

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



PROJETO, CONSTRUÇÃO E ENSAIO DE UM APARELHO PARA  
DISTRIBUIR PARTÍCULAS SÓLIDAS POR AVIÃO.

Eng. LEONIDAS HILDEBRAND JÚNIOR

Orientador: Prof. Dr. Michael George Maunsell

DEDALUS - Acervo - EESC



31100017974

Dissertação apresentada à Escola de  
Engenharia de São Carlos, da Universidade de  
São Paulo, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia.  
área: Engenharia Mecânica.

São Carlos  
1994



Class. TFSE-EEESC  
Cutt. 2739  
Tombo 153/95

Eng. mecânica

it 0742729

## Dedicatória

Dedico este trabalho ao Professor Fernando Martini Catalano, responsável pelo meu ingresso no programa de Pós-Graduação, como prova de reconhecimento.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Michael George Maunsell - pela orientação, paciência e confiança que depositou em mim.

Aos Senhores Iberê Iori e Carlos Alberto Maragno - pelas facilidades a mim atribuídas durante a elaboração deste trabalho.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC que, cada um a sua maneira, contribuíram para a elaboração deste trabalho, são eles:

- Prof. Dr. Mario Pinotti Junior;
- Prof. Dr. Benedito de Moraes Purquério;
- Prof. Dr. Antonio Moreira dos Santos;
- Prof. Dr. Duilio Venanzi;
- Prof. Dr. Dawilson Lucato;
- Prof. Dr. Benedito Di Giacomo;
- Prof. Dr. Alvaro Costa Neto;
- Prof. Dr. Francisco José Benevenuto.

Aos Professores do LAE - pelo parecer positivo numa hora de aflição financeira.

Aos Técnicos e funcionários do LAE - pelo apoio nos experimentos.

Aos Técnicos e funcionários do Laboratório de Termodinâmica, em especial ao Torres - pelas ferramentas e aparelhos emprestados.

Ao piloto Agrícola e entusiasta Engenheiro Agrônomo Marcos Vilela de M. Monteiro- pelo gentil empréstimo de seus apontamentos pessoais, livros e apostilas.

A todos aqueles cujos nomes não estão nesta lista, mas sim em minha mente, e pelos quais cultivo profunda gratidão.

## ÍNDICE

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	ii
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	iii
<b>ÍNDICE</b> .....	iv
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	viii
<b>RESUMO</b> .....	ix
<b>ABSTRAC</b> .....	x
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2.. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
2.1. ORIGEM DO PRIMEIRO APARELHO DISTRIBUIDOR DE SÓLIDOS.....	3
2.2. DISTRIBUIDOR TIPO VENTURI OU PRESSÃO DINÂMICA .....	6
2.3. DISTRIBUIDOR POR AR FORÇADO .....	7
2.4. DISTRIBUIDOR ROTATIVO.....	9
2.5. DISTRIBUIDOR TETRAHÉDRICO.....	10
2.6. DISTRIBUIDOR TIPO AEROFÓLIO.....	11
2.7. DISTRIBUIDOR S.B.1.....	12
2.8. TIPOS DE APARELHOS JÁ EXISTENTES PARA AERONAVES DE ASAS ROTATIVAS.....	13
<b>3. DIMENSIONAMENTO DO BOCAL AERODINÂMICO</b> .....	15
3.1 O EFUSOR.....	15
3.1.1. <i>O Contorno da Contração</i> .....	15
3.1.2. <i>Cálculo do Contorno da Contração</i> .....	16
3.1.3. <i>Construção do efusor</i> .....	18
3.1.4. <i>Avaliação Experimental do comportamento do escoamento no Interior do efusor</i> .....	21
3.2. O DIFUSOR.....	22
3.2.1 - <i>Critérios para a construção do Difusor</i> .....	23
3.2.2 - <i>Avaliação Experimental do Difusor</i> .....	24
3.3 - CONFIGURAÇÃO FINAL.....	27
3.3.1 - <i>Avaliação Experimental da distribuição de velocidade, pressão e comportamento do escoamento no interior do conjunto do bocal aerodinâmico</i> .....	27
<b>4. O BOCAL COMO DISPOSITIVO DISTRIBUIDOR DE PARTÍCULAS SÓLIDAS</b> .....	33
4.1- A INSTALAÇÃO DA(S) ABERTURA(S).....	34
4.1.1 - <i>Formato da(s) Abertura(s)</i> .....	34
4.1.2 - <i>A confluência entre o escoamento interno do bocal e o escoamento proveniente das aberturas</i> .....	37
4.1.3 - <i>Avaliação experimental do escoamento interno do bocal com as fendas abertas</i> .....	38
4.2- O ESCOAMENTO NO INTERIOR DO CONDUTO QUE LIGA AS FENDAS NA "GARGANTA" DO BOCAL AO COMPARTIMENTO DE CARGA DO AVIÃO.....	43
4.2.1- <i>Determinação da quantidade de partículas sólidas transportadas pneumaticamente no interior do conduto</i> .....	44

<b>5. DISCUSSÃO.....</b>	<b>49</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>51</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....</b>	<b>52</b>
<b>8 -BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>53</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Avião Curtiss JN-6H equipado com pulverhadora acionada por manivela	4
Figura 2	Avião Deha villand DH-48 equipado com pulverhadora com "boca" na "barriga" do avião	5
Figura 3	Distribuidor tipo pressão dinâmica montado em um avião Piper Pawnee.	6
Figura 4	Esquema do distribuidor por ar forçado	7
Figura 5	Avião Grumman equipado com distribuidor por ar forçado	8
Figura 6	Corte esquemático de um avião equipado com distribuidor por ar forçado com motor auxiliar	8
Figura 7	Vista do avião equipado com distribuidor por ar forçado com motor auxiliar de 125 HP	9
Figura 8	Distribuidor rotativo montado em um avião Stearman	10
Figura 9	Esquema de um distribuidor tetrahédrico	11
Figura 10	Vista esquemática de um distribuidor tipo aerofólio	12
Figura 11	Vista esquemática de um distribuidor S.B.1	13
Figura 12	Vista esquemática de um helicóptero abastecendo um distribuidor tipo caixa cônica	14
Figura 13	Vista esquemática de um helicóptero equipado com distribuidor de discos rotativos	14
Figura 14	Contorno da contração	18
Figura 15	Vista do molde de madeira desmontado	19
Figura 16	Vista do molde de madeira montado	19
Figura 17	Vista lateral do efusor mostrando o contorno da contração	20
Figura 18	Vista frontal do efusor mostrnado a razão da contração	20
Figura 19	Efusor com suporte na câmara de ensaio do túnel	21
Figura 20	Ângulo equivalente de cone versus AR	23

Figura 21	Relação de área (AR) versus comprimento do difusor dividido pelo raio da “garganta”	23
Figura 22	Difusor com ângulo de cone $\theta = 5,25^\circ$ e comprimento $L = 0,64\text{m}$ acoplado ao efusor na câmara de ensaio do túnel	25
Figura 23	Difusor com $\theta = 6,05^\circ$ e $L = 0,45\text{m}$ com complemento de $0,19\text{m}$	26
Figura 24	Configuração final do conjunto do bocal	27
Figura 25	Coordenadas das tomadas de pressão estática na parede do bocal	28
Figura 26	Multimanômetro de querosene colocado verticalmente	29
Figura 27	$C_p$ experimental versus $X/L$	31
Figura 28	$C_p$ experimental e teórico versus $X/L$	33
Figura 29	Corte esquemático do tubo de seção circular, com uma única fenda na “garganta”	36
Figura 30	Corte esquemático do tubo de seção circular achatado, com duas fendas nas laterais da “garganta” do bocal	37
Figura 31	Corte esquemático mostrando a região de instabilidade no escoamento sem as cavidades em forma de leque	40
Figura 32	Corte esquemático mostrando o escoamento com as cavidades em forma de leque inseridas na parede interna do bocal	41
Figura 33	Distribuição de $C_p$ ao longo do bocal com o acesso às fendas aberto e fechado	43
Figura 34	Corte esquemático mostrando a montagem do experimento para a determinação da vazão, pressão e velocidade do escoamento induzido pelo bocal	45
Figura 35	Corte esquemático mostrando a bancada de calibração da bomba de sucção	47
Figura 36	Corte esquemático mostrando a montagem do experimento para a determinação da vazão de material sólido	48



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Coordenadas da contração	17
Tabela 2	Valores experimentais para a seção de difusão	25
Tabela 3	Valores experimentais da distribuição de velocidade e pressão ao longo do bocal	30
Tabela 4	Valores experimentais e teóricos de $C_p$ ao longo do bocal	32
Tabela 5	Valores experimentais de $C_p$ com o acesso do conduto às fendas aberto e fechado	42

## RESUMO

Com a finalidade de alcançar maior precisão na semeadura aérea e otimizar a aplicação de sólidos leves por intermédio de um avião, foi projetado e construído, a partir da configuração geométrica de bocais convergentes-divergentes e utilizando o princípio da experiência de Venturi, um bocal aerodinâmico capaz de produzir, em sua "garganta", uma redução de pressão suficientemente grande para induzir um fluxo de ar no interior de um conduto. Este fluxo de ar foi utilizado como transporte pneumático para as partículas sólidas. Através de experimentação em túnel de vento foram determinadas as pressões estática e total a fim de se calcular as velocidades do escoamento dentro do sistema e a vazão de partículas sólidas no interior do conduto. São discutidos parâmetros como: arrasto aerodinâmico, precisão da dosagem e também é feito um levantamento comparativo com métodos e sistemas já existentes.

## ABSTRAC

With the aim of obtaining greater precision in aerial seeding and of optimizing the aerial application of light solids, an aerodynamic nozzle was constructed using the Venturi principle to produce sufficiently low pressure in the throat for the induction of a reasonable air flow through an adjacent tube. The air flow thus induced was used to transport light solid particles from a container to the throat. Local air flow velocities and the flow rate of the solid particles were calculated from pressure measurements made within the system. Parameters such as aerodynamic drag and dosage precision are discussed and a comparison is made with existent methods and systems.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de grande extensão territorial, tendo ainda, muitas regiões inexploradas e de difícil acesso. A nação desenvolve um grande esforço para torná-las férteis e produtivas. No desenvolvimento destas regiões, a aviação agrícola ocupa um lugar de preponderante importância, desde que, evidentemente, se tome o devido cuidado para não prejudicar o microclima e o ecossistema destes lugares.

Baseado nesta prerrogativa, o autor, sendo profissional do ramo de agronomia, sente uma certa obrigação pessoal de utilizar o seu trabalho, apesar deste ser próprio da área de engenharia mecânica, para contribuir ao desenvolvimento da aviação agrícola no Brasil, nesta hora de grande e, porque não dizer, desordenada demanda.

Em levantamentos feitos em lugares entre os paralelos 15 e 17 da região centro-oeste do Brasil, foi possível verificar a utilização indevida de aeronaves civis na semeadura de gramíneas para a formação de pastagens, utilizadas na implantação de grandes projetos agropecuários. O procedimento adotado, até então, é o de queimar grandes áreas de florestas e depois, sobre as cinzas, lançar manualmente através da janela ou porta do avião as sementes das gramíneas. Tal prática, além de imprecisa e perigosa, por utilizar um avião inadequado<sup>1</sup>, forma uma pastagem desuniforme e bem pouco eficiente<sup>2</sup>, uma vez que grandes áreas de terra sem cobertura vegetal, ficam à mercê da erosão eólica e pluvial.

Por outro lado, na região sul do país, o problema existe na semeadura do trevo azul em tabuleiros utilizados no cultivo do arroz irrigado. Pelo fato do terreno ainda estar encharcado impedindo a entrada de máquinas agrícolas convencionais, e sendo a quantidade de semente distribuída por unidade de área muito pequena, a semeadura é

---

<sup>1</sup> O termo "inadequado" usado no texto não implica no uso obrigatório de um avião agrícola, mas sugere a adequação de aeronaves comuns para o uso em questão

<sup>2</sup> O termo "pouco eficiente" usado, pelo autor, procura demonstrar que utilizando este procedimento, a pastagem somente estará apta ao recebimento do gado após um período de 18 a 20 meses. Comparativamente, num procedimento racional de formação de pastagens, este período poderá ser reduzido para 8 a 10 meses.



feita por avião agrícola, entretanto, há a necessidade da adição de material inerte junto a semente no compartimento de carga do avião na tentativa de se chegar a uma dosagem adequada.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento, construção e ensaio de um bocal aerodinâmico capaz de promover com precisão, segurança e eficiência a semeadura de gramíneas para pastagens, assim como a aplicação de sólidos leves, como por exemplo os inseticidas biológicos e outros.

Para a confecção do bocal pretende-se partir da configuração geométrica de bocais convergentes-divergentes, tendo seu princípio de funcionamento baseado na experiência de Venturi<sup>3</sup>.

Na região de menor área transversal, denominada "garganta", deverá ser produzido um abaixamento de pressão capaz de gerar um fluxo de ar no interior de um conduto. Este fluxo de ar deverá ter velocidade suficiente para arrastar as partículas sólidas do "Hopper" (compartimento de carga do avião) até o bocal.

Segundo pesquisas realizadas na UNICAMP (Universidade de Campinas) este tipo de transporte pneumático é pouco eficiente para grandes quantidade de sólidos pesados. Tal hipótese pode ser considerada como sendo uma das limitações para o uso do bocal aerodinâmico. Entretanto, como a quantidade de semente utilizada por hectare para a formação de pastagens é pequena e seu peso específico bastante baixo, é possível que o bocal aerodinâmico venha preencher uma lacuna na aviação agrícola, uma vez que as máquinas já existentes são incapazes de distribuir partículas sólidas em pequenas vazões com eficiência e precisão.

---

<sup>3</sup> Venturi demonstrou a existência de uma coroa de depressão em torno da veia líquida dentro de um bocal introduzindo, naquela região, um tubo de vidro com uma das pontas mergulhada dentro de um segundo recipiente com líquido. O fenômeno pode ser visualizado pelo fato do líquido do segundo recipiente subir pelo tubo de vidro.

## 2.. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O inventor da aviação agrícola foi Alfred Zimmermann, um agente florestal alemão, que viu na utilização de um avião com tanques reservatórios e pulverizadores, a possibilidade da aspersão de solução de cal sobre florestas, e, com isto, o controle ao ataque de lagartas (MAAN, 1967). Pode parecer estranho o termo "inventor", entretanto é a expressão da verdade, uma vez que Zimmermann, junto ao Imperial Patent Office de Berlim recebeu, em 29 de março de 1911, um diploma legal de invento sob o número 247028, classe 45K grupo 4/35, que lhe amparava para a prática da aplicação aérea de produtos químicos.

Embora tendo recebido a carta patente, Zimmermann não conseguiu pôr em prática sua idéia, pois na época não havia desenvolvimento tecnológico suficiente para a construção do aparato (QUANTICK, 1985).

### ***2.1. Origem do primeiro aparelho distribuidor de sólidos***

Nos anos seguintes à carta patente de Zimmermann, várias tentativas de utilização do avião na agricultura foram levadas a efeito, algumas com resultados pobremente positivos, outras com resultados negativos. Foi John Chaytor, membro de um grupo de neozelandeses, o primeiro a idealizar e utilizar um aparelho distribuidor de sólidos (ALEXANDER & TULLET, 1967). Chaytor semeou gramíneas em uma área pantanosa e inacessível utilizando um balão de ar quente. Seu artefato consistia em um saco de sementes com uma abertura pela qual as sementes caíam gradativamente à medida que homens, convenientemente situados a cada lado do campo, puxavam o balão através de cordas. Esse tipo de aparelho inspirou aqueles utilizados até hoje em helicópteros.

