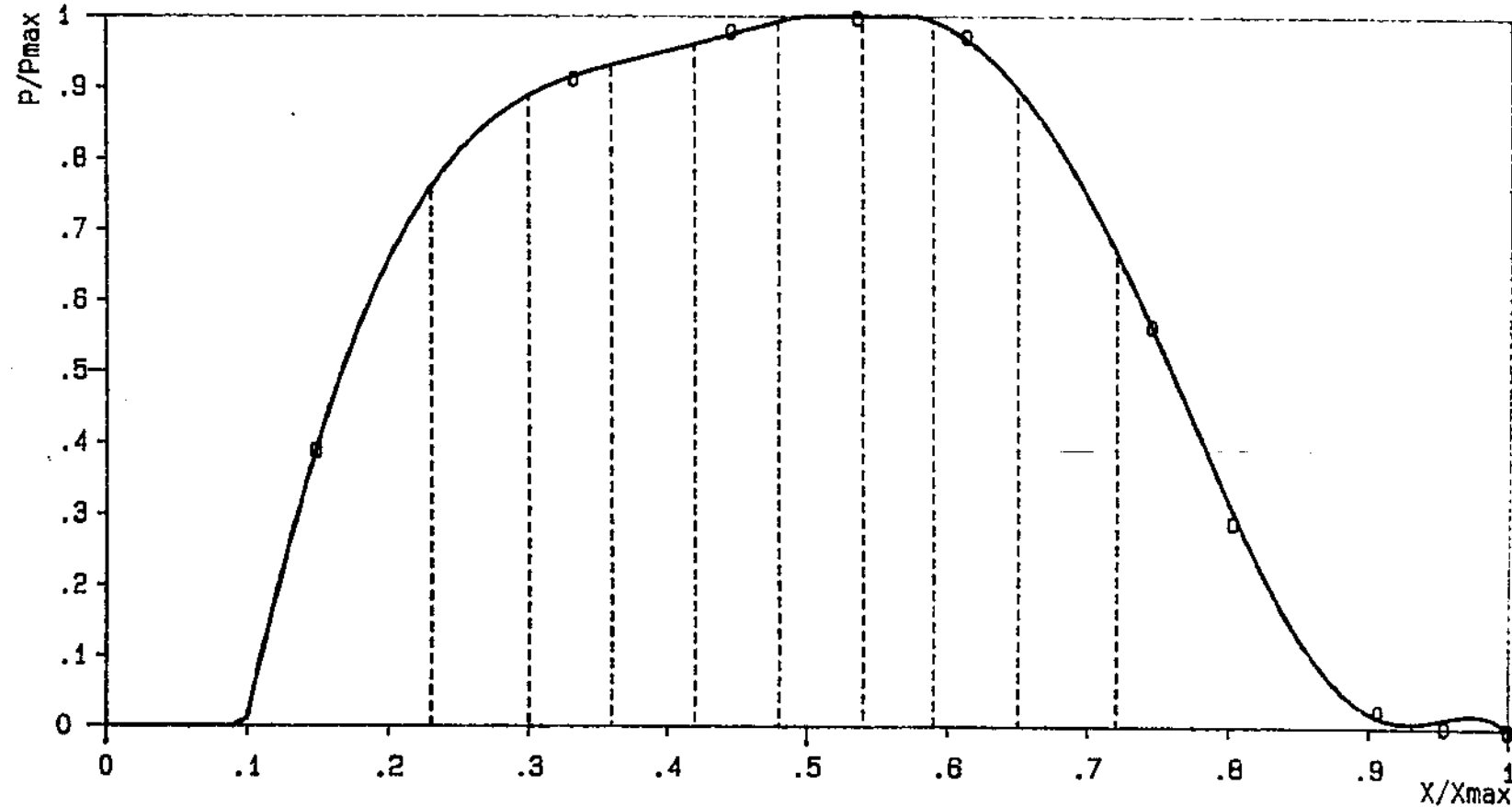
Ae/Ai: 1.2

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -1.11657772477$
 $+ (13.1107167811 * x ^ 1) + (-13.349764037 * x ^ 2)$
 $+ (-52.9182932775 * x ^ 3) + (-38.9869264931 * x ^ 4)$
 $+ (847.639131509 * x ^ 5) + (-1868.0837791 * x ^ 6)$
 $+ (1612.86006637 * x ^ 7) + (-498.178767042 * x ^ 8)$

Aproximacao Polinomial do 8o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



Perfil de distribuicao adimensional

decil	abscissa
1	.23
2	.30
3	.36
4	.42
5	.48
6	.54
7	.59
8	.65
9	.72
10	1.00

ENSAIO No.: C-02B

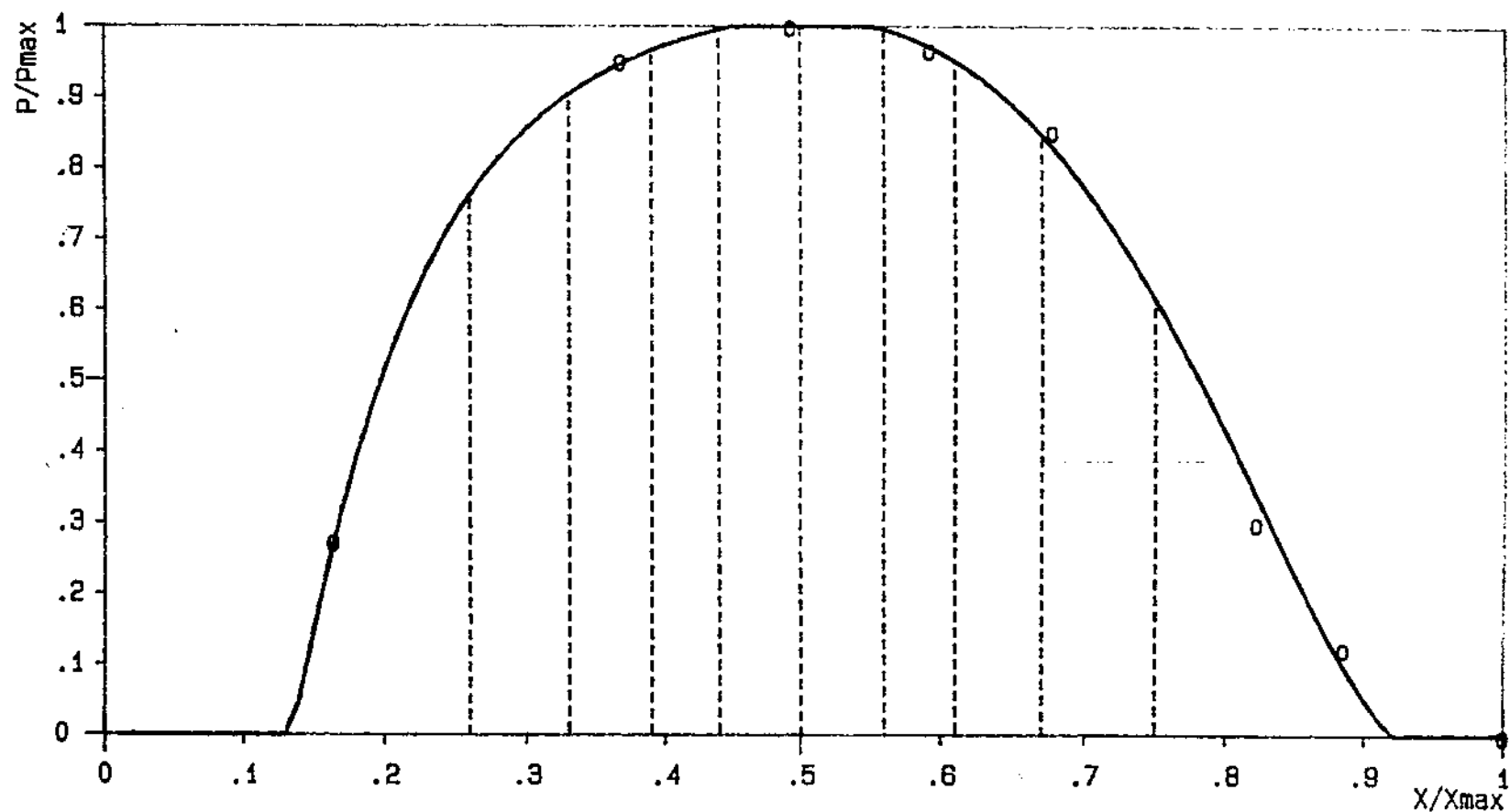
Ae/Ai: 1.3

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -2.73174894497$
 $+ (33.0874893923 * x ^ 1) + (-122.959313847 * x ^ 2)$
 $+ (234.385937589 * x ^ 3) + (-221.742896829 * x ^ 4)$
 $+ (79.963688482 * x ^ 5)$

Aproximacao Polinomial do 5o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.26
2	.33
3	.39
4	.44
5	.50
6	.56
7	.61
8	.67
9	.75
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-03

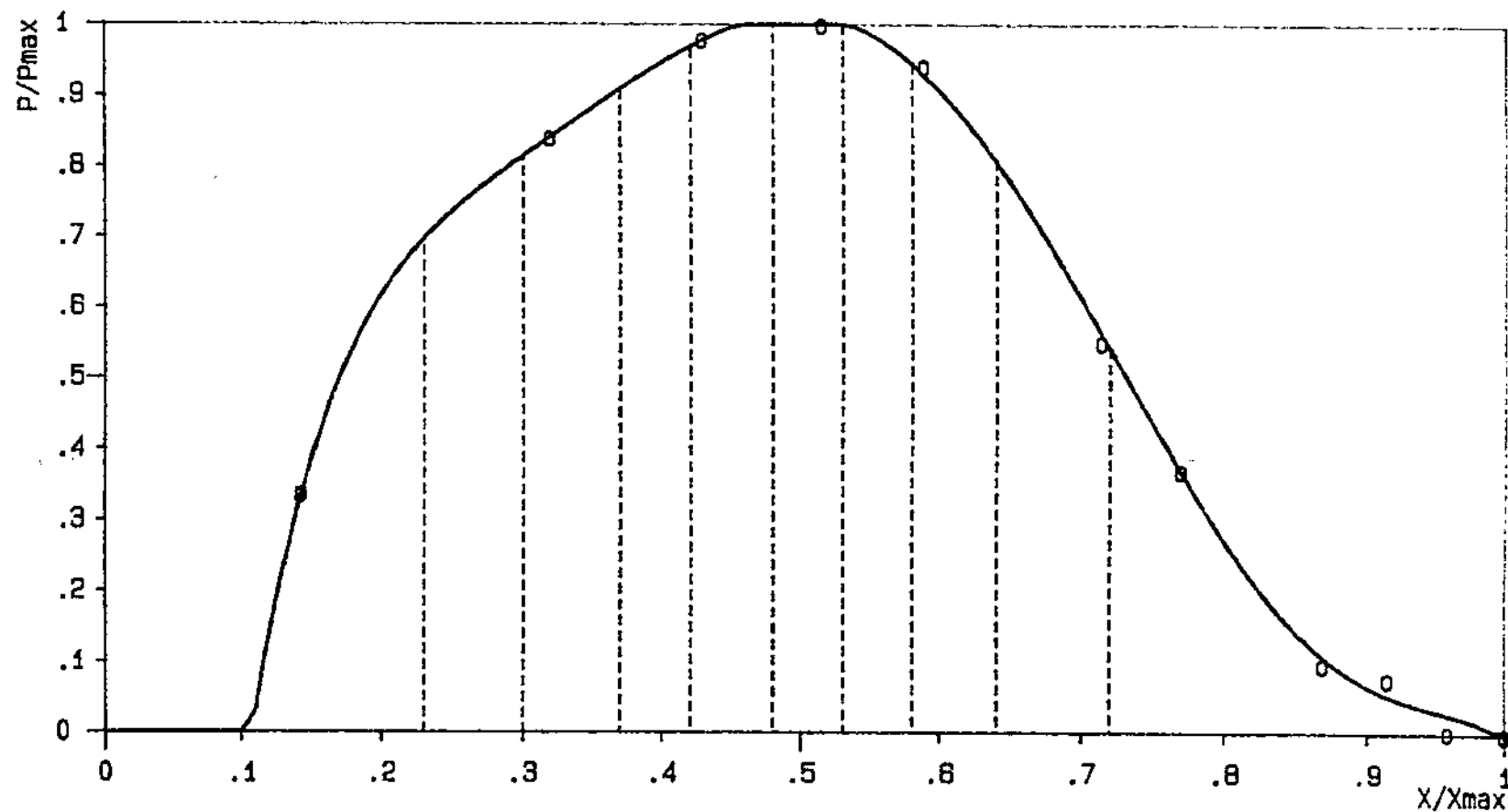
Ae/Ai: 1.4

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -2.72826388545$
 $+ (44.345599942 * x ^ 1) + (-237.268691081 * x ^ 2)$
 $+ (687.162846293 * x ^ 3) + (-892.557307128 * x ^ 4)$
 $+ (728.608748757 * x ^ 5) + (-207.569546355 * x ^ 6)$

Aproximacao Polinomial do 6o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



