

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
RODRIGO ANTONIO SITTA

**ESTUDO E AVALIAÇÃO DO ATRITO TRANSVERSAL NOS
LIMITADORES CILÍNDRICOS DE BALÕES TÊXTEIS**

São Paulo
2004

RODRIGO ANTONIO SITTA

**ESTUDO E AVALIAÇÃO DO ATRITO TRANSVERSAL NOS
LIMITADORES CILÍNDRICOS DE BALÕES TÊXTEIS**

Dissertação apresentada a Universidade
de São Paulo para obtenção do título de
Mestre, sob orientação do Prof. Dr. Raul
Gonzalez Lima

São Paulo
2004

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que torcem pelo meu sucesso profissional e pessoal e que, de alguma forma, forneceram o suporte necessário para que eu pudesse concluir esta etapa, em especial a minha mulher e meu filho pela compreensão e apoio, meus pais Donglei pelo incentivo e Maria Teresa pela saudade, minha segunda mãe Gilda e todos meus irmãos e amigos.

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que tornaram possível a conclusão de mais esta etapa de minha formação profissional, em especial aos senhores Ildeu Gomes Costa e engenheiro Gabriel Francês de Matos da Karibê Ind. & Com. Ltda, ao meu orientador Prof. Dr. Raul Gonzalez Lima, ao Professor Ryzard Majewski, ao Prof. Dr. Carlos C. C. Tu e ao Prof. Dr. João P.P. Marcicano.

ABSTRACT

A new device was developed allowing the measurement of the tangential friction coefficient between yarn and the balloon limiter of a "two-for-one" twisting frame. In this apparatus, the normal force can be varied independently of the tangential speed of the yarn. This allows that the aerodynamic drag coefficient of the yarn sliding on the balloon limiter surface to be separated from the Coulomb friction coefficient. Experimental results of the transversal friction coefficient are shown.

KEYWORDS: twisting frame, textile, transversal friction.

Resumo

Um novo dispositivo foi desenvolvido permitindo a medição do coeficiente de atrito tangencial entre um fio e o limitador de balão de retorcedoras "dois por um". Este aparelho possibilita a variação da velocidade tangencial do fio independentemente da força normal. Isto permite que o arrasto aerodinâmico sobre o fio seja avaliado e discriminado do coeficiente de atrito de Coulomb. Estimativas experimentais para o coeficiente de atrito transversal de Coulomb são apresentadas.

PALAVRAS-CHAVE: retorcedora, têxtil, atrito transversal, efeito aerodinâmico.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Processo de Retorção – Retorcedeira de Dupla-Torção	13
1.2 Limitações do Processo	19
1.3 Importância do Estudo do Atrito	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3. OBJETIVO	28
4. MODELO DINÂMICO	29
4.1 Bases Teóricas do Método	29
4.2 Escolha dos Adimensionais	37
5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	38
5.1 Procedimento de Medição	42
6. RESULTADOS	44
6.1 Dados Experimentais	45
6.2 Resultados Estimados	48
7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53
8. COMENTÁRIOS FINAIS	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXOS	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1a: Diagrama de blocos da retorcedeira.	13
Figura 1b: Método de torção concêntrico.	14
Figura 1c: Método de torção rotativo.	14
Figura 2a: Anel para controle do balão.	15
Figura 2b: Cilindro para controle do balão.	15
Figuras 3a, 3b e 3c: Esquema da torção na retorcedeira dois por um.	16
Figura 4: Esquema de um fuso de retorcedeira dois por um.	17
Figura 5: Esquema do fuso da retorcedeira moderna (dois por um).	18
Figura 6: Esquema do enrolamento da retorcedeira moderna (dois por um).	18
Figura 7: Detalhe da panela protetora do fio e panela antibalão.	20
Figura 8: Detalhe do fuso sem panela antibalão.	21
Figura 9: Detalhe anel limitador de balão.	21
Figura 10: Direção Longitudinal e transversal.	25
Figura 11: Direções positivas x, y e z.	29
Figura 12a – Forma do balão do fio para diferentes valores de μ_t . em gráfico polar.	35
Figura 12b – Forma do balão do fio para diferentes valores de μ_t . em gráfico radial.	35
Figura 13: Diagrama de blocos do programa corda.	36
Figura 14a – Dispositivo construído em esquema.	38
Figura 14b – Dispositivo construído em fotografia.	38

Figura 15: Foto do topo do balão de fiação	39
Figura 16: Esquema do corte do fio junto à parede do limitador de balão.	40
Figura 17: Detalhe do sistema que suporta o limitador de balão e seu motor de acionamento.	41
Figura 18: Detalhe do aparelho completo.	42
Figura 19: Detalhe da montagem do espelho em ângulo de 45°	43
Figura 20: Cálculo do ângulo final do fio 100% PAC.	44
Figura 21: Cálculo do ângulo final do fio 50% PAC/CO.	45
Figura 22: Gráfico comparativo Coeficiente de atrito transversal X Velocidade fio 100% PAC	50
Figura 23: Gráfico comparativo Coeficiente de atrito transversal X Velocidade fio 50% PAC/CO.	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Valores medidos nas condições de ensaio para o fio 100% PAC.	45
Tabela 2: Valores medidos nas condições de ensaio para o fio 50% PAC/CO.	46
Tabela 3: Valores do coeficiente de atrito longitudinal.	47
Tabela 4: Valores adimensionais das condições de ensaio para o fio 100% PAC.	48
Tabela 5: Coeficiente de atrito tangencial calculado fio 100% PAC.	49
Tabela 6: Valores adimensionais das condições de ensaio para o fio 50% PAC/CO.	50
Tabela 7: Coeficiente de atrito tangencial calculado fio 50% PAC/CO.	51
Tabela 8: Propagação de erro de medida.	54