Apesar de Chaytor ter obtido resultados práticos em anos anteriores, somente em março de 1922 que C. R. Neillie e J. L. Houser escreveram um artigo para a

*National Geographic Magazine* narrando um trabalho realizado em agosto de 1921 na estação experimental de Ohio para combater uma infestação de lagartas "Catalpa Sphinx". O experimento consistiu em polvilhar arseniato de chumbo utilizando o avião militar de observação CURTIS JN6. O aparelho distribuidor utilizado nada mais era do que uma caixa colocada no assento traseiro do avião. A distribuição do produto era feita por intermédio de um orifício no piso do posto posterior do avião (HOUSER, 1922).

Em julho de 1922 houve a primeira evolução do aparelho. A caixa que ficava no assento traseiro, foi estrategicamente colocada mais adiante permitindo, assim, que uma segunda pessoa pudesse acionar um agitador por intermédio de uma manivela (Figura 1). A segunda evolução veio pouco tempo depois com a adaptação de uma "boca" na "barriga" do avião, conforme mostra a Figura 2, o que permitia um melhor espalhamento das partículas.



FIGURA 1 - Avião Curtiss JH-6H equipado com pulvilhadora acionada por manivela.

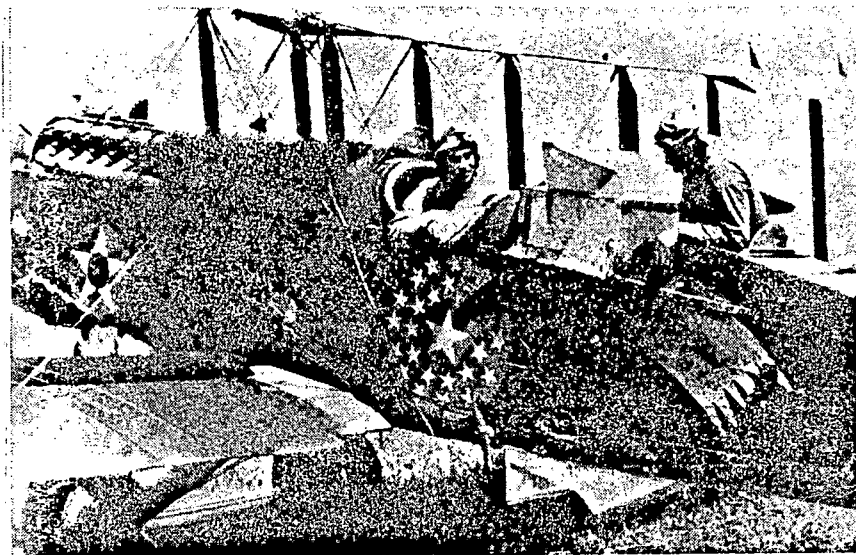


FIGURA 2 - Avião Dehavilland DH-48 equipado com pulverhadora com "boca" na "barriga" do avião.

No Brasil, o primeiro vôo agrícola registrou-se em 1947, quando em Pelotas (RS), no dia 19 de agosto, o Eng. Agrônomo Leôncio Fontelles deu combate a uma inusitada infestação de gafanhotos utilizando-se um avião MUNIS-9, de instrução do aeroclube local, adaptado com uma pulverhadora. O referido Engenheiro apoiado pelo piloto civil Clóvis Candiota inaugurava a aviação agrícola em nosso país polvilhando BHC sobre uma "nuvem" de gafanhotos em vôo, com resultados altamente positivos. Tal feito teve repercussão nacional e começou a ser disseminado e evoluído como uma ferramenta em prol da agricultura, encontrando na ocasião maior espaço no combate à broca do café (EMBRAER, 1979).

Além dos aparelhos utilizados por Neillie e Houser em 1922, a literatura mundial menciona apenas sete tipos de distribuidores de sólidos (QUANTICK, 1985).

Em essência, a função de um equipamento de aplicação de sólidos é lançar as partículas em uma faixa o mais larga possível, respeitando uma deposição que permita, com recobrimentos em passadas adjacentes e progressivas, uma distribuição de razoável uniformidade (CHRISTOFOLETTI, 1972).



## **2.2. Distribuidor tipo Venturi ou pressão dinâmica**

Também conhecido como "difusor" e, popularmente "pé de pato", é o distribuidor mais usado e mais conhecido em todo o mundo (MONTEIRO E CHRISTOFOLETTI, 1978).

Esta popularidade se deve à sua robusticidade, facilidade de operação e boa uniformidade na faixa de deposição. Entretanto, possui um arrasto aerodinâmico muito grande aumentando o consumo de combustível e prejudicando o traslado do avião de um campo de trabalho para outro (STEPHENSON, 1975).

A Figura 3 mostra o aparelho acoplado em uma aeronave agrícola Piper Pawnee.

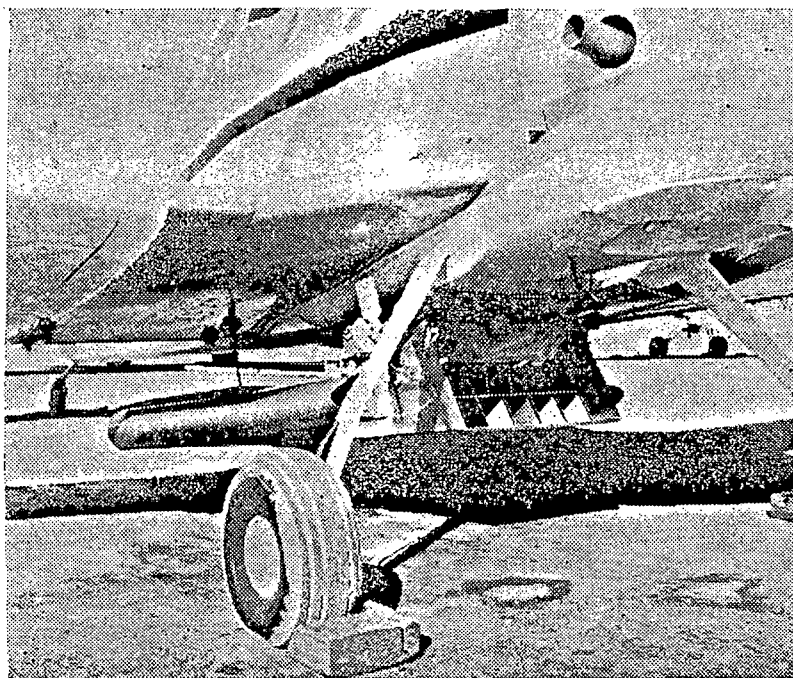


FIGURA 3 - Distribuidor tipo pressão dinâmica montado em um avião Piper Pawnee.

### 2.3. Distribuidor por ar forçado

ROBERTS & SMITH (1963), utilizando um projeto da Universidade Estadual do Mississippi, desenvolveram um sistema de ar forçado. O sistema consta de um ventilador que capta potência diretamente do motor principal do avião através de correias (Figuras 4 e 5).

Este sistema, por necessitar de muita potência do motor do avião, fazia com que o desempenho do vôo fosse prejudicado causando um espalhamento do material não muito eficaz.

Visando obter um melhor rendimento do sistema, os dois pesquisadores criaram uma nova versão do aparelho. Esta nova versão era equipada com um motor auxiliar de 125HP para acionar o ventilador. O sistema foi grandemente melhorado, entretanto, para que isso fosse possível foi desenhado e construído um novo avião para a operação (Figuras 6 e 7). Apesar de terem obtido sucesso, os custos não justificavam o seu emprego (AKESSON & YATES, 1975).

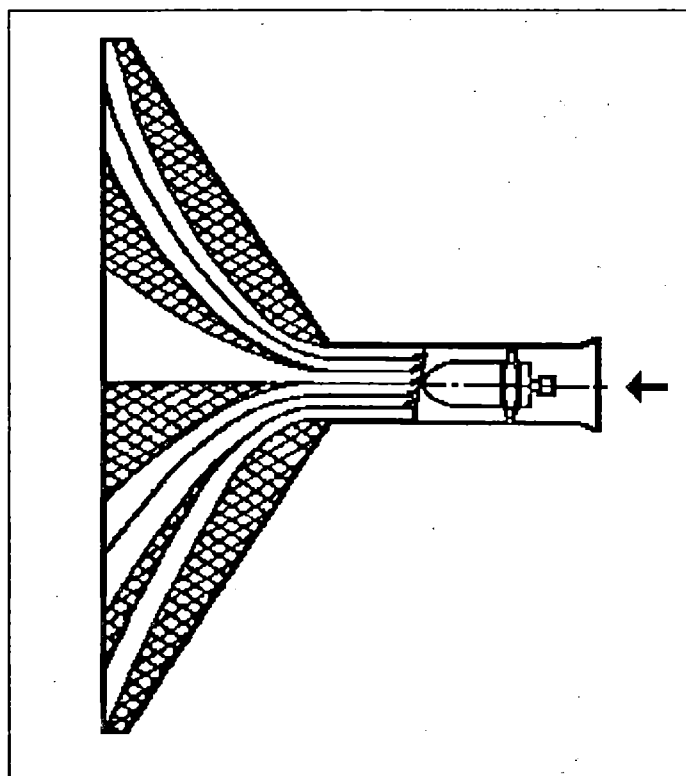


FIGURA 4 - Esquema do distribuidor por ar forçado.

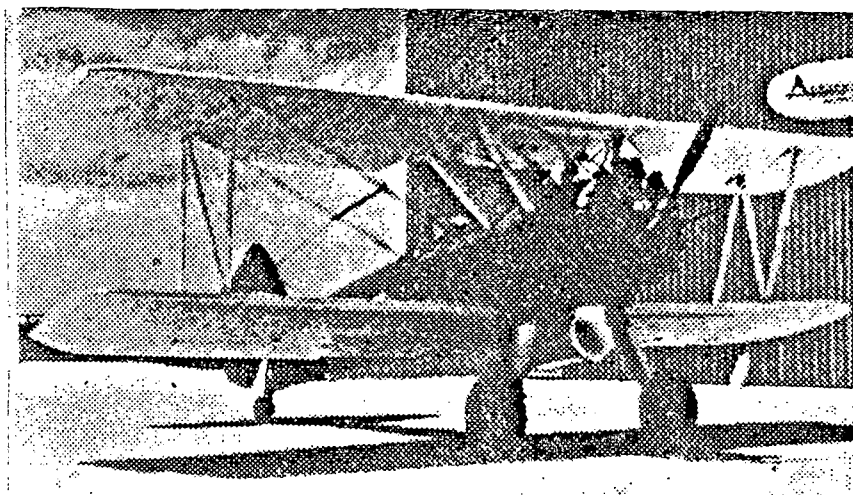


FIGURA 5 - Avião Grumman equipado com distribuidor por ar forçado.

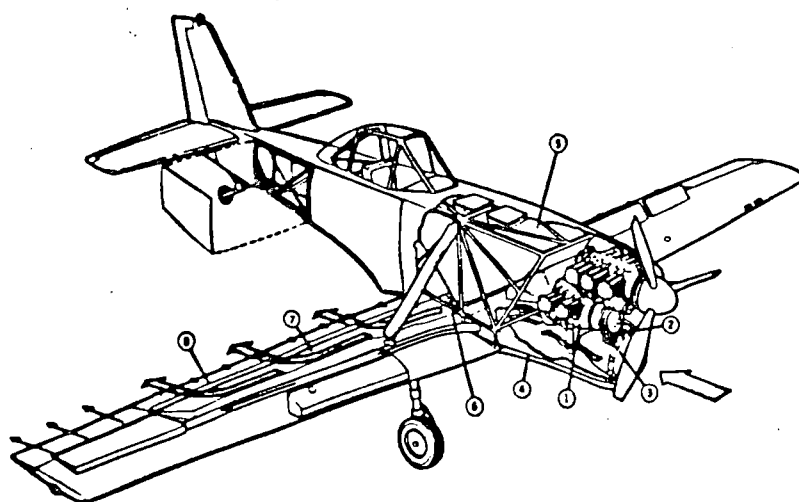


FIGURA 6 - Corte esquemático de um avião equipado com distribuidor por ar forçado com motor auxiliar.

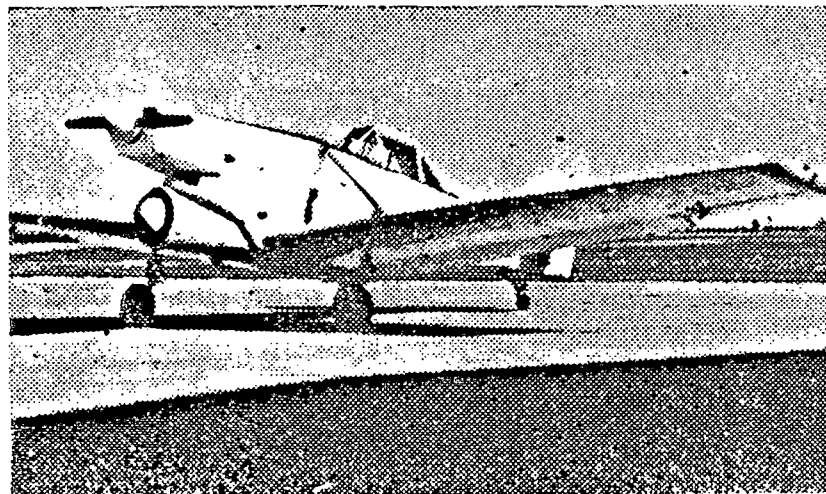


FIGURA 7 - Vista do avião equipado com distribuidor por ar forçado com motor auxiliar de 125 HP.

#### **2.4. Distribuidor rotativo**

O distribuidor rotativo surgiu da necessidade de se eliminar o arrasto aerodinâmico causado pelo distribuidor de pressão dinâmica (AKESSON & YATES, 1975).

Os trabalhos experimentais em torno do distribuidor rotativo foram feitos concomitantemente nos Estados Unidos, Europa e União Soviética por ROBERTS & SMITH (1963), BALTIN & BRANDT (1966) e AZAR'YAN (1966), que logo descobriram que a potência necessária para espalhar grandes quantidades de sólidos, por meio de discos giratórios, era muito maior do que o arrasto causado pelo distribuidor de pressão dinâmica. O distribuidor rotativo acoplado em uma aeronave STEARMAN é mostrado na Figura 8.

LEE & STEPHENSON (1969), em suas pesquisas junto à Universidade de Auckland da Nova Zelândia, uniram o distribuidor de pressão dinâmica ao distribuidor rotativo. O resultado desta união foi a distribuição perfeita do material, mas, ao unirem-se as duas máquinas, uniram-se também o arrasto aerodinâmico de uma com o consumo de potência da outra.



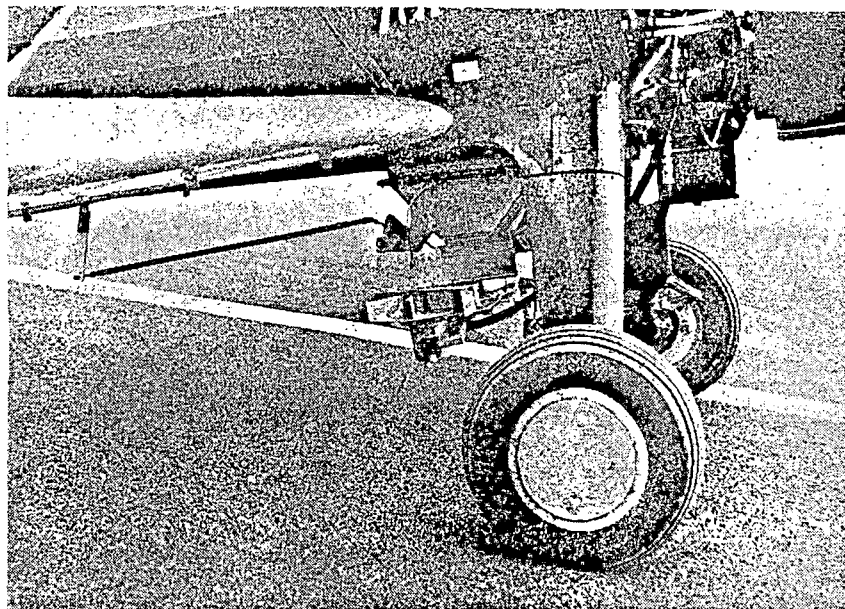


FIGURA 8 - Distribuidor rotativo montado em um avião Stearman.