Perfil de distribuicao adimensional

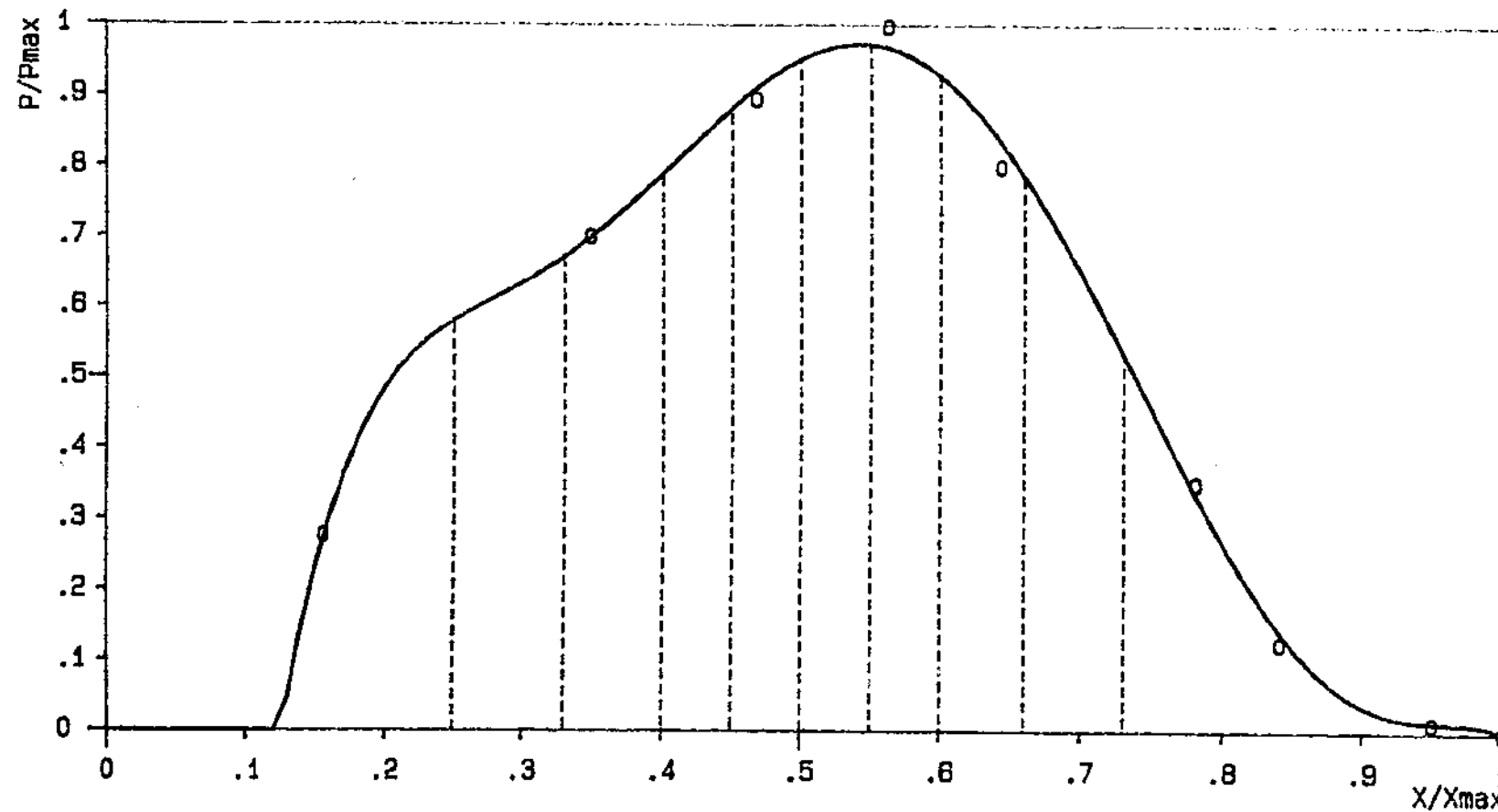
ENSAIO No.: C-01B

Ae/Ai: 1.5

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -4.16741229384$
 $+ (65.2759776302 * x ^ 1) + (-362.239865503 * x ^ 2)$
 $+ (1018.10852582 * x ^ 3) + (-1487.37290058 * x ^ 4)$
 $+ (1068.83028824 * x ^ 5) + (-288.434814098 * x ^ 6)$
 Aproximacao Polinomial do 6o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.25
2	.33
3	.40
4	.45
5	.50
6	.55
7	.60
8	.68
9	.73
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-0910B

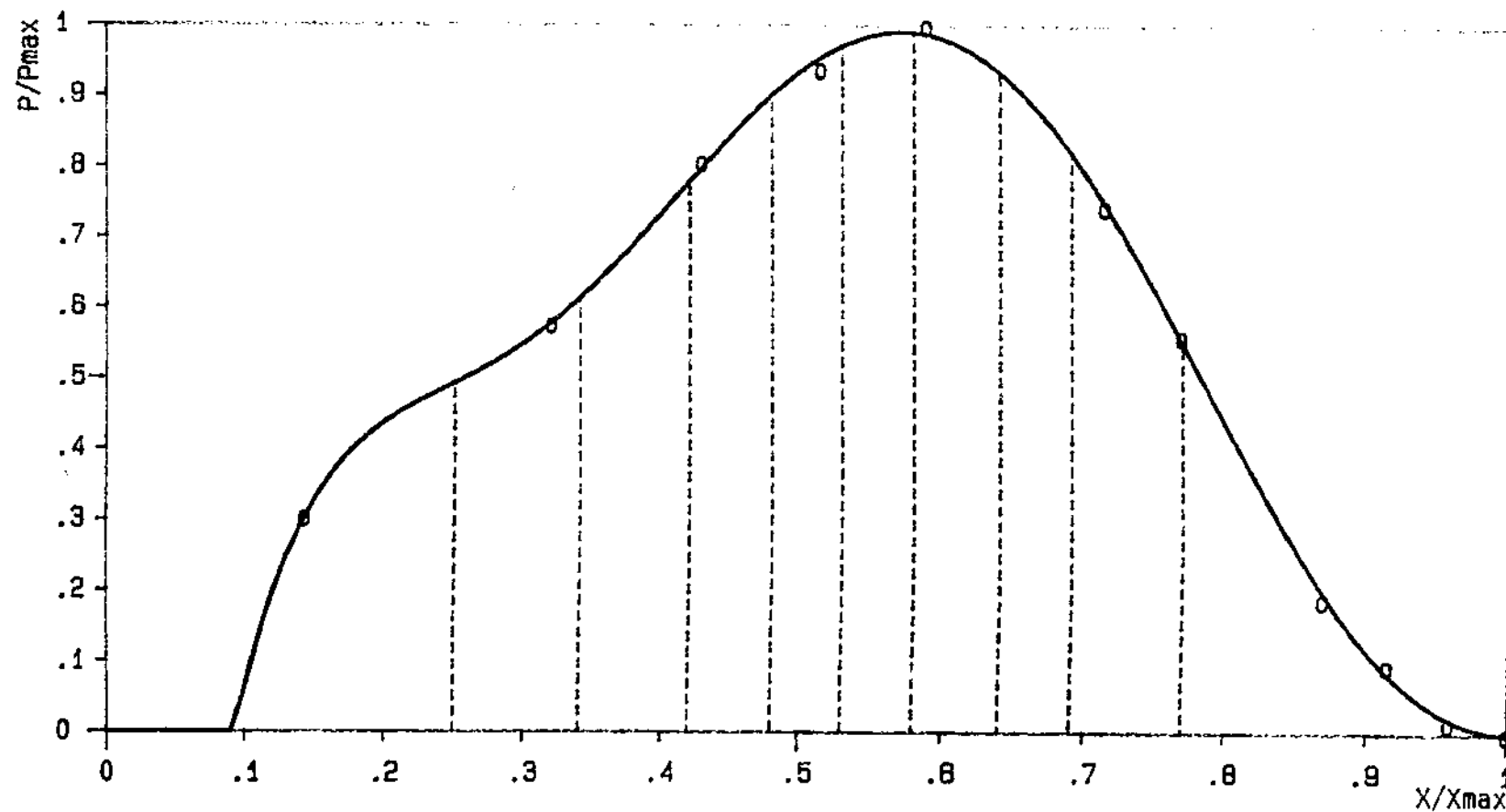
Ae/Ai: .6

Conicidade: 10

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -1.75175758198$
 $+ (32.0888877903 * x ^ 1) + (-187.378028705 * x ^ 2)$
 $+ (548.449010836 * x ^ 3) + (-807.388078423 * x ^ 4)$
 $+ (589.070859257 * x ^ 5) + (-153.109508469 * x ^ 6)$

Aproximacao Polinomial do 6o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



Perfil de distribuicao adimensional

decil	abscissa
1	.25
2	.34
3	.42
4	.48
5	.53
6	.58
7	.64
8	.69
9	.77
10	1.00

ENSAIO No.: C-1010

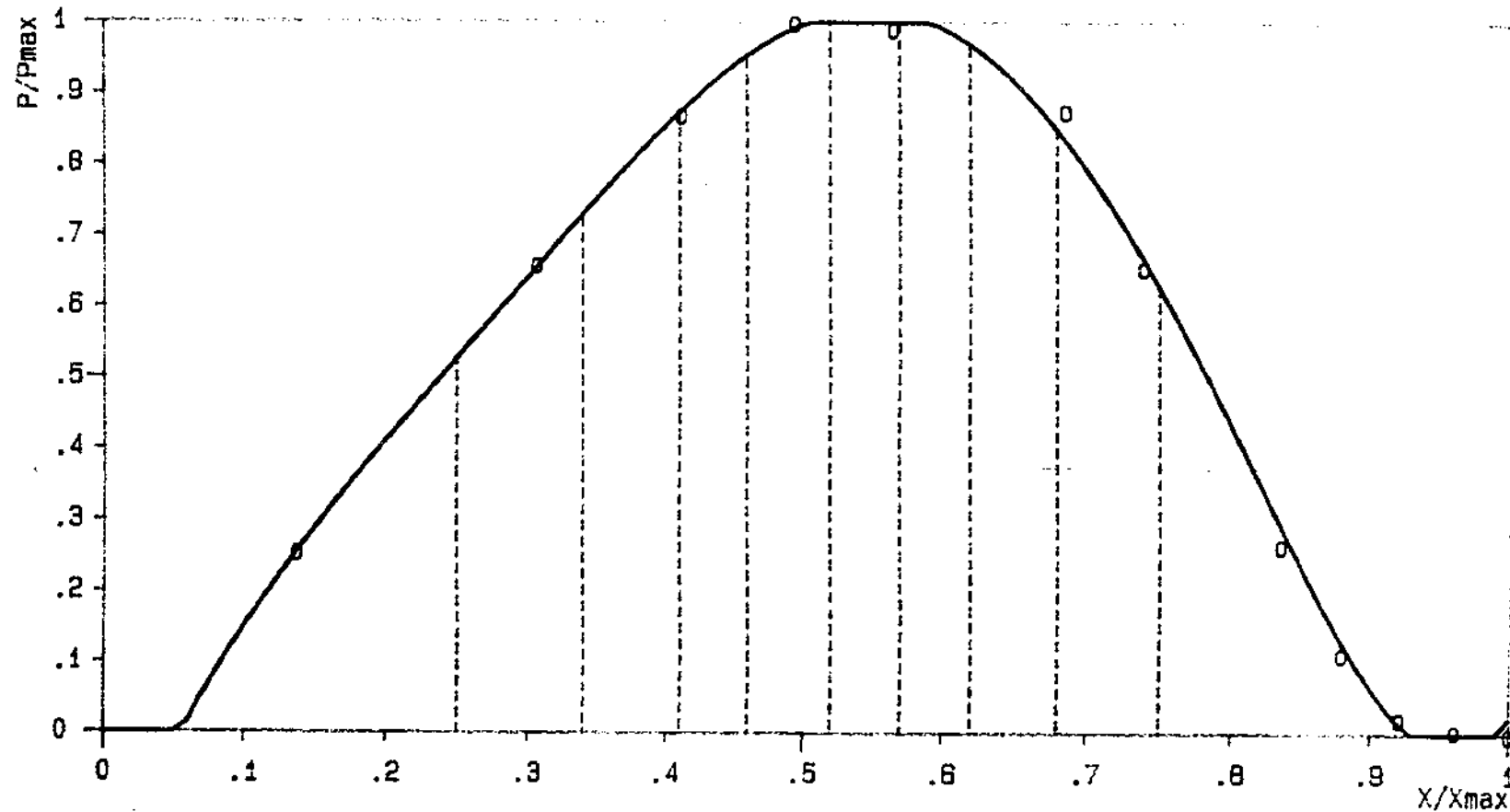
Ae/Ai: .7

Conicidade: 10

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -.272490075761$
 $+ (5.90467021899 * x ^ 1) + (-22.522928884 * x ^ 2)$
 $+ (66.8188970457 * x ^ 3) + (-81.0583428914 * x ^ 4)$
 $+ (41.152788671 * x ^ 5)$

Aproximacao Polinomial do 5o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.25
2	.34
3	.41
4	.46
5	.52
6	.57
7	.62
8	.68
9	.75
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-0810B

