

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto Mecânico

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA AERODINÂMICA DE VEÍCULOS

1983

Autor : Mathias Budweg

Orientador : Valter Francisco Arruda Alves

Sumário

O presente trabalho visa dar ao leitor uma introdução à análise experimental da aerodinâmica de veículos em túnel de vento. São apresentados alguns métodos de estudo da aerodinâmica de veículos, assim como um arranjo experimental para a medição das forças aerodinâmicas atuantes no veículo, durante o ensaio no túnel de vento.

Espero, com esse trabalho, dar uma pequena ajuda a todos aqueles que um dia desejarem desenvolver a aerodinâmica de algum tipo de veículo, utilizando o túnel de vento no processo experimental.

O autor

ÍNDICE

Capítulo I : Introdução	1
Capítulo II : Alguns fundamentos da mecânica dos flúidos e sua aplicação à aerodinâmica de veículos	3
Capítulo III: O túnel de vento para veículos	10
Capítulo IV : Método experimental: o modelo e medições no túnel de vento	14
Capítulo V : Avaliação dos resultados Conclusões	25

ANEXOS

BIBLIOGRAFIA

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

A idéia inicial deste trabalho era desenvolver, com auxílio de experiências no túnel de vento, a aerodinâmica de um modelo de veículo de competição do tipo Fórmula 2 Brasil.

Isso se deve ao fato de já existir em andamento o projeto de um veículo dessa categoria, porém, só a parte de chassi e suspensão.

Ainda não se havia pensado em como seria, em detalhes, a aerodinâmica desse carro.

Resolvi, então, tomar como tema de meu trabalho de formatura justamente esse tópico, ou seja, Análise Experimental da Aerodinâmica de Veículos.

Pretendia-se, para tanto, utilizar um dos túneis de vento existentes na Escola Politécnica da USP, e através da coleta de dados de medição, introduzir ao modelo as modificações necessárias à sua otimização. O que quer dizer otimização em um carro do tipo fórmula?

Nesse caso, otimização aerodinâmica seria obter com uma mesma configuração, um arrasto mínimo e uma pressão aerodinâmica vertical descendente, a "down-force", máxima.

O problema todo nesse procedimento se resume basicamente em como coletar tais dados de medição.

Foi nesse ponto que o rumo do trabalho mudou ligeiramente de curso. Da idéia inicial de desenvolver o carro em si, passou-se a desenvolver um sistema adequado de medição das forças atuantes num modelo, durante o ensaio do túnel de

vento, mais especificamente a força descentente ou "down-force". E é nesse ítem que se concentra o presente trabalho.

Antes de partir a esse ítem específico, daremos, nos primeiros capítulos, algumas informações básicas simples para que o leitor possa compreender com mais clareza os fundamentos envolvidos.

CAPÍTULO II: ALGUNS FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DOS FLUIDOS E SUA APLICAÇÃO À AERODINÂMICA DE VEÍCULOS.

11.1. Características do fluido incompressível

Quando abordamos os problemas relacionados à aerodinâmica de veículos, estaremos sempre utilizando o ar como meio, ou mais precisamente, o ar úmido.

Nas velocidades em que veículos normais e mesmo a maioria dos veículos de competição se locomovem, o efeito da compressibilidade do ar pode ser desprezado, o que simplifica bastante a análise dos resultados.

Sabemos que a velocidade do som no ar, sob condições normais ($p = 1 \text{ atm}$, $t = 20^\circ\text{C}$) é aproximadamente $a = 340 \text{ m/s}$.

Veículos normais, raramente ultrapassam os 200 km/h ($\sim 60 \text{ m/s}$), e veículos de competição são raramente superam os 350 km/h ($\sim 100 \text{ m/s}$). Assim, as velocidades usuais dos automóveis assumem valores inferiores a $1/3$ da velocidade do som, uma faixa na qual podemos desprezar, sem maiores problemas, o efeito da compressibilidade do ar.

Assim, podemos assumir, nas condições normais de pressão e temperatura, que a Densidade do ar vale:

$$\rho = 1,205 \text{ Kg/m}^3$$

Pela Viscosidade de um fluido entendemos a capacidade do fluido transferir tensão de cisalhamento entre as camadas do fluido ou entre o fluido e uma parede que é tangenciada pelo escoamento desse fluido. Assim, por Newton:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (11.1)$$

a tensão de cisalhamento é proporcional à variação da velocidade $\frac{du}{dy}$.

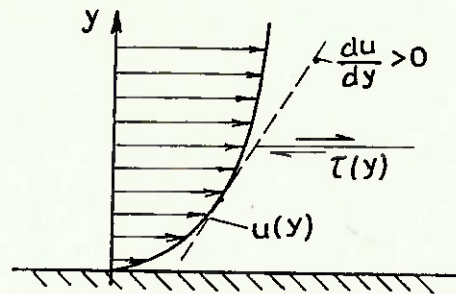


Figura 1: Distribuição da velocidade u nas imediações de uma superfície plana.

o coeficiente de proporcionalidade μ é denominado viscosidade dinâmica, que, dividido pela densidade, resulta na viscosidade de cinemática:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (11.2)$$

Os valores de μ e ν , nas condições normais, são:

$$\mu = 1,717 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

$$\nu = 1,373 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

É a viscosidade do fluido a responsável pelo aparecimento da força de arrasto em qualquer corpo mergulhado num escoamento de um fluido.

11.2. Número de Reynolds

O número de Reynolds é definido como:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (11.4)$$

onde: V é a velocidade do escoamento ao longe.

L é uma dimensão característica do veículo, por exemplo, o comprimento.

ν é a viscosidade cinemática.

Quando trabalhamos com modelos em escala reduzida, devemos considerar, além da semelhança geométrica, também a semelhança mecânica, ou seja, o modelo e o protótipo devem apresentar números de Reynolds iguais.

$$Re_p = Re_m \quad (11.4)$$

ou

$$\frac{V_p \cdot L_p}{\nu_p} = \frac{V_m \cdot L_m}{\nu_m} \quad (11.5)$$

Na quase totalidade dos ensaios com modelos utiliza-se também o ar como meio. Raramente ensaiam-se modelos de automóveis em canais utilizando-se água como fluido.

Logo, obtemos a relação de semelhança simplificada:

$$V_p \cdot L_p = V_m \cdot L_m \quad (11.6)$$

que deve ser respeitada, assim como a semelhança geométrica, se quisermos transferir os resultados medidos no modelo ao protótipo real.

11.3 Equação de Bernoulli. Velocidade de Escoamento.

Aplicando a lei fundamental de Newton: "Força é igual à massa vezes a aceleração" a um escoamento incompressível, obteremos:

$$g = p + \frac{\rho}{2} \cdot V^2 = \text{cte sobre uma linha de fluxo.} \quad (11.7)$$

onde: g = pressão total.

p = pressão estática.

$\frac{\rho}{2} \cdot V^2$ = pressão dinâmica.

V = velocidade de escoamento.

Essa fórmula é aplicada quando utilizamos um Tubo de Pitot para a medição da velocidade do escoamento de ar no túnel de vento. (Ver Figura 2).

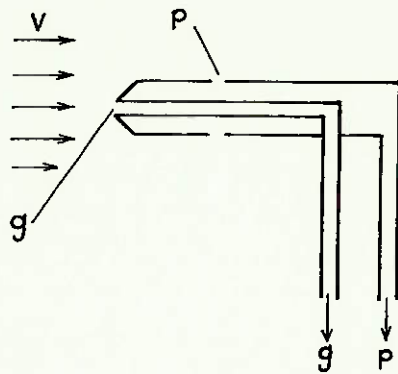


Figura 2: Tubo de Pitot para medição da pressão total g e da pressão estática p num escoamento incompressível de ar.

Da equação (11.7), teremos:

$$V = \sqrt{\frac{2(g-p)}{\rho}} \quad (11.8)$$

Na prática, muitas vezes mede-se a diferença de pressões $(g-p)$ com auxílio de um tubo em U preenchido de um líquido barométrico, geralmente algum tipo de óleo. (Ver Figura 3).