### **2.5. Distribuidor Tetrahédrico**

É um aparelho que permite uma aplicação uniforme de sólidos em grandes faixas de deposição com baixo arrasto aerodinâmico. Segundo CHRISTOFOLETTI (1972) foi desenvolvido por Trayford e Holt em 1972 e Taylor em 1974, engenheiros da Divisão de Engenharia Mecânica da Organização de Pesquisa Científica e Industrial da Comunidade (C.S.I.R.O.), em Highett, Victorie, Austrália.

Segundo entrevista concedida por técnicos da Indústria Aeronáutica Neiva, o inconveniente deste aparelho é causar uma modificação do comportamento aerodinâmico do avião. Esta modificação acontece pelo fato do aparelho gerar uma pequena sustentação devido a sua configuração aerodinâmica (Figura 9).

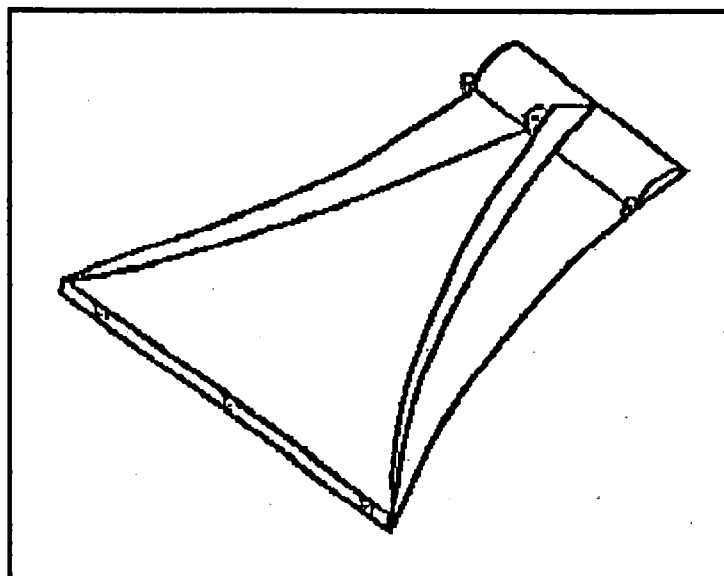


FIGURA 9 - Esquema de um distribuidor tetrahédrico.

## **2.6. Distribuidor tipo aerofólio**

Este distribuidor de origem norte-americana é comercialmente conhecido como "SWATHE MASTER". Como o próprio nome já diz, ele promove faixas de deposição bastante largas e também é muito eficaz para pequenas quantidades de sólidos.

Segundo LEE (1975), o fator limitante do aparelho é a granulometria do produto, que deve ser pequena e extremamente uniforme para não causar entupimento nos dutos (Figura 10).

Outro problema comum neste tipo de aparelho é o arrasto aerodinâmico, conforme afirmam MONTEIRO & CHRISTOFOLETTI (1978).

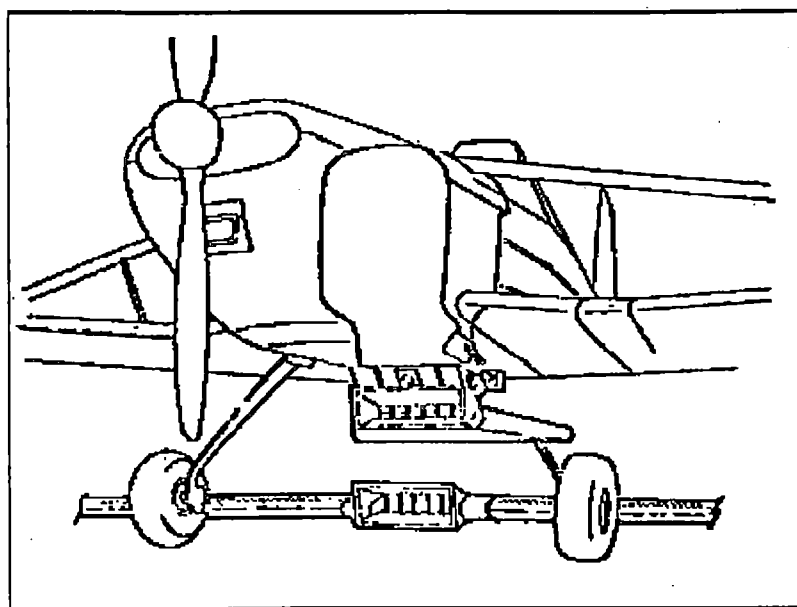


FIGURA 10 - Vista esquemática de um distribuidor tipo aerofólio.

### **2.7. Distribuidor S.B.1**

Desenvolvido na Inglaterra por J. J. Spillman em 1980, teve por objetivo eliminar os inconvenientes dos aparelhos já existentes. De fato, o aparelho apresenta baixo arrasto e pouco peso. Ainda em fase de teste, apresentou alguns resultados como a economia de combustível e a maior produtividade operacional, além de permitir maior versatilidade de aplicação devido a diversas geometrias alternativas das canaletas de direcionamento das partículas (QUANTICK, 1985).

O S.B.1 apresenta como fator limitante de seu uso o fato de ter sido projetado para um determinado tipo de aeronave, e também por não possuir uma tampa de alijamento de emergência (Figura 11).

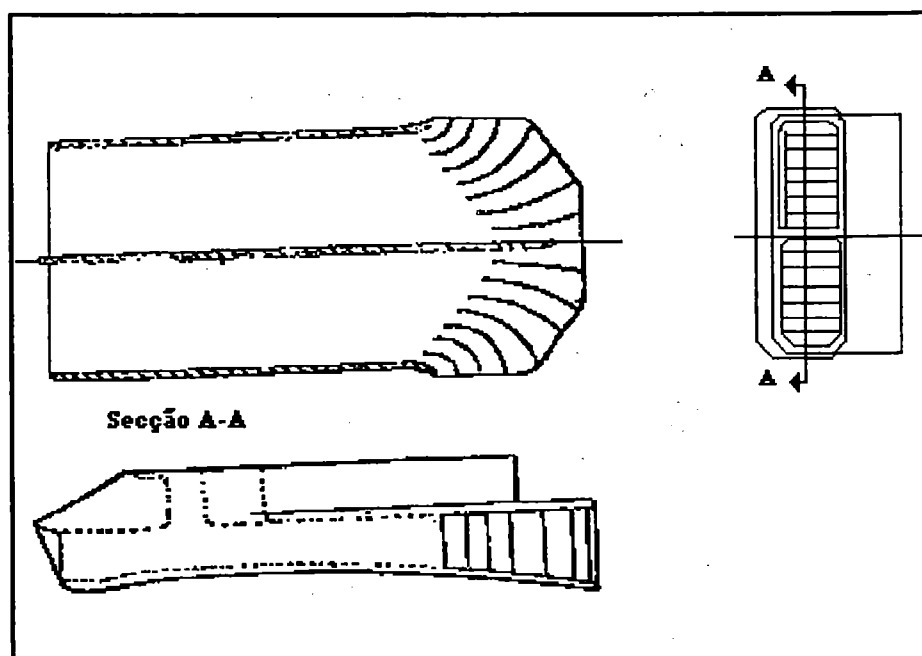


FIGURA 11 - Vista esquemática e corte de um distribuidor S.B.1.

## **2.8. Tipos de aparelhos já existentes para aeronaves de asas rotativas**

Os equipamentos para aplicação de sólidos utilizados em helicópteros não são muito diferentes daquele usado por John Chaytor para semear gramíneas nos anos 20. Normalmente são artefatos suspensos através de cabos presos ao helicóptero.

O aparelho constitui-se, basicamente, de uma caixa de forma cônica com um prato giratório preso no cone acionado por um motor à gasolina ou por motor hidráulico (OSEKI, 1988), conforme mostram as Figuras 12 e 13.

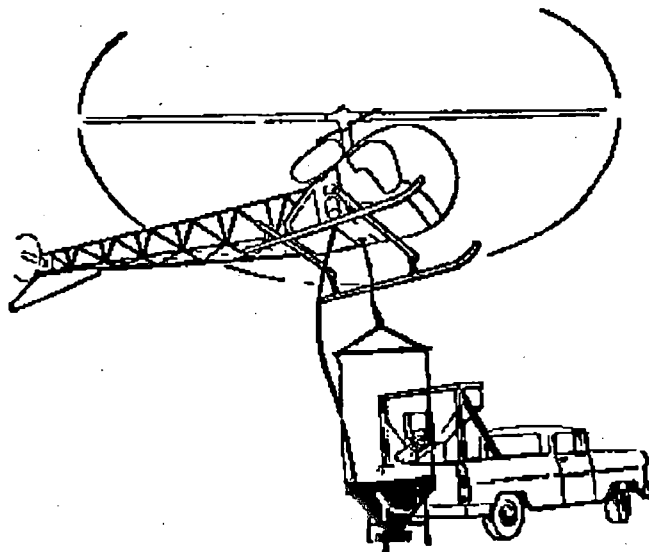


FIGURA 12 - Vista esquemática de um helicóptero abastecendo um distribuidor tipo caixa cônica.

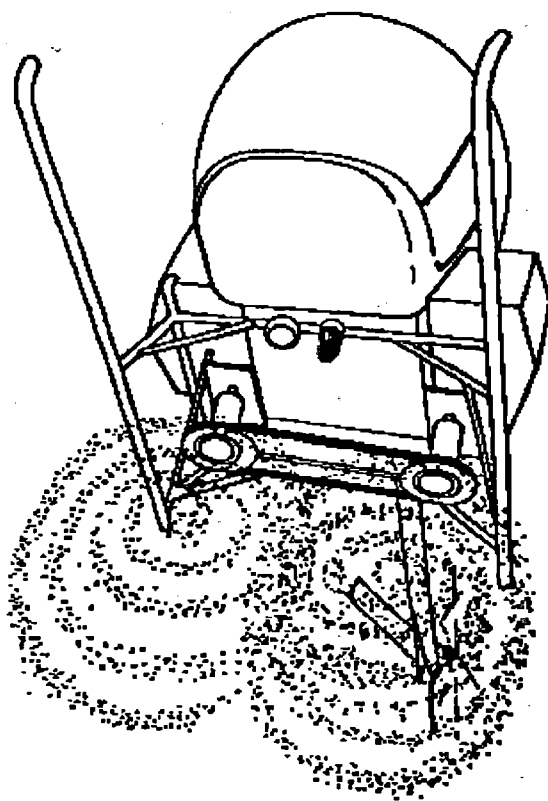


FIGURA 13 - Vista esquemática de um helicóptero equipado com distribuidor de discos rotativos.

### 3. DIMENSIONAMENTO DO BOCAL AERODINÂMICO

O dimensionamento do bocal aerodinâmico consiste na determinação da configuração geométrica de seus componentes, ou seja, o bocal convergente ou efusor, e o bocal divergente ou difusor. A área de menor secção transversal, denominada "garganta", foi tratada como sendo um ponto de interação entre os bocais e os parâmetros levantados nesta região são provenientes da geometria do conjunto.

#### 3.1 O Efusor

O efusor tem por finalidade acelerar gradualmente o escoamento, de modo a se obter tanto quanto possível, uma distribuição uniforme de velocidade na área de menor secção transversal e por consequência uma queda de pressão.

O dimensionamento do efusor foi feito baseando-se no tamanho de aparelhos rotativos para aspersão de líquidos (Micronair AU 5000). Como estes aspersores rotativos são bastante usados, a utilização das mesmas dimensões, já largamente estudadas e testadas pela comunidade atuante na aviação agrícola, elimina o período de adaptação por parte dos pilotos, além de assegurar que seu tamanho não trará prejuízo nas manobras de solo, nem tão pouco em pousos ou decolagens.

Desta forma, a secção de efusão fica com uma área de entrada de  $0,074 \text{ m}^2$ , contraindo-se até a área de menor secção transversal de  $0,019 \text{ m}^2$ , resultando uma razão de contração de 1:4 num comprimento de 0,35 m.

##### 3.1.1. O Contorno da Contração

Houve especial atenção a esta fase do trabalho, uma vez que, segundo CATALANO (1988), o contorno da contração influencia grandemente a eficiência do conjunto do bocal aerodinâmico. Buscou-se estabelecer um contorno da contração que



fizesse com que o escoamento na seção de efusão fosse bastante uniforme e livre de descolamento da camada limite.

Levando-se em conta estes fatores, optou-se por utilizar na seção de efusão uma contração que segue o contorno de arcos cúbicos na forma  $y = ax^3$ , uma vez que efusores com curvatura elíptica são muito sensíveis a erro na construção pelo fato de que a junção da seção curva com a área de menor secção transversal deve ser feita no ponto de tangência da elipse.

### 3.1.2. Cálculo do Contorno da Contração

O contorno da contração foi calculado segundo o método estabelecido por MOREL (1977).

Então tem-se:

$RC = 4$ , razão de contração

$L = 0,350$  m, comprimento do efusor.

$R1 = 0,153$  m, raio de entrada do efusor.

$R2 = 0,078$  m, raio da área de menor secção transversal.

$Xm = 0,200$  m, ponto de inflexão

$L/D1 = 1,144$

$X = 0,57$ , onde  $X = xm/L$

Com estes valores tem-se

$C_{Pe} = 0,25$  e  $C_{Ps} = 0,048$

Que satisfazem as condições, uma vez que:

$0,85 < L/D1 < 1,5$ ;  $0,2 < X < 0,8$ ;  $C_{Pe} > 0,1$  e  $C_{Ps} < 0,1$

A equação do contorno fica então:

Para  $0 < X < 0,20$

$D/D1 = 1 - 1,509 (x/L)$

e para  $0,20 < x < 0,35$

$D/D2 = 1 + 5,2 (1 - x/L)$

A Tabela 1 fornece os valores dos diâmetros da contração ao longo do comprimento da contração, os quais estão plotados na Figura 14.

TABELA 1 - Coordenadas da Contratação.

<b>X [m]</b>	<b>D/D1</b>	<b>diam</b>	<b>raio</b>
0	1	0.306	0.153
0.01	0.999964	0.305989	0.152994
0.02	0.999718	0.305913	0.152956
0.03	0.999049	0.305709	0.152854
0.04	0.997747	0.305310	0.152655
0.05	0.995600	0.304653	0.152326
0.06	0.992397	0.303673	0.151836
0.07	0.987928	0.302305	0.151152
0.08	0.981979	0.300485	0.150242
0.09	0.974342	0.298148	0.149074
0.1	0.964804	0.295230	0.147615
0.11	0.953155	0.291665	0.145832
0.12	0.939182	0.287389	0.143694
0.13	0.922675	0.282338	0.141169
0.14	0.903424	0.276447	0.138223
0.15	0.881215	0.269652	0.134826
0.16	0.855839	0.261887	0.130943
0.17	0.827085	0.253088	0.126544
0.18	0.794740	0.243190	0.121595
0.19	0.758595	0.232130	0.116065
0.2	0.718437	0.219841	0.109920
0.21	1.3328	0.207916	0.103958
0.22	1.266458	0.197567	0.098783
0.23	1.209576	0.188693	0.094346
0.24	1.161427	0.181182	0.090591
0.25	1.121282	0.174920	0.087460
0.26	1.088415	0.169792	0.084896
0.27	1.062096	0.165687	0.082843
0.28	1.0416	0.162489	0.081244
0.29	1.026197	0.160086	0.080043
0.3	1.015160	0.158365	0.079182
0.31	1.007762	0.157210	0.078605
0.32	1.003274	0.156510	0.078255
0.33	1.000970	0.156151	0.078075
0.34	1.000121	0.156018	0.078009
0.35	1	0.156	0.078

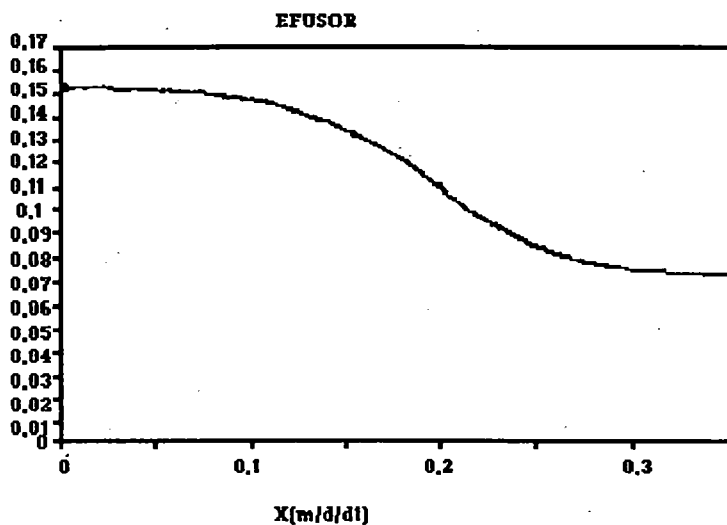


FIGURA 14 - Contorno da Contração.