Lista de Símbolos

a : ângulo inicial do fio;

C_d : coeficiente de arraste aerodinâmico;

D : diâmetro do fio;

g : aceleração da gravidade;

m : massa por unidade de comprimento;

N : força normal;

P : somatória das componentes radiais das forças externas;

p_o : adimensional referente ao arrasto aerodinâmico;

Q : somatória das componentes transversais das forças externas;

Re : numero de Reynolds;

R_f ; raio final do balão;

r_f : raio final do balão adimensionalizado;

r : coordenada r do ponto;

R_o : raio do limitador;

t : tempo;

t_0 : Tensão inicial do fio adimensionalizada;

T : força de tração no fio;

T_o : força de tração na extremidade inicial do fio;

T_i : força de tração na extremidade inicial do fio mantida constante;

T_r : componente r de T ;

T_θ : componente θ de T ;

T_x : componente x de T ;

T_y : componente y de T ;

T_z : componente z de T ;

V_p : Velocidade na parede do limitador de balão;

X : força por unidade de comprimento na direção x ;

x : coordenada x do ponto;

Y : força por unidade de comprimento na direção y ;

y : coordenada y do ponto;

Z : força por unidade de comprimento na direção z ;

z : coordenada z do ponto;

z_1 : coordenada z do ponto onde o fio começa a tocar o limitador;

z_2 : coordenada z do ponto onde o fio deixa de tocar o limitador;

Z_f : altura final do balão;

z_f : altura final do balão adimensionalizada

α : aceleração;

μ : coeficiente de atrito;

μ_t : coeficiente de atrito transversal;

μ_l : coeficiente de atrito longitudinal;

ν : viscosidade dinâmica;

θ_f : ângulo final do fio;

ρ : densidade específica do ar.

τ : período;

ω : velocidade angular;

ω_0 : velocidade inicial angular;

θ_f : ângulo final do fio;

1. INTRODUÇÃO

Na indústria têxtil, com o objetivo de melhorar determinadas características dos fios produzidos como a sua resistência e sua regularidade, os fios são unidos em dois ou mais cabos através do processo chamado retorcção. Os fios retorcidos apresentam-se mais regulares, pois as irregularidades eventuais são diluídas, já que dificilmente coincidem no mesmo trecho de fio. Por este motivo, e também pelo fato de a retorcção prender ainda mais as fibras dos cabos que formam o fio, estes fios são mais resistentes que os fios singelos.

1.1 Processo de Retorcção – Retorcedeira Dupla-Torcção.

O processo de retorcção é executado em um equipamento chamado retorcedeira e consiste nas seguintes operações representadas pelo diagrama de blocos abaixo (figura 1a):

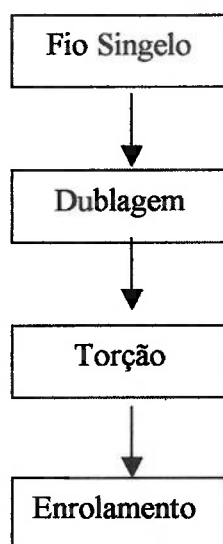


Figura 1a: Diagrama de blocos da retorcedeira

Existem dois métodos conhecidos pelo homem para torcer os fios: o concêntrico e o rotativo (figuras 1b e 1c). Em ambos os métodos, a cada volta do dispositivo, uma volta é introduzida no fio. No concêntrico, a aceleração centrípeta

do fio é menor do que no rotativo. Esta aceleração é a principal causa da tensão no fio durante o processamento. Apesar de trabalhar com tensões maiores, o método rotativo é empregado na maioria das máquinas modernas de alta velocidade por permitir formas construtivas mais adequadas. Neste método, devido à rotação, o fio assume visualmente um formato característico parecido com um balão. A estabilidade deste balão depende do ajuste da rotação e tensão no fio. Mantendo-se a tensão e aumentando-se a rotação, o balão aumenta de tamanho e pode colapsar, o mesmo ocorre mantendo-se a rotação e diminuindo-se a tensão. Para conter o diâmetro e para aumentar a estabilidade do balão, costuma-se utilizar limitadores na forma de anéis ou cilindros (figuras 2a e 2b).

