

MARCOS COSTA MIRANDA

**PROJETO E MONTAGEM DE DISPOSITIVOS PARA UM
LABORATÓRIO DIDÁTICO DE MECÂNICA DOS FLUIDOS
UTILIZANDO SISTEMA DE ANEMOMETRIA LASER**

Projeto Mecânico (PMC-580 e PMC-
581) apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

São Paulo
1996

MARCOS COSTA MIRANDA

**PROJETO E MONTAGEM DE DISPOSITIVOS PARA UM
LABORATÓRIO DIDÁTICO DE MECÂNICA DOS FLUIDOS
UTILIZANDO SISTEMA DE ANEMOMETRIA LASER**

Projeto Mecânico (PMC-580 e PMC-
581) apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Área: Engenharia Mecânica com ênfase
em Energia e Fluidos

Orientador:
Jayme Pinto Ortiz

São Paulo
1996

Índice

INTRODUÇÃO	1
ANEMOMETRIA A LASER	2
PERFIL DE VELOCIDADES NO DUTO	9
JATO HORIZONTAL	16
RESSALTO HIDRÁULICO	20
PLACA PLANA	25
CILINDRO	34
VERTEDOURO DE SOLEIRA ESPESSA	36
BANCADA	39
CONCLUSÕES GERAIS	40
BIBLIOGRAFIA	42
ANEXOS	

Introdução:

O trabalho apresenta uma proposta de modernização do Laboratório de Mecânica dos Fluidos para o ensino de graduação e treinamento de alunos de pós-graduação. Pretende-se portanto, a partir desta proposta modernizar a disciplina PMC-328 Mecânica dos Fluidos VI ministrada a alunos do curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP.

Para o cumprimento desta proposta foi projetada e construída uma bancada experimental, onde pode ser simulado: a descarga de um jato horizontal, de um ressalto hidráulico, o escoamento sobre uma placa plana, o escoamento em torno de um cilindro e o escoamento sobre um verteduro de soleira espessa por meio de dispositivos que se foram projetados e construídos durante a realização deste projeto.

As medições de velocidade deverão ser feitas a partir da utilização de um sistema de anemometria Laser (Dantec Educational LDA and Flow System "EduSys"), com as seguintes características: marca DANTEC-EDUSYS (fabricação dinamarquesa), He-Ne com 10 mW, coaxial, comprimento de onda de 632 mm, distância focal de 300 mm. Acompanha o sistema um software específico para a aquisição e análise do sinal turbulento. Um sistema para movimentação do LDA foi especialmente projetado e construído junto a bancada de medição.

O levantamento dos perfis de velocidade, a simulação em pequena escala de situações que existem em projetos de maiores escalas, em cada experiência, acima referidas, deverão fazer parte das experiências a serem realizadas pelos alunos de graduação da disciplina PMC-328. Como treinamento foram realizadas algumas experiências no 2º semestre de 1996 com os alunos que cursaram a disciplina.

A bancada experimental proposta além de permitir o contato dos alunos de graduação com tecnologia de ponta aplicada ao estudo da Mecânica dos Fluidos, permitirá também o treinamento de pessoal de pós-graduação para a utilização de sistema **LDA** aplicado a projetos de pesquisa.

Todos os gráficos que se encontram no texto serão apresentados, em escala maior no anexo I, e os desenhos das peças no anexo II.

1.) Anemometria a Laser por Efeito Doppler (LDA)

Introdução

O anemômetro a laser é um instrumento que utiliza feixes de laser para medir a velocidade de um fluido em um determinado ponto do escoamento. Quando um feixe luminoso passa através de um fluido, a luz é espalhada por partículas em suspensão, colocadas no fluido exatamente com esse propósito (seeding particles). Essa operação é conhecida por “semear” o escoamento. A luz espalhada pelas partículas contém informações sobre a velocidade do fluido. A velocidade do fluido pode ser obtida pela frequência das ondas luminosas refletidas (Laser Doppler Anemometry ou LDA).

Efeito Doppler

Vamos considerar uma onda de luz plana de frequência f_0 propagando-se na direção do vetor unitário \vec{s} , com comprimento de onda λ . A luz é espalhada na forma de uma onda esférica por uma partícula passando por um ponto x com uma velocidade dada pelo vetor \vec{v} . Para um observador localizado numa posição qualquer na direção do vetor unitário \vec{r} (fig., 1.1) a frequência de onda luminosa espalhada pela partícula é dada por:

$$f = f_0 + \frac{\vec{v} \cdot (\vec{r} - \vec{s})}{\lambda} \quad (1.1)$$

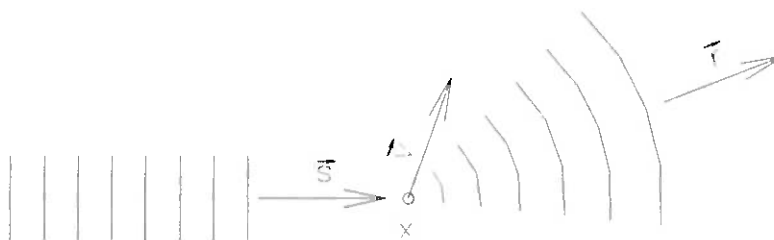


fig.1.1 - Luz espalhada por uma partícula.

Assim, vemos que a diferença f_D entre a frequência da luz incidente e a frequência da luz espalhada (“Doppler shift”) é dada por:

$$f_D = \frac{\vec{v} \cdot (\vec{r} - \vec{s})}{\lambda} \quad (1.2)$$

Temos, portanto, que f_D depende linearmente da componente da velocidade na direção $r-s$. Além disso, f_D tem um sinal associado ao sentido da velocidade.

Detecção óptica heteródina

A luz espalhada pelas partículas é recebida em um instrumento chamado fotodetector, que transforma um sinal luminoso numa corrente elétrica. A luz do laser possui uma frequência da ordem de 10^{14} Hz. Ocorre que tal frequência é muito mais alta que a frequência de resposta de qualquer detector disponível. Assim, analisando o sinal de uma única onda luminosa, seria impossível obter um sinal no fotodetector.

A saída para esse problema é combinar, no fotodetector, os sinais de duas ondas luminosas de frequências diferentes f_1 e f_2 . Tal processo, chamado de detecção óptica heteródina produz um sinal com uma parte oscilando com frequência $f_1 + f_2$ e outra parte oscilando com frequência de $f_1 - f_2$. O fotodetector responde apenas a segunda parte do sinal que tem frequência que varia entre 1 e 100 Mhz.

Sistemas ópticos

Dos sistemas ópticos básicos (“dual beam mode”, “reference beam mode” e “dual scatter”) será discutido o dual beam mode que é o sistema utilizado no laboratório.

O “dual beam mode” duas ondas luminosas planas E_{01} e E_{02} , com frequências f_{01} e f_{02} , e direções de propagação \vec{s}_1 e \vec{s}_2 , cruzam-se no espaço em um ponto x . Uma partícula dotada de velocidade \vec{v} , passando pelo ponto x (fig.1.2) provoca o espalhamento de duas ondas esféricas E_1 e E_2 , com frequências dadas por:

$$f_1 = f_{01} + \frac{\vec{v} \cdot (\vec{r} - \vec{s}_1)}{\lambda} \quad (1.3)$$

$$f_2 = f_{02} + \frac{\vec{v} \cdot (\vec{r} - \vec{s}_2)}{\lambda} \quad (1.4)$$

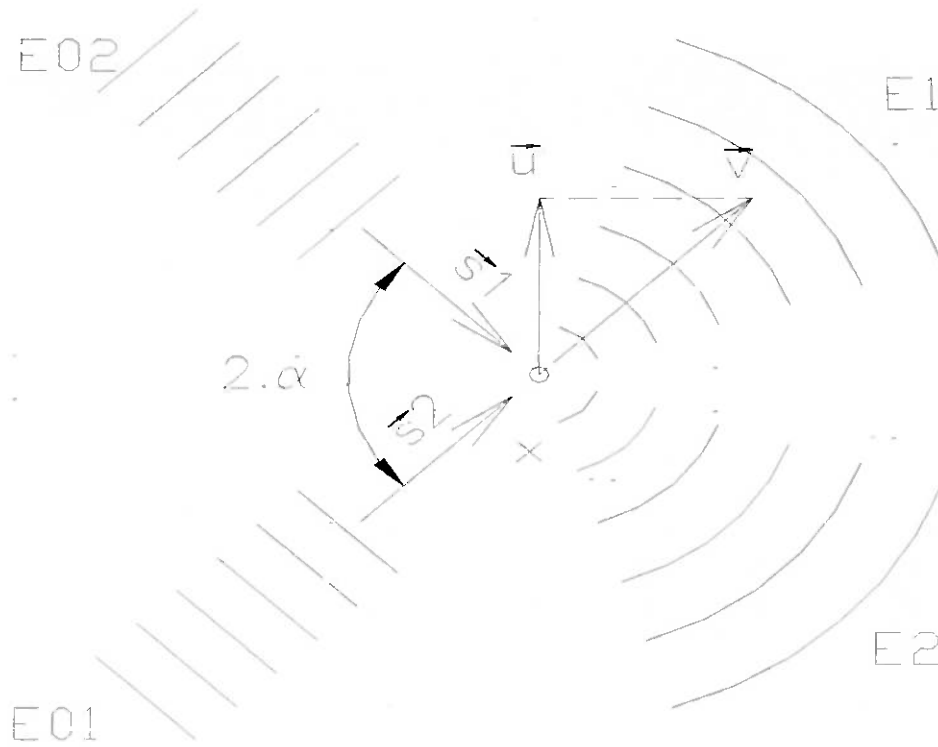


fig.1.2 - "Dual beam mode"

A diferença entre as frequências, que gera um sinal no fotodetector, é dada por:

$$f_1 - f_2 = f_s + f_D \quad (1.5)$$

onde

$$f_s = f_{01} - f_{02} \quad (1.6)$$

$$f_D = \frac{\vec{v} \cdot (\vec{s}_2 - \vec{s}_1)}{\lambda} \quad (1.7)$$

Se u é a componente do vetor \vec{v} na direção $(\vec{s}_2 - \vec{s}_1)$, é fácil ver, de acordo com a fig.2, que f_D é dado por:

$$f_D = \frac{2 \cdot u \cdot \sin \alpha}{\lambda} \quad (1.8)$$

Assim, nós temos que, analisando a frequência do sinal da corrente gerada no fotodetector, é possível determinar o valor da componente da velocidade na direção $(\vec{s}_2 - \vec{s}_1)$, determinando inclusive o seu sentido, através de:

$$u = \frac{(f_1 - f_2 - f_s) \cdot \lambda}{2 \cdot \sin \alpha} \quad (1.9)$$

Na interseção dos feixes monocromáticos e coerentes (laser) se formam franjas de interferência planas (fig.1.3) cujas distâncias de separação podem ser calculadas através do ângulo de interseção dos feixes (2α) e do comprimento de onda do feixe (λ). Essa distância é dada pela fórmula:

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin(\alpha)} \quad (1.10)$$

sendo assim

$$u = f_D \cdot d_f = f_D \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot \sin(\alpha)} = (f_1 - f_2 - f_s) \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot \sin(\alpha)} \quad (1.11)$$

O fator d_f será chamado de fator de calibração do LDA pois seus valores podem ser fixados, sendo que a componente, perpendicular aos planos das franjas de interferência, da velocidade da partícula imersa no fluido será diretamente proporcional à frequência Doppler (f_D).

Se os dois feixes incidentes tiverem as mesmas frequências teremos:

$$f_D = f_1 - f_2 \quad (1.12)$$

e a velocidade da partícula imersa no fluido será diretamente proporcional a aquela detectada pelo fotodetector.

O sistema básico do LDA com franjas de interferências estacionárias não é capaz de diferenciar entre velocidades positivas e negativas (não há frequências negativas). Portanto é necessário desenvolver um sistema que movimente com uma velocidade conhecida as franjas de interferência na direção oposta à direção preferencial de movimento das partículas, pois se houver sentido oposto ao preferencial ainda obteremos uma frequência positiva coerente, menor que a frequência obtida para uma partícula em repouso. Para obtermos franjas móveis fazemos que um dos feixes passe por uma célula de Bragg que eleva a frequência desse feixe, e com feixes de diferentes frequências conseguimos o efeito de movimentação das franjas. Podemos ajustar, assim a frequência que define a velocidade zero somando-se ou subtraindo-se eletronicamente a frequência do sinal obtido no fotodetector.

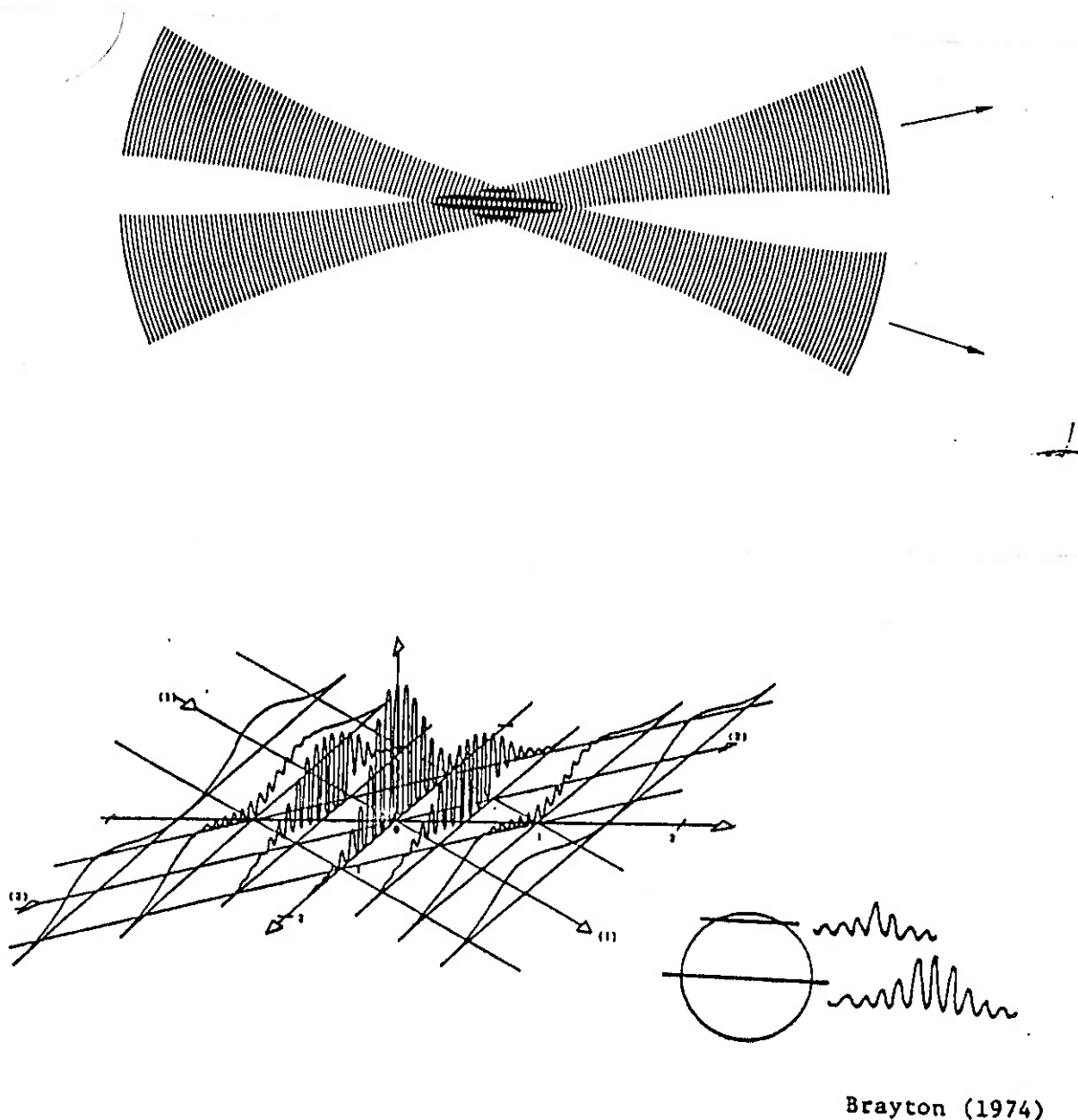


fig.1.3 - Franjas de interferência

Componentes do sistema de anemometria a laser (LDA)

Basicamente, o sistema é composto de:

- laser: produz um feixe luminoso de alta intensidade e altamente colimado. Na anemometria se usa mais frequentemente lasers de He-Ne de baixas potências (0,5-25mW e $\lambda=632,8\text{nm}$).

- "beamsplitter": separa o feixe de laser inicial em dois feixes de igual intensidade.
- "Bragg cell": faz com que um dos feixes incidentes tenha sua frequência aumentada de um valor conhecido para que possamos medir velocidades em sentidos opostos ao do preferencial (turbulência).
- lente óptica emissora: força o cruzamento dos feixes.
- lentes coletoras: recebem a luz espalhada pelas partículas e a focalizam no fotodetector.
- fotodetector: transforma a energia luminosa em energia elétrica.
- processador de sinal: transforma a frequência da corrente do fotodetector em sinal contínuo analógico de voltagem, e este em um sinal discreto digital.
- processador de dados : a partir do sinal digital faz a análise estatística dos resultados.

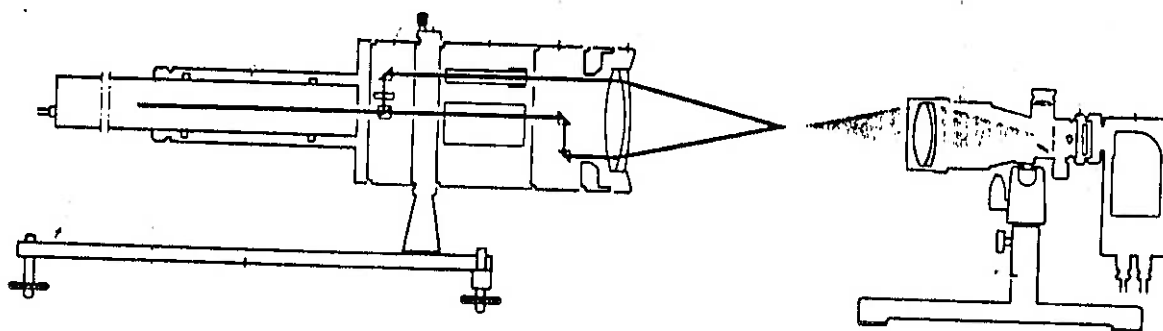


fig.1.4 - Esquema simplificado do sistema de aquisição do LDA

Partículas

A escolha adequada das partículas para semear o escoamento é importante para gerar um sinal forte em relação aos ruídos provenientes do ambiente e da própria aparelhagem.

Devemos lembrar que as partículas devem seguir o escoamento eficientemente, sem tendência a flutuar, e com a velocidade mais próxima o possível do fluido (o arrasto é fruto justamente da diferença de velocidades entre o fluido e as partículas).

Experimentalmente, nota-se que, para pequenas partículas, com diâmetro bem menor que comprimento da onda de luz, a luz é espalhada com igual intensidade tanto na direção de origem dos feixes quanto na direção oposta. Já para as partículas com o diâmetro da ordem do comprimento de onda, a luz espalhada na direção de origem dos feixes é bem menor que na direção oposta. Para partículas bem maiores que o comprimento de onda, a diferença fica ainda bem mais acentuada.

A escolha do material e tamanho da partícula é sempre em função da velocidade e tipo do fluido. A concentração de partículas no fluido é importante para definir a taxa e tempo de amostragem. Pequenas concentrações podem exigir tempos e taxas de amostragem maiores. Algumas partículas usadas são esferas de látex, pó de alumínio, plástico e bolhas para água, e atomização de água ou óleo, esferas de teflon, fumaça ou vapor para ar.



fig.1.5 - Espalhamento de luz por uma partícula esférica.

2.) Perfil de velocidades no duto sem e com os retificadores

Levantamento do Perfil de Velocidades

Foram feitos levantamentos dos seguintes perfis de velocidades em quatro seções diferentes. O objetivo era saber se o perfil de velocidades estava razoavelmente plano para se realizar experiências nas quais o perfil de velocidade plano era fundamental, como o estudo do escoamento em torno de um cilindro e sobre uma placa plana.

As seções se encontram a aproximadamente 50mm (1), 200mm (2), 400mm (3) e 650mm (4) do início da seção de testes. Os perfis levantados foram os seguintes:

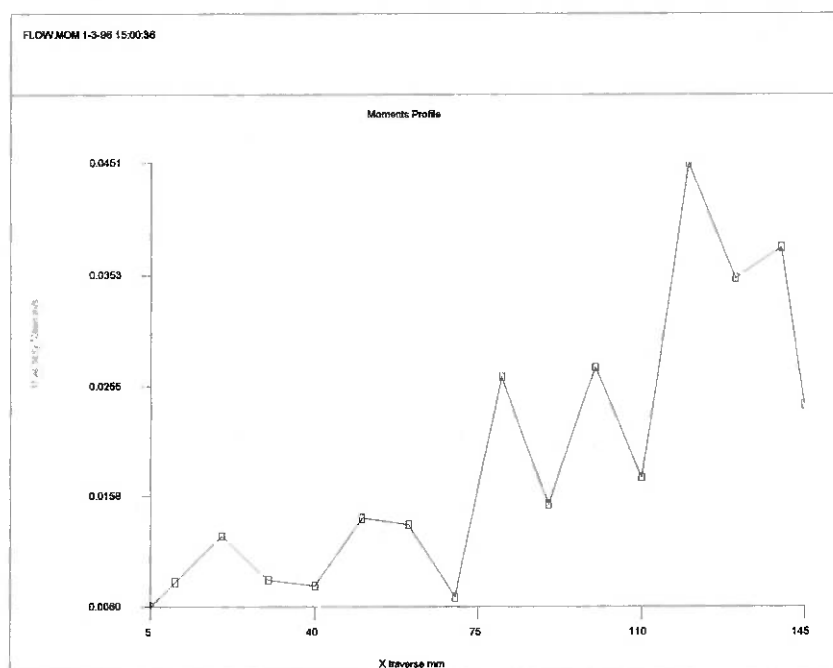


fig.2.1 - Seção 1 (50mm);

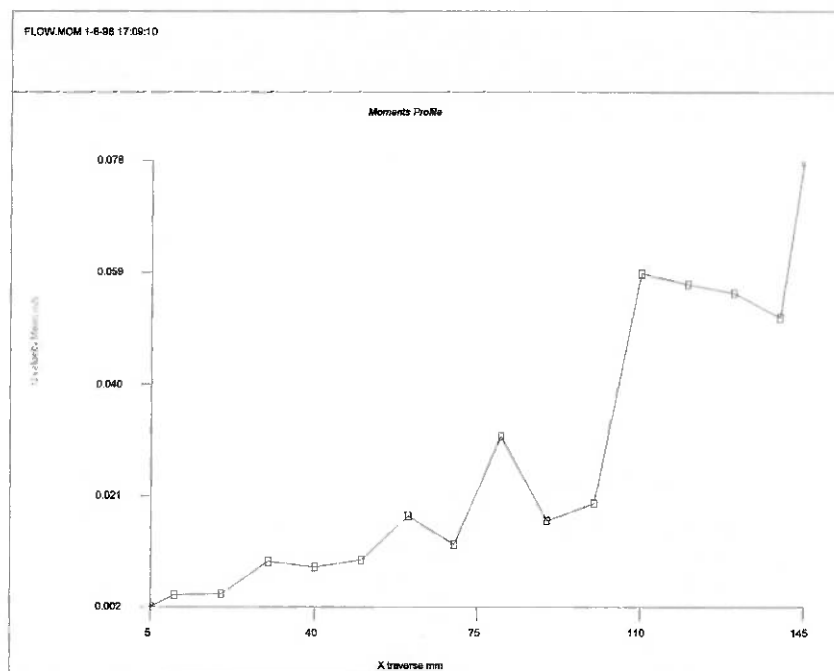


fig.2.2 - Seção2 (200mm);

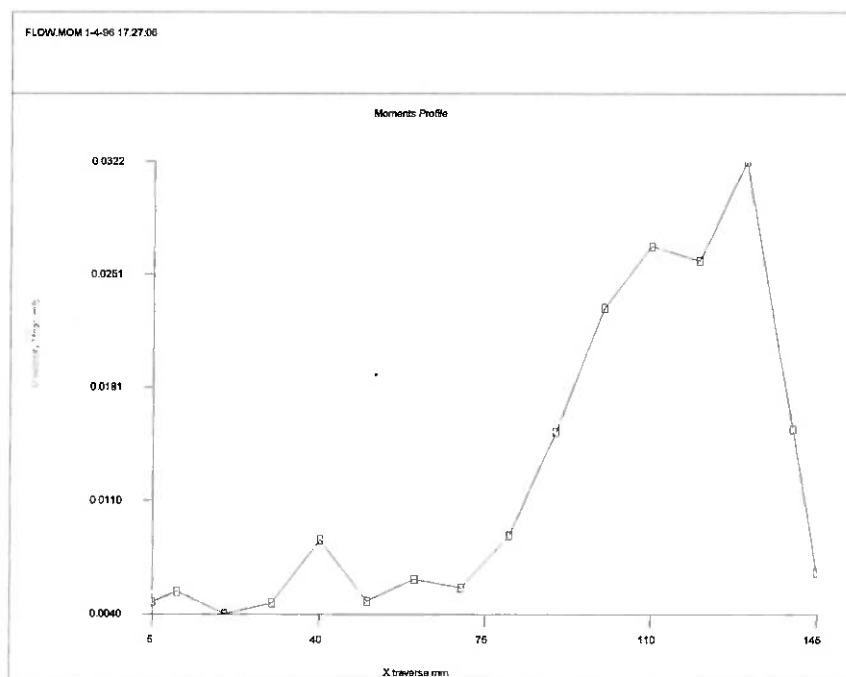


fig.2.3 - Seção3 (400mm);

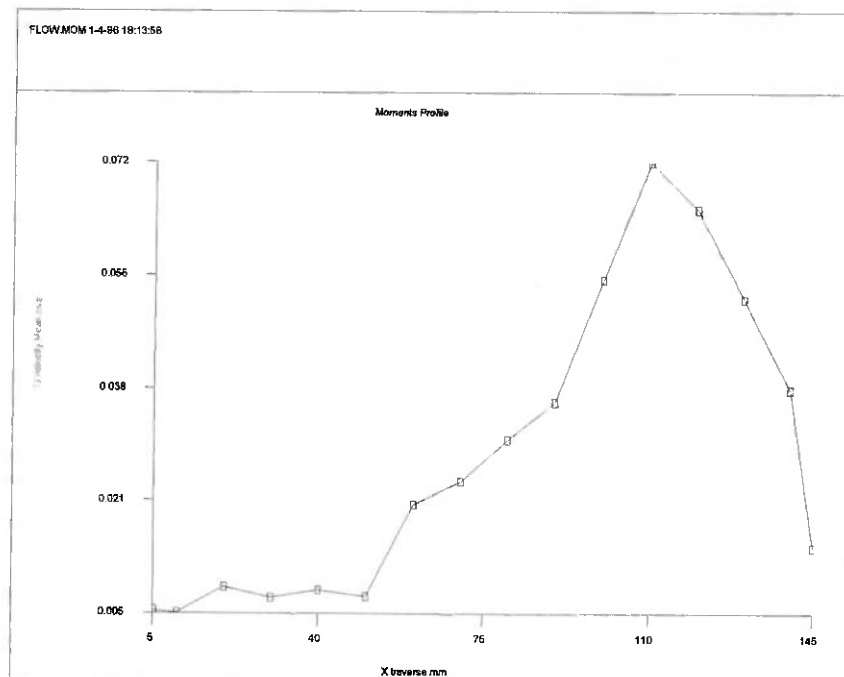


fig.2.4 - Seção 4 (650mm);

Como pode ser observado o perfil de velocidades se encontra bastante assimétrico e não plano, sendo portanto necessário algum tipo de retificador.