### 3.1.3. Construção do efusor

O efusor foi construído em fibra de vidro com resina poliéster (Figuras 17 e 18), utilizando-se como molde placas de madeira com 5 centímetros de espessura. A madeira foi cortada em circunferências com raios variados de modo que, depois de acopladas, ficassem com um esboço do contorno da contração. O acabamento foi dado com o auxílio de um torno (Figura 15 e 16).



FIGURA 15 - Vista do molde de madeira desmontado.



FIGURA 16 - Vista do molde de madeira montado.

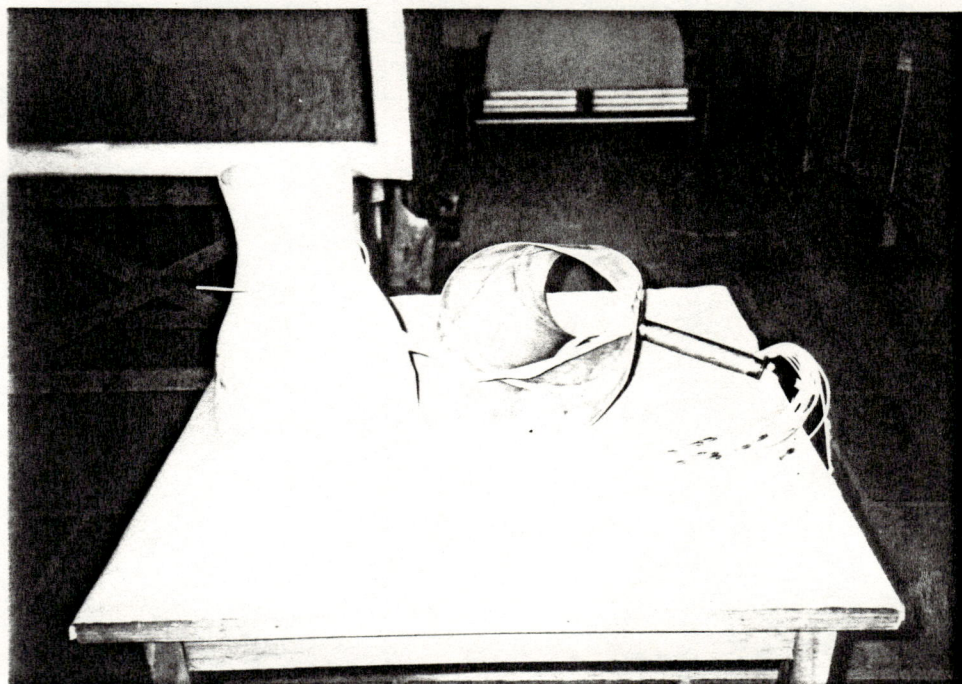


FIGURA 17 - Vista lateral do efusor mostrando o contorno da contração.

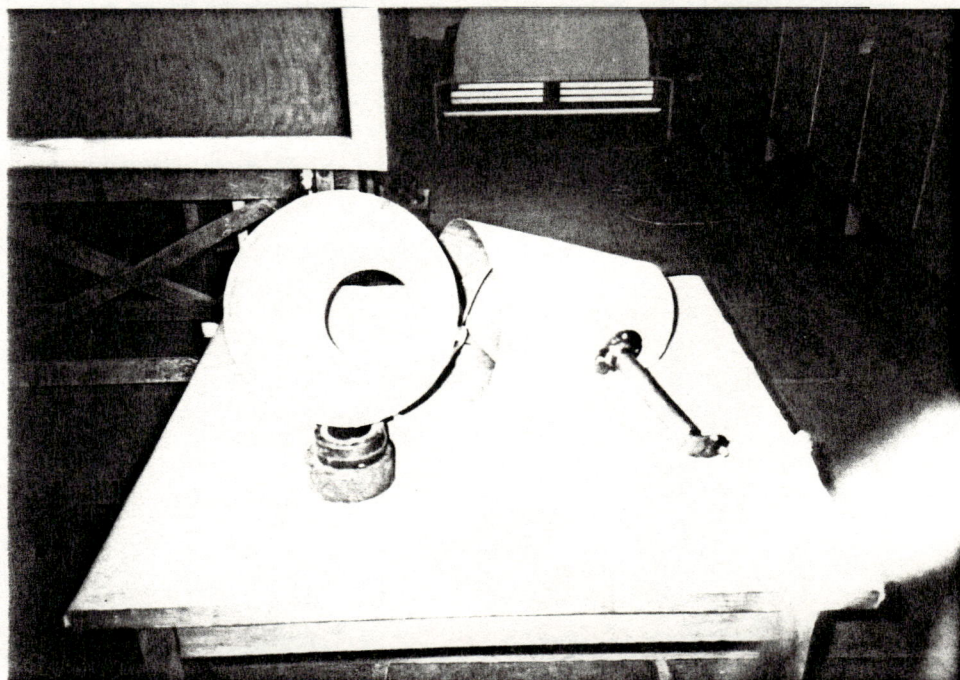


FIGURA 18 - Vista frontal do efusor mostrando a razão de contração.



### 3.1.4. Avaliação Experimental do comportamento do Escoamento no Interior do efusor.

O objetivo deste ensaio foi, apenas, visualizar, através de fios de lã (tufts), o comportamento do escoamento a fim de verificar a eficiência do contorno da contração.

O experimento se desenvolveu a partir da colocação de pequenos fios de lã (tufts) ao longo da parede interna do efusor, o qual foi convenientemente colocado na câmara de ensaio do túnel de vento (Figura 19) e submetido a uma velocidade do ar igual a 44,4 m/s (velocidade de trabalho do avião).

Os resultados obtidos, nesta avaliação, foram bastante satisfatórios, uma vez que os fios de lã permaneceram "colados" a parede do bocal, indicando não haver separações no escoamento, com exceção da área localizada imediatamente após a "garganta". Este fato, no entanto, não foi motivo de preocupação, uma vez que, sem o difusor (bocal divergente), a confluência entre o fluxo de ar que sai do bocal e o fluxo de ar do túnel é bastante turbulenta em função da diferença de velocidades.

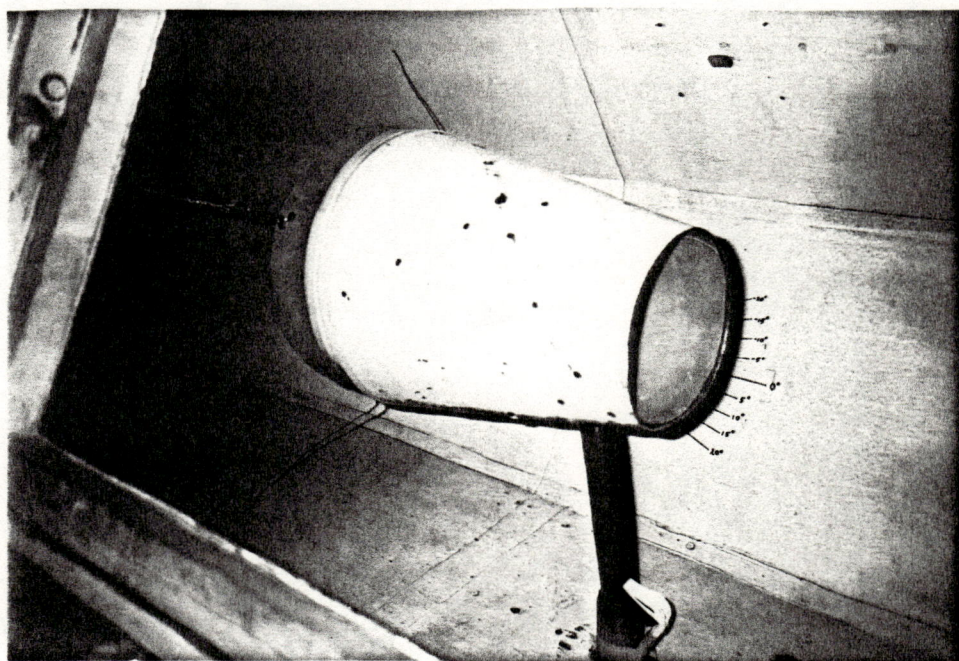


FIGURA 19 - Efusor com suporte na câmara de ensaio do túnel.



### **3.2. O Difusor**

Os difusores colocados após as seções de alta velocidade, são muito sensíveis a erros de projeto, os quais podem causar separações no escoamento. O ângulo de cone equivalente e a razão de áreas devem ser devidamente selecionados visando evitar separações ao longo das paredes do difusor. Tais separações são responsáveis pelas variações na distribuição de velocidade na área de menor seção transversal e conseqüentemente perda de eficiência do conjunto do bocal.

Desta forma, o difusor, do conjunto do bocal aerodinâmico em estudo, tem a finalidade de desacelerar gradualmente o escoamento proporcionando uma equalização de velocidades na região de confluência entre o escoamento interno do difusor e o fluxo de ar externo.

A razão de área  $AR$  e o ângulo de cone equivalente, foram estabelecidos segundo estudos realizados por ECKERT; MORT & JOPPE (1976) citados por CATALANO (1988) em seu trabalho com túneis de vento com velocidade subsônica de escoamento.

Pode-se notar, pelas Figuras 20 e 21, que a região situada entre a curva de limite superior para difusores cônicos e a curva de limite superior para difusores bi-dimensionais com cantos vivos é muito abrangente, havendo, portanto, a necessidade de se estabelecer critérios para a confecção do bocal divergente, e posteriormente, através de ensaios em túnel de vento, eleger o difusor que apresentar maior eficiência dentro dos critérios estabelecidos.

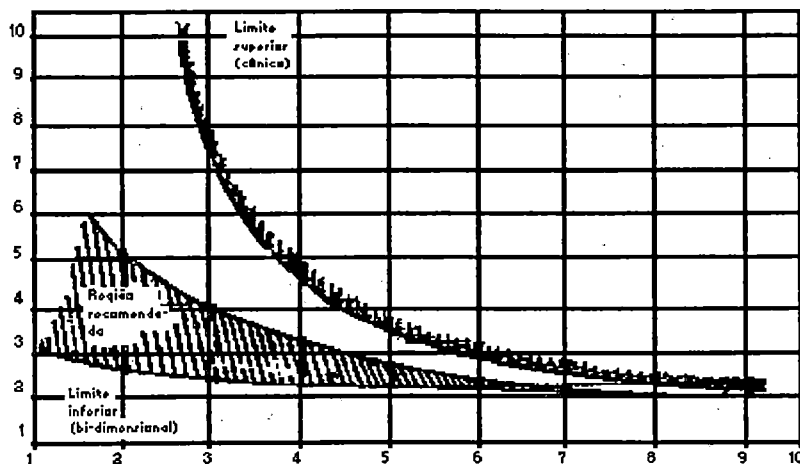


FIGURA 20 - Ângulo Equivalente de Cone versus AR.

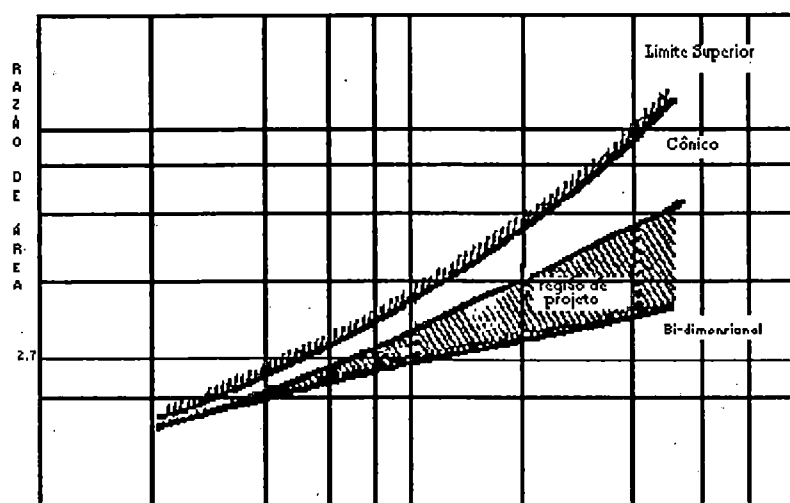


FIGURA 21 - Relação de área (AR) versus comprimento do difusor dividido pelo raio da "garganta".

### 3.2.1 - Critérios para a construção do Difusor

O fato do conjunto do bocal aerodinâmico ser utilizado como dispositivo distribuidor de partículas sólidas por intermédio de um avião faz com que haja uma preocupação muito grande quanto às suas dimensões, peso e arrasto. desta forma os critérios estabelecidos para a seção de difusão foram:

- Comprimento:- O difusor deve desacelerar o escoamento afim de deixá-lo com a mesma velocidade do fluxo de ar externo no menor espaço possível. A equalização das velocidades elimina a confluência turbulenta entre os escoamento interno e externo minimizando o arrasto.
- Diâmetro da seção de saída do difusor:- Deve ser o menor possível evitando, com isto, prejuízo nas manobras de solo, além de facilitar o acoplamento do conjunto do bocal aerodinâmico ao avião.
- Queda de pressão na área de menor secção transversal (garganta):- Como a eficiência do conjunto do bocal aerodinâmico está intimamente relacionada com a queda de pressão na "garganta", foi estipulado como critério, para a construção do difusor, a maior queda de pressão nesta região.

### 3.2.2 - Avaliação Experimental do Difusor.

Esta avaliação experimental teve por objetivo visualizar o comportamento do escoamento ao longo das paredes internas do conjunto do bocal aerodinâmico ao mesmo tempo em que se media a queda de pressão gerada na "Garganta". Desta forma, foram colocados, ao longo das paredes internas do conjunto, fios de lã (tufts) com aproximadamente 1,5 cm de comprimento, além de uma tomada de pressão estática na área de menor secção transversal.

Para a realização do experimento foram construídos, utilizando-se chapas de alumínio aeronáutico de 0,25 mm de espessura, 11 (onze) difusores de diferentes dimensões.

Os ensaios consistiram em acoplar cada um dos onze difusores ao efusor e fixar o conjunto na câmara de ensaio do túnel de vento.(Figura 22 e 23). Cada conjunto foi submetido a uma velocidade do ar no interior da câmara de ensaio do túnel de 44,4 m/s, e a queda de pressão foi medida com o auxílio de um manômetro contendo querosene e colocado verticalmente.

Os parâmetros levantados e usados para a escolha do difusor são demonstrados na Tabela 2.

TABELA 2 - Valores experimentais para a seção de difusão.