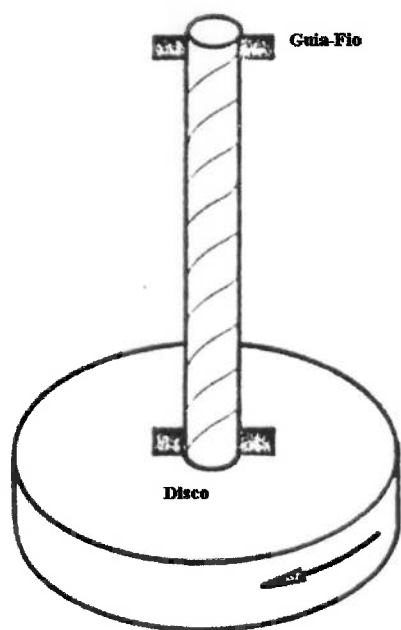


Figura 1b: Método de torção concêntrica

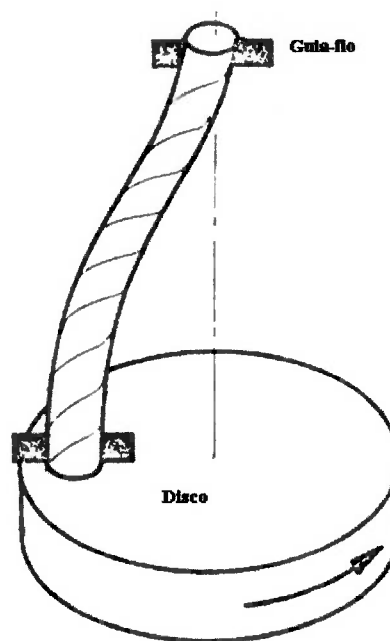


Figura 1c: Método de torção rotativo

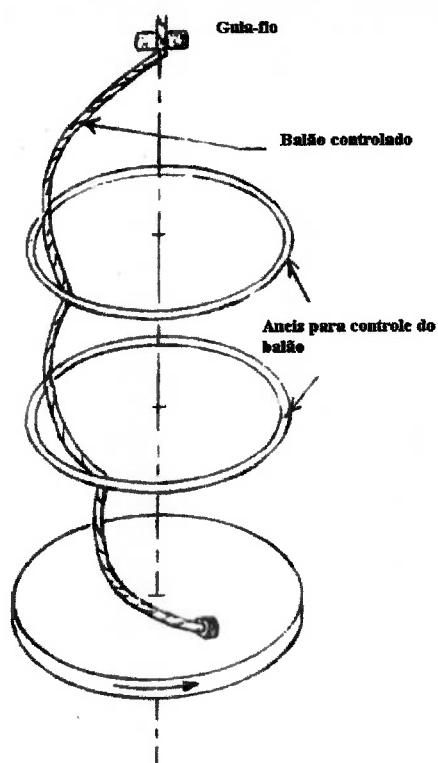


Figura 2a: Anel para controle do balão

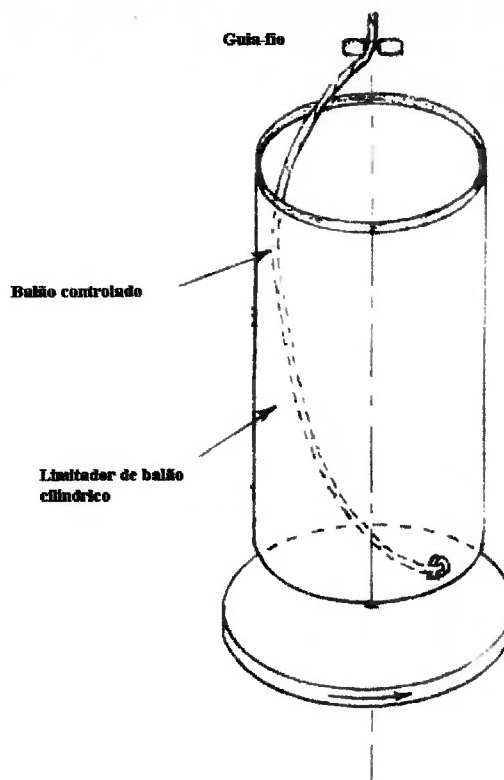
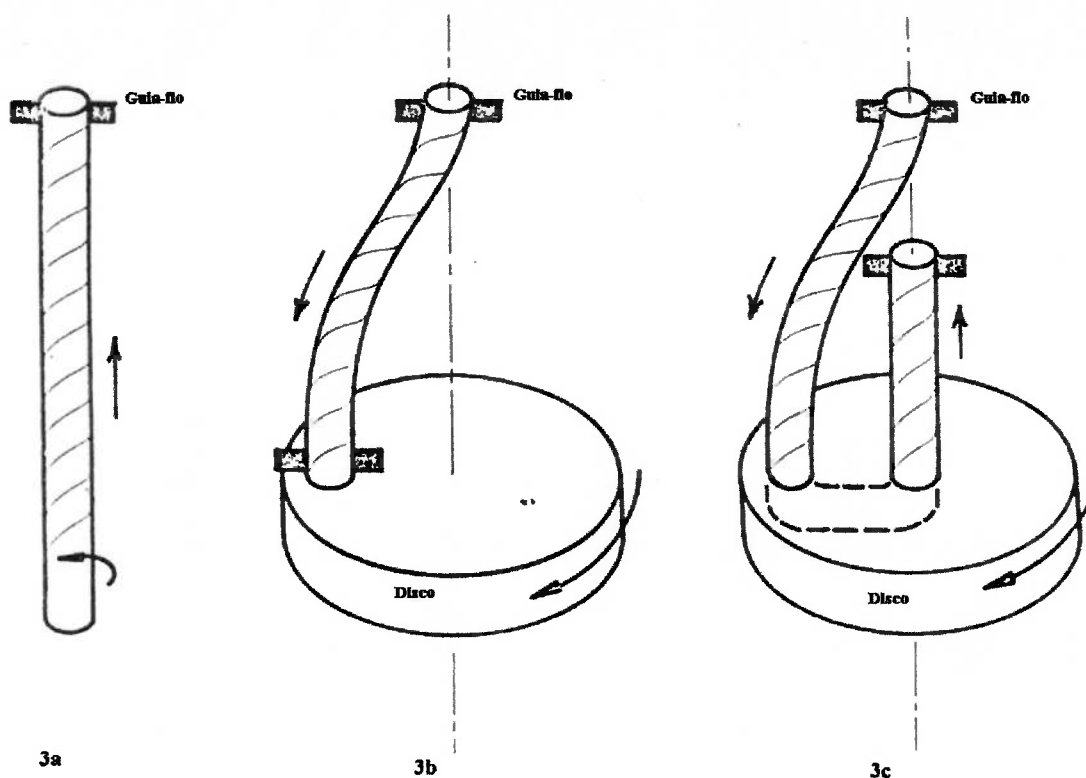