Retificador de Fluxo (tubos):

O primeiro passo foi o de desenvolver um retificador de fluxo para que pudéssemos obter um perfil de velocidades o mais plano possível para executarmos as experiências que tem como objetivo o estudo dos perfis de velocidade antes e depois de objetos inclusos na seção de testes. Para isso foi testada uma primeira alternativa seguindo a norma ISO 5167:

D - diâmetro do duto;

d - diâmetro dos tubos retificadores;

l - comprimento dos tubos retificadores;

Foi considerado, por ser a seção de testes retangular, o diâmetro hidráulico no lugar do diâmetro do duto (D). Sendo assim, o diâmetro do duto:

$$D = \frac{4 \times 100\text{mm} \times 150\text{mm}}{2 \times (100\text{mm} + 150\text{mm})} \Rightarrow D = 120\text{mm}$$

Segundo a norma $d \leq 0,2D$, portanto: $d \leq 24\text{mm}$, dessa maneira foi escolhido tubos de plástico (canudos de refrigerante) com diâmetro de aproximadamente 3mm.

A norma também exige que o comprimento dos tubos (l) seja superior ou igual a dez vezes o diâmetro dos tubos retificadores: $l \geq 10d$, sendo assim $l \geq 30\text{mm}$. Para garantir um bom resultado, o comprimento dos tubos foi aproximadamente igual a 35mm.

Foram obtidos os seguintes perfis com o retificador de fluxo a 200mm depois do início da seção de testes:

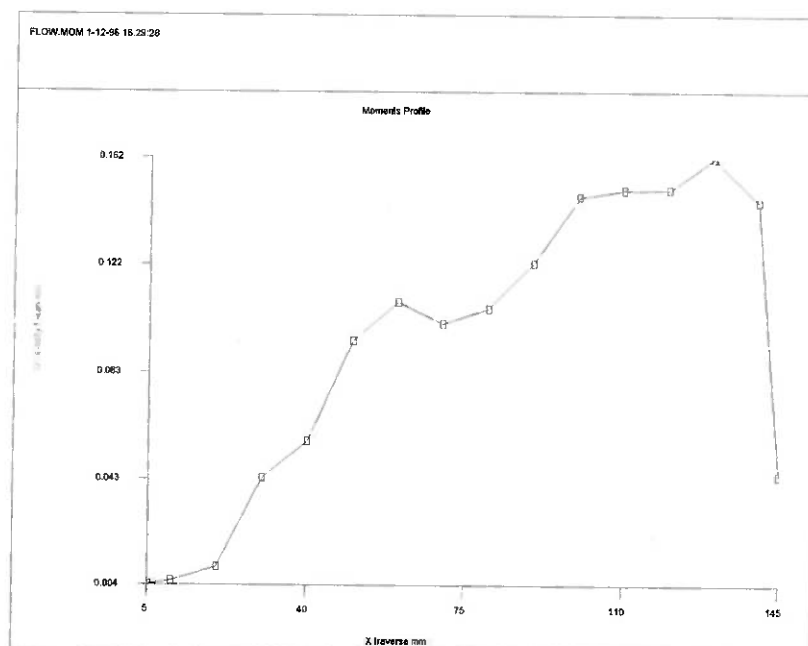


fig.2.5 - Seção2 (200mm) com o retificador de tubos;

Ao se inverter a posição do retificador:

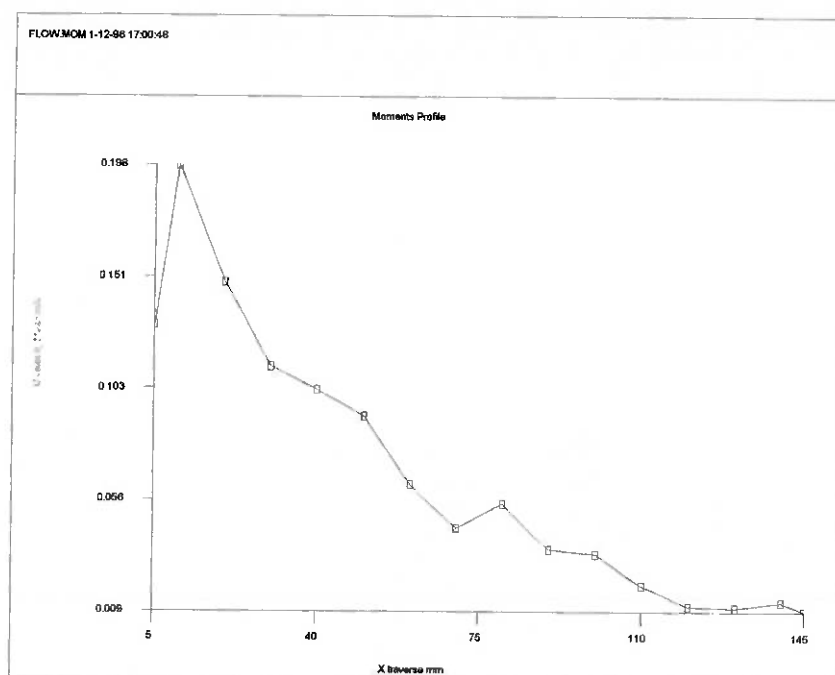


fig.2.6 - Seção2 (200mm) invertendo-se o retificador;

Como se pode observar esse tipo de retificador não funcionou a contento, sendo que uma segunda alternativa foi testada, a colocação de telas (malhas) na entrada da seção de testes ou combinar a colocação das telas com os tubos retificadores.

Retificador de Fluxo (telas + multi-tubos):

Para tentar retificar o fluxo passamos para tentativa de se inserir na entrada do duto telas de malha fina para aumentarmos a turbulência e a dissipação. Para isso foi construído um flange para fixar as telas, quatro duas a duas, na entrada do duto. Como verificado posteriormente o arranjo das telas mais o retificador de tubos proporcionou um escoamento razoavelmente plano. A velocidade máxima ficou no máximo 15% acima da menor velocidade na seção de testes (da região onde os testes são realizados), sendo que também não foi verificado nenhum turbilhonamento e que a direção das velocidades se mostrou uniforme e coerente com o sentido do escoamento.

Alguns perfis de velocidade foram levantados, como é mostrado a seguir:

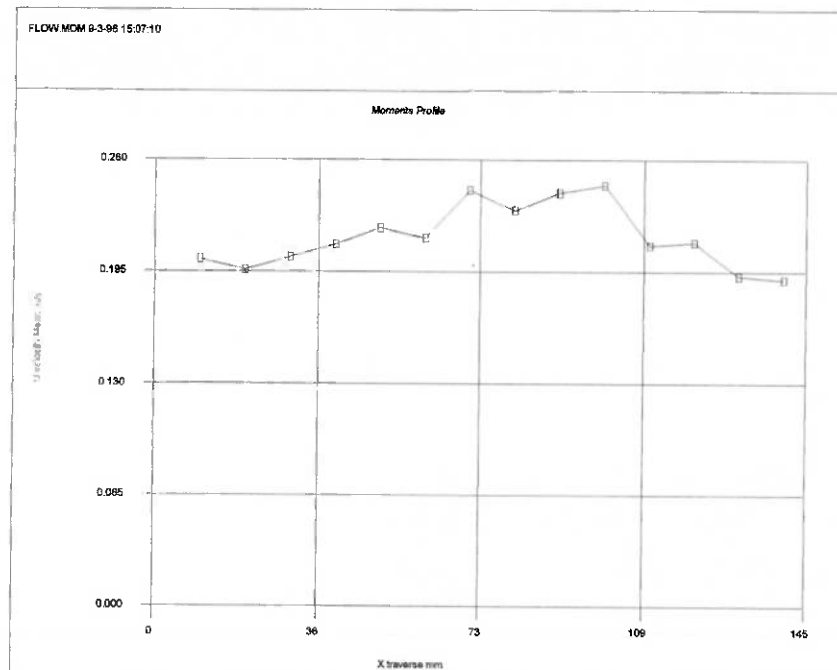


fig.2.7 - Seção2 (200mm) retificador (tela + multi-tubos);

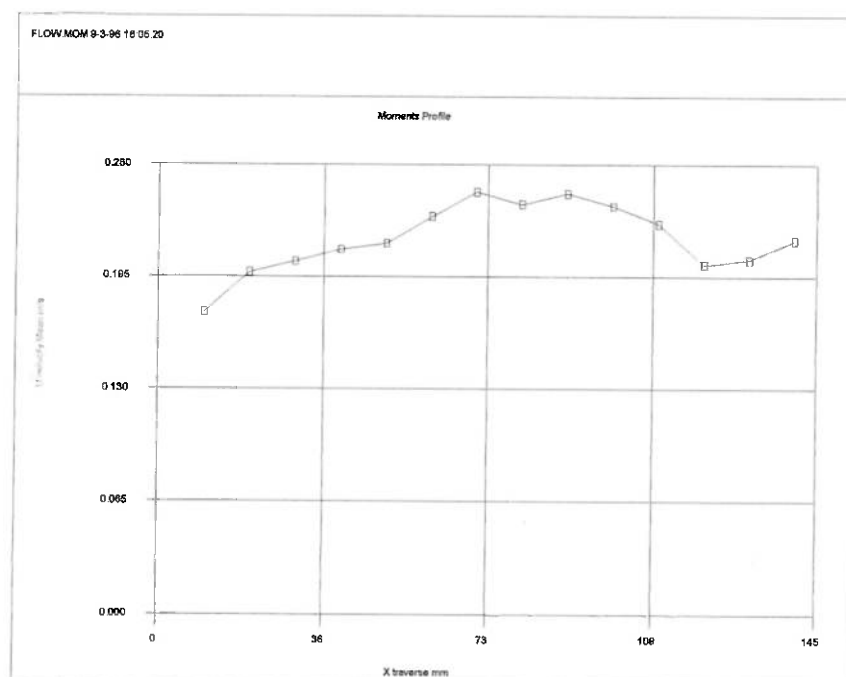


fig.2.8 - Seção4 (400mm) retificador (tela + multi-tubos);

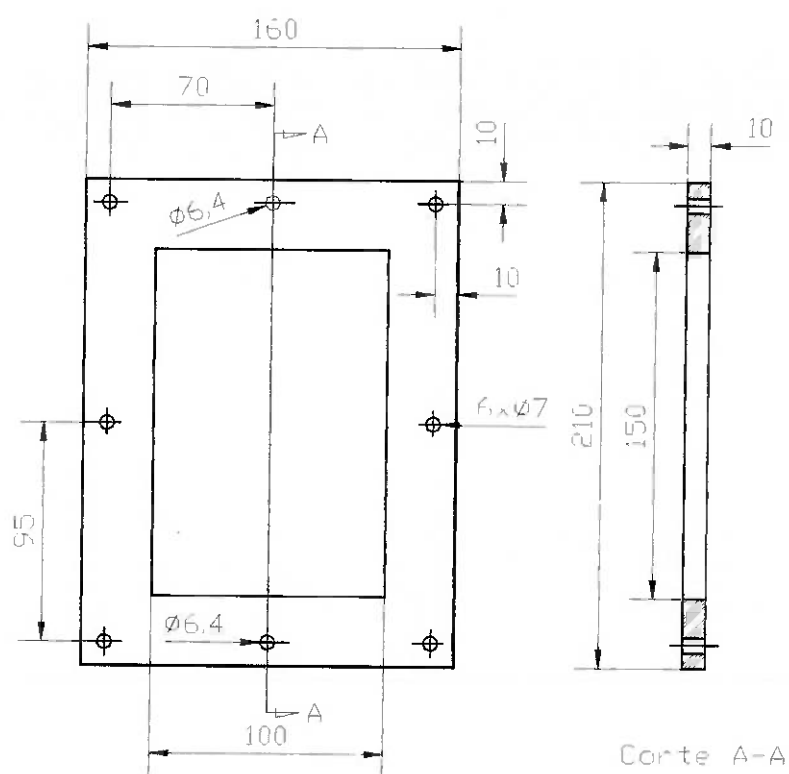


fig.2.9 - Flange suporte para as telas retificadoras;

3.) Jato Horizontal

Objetivo

Mostrar o desenvolvimento do perfil de velocidades, em variadas seções, de um jato horizontal submerso e analisar os efeitos que o confinamento produz sobre ele. Ao se fazer a investigação do fenômeno os alunos poderão ter a noção da dissipação de energia que ocorre quando o jato entra o reservatório. A distribuição é teoricamente simétrica e se assemelha com uma distribuição normal, como poderá ser visto o ensaio se mostrou compatível ao objetivo de demonstração do efeito, ao mesmo tempo pôde ser observado o efeito que a parede exerce sobre o escoamento (velocidades negativas).

Memorial de cálculo

Velocidade máxima (aproximada) média do jato horizontal:

$$D := .01 \cdot \text{m} \quad S := \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$Q := .003 \frac{\text{m}^3}{\text{sec}} \quad \text{Vazão máxima da bomba (teste realizado para o Ressalto Hidráulico)}$$

Considerando uma perda de carga razoável (sistema mais placa com o orifício):

$$Q := .001 \frac{\text{m}^3}{\text{sec}} \quad (\text{Reduzinda a 1/3 da vazão máxima})$$

$$V = \frac{Q}{S} \quad V = 12.732 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$$

Como pode ser observado a velocidade é compatível para se obter os resultados abaixo para o número de Reynolds desejado.

Cálculo do número de Reynolds:

$$V = .5 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad D := .01 \cdot \text{m} \quad \nu := 1.130610^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$$

$$\text{Re} := \frac{V \cdot D}{\nu} \quad \text{Re} = 4.422 \cdot 10^3$$

$$V = 1.2 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

$$\text{Re} := \frac{V \cdot D}{\nu} \quad \text{Re} = 1.061 \cdot 10^4$$

Como podemos ver o diâmetro de 10mm é suficiente para que tenhamos uma alta velocidade na saída do jato (regime turbulento, $\text{Re} > 2 \times 10^3$).

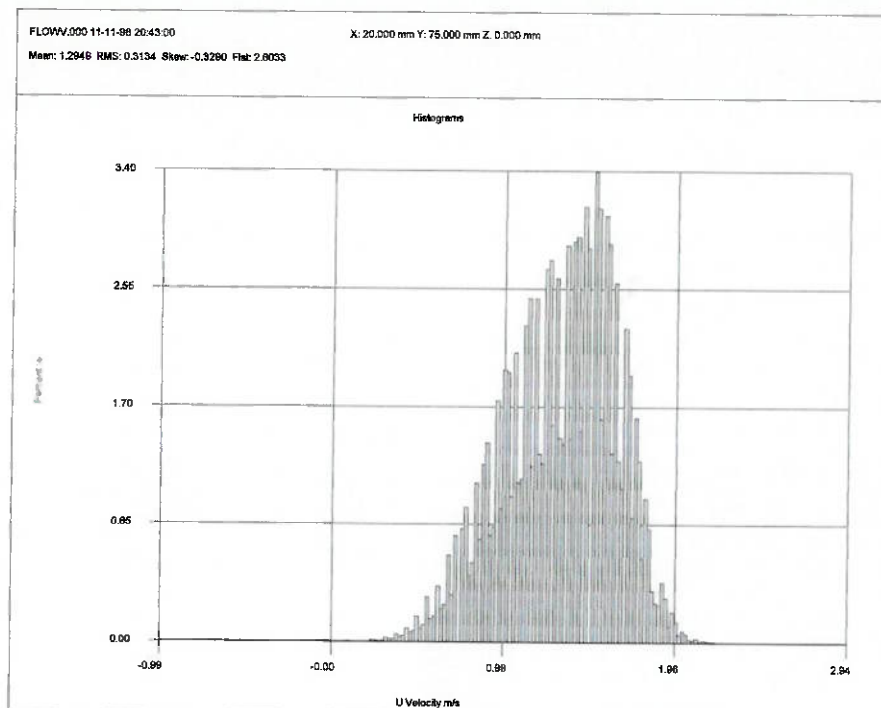


fig.3.1 - : Distribuição (Histograma) da velocidade do jato na sua saída

Perfis de velocidades aquisitados

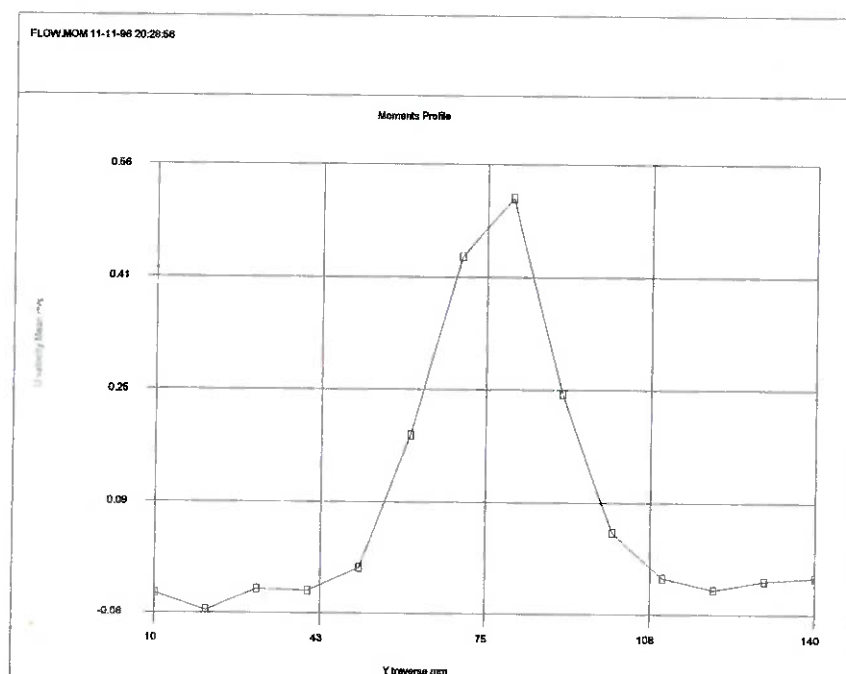


fig.3.2 - Perfil de velocidades do Jato Horizontal, Seção (100mm)

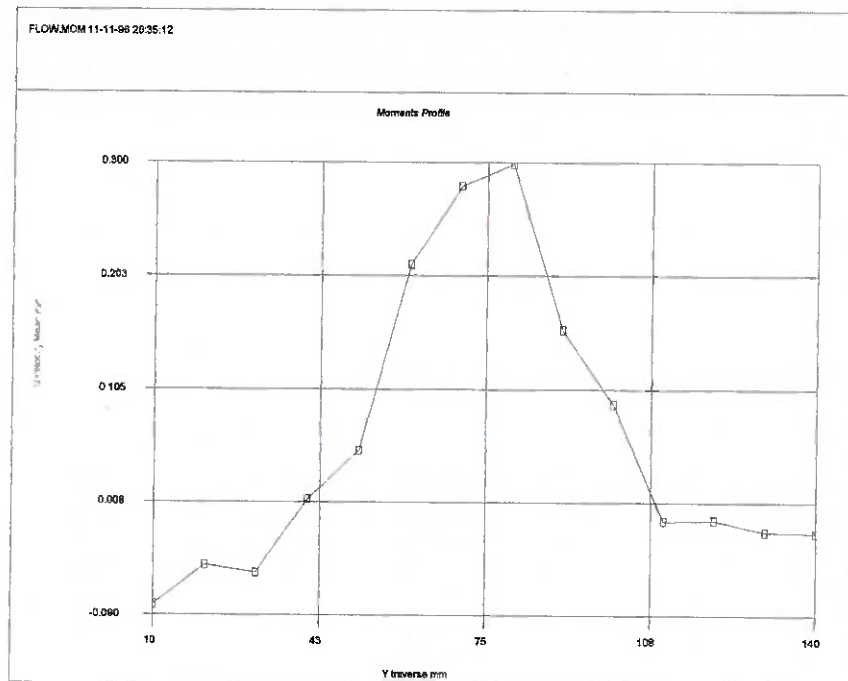


fig.3.3 - Perfil de velocidades do Jato Horizontal, Seção (200mm)

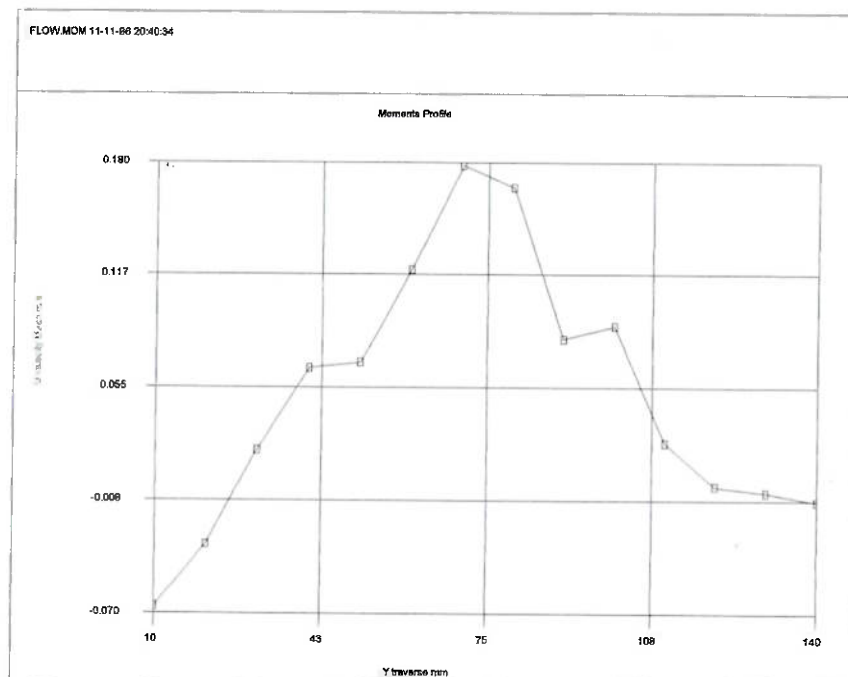


fig.3.4 - Perfil de velocidades do Jato Horizontal, Seção (300mm)

Comentários:

Como pôde ser observado pelos ensaios o perfil de velocidades para o jato horizontal se comportou dentro do previsto sendo que sua maior velocidade se encontrou no meio da seção de testes. Também pode ser observado que houve recirculação perto das paredes do duto, sendo observadas velocidades negativas; esse efeito se deve ao confinamento do jato dentro do duto de testes que não era suficientemente grande para se supor um jato livre.

A velocidade máxima, que se encontra no centro do escoamento, decresce rapidamente ao se distanciar do orifício de entrada do jato, e o perfil de velocidades se torna mais plano com a dispersão do jato.