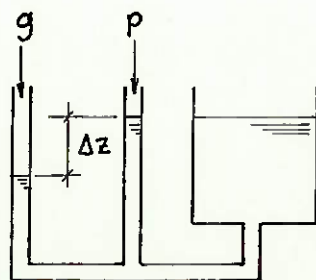


Figura 3: Esquema da instalação para medição da dif. de pressão $(g-p)$.

A diferença de pressões ($g-p$) será igual à pressão da coluna do líquido barométrico de altura Δz .

$$\text{Logo: } (g-p) = \rho_b \cdot g_c \cdot \Delta z \quad (11.9)$$

onde: ($g-p$) = diferença entre pressão total e estática (N/m^2)

ρ_b = densidade do líquido barométrico (Kg/m^3)

g_c = aceleração da gravidade = $9,81 \text{ m/s}^2$

Δz = altura da coluna de líquido barométrico (m).

$$\text{Então: } v = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_b \cdot g_c \cdot \Delta z}{\rho}} \quad (11.10)$$

é a equação que nos fornece a velocidade do escoamento.

11.4. Esforços aerodinâmicos em um carro em movimento.

Quando um carro está em movimento, ou quando ensaiamos um modelo no túnel de vento, teremos, simplificada-mente (considerando escoamento bidimensional e incidindo paralela-mente ao eixo longitudinal do carro) o surgimento dos seguintes esforços:

- arrasto, que é a força que "segura" o carro em movimento;
- empuxo, a força vertical que pode ser ascendente ou descendente, dependendo do perfil aerodinâmico do automóvel;
- e um momento, resultante da diferença entre as posições do centro de gravidade de massa e o baricentro das pressões aerodinâmicas.

Estes esforços estão esquematizados na Figura 4.

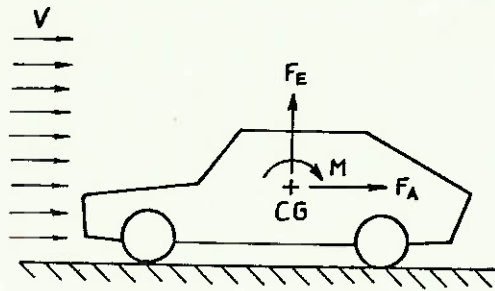


Figura 4: Esforços atuantes em um veículo em movimento.

Em veículos de passeio o repuxo F_E geralmente é ascendente, razão pela qual o carro fica "mais leve" quando se anda em altas velocidades.

O arrasto F_A é sempre em sentido contrário ao do movimento do carro, ou seja, F_A sempre tende a frear o veículo.

Podemos adimensionalizar estes esforços, como mostramos abaixo, o que nos permite comparar diretamente as características aerodinâmicas do modelo com o protótipo. Assim, obteremos:

$$C_A = \frac{F_A}{\frac{\rho}{2} V^2 \cdot A_F}$$

$$C_E = \frac{F_E}{\frac{\rho}{2} V^2 \cdot A_F}$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{\rho}{2} V^2 \cdot A_F \cdot L}$$

C_A , C_E , C_M são os coeficientes adimensionais relativos, res-

pectivamente, ao arrasto, empuxo e momento.

AF é a área frontal projetada do veículo.

CAPÍTULO III: O TÚNEL DE VENTO PARA VEÍCULOS

III.1: Tipos e Características Construtivas

Existem basicamente dois tipos de túneis de vento: os com retorno e sem retorno.

No primeiro tipo, o ar, após passar pelo trecho útil de medição, retorna através de uma tubulação adequadamente desenhada para se ter um mínimo de perdas e uma máxima uniformidade no escoamento na área de medição. No segundo tipo, sem retorno, o ar é aspirado da atmosfera, passa pelo trecho de medição e é devolvido à atmosfera.

O primeiro tipo tem a vantagem de consumir menos potência de acionamento, porém a sua construção requer recursos iniciais mais elevados.

Já o segundo tipo tem o inconveniente de ser sujeito às intempéries, já que deve ser construído em local aberto. Isso impossibilita o seu uso em certas épocas do ano. Por outro lado, a sua construção é mais barata, porém os custos de operação são mais elevados, já que a eficiência de um túnel de vento sem retorno de ar é reduzida.

Quanto ao trecho de medição encontramos duas construções distintas.

Existem aqueles "abertos", nos quais o túnel é interrompido na seção de medição e o fluxo de ar é captado novamente após passar por essa. Eles apresentam a vantagem de permitir uma mobilidade e versatilidade maior no manejo do modelo que está sendo ensaiado, além de não apresentarem acentuada queda de pressão ao longo do trecho de medição. Tem,

porém, o inconveniente de possuírem um trecho de medição relativamente curto, devido a interferência do ar externo que circunda o trecho de medição.

O segundo tipo de trecho de medição é o "fechado", no qual as paredes do túnel não se interrompem no trecho de medição. Nesse caso, a desvantagem está no fato de existir uma acentuada perda de pressão ao longo da secção de medição, o que pode ser corrigido em parte fazendo-se com que a secção transversal aumente ligeiramente no trecho de medição, criando o "efeito Venturi". A principal vantagem dessa configuração está no maior comprimento do trecho de medição, permitindo, dessa forma, ensaios de modelos longos.

III.2: Especificações

Verificou-se, ao longo dos anos, que um fator importante em ensaios de túnel de vento é a "relação de bloqueio", ou seja, a relação da área frontal do modelo AF e área de saída do local Ab. Essa relação

$$r_b = AF/Ab \quad (III.1)$$

não deve ser maior que 0,1, principalmente em túneis com trecho de medição fechado, pois pode haver interferência da parede com o desenvolvimento das linhas de fluxo ao redor do veículo.

Já nos túneis com trecho de medição aberto, é permitido se usar r_b até da ordem de 0,15 a 0,2.

Na prática, as grandes indústrias automobilísticas fazem túneis de vento 1:1, ou seja, elas ensaiam no túnel de vento modelos ou protótipos em escala natural. Estes túneis possuem uma área de saída do bocal em torno de 40 m², equivale a um diâmetro de aproximadamente 7 metros. Como vêem, são verdadeiros "monstros".

Usa-se, para pesquisas que exigem uma sofisticação

um pouco menor, túneis de escala 1:4, cujos custos já são consideravelmente menores.

A medida que reduzimos o tamanho do modelo, ou aumentamos a escala, surgem dois graves problemas. O primeiro é relacionado à construção do modelo que, numa escala de 1:10, por exemplo, se torna extremamente complicada, devido à complexidade dos detalhes como spoilers, caixas de rodas, reentrâncias, maçanetas, etc.

O outro problema, talvez até mais grave que o anterior, se relaciona à concepção do túnel de vento. Como já vimos, para mantermos a semelhança mecânica num modelo reduzido com o protótipo, precisamos respeitar a igualdade (11.6).

$$\text{Então: } V_m = \frac{V_p L_p}{L_m}$$

Numa escala 1:10, $\frac{L_p}{L_m}$ vale 10, e teremos

$$V_m = 10 \cdot V_p.$$

Num carro de competição, V_p é da ordem de 80 m/s, ou seja, no túnel de vento precisaríamos uma velocidade de escoamento do ar da ordem de 800 m/s, que é várias vezes superior à velocidade do som.

1.3: O Túnel de Vento da EPUSP

O túnel de vento existente na Escola Politécnica é uma secção retangular na saída do bocal medindo 23 X , ou seja $A_b = 780 \text{ cm}^2$.

Isso nos permitirá, a grosso modo, ensaiar um modelo na escala 1:10.

Como já vimos, porém, é praticamente impossível conseguir uma velocidade compatível com o número de Reynolds necessário para se manter a semelhança mecânica.