Figura 2b: Cilindro para controle do balão

No processo de retorcerdeiras “dois por um”, os métodos de torção concêntrico e rotativo são combinados para inserir duas voltas no fio para cada volta do disco (figura 3a, 3b e 3c). Como o mecanismo para bobinar o fio já retorcido é complexo, não existe ainda hoje, retorcerdeiras de fiação que consigam ter uma bobina dentro do balão. Quase todas as retorcerdeiras só alimentam os fuso pelo interior do balão. Neste caso, a bobina fica acima do fuso, como é mostrado na figura 6.



Figuras 3a, 3b e 3c: Nas retorcedeiras dupla-torção o fio é primeiramente torcido usando-se o método rotativo (3b), depois é girado a 180° e torcido usando-se o método concêntrico (3a). Duas torções reais são inseridas em apenas uma única volta do disco.

As figuras 4 e 5 abaixo apresentam o esquema de um fuso moderno de retorcedeira tipo "dupla-torção". A panela protetora de bobinas serve para o armazenamento do fio não retorcido. Esta panela protetora é mantida estacionária, sem rotação, mediante um sistema magnético. Em retorcedeiras modernas, o limitador cilíndrico é mais usado na prática.

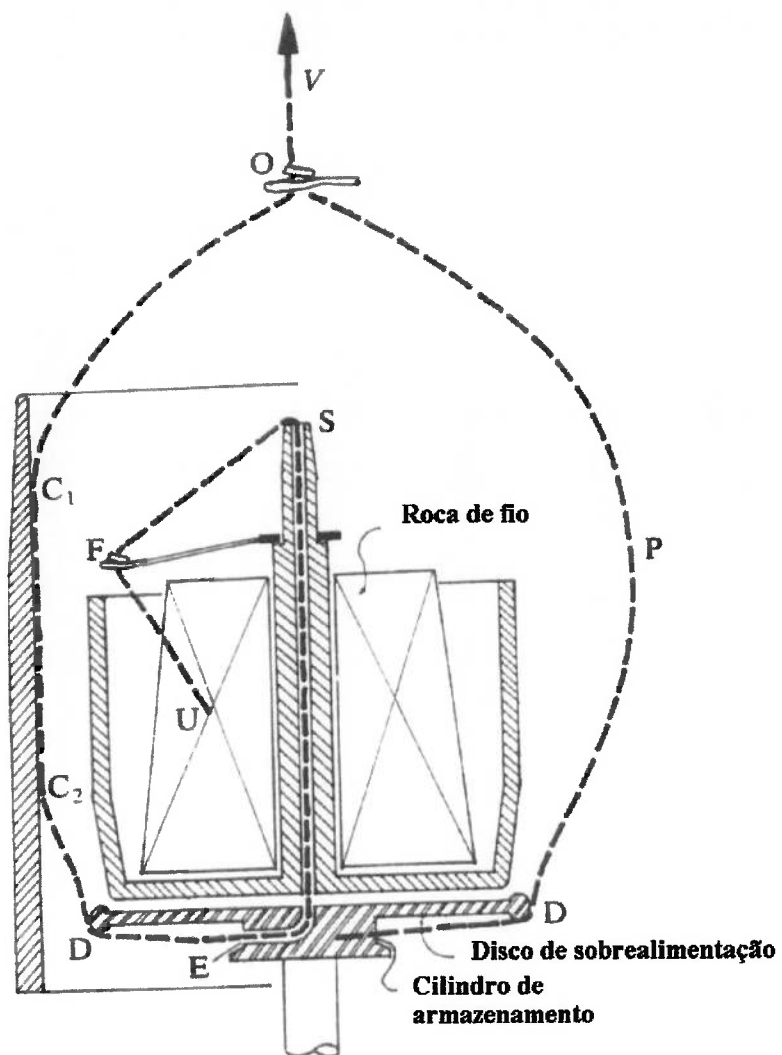


Figura 4: Esquema de um fuso de retorcedeira dois por um

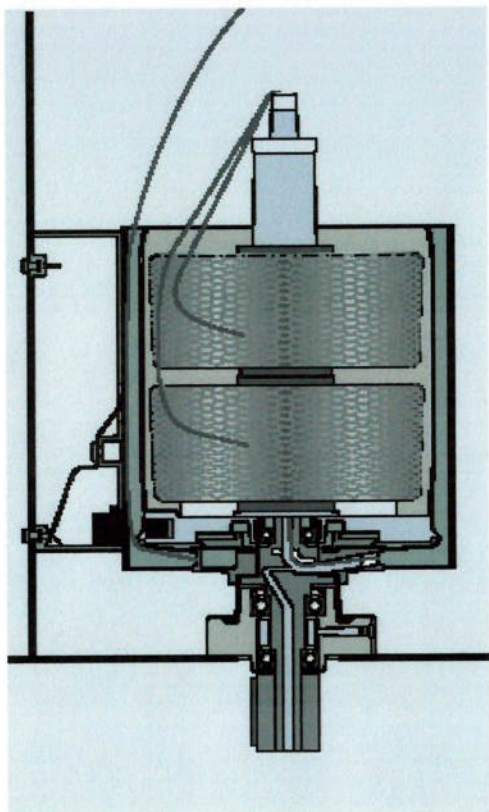


Figura 5: Esquema do fuso da retorceadeira moderna (dois por um)