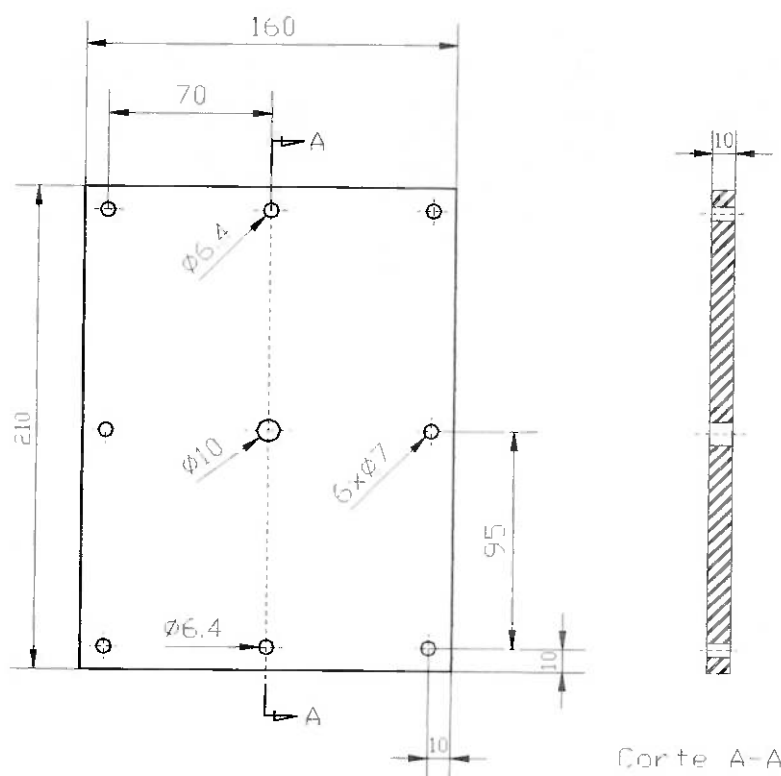


fig.3.5 - Placa para o jato horizontal;

4.) Ressalto Hidráulico

Objetivo

Estudar a variação brusca do regime torrencial para o regime fluvial. Mostrar aos alunos a grande dissipação de energia que ocorre no ressalto hidráulico e o efeito em si que ocorre frequentemente na saída de comportas, que se mal avaliado pode ter consequências danosas ao sistema em que se situa (ex.: barragens).

Introdução Teórica

Ao estudarmos o escoamento compressível verificamos certas semelhanças com o escoamento em superfícies livres. Como no escoamento compressível temos a onda de choque no escoamento de superfície livre temos o fenômeno semelhante que é chamado ressalto hidráulico e é mostrado esquematicamente na figura abaixo:

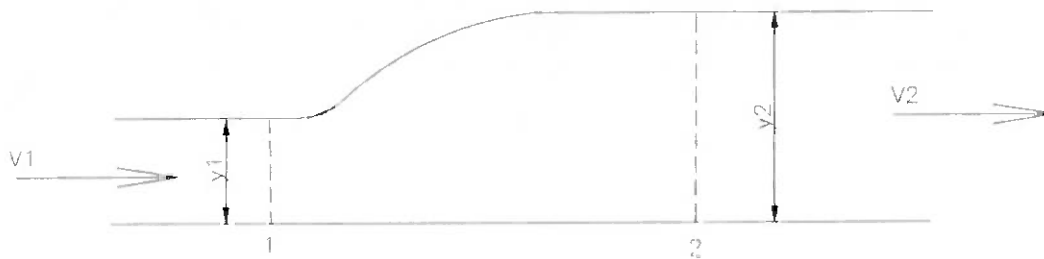


fig.4.1 - Representação esquemática de um ressalto hidráulico.

O canal consideraremos como tendo largura b . O ressalto hidráulico pode ocorrer quando existe um escoamento torrencial (supercrítico) em um canal com uma obstrução ou uma rápida mudança na seção transversal. No ressalto passamos de um escoamento torrencial (supercrítico) para um escoamento fluvial (subcrítico) tendo uma maior profundidade.

Para estudar o ressalto hidráulico, devemos considerar um escoamento permanente onde a posição do ressalto permaneça fixa (número de Froude em torno de 5). O volume de controle foi desenhado de forma a expor as condições de escoamento a montante (seção 1) e a jusante (seção 2) do ressalto hidráulico. Nestas seções devemos considerar o escoamento unidimensional; tomando as seções 1 e 2 razoavelmente próximas do salto, podemos desprezar o atrito no leito do canal sem sérios erros.

Usando as equações da continuidade e da quantidade de movimento para este volume de controle, relacionamos as profundidades y_1 e y_2 , antes e depois do ressalto. Assim, a equação da continuidade para o escoamento incompressível nos dá

$$b \cdot y_1 \cdot V_1 = b \cdot y_2 \cdot V_2 = q_T$$

onde q é a vazão total, uma constante para o problema. Usando distribuições de pressão hidrostática nas seções 1 e 2 temos, pela equação da quantidade de movimento na direção do escoamento,

$$\frac{\gamma \cdot y_1}{2} \cdot b \cdot y_1 - \frac{\gamma \cdot y_2}{2} \cdot b \cdot y_2 = \rho \cdot q_T \cdot (V_2 - V_1)$$

Da equação da continuidade temos: $V_2 = \frac{y_1}{y_2} \cdot V_1$

Substituindo na equação do momento e resolvendo para a relação das profundidades a montante e a jusante temos:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot F_1^2} - 1 \right)$$

onde: $F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot y_1}}$ (número de Froude)

A perda de carga no ressalto é um importante parâmetro no ressalto hidráulico. A equação da energia através do ressalto é:

$$\left(\frac{V_1^2}{2 \cdot g} + y_1 \right) - \left(\frac{V_2^2}{2 \cdot g} + y_2 \right) = h_f$$

que substituindo na equação anterior e na da continuidade nos dá:

$$h_f = \frac{(y_2 - y_1)^2}{4 \cdot y_1 \cdot y_2}$$

A equação é resolvível matematicamente para $F_1 > 1$ e $F_1 < 1$, mas se resolvermos para $F_1 < 1$ teremos uma perda de carga negativa, o que é impossível fisicamente.

Para que tenhamos um ressalto hidráulico estável temos que ter o número de Froude entre 4,5 e 9,0.

Por ser o anemômetro sensível às bolhas de ar que o ressalto hidráulico forma, tivemos que efetuar a experiência do ressalto afogado para obtermos as medições dos perfis de velocidade mostrados a seguir. Para efeito didático podemos mostrar o ressalto livre para que os alunos tenham a noção do formato do ressalto, mas para efetuarmos as medidas tivemos que afogá-lo.

Memorial de cálculo

Como podemos ver teremos a vazão que necessitamos para obtermos um ressalto estável. Com esses dados foi possível construir uma comporta que tem a forma:

Para termos estabilidade no ressalto hidráulico, o número de Froude deve ser aproximadamente igual a 5 ou maior.

$$F := 5$$

$$g_{\text{grav}} := 9.8 \cdot \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$$

l : largura do canal

h : altura da comporta

S : área da comporta

$$l := 0.01 \cdot \text{m}$$

$$h := 0.02 \cdot \text{m}$$

$$S := l \cdot h$$

$$S = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \text{m}^2$$

Q : vazão

$$Q := F \cdot S \cdot \sqrt{g_{\text{grav}} \cdot h}$$

$$Q = 4.427 \cdot 10^{-4} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$$

vazão necessária para se obter o F desejado

Fazendo-se um pequeno ensaio verificou-se que a vazão máxima da bomba foi de:

$$St := .38 \cdot \text{m} \cdot .38 \cdot \text{m}$$

área do fundo do tanque

$$\Delta h := .1 \cdot \text{m}$$

variação na altura do tanque

$$\Delta \text{Vol} := St \cdot \Delta h$$

volume deslocado de água do tanque

$$\Delta t_1 := 5.71 \cdot \text{sec}$$

$$\Delta t_2 := 5.42 \cdot \text{sec}$$

$$\Delta t_3 := 5.03 \cdot \text{sec}$$

três tomadas de tempo

$$\Delta t := \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3}{3}$$

$$\Delta t = 5.387 \cdot \text{sec}$$

$$Q_b := \frac{\Delta \text{Vol}}{\Delta t}$$

$$Q_b = 0.003 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$$

vazão máxima da bomba

Perfis de velocidades aquisitados

Alguns ensaios foram realizados para obtermos os perfis de velocidades, no ressalto afogado, em algumas seções, os quais foram:

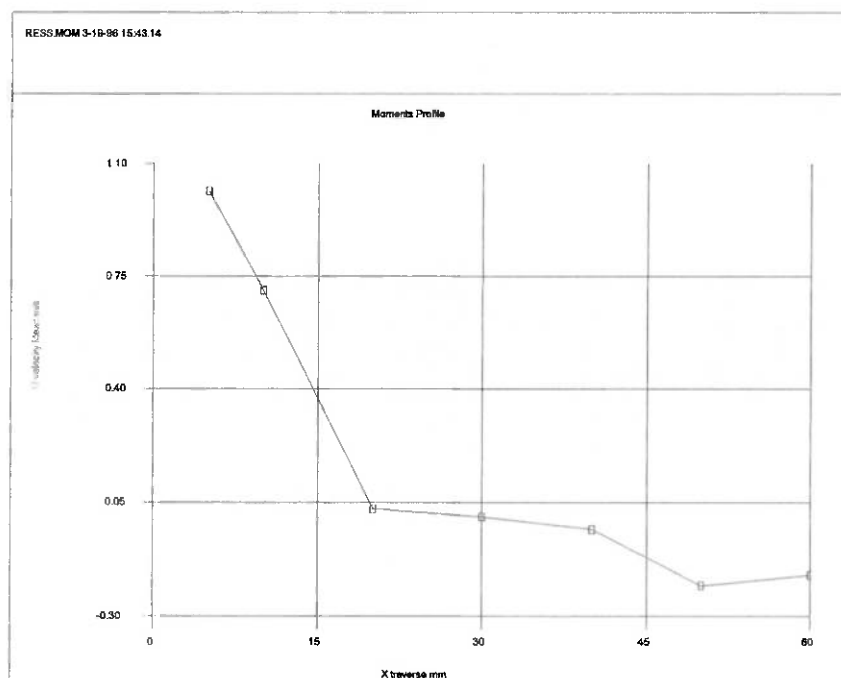


fig.4.2 - Seção1 (100mm);

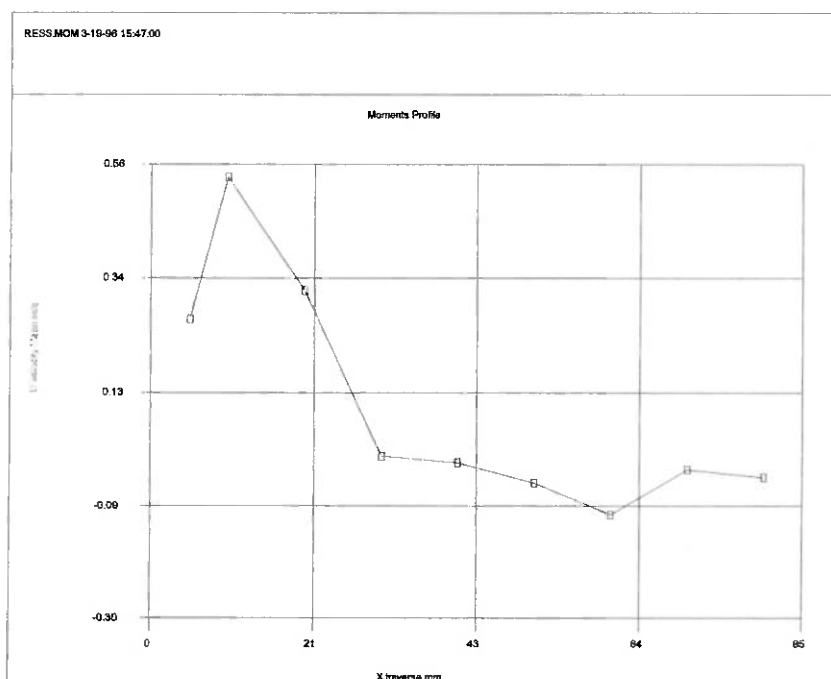


fig.4.3 - Seção2 (200mm);

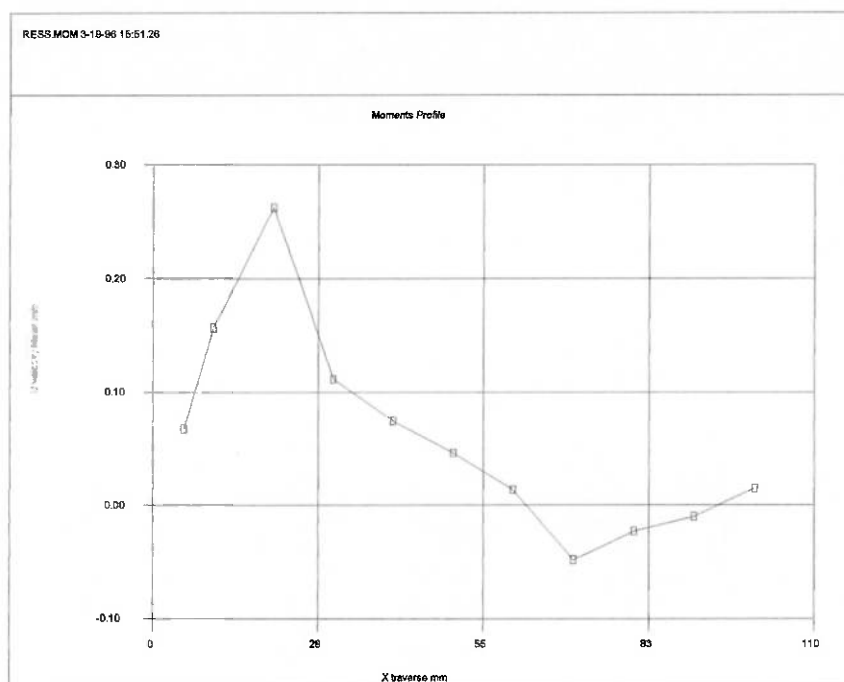


fig.4.4 - Seção 3 (300mm);

Comentários:

Como pôde ser observado pelos ensaios o perfil de velocidades para o ressalto hidráulico se comportou dentro do previsto, sendo perfeitamente visível recirculação da água na parte superior do ressalto.

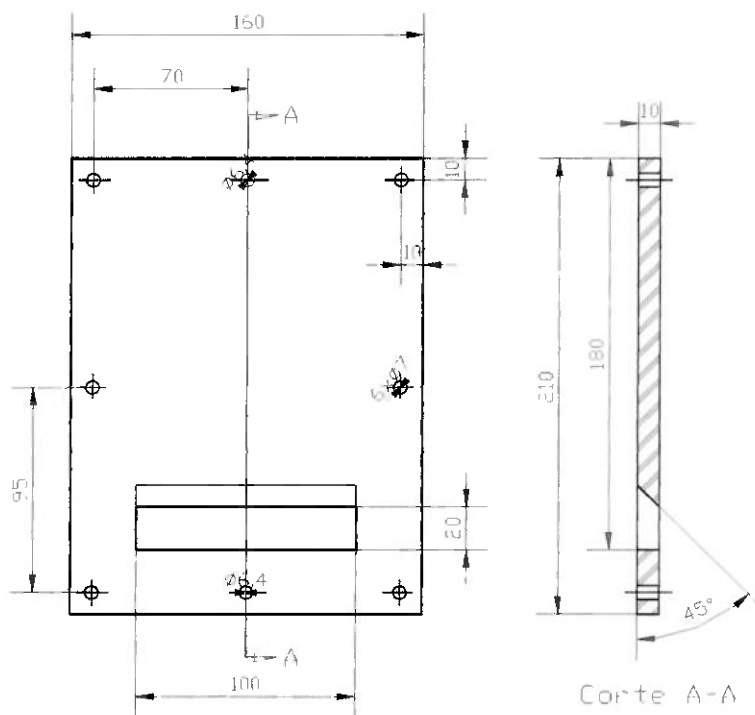


fig.4.5 - Placa do ressalto;

5.) PLACA PLANA

Objetivo

Estudar o efeito da camada limite laminar sobre o escoamento é o objetivo deste dispositivo. Para tal foi construída uma placa plana com bordo de ataque em ângulo bem agudo com comprimento o suficientemente grande para que pudéssemos ter o desenvolvimento da camada limite laminar a uma espessura que pelo menos uma medição pudesse ser feita dentro da camada limite.

Introdução ao Tema

Ao estudarmos a respeito da camada limite, nos vem logo à memória os estudos realizados por Prandtl, Blasius (aluno de Prandtl) e Von Kármán sobre o assunto. No estudo da camada limite sempre é apresentado a experiência da placa plana, por ser esta a mais fácil de equacionar e com exemplos já realizados. Por esse motivo é de interesse ao curso de Mecânica dos Fluidos a apresentação desta experiência para que os alunos possam observar que os resultados teóricos se aproximam do real, o que motiva os alunos ao estudo do assunto.

Na análise foi admitido um escoamento bidimensional, incompressível, em regime permanente e desprezando as forças de campo. O resultado (exato) que Blasius encontrou para a equação da camada limite (simplificada) para um fluido em movimento sobre uma placa plana quando há uma pressão constante exercida pela corrente principal sobre a camada-limite (gradiente de pressão nulo) foi:

$$\frac{\delta}{x} = 4,96 \cdot (\text{Re})^{-1/2}$$

onde : δ é a espessura da camada limite

Re é o número de reynolds em relação à distância da borda de ataque da placa plana

x é a distância da borda de ataque da placa plana

Tomando-se essa equação podemos comparar os resultados experimentais com os teóricos.

Esquematicamente ($\delta = d$):

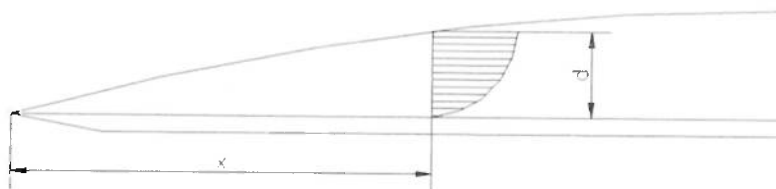


fig. 5.1 - Camada Limite Laminar na Placa Plana.

Perfis de velocidades aquisitados

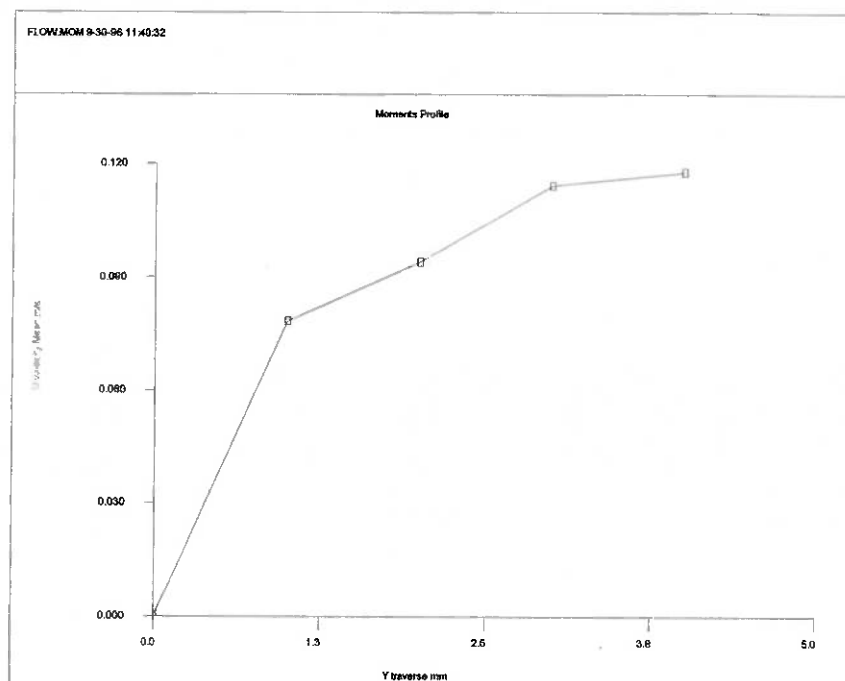


fig.5.2 - Perfil de velocidades da Placa Plana a 50mm da borda de ataque.

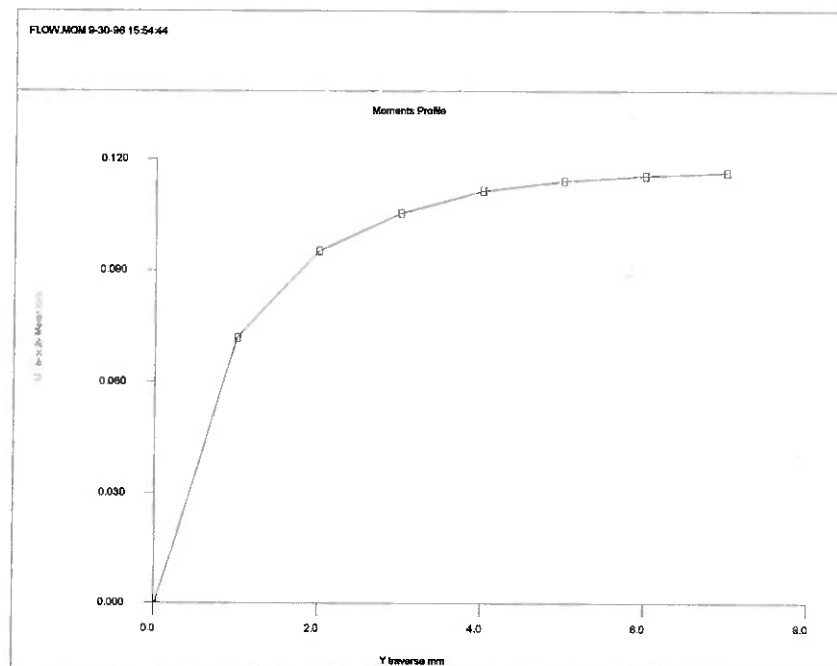


fig.5.3 - Perfil de velocidades da Placa Plana a 150mm da borda de ataque.

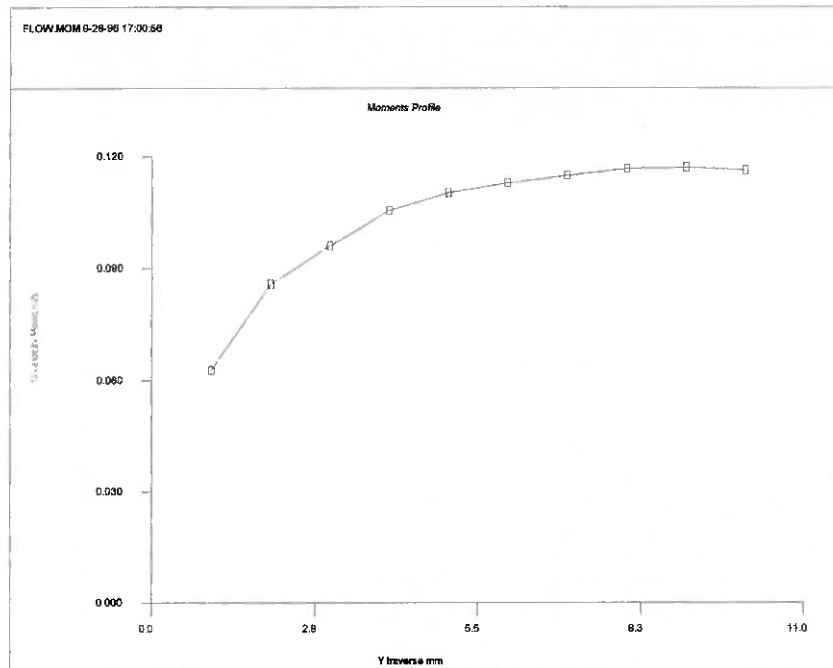


fig.5.4 - Perfil de velocidades da Placa Plana a 300mm da borda de ataque.

Memorial de cálculo

Algumas comparações entre os resultados teóricos e experimentais:

Para o perfil de velocidades da placa plana a 50mm da borda de ataque:

Características básicas:

$U_{\infty} \approx 0.12 \text{ m/s}$

$\delta \approx 3.3 \text{ mm}$

$Re_x = 5500$

$X = 50 \text{ mm}$

$Y = 0, 1, 2, 3 \text{ e } 4 \text{ mm}$

Y (mm)	U (m/s)	u (m/s)
0	0.0002	0.0029
1	0.0783	0.0180
2	0.0941	0.0225
3	0.1144	0.0115
4	0.1180	0.0096

Resultado teórico: $\delta = 3.2 \text{ mm}$

Para o perfil de velocidades da placa plana a 150mm da borda de ataque:

Características básicas:

$$U_{\infty} \approx 0.1093 \text{ m/s}$$

$$\delta \approx 5.7 \text{ mm}$$

$$Re_x = 16395$$

$$X = 150 \text{ mm}$$

$$Y = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ e } 7 \text{ mm}$$

Y (mm)	U (m/s)	u (m/s)
0	0.000	0.0032
1	0.0719	0.0153
2	0.0953	0.0152
3	0.1054	0.0130
4	0.1115	0.0105
5	0.1142	0.0092
6	0.1155	0.0088
7	0.1164	0.0080

Resultado teórico: $\delta = 5.8 \text{ mm}$

Para o perfil de velocidades da placa plana a 300mm da borda de ataque:

Características básicas:

$$U_{\infty} \approx 0.12 \text{ m/s}$$

$$\delta \approx 7.7 \text{ mm}$$

$$Re_x = 36000$$

$$X = 300 \text{ mm}$$

$$Y = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 \text{ e } 10 \text{ mm}$$

Y (mm)	U (m/s)	u (m/s)
1	0.0627	0.0155
2	0.0858	0.0155
3	0.0961	0.0132
4	0.1056	0.0121
5	0.1103	0.0128
6	0.1129	0.0096
7	0.1149	0.0106
8	0.1167	0.0089
9	0.1171	0.0078

Resultado teórico: $\delta = 7.8 \text{ mm}$

No caso apresentado teremos uma camada limite somente laminar, o que nos é conveniente pois com velocidades menores a espessura da camada limite é maior podendo assim termos mais pontos medidos dentro da camada limite.

A transição do regime laminar para o turbulento ocorreria a um $Re = 5 \times 10^5$, portanto:

$$Re = 5 \cdot 10^5 = \frac{V_{\infty} \cdot x}{\nu} \quad \text{se} \quad V_{\infty} = 0.12 \text{ m/s} \quad \text{então:}$$

$x = 4,7 \text{ m}$ que é muito maior que o comprimento da placa.