Medições de velocidade no túnel de vento com um tubo de Pitot resultaram num valor médio de 20 m/s, certamente muito baixo para podermos tirar alguma conclusão quantitativa das forças aerodinâmicas, porém suficiente para poder se fazer uma análise qualitativa do modelo, e também para se calcular os coeficientes adimensionais de empuxo e arrasto, C_E e C_A .

Quanto à uniformidade do escoamento, fizemos medições de velocidade em diferentes pontos da secção transversal do escoamento e obtivemos uma variação de $\pm 10\%$ nas regiões mais afastadas do centro, sendo que na parte central, onde colocamos o modelo, o escoamento é razoavelmente uniforme.

CAPÍTULO IV: MÉTODO EXPERIMENTAL: O MODELO E MEDIÇÕES NO TÚNEL DE VENTO.

IV.1 Descrição do Modelo. Características.

Já há algum tempo estamos desenvolvendo o projeto de um carro de corridas do tipo fórmula 2 Brasil. Várias características construtivas já estavam definidas quando resolvemos tentar desenvolver a aerodinâmica do veículo em túnel de vento. Assim, nada mais lógico do que utilizarmos, nos ensaios do túnel de vento, um modelo desse carro.

Trata-se de um carro internacionalmente conhecido como monoposto, ou seja, só há lugar para o piloto. Assim sendo, é um veículo destinado unicamente a se locomover em pistas especiais para competição. Na fórmula 2 Brasil, o regulamento estipula que o motor deve ser derivado de um bloco de série e ter a capacidade máxima de 1.600 cc. Um motor nestes moldes desenvolve entre 180 e 200 cv, uma potência que já permite conceber um "wing-car".

Por "wing-car" entende-se um carro que tem embutido nas suas laterais perfis de asa de avião invertidos, ou seja, perfis que proporcionam uma enorme carga aerodinâmica descendente no carro, e que faz com que este tenha uma melhor estabilidade em curvas. Em contrapartida, estes perfis de asa consigo um arrasto maior no veículo, o que torna muito importante o trabalho no túnel de vento para se desenvolver perfis com mínimo arrasto e máximo empuxo.

Nas figuras 5 e 6 temos alguns exemplos de autênticos "carros-asa" de fórmula 1.

A Figura 7 mostra esquematicamente qual o princípio

de funcionamento do efeito asa em carros de competição.



Figura 5



Figura 6

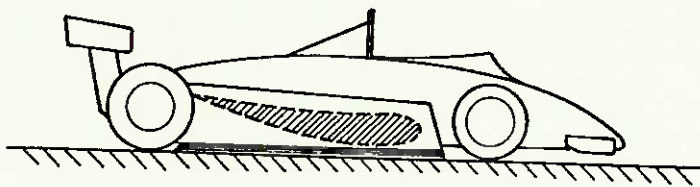


Figura 7: O efeito-solo nos modernos carros tipo fórmula. A parte hachurada representa a asa embutida na lateral do carro, uma de cada lado.

Nos anexos, encontramos os desenhos do modelo ensaiado no túnel de vento com algumas de suas dimensões características. A partir desses desenhos construímos o modelo em madeira balsa, alumínio e chapas de ferro. É um trabalho artesanal que requer muita paciência e alguma prática no manejo com tais materiais. Porém, não existem segredos, e qualquer pessoa interessada no assunto seria capaz de construir o seu próprio modelo, com suas próprias idéias e concepções. Basta possuir algumas ferramentas encontráveis na oficina de qualquer "marceneiro hobbysta".

2 Método de Medição

Nas nossas experiências, nos preocupamos apenas em o empuxo do modelo e, portanto, o arranjo experimental descrito se concentrará nesse aspecto. Porém, com as formações aqui contidas, não é difícil projetar um arranjo para medir, por exemplo, o arrasto no modelo.

A primeira idéia que surgiu, se baseava na medição de deformação de barras sujeitas a compressão, montadas verticalmente uma debaixo de cada roda do modelo. Porém, logo

verificamos que esse procedimento certamente não traria resultados positivos devido a baixa carga que certamente atuaria nas barras.

Esperamos obter uma "down-force" da ordem de dezenas de gramas, o que seria muito pequena para deformar suficientemente uma barra sujeita a compressão, pois esta teria que ser suficientemente rígida para não flambar.

As deformações, de qualquer maneira, seriam medidas com extensômetros elétricos, ou "strain-gages".

Partimos então para um outro sistema de medição. Optamos por lâminas de aço montadas horizontalmente, uma sob cada roda do modelo, e que trabalhariam a flexão. Assim, alterando o comprimento do apoio da roda até o engastamento, poderíamos alterar a elasticidade da lâmina.

Escolhemos uma lâmina cujo perfil permitisse uma flexão de aproximadamente 2 mm. sob uma carga de 20 g, o que já seria suficiente para medir a flexão, sendo a lâmina engastada a 20 cm. de distância do apoio da roda.

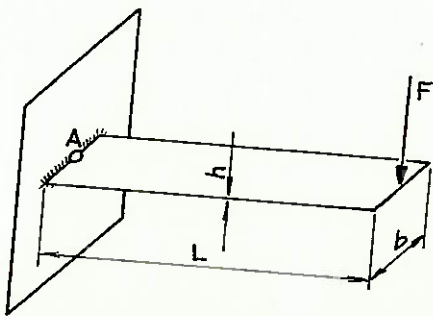


Figura 8: Lâmina engastada sujeita a uma carga F .

Uma lâmina engastada, conforme figura 8, apresenta as seguintes características:

$$I = \frac{b h^3}{12} \quad \text{momento de inércia} \quad (\text{IV.1})$$

$$M_A = F L \quad \text{momento no ponto A} \quad (\text{IV.2})$$

$$\sigma_A = \frac{M_A h}{2 I} \quad \text{tensão de tração (ou compressão) em A} \quad (\text{IV.3})$$

$$\sigma_A = E \epsilon$$

E = módulo de elasticidade do material;

para aço: $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$

ϵ = alongamento no ponto A = $\Delta L/L$

Portanto, para podermos calcular a carga F , precisamos medir ϵ com um arranjo de extensômetros convenientemente colados na lâmina.

IV.3: Teoria dos extensômetros elétricos

O funcionamento do extensômetro elétrico é muito simples. Trata-se de um fio elétrico muito fino dobrado em forma de serpentina, que é colado sobre a peça cuja deformação se deseja medir. É, portanto, um medidor de deformação e não um medidor de esforço, como seria de se esperar ao se traduzir a sua denominação em inglês, "strain-gage".

Ao se deformar, o extensômetro altera a sua resistência elétrica, pois varia a secção transversal e o comprimento do fio.

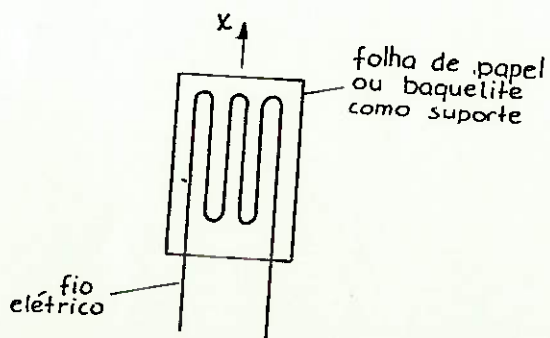


Figura 9: Extensômetro elétrico.

A maneira mais prática de se utilizar os extensômetros elétricos é montando-os em uma ponte de Wheatstone. É um arranjo que basicamente utiliza quatro extensômetros iguais e um conjunto de baterias. (Ver figura 10)

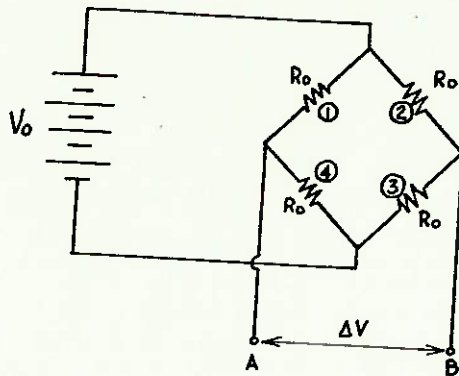


Figura 10: Ponte de Wheatstone

As quatro resistências R_0 representam os quatro extensômetros iguais. V_0 pode ser um conjunto de quatro pilhas comuns, ligadas em série.