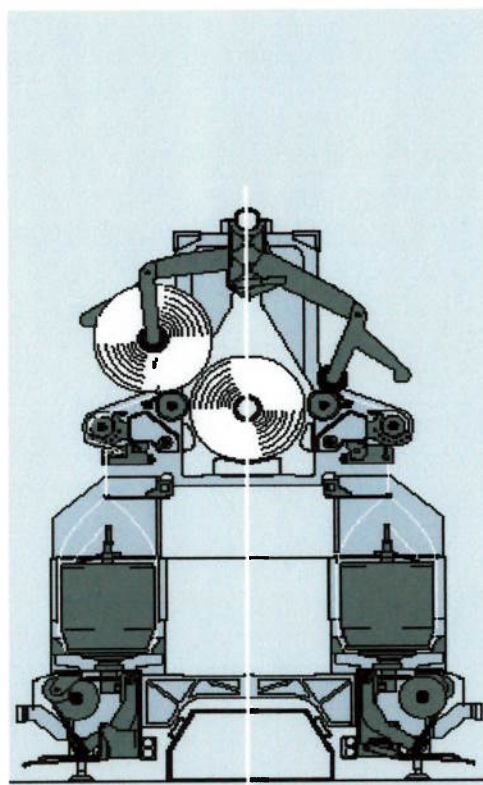


Figura 6: Esquema do enrolamento da retorceadeira moderna (dois por um)

1.2 Limitações do Processo

Um dos parâmetros limitadores de produção no processo de retorção é o atrito gerado entre o fio e o limitador do balão, quando este existir, como é mostrado nas figuras 7 e 8. Este atrito provoca a limitação da velocidade de entrega do fio e do número de rotações (RPM) do fuso, fatores que influenciam diretamente na produtividade do equipamento por alterar algumas características físicas das fibras que compõem os fios.

Um dos parâmetros físicos do fio mais afetados pelo atrito é a chamada pilosidade (pilling) que é a formação de pêlos na superfície do fio devido à estimulação física do material como por fricção, onde número de pontas livres é incrementado. Este fator influi diretamente no aspecto dos tecidos que serão produzidos, alterando parâmetros como brilho, toque e resistência ao atrito. Hoje já existem alguns tratamentos anti-pilling, entretanto tratando-se de fibras sintéticas a tenacidade, elasticidade e resistência à abrasão não permitem a retirada da pilosidade.

A redução do atrito gerado entre o fio e o limitador do balão nas retorcedeiras tem sido objeto de estudo, principalmente por parte de muitos fabricantes de máquinas que buscam aumentar a produtividade dos equipamentos.