Difusor	$\theta^\circ$	L (m)	AR	V (m/s)	h (m)	CP
1.	7,7	0,09	1,3	44,4	0,502	- 2,6
2.	7,7	0,27	2,2	44,4	0,913	- 5,5
3.	7,7	0,40	2,9	44,4	0,955	- 5,8
4.	7,7	0,45	3,2	44,4	0,987	- 6,1
5.	6,05	0,45	2,7	44,4	1,095	- 6,8
6.	6,05	0,64	3,5	44,4	1,170	- 7,4
7.	5,25	0,53	2,6	44,4	1,010	- 6,2
8.	5,25	0,64	3,1	44,4	0,990	- 6,1
9.	4,4	0,53	2,3	44,4	0,910	- 5,5
10.	4,4	2,9	2,9	44,4	1,090	- 6,8
11.	2,7	2,0	2,0	44,4	0,506	- 2,6

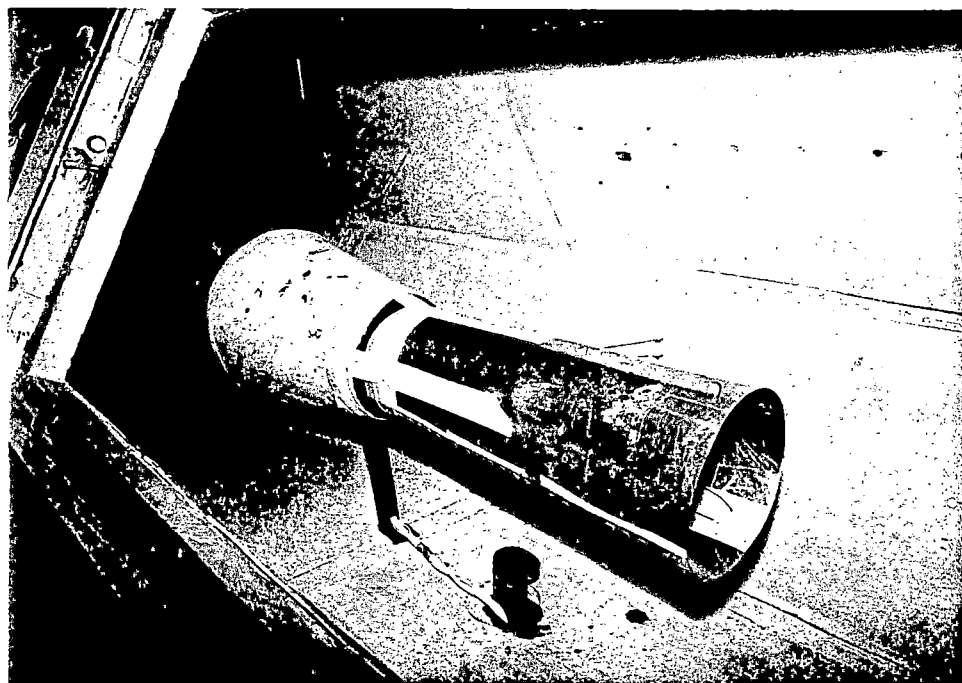


FIGURA 22 - Difusor com ângulo de cone  $\theta = 5,25^\circ$ , e comprimento  $L = 0,64\text{m}$  acoplado ao efusor na câmara de ensaio do túnel.

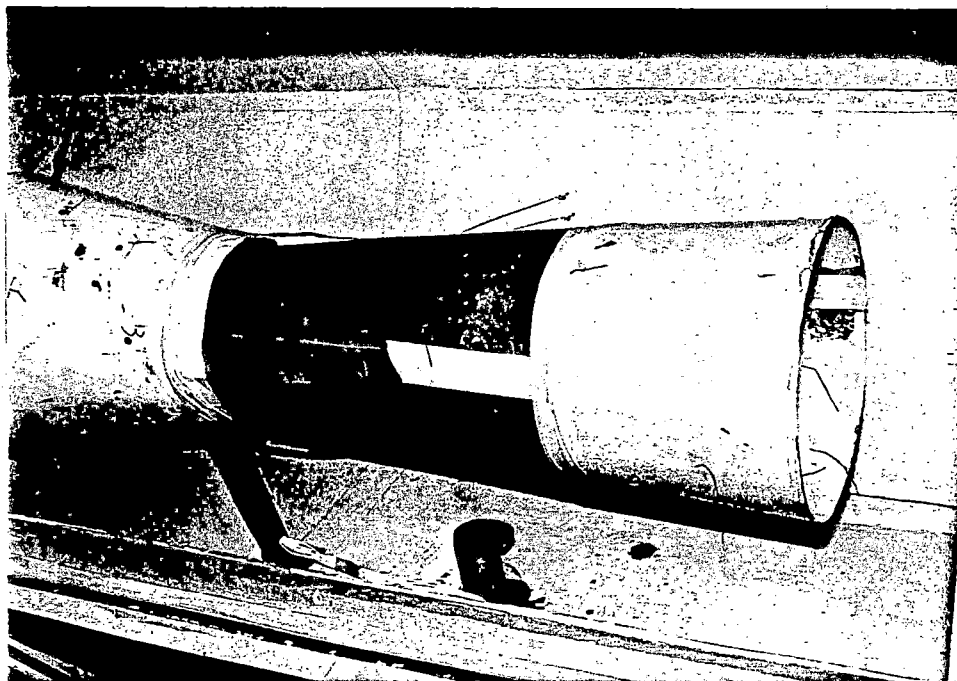


FIGURA 23 - Difusor com ângulo  $\theta = 6,05^\circ$ , e  $L = 0,45\text{m}$  com complemento de  $0,19\text{m}$ .

Pela observação, através dos "Tufts", do comportamento do escoamento no interior do conjunto do bocal e pela análise dos resultados contidos na Tabela 2, chegou-se a conclusão que o difusor do conjunto do bocal aerodinâmico possui uma relação de área  $AR = 2,7$ , um ângulo de cone equivalente  $= 6,05$  e um comprimento  $L = 0,450\text{ m}$ . Estas dimensões quando plotadas nas Figuras 20 e 21 mostram que o difusor escolhido está coerente com os estudos dos autores acima citados.

No entanto, observa-se que o difusor n 6 da Tabela 2 demonstra uma maior queda de pressão na "garganta", entretanto seu comprimento ( $L$ ), apesar de não ser muito maior que o do difusor n 5, implica em um diâmetro na seção de saída relativamente grande, causando uma desaceleração maior do que a pretendida do fluxo interno, e como consequência, ocorre uma separação pronunciada do escoamento nesta região. Tal situação implica em uma confluência turbulenta dos escoamentos interno e externo e, portanto, em maior arrasto acompanhado por instabilidade dos

esforços aerodinâmicos do bocal. Estes dois fenômenos, certamente, prejudicariam o desempenho do aparelho.

### 3.3 - Configuração Final.

Com o dimensionamento do efusor e do difusor, o conjunto do bocal aerodinâmico em estudo apresenta a configuração final mostrada na Figura 24.

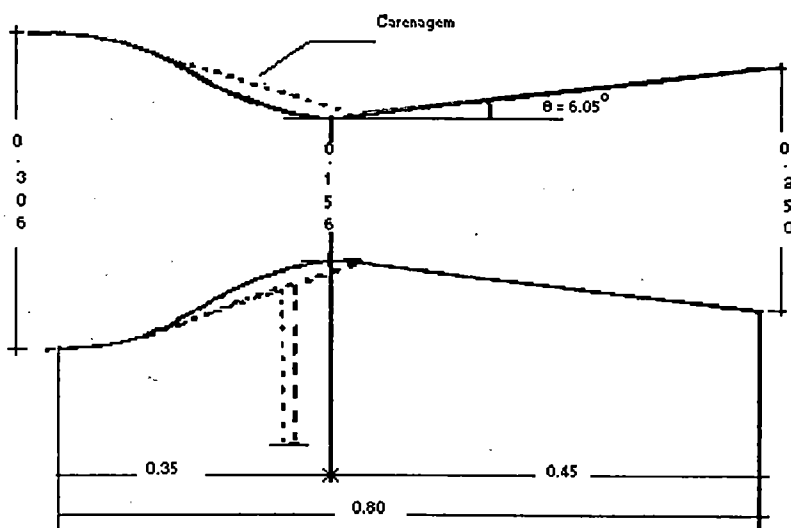


FIGURA 24 - Configuração final do conjunto do bocal.

#### 3.3.1 - Avaliação Experimental da distribuição de velocidade, pressão e comportamento do escoamento no interior do conjunto do bocal aerodinâmico.

O experimento se desenvolveu a partir da medição das pressões estáticas ao longo das paredes internas do conjunto do bocal aerodinâmico. Foram colocados no bocal 23 pontos de tomada de pressão estática, sendo que 7 destes pontos situam-se nas proximidades da "garganta" com o intuito de melhor rastrear a distribuição de pressão e velocidade uma vez que o acoplamento do difusor ao efusor está sendo feito nesta região (Figura 25).



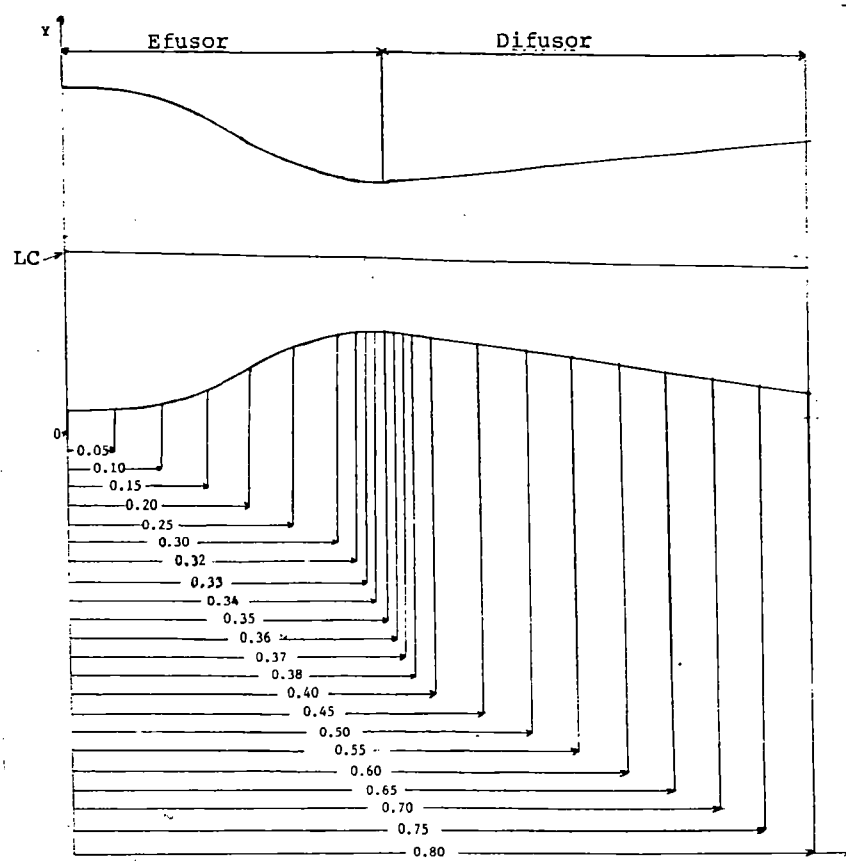


FIGURA 25 - Coordenadas das tomadas de pressão estática na parede do bocal.

Além dos pontos de tomadas de pressão, foram colocados, ao longo das paredes internas, pequenos fios de lã (tufts) com o objetivo de visualizar o comportamento do escoamento, ou seja, para verificar se não estava havendo descolamentos da camada limite ao longo das paredes do bocal.

A pressão foi medida utilizando-se um multimanômetro contendo querosene colocado verticalmente (Figura 26). A partir das pressões estáticas determinou-se, através da equação de Bernoulli, as velocidades locais, as pressões totais foram coletadas na linha de centro do conjunto do bocal através de um pitot de pressão total.

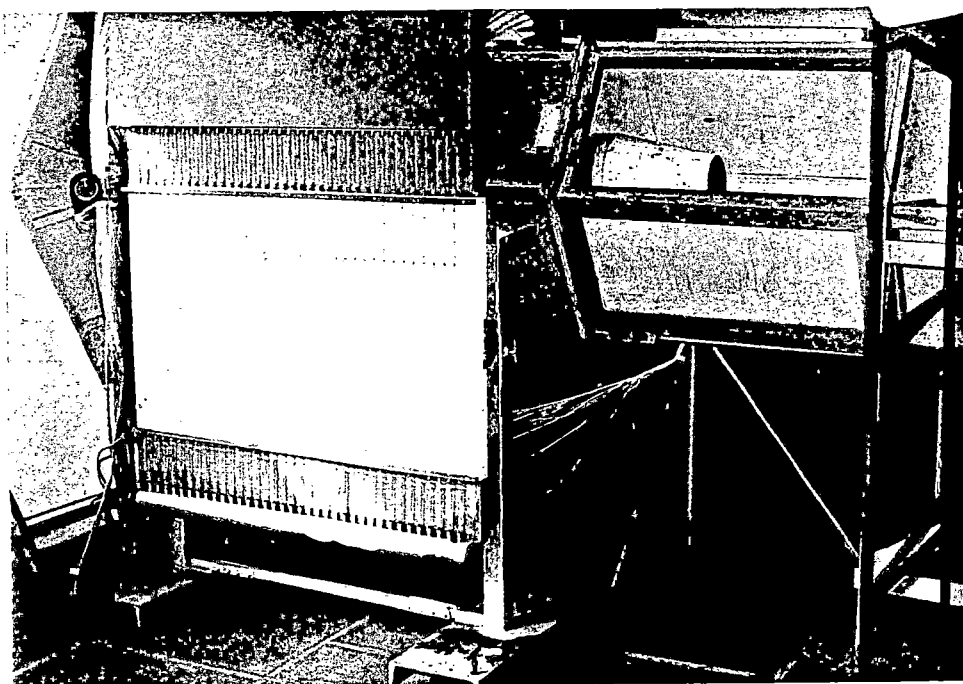


FIGURA 26 - Multimanômetro contendo querosene colocado verticalmente.

Para efeito de comparação, foi calculada, utilizando-se a equação da continuidade na forma incompressível, a distribuição de velocidade ao longo da linha de centro do bocal.

Quanto aos valores obtidos para a queda de pressão, os resultados estão na forma de coeficiente de pressão em relação ao fluxo livre não perturbado, então:

$$CP = 1 - (V_x/V_o)$$

onde  $V_x$  é a velocidade na coordenada do ponto de tomada de pressão, e  $V_o$  é a velocidade de fluxo livre não perturbado tomada no início da câmara de ensaios do túnel de vento.

Os resultados obtidos estão contidos na tabela 3 e plotados na Figura 27.

TABELA 3 - Valores experimentais da distribuição de velocidade e pressão ao longo do bocal.

X/L	X (m)	Ps (x) (cm)	V (x)	V (x)/Vo	Cp
0,000	0,000	1,800	10,994	0,365	0,817
0,063	0,050	2,500	15,055	0,500	0,700
0,125	0,100	2,600	15,548	0,516	0,683
0,188	0,150	3,200	18,232	0,606	0,583
0,250	0,200	3,800	20,568	0,683	0,483
0,313	0,250	10,000	36,876	1,225	- 0,550
0,375	0,300	18,700	51,714	1,718	- 2,000
0,400	0,320	24,300	59,334	1,971	- 2,933
0,413	0,330	37,800	74,567	2,477	- 5,183
0,425	0,340	42,250	78,947	2,622	- 5,925
0,438	0,350	46,700	83,096	2,760	-6,667
0,450	0,360	37,300	74,059	2,460	-5,100
0,463	0,370	33,400	69,967	2,324	-4,450
0,475	0,380	27,200	62,918	2,090	-3,417
0,500	0,400	27,600	63,396	2,106	-3,483
0,563	0,450	22,000	56,329	1,871	-2,550
0,625	0,500	17,700	50,232	1,668	-1,833
0,688	0,550	14,000	44,319	1,472	-1,217
0,750	0,600	12,600	41,865	1,390	-0,983
0,813	0,650	11,700	40,208	1,335	-0,833
0,875	0,700	11,100	39,065	1,297	-0,733
0,938	0,750	10,500	37,886	1,258	-0,633
1,000	0,800	10,100	37,080	1,232	-0,567
Túnel			Pat = 92675,4	Vo (M/s)	
PT (N/m <sup>2</sup> ) Ps			dens. = 1,065	30,109	
92619,1	92136,4				

Nota-se, pela Figura 27, uma queda acentuada de pressão, em decorrência do aumento de velocidade, na região entre 25% e 43,7% ( $x/L = 0,25$  a  $x/L = 0,4375$ ) do comprimento do conjunto do bocal, sendo que o ponto de menor pressão situa-se na "garganta".