Quando a ponte estiver equilibrada, ou seja, nenhum extensômetro está deformado, a diferença de potencial ΔV entre os pontos A e B do circuito é igual a zero.

A relação entre ΔV e a variação do valor das resistências é a seguinte:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{1}{4R_0} (-\Delta R_1 + \Delta R_2 - \Delta R_3 + \Delta R_4) \quad (IV.5)$$

Na prática, porém, a ponte nunca fica balanceada), sem a deformação de nenhum dos extensômetros. se deve basicamente a três fatores:

- diferença de R_0 na fabricação dos extensômetros
- colagem dos extensômetros nos corpos de prova com alguma deformação inicial
- extensômetros sujeitos a temperaturas diferentes

Por isso, acrescentam-se alguns componentes na ponte de Wheatstone que permitem o seu balanceamento.

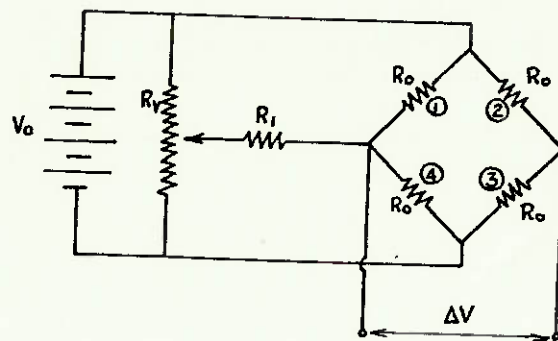


Figura 11: Ponte de Wheatstone com balanceamento.

Ainda referente aos extensômetros, sabe-se que existe uma relação de proporcionalidade entre a variação percentual da resistência $\Delta R/R_0$ e o alongamento $\Delta L/L_0 = \epsilon$.

Portanto:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = GF \cdot \epsilon \quad (IV.6)$$

onde o fator de proporcionalidade GF ("gage-factor") é uma característica de cada extensômetro e que expressa sua sensibilidade.

IV.4: Disposição dos extensômetros

Como já vimos, a fórmula (IV.5) nos dá a relação entre ΔR_i , $i = 1, 2, 3, 4$

No nosso caso, usaremos duas pontes de Wheatstone, para as duas lâminas dianteiras e uma para as duas lâminas traseiras. Isso nos permite medir separadamente o eixo no eixo dianteiro e no eixo traseiro, além de utilizar quatro extensômetros ativos em cada ponte, colando, com um sivo especial a base de cianoacrilato, dois "strain-gages" em cada lâmina, um na parte superior e outro na parte inferior. (ver figura 12)

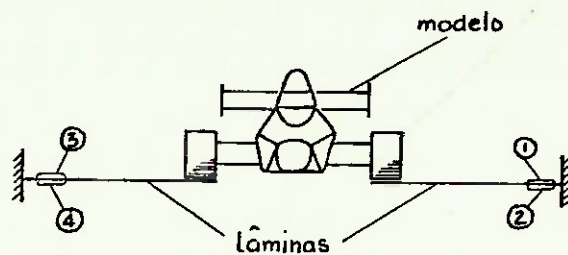


Figura 12: Esquema da disposição dos extensômetros nas lâminas.

Os extensômetros 1 e 3 tem variação de resistência de igual valor e sinal, enquanto que os extensômetros 2 e 4 tem a mesma variação de resistência porém de sinal contrário aos dois anteriores. Dessa maneira, ligados conforme esquema da figura 11, haverá uma soma das variações das resistências e então teremos:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta R}{R_0} \quad (IV.7)$$

De (IV.6) e (IV.7) podemos escrever:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = GF \cdot \xi \quad (IV.8)$$

e, portanto, calcular ξ , já que ΔV é medido, V_0 e GF são valores conhecidos.

Logo, conhecendo-se ξ , é possível calcular o valor da força F aplicada à lâmina em balanço, valor esse que corresponde ao empuxo que desejamos saber.

IV.5: Circuito de amplificação

Em ensaios preliminares, verificamos que o sinal ΔV que seria esperado, seria da ordem de décimos de milivolts,

o que tornaria muito difícil qualquer leitura em aparelhos usuais, do tipo multímetro ou milivoltímetro.

Resolvemos, então, adicionar ao arranjo experimental um circuito simples de amplificação, que tornasse possível a leitura de ΔV .

Trata-se de um circuito que utiliza um amplificador operacional do tipo 741 e algumas resistências convenientemente interligadas. O esquema de ligação do circuito de amplificação está na figura 13.

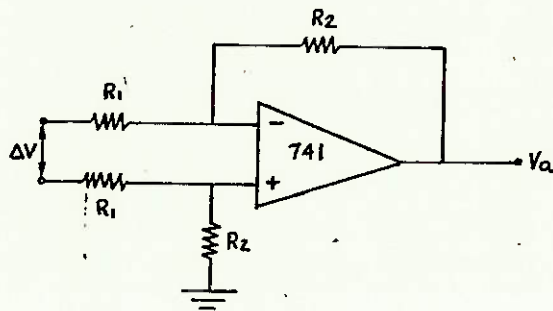


Figura 13: Esquema elétrico do circuito de amplificação.

Nesse tipo de circuito, o ganho é determinado pela relação entre os valores das resistências R_2 e R_1 .

$$V_a = \frac{R_2}{R_1} (\Delta V) \quad (IV.9)$$

Utilizamos no nosso circuito:

$$R_1 = 220 \text{ k}\Omega \text{ e}$$

$$R_2 = 1 \text{ k}\Omega$$

o que resulta em um fator de amplificação de 220 vezes, suficiente para podermos utilizar um aparelho registrador do tipo X-Y para "medir" (registrar) o valor de V_a .

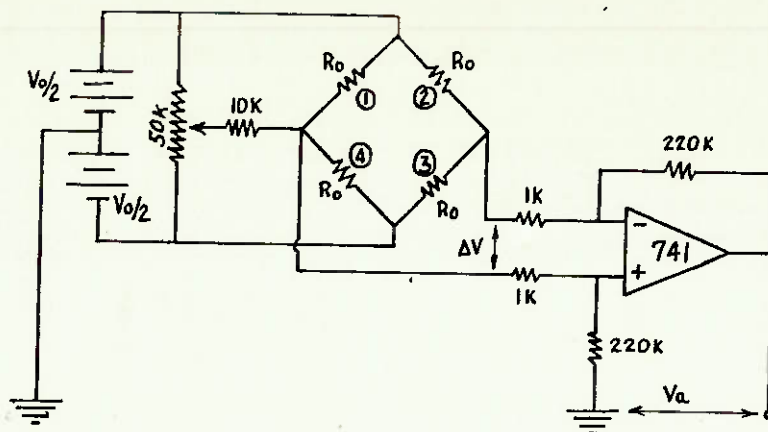


Figura 14: Circuito eletrônico completo.

IV.6: Parte experimental

(Para melhor entendimento, ver também fotografias nos anexos.)

Nas primeiras vezes em que ensaiamos o modelo no túnel de vento, logo notamos uma forte vibração induzida no modelo pelo escoamento do ar ao seu redor.

As oscilações, na direção vertical, tinham uma amplitude de vários centímetros e uma frequência de aproximadamente 3 Hz, o que impossibilitava qualquer tipo de medição.

Tentamos, através da alteração da massa do modelo (acrescentando pesos no interior deste), modificar a frequência natural de ressonância do sistema, pois esta depende da elasticidade e da massa do sistema.