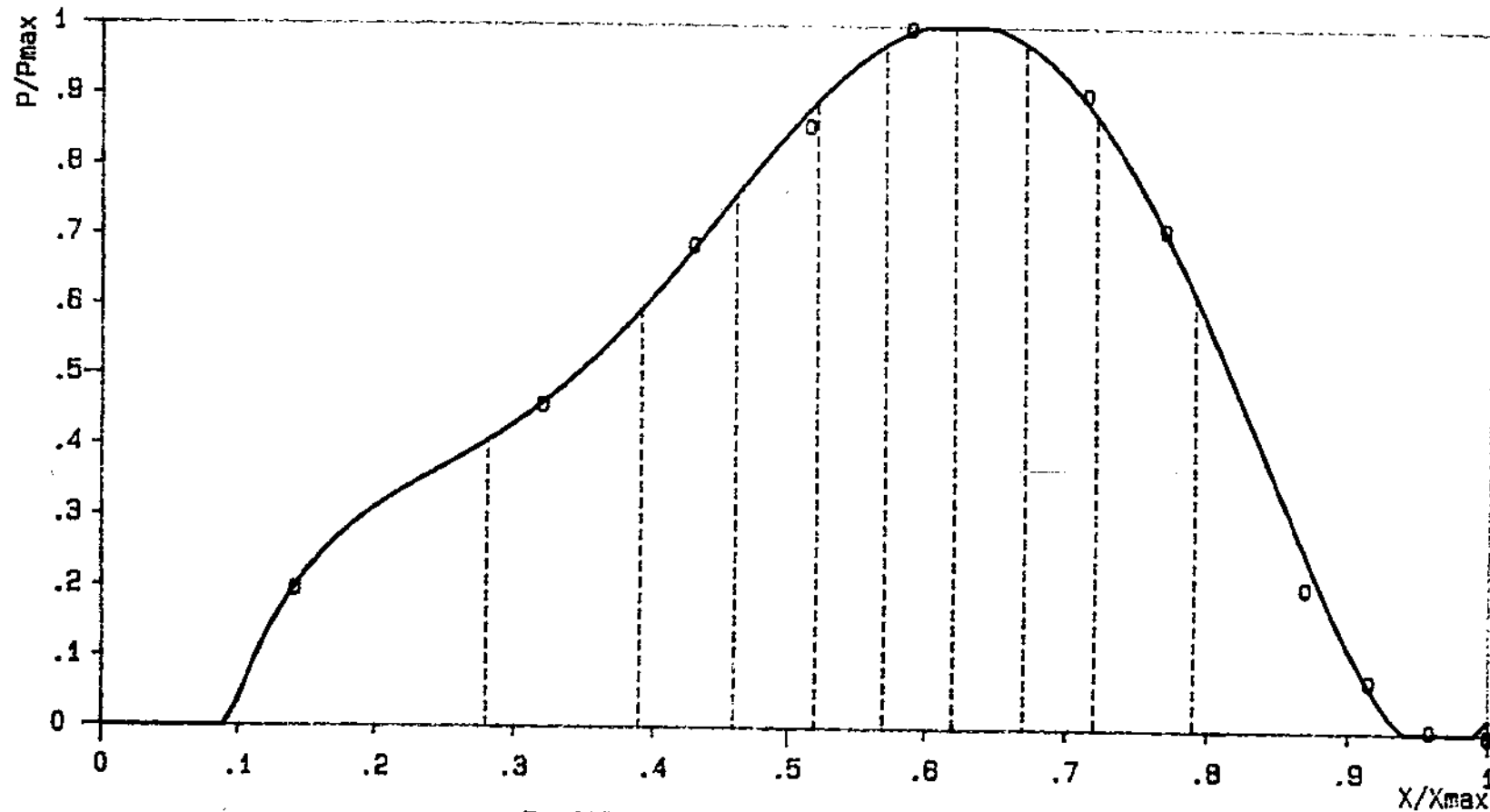
Ae/Ai: .8

Conicidade: 10

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -.957083689158$
 $+ (18.4089461805 * x ^ 1) + (-83.6879127541 * x ^ 2)$
 $+ (208.596468585 * x ^ 3) + (-232.287962989 * x ^ 4)$
 $+ (90.9488553285 * x ^ 5)$

Aproximacao Polinomial do 5o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.28
2	.39
3	.48
4	.52
5	.57
6	.62
7	.67
8	.72
9	.79
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-0410

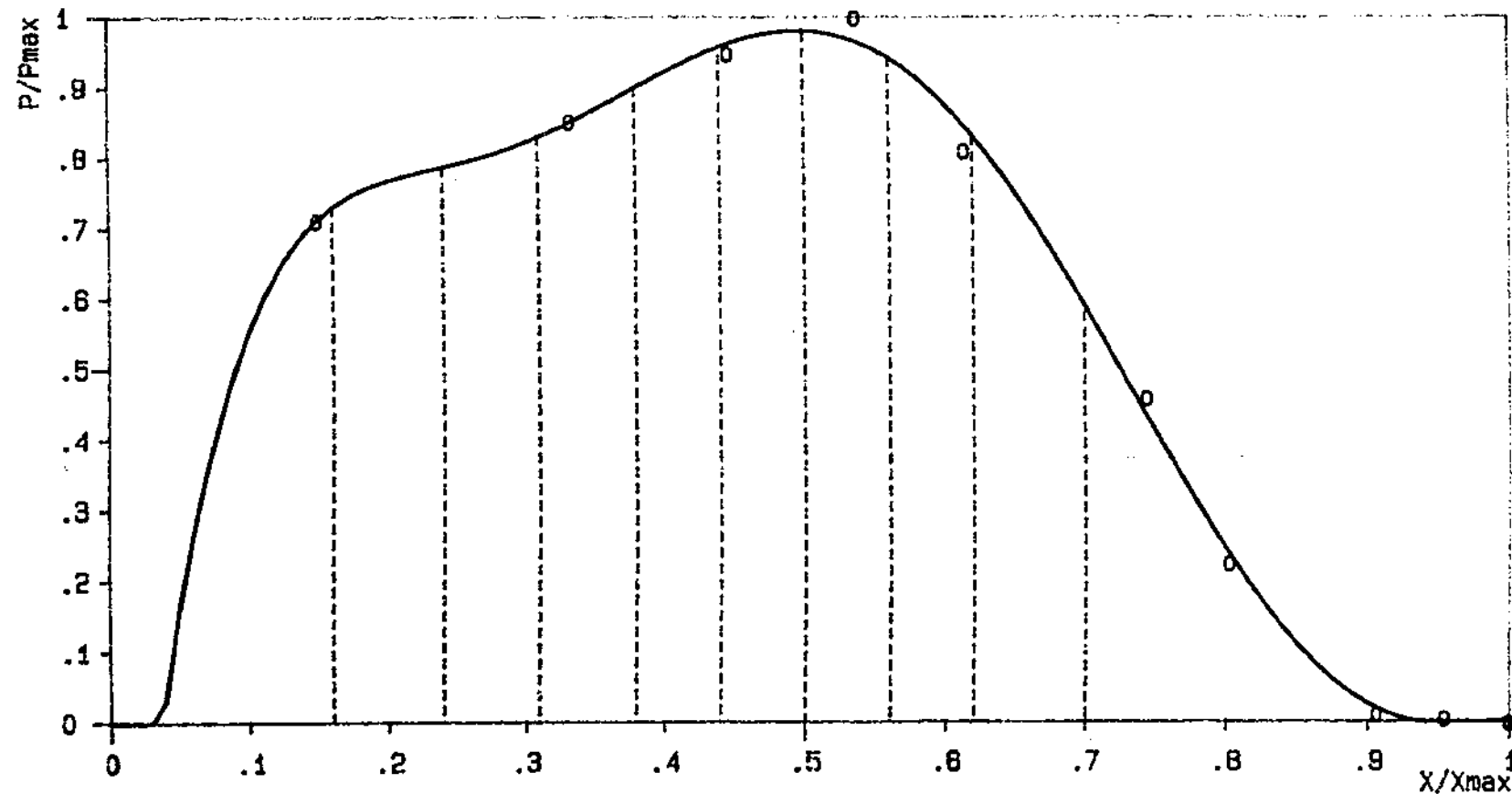
Ae/Ai: .9

Conicidade: 10

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -.877824938135$
 $+ (22.781047395 * x ^ 1) + (-142.202747053 * x ^ 2)$
 $+ (442.126384888 * x ^ 3) + (-694.470088308 * x ^ 4)$
 $+ (521.451897549 * x ^ 5) + (-149.985581823 * x ^ 6)$

Aproximacao Polinomial do 6o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.16
2	.24
3	.31
4	.38
5	.44
6	.50
7	.58
8	.62
9	.70
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-0110

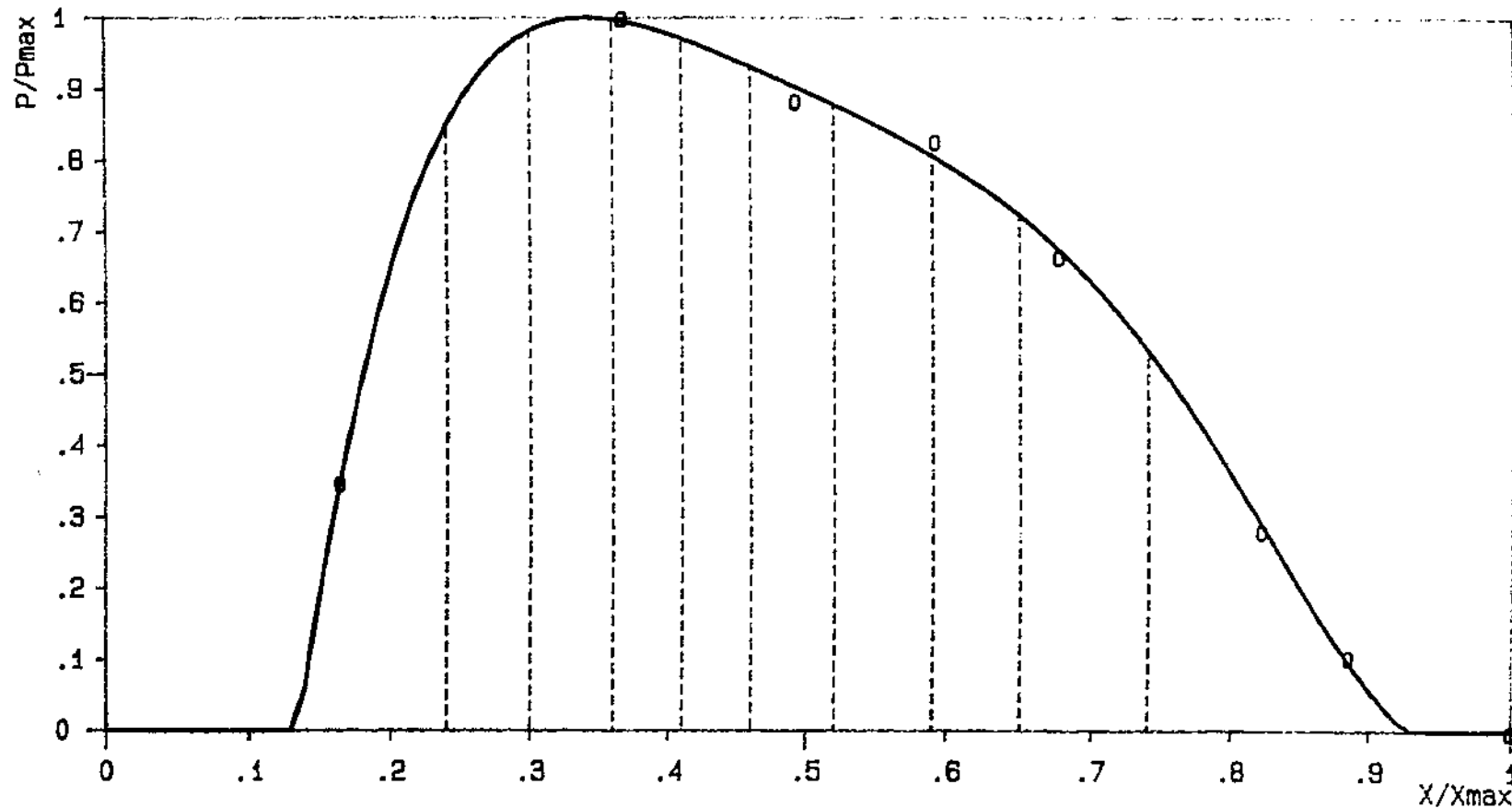
Ae/Ai: 1

Conicidade: 10

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -3.73398565574$
 $+ (45.3345334285 * x ^ 1) + (-188.9968559 * x ^ 2)$
 $+ (297.408476441 * x ^ 3) + (-258.828018902 * x ^ 4)$
 $+ (88.8162457725 * x ^ 5)$

Aproximacao Polinomial do 5 o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