A resolução da equação diferencial para o perfil da camada limite encontrada por Blasius não se obtém com facilidade. Na realidade, não existe solução em forma fechada. Pode-se, no entanto, ter solução exata mediante expansão em série, ou mediante a métodos numéricos. Alguns resultados foram usados para chegarmos ao perfil teórico de velocidades da camada limite:

Para $x = 50 \text{ mm}$

$$i := 0..4 \quad Y_i := 0.001 \cdot i \quad u\alpha := 0.12 \quad \nu := 1.13 \cdot 10^{-6} \quad x := .05 \quad n := 0..17$$

$u_0 := 0.0002$	$\eta_0 := 0$	$\eta_4 := 1.6$	$\eta_8 := 3.2$	$\eta_{12} := 4.8$	$\eta_{16} := 6.4$
$u_1 := 0.0783$	$\eta_1 := 0.4$	$\eta_5 := 2$	$\eta_9 := 3.6$	$\eta_{13} := 5.2$	$\eta_{17} := 6.8$
$u_2 := 0.0941$	$\eta_2 := 0.8$	$\eta_6 := 2.4$	$\eta_{10} := 4$	$\eta_{14} := 5.6$	
$u_3 := 0.1144$	$\eta_3 := 1.2$	$\eta_7 := 2.8$	$\eta_{11} := 4.4$	$\eta_{15} := 6.0$	
$u_4 := 0.118$					

$\text{dif}_0 := 0$	$\text{dif}_4 := 0.517$	$\text{dif}_8 := 0.876$	$\text{dif}_{12} := 0.988$	$\text{dif}_{16} := 1$
$\text{dif}_1 := 0.133$	$\text{dif}_5 := 0.630$	$\text{dif}_9 := 0.923$	$\text{dif}_{13} := 0.994$	$\text{dif}_{17} := 1$
$\text{dif}_2 := 0.265$	$\text{dif}_6 := 0.729$	$\text{dif}_{10} := 0.956$	$\text{dif}_{14} := 0.997$	
$\text{dif}_3 := 0.394$	$\text{dif}_7 := 0.812$	$\text{dif}_{11} := 0.976$	$\text{dif}_{15} := 0.999$	

$$y_n := \eta_n \cdot \sqrt{\frac{\nu \cdot x}{u\alpha}}$$

$$ut_n := u\alpha \cdot \text{dif}_n$$

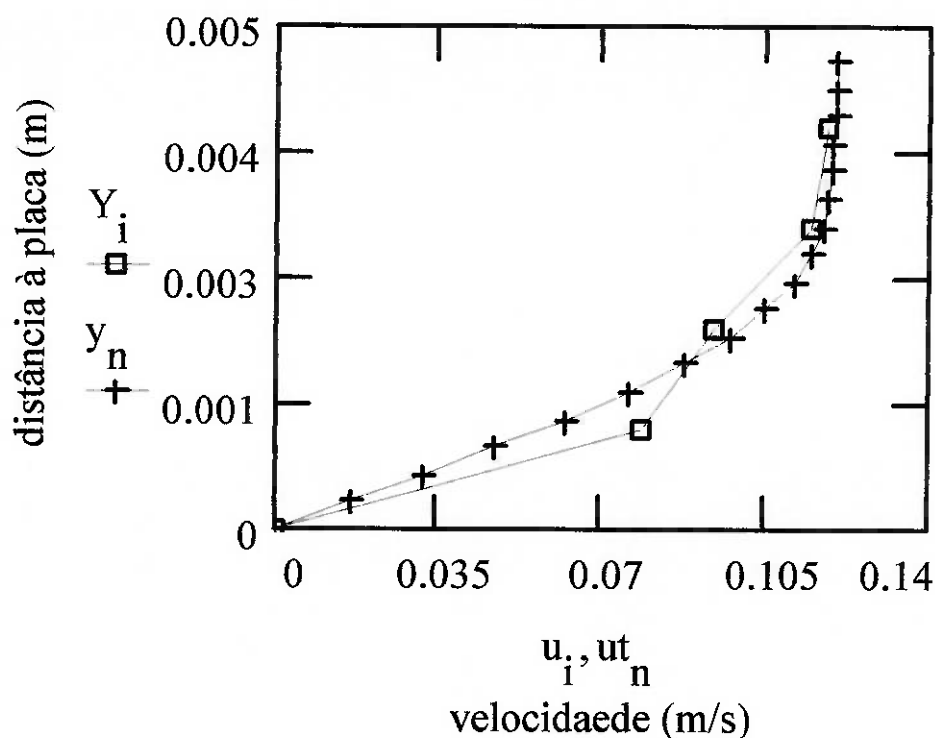


fig.5.5 -. Perfil de velocidades experimental (□) e teórico (+)

Para $x = 150\text{mm}$

$i := 0..7$ $Y_i := 0.001i$ $u\alpha := 0.1093$ $v := 1.13 \cdot 10^{-6}$ $x := .15$ $n := 0..17$

$u_0 := 0$	$\eta_0 := 0$	$\eta_4 := 1.6$	$\eta_8 := 3.2$	$\eta_{12} := 4.8$	$\eta_{16} := 6.4$
$u_1 := 0.0719$	$\eta_1 := 0.4$	$\eta_5 := 2$	$\eta_9 := 3.6$	$\eta_{13} := 5.2$	$\eta_{17} := 6.8$
$u_2 := 0.0953$	$\eta_2 := 0.8$	$\eta_6 := 2.4$	$\eta_{10} := 4$	$\eta_{14} := 5.6$	
$u_3 := 0.1054$	$\eta_3 := 1.2$	$\eta_7 := 2.8$	$\eta_{11} := 4.4$	$\eta_{15} := 6.0$	
$u_4 := 0.1115$					
$u_5 := 0.1142$	$\text{dif}_0 := 0$	$\text{dif}_4 := 0.517$	$\text{dif}_8 := 0.876$	$\text{dif}_{12} := 0.988$	$\text{dif}_{16} := 1$
$u_6 := 0.1155$	$\text{dif}_1 := 0.133$	$\text{dif}_5 := 0.630$	$\text{dif}_9 := 0.923$	$\text{dif}_{13} := 0.994$	$\text{dif}_{17} := 1$
$u_7 := 0.1164$	$\text{dif}_2 := 0.265$	$\text{dif}_6 := 0.729$	$\text{dif}_{10} := 0.956$	$\text{dif}_{14} := 0.997$	
	$\text{dif}_3 := 0.394$	$\text{dif}_7 := 0.812$	$\text{dif}_{11} := 0.976$	$\text{dif}_{15} := 0.999$	

$$y_n := \eta_n \cdot \sqrt{\frac{v \cdot x}{u\alpha}}$$

$$ut_n := u\alpha \cdot \text{dif}_n$$

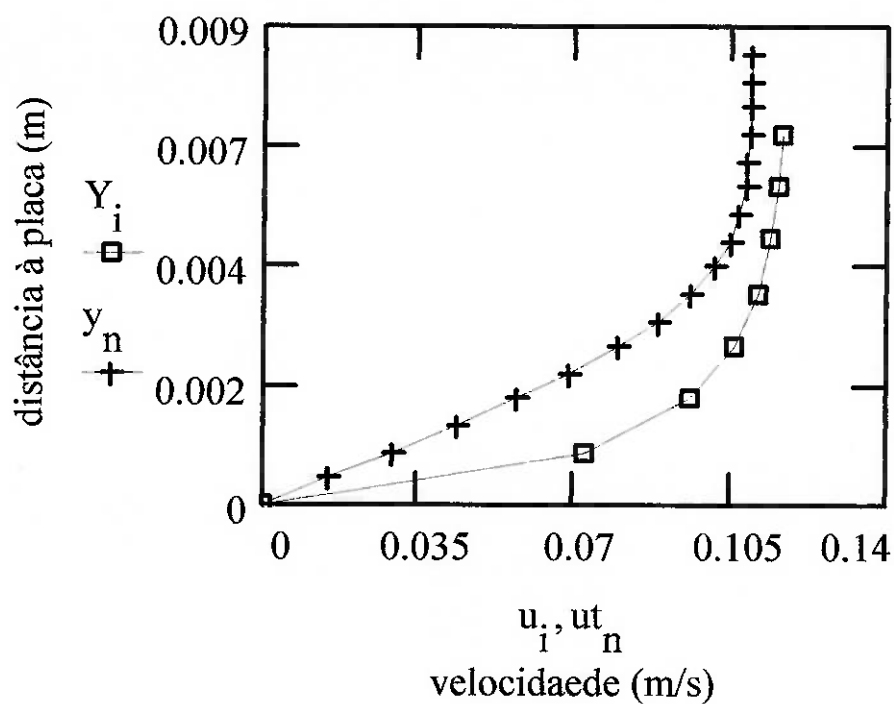


fig.5.6 -. Perfil de velocidades experimental (□) e teórico (+)

Para $x = 300\text{mm}$

$i = 0..9$ $Y_i = 0.001i$ $u\alpha = 0.12$ $v = 1.13 \cdot 10^{-6}$ $x = .3$ $n = 0..17$

$u_0 = 0$	$\eta_0 = 0$	$\eta_4 = 1.6$	$\eta_8 = 3.2$	$\eta_{12} = 4.8$	$\eta_{16} = 6.4$
$u_1 = 0.0627$	$\eta_1 = 0.4$	$\eta_5 = 2$	$\eta_9 = 3.6$	$\eta_{13} = 5.2$	$\eta_{17} = 6.8$
$u_2 = 0.0858$	$\eta_2 = 0.8$	$\eta_6 = 2.4$	$\eta_{10} = 4$	$\eta_{14} = 5.6$	
$u_3 = 0.0961$	$\eta_3 = 1.2$	$\eta_7 = 2.8$	$\eta_{11} = 4.4$	$\eta_{15} = 6.0$	
$u_4 = 0.1056$					
$u_5 = 0.1103$	$\text{dif}_0 = 0$	$\text{dif}_4 = 0.517$	$\text{dif}_8 = 0.876$	$\text{dif}_{12} = 0.988$	$\text{dif}_{16} = 1$
$u_6 = 0.1129$	$\text{dif}_1 = 0.133$	$\text{dif}_5 = 0.630$	$\text{dif}_9 = 0.923$	$\text{dif}_{13} = 0.994$	$\text{dif}_{17} = 1$
$u_7 = 0.1149$	$\text{dif}_2 = 0.265$	$\text{dif}_6 = 0.729$	$\text{dif}_{10} = 0.956$	$\text{dif}_{14} = 0.997$	
$u_8 = 0.1167$	$\text{dif}_3 = 0.394$	$\text{dif}_7 = 0.812$	$\text{dif}_{11} = 0.976$	$\text{dif}_{15} = 0.999$	
$u_9 = 0.1171$					

$$y_n = \eta_n \cdot \sqrt{\frac{v \cdot x}{u\alpha}}$$

$$ut_n = u\alpha \cdot \text{dif}_n$$

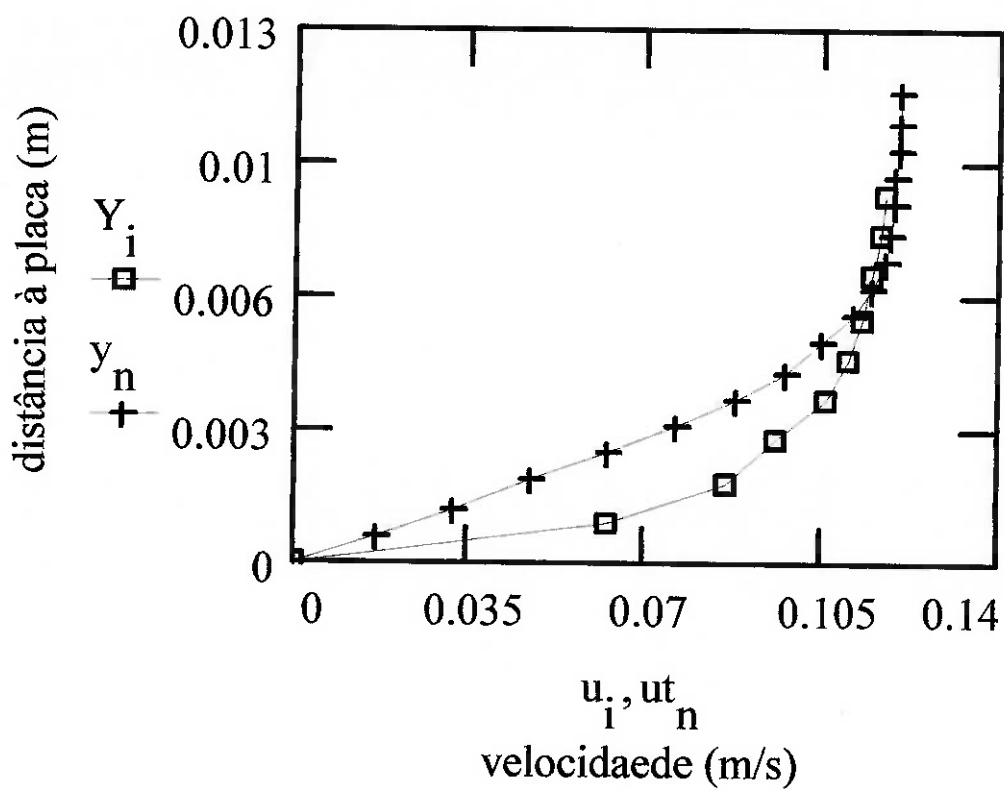


fig.5.7 -. Perfil de velocidades experimental (□) e teórico (+)

Comentários:

Como pôde ser observado pelos ensaios o perfil de velocidades da camada limite laminar da placa plana teve êxito ao demonstrar que os resultados experimentais se aproximam, e muito, do resultados teóricos, sendo que devemos considerar que o efeito das paredes do duto e a não uniformidade do perfil de velocidades do fluido ao chegar à placa prejudicou o ensaio.

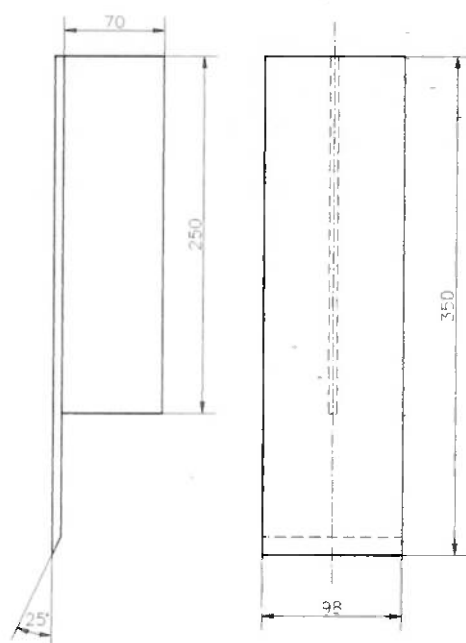


fig.5.8 - Placa plana;

6.) CILINDRO

Objetivo

Estudar como o escoamento se comporta ao passar por um obstáculo imerso no escoamento, cilindro, e verificar o grau de perturbação que sua esteira de vórtices causa ao escoamento é o objetivo deste dispositivo.

Introdução ao Tema

Qualquer corpo imerso em um escoamento oferece resistência à passagem do mesmo, essa resistência é devido ao fato do corpo “frear” o fluido que se movimenta em sua direção, ou seja, a quantidade de movimento que o fluido tem é absorvida pelo corpo. Isso acarreta o que chamamos de força de arrasto de um corpo imerso em um escoamento. O estudo dessa força é de interesse no desenvolvimento de corpos aerodinâmicos, que visa uma melhor performance aerodinâmica de perfis de asa de aviões, de sua fuselagem, de melhoria no consumo de combustível de automóveis quando em altas velocidades.

Um fenômeno também estudado é o da Esteira de Vón Kármán, que são vórtices que aparecem ajusante do corpo. Esses vórtices aparecem alternadamente e tem uma freqüência de batimento de acordo com as características geométricas do corpo e da velocidade do fluido. O adimensional que relaciona a freqüência de alternância dos vórtices e de sua geometria com a velocidade do escoamento é chamado de número de Strouhal e tem a seguinte formulação:

$$S = \frac{f \cdot d}{V}$$

onde: S é o número de Strouhal
f é a freqüência de alternância dos vórtices
d dimensão perpendicular ao escoamento
V velocidade do fluido

Isso nos leva à possibilidade de podermos montar um medidor de vazão que opere segundo esse princípio desde que o número de Strouhal permaneça constante na faixa de medição de interesse.

Também é importante salientar que esses ensaios são importantes para as construções civis de grande porte (pontes, edifícios, torres), pois o vento ao passar por essas estruturas induz uma freqüência a elas devido a esse efeito, e que se essa freqüência for a mesma de ressonância dessas estruturas poderemos ter acidentes de grande monta como o que ocorreu na ponte de Tacoma nos EUA.

Os fios de alta tensão também recebem cuidados especiais para que os ventos não prejudiquem sua estabilidade e durabilidade. Os aviões, por sua vez não desejam que essa vibração afete a manobrabilidade do aparelho, sendo necessário testes em modelos para verificar e corrigir essas turbulências.

Perfis de velocidades adquiridos

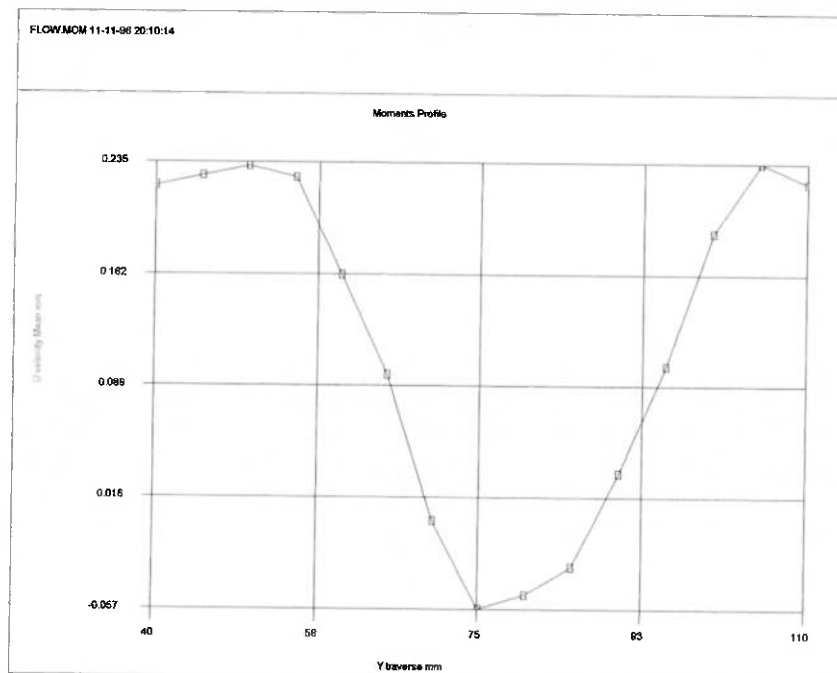


fig.6.1 - Perfil de velocidades a jusante do cilindro a 25mm do centro do mesmo.

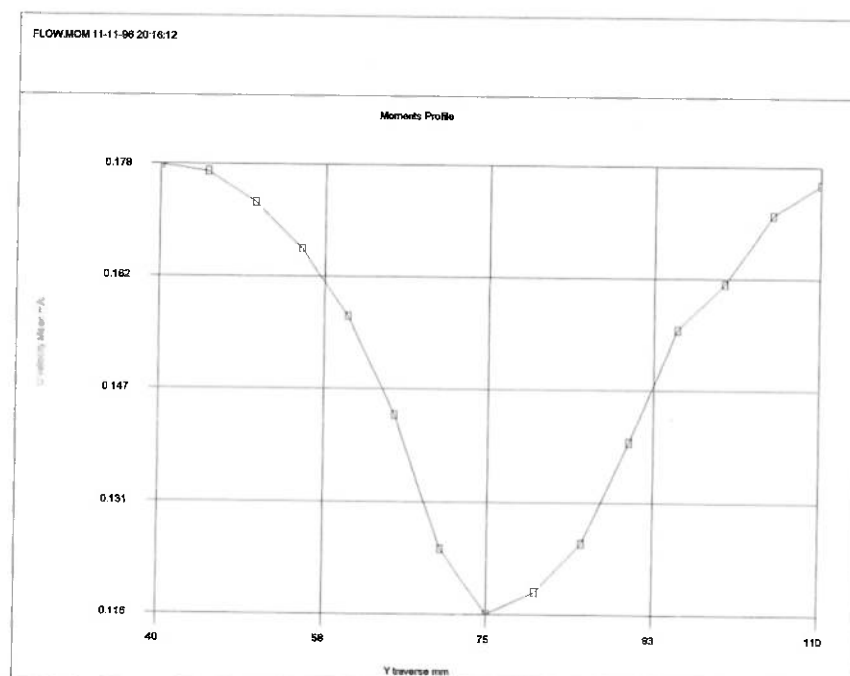


fig.6.2 - Perfil de velocidades a montante do cilindro a 10mm do centro do mesmo.

7.) VERTEDOIRO DE SOLEIRA ESPESSA

Objetivo

A experiência do vertedouro de soleira espessa visa, além de dar uma noção da diferença entre os regimes fluviais e torrenciais, mostrar como se pode medir a vazão em canais.

Memorial de cálculo

- Q: (vazão volumétrica)
 He: (carga total, em relação ao topo do vertedouro e antes do mesmo);
 Ho: (altura manométrica, em relação ao topo do vertedouro e antes do mesmo);
 l: (largura do canal);
 y: (altura da lâmina d'água sobre o vertedouro);
 yc: (altura crítica da lâmina d'água sobre o vertedouro);
 S: (área transversal da lâmina d'água sobre o vertedouro);
 V: (velocidade média da lâmina d'água sobre o vertedouro);

Considerando a perda de carga desprezível ao longo do canal:

$$He = \frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g} + y = \frac{\alpha \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot S^2} + y \quad \text{Supondo: } \alpha = 1;$$

$$Q = \sqrt{2 \cdot g} \cdot S \cdot \sqrt{He - y} = \sqrt{2 \cdot g} \cdot l \cdot y \cdot \sqrt{He - y}$$

Para obtermos a vazão máxima: $y = yc \quad \frac{dQ}{dy} = 0$

$$\frac{dQ}{dy} = \frac{l \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{\sqrt{He - yc}} \cdot \left(He - \frac{3}{2} \cdot yc \right) = 0 \Rightarrow yc = \frac{2}{3} \cdot He$$

Supondo: $He = Ho$ (velocidade baixa longe do vertedouro);

$$yc = \frac{2}{3} \cdot Ho$$

Portanto:

$$Q = \sqrt{2 \cdot g \cdot l} \cdot \frac{2 \cdot H_o}{3} \cdot \sqrt{H_o - \frac{2 \cdot H_o}{3}} = \frac{2}{3 \cdot \sqrt{3}} \cdot l \cdot H_o \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_o} \cong 0,385 \cdot l \cdot H_o \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_o}$$

$$Q \cong 1,704 \cdot l \cdot H_o^{3/2}$$

Tomando como parâmetro:

$$l = 100mm$$

$$H_o = 13cm \Rightarrow Q = 798,7 \cdot \frac{cm^3}{s}$$

$$y_c = 8,7 \cdot cm$$

$$h = 4,3 \cdot cm$$

O comprimento do vertedouro não poderá ser muito longo para não haver perda de carga relevante, nem tão pouco pequeno para que possa ocorrer a formação da lâmina d'água.

A princípio tomaremos o comprimento como o de quatro vezes a largura do canal.

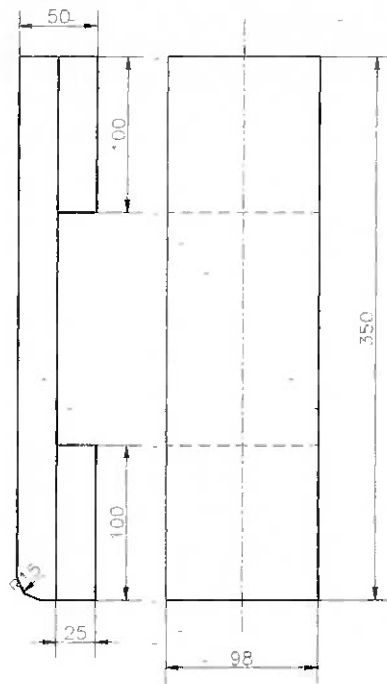


fig. 7.1 - Vertedouro de soleira espessa;

8.) Bancada

A bancada é composta de dois reservatórios (400 x 400 x 600mm) interligados por um duto de seção retangular (100 x 150mm) e comprimento de 800mm feitos de acrílico. Um sistema composto de uma bomba, uma válvula de regulagem e dutos faz a circulação da água forçada, bombeando água de um reservatório para o outro escoando pelo duto que usamos como local para os ensaios.

Esse duto tem que ser o suficientemente largo e comprido para que possamos ter um acesso facilitado (é desmontável) e que todos os dispositivos a serem ensaiados possam ser dispostos de maneira conveniente para serem efetuadas as medições.

A bancada já se encontra construída e encontra-se na sala TS-10, onde montou-se paralelamente a ela o sistema de anemometria a laser.