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (IV.10)$$

onde: w_n = frequência natural (rd/s)
 k = coef. de elasticidade das lâminas (N/m)
 m = massa do sistema (kg)

Para uma lâmina engastada conforme figura 8, o coeficiente de elasticidade é dado por:

$$k = \frac{3 E I}{L^3} \quad (IV.11)$$

onde: E = módulo de elasticidade do material
 I = momento de inércia
 L = comprimento da lâmina engastada

Para solucionar o problema da vibração induzida, alteramos o comprimento das lâminas, que passou de 18 cm para 9 cm (comprimento do apoio das rodas até o engastamento). Assim, conseguimos eliminar a vibração completamente, possibilitando a medição das forças verticais nos eixos dianteiro e traseiro do modelo.

O sinal V_a , na saída do amplificador, foi registrado em um traçador X-Y da Hewlett-Packard na coordenada Y, em função do tempo.

No próximo capítulo, encontramos alguns desses registros, com medições de V_a em várias situações diferentes.

- modelo com e sem mini-saia
- dois ângulos de inclinação do aerofólio traseiro diferentes .

Uma outra experiência realizada com o modelo no túnel de vento se refere à verificação de turbulências do escoamento do ar ao redor da carroceria do veículo, colando-se vários fios de algodão ao longo da carroceria.

com o fluxo de ar, estes fios acompanham as linhas de fluxo, indicando a existência ou não de turbulências.

A partir das observações nesse tipo de procedimento, introduzem-se ao modelo as modificações necessárias a fim de reduzir ou eliminar tais turbulências.

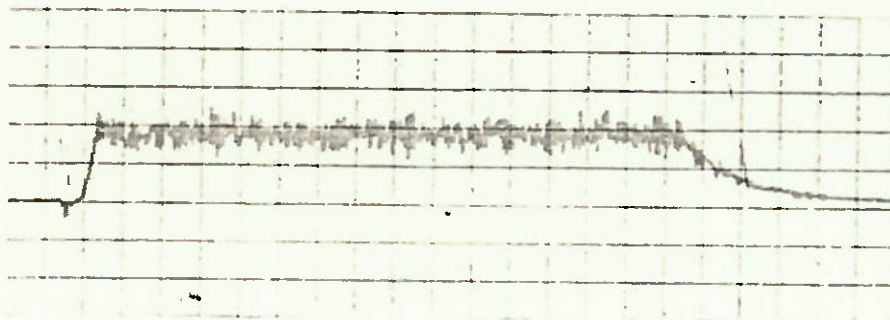
nos anexos, pode-se ver nas fotografias o comportamento do escoamento do ar ao redor do modelo em questão.

CAPÍTULO V : AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS . CONCLUSÕES

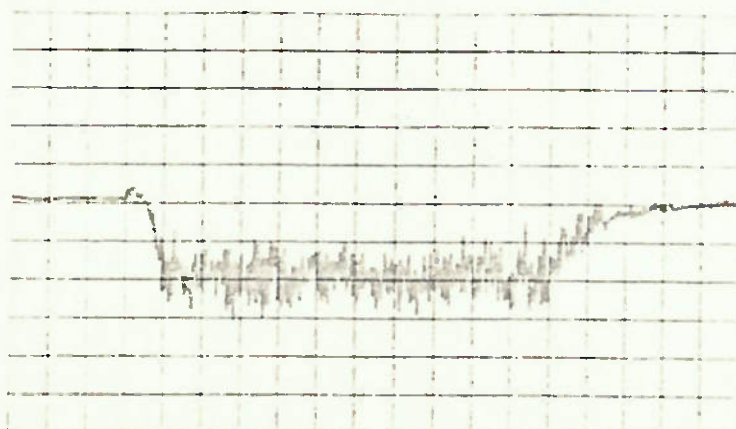
V.1 : Dados obtidos

Abaixo estão alguns dos registros de V_a obtidos no traçador X-Y .

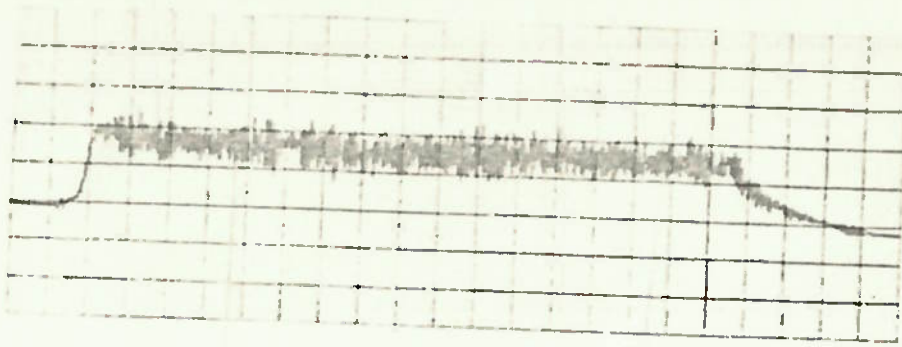
Inicialmente, apresentamos os registros para o modelo sem "mini-saia".



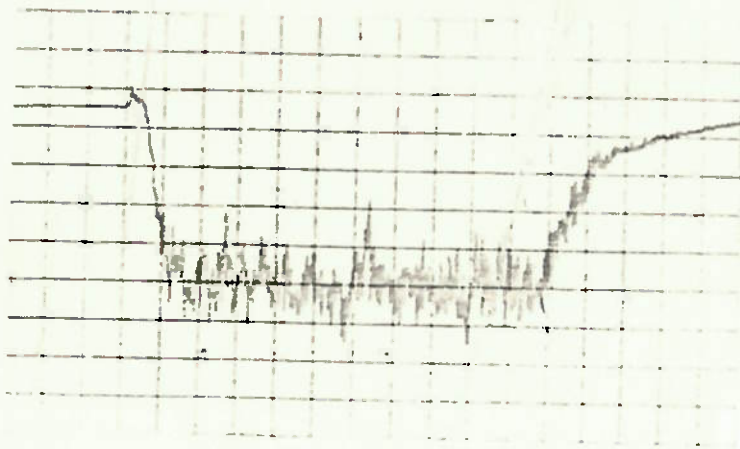
Diant., sem saia, aerofólio: 10° , $V_0 = 5,50V$



Tras., sem saia, aerofólio: 10° , $V_0 = 5,46V$



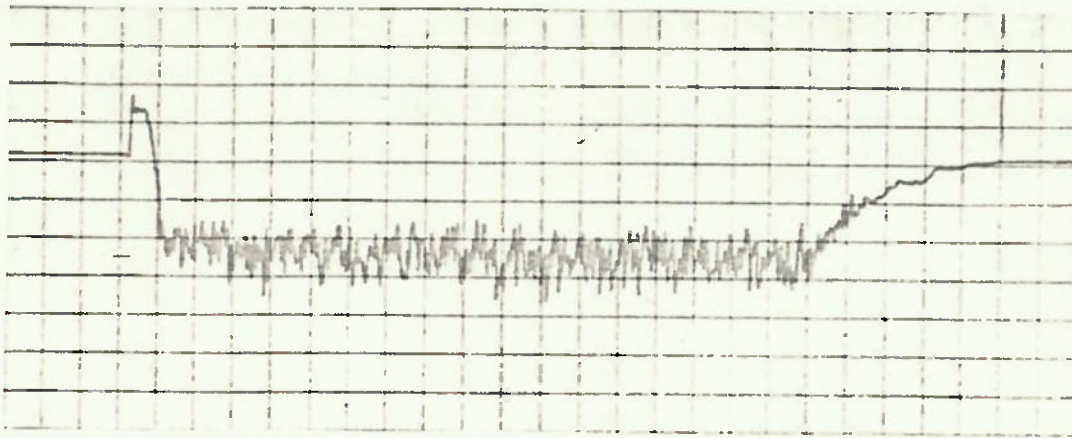
Diant., sem saia, aerofôlio: 45° , $V_0 = 5,50V$