Perfil de distribuicao adimensional

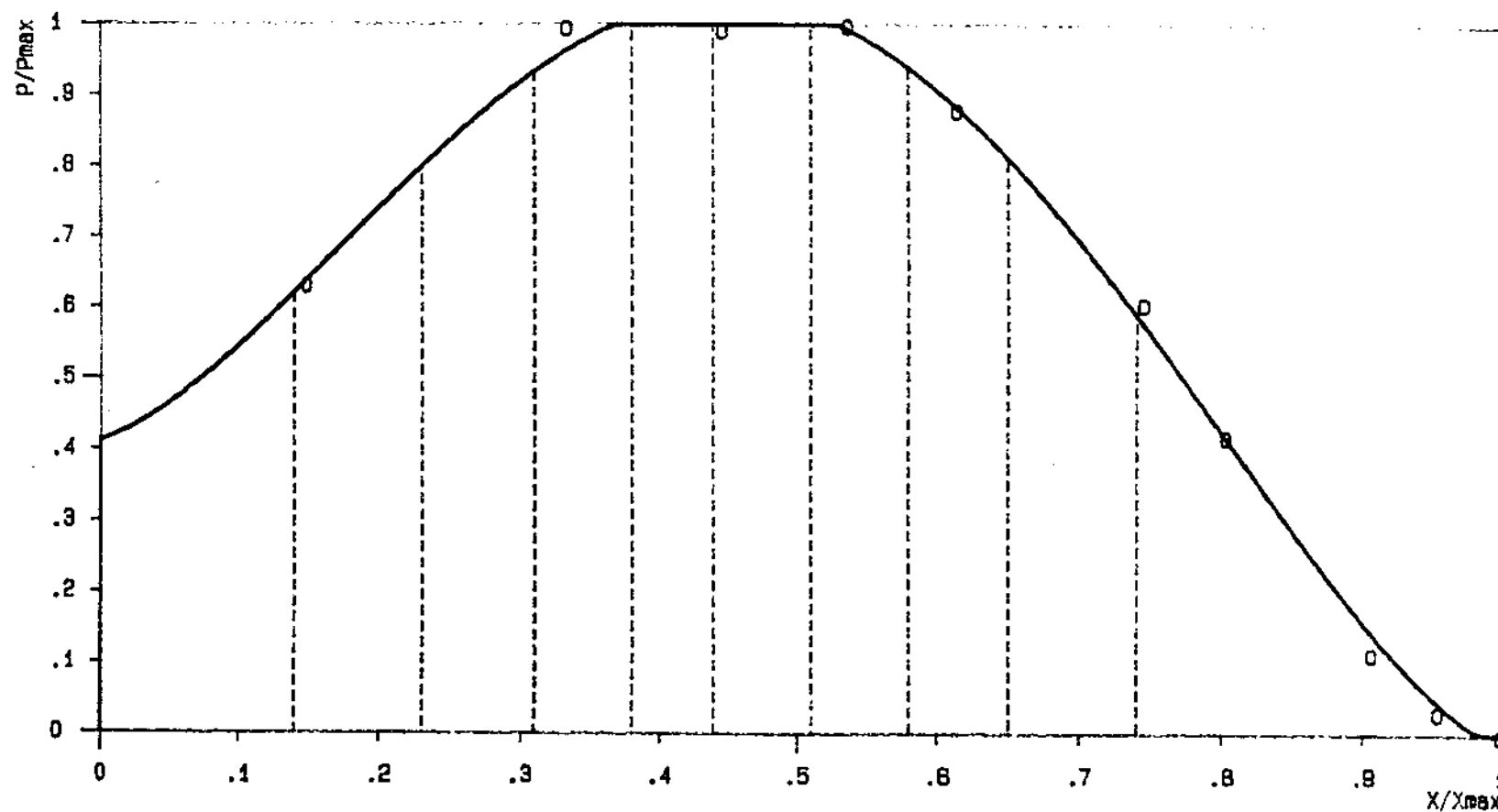
ENSAIO No.: C-0610

Ae/Ai: 1.1

Conicidade: 10

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = .411691822688$
 $+ (.687005583858 * x^1) + (8.23614097305 * x^2)$
 $+ [-19.301467021 * x^3] + (9.94643847073 * x^4)$



decil	abscissa
1	.14
2	.23
3	.31
4	.38
5	.44
6	.51
7	.58
8	.65
9	.74
10	.99

Perfil de distribuicao adimensional

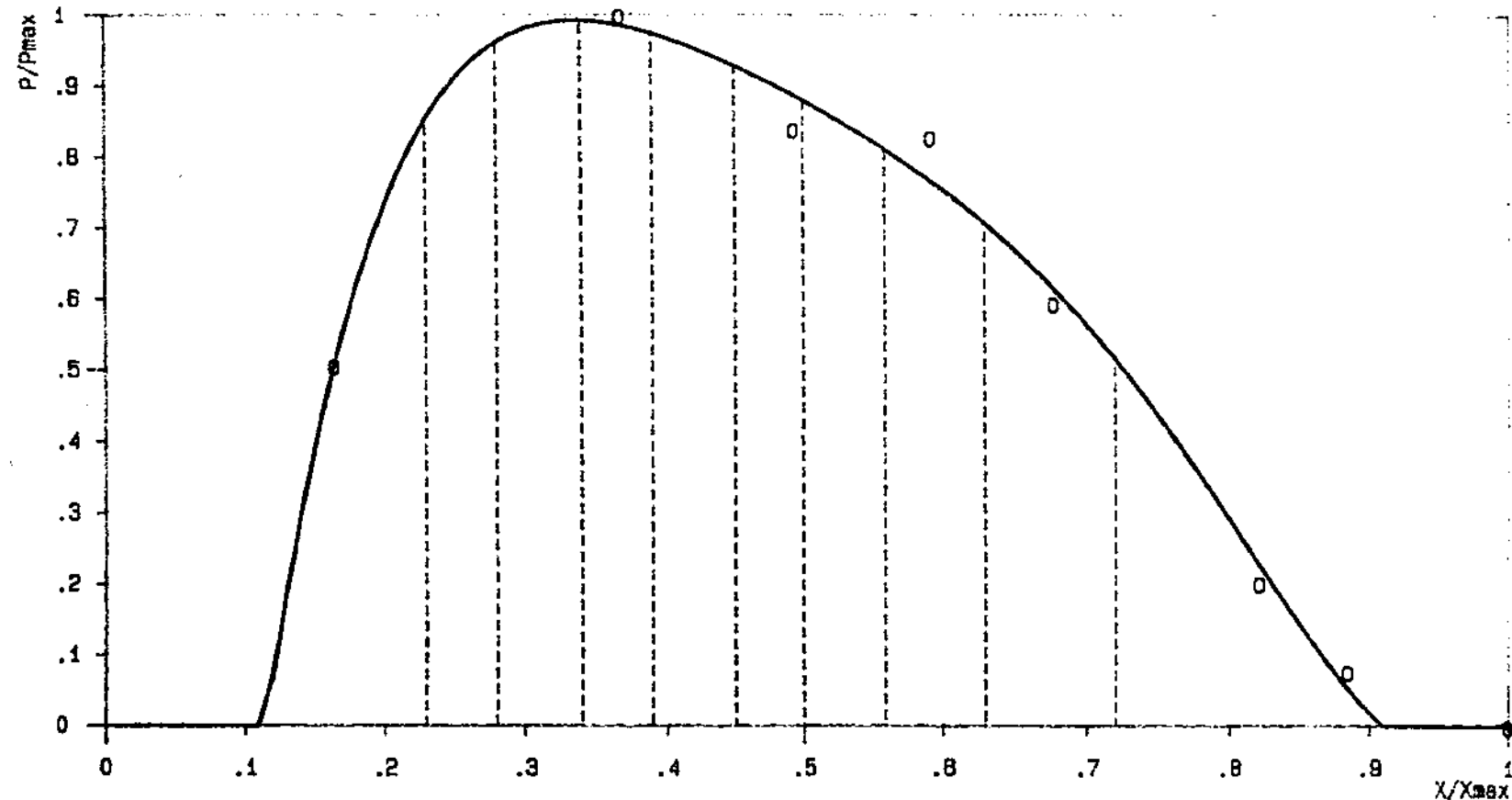
ENSAIO No.: C-0210

Ae/Ai: 1.2

Conicidade: 10

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -2.55864692282$
 $+ (34.0338544502 * x ^ 1) + (-125.497617509 * x ^ 2)$
 $+ (224.90235141 * x ^ 3) + (-199.236488412 * x ^ 4)$
 $+ (68.3603567555 * x ^ 5)$



decil	abscissa
1	.23
2	.28
3	.34
4	.39
5	.45
6	.50
7	.56
8	.63
9	.72
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-0510

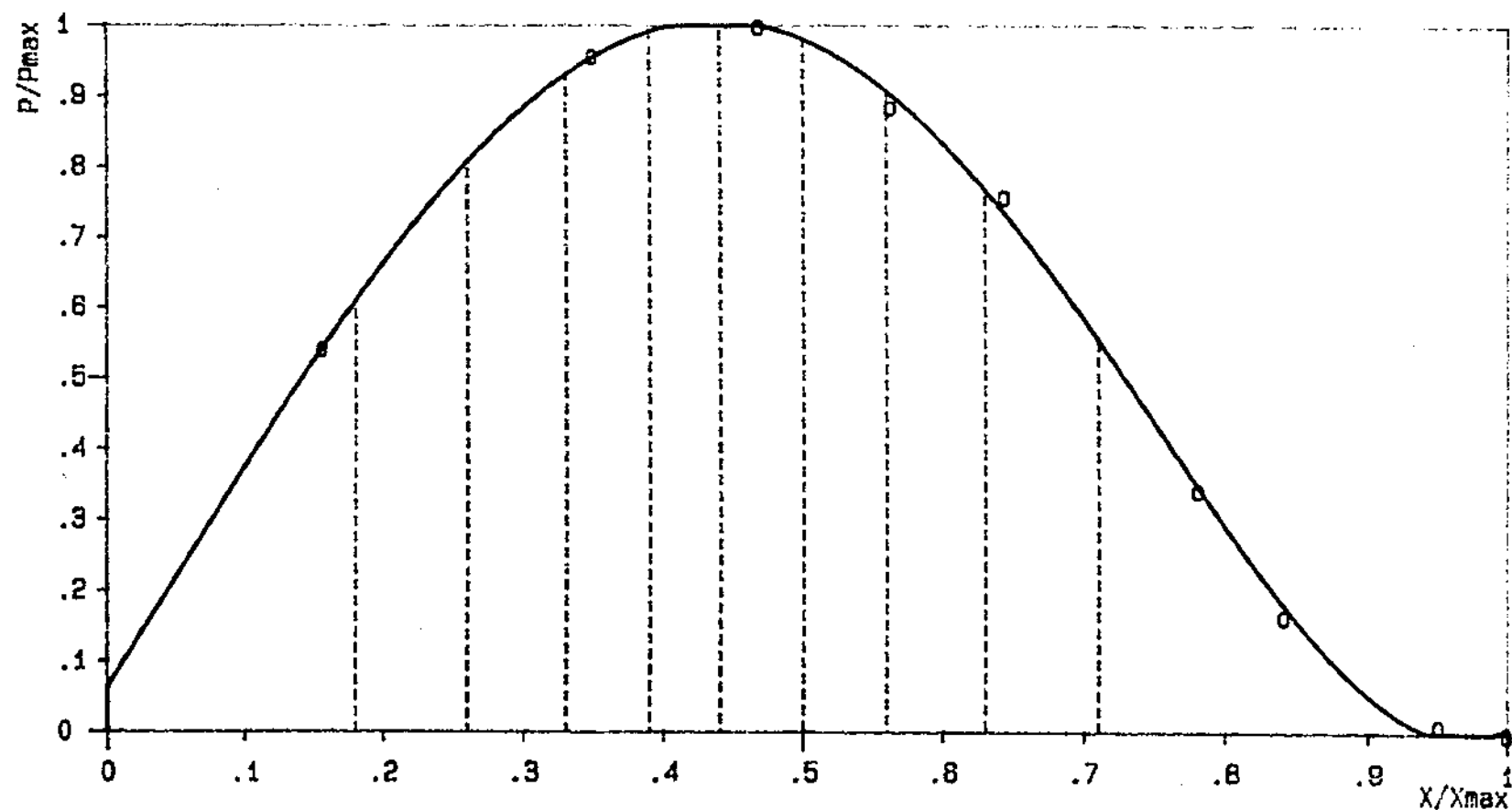
Ae/Ai: 1.3

Conicidade: 10

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = 8.41147086893E-2$
 $+ (3.0188707375 * x ^ 1) + (1.70854240868 * x ^ 2)$
 $+ (-8.24348558791 * x ^ 3) + (-.118310977312 * x ^ 4)$
 $+ (4.57818312216 * x ^ 5)$

Aproximacao Polinomial do 5o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.18
2	.26
3	.33
4	.39
5	.44
6	.50
7	.56
8	.63
9	.71
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-0710B

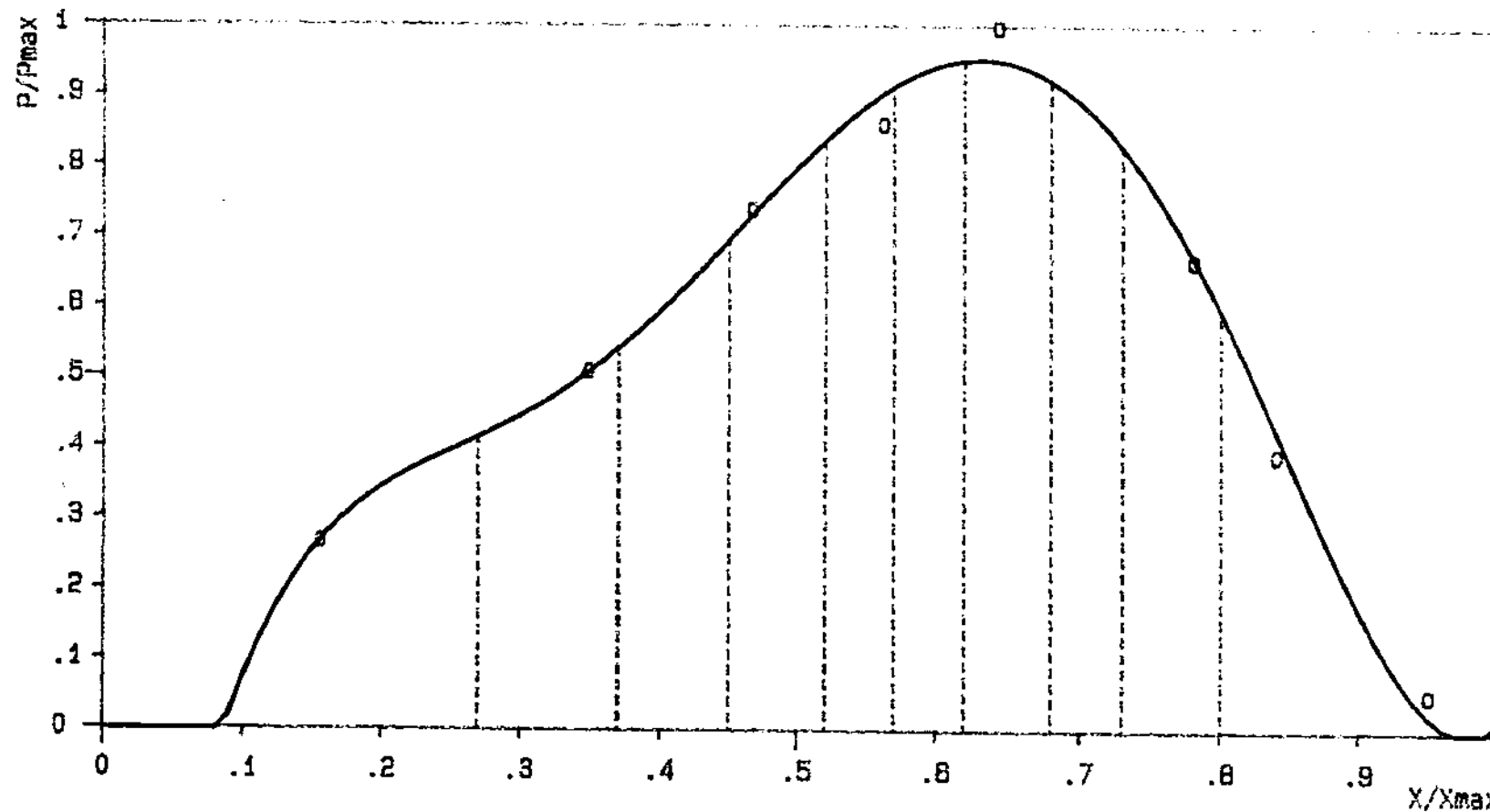
Ae/Ai: 1.4

Conicidade: 10

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -.807110942572$
 $+ (18.1083508042 * x ^ 1) + (-80.6878311326 * x ^ 2)$
 $+ (186.603808895 * x ^ 3) + (-212.678258252 * x ^ 4)$
 $+ (81.7875387112 * x ^ 5)$