Já na seção de difusão, percebe-se claramente o ponto ( $x/L = 0,475$  a  $x/L = 0,5$ ) onde foi feito o acoplamento do difusor no conjunto do bocal. Pela distribuição de Cp

verifica-se que existe, nesta região, uma pequena seção de área constante resultando numa mesma pressão entre  $x/L=0,475$  e  $x/L=0,5$ .

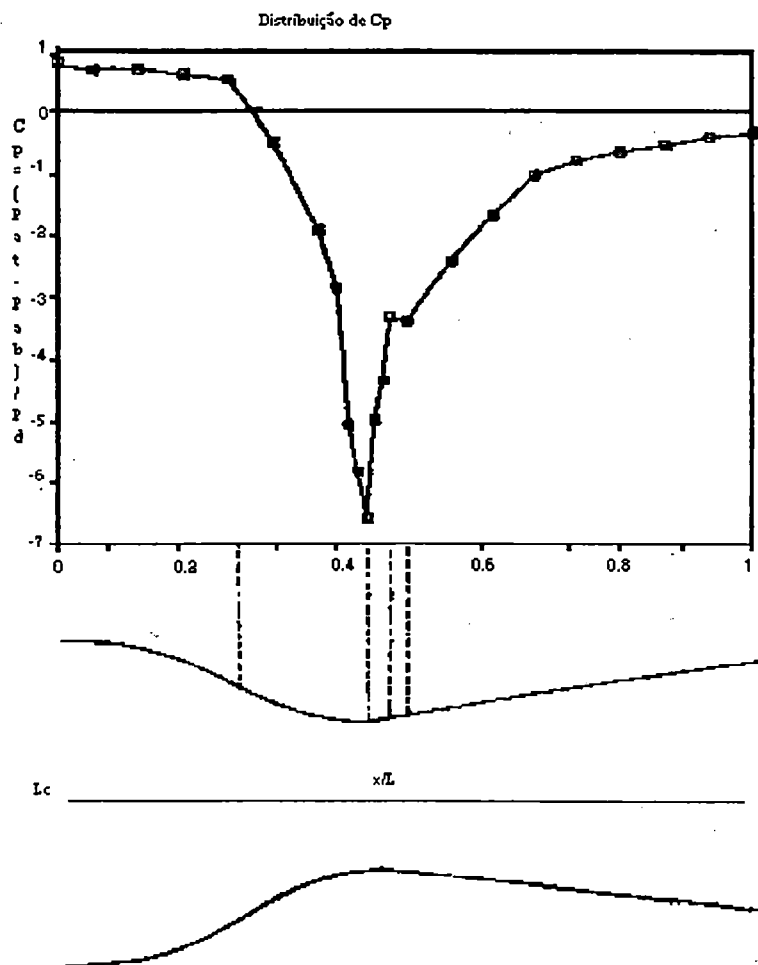


FIGURA 27 -  $C_p$  experimental versus  $x/L$ .

A Tabela 4 fornece os valores experimentais e teóricos de  $C_p$ , os quais estão plotados na Figura 28.

TABELA 4 - Valores experimentais e teóricos de  $C_p$  ao longo do bocal.

X/L	$C_p$ (exp.)	$C_p$ (teor.)
0,000	0,817	0,486
0,063	0,700	0,477
0,125	0,683	0,407
0,188	0,583	0,148
0,250	0,483	-0,928
0,313	-0,550	-3,810
0,375	-2,000	-6,159
0,400	-2,933	-6,504
0,413	-5,183	-6,574
0,425	-5,925	-6,599
0,438	-6,667	-6,603
0,450	-5,100	-6,500
0,463	-4,450	-6,200
0,475	-3,417	-5,470
0,500	-3,483	-4,740
0,563	-2,550	-3,440
0,625	-1,833	-2,540
0,688	-1,217	-1,890
0,750	-0,983	-1,400
0,813	-0,833	-0,920
0,875	-0,733	-0,650
0,938	-0,633	-0,370
1,000	-0,567	-0,160

As diferenças existentes entre a distribuição de  $C_p$  teórico e experimental se devem ao fato de que para se calcular o  $C_p$  teórico não foram levados em consideração os efeitos da viscosidade, e o equacionamento foi tratado unidimensionalmente.

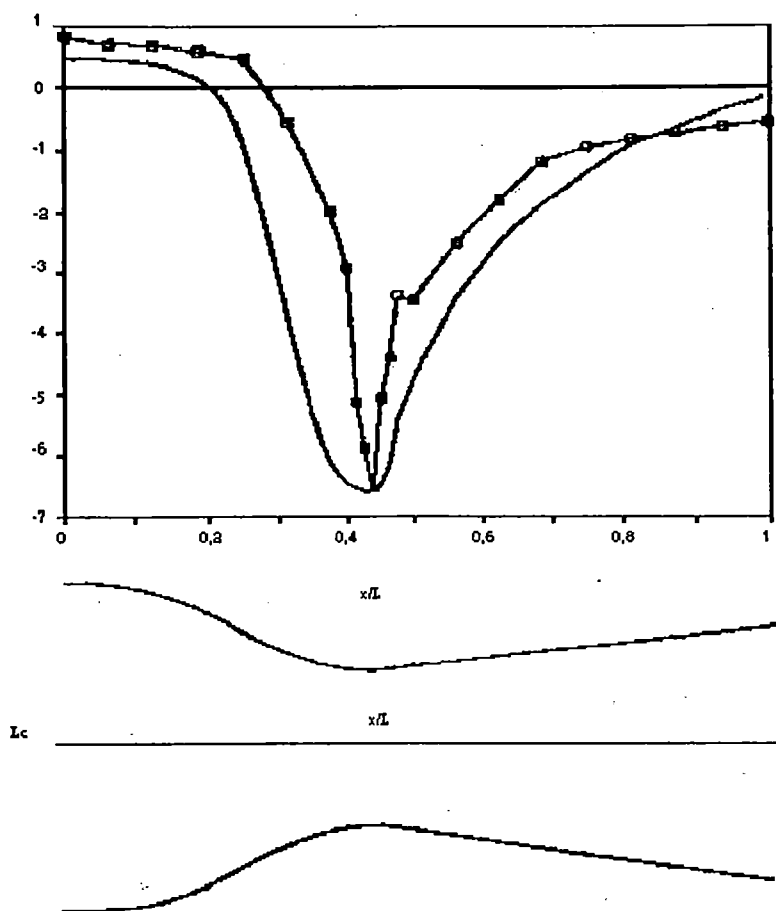


FIGURA 28 -  $C_p$  experimental e teórico versus  $x/L$ .

#### 4. O BOCAL COMO DISPOSITIVO DISTRIBUIDOR DE PARTÍCULAS SÓLIDAS.

No capítulo anterior foi investigado a distribuição de pressão e velocidade ao longo da parede interna do conjunto do bocal sem que se fosse incluído qualquer tipo de abertura, na região de menor pressão, para a entrada de material sólido no escoamento do fluxo interno. Tal procedimento foi adotado com o intuito de simplificar ao máximo a análise aerodinâmica da geometria básica da parede interna do conjunto do bocal convergente-divergente.



Os assuntos abordados neste capítulo são:

- A instalação de abertura(s) na região onde foi detectada a menor pressão, ou seja, na "garganta".
- A investigação e análise do escoamento induzido no interior do conduto que liga a(s) abertura(s) do bocal ao compartimento de carga do avião.

#### **4.1- A instalação da(s) abertura(s).**

Para a instalação da(s) abertura(s) dois fatores foram levados em consideração, são eles:

- Formato da(s) abertura(s).
- A confluência entre o escoamento interno do bocal e o escoamento proveniente da(s) abertura(s).

##### **4.1.1 - Formato da(s) Abertura(s)**

Visando economia e praticidade, optou-se por utilizar como conduto do compartimento de carga do avião até o bocal, a mesma barra de tubo de alumínio utilizada para a aspersão de líquidos.

A barra de alumínio, equipamento original do avião do avião agrícola EMB 202 B, possui um diâmetro interno de 1,25 polegadas ( 3,175 cm) com uma área de 7,917 cm<sup>2</sup> de seção transversal , logo a abertura na "garganta" deveria ter a mesma área para manter-se a mesma vazão.

No entanto, a simples abertura de um orifício de 1,25 polegadas de diâmetro na "garganta" do bocal não seria a solução para o problema, pois isto desconfiguraria a geometria da mesma, devido ao fato da área da seção transversal da barra (7,917 cm) ser muito grande.

Outro impediço para o uso deste procedimento é o fato de que o escoamento induzido proveniente do conduto entraria no escoamento do bocal

perpendicularmente, e a tentativa de fazê-lo entrar na garganta do bocal tangencialmente ao escoamento prejudicaria ainda mais a configuração geométrica da "garganta", uma vez que a inclinação de um tubo de seção circular aumentaria muito a área da abertura.

Baseando-se nestes fatores, optou-se pela abertura de uma fenda de seção retangular, de tal forma que sua largura fosse a menor possível a fim de ocupar um menor espaço no sentido longitudinal da "garganta".

Como a função básica do aparelho e a distribuição de sementes de gramíneas e pós de baixa densidade, o parâmetro utilizado para o dimensionamento da abertura foi a maior granulometria encontrada dentre a maioria dos produtos a serem utilizados. Desta forma, a abertura ficaria com uma largura de 0,4 cm e um comprimento de 19,792 cm, resultando numa área de  $7,917 \text{ cm}^2$ , igual a área da seção circular da barra do avião.

Para que esta configuração fosse conseguida, o tubo de seção circular sofreu um achatamento até se chegar as dimensões acima citadas, a Figura 29 mostra um corte esquemático. Entretanto, o problema não foi totalmente solucionado, pois houve uma concentração de material sólido na região central da área da abertura.

A solução encontrada foi a colocação de duas fendas na lateral da "garganta", sendo que, cada uma delas, possui uma área igual a metade da área da seção circular da barra do avião, ou seja,  $3,958 \text{ cm}^2$ . A Figura 30 mostra o corte esquemático das aberturas.

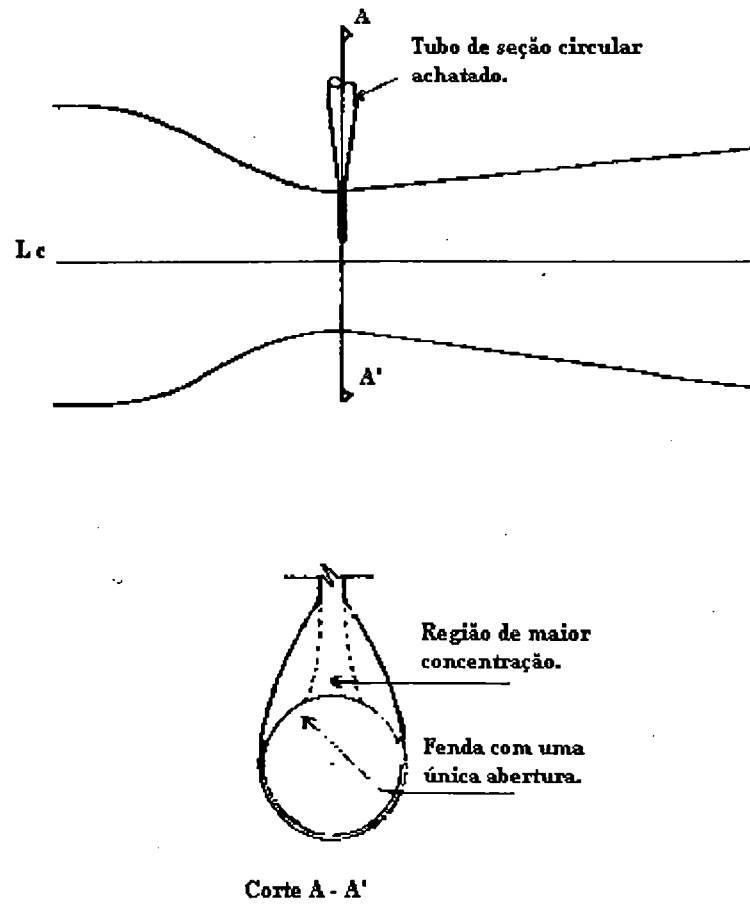


FIGURA 29 - Corte esquemático do tubo de seção circular achatado, com uma única fenda na "garganta".

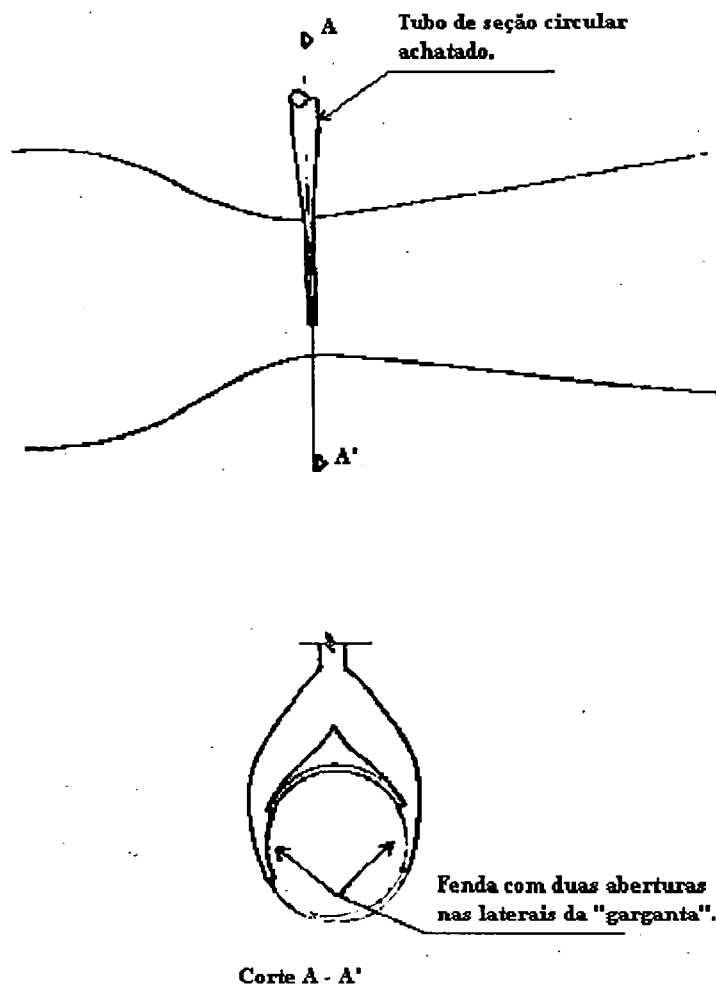


FIGURA 30 - Corte esquemático do tubo de seção circular achatado, com duas fendas nas laterais da "garganta" do bocal.

#### 4.1.2 - A confluência entre o escoamento interno do bocal e o escoamento proveniente das aberturas.

A análise da confluência entre o escoamento interno do bocal e o escoamento proveniente das aberturas foi feita experimentalmente. Nesta fase do trabalho, foram

verificados e solucionados os efeitos das aberturas sobre o escoamento interno do bocal.

Era esperado que com a nova situação criada com a abertura das fendas na "garganta" ocorresse uma perturbação no escoamento, pois a introdução das aberturas poderia desconfigurar a geometria da mesma.

Esta desconfiguração poderia causar descolamentos da camada limite do escoamento e com isto prejudicar o desempenho do difusor, no tocante a distribuição de velocidade e pressão.

#### **4.1.3 - Avaliação experimental do escoamento interno do bocal com as fendas abertas.**

O objetivo desta experimentação foi o de visualizar, através de "tufts", o comportamento do escoamento do bocal com as fendas abertas, assim como a determinação da distribuição de pressão e velocidade com o acesso do conduto às fendas aberto e fechado.