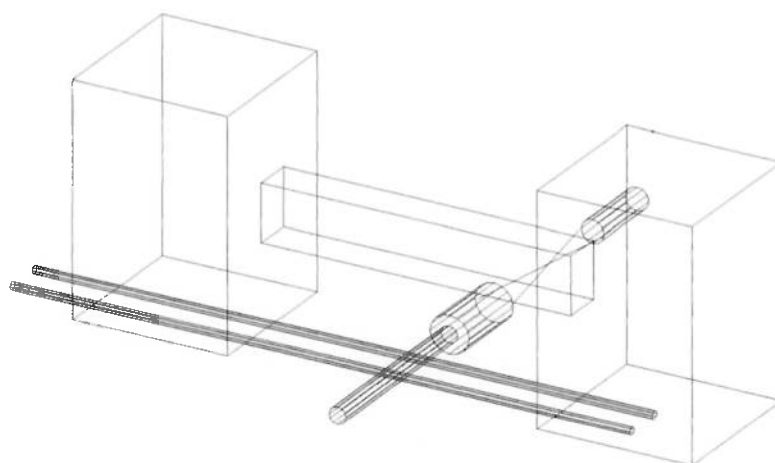


fig.8.1 - Representação esquemática da bancada;

9.) Conclusões Gerais

Como no decorrer do trabalho apresentamos uma proposta de modernização do Laboratório de Mecânica dos Fluidos para o ensino de graduação e treinamento de alunos de pós-graduação, foi alcançado o principal objetivo. Uma turma da disciplina de PMC-328 de 1996 serviu de ensaio para realizarmos uma possível modificação do currículo, integrando à disciplina experiências práticas aumentando assim o interesse dos alunos ao estudo dos fenômenos da Mecânica dos Fluidos. Foi observado que a turma apesar de estar iniciando seu aprofundamento nos conceitos da disciplina, absorveu-os bem realizando as expectativas da realização dos trabalhos.

Infelizmente não é possível treinar todos os alunos na operação do equipamento que requer vários ajustes antes de se começar um ensaio e que demanda um tempo razoavelmente grande para isso. Uma alternativa é apresentar os conceitos envolvidos na anemometria a Laser aos e treinar o técnico da área para o manejo do instrumento, tendo os alunos mais tempo para analisar o fenômeno em questão. Todas as experiências podem ser realizadas contanto que os alunos tenham um meio período disponível e que o técnico, bem treinado, opere o anemômetro, pois como foi dito não são experiências de rápida realização.

Na experiência do jato horizontal podemos levantar o perfil de velocidades em duas seções, a 100mm e 300mm da saída do jato para mostrar o desenvolvimento do perfil que será simétrico com velocidades maiores no centro, o achatamento desse perfil de uma seção para outra, a dissipação que ocorre ao explicarmos efluentes industriais e o efeito das paredes que faz o fluido recircular em certos pontos.

Na experiência do ressalto hidráulico é interessante mostrarmos inicialmente o ressalto livre para que o aluno tenha a noção da transição do regime torrencial para o regime fluvial, mas para fazermos qualquer tipo de levantamento teremos que afogá-lo visto que o ressalto livre gera muitas bolhas que atrapalham as medições. Ao afogarmos o ressalto esse efeito se minimiza e podemos realizar as medições nas seções a 100mm e 300mm da saída da comporta, mostrando o pico de velocidade na altura da comporta e a recirculação ao caminharmos com o anemômetro na direção da superfície.

A experiência da placa plana foi a que considero mais importante, pois ao se ensinar os efeitos da camada limite se utilizam da placa plana como exemplo, por ser de mais fácil modelagem com exemplos na literatura corrente. Os resultados obtidos superaram as expectativas pois, com velocidades bem reduzidas e o perfil de velocidades razoavelmente plano, foi conseguido uma camada limite laminar o suficientemente espessa para

conseguirmos medir em seu interior e avaliarmos experimentalmente sua espessura para compararmos posteriormente com os resultados teóricos. Os resultados, comparando-os com a equação de Blasius, foram muito próximos. Como sugestão quando essa experiência for realizada é desejoso tomarmos uma distância maior que 200mm em relação à borda de ataque para que tenhamos uma região o suficientemente espessa para efetuarmos as medições e verificarmos não só a espessura da camada limite mas também o formato do perfil de velocidades.

A experiência do cilindro é indicada para que os alunos tenham noção de como o perfil de velocidades se altera quando se tem um corpo imerso em um escoamento, ela pode ser realizada levantando-se o perfil de velocidades ajusante e amontante do corpo como foi feito nesta experiência com o cilindro. Sugiro que seria interessante montarmos um perfil de asa para o estudo das velocidades próximas a ele estudando seu efeito sobre as pressões exercidas sobre ele. Outro efeito verificado foi o da esteira de vórtices, que pode ser visualizado pois o líquido estava inseminado com partículas grandes e com a regulação da vazão foi possível obter uma frequência o suficientemente baixa (~ 4 Hz) para visualizarmos a geração de vórtices alternados ajusante do cilindro.

O vertedouro de soleira espessa serve mais como ilustração de como podemos medir vazão em um canal aberto sem dispositivos sofisticados. Comparando-se a vazão dada pelo vertedouro com a levantada com o anemômetro.

O resultado geral foi satisfatório, conseguindo fazer o treinamento na utilização e no conceito do anemômetro a Laser, no desenvolvimento do projeto e na fabricação das peças para os ensaios e no levantamento dos dados experimentais de qualidade suficientemente boa para mostrar aos alunos, na prática, tudo o que eles aprenderam na teoria.

10.) **Bibliografia**

- ADRIAN, R.J.; FINGERSON, L.M.; KAUFMAN, S.L. - Laser Velocimetry: Theory, Application and Techniques. TSI Incorporated, 1987.
- SALTARA, F. - Seminário sobre anemometria a laser em PMC-837
- ARIK, E.B. - Modern Approach to classical Fluid Mechanics. DANTEC Educational LDA and Flow System “EduSys” Instruction ook. DANTEC Eletronics Inc, 198.
- DANTEC - Catálogo sobre LDA e seus acessórios.
- PIMENTA, C. F. ; Curso de Hidráulica Geral, vol. 1, 4° ed., Ed. Guanabara Dois, 1981.
- GERHART, P. M. ; GROSS, J. R.; Fundamentals of Fluid Mechanics, Addison-Wesley Publishing Company, 1985
- SHAMES, I. H. - Mecânica dos Fluidos, vol.2, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1973.
- VIEIRA, R. C. de C. - Atlas de Mecânica dos Fluidos, Fluidodinâmica; Ed. Edgard Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1971.
- INCROPERA, F. P.; WITTT, D. P. de - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 3° ed., Ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, RJ.

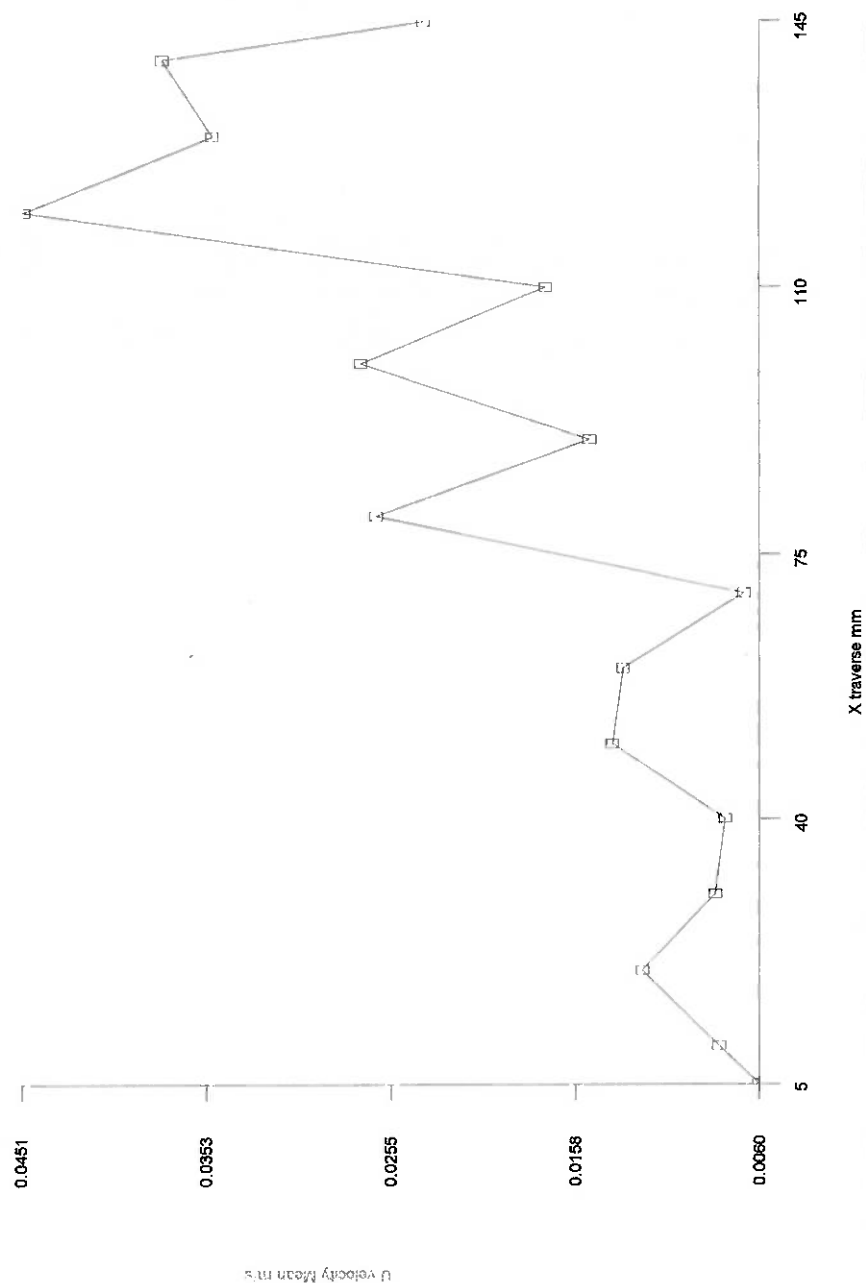
ANEXOS

ANEXO I

(Gráficos)

FLOW.MOM 1-3-96 15:00:36

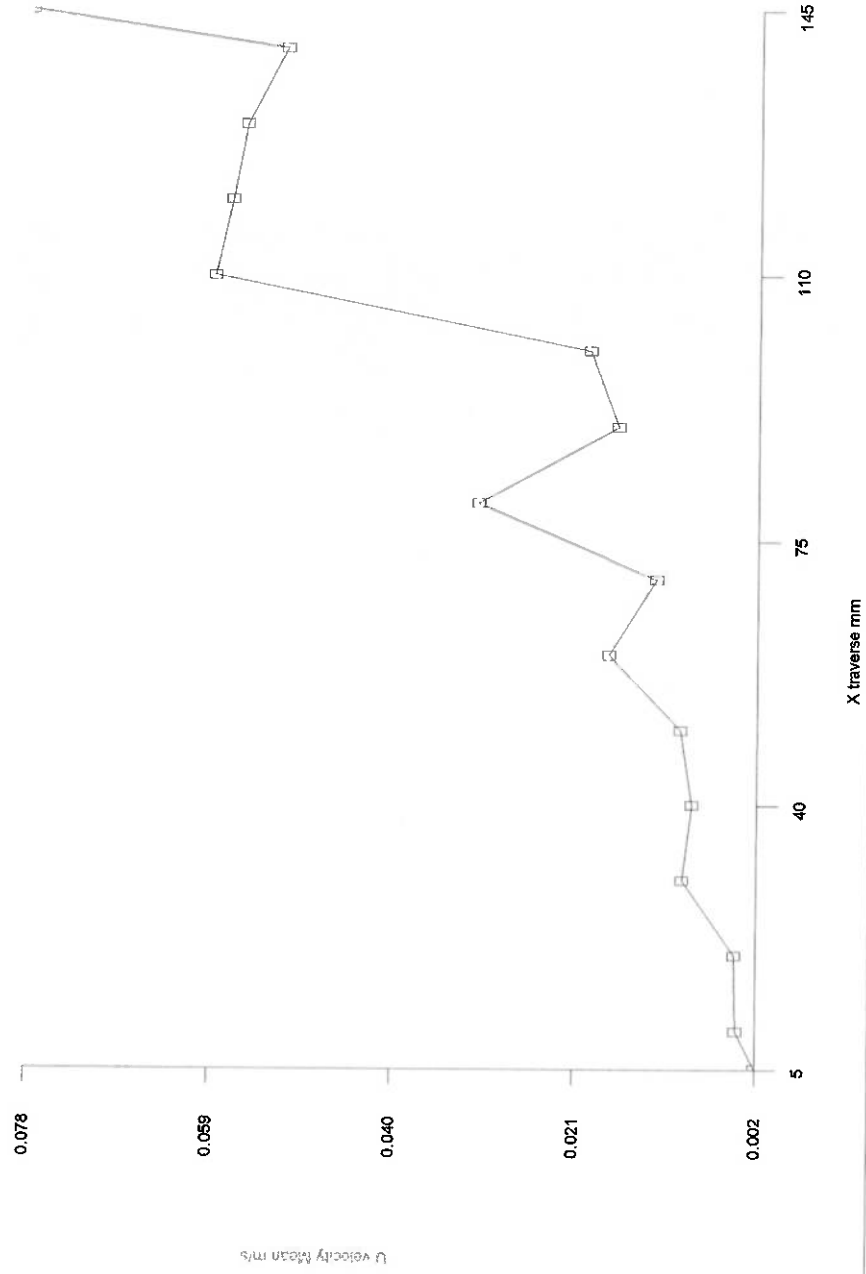
Moments Profile



Perfil de velocidades na duto sem reificador na Seção I (50mm);

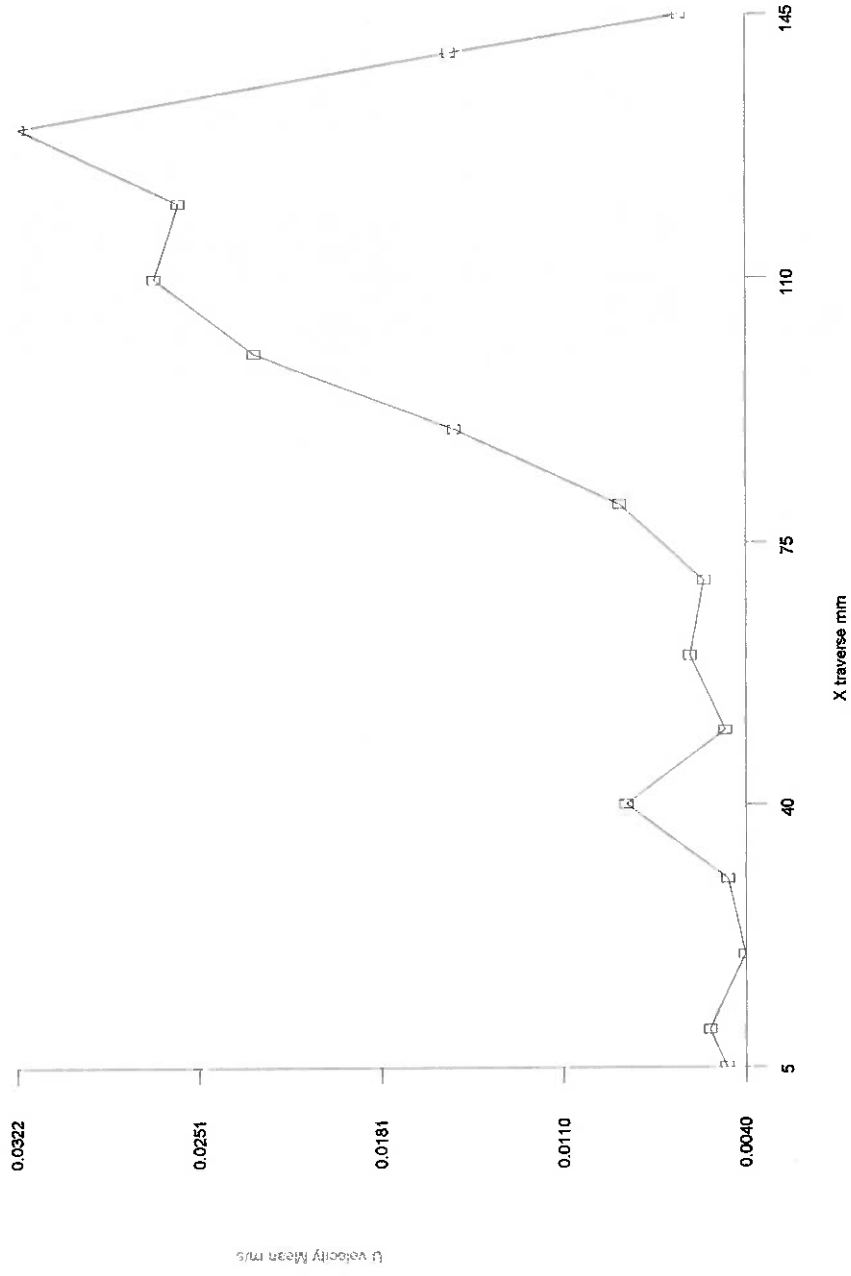
FLOW.MOM 1-8-96 17:09:10

Moments Profile



Perfil de velocidades na duto sem retificador na Seção2 (200mm);

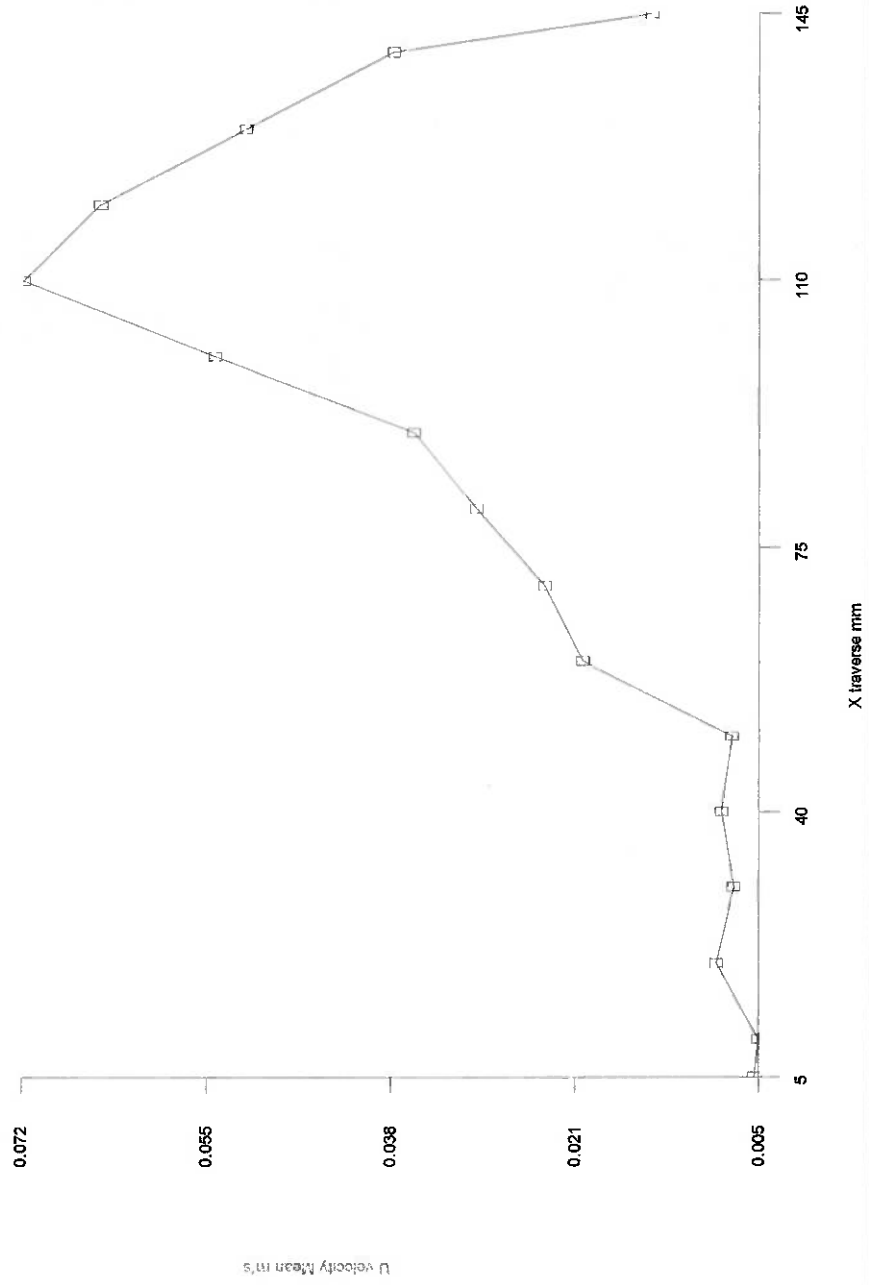
Moments Profile



Perfil de velocidades na duto sem retificador na Seção3 (400mm);

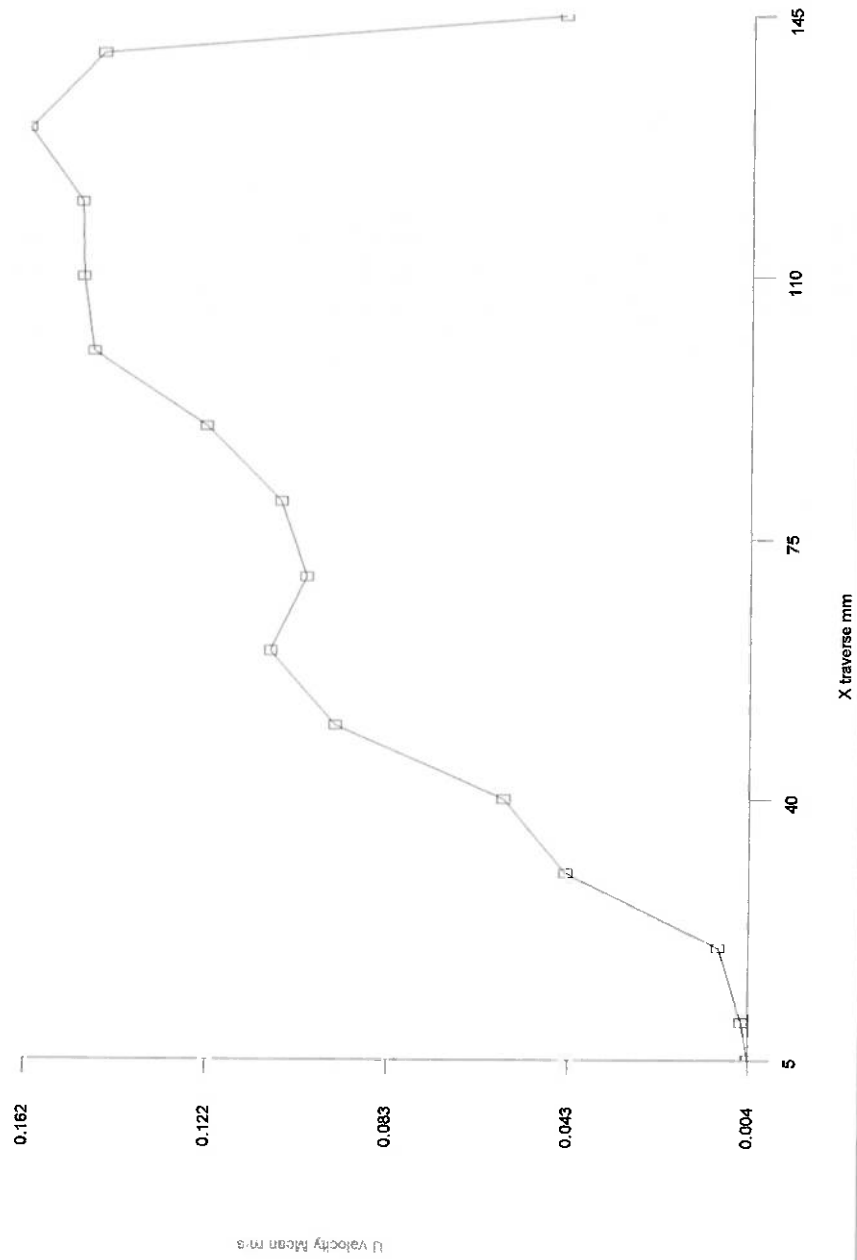
FLOW.MOM 1-4-96 18:13:58

Moments Profile



Perfil de velocidades na duto sem retificador na Seção4 (650mm);