Aproximacao Polinomial do 5o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.27
2	.37
3	.45
4	.52
5	.57
6	.62
7	.68
8	.73
9	.80
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-0310

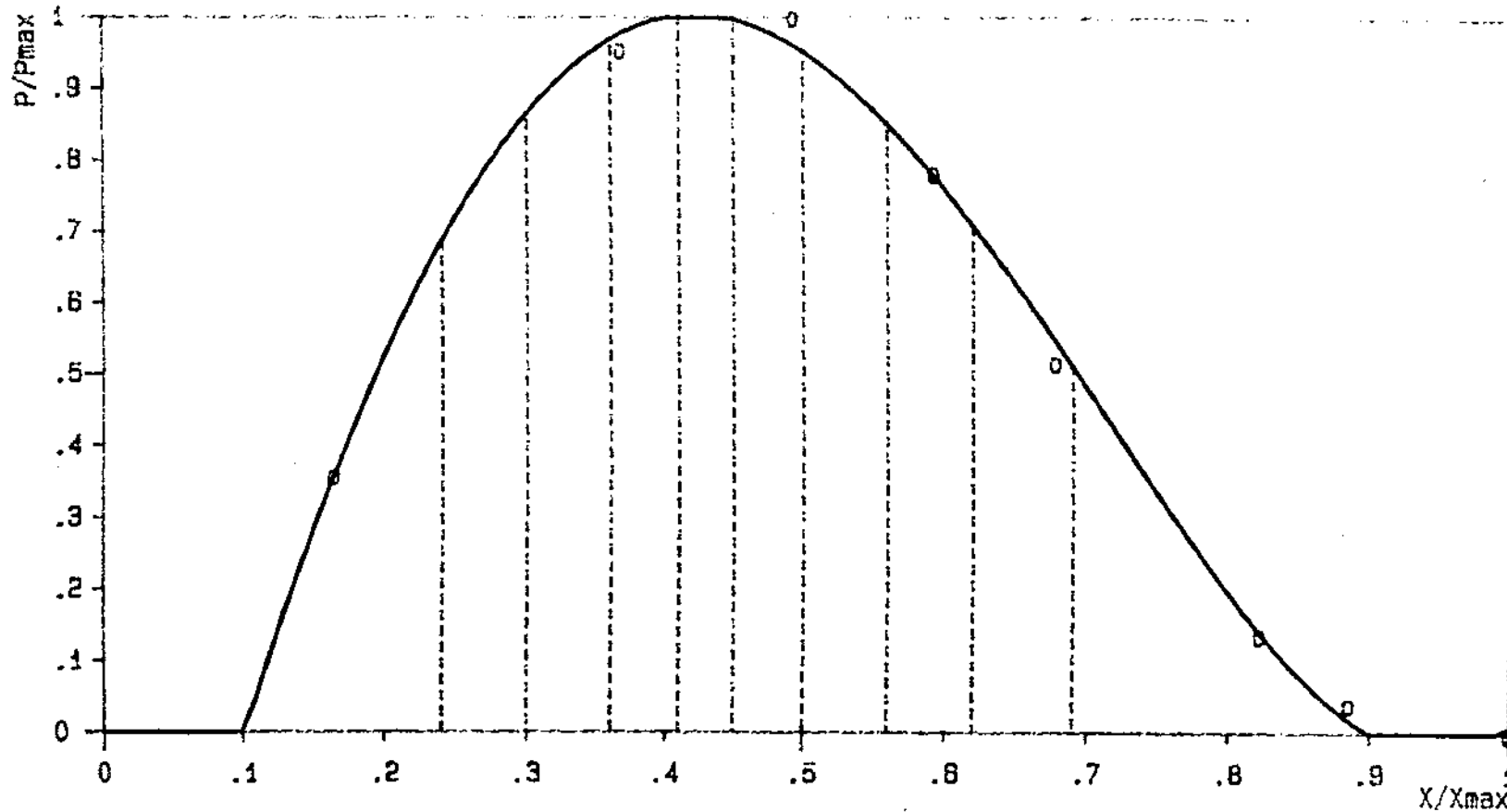
Ae/Ai: 1.5

Conicidade: 10

Pre-notacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -.736886441018$
 $+ (8.03130581273 * x^1) + (-7.23986082328 * x^2)$
 $+ (-8.17048115513 * x^3) + (8.12430420673 * x^4)$

Aproximacao Polinomial do 4o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



Perfil de distribuicao adimensional

APENDICE C.2 - VARIAÇÃO DA CONICIDADE DO JATO EXTERNO

BOCAIS ENSAIADOS

Nº do bocal	α (graus)	γ (graus)	A_e/A_i
C-01	0	0	1,5
C-0105	5	0	1,5
C-0310	10	0	1,5
C-0115	15	0	1,5
C-0120	20	0	1,5

ENSAIO No.: C-01B

Ae/Ai: 1.5

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 0

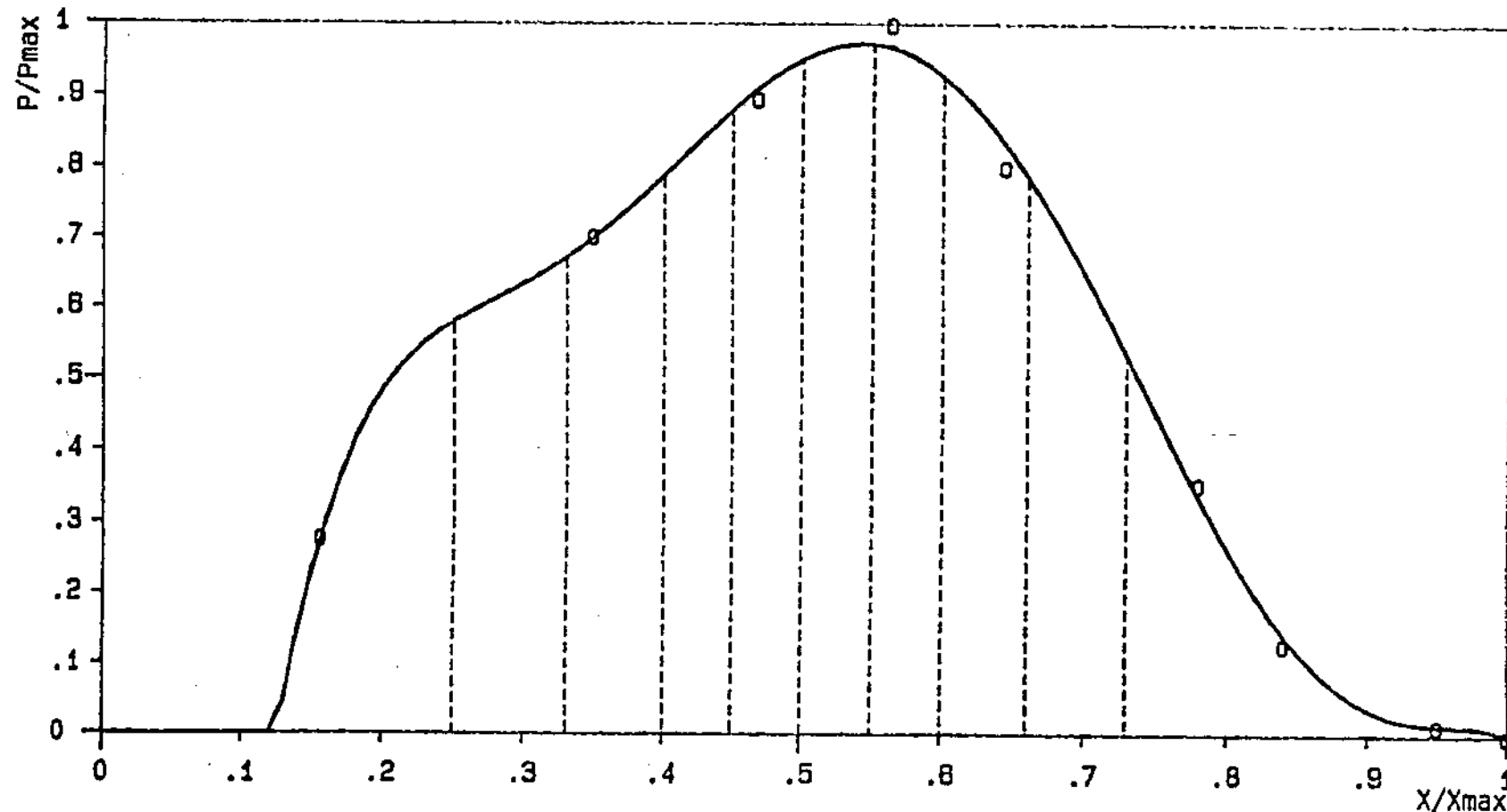
Polinomio usado na aproximacao: $y = -4.18741228384$

$+ (85.2759778302 * x ^ 1) + (-382.238885503 * x ^ 2)$

$+ (1018.10852582 * x ^ 3) + (-1487.37280058 * x ^ 4)$

$+ (1088.83028924 * x ^ 5) + (-288.434814088 * x ^ 6)$

Aproximacao Polinomial do 6o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.25
2	.33
3	.40
4	.45
5	.50
6	.55
7	.60
8	.68
9	.73
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-0105

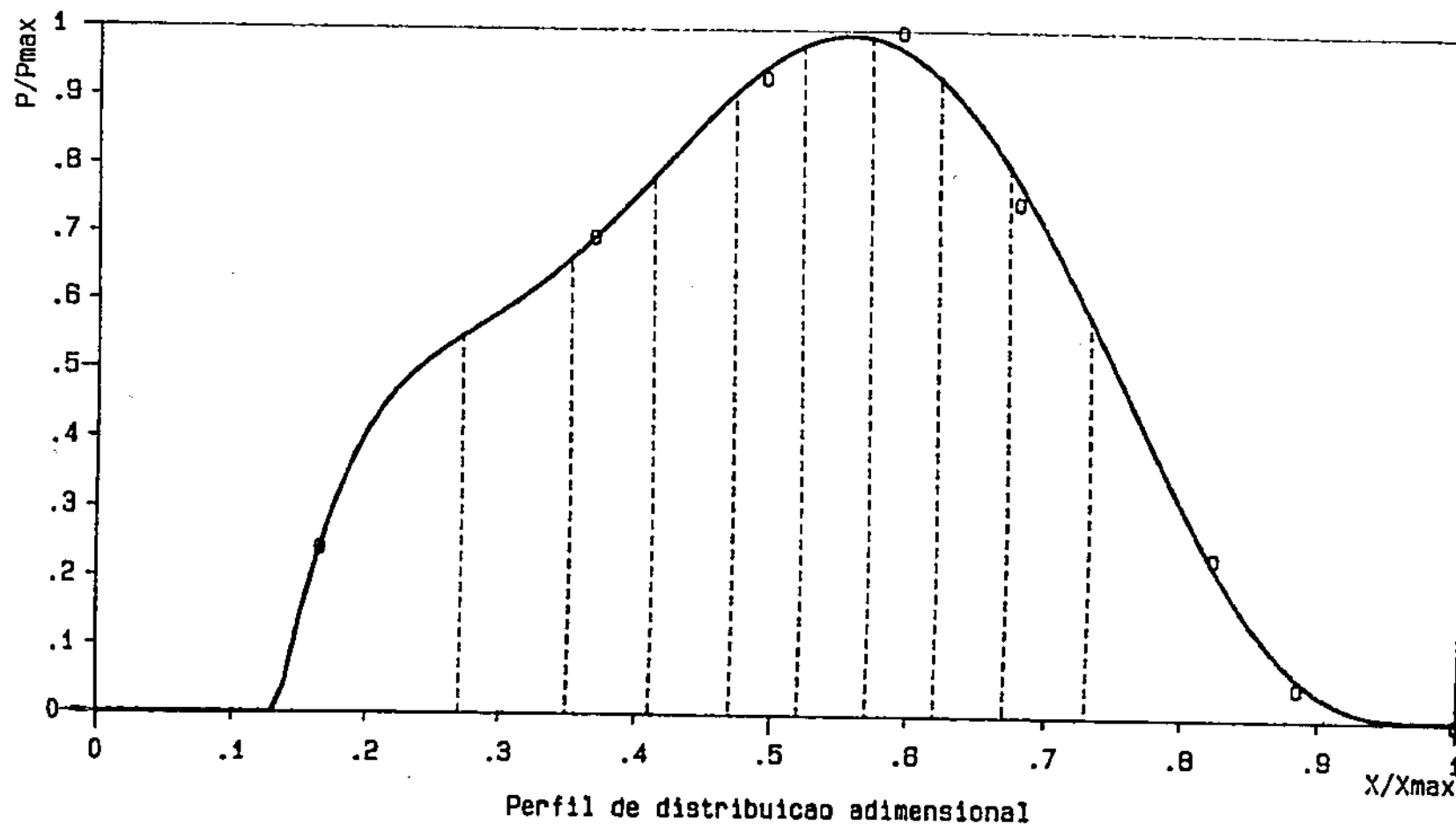
Ae/Ai: 1.5

Conicidade: 5

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -4.46111295584$
 $+ (87.5686399189 * x ^ 1) + (-370.64140939 * x ^ 2)$
 $+ (1031.2460334 * x ^ 3) + (-1489.65416214 * x ^ 4)$
 $+ (1057.37033638 * x ^ 5) + (-291.429153279 * x ^ 8)$