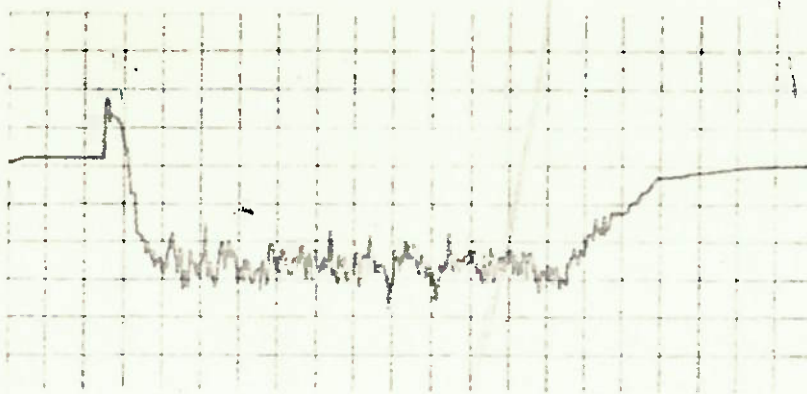
Tras., sem saia, aerofôlio: 45° , $V_0 = 5,46V$

Para a situação do modelo sem a "mini-saia", podemos notar claramente a influência da posição do aerofólio traseiro. A força vertical no eixo traseiro é quase o dobro quando a inclinação do aerofólio passa de 10° para 45° , enquanto que no eixo dianteiro a força decai de aproximadamente 20%, devido ao momento maior causado pelo aerofólio sobre o eixo dianteiro.

Abaixo, os registros de V_a para o modelo com "mini-saia".

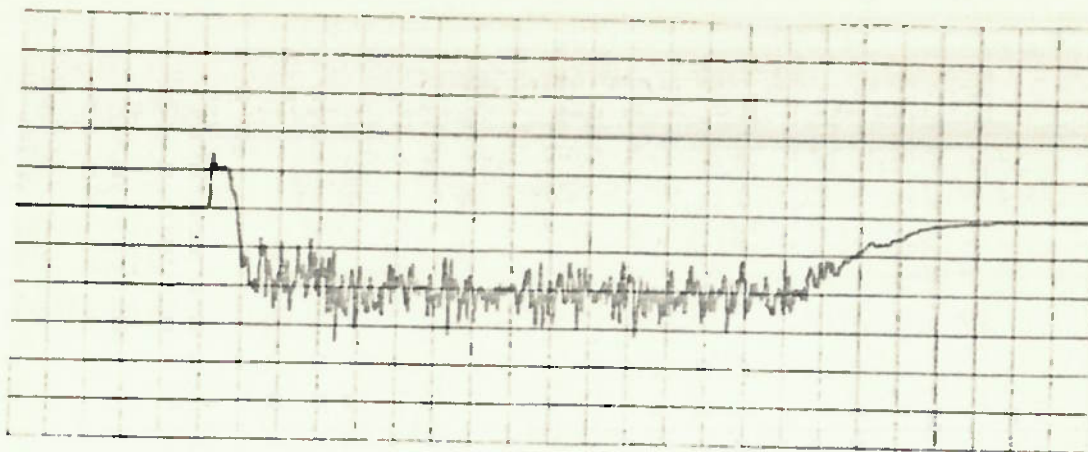


Diant., com saia, aerofólio: 10° , $V_o = 5,77V$

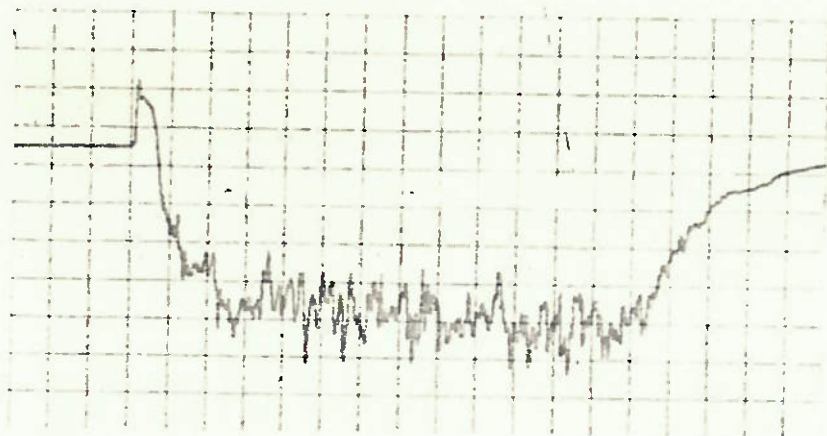


Tras., com saia, aerofólio: 10° , $V_o = 5,59V$

É interessante notar que nesse caso, a força no eixo dianteiro é descendente, enquanto que na situação anterior, sem "mini-saia", a força no eixo dianteiro é ascendente.



Diant., com saia, aerofólio: 45° , $V_0 = 5,59V$



Tras., com saia, aerofólio: 45° , $V_0 = 5,59V$

Também nesse caso, comparando-se as duas situações de diferentes ângulos de inclinação do aerofólio, verificamos um aumento substancial na força descendente no eixo traseiro e uma diminuição de aprox. 40% na força descendente no eixo dianteiro.

V.2 : Conclusões

Em linhas gerais, os resultados obtidos com o arranjo experimental proposto nesse trabalho foram satisfatórios, na medida em que foi possível medir, com razoável precisão, as forças verticais aerodinâmicas atuantes no modelo.

Devemos mais uma vez, porém, ressaltar que os resultados aqui obtidos estão sujeitos a um certo grau de incerteza, já que a velocidade de escoamento do ar no túnel de vento (20 m/s) corresponde a aproximadamente 7 km/h no protótipo real, um valor muito baixo para se poder tirar conclusões quantitativas.

Por outro lado, contudo, as avaliações qualitativas são absolutamente válidas, como, por exemplo, as verificações de turbulências no escoamento.

ANEXOS

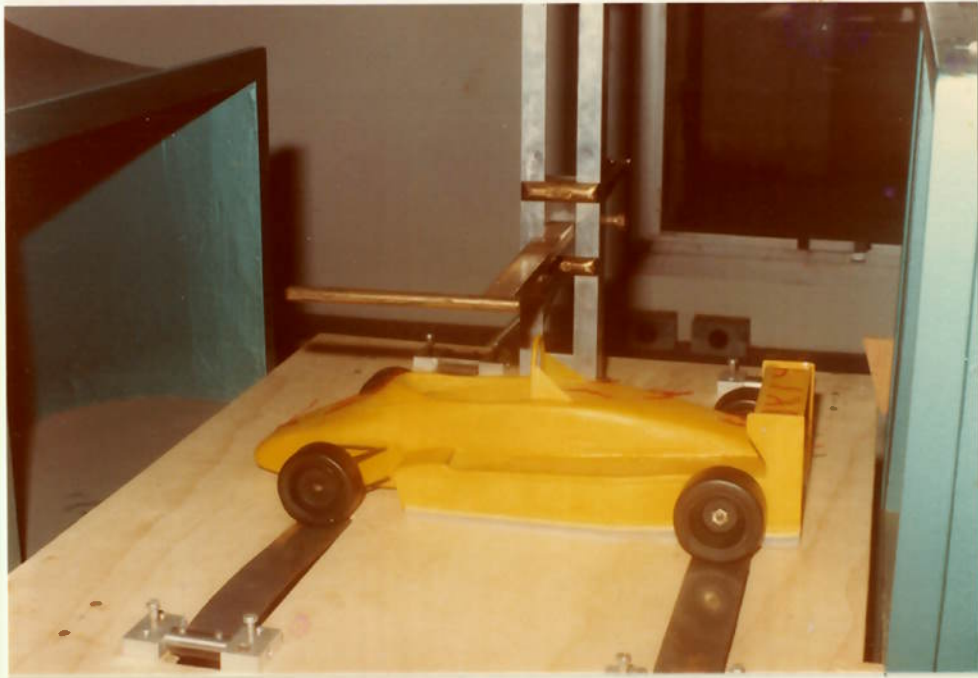


Foto 1: Medição da velocidade de escoamento do ar com Tubo de Pitot.