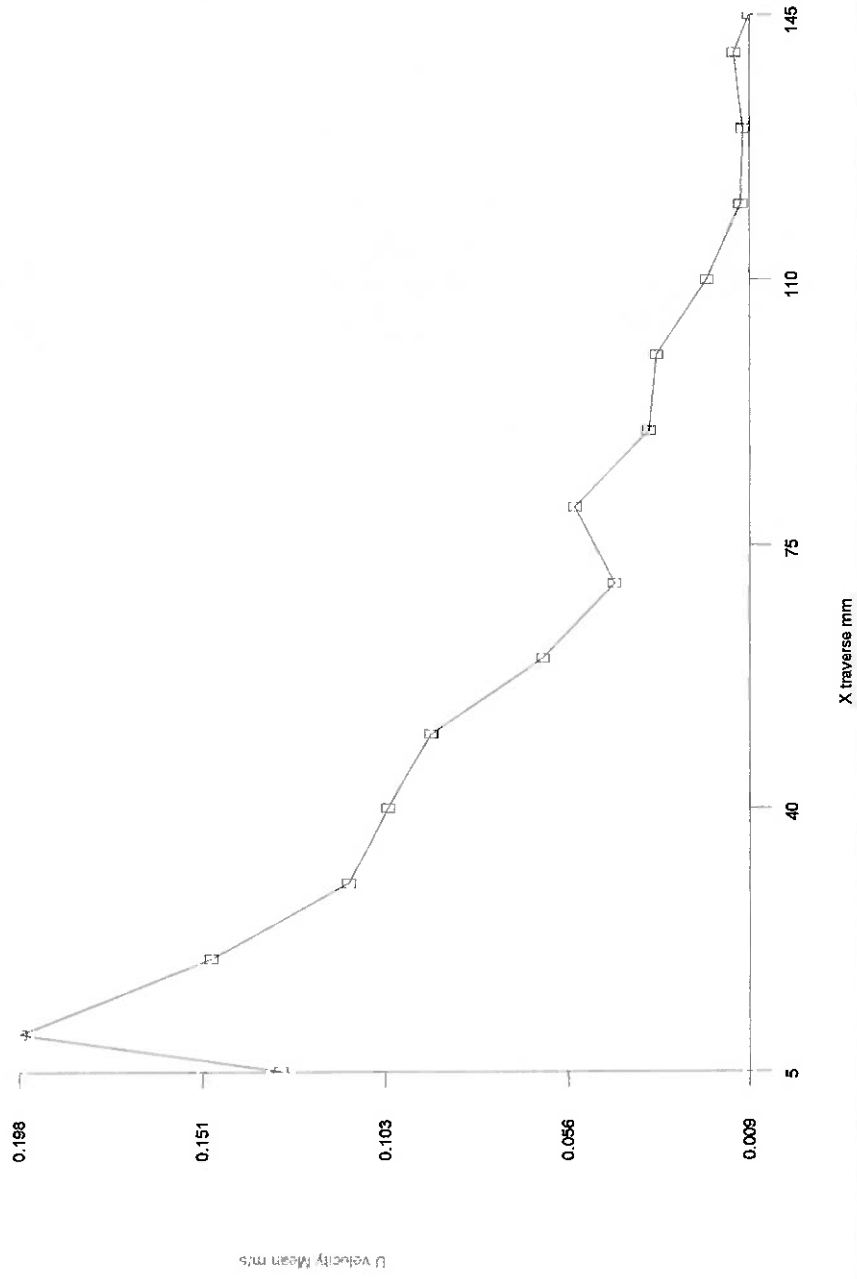
Moments Profile



Seção2. (200mm) com o retificador de tubos;

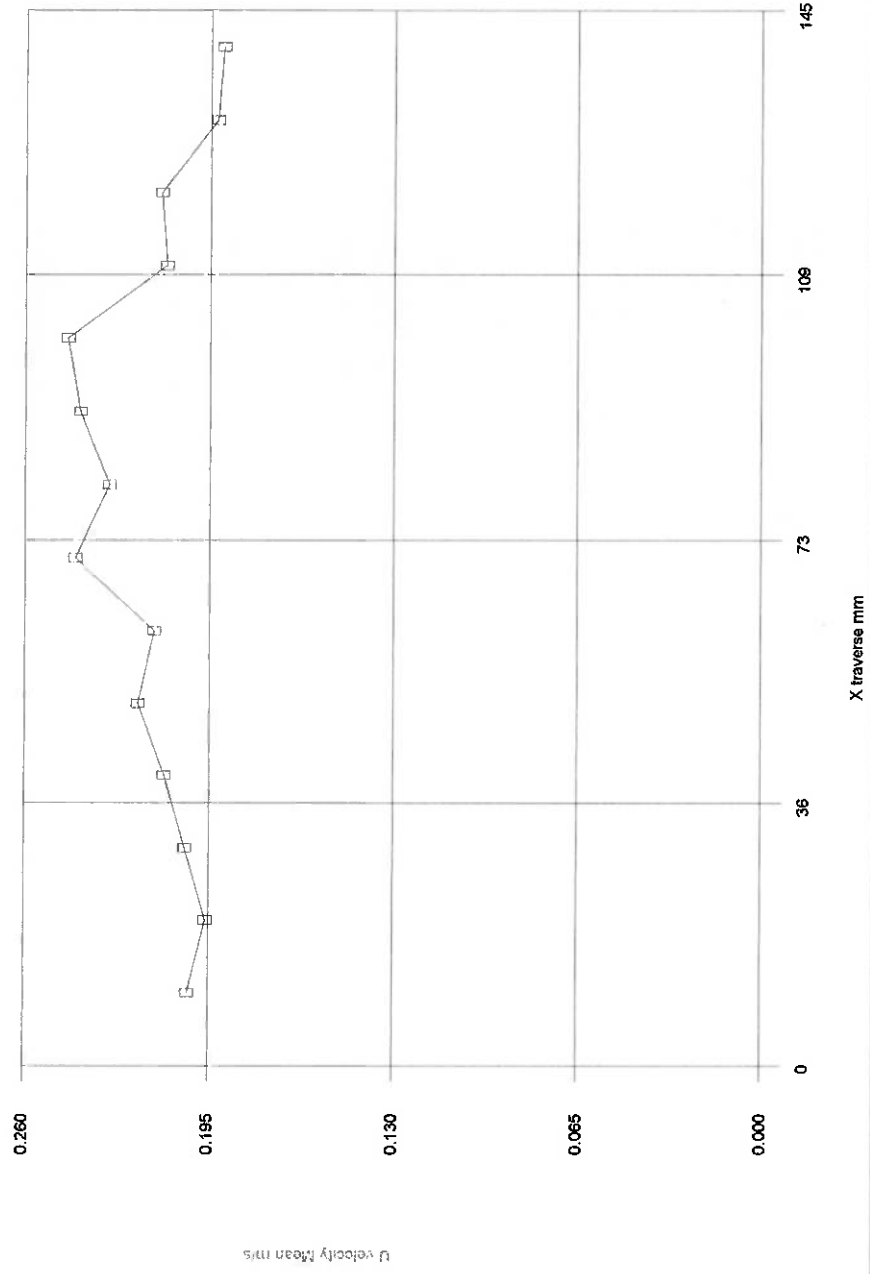
FLOW.MCM 1-12-96 17:00:48

Moments Profile



Seção2 (200mm) invertendo-se o retificador:

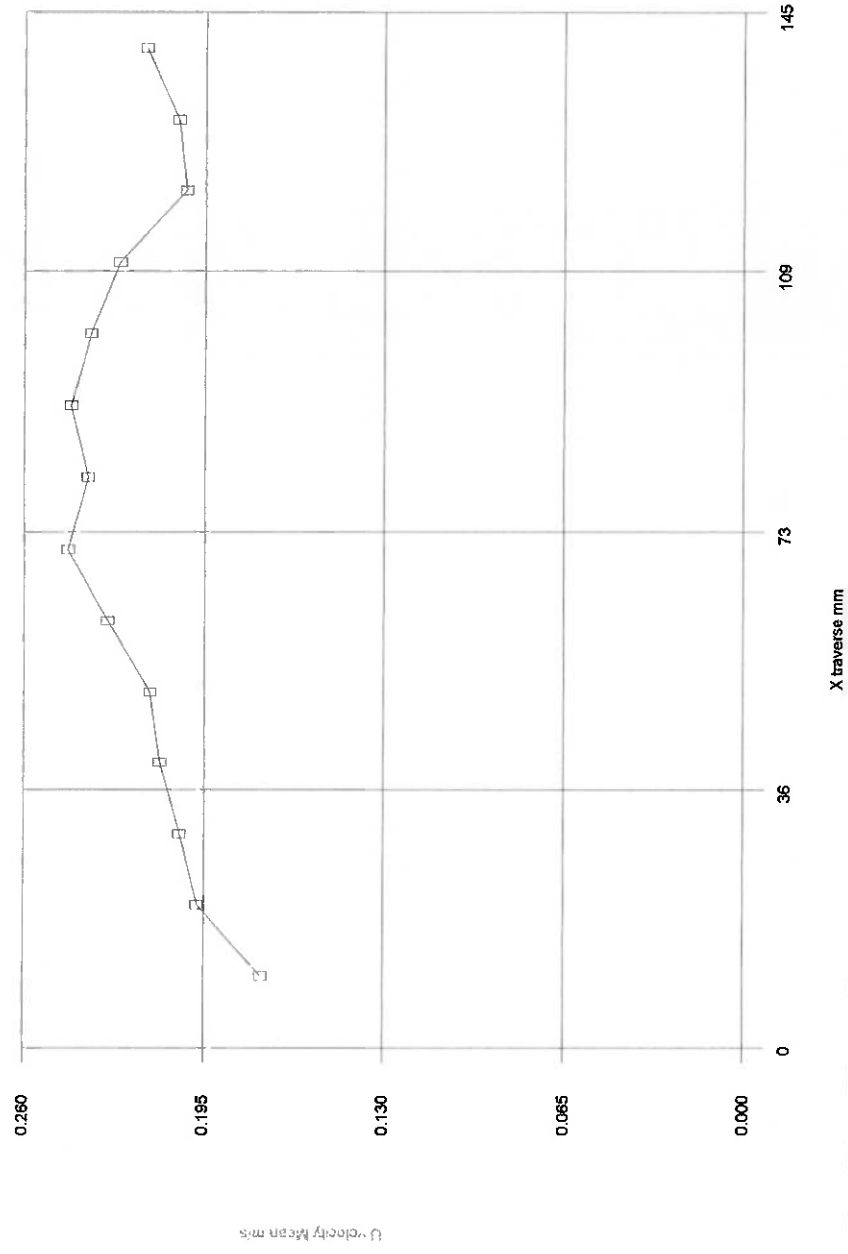
Moments Profile



Seção2 (200mm) retificador (tela + multi-tubos);

FLOW.MOM 3-3-86 16:05:20

Moments Profile



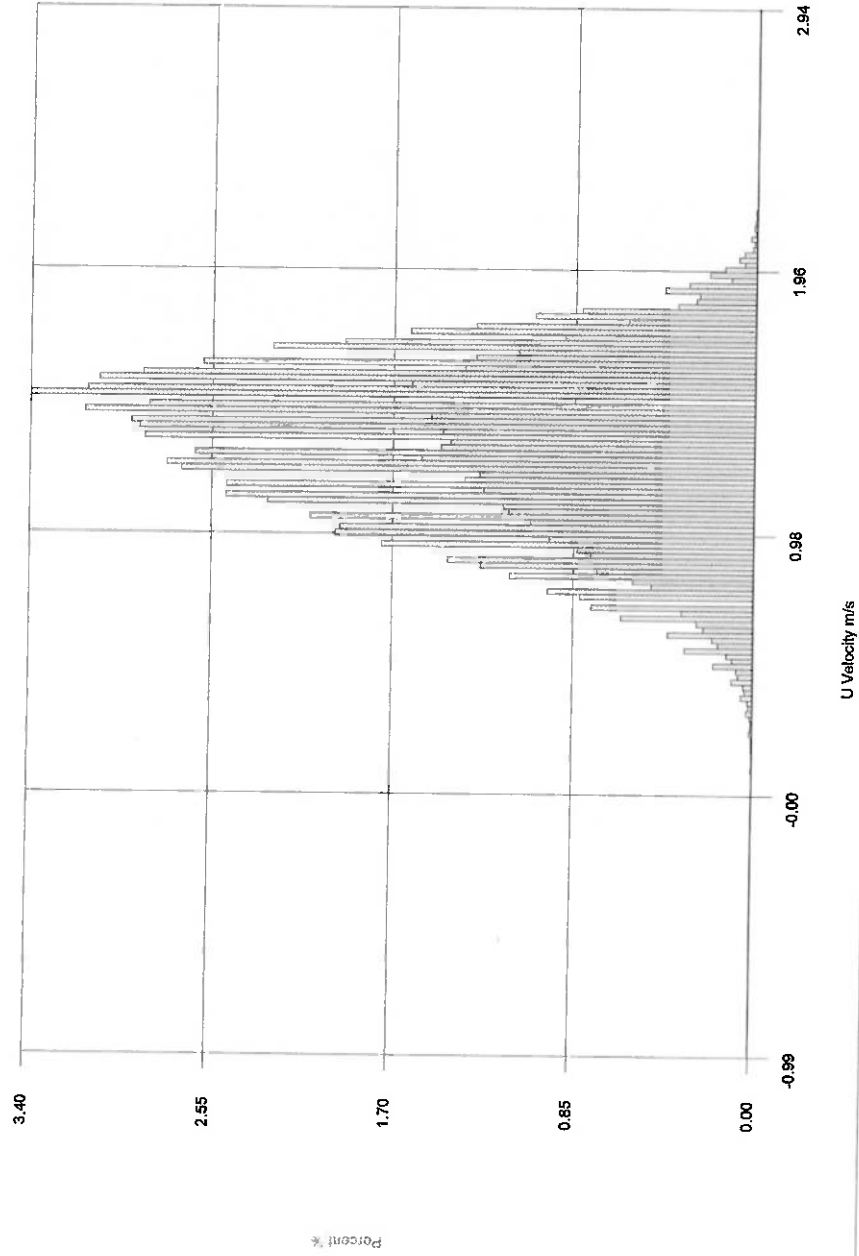
Seção4 (400mm) retificador (tela + multi-tubos);

FLOW/000 11-11-96 20:43:00

X: 20.000 mm Y: 75.000 mm Z: 0.000 mm

Mean: 1.2949 RMS: 0.3134 Skew: -0.3290 Flat: 2.6033

Histograms

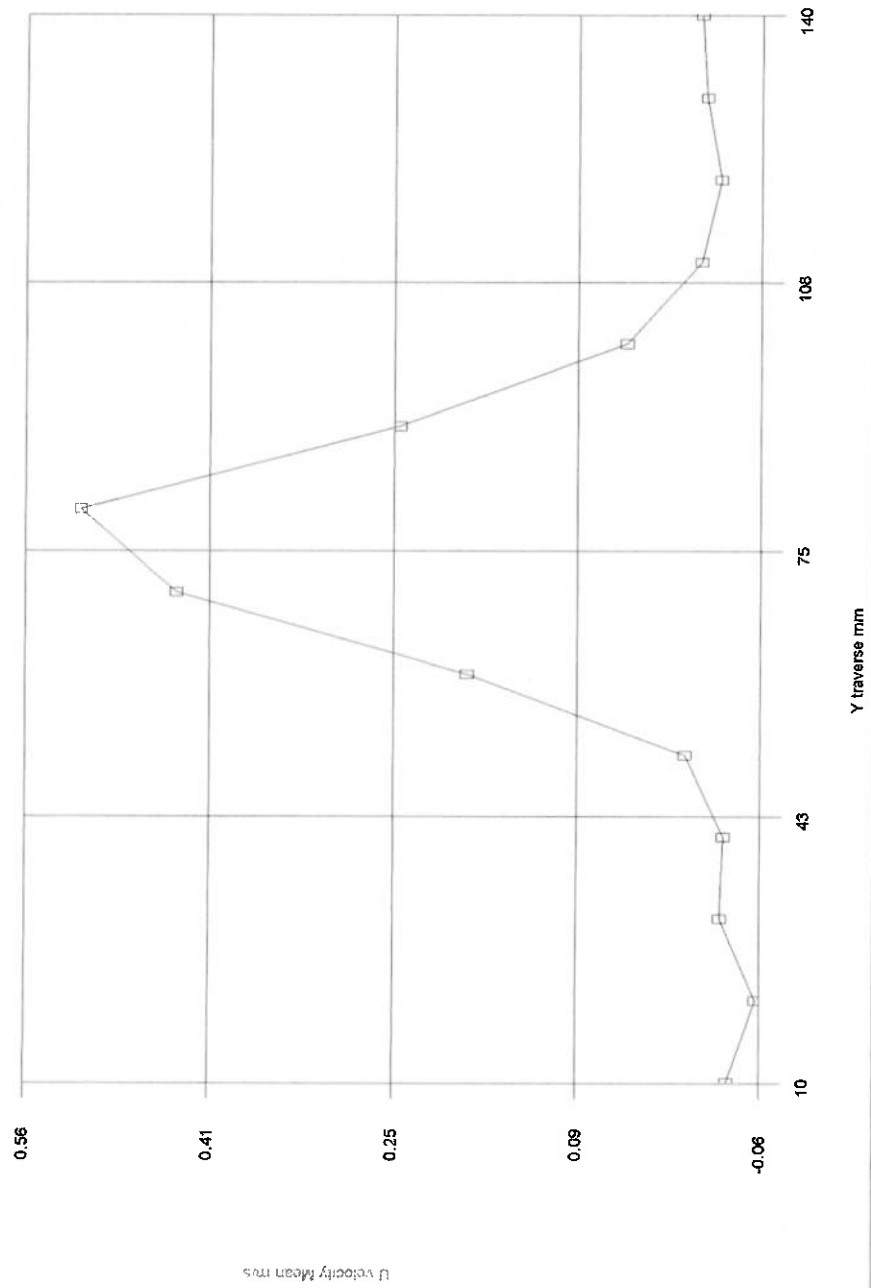


Distribuição (Histograma) da velocidade do jato na sua saída

horizontal

FLOW.MOM 11-11-96 20:28:56

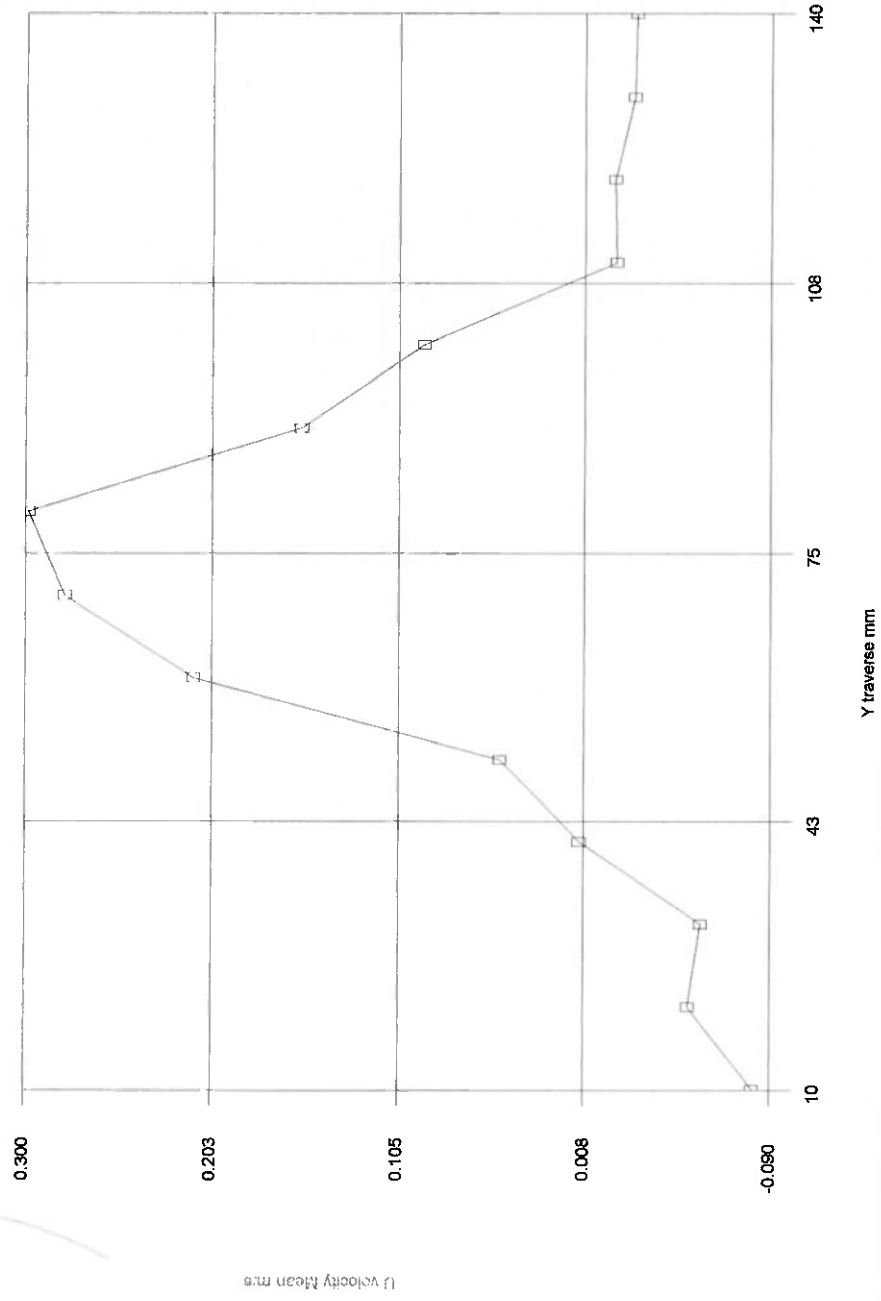
Moments Profile



Perfil de Velocidades do Jato Horizontal, Seção (100mm)

FLOW.MOM 11-11-96 20:35:12

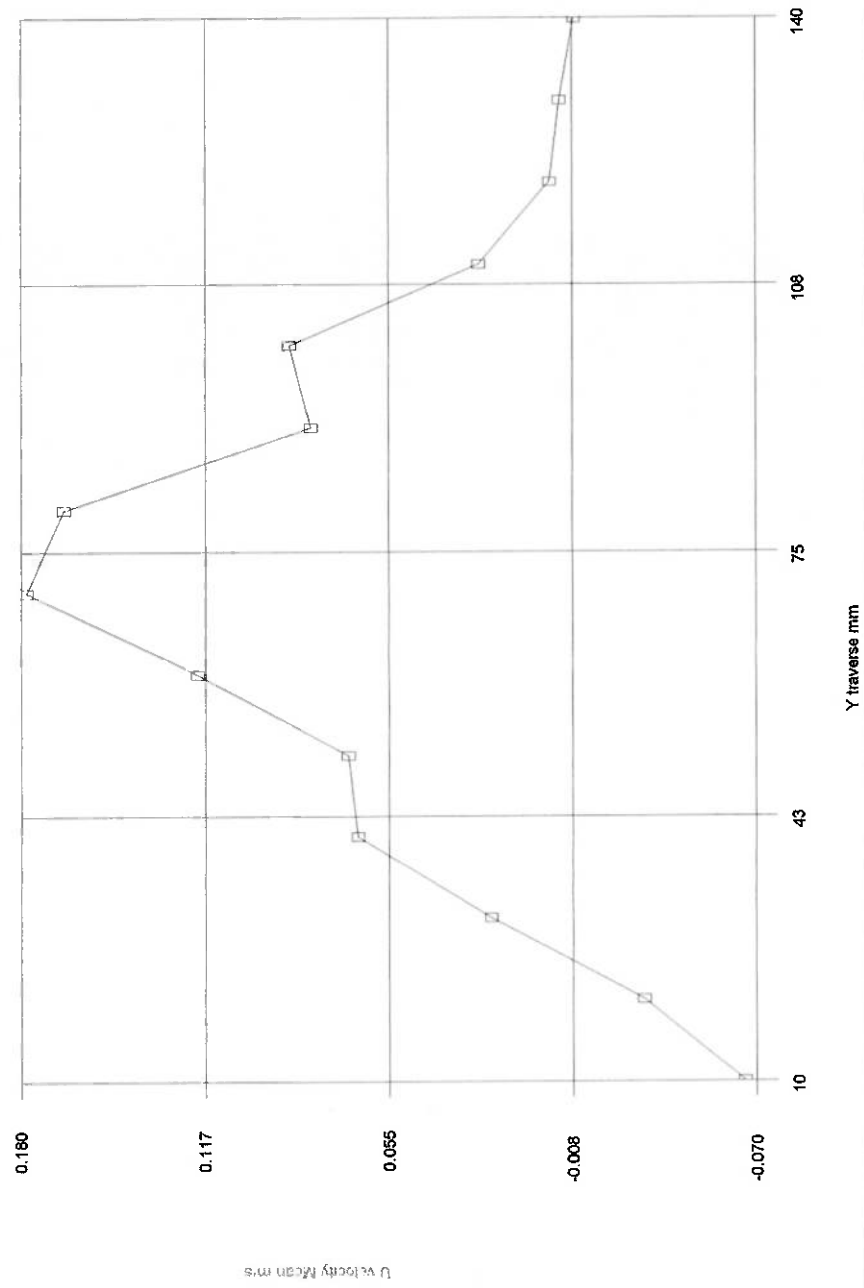
Moments Profile



Perfil de Velocidades do Jato Horizontal, Seção (200mm)

FLOW.MOM 11-11-96 20:40:34

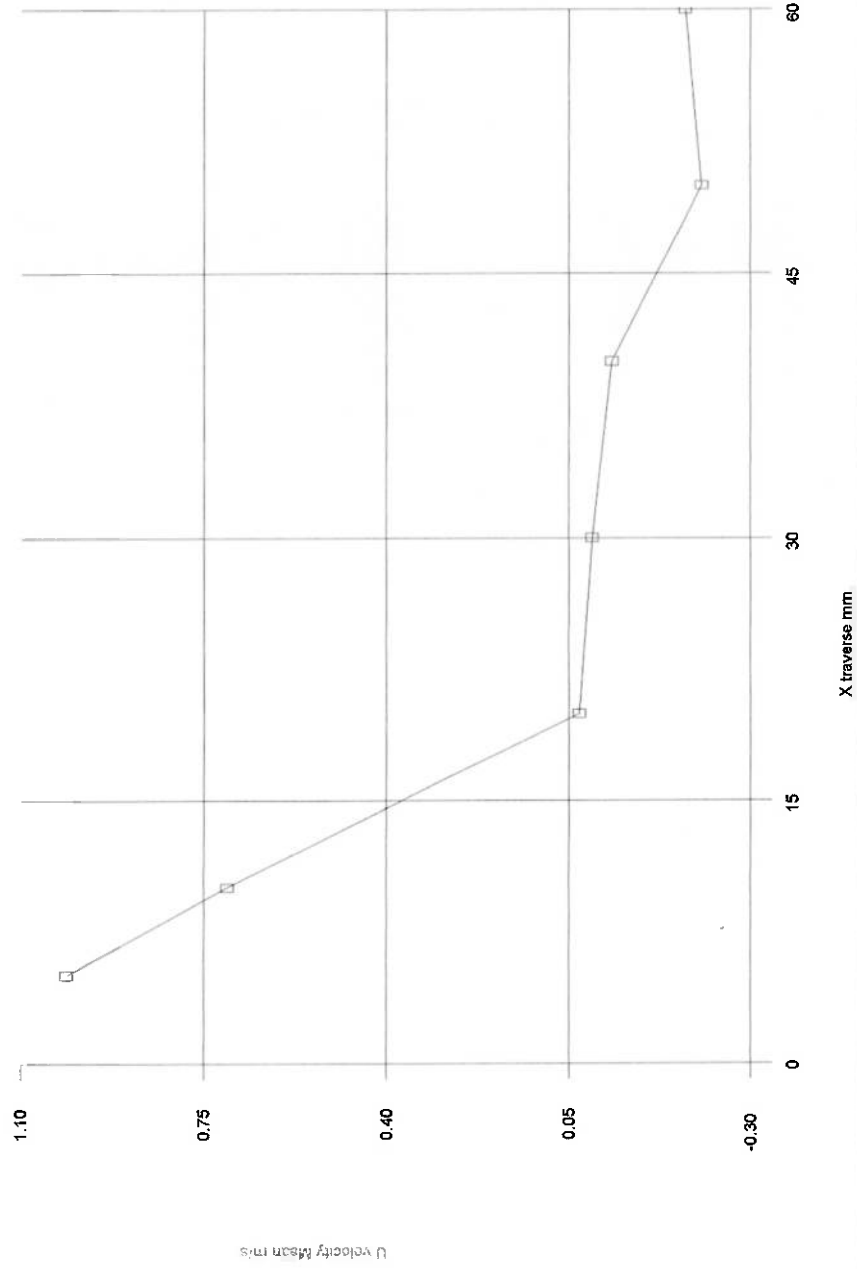
Moments Profile



Perfil de Velocidades do Jato Horizontal, Seção (300mm)