Aproximacao Polinomial do 8o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.27
2	.35
3	.41
4	.47
5	.52
6	.57
7	.62
8	.67
9	.73
10	1.00

ENSAIO No.: C-0310

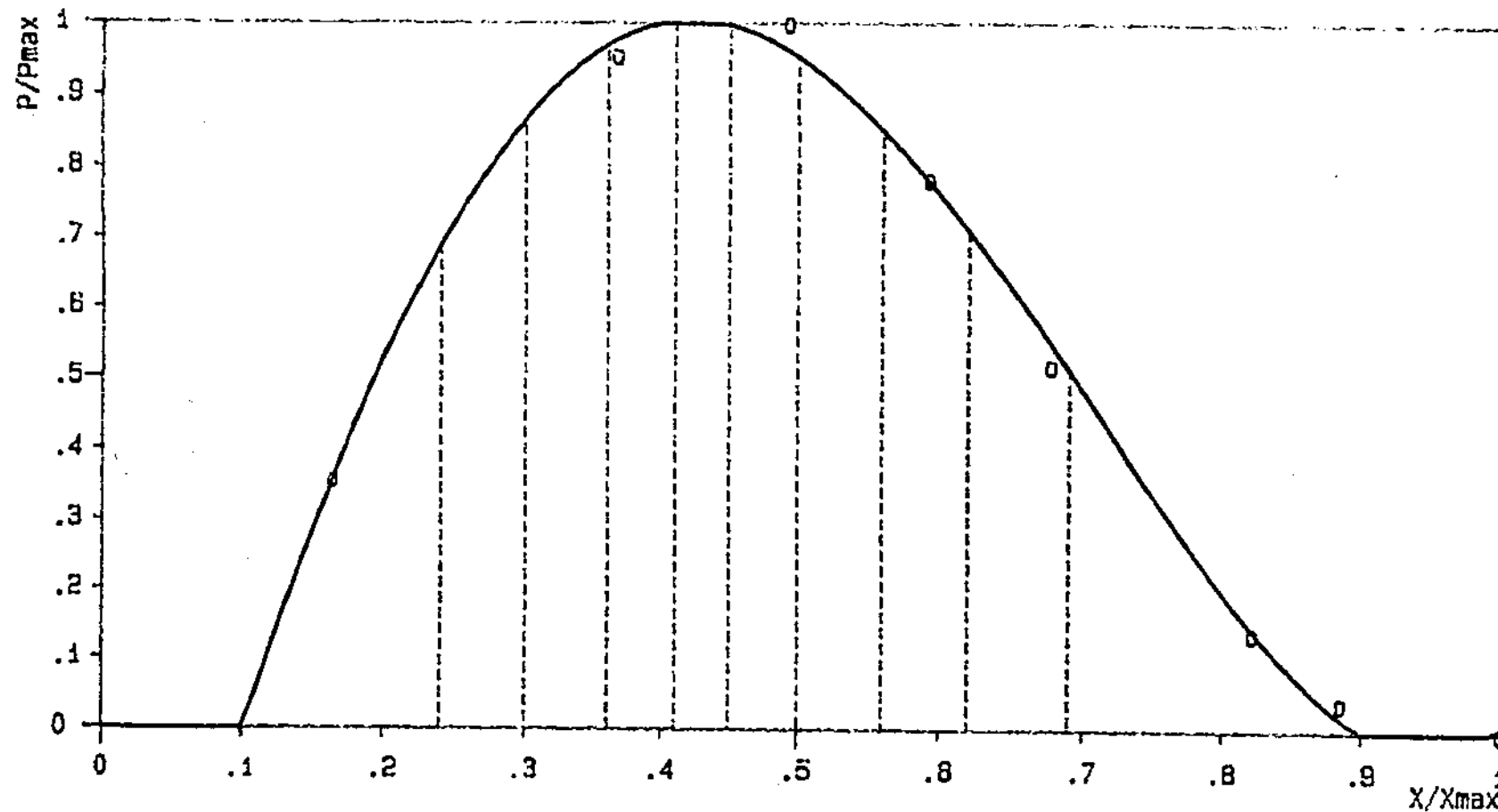
Ae/Ai: 1.5

Conicidade: 10

Pre-rotacao: 0

Polinômio usado na aproximação: $y = -.738888441018$
 $+ (8.09130581273 * x^1) + (-7.23888082328 * x^2)$
 $+ (-8.17048115513 * x^3) + (8.12480420873 * x^4)$

Aproximação Polinomial do 4o. grau pelo Método dos Mínimos Quadrados



Perfil de distribuição adimensional

ENSAIO No.: C-0115B

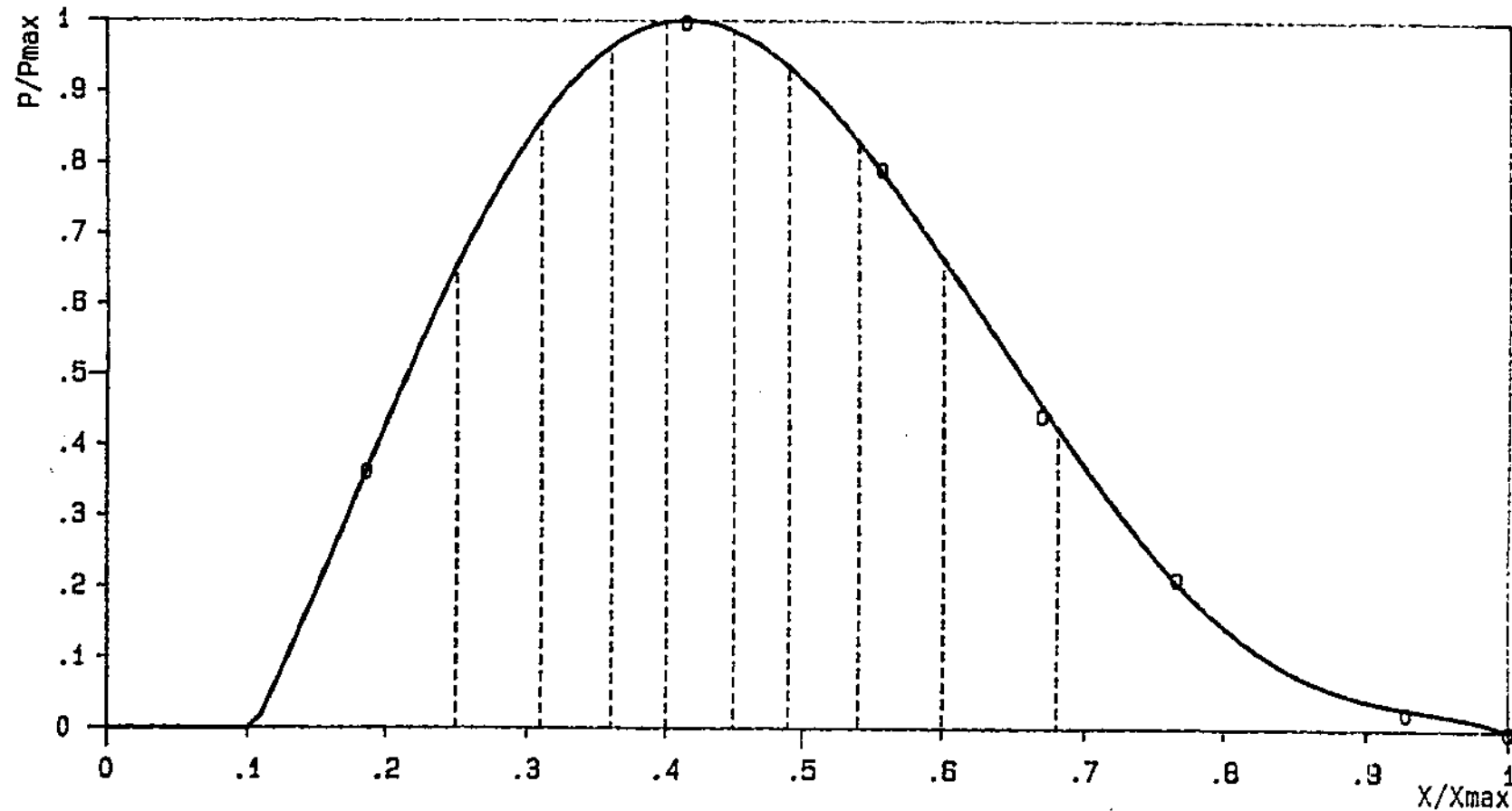
Ae/Ai: 1.5

Conicidade: 15

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -.140390115295$
 $+ (-2.35982898059 * x^1) + (47.6296036194 * x^2)$
 $+ (-132.265616869 * x^3) + (132.50009015 * x^4)$
 $+ (-45.3848773688 * x^5)$

Aproximacao Polinomial do 5o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.25
2	.31
3	.36
4	.40
5	.45
6	.49
7	.54
8	.60
9	.68
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: C-0120

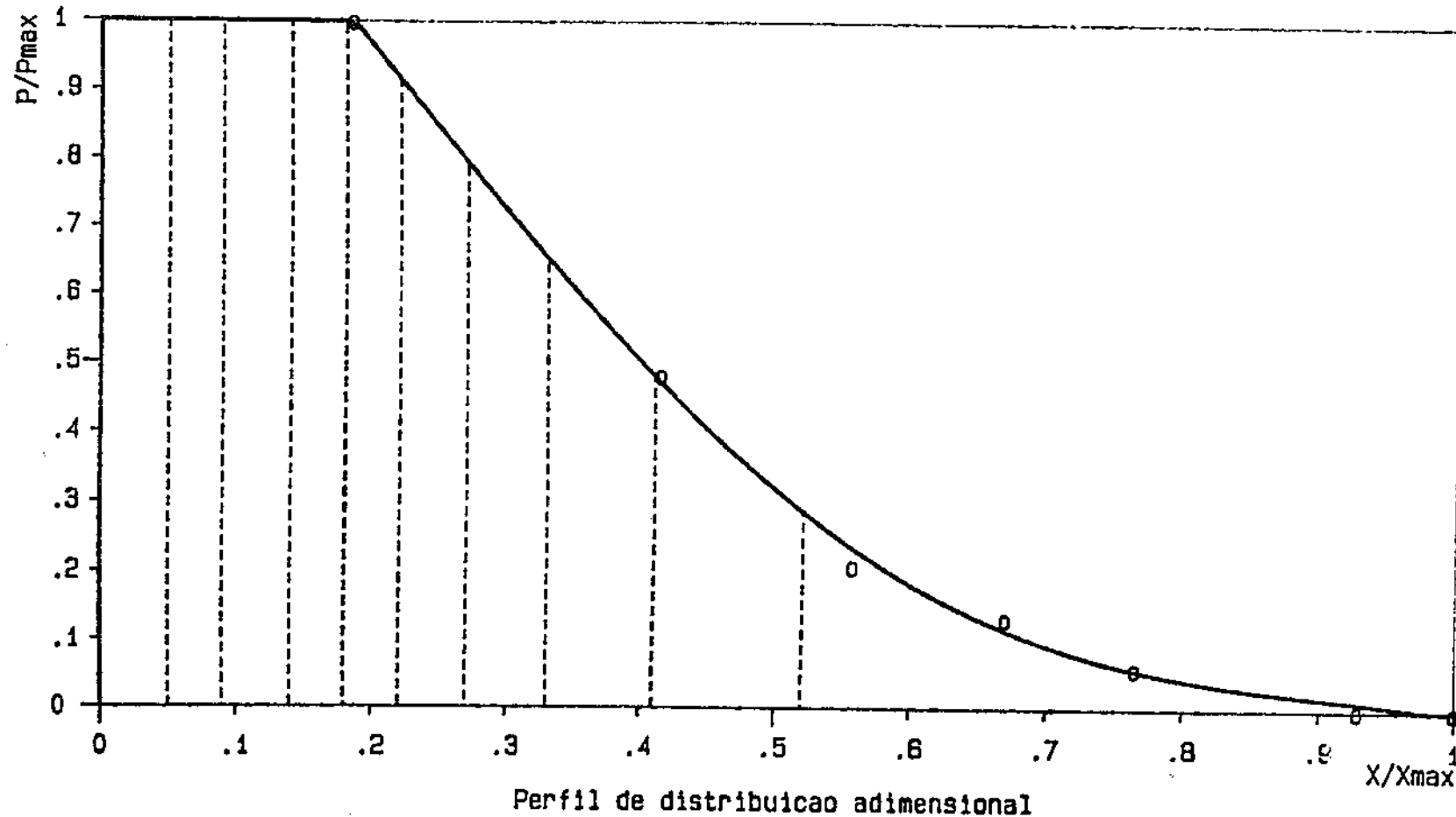
Ae/Ai: 1.5

Conicidade: 20

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = 1.41729871927$
 $+ (-1.81881983097 * x^1) + (-3.49028507783 * x^2)$
 $+ (7.08131712837 * x^3) + (-3.17757807271 * x^4)$