O procedimento do ensaio foi imprimir uma velocidade de 44,4 m/s no ar no interior do túnel e visualizar, por intermédio de fios de l<sub>1</sub> colocados nas proximidades das fendas, o comportamento do escoamento no interior do bocal, a medida em que se abria ou fechava o acesso do conduto às fendas.

Para se determinar a distribuição de velocidade e pressão utilizou-se as mesmas tomadas de pressão estática vistas na Figura 25 do capítulo 3.

Observou-se, no experimento, que ao se abrir o acesso do conduto às fendas, os "tufts" que estavam colocados imediatamente antes das mesmas se levantavam, e os

situados após as fendas assumiam um comportamento instável, indicando uma perturbação pronunciada do escoamento (Figura 31).

Foi notado, no entanto, que esta perturbação acontecia numa área limitada, que não se estendia além de alguns centímetros depois de cada fenda. Desta forma parecia claro que a solução para o problema seria a retirada de material da parede interna do bocal esculpindo, na região de instabilidade, uma cavidade em forma de leque de modo a acomodar o escoamento para a nova situação, ou seja, com o acesso do conduto às fendas aberto.

As cavidades em forma de leque foram feitas e o bocal foi ensaiado novamente.

Observou-se, no segundo experimento, que a perturbação do escoamento na região situada após as fendas não mais ocorria, pois as cavidades em forma de leque esculpidas na "garganta" faziam com que o escoamento permanecesse com sua forma original, em virtude de uma melhor confluência entre as velocidades naquele ponto. As Figuras 31 e 32 mostram um corte esquemático da situação.

Os valores obtidos na distribuição de velocidade e pressão estão contidos na Tabela 5 e plotados na Figura 33.

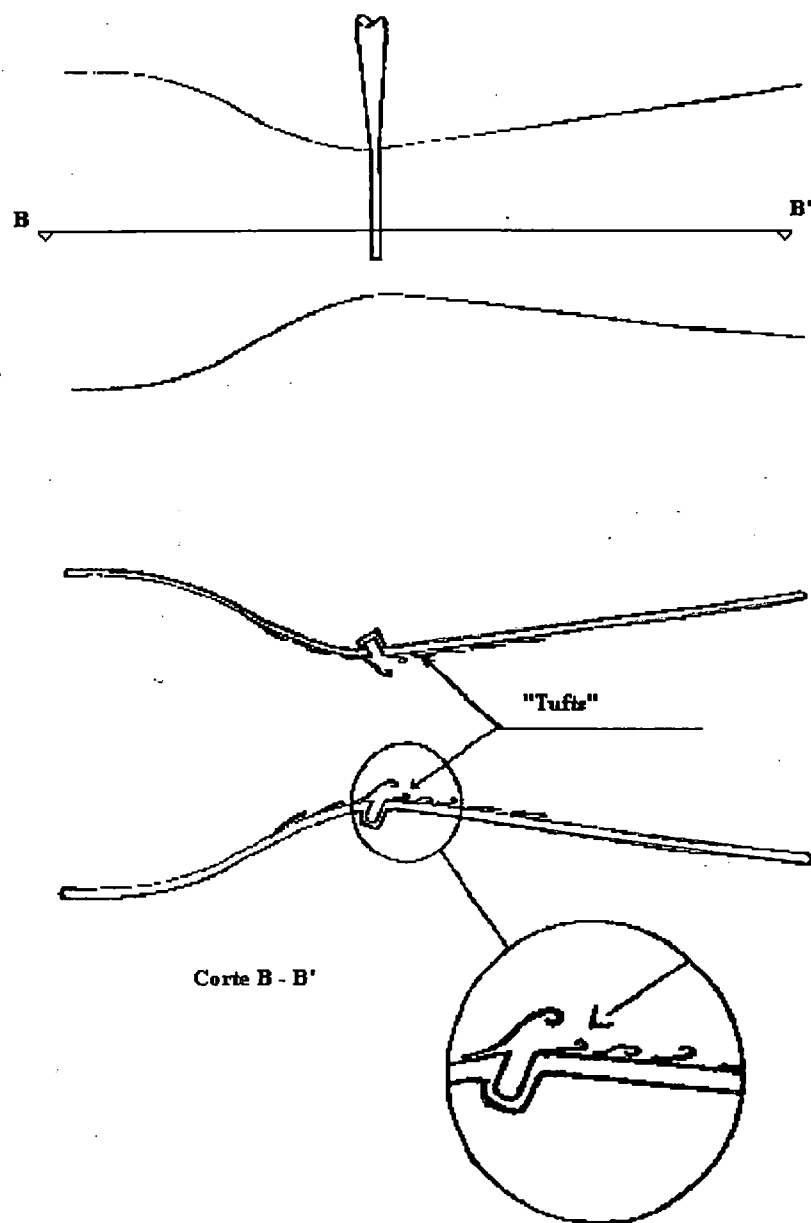


FIGURA 31 - Corte esquemático mostrando a região de instabilidade no escoamento sem as cavidades em forma de leque.



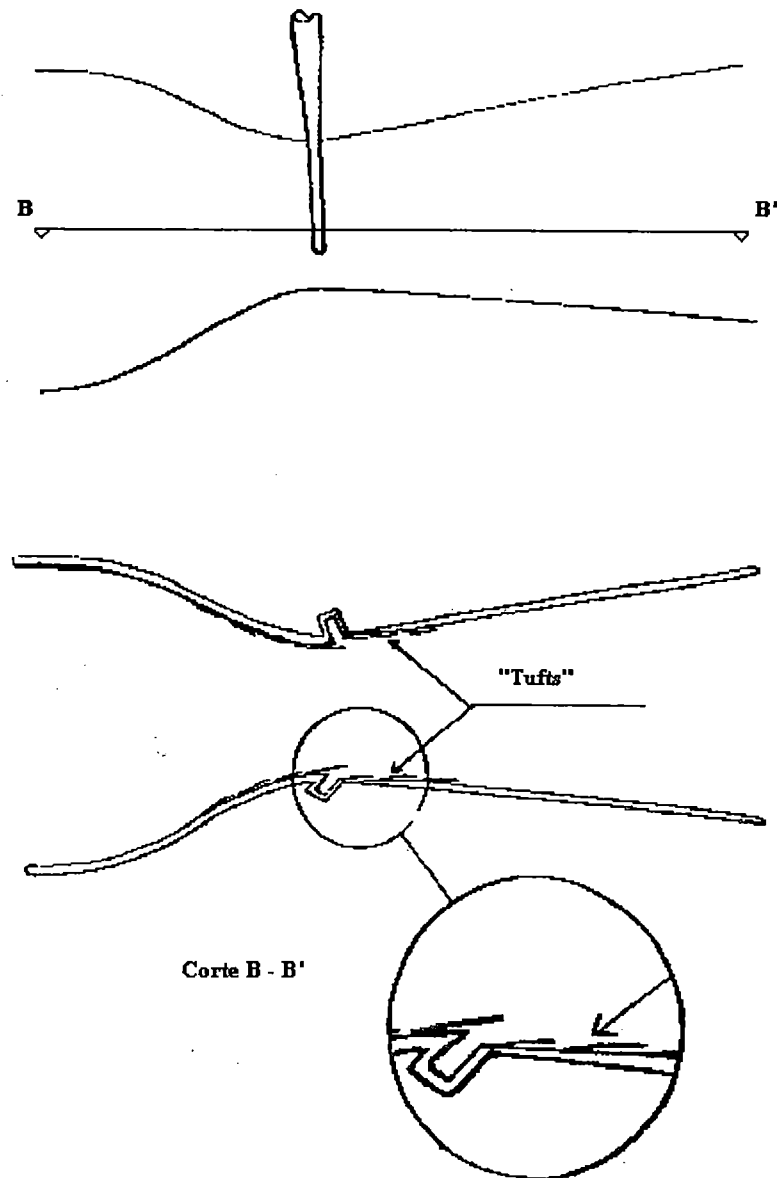


FIGURA 32 - Corte esquemático mostrando o escoamento com as cavidades em forma de leque inseridas na parede interna do bocal.

TABELA 5 - Valores experimentais de  $C_p$  com o acesso do conduto às fendas aberto e fechado.

X/L	$C_p$	$C_p(\text{aberto})$
0,0000	0,9643	0,9643
0,0625	0,8750	0,8750
0,1250	0,8393	0,8393
0,1875	0,8036	0,8036
0,2500	0,6429	0,7321
0,3125	-0,2857	0,0179
0,3750	-1,6429	-1,0893
0,4000	-2,4464	-1,7679
0,4125	-4,4821	-3,3929
0,4250	-5,0714	-3,9107
0,4375	-5,7143	-4,3571
0,4500	-4,2857	-3,3571
0,4625	-3,8571	-2,9286
0,4750	-2,9286	-2,1429
0,5000	-2,9643	-2,1429
0,5625	-2,1786	-1,5714
0,6250	-1,5000	1,1786
0,6875	-0,9643	-0,7857
0,7500	-0,7857	-0,6786
0,8125	-0,6786	-0,6071
0,8750	-0,5357	-0,5357
0,9375	-0,4643	-0,4643
1,0000	-0,3929	-0,3929



#### **4.2.1- Determinação da quantidade de partículas sólidas transportadas pneumaticamente no interior do conduto.**

Todos os parâmetros levantados até o momento foram obtidos através de experimentação em túnel de vento. Entretanto, a determinação da vazão de partículas sólidas no bocal não pôde seguir o mesmo procedimento de ensaio até agora adotado, pelo fato de que uma parte do material utilizado na experimentação ficaria colocado do lado de fora da câmara de ensaio do túnel de vento.

Esta situação, certamente, faria com que os resultados obtidos no experimento não fossem verdadeiros, uma vez que a pressão total no interior da câmara de ensaio do túnel de vento é menor do que a pressão atmosférica quando o túnel está em funcionamento.

Desta forma, para se determinar experimentalmente a quantidade de material sólido transportado pneumaticamente utilizando o fluxo de ar induzido especificamente pelo bocal, seria necessário igualar a pressão interna da câmara de ensaio à pressão externa.

Baseando-se nas considerações acima citadas, decidiu-se montar um experimento com a finalidade de se obter a vazão, pressão e velocidade do escoamento no interior do conduto para, com estes valores já previamente corrigidos, determinar experimentalmente a vazão de material sólido utilizando-se uma bomba de sucção para induzir o escoamento no conduto.

##### ***4.2.1.1- Determinação da vazão, pressão e velocidade do escoamento induzido pelo bocal.***

A vazão de ar no interior do conduto foi medida com um medidor de vazão de orifícios calibrados conectado ao bocal por intermédio do conduto.

A pressão no conduto foi obtida através de um manômetro contendo querosene colocado verticalmente.

A velocidade foi calculada em função da vazão, da área da seção transversal do conduto e da densidade do ar.

O esquema mostrando a montagem do experimento é mostrado na Figura 34, e os resultados obtidos estão relacionados com a velocidade de trabalho do avião (44,4 m/s).

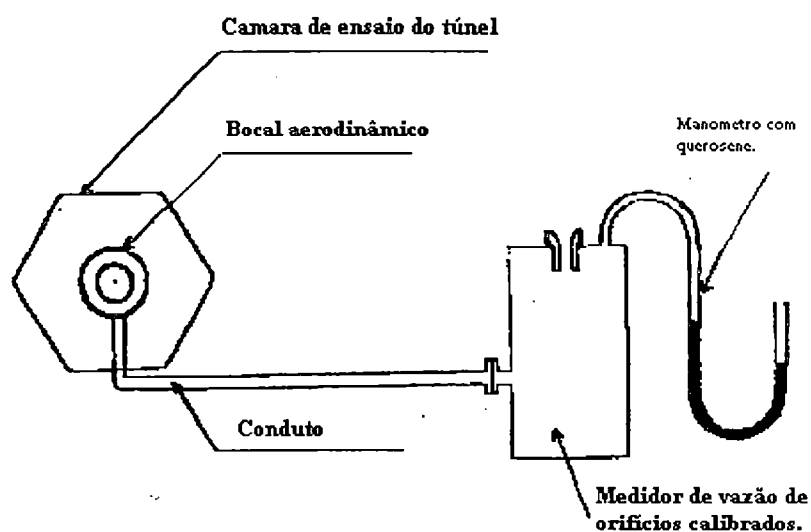


FIGURA 34 - Corte esquemático mostrando a montagem do experimento para a determinação da vazão, pressão e velocidade do escoamento induzido pelo bocal.

Os resultados obtidos foram:

- a) Vazão de ar no conduto - 33 m<sup>3</sup>/hora;
- b) Pressão no conduto - 0,98 m de coluna vertical de querosene;
- c) Velocidade do escoamento no conduto - 12,27 m/s.

#### **4.2.1.2 - Experimentação com bomba de sucção.**

Este ensaio teve por objetivo simular os parâmetros obtidos em túnel de vento a fim de se determinar a quantidade de partículas sólidas transportadas no interior do conduto num determinado intervalo de tempo.

Para a realização do ensaio foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Bomba de sucção;
- b) Recipiente de vidro com vedação hermética;
- c) Peneira de malha fina;
- d) Tubo de alumínio de 1,25 polegadas de diâmetro;
- e) Réplica do compartimento de carga do avião agrícola;
- f) Manômetro com escala em milímetro contendo querosene;
- g) Balança com graduação de um grama;
- h) Cronometro;
- i) Medidor de vazão de orifícios calibrados;
- j) Partículas sólidas com densidade (  $300 \text{ Kg/m}^3$  ) e granulometria igual a média da maioria dos produtos a serem utilizados.

O experimento consistiu em produzir um fluxo de ar no interior do conduto, induzido por uma bomba de sucção e controlado por uma válvula. Desta forma, reproduziu-se no interior do conduto um escoamento com as mesmas características do escoamento induzido pelo bocal no túnel de vento, porém com os valores dos parâmetros (vazão, pressão e velocidade) já devidamente corrigidos para a nova situação.

A calibração do sistema foi feita com um medidor de vazão de orifícios calibrados conectado ao conduto que liga a bomba de sucção ao compartimento de carga, conforme mostra a Figura 35.

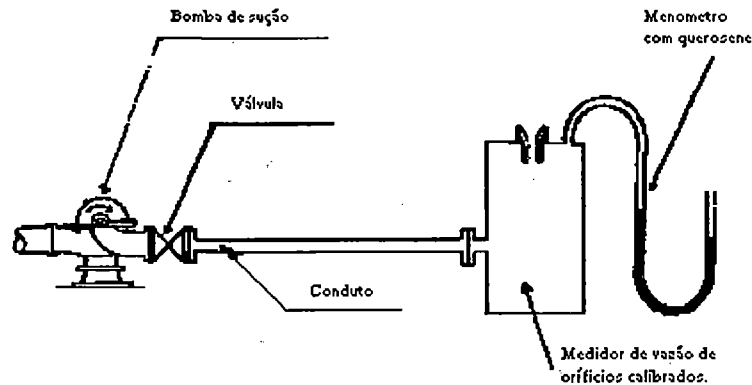


FIGURA 35 - Corte esquemático mostrando a bancada de calibração da bomba de sucção.

Para a determinação da vazão de material sólido, o experimento foi montado conforme mostra a Figura 36.

O compartimento de carga utilizado no ensaio possui, na parte inferior, um mexedor, que é equipamento original do avião, além de uma tampa de alijamento na qual foram feitas "janelas" com dispositivo de fechamento do tipo guilhotina.

Quando abertas, estas "janelas" permitem a entrada de partículas sólidas no interior do conduto, as quais são transportadas pelo fluxo de ar induzido pela bomba de sucção. Outra função destas "janelas" é fazer com que se tenha controle sobre a quantidade de partículas sólidas que entram no conduto, ou seja, as "janelas" também correspondem a válvula dosadora do sistema (Figura 37).

No caso deste experimento as "janelas" ficaram totalmente abertas, uma vez que o objetivo foi o de conhecer a vazão máxima de material sólido.