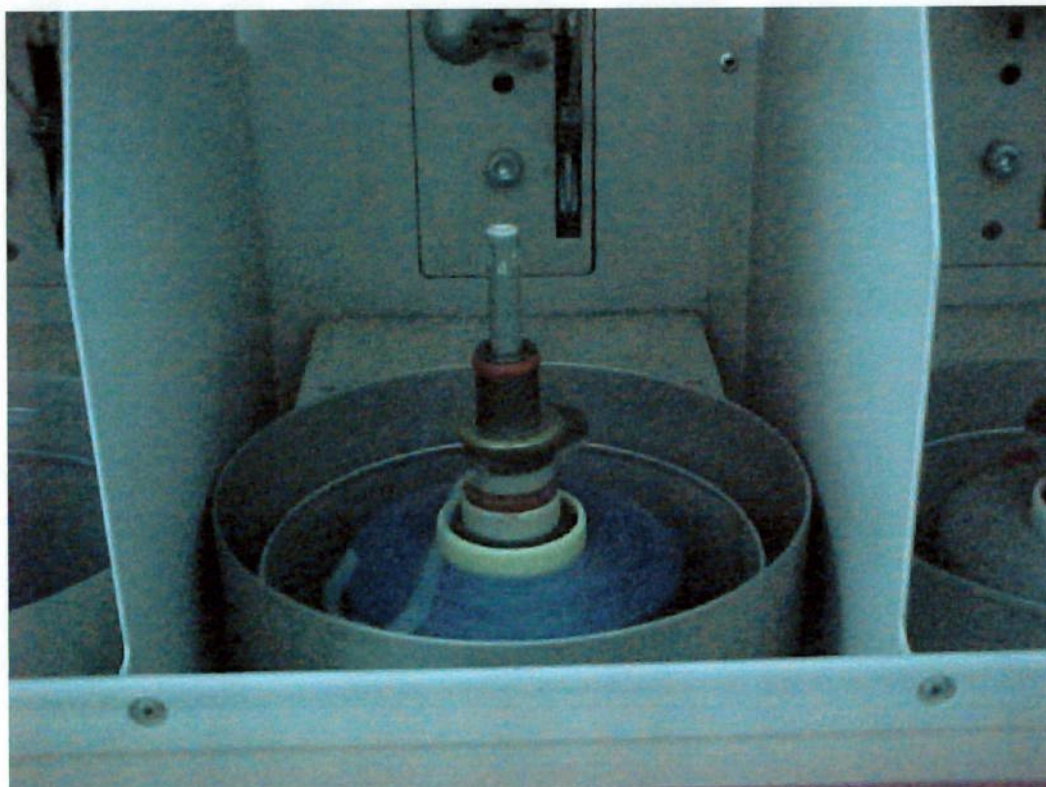


Figura 7: Detalhe da panela protetora do fio e panela antibalão

A retirada do limitador de balão (figura 8) pode ser uma solução. Entretanto, ela aumenta consideravelmente o tamanho do equipamento, visto que é necessário um espaço maior entre fusos de 200 mm quando existe o limitador contra 300 mm quando não existe (mediadas baseadas em painéis protetoras de fio de 5 polegadas de diâmetro). Neste espaço vazio, o balão formado pelo fio gira livremente sem tocar as paredes. As máquinas produzidas sem o limitador de diâmetro do balão permitem chegarmos a uma velocidade superior pois o atrito é reduzido devido a um elemento a menos para contato. Isto faz com que a máquina seja 75% maior em comprimento que uma máquina "standard". Muitas vezes não é possível adaptar o layout da empresa a esta necessidade de espaço, além do operador deslocar-se muito mais durante o turno de trabalho limitando o tempo de atendimento.

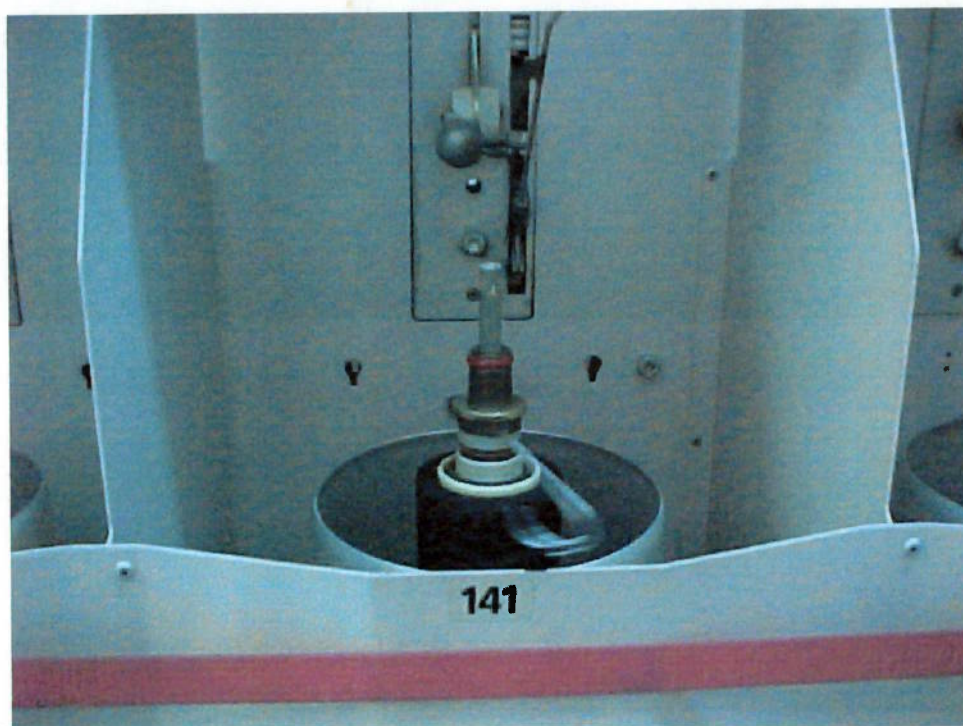


Figura 8: Detalhe do fuso sem panela antibalão

Outra questão, é que mesmo assim é necessária a colocação de um anel para limitar o formato do balão (figura 9). Como este anel é fixo, mesmo que em menor escala ainda existe atrito do fio.



Figura 9: Detalhe anel limitador de balão

Nos limitadores de balão diversas medidas foram testadas tentando reduzir o atrito do fio com o metal, entre elas a aplicação de películas como teflon e óxido de alumínio. Entretanto estas películas devido ao atrito possuem uma certa vida útil, desgastando-se e perdendo sua função.

O problema se torna ainda maior quando trabalhamos com fibras de poliéster ou acrílico, que possuem a propriedade de se fundir com o calor gerado pelo atrito. A ação corretiva adotada hoje é a aplicação de lubrificantes (encimagem) e redução de 10% da velocidade de trabalho quando comparado a velocidades trabalhadas em fibras naturais (algodão e lã, por exemplo). Isto significa perda direta de produção.

A aplicação de óleos lubrificantes sobre o material também é bastante empregada. Entretanto, para fios que serão tintos após o processo de retorcção, este procedimento gera um custo extra, pois torna necessário um banho para retirada dos óleos lubrificantes, visto que na maior parte dos casos não existe afinidade do óleo com o corante e a fibra têxtil, gerando manchas nos processos de tingimento devido à dificuldade de igualização do corante.

Um segundo fator é que o número de rupturas dos fios durante o processo de produção aumenta significativamente com o aumento da velocidade da máquina, devido ao atrito. Este aumento pode limitar a velocidade de produção pois cada ruptura do fio é um defeito que deve ser retirado em um processo posterior de enrolamento e substituído por uma emenda tipo "splicer", caso contrário o nó fica visível no tecido produzido.

Um terceiro fator limitador de velocidade é que devido ao atrito do fio com limitador de balão, a estrutura física das fibras sintéticas sofre pequenas alterações. Estas alterações provocam diferenças na afinidade tintorial da fibra fazendo com que

os tecidos tingidos em peça (após o processo de retorção) possam apresentar barramentos e manchas.