Aproximacao Polinomial do 4o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



APÊNDICE C.3 - VARIAÇÃO DA PRÉ-CIRCULAÇÃO DO JATO EXTERNO

BOCAIS ENSAIADOS

Nº DE bocal	α (graus)	γ (graus)	A_e/A_i
C-10	0	0	0,5
CIR-10	0	10	0,5
CIR-20	0	20	0,5
CIR-30	0	30	0,5
CIR-40	0	40	0,5
CIR-50	0	50	0,5

ENSAIO No.: C-10B

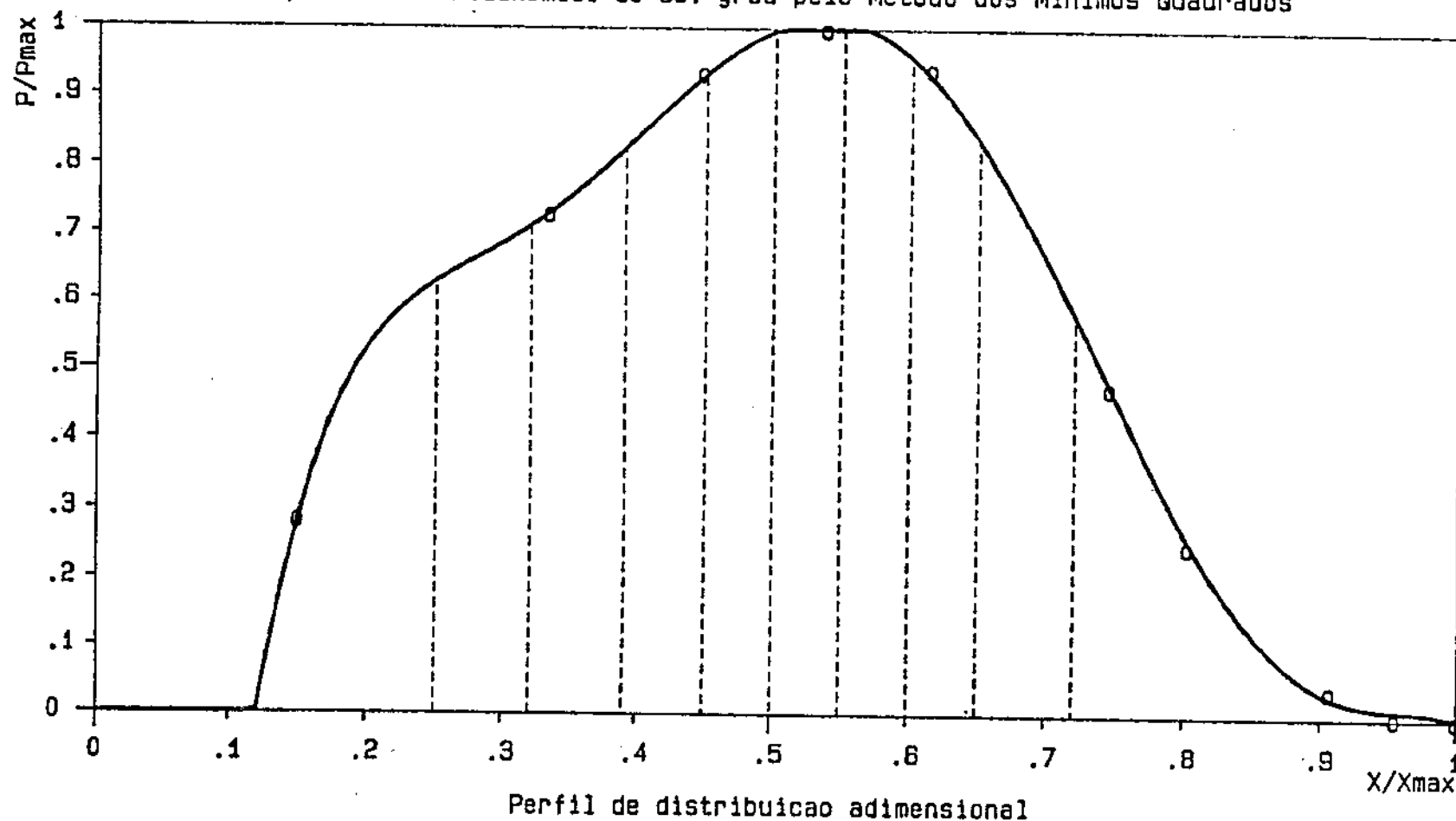
Ae/Ai: .5

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 0

Polinomio usado na aproximacao: $y = -3.87534530249$
 $+ (57.6342089118 * x ^ 1) + (-308.030784392 * x ^ 2)$
 $+ (807.42637468 * x ^ 3) + (-987.350982214 * x ^ 4)$
 $+ (322.219542463 * x ^ 5) + (382.819104508 * x ^ 6)$
 $+ (-345.081838984 * x ^ 7) + (74.0373589688 * x ^ 8)$

Aproximacao Polinomial do Bo. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



ENSAIO No.: CIR-10B

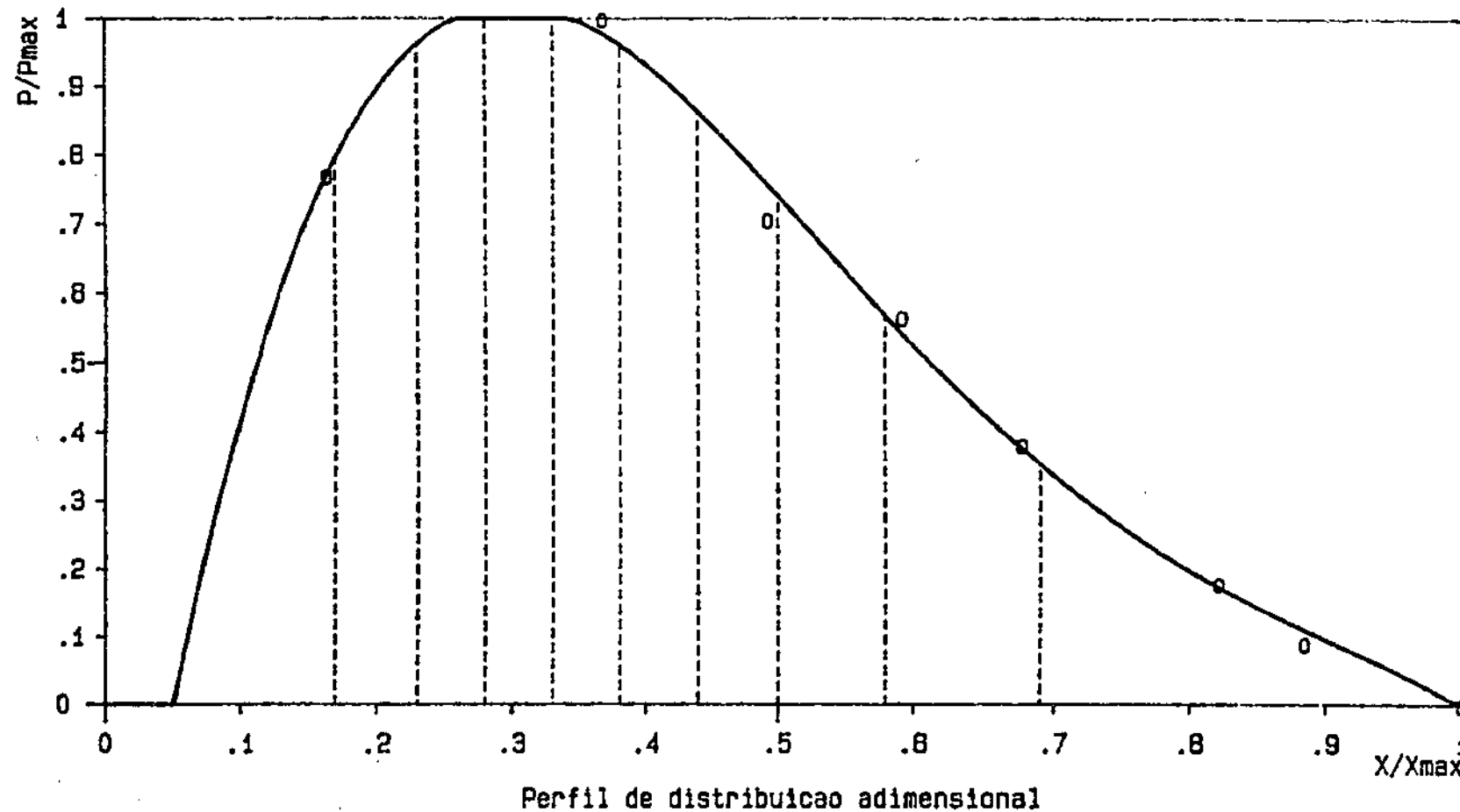
Ae/Ai: .5

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 10

Polinomio usado na aproximacao: $y = -.580984503224$
 $+ (13.220338882 * x ^ 1) + (-35.8080588982 * x ^ 2)$
 $+ (35.4484707659 * x ^ 3) + (-12.2850484828 * x ^ 4)$

Aproximacao Polinomial do 4o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.17
2	.23
3	.28
4	.33
5	.38
6	.44
7	.50
8	.58
9	.69
10	1.00

ENSAIO No.: CIR-20

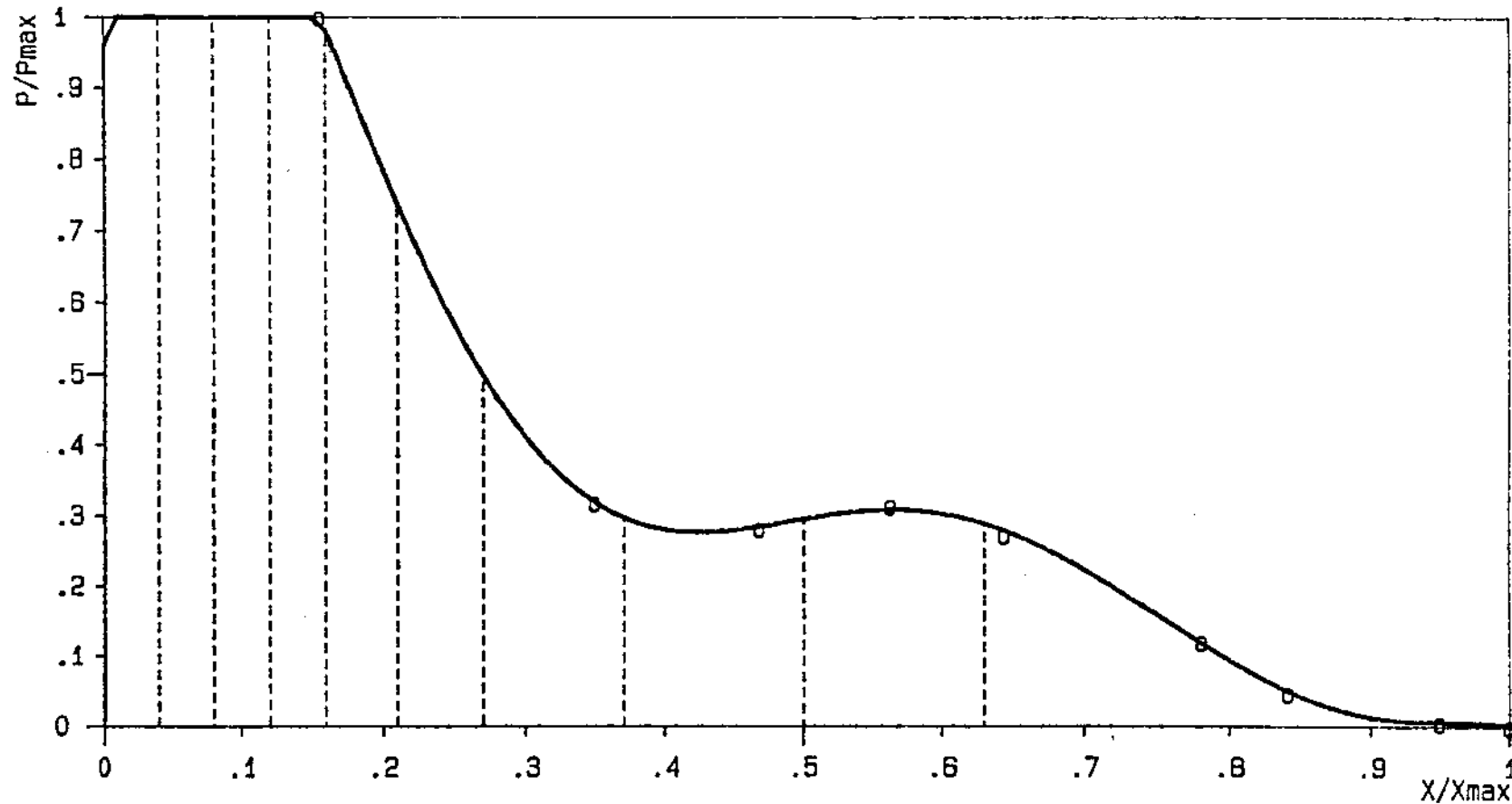
Ae/Ai: .5

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 20

Polinomio usado na aproximacao: $y = .957580999955$
 $+ (11.1236083563 * x ^ 1) + (-118.384217281 * x ^ 2)$
 $+ (399.411582396 * x ^ 3) + (-620.688278605 * x ^ 4)$
 $+ (455.886578618 * x ^ 5) + (-128.106928239 * x ^ 6)$