Entre o compartimento de carga e a bomba de sucção foi colocado, no conduto, um recipiente herméticamente fechado com o objetivo de reter as partículas sólidas transportadas. Este recipiente foi estrategicamente colocado sobre uma balança de forma a fornecer diretamente o resultado do experimento.



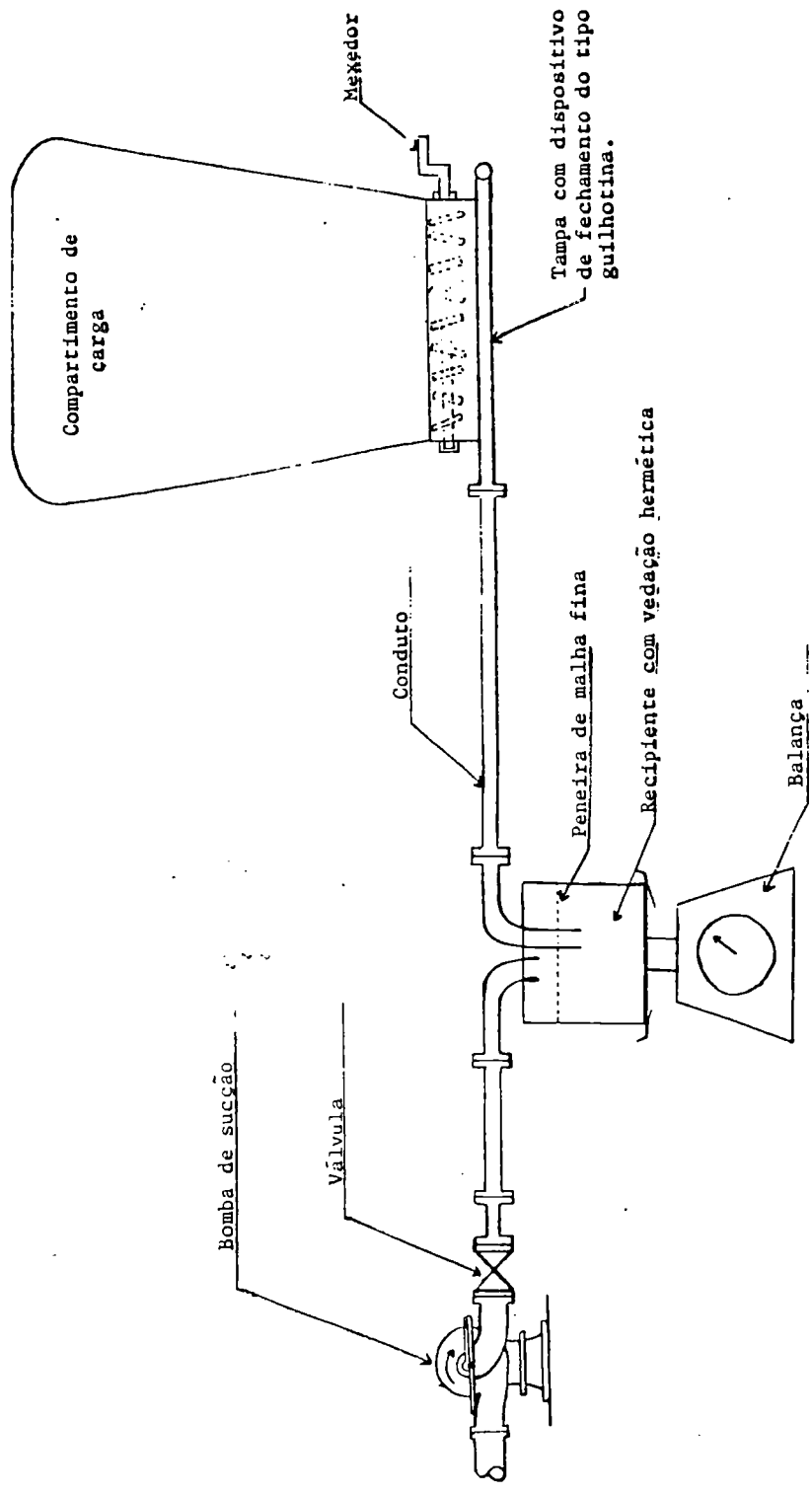


FIGURA 36 - Corte esquemático mostrando a montagem do experimento para a determinação da vazão de material sólido.

## 5. DISCUSSÃO

O aparelho para distribuição de partículas sólidas estudado neste trabalho, foi desenvolvido utilizando conceitos simples, mas diferentes daqueles utilizados pelos aparelhos já existentes. Portanto a maneira considerada mais direta para julgar a eficiência de cada componente do aparelho, e do aparelho como um todo foi através dos resultados obtidos.

Como o autor procurou, desde o principio, elaborar um texto simples e de fácil compreensão, alguns resultados foram comentados a medida em que iam sendo apresentados. Entretanto, alguns tópicos referentes a construção e uso do aparelho merecem destaque, são eles:

- **Dimensão** - Conforme descrito acima, nas seções 3.1, 3.2 e 3.3 do capítulo que trata do dimensionamento do conjunto do bocal aerodinâmico, foi conseguido um aparelho cujo comprimento (0,80 m) fica próximo da metade da corda da maioria dos aviões agrícolas. Esta característica permite que se tenha um melhor aproveitamento dos efeitos da corrente descendente (Down Wash), ou seja, pode-se adiantar ou recuar o aparelho sob a asa do avião de modo a colocar a seção de difusão antes dos efeitos do "Down Wash", ou na própria corrente descendente. Este procedimento pode ajudar a uniformizar e aumentar a faixa de deposição conforme o produto a ser aplicado.
- **Velocidade do escoamento na seção de difusão** - Conforme mostra a Tabela 3 da seção 3.3.1, que trata da avaliação experimental da distribuição de velocidade, pressão e comportamento do escoamento no interior do bocal aerodinâmico, a velocidade na seção de saída do difusor é maior que a velocidade do ar no fluxo livre não perturbado, no entanto é igual a velocidade do ar dentro da câmara de ensaio do túnel na região que compreende a seção de saída do difusor. Este fenômeno se deu devido ao espaço ocupado pelo bocal no interior da câmara de

ensaio, desta forma, para se fazer um ensaio com avião há que se fazer as devidas correções no ângulo de cone equivalente.

- **Desempenho** - O desempenho do aparelho como um todo foi avaliado no capítulo 4, que trata do conjunto do bocal como aparelho distribuidor de partículas sólidas, conforme mostra a seção 4.2.1.2, a vazão obtida em um único aparelho foi de 0,026 Kg/s. Como toda a configuração sugere que se coloquem 2 aparelhos, um sob cada asa do avião, a vazão de material sólido obtido é mais do que o suficiente para visualizar o uso do aparelho, mesmo sem se conhecer a faixa de deposição.

Outro ponto positivo, no que diz respeito ao desempenho é o menor arrasto aerodinâmico, pois, por possuir uma menor área frontal e ser isento de cantos vivos, além de gerar uma menor vorticidade, pode ser colocado sob as asas, e portanto fora da esteira da hélice.



## 6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir do estudo e experimentos realizados permitem elaborar as conclusões a seguir:

- Como contribuição, no sentido de implementar o subsídio tecnológico para a comunidade atuante na aviação agrícola, pode-se afirmar que o objetivo foi alcançado. Pois o trabalho realizado, além de instilar a pesquisa neste setor, demonstrou a viabilidade de utilização do aparelho aqui desenvolvido.
- Como aparelho para distribuir partículas sólidas por avião, pode-se afirmar que o objetivo foi alcançado. Pois a vazão de material sólido, obtida em um único aparelho, é maior do que a vazão mínima que inviabilizaria o projeto.
- Tomando-se em conta que um dos objetivos deste trabalho foi o de alcançar maior precisão na semeadura aérea, pode-se afirmar que o conceito utilizado para o desenvolvimento do sistema é válido. Pois, sendo o fluxo de ar, utilizado como transporte pneumático, induzido pela queda de pressão na "garganta" do bocal, e estando a queda de pressão relacionada com a velocidade do escoamento no interior do bocal. Observa-se que variações na velocidade do escoamento podem ser utilizadas como fatores de correção automáticos para a vazão de material sólido.

## 7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Alguns tópicos mereceriam destaque com relação à complementação deste estudo. Serão colocadas, em ordem de importância, algumas sugestões para futuros trabalhos:

- Faixa de deposição - Poder-se-ia promover uma avaliação experimental da faixa de deposição com diversos tipos e pesos de produtos a serem aplicados com o bocal aerodinâmico aqui desenvolvido. Este trabalho, por utilizar parâmetros como a relação arrasto/massa das partículas sólidas envolvidas, daria subsídio para maximizar a faixa de deposição utilizando a velocidade adequada na seção de difusão para cada tipo de partícula empregada.
- Estudo da configuração externa do bocal - Seria de grande interesse um estudo aerodinâmico da configuração externa do aparelho para minimização do arrasto no tocante a descolamentos da camada limite, efeitos de ventos laterais ou rajadas, e como isto afetaria o desempenho do bocal.
- Entrada das partículas sólidas na "garganta" do bocal - Um estudo que merecia destaque é o de promover a entrada do material sólido na "garganta" através de uma abertura anelar, ou seja, à volta toda da "garganta".
- Acoplamento do conjunto do bocal ao avião - Neste tópico poderia ser feito um estudo aerodinâmico das interferências mútuas entre a asa do avião e o aparelho.

## 8 -BIBLIOGRAFIA

AKESSON, N.B. & YATES, W.E. Pesticide application equipment and techniques. FAO Agricultural Services Bulletin 38, FAO-ONU, Roma, 1979. 257 p.

AKESSON, N.B. & YATES, W.E. Predicting and controlling flagged' and extended aircraft swaths. paper ASAE AA 84-003, 1984. 16 p.

AKESSON, N.B. & YATES, W.E. The use of aircraft in agriculture. Agricultural Services Bulletin 16 Roma & A.O. 1972.

AKESSON, N.B., E yates, W.E. , El emples de aeronaves en la agricultura e la alimentacion, Roma, 1975.

ALEXANDER, G. e TULLETT, J.S. Agricultural aviation in New Zealand, Chapter 2. Wellington, rEED. 1967.

AMSDEN, R. The serial application application of solid materials. Short Course on Aerial Application of Pesticides. Cranfield, England, 1981. 31 p.

ANONIMO. A Shell guide to the aerial application of pesticides. Shell Agriculture. England, 1982. 37 p.

ANONIMO. Curso de Aeroaplication. Ciba-Geigy, Argentina, 1986.

ANONIMO. Handbook for agricultural pilots. International Agricultural Aviation Centre, England, 1977. p. 143.

ANONIMO. Manual de Aplicação Aérea. BASF do Brasil Ltda., 1986. 21 p.

AZAR'YAN, M.B., etc. al. The Application of aviation in agriculture and forestry. Washington, D.C., US. Department of Commerce. 1966.

BALTIN, F. e BRANDT, R. An improvement of the method of measuring the distribution of fertilizers applied from the air. Proc. 3rd int. agric. aviat. cong., Arnhen, 1966 p. 119-128.

BOUSE, L.F. & CARLTON, J.B., - Factors affecting size distribution of vegetable oil spray droplets. Papes ASAE AA83-006. 1983. 17p.

CATALANO, F. M. Projeto, Construção e Calibração de um Túnel Aerodinâmico de Circuito Aberto Tipo N.P.L. de Secção Transversal Hexagona. Dissertação de Mestrado. São Carlos, 1988. p. 30-40.

CHRISTOFOLETTI, J.C. - Determinação da dosagem de aplicação e vôo de calibração para equipamentos de pulverização. CENEA, Sorocaba, 1983. 24p.

CHRISTOFOLETTI, J.C. - Equipamentos para aplicação de produtos por via líquida. CENEA, Sorocaba, 1985. 19p.

CHRISTOFOLETTI, J.C. e Monteiro, M.V.M. - Aplicação aérea de uréia granulada com distribuidor tetraédrico. Anais do X CONBEA, Campinas, 1980. p.159-173.

CHRISTOFOLETTI, J.C. Equipamentos para a aplicação de defensivos por via sólida. Aviação Agrícola, F.C.M.B.B. Botucatu, 1972. p. 74-78.

COOK, L.R. Low and Slow Eagle Agplane Private Pilot FEB 1983 58-63.



ECKERT, W.T.; MORT, K.W. and JOPPE, J. - Aerodynamic Desing Guidelines and Computer Program for Estimation of Subsonic Wind-Tunnel Perfomace, NASA TN D- 8243, October, 1976.

HENRY. J.E. - Study of distributors for applying dry materials by airplane. Research Bull. 906, Ohio Agric. Exp. St., 1962. 31p.

HOUSER, J.S. The airplane in Catalpo Sphinx control. Ohio agric. exp. station. 1922. p. 126-136

II CURSO DE AVIAÇÃO: 05 A 16 de Junho de 1989. Rio de Janeiro, 1989. pag. irreg. ( Apostila do Curso promovido pelo núcleo de Aviação Agrícola, Convênio UFRRJ-SERTA).

LEE, K.C. The desing of ducted spreaders for applications of rowders and granules. 1975. p. 203-211.

MAAN, W.J. Editorial IAAC at work agric. aviat. 1967. p. 111-113.

MATTHEWS, G.A. - Specification of application parameters. In Aerial Application of Pesticides, Vol. 1, Cranfield, 1981. 5p.

MONTEIRO, M.V.M. e CHRISTOFOLETTI, J.C. Distribuidor para sólidos de baixo arrasto, para aeronaves agricolas. Anais do VIII COMBEA, Botucatu, 1978.

MOREL, T. Comprehensive Design of Axisymetric Wind-Tunnel Contractions, Jurnal of Fluid Egeineering, June, 1977, p. 371-377.

OSEKI, Y. Uso do helicóptero na aviação agrícola. Departamento Serviços Técnicos da CIBA-GEIGY Química S.A.. São Paulo, Brasil. 1988. p. 01-13.

PEZETEL em todas partes. Pezetel - Varsóviaq. Plonia 30p.

QUANTICK, H.R. Aviation in crop, protection, pollution and insert control. Collins Professional and Technical Books, England, 1985. 428 p.

REVISTA Internacional de Aviação, nº 61-A. Edição especial de aviação agrícola, p. 3-34, Maio 1988.

ROBERTS, S.C. e SMITH, M.R. The evolution of a positive energy distribution system for the aerial application of agricultural materials. Mississippi, 1963.

SANTOS, A.M. - Queimadores a Gás com Ar Induzido, Departamento de Engenharia Mecânica da EESC, Janeiro, 1990.p. 01-25.

SANTOS, J.M.F. - Parâmetros utilizados em aviação agrícola. In Tecnologia de Aplicação de Defensivos Agrícolas. FCAV-UNESP-FUNEP, Jaboticabal, 1978. 85-120.

SANTOS, J.M.F. - Fundamentos e Tecnologia de Aplicação de Defensivos - Aviação Agrícola. Ciba-Geigy, Brasil, 1980.

SMITH, M.R. (1969) Evaluation of aircraft performace. Proc. 4 th Agric. Aviat. Congr.Kingston - 83-95.

SPILLMAN, J.J. The S.B.1 aircraft espreader. Cranfield inst. of thecnology, England, 1980. 7p.

SPUYBROEK, P.H.G. (1959) Airworyhness of agricultural airplanes. Agricultural Aviation. Vol. 1 nº 3 62-66.

STEPHENSON, J. Assesment of the performance penalty of spreaders on agricultural aircraft, 1975.

TRAYFORD, R.S. & WELCH, L.W. - Aerial spaying: a simulation of fastors inflencing the distribution and recovery of liquid droplets. Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 22. 1977. 183-196.

WEICH, F.E. (1960) Desing philosophy of agricultural airplanes. Agricultural Aviation. Vol. 2 n<sup>o</sup> 3 84-91.

WHITNEY, R.W. & KUHLMAN, D.K. - Pattern analysis of agricultural aircraft. SAE Technical Paper Series 830765, 1983. 9p.