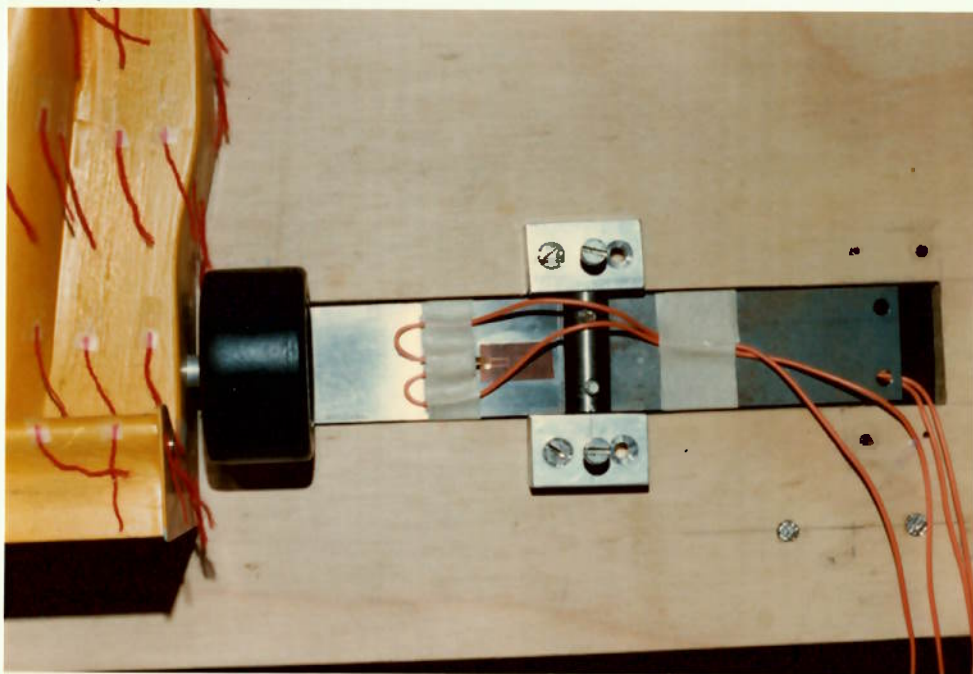


Foto 2: Montagem da lâmina com o "strain-gage" colado.



Foto 3: Experiência para verificação de turbulências. Notar como os fios na parte lateral inferior são "sugados" por baixo do carro, devido à baixa pressão ali existente.

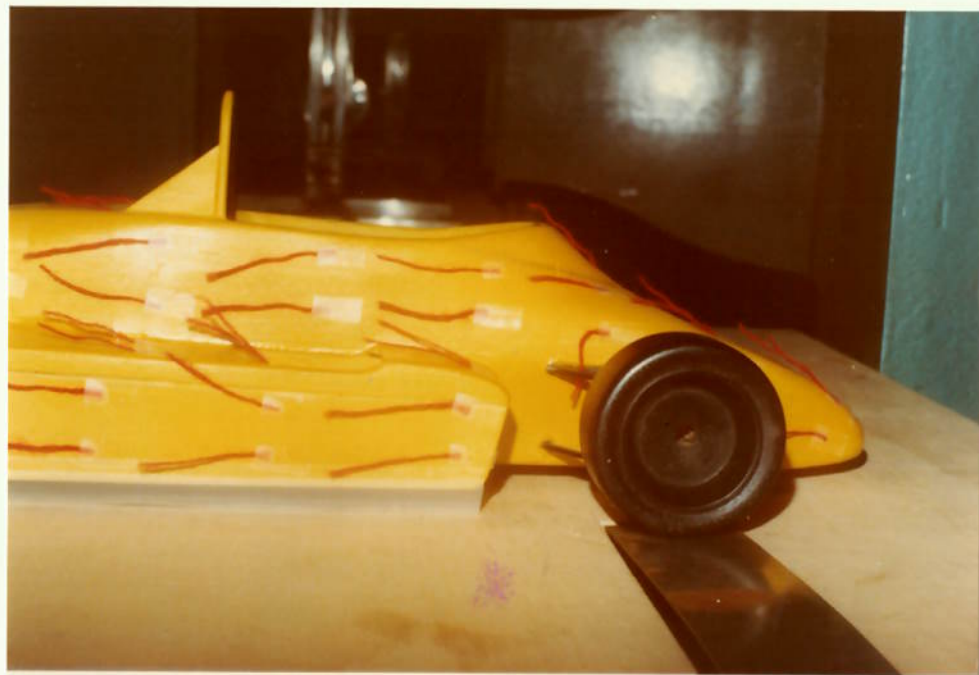


Foto 4: Detalhe da "mini-saia". Ela impede que o ar externo penetre sob o carro anulando o "efeito asa".

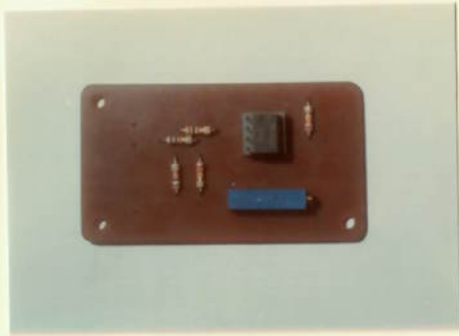


Foto 5: Circuito impresso do amplificador. Lado dos componentes.

Foto 6: Circuito impresso. Lado das ligações.