Aproximacao Polinomial do 6o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.04
2	.08
3	.12
4	.16
5	.21
6	.27
7	.37
8	.50
9	.63
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: CIR-30

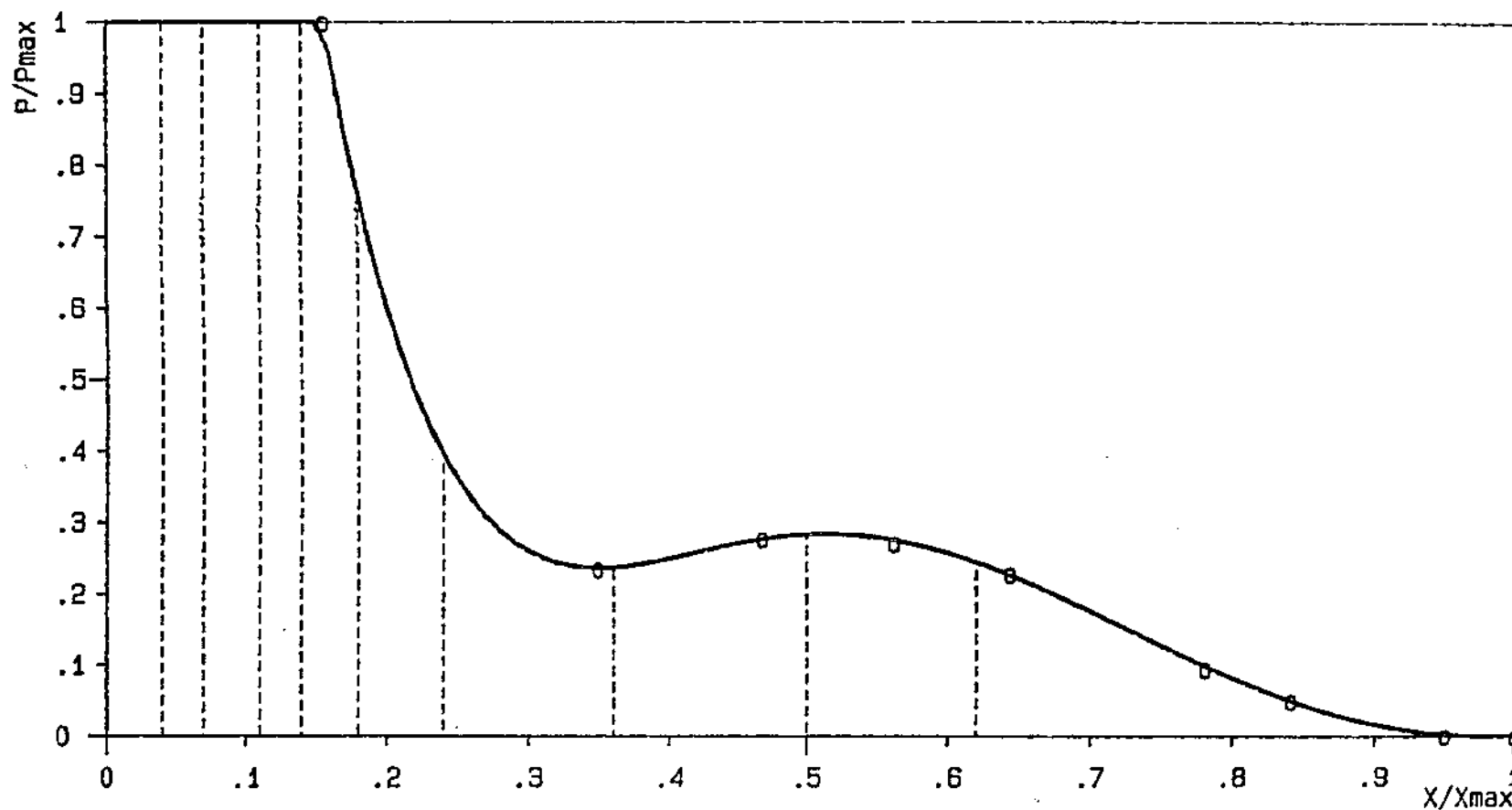
Ae/Ai: .5

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 30

Polinomio usado na aproximacao: $y = 5.09111174179$
 $+ (-46.5961036982 * x^1) + (173.616754258 * x^2)$
 $+ (-320.119824539 * x^3) + (310.092772385 * x^4)$
 $+ (-151.832791758 * x^5) + (29.8480027978 * x^6)$

Aproximacao Polinomial do 6o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.04
2	.07
3	.11
4	.14
5	.18
6	.24
7	.36
8	.50
9	.62
10	.97

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: CIR-40B

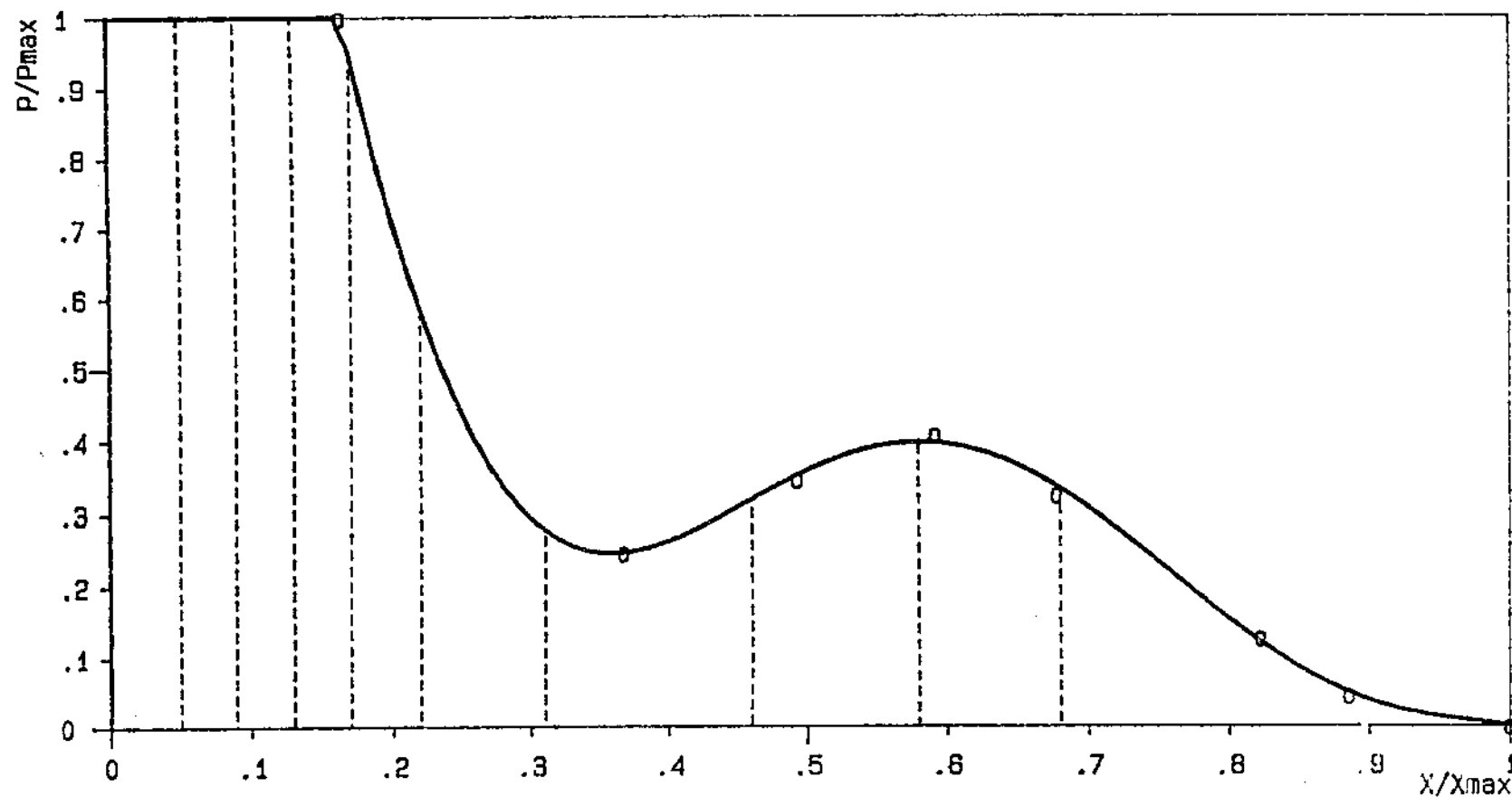
Ae/Ai: .5

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 40

Polinomio usado na aproximacao: $y = 3.39029528605$
 $+ (-18.7566149898 * x^1) + (13.4683839056 * x^2)$
 $+ (115.829312208 * x^3) + (-294.446600586 * x^4)$
 $+ (281.346245783 * x^5) + (-80.8293596329 * x^6)$

Aproximacao Polinomial do 6o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.05
2	.09
3	.13
4	.17
5	.22
6	.31
7	.46
8	.58
9	.68
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional

ENSAIO No.: CIR-50

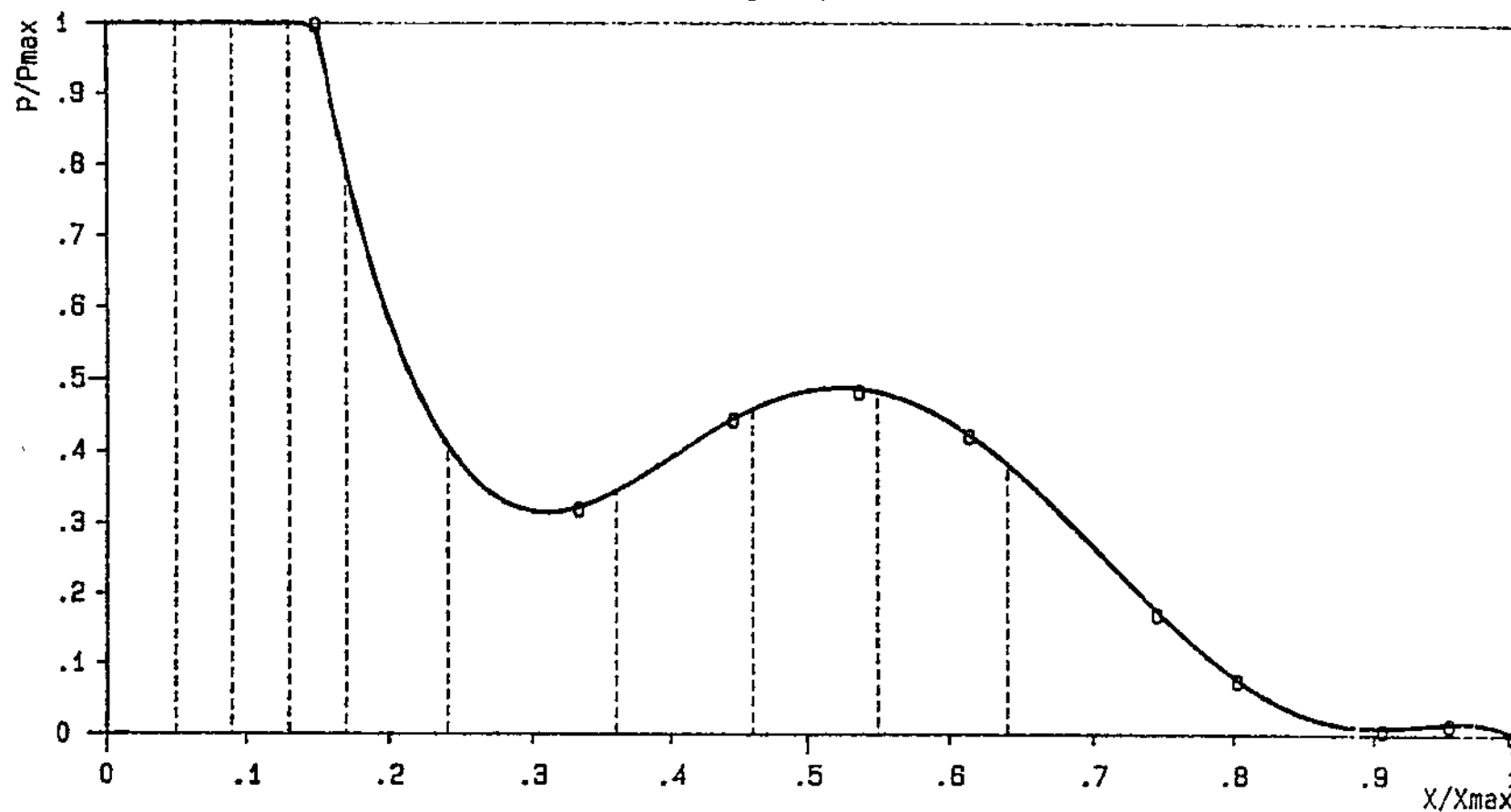
Ae/Ai: .5

Conicidade: 0

Pre-rotacao: 50

Polinomio usado na aproximacao: $y = 4.205946898$
 $+ (-34.8510732324 * x^1) + (107.688296898 * x^2)$
 $+ (-126.002648047 * x^3) + (20.074204923 * x^4)$
 $+ (58.366882632 * x^5) + (-50.4721520833 * x^6)$
 $+ (40.7569118403 * x^7) + (-19.7840491423 * x^8)$

Aproximacao Polinomial do 8o. grau pelo Metodo dos Minimos Quadrados



decil	abscissa
1	.05
2	.09
3	.13
4	.17
5	.24
6	.36
7	.46
8	.55
9	.64
10	1.00

Perfil de distribuicao adimensional