Os parâmetros de trabalho atuais apontam que para que em fios compostos de lã ou da mistura de poliéster e lã, a rotação não pode ser superior a 7000 RPM. Levando-se em conta que as máquinas atuais podem chegar facilmente a 12000 RPM, vemos que a perda de produção pode chegar a 50% da capacidade instalada.

1.3 Importância do Estudo do Atrito.

O primeiro passo para desenvolver um sistema mais versátil e eficiente de retorção seria eliminar os atritos existentes, principalmente entre o limitador de balão e o fio. Entretanto muito pouco se sabe até hoje sobre o comportamento do atrito em relação ao deslizamento transversal do fio.

Atualmente o comportamento do atrito dentro do limitador de balão, a influência da força normal presente e sua variação de acordo com a velocidade de rotação do fuso não foram estudados, visto a grande dificuldade que é projetar um sistema para medir o coeficiente de atrito transversal. Portanto, fica difícil de pressupor qual seria a melhor maneira de diminuí-lo. Sendo assim, seria fundamental entender o comportamento das variáveis que compõem esta força de atrito.

O atrito na indústria têxtil para estes casos tem sido simplificado sob a forma de:

$$T = \mu_t \times N$$

onde, μ_t é o coeficiente de atrito transversal e N é a força normal.

É certo que a redução do atrito irá permitir que o equipamento trabalhe com rotações de fuso e conseqüentemente velocidades de enrolamento superiores.

Aumentar a velocidade de trabalho representa aumento de produção, possibilidade de trabalhar com um menor número de retorceiras (menor investimento) e redução de mão de obra aplicada pois, existe uma redução no número de máquinas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existem muito poucos estudos sobre o comportamento do atrito do fio em relação às partes metálicas do equipamento. Os que existem são dedicados ao estudo do coeficiente de atrito longitudinal devido a sua maior facilidade de avaliação experimental. Para uma definição do atrito longitudinal e transversal, ver figura 10.

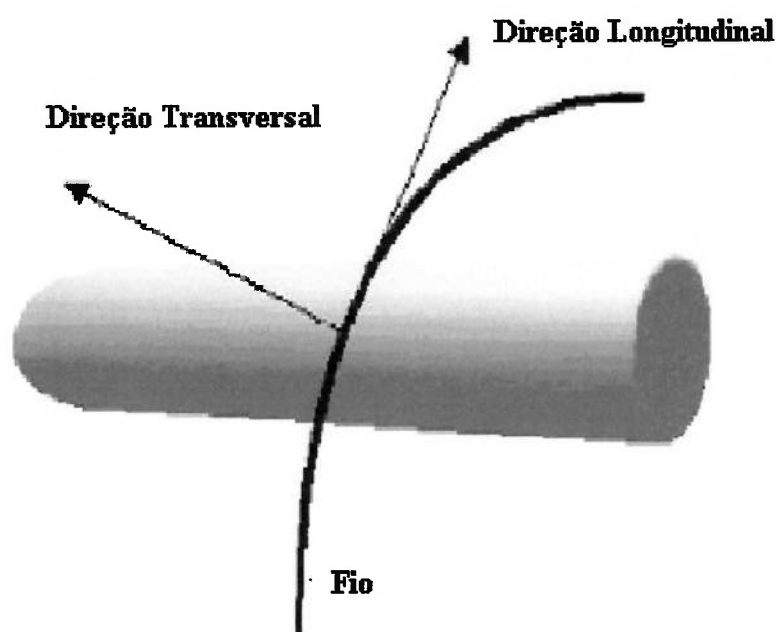


Figura 10: Direção Longitudinal e Transversal

Em 1972, H. Linz (1972) desenvolveu um modelo para o coeficiente de atrito levando em conta parâmetros como velocidade, tensão preliminar, ângulo de cruzamento, temperatura, umidade relativa e macro-geometria dos elementos de atrito. Até este momento o coeficiente de atrito entre o fio e os guias tinha um valor específico para qualquer combinação de materiais. Com o uso do novo modelo as

conseqüências das mudanças de um ou mais parâmetros passaram a ser estimadas antecipadamente.

Ainda em 1972, P. M. Latzke estudou os erros de medição nos medidores eletrônicos de tensão dos fios. Seu trabalho sugere que nas cabeças de medição, todos os órgãos guias sejam substituídos por elementos rolantes, o que tornaria os erros de medição desprezíveis.

O aumento das velocidades de fiação também provoca o aquecimento do fio a altas temperaturas devido ao contato com guias e placa aquecidas pelo atrito. M. J. Schick (1980) descreve em seu trabalho estudos feitos sobre a interface fibra-metal em uma larga faixa de temperatura de 30°C a 220°C com um pino de cromo aquecido, tentando simular as condições existentes na planta de produção. São descritos os efeitos da rugosidade da superfície dos guias, pré-tensão, diâmetro do guia e comportamento dos lubrificantes antiaquecimento na dependência da temperatura por atrito. Entretanto o estudo foi baseado em fios multi-filamento sintéticos não sendo consideradas os supostos diferentes efeitos dos fios por fibras naturais.

W. W. Hanser e D. Tabor (1985) investigaram a importância dos fatores hidrodinâmicos no comportamento do atrito longitudinal de fios deslizando sobre superfícies cilíndricas. Através do método clássico de "capstan", largamente usado, que consiste em passar fibras ou fios sobre uma superfície cilíndrica e medir a tensão inicial T_0 e a tensão final T . Utilizando fibras e fios cobertos com uma camada de óleos lubrificantes de viscosidade conhecida tentou provar que o atrito depende exclusivamente do produto VZ (velocidade e viscosidade).