RESS.MOM 3-18-96 15:43:14

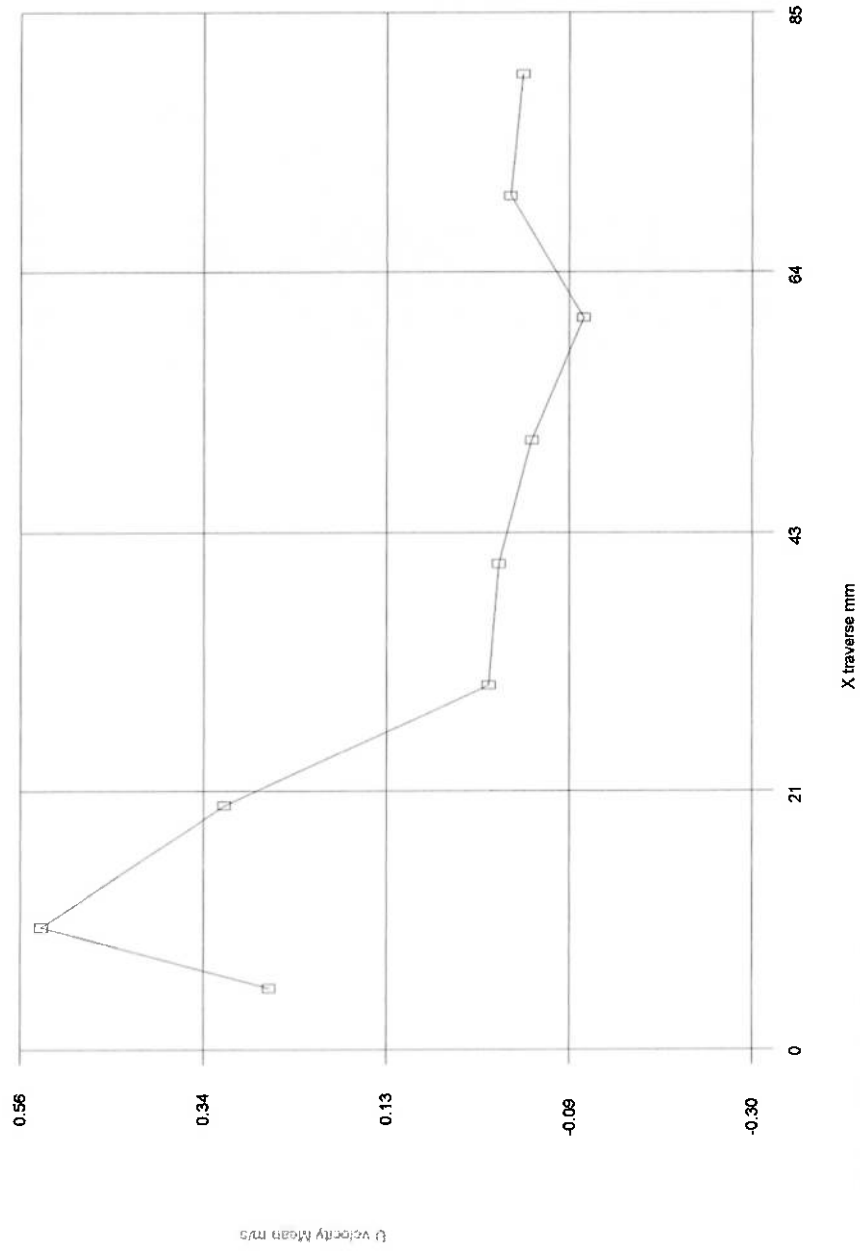
Moments Profile



Perfil de Velocidades do Ressalto Hidráulico da Seção1 (100mm);

RESS MOM 3-19-86 15:47:00

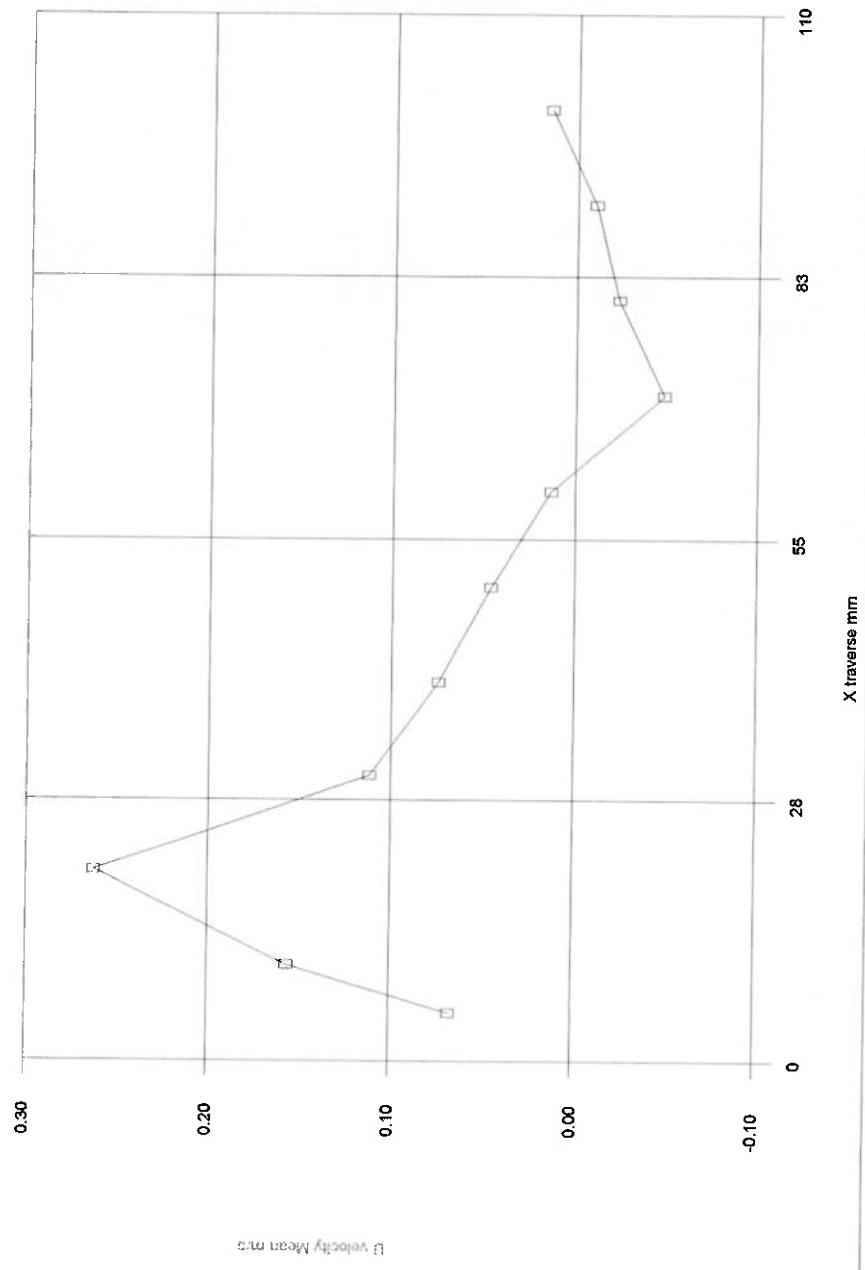
Moments Profile



Perfil de Velocidades do Ressalto Hidráulico da Seção2 (200mm);

RESS.MOM 3-19-96 15:51:26

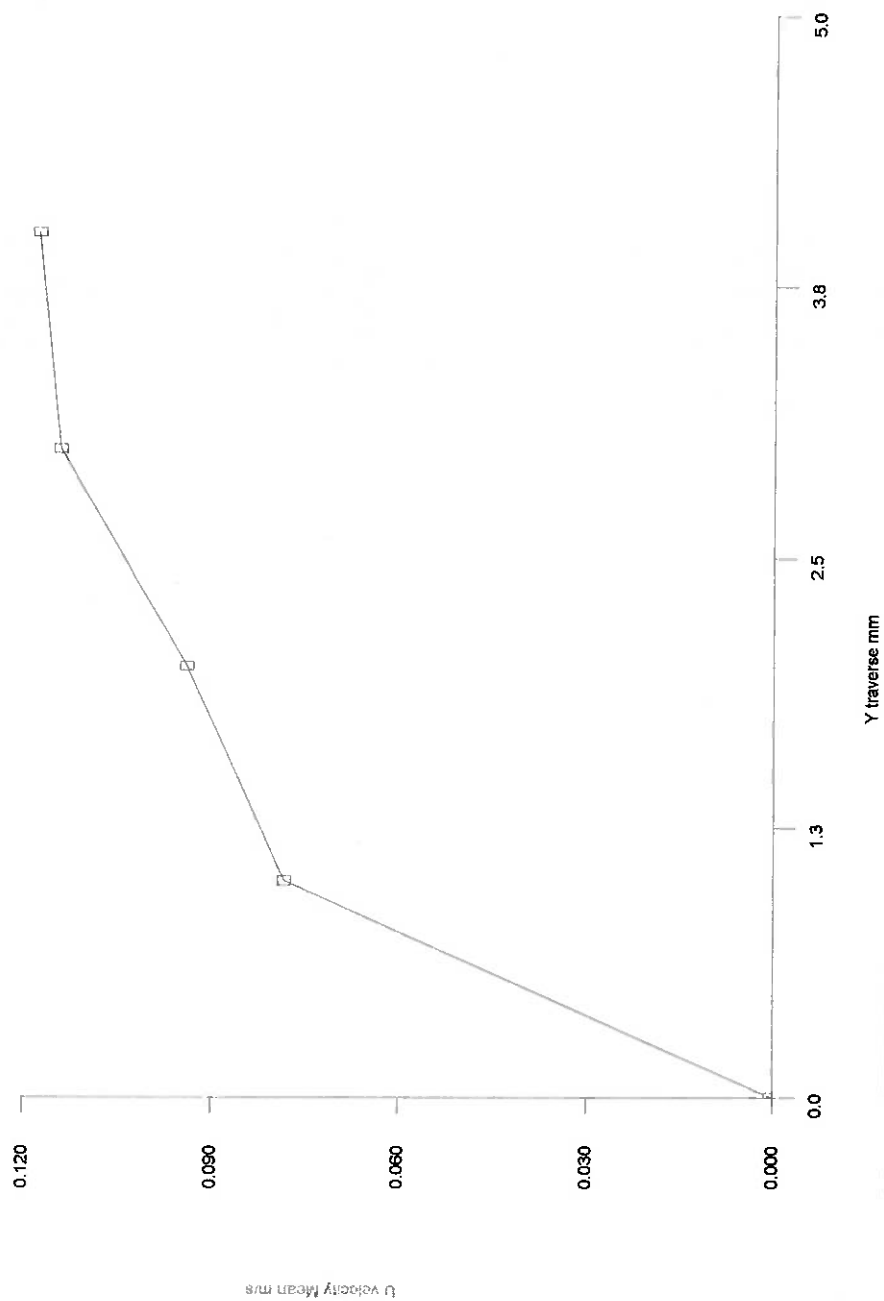
Moments Profile



Perfil de Velocidades do Ressalto Hidráulico da Seção3 (300mm);

FLOW.MCM 9-30-96 11:40:32

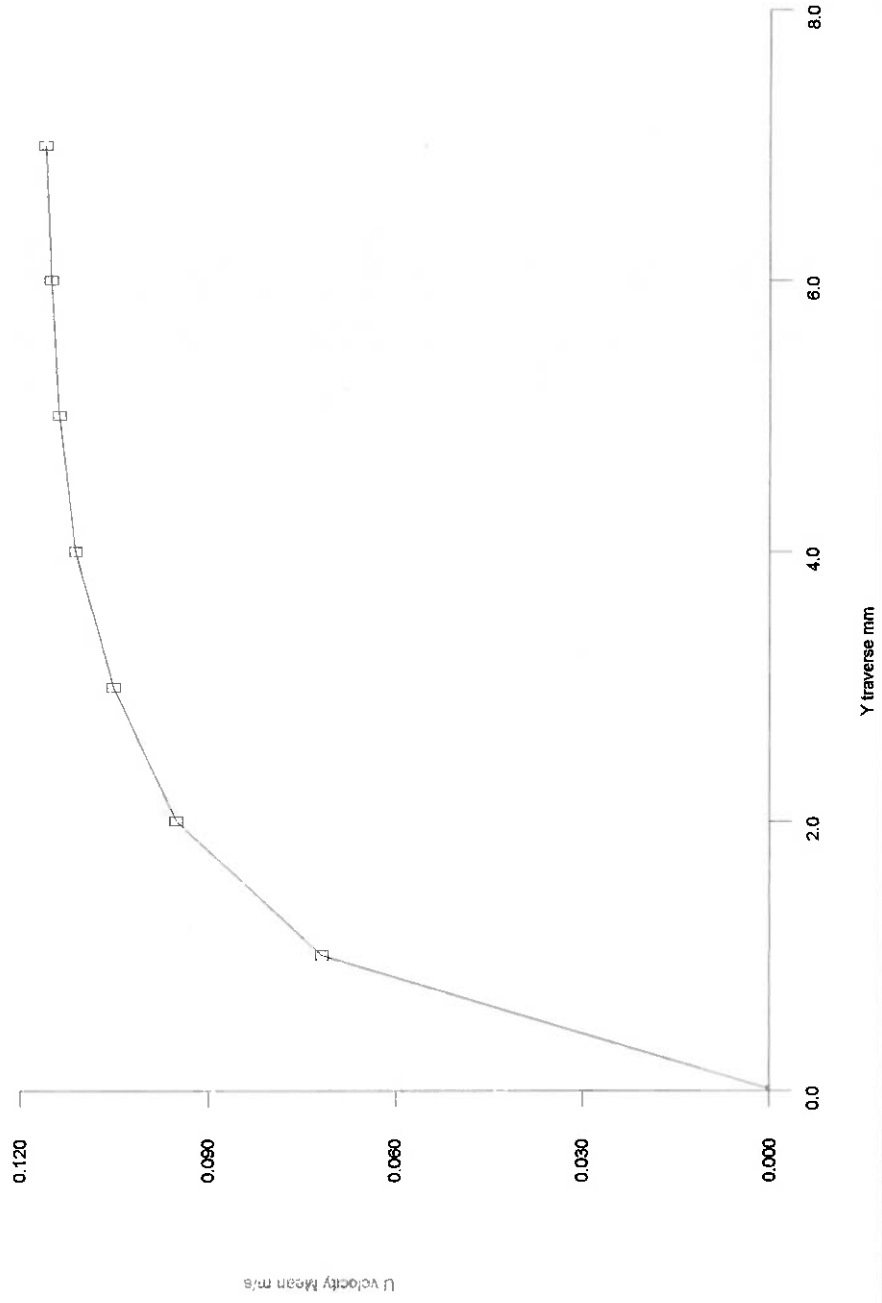
Moments Profile



Perfil de velocidades da Placa Plana a 50mm da borda de ataque.

FLOW.MOM 9-30-96 15:54:44

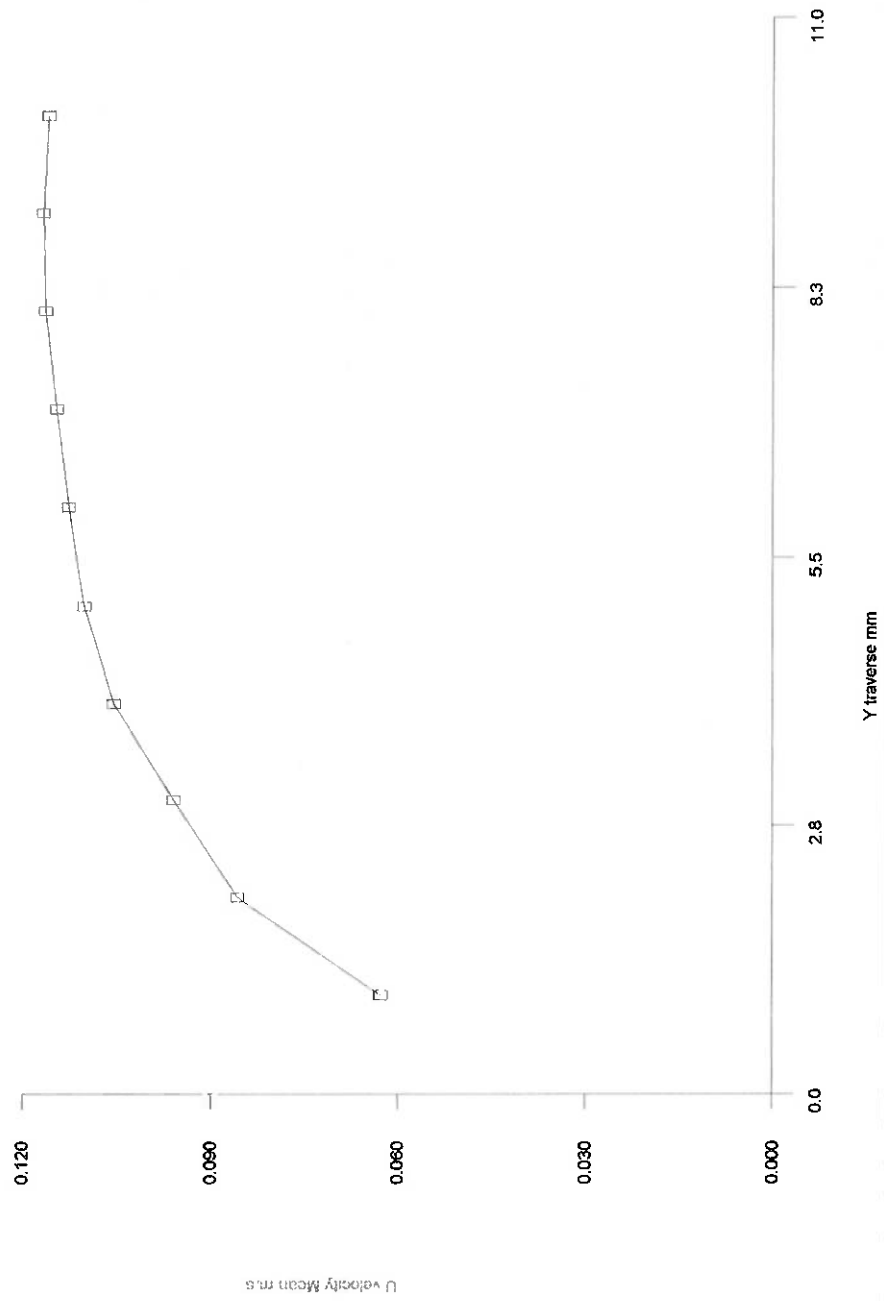
Moments Profile



Perfil de velocidades da Placa Plana a 150mm da borda de ataque.

FLOW.MOM 9-28-96 17:00:56

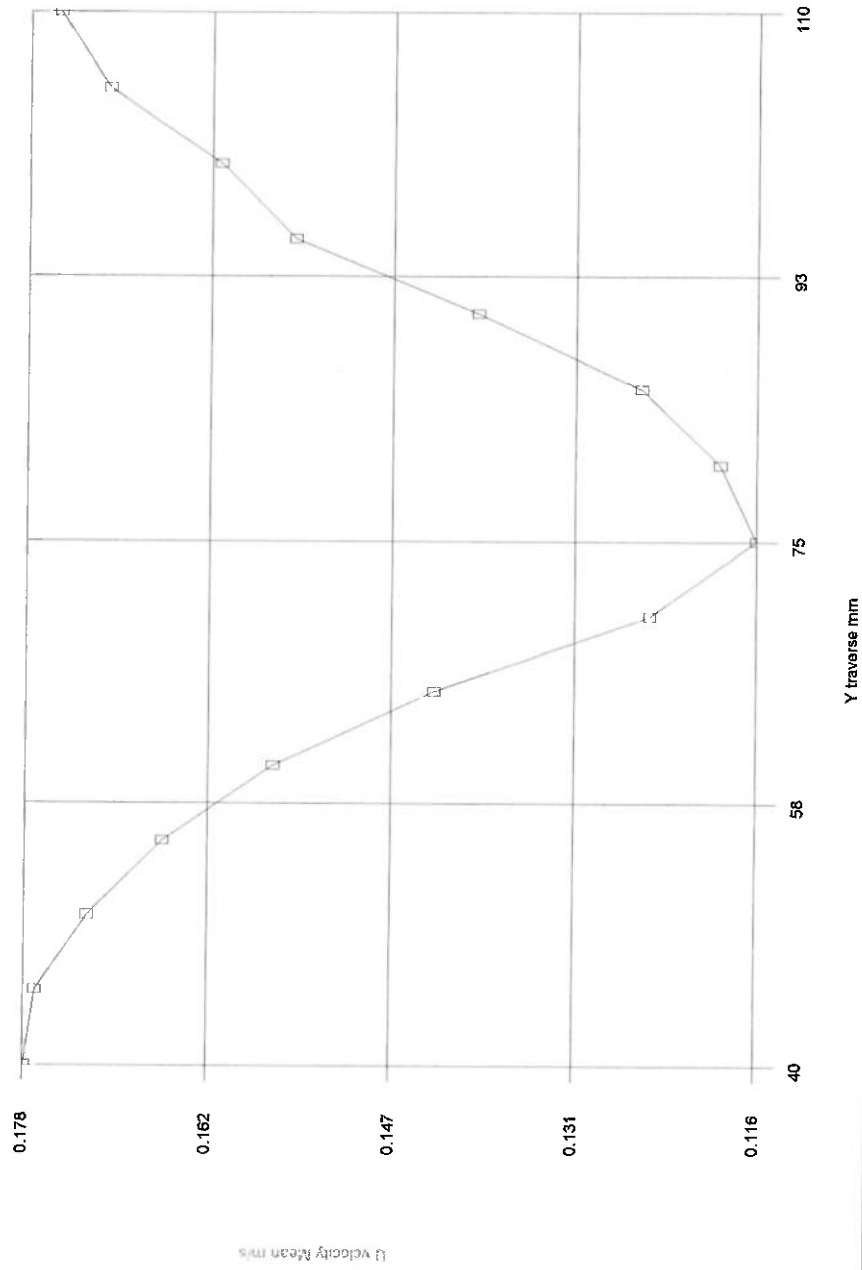
Moments Profile



Perfil de velocidades da Placa Plana a 300mm da borda de ataque.