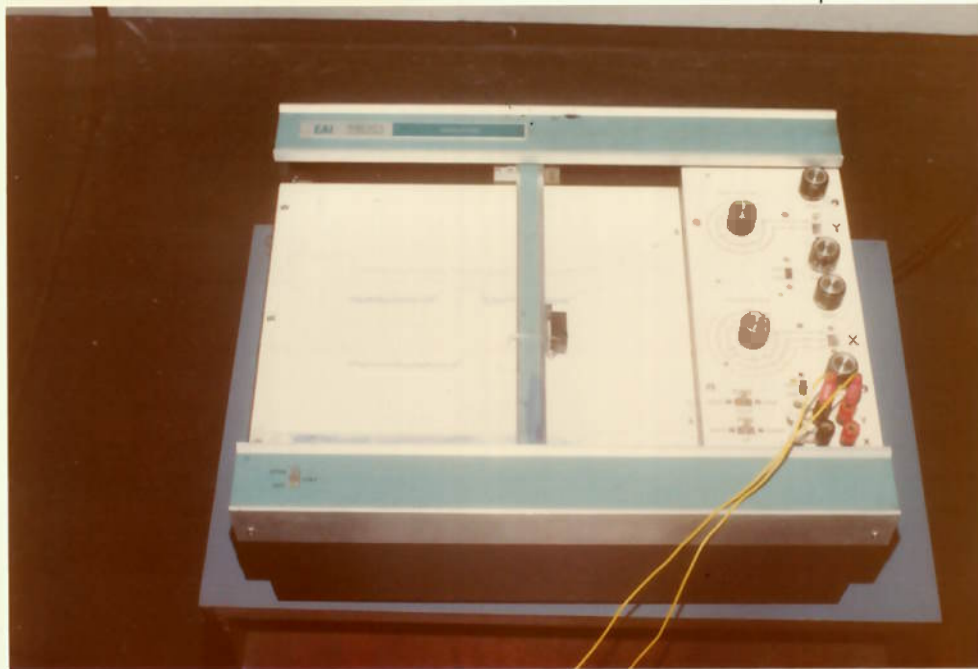
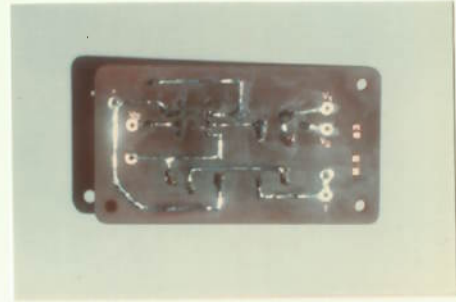
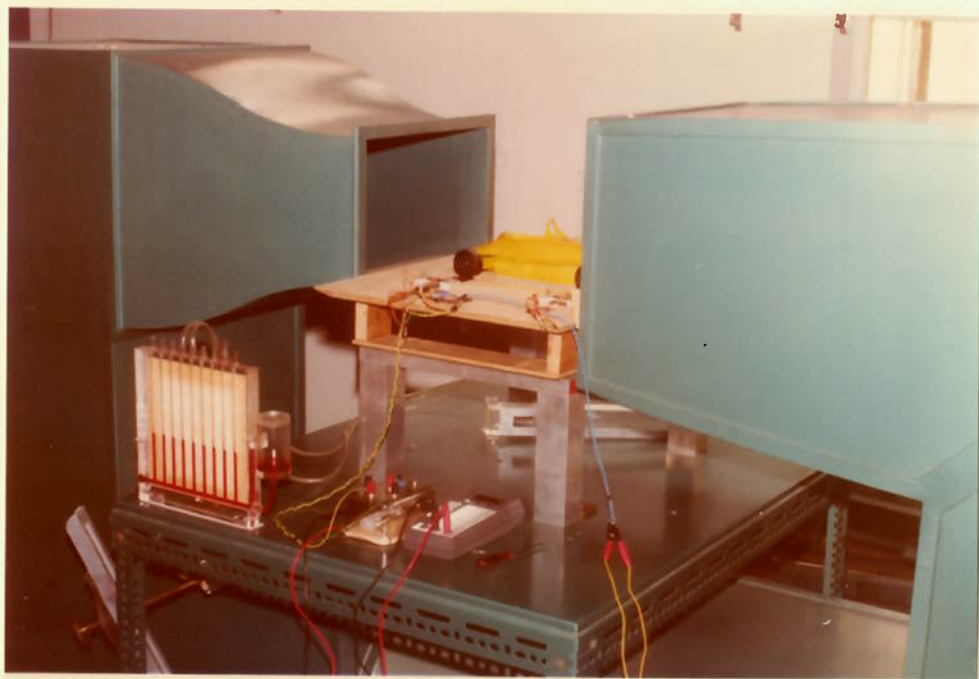
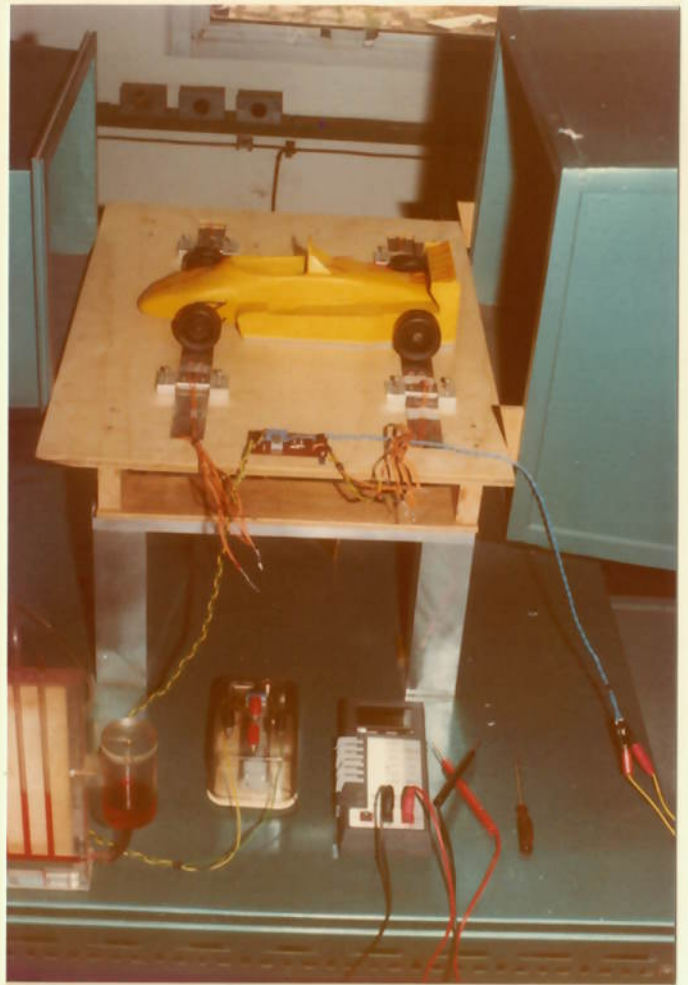
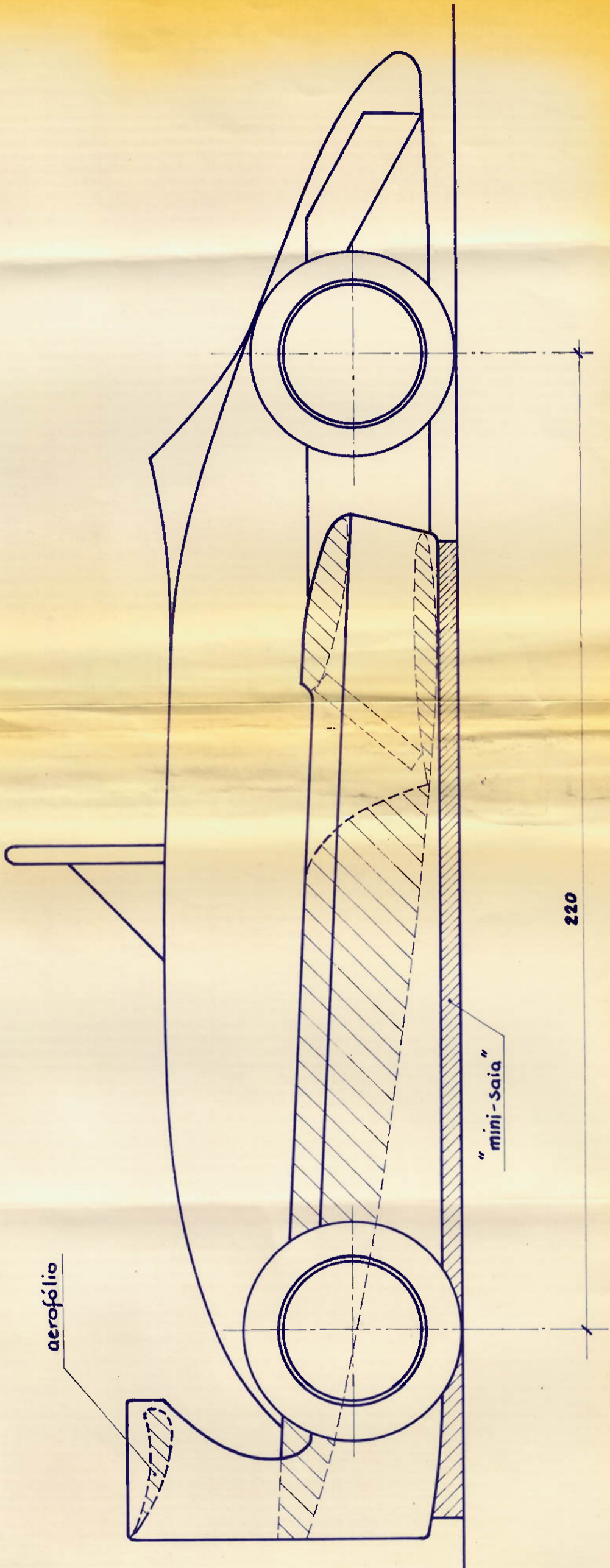


Foto 7: Traçador X-Y para registro do sinal V_a .

Fotos 8 e 9: Aspecto geral da montagem do dispositivo de medição no túnel de vento.





aerofólio

"mini-saia"

220

Proj. Mecânico	Modelo em escala 1:10	
Esc.: 1=1	Mathias Budweg	1983

BIBLIOGRAFIA

- Hucho, Wolf Heinrich : "Aerodynamik des Automobils"
- Revista "Rally Racing" : várias edições
- Apostila : Marcos de Mattos Pimenta : "Escoamento do ar compressível"