FLOW.MOM 11-11-96 20:16:12

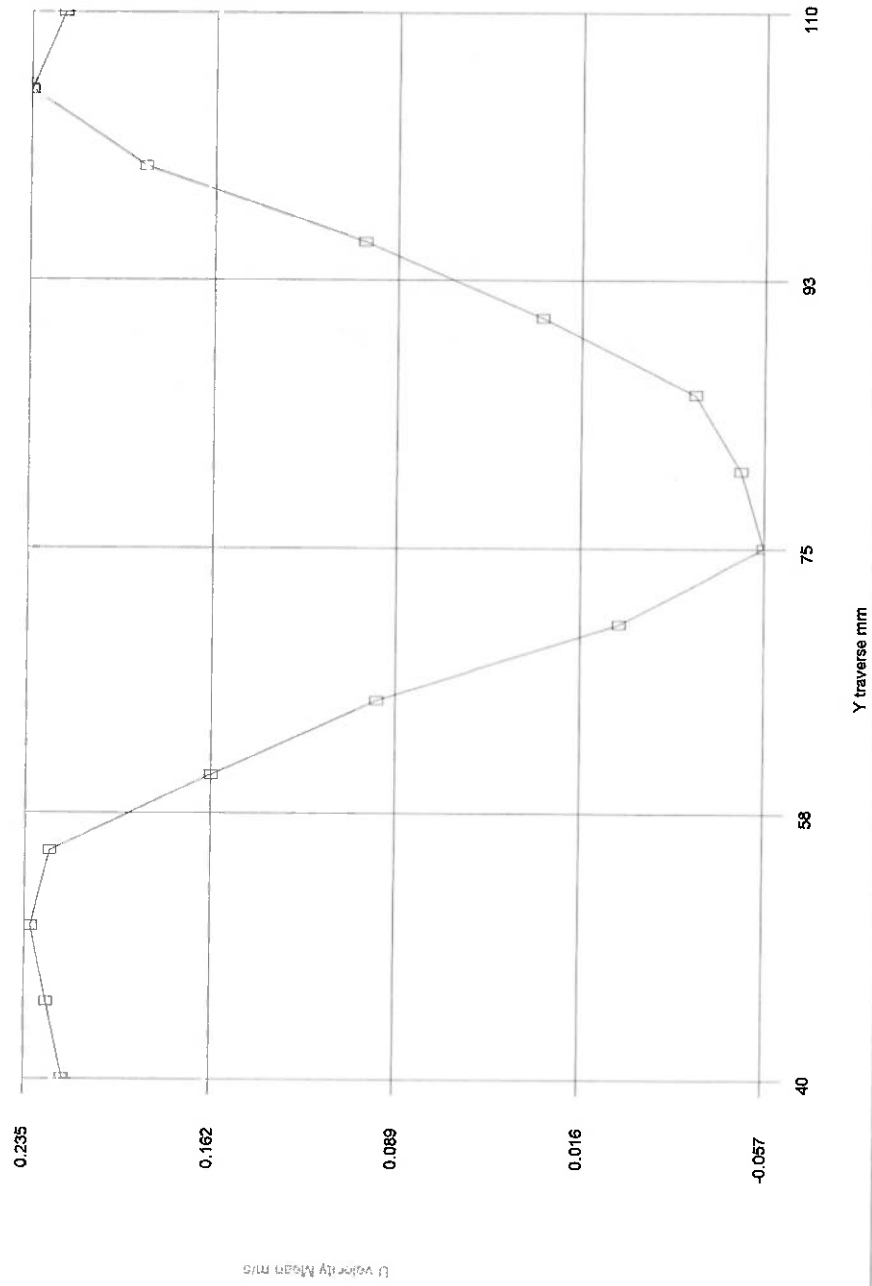
Moments Profile



Perfil de velocidades Amontante do Cilindro (25mm em relação ao seu centro)

FLOW.MOM 11-11-96 20:10:14

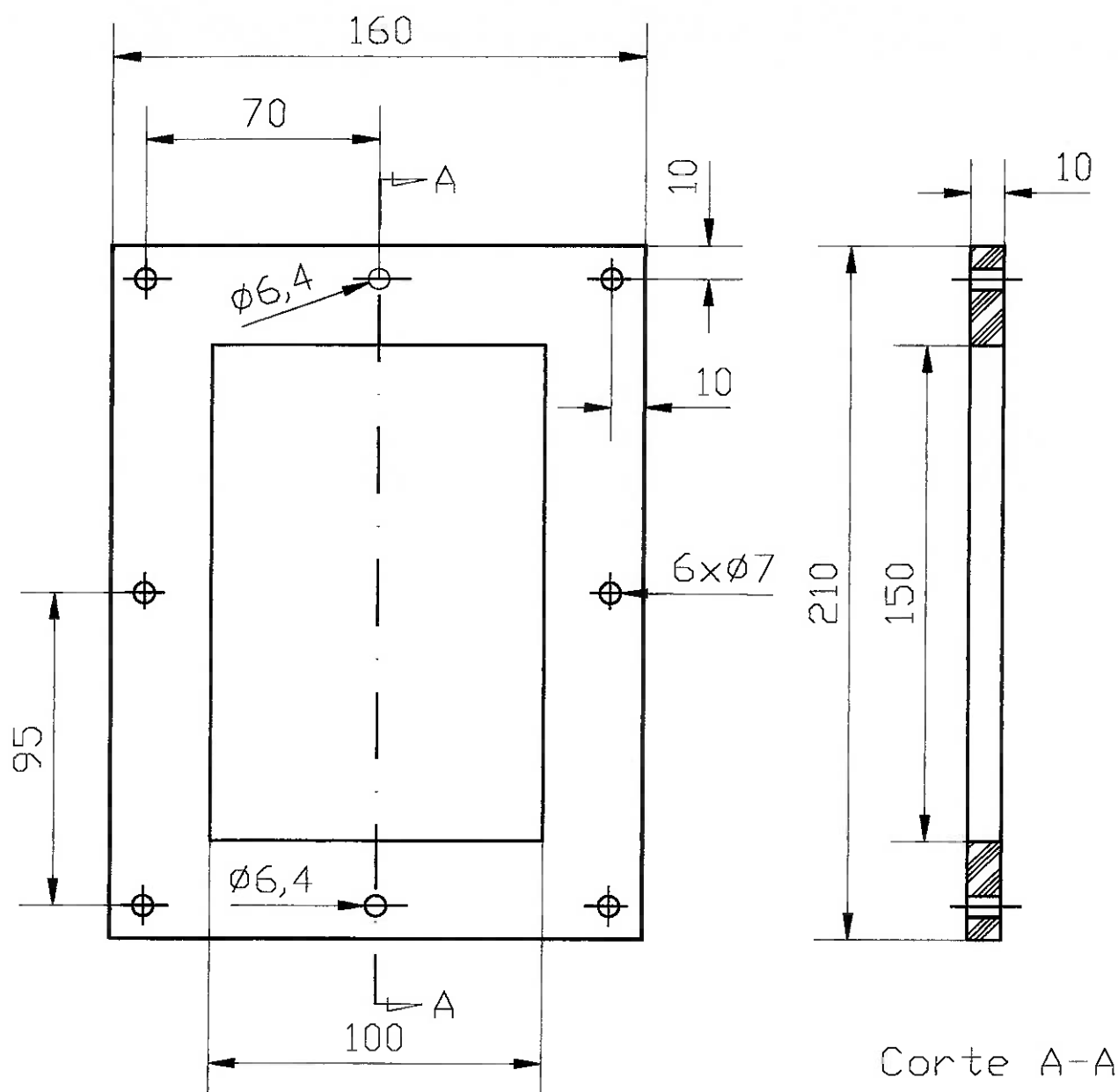
Moments Profile



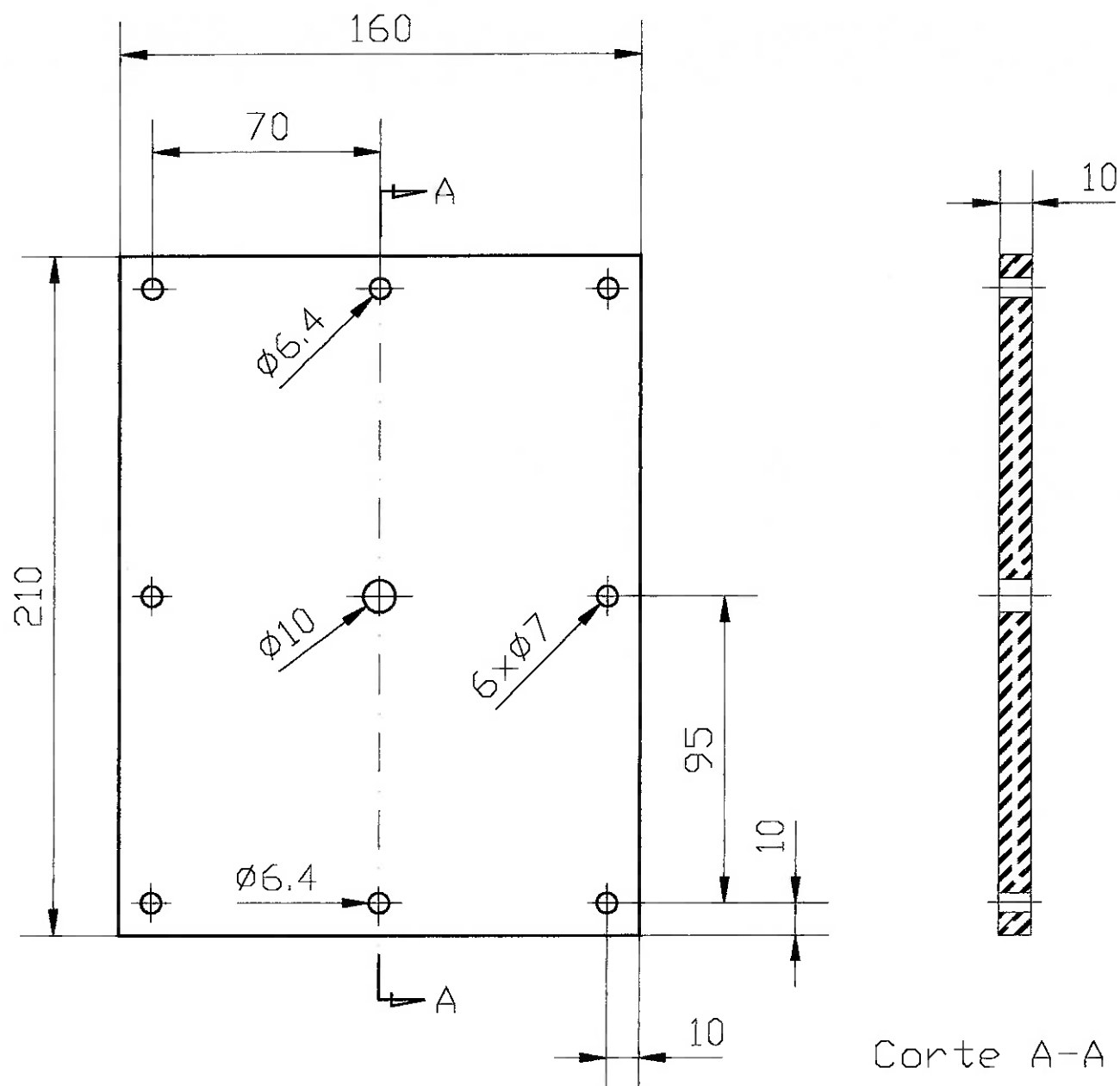
Perfil de velocidades Ajustante do Cilindro (40mm em relação ao seu centro)

ANEXO II

(Desenhos das Peças)

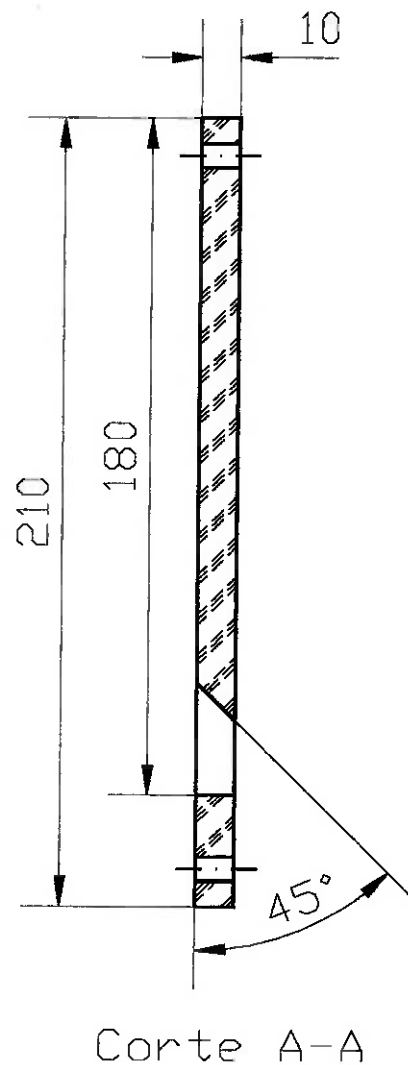
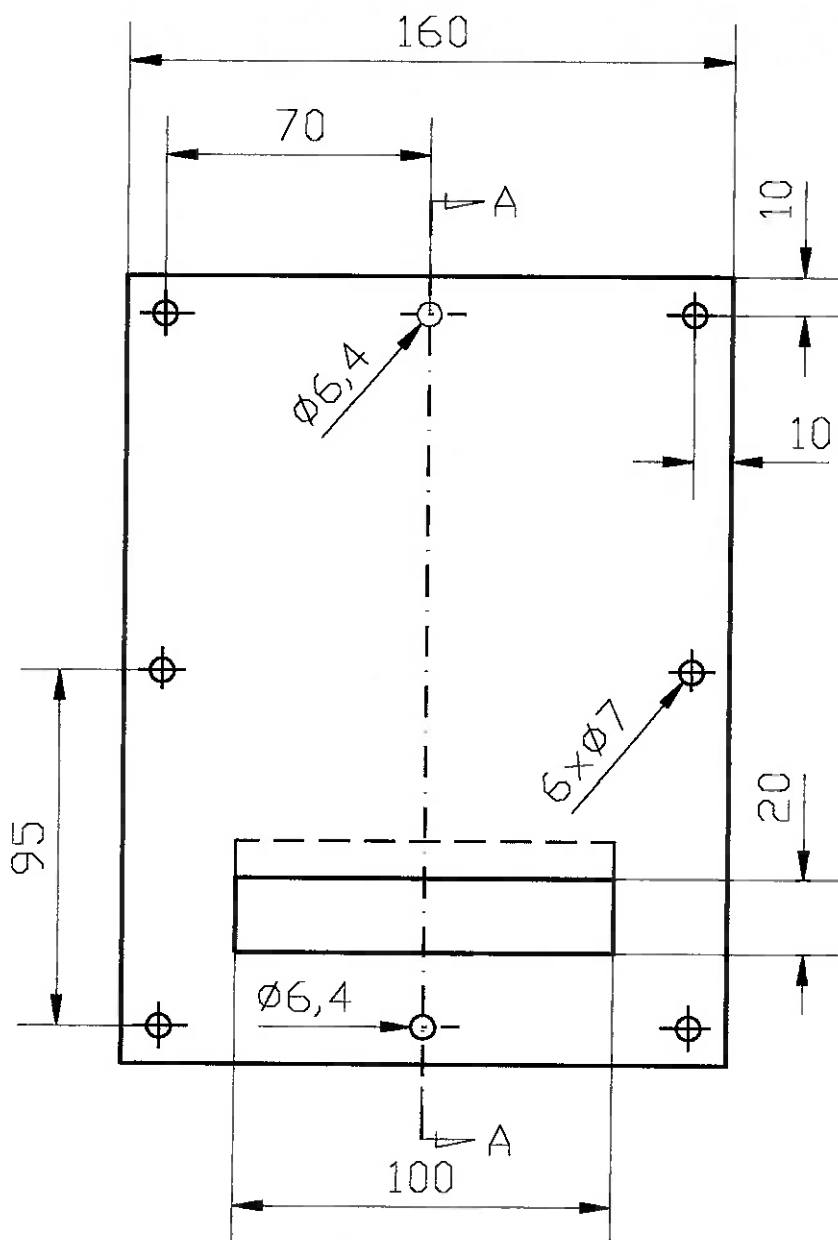


MATERIAL:		Quantidade
Acrílico		01
DESENHADO POR:	DATA:	EPUSP
Miranda-TS10	13/02/96	
Placa da Tela		ESCALA
		1:2

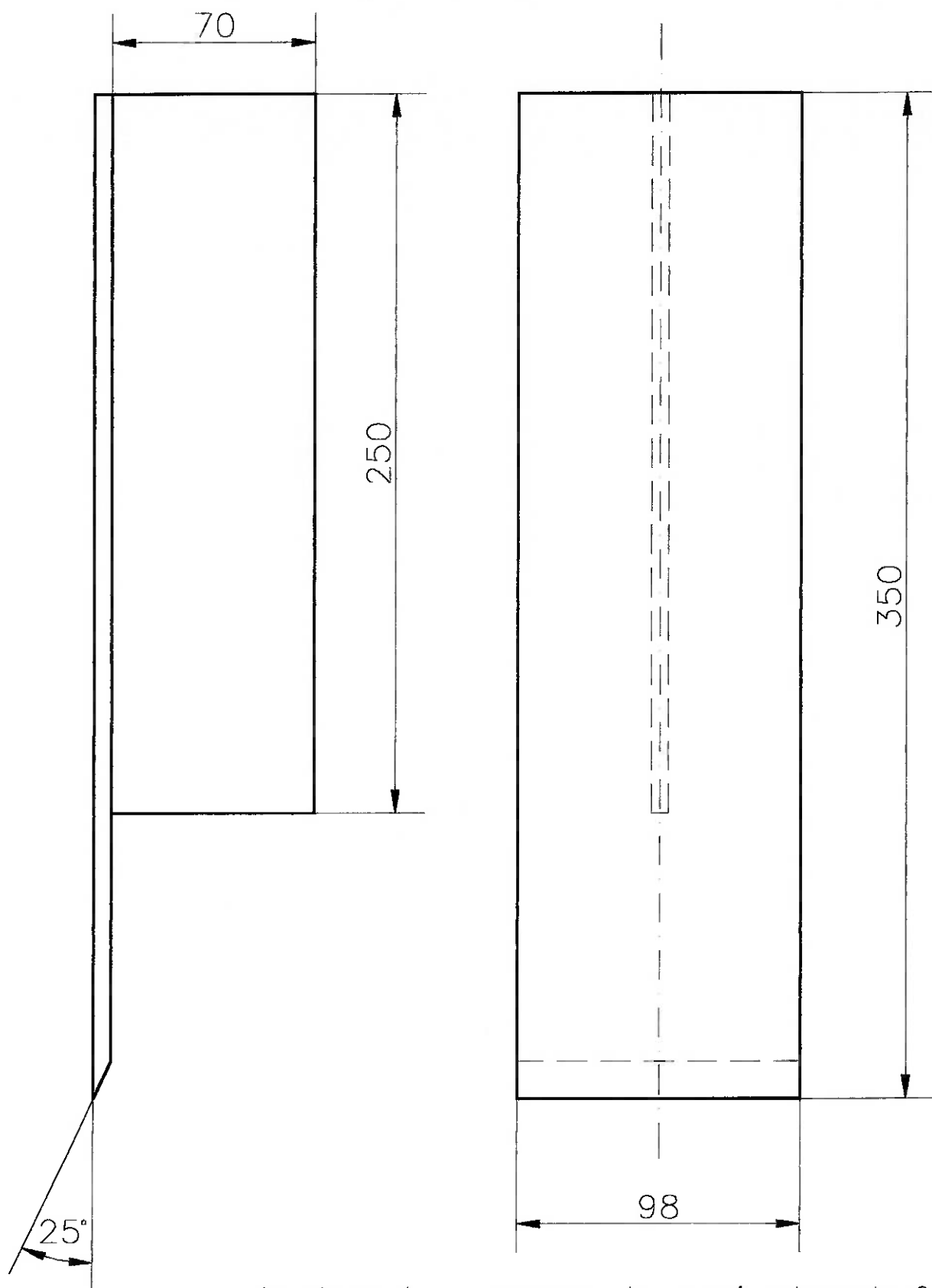


Corte A-A

MATERIAL:		Quantidade
Acrílico		01
DESENHADO POR:	DATA	EPUSP
Miranda-TS10	17/01/96	
Jato Horizontal		ESCALA
		1:2

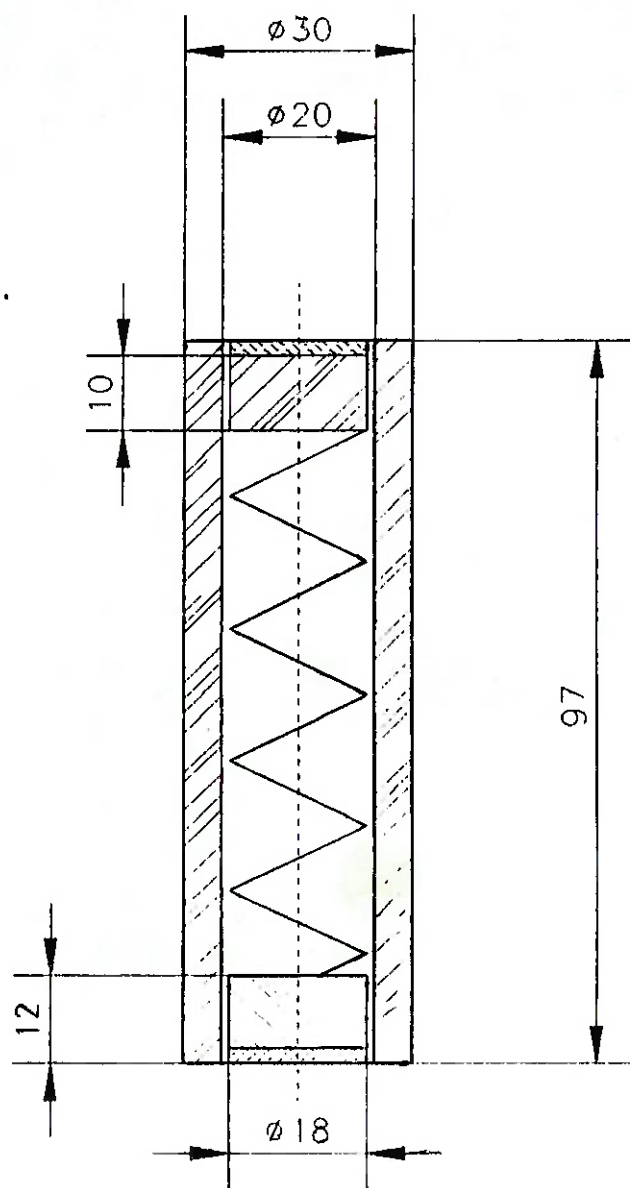


MATERIAL:		Quantidade
Acrílico		01
DESENHADO POR	DATA	EPUSP
Miranda-TS10	16/01/96	
Placa do Ressalto		ESCALA
		1:2



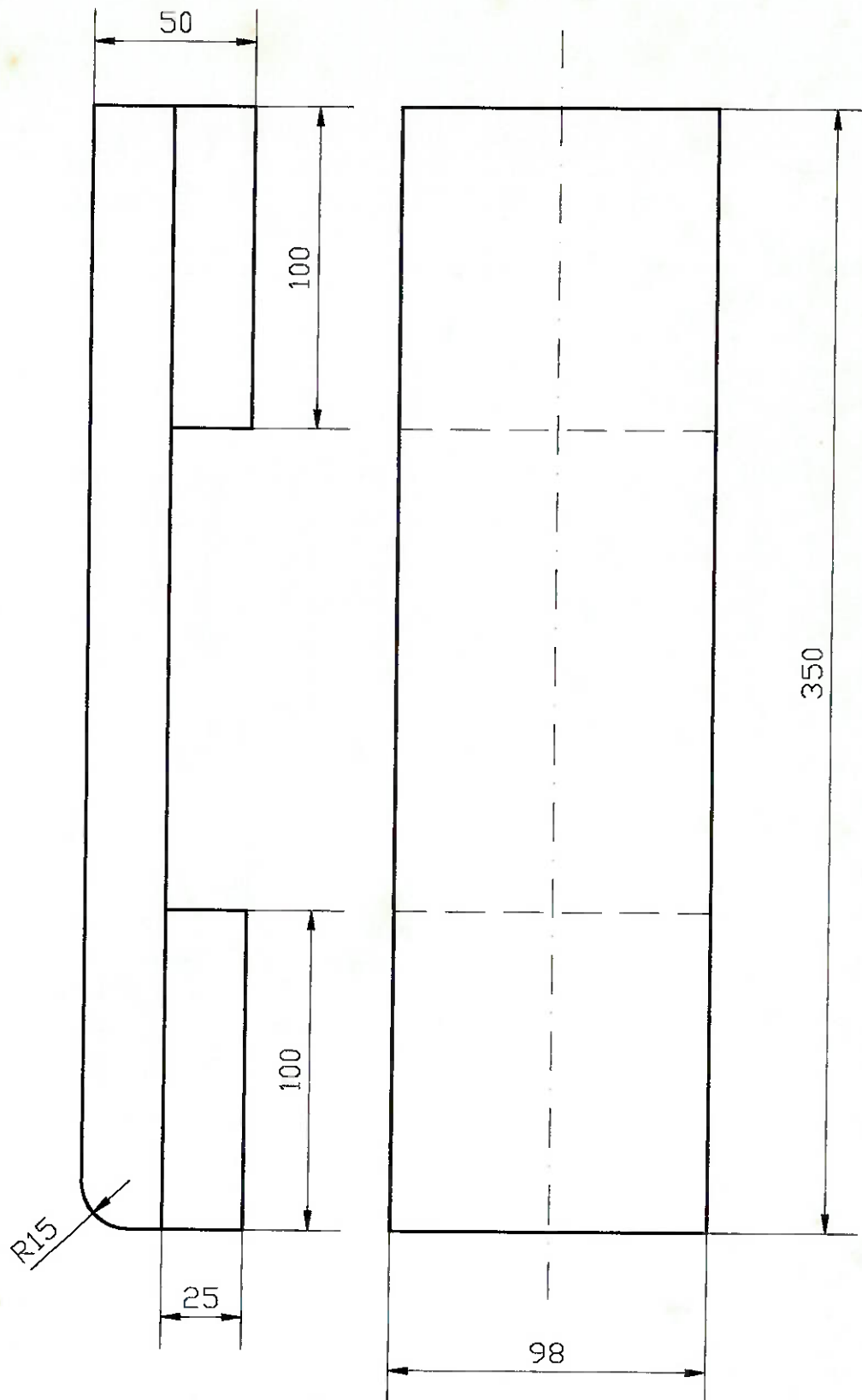
As placas tem espessura de aproximadamente 6mm

MATERIAL:		Quantidade
Acrilico		01
DESNHADO POR:	DATA	EPUSP
Miranda, Marcos C.	9/7/96	
PLACA PLANA		ESCALA
		1:1



obs: Mola Helicoidal
 ø nominal: 18mm
 ø do fio : 1,5mm
 Comprimento: 100mm

Material: Madeira (envernizada)			
Desenhado por: Miranda sala TS10		Data: 31/01/96	EPUSP
Nome: CILINDRO			Escala: 1:1



MATERIAL: Madeira		Quantidade
DESENHADO POR: Marcos C. Miranda	DATA: 10/06/96	EPUSP
Vertedouro/Sol. Esp.		ESCALA: 1:2