Somente em 2003 surgiu o primeiro estudo sobre o coeficiente de atrito transversal dos fios nos processos de retorção. J. P. P. Marcicano, C. Tu e H. G.

Rylander (2003), através de fotos tiradas do topo de um balão do fio cilíndricamente restringido, mediram o ângulo final do fio. Este ângulo foi teoricamente correlacionado a outros parâmetros de fácil medição e ao cobiçado coeficiente de atrito transversal. Porém, neste estudo, só o método foi desenvolvido; falta agora fazer as medições do atrito para poder compreender os mecanismos e os parâmetros que controlam este atrito. Outra limitação do aparelho usado é de que a força normal não pode ser variada independentemente da velocidade de deslizamento do fio na parede do limitador. Isto limita o estudo do componente aerodinâmico do atrito final.

O modelo adotado de nenhum modo estudou a natureza do coeficiente de atrito transversal μ_t e deixou algumas dúvidas a serem respondidas. O μ_t varia com o aumento da velocidade de rotação e por conseqüência da força centrífuga? O μ_t é uma função do arraste aerodinâmico perto da parede sólida do limitador de balão? Como o μ_t varia com os diferentes materiais ou rugosidade do limitador?

Para poder responder as perguntas do parágrafo anterior, é preciso, porém, modificar o aparelho usado por Marcicano, et al. (2001) permitindo que a força normal seja modificada independentemente da velocidade tangencial.

3. OBJETIVO.

Portanto, o objetivo desta dissertação é estudar o comportamento do atrito transversal através de modificação do dispositivo criado por Marcicano (2000). Impondo-se a rotação do cilindro limitador de balão externo, pretende-se avaliar através de fotografias tiradas do fio qual a influência da velocidade do cilindro limitador no arrasto aerodinâmico e no comportamento do coeficiente de atrito transversal.

4. MODELO DINÂMICO

O método mais simples para deduzir as equações do balão é usar um sistema rotativo em coordenadas cilíndricas. A velocidade de rotação do sistema de coordenadas, na direção do eixo z , é feita para coincidir com ω_0 , a velocidade do fuso e do disco. Desta maneira, o balão permanecerá estacionário para um observador rodando com o sistema de coordenadas cilíndricas.

4.1 Bases Teóricas do Método

A equação em coordenadas cartesianas de equilíbrio de um fio num campo estático pode ser deduzido de acordo com o esquemático mostrado na figura 11.

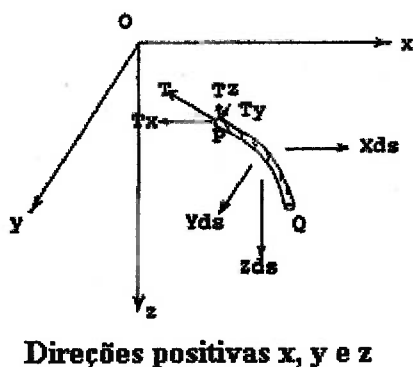


Figura 11: Forças em um pedaço de fio ds e ponto P.

Sejam T_x, T_y e T_z os componentes da tensão resultante, T , no ponto P. Como o fio pode ser admitido como infinitamente flexível, a resultante tem a direção do fio, essas componentes estão relacionados com T pelos co-senos diretores

$\cos\alpha_x = \frac{dx}{ds}, \cos\alpha_y = \frac{dy}{ds}, \cos\alpha_z = \frac{dz}{ds}$. Para um segmento pequeno com

cumprimento, Δs , usando a expansão de Taylor e desprezando os termos superiores, o componente na direção x da tensão no ponto Q será:

$$T_x + \frac{dT_x}{ds} \Delta s \quad (1)$$

Somando as forças na direção x , resulta:

$$T_x + \frac{dT_x}{ds} \Delta s - T_x + X \Delta s = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{dT_x}{ds} + X = 0 \quad (2)$$

onde X é a resultante das forças externas na direção x aplicado ao fio por unidade de comprimento. Analogamente, as equações de equilíbrio nas direções y e z podem ser deduzidas resultando no seguinte conjunto de equações:

$$\frac{dT_x}{ds} + X = 0 \quad T_x = T \frac{dx}{ds} \quad (3)$$

$$\frac{dT_y}{ds} + Y = 0 \quad T_y = T \frac{dy}{ds} \quad (4)$$

$$\frac{dT_z}{ds} + Z = 0 \quad T_z = T \frac{dz}{ds} \quad (5)$$

As equações de equilíbrio em coordenadas cilíndricas, por sua vez, podem ser obtidas usando as relações:

$$x = r \cos \theta$$

$$y = r \sin \theta$$

$$\frac{dx}{ds} = \cos \theta \frac{dr}{ds} - r \sin \theta \frac{d\theta}{ds} \quad (6) \quad \frac{dy}{ds} = \sin \theta \frac{dr}{ds} + r \cos \theta \frac{d\theta}{ds} \quad (7)$$

As equações de movimento em coordenadas cilíndricas resultam:

$$\frac{d}{ds} \left(T \frac{dr}{ds} \right) - T \cdot r \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 + P = 0 \quad (8)$$

$$\frac{d}{ds} \left(T \cdot r \frac{d\theta}{ds} \right) + T \frac{dr}{ds} \frac{d\theta}{ds} + Q = 0 \quad (9)$$

$$\frac{d}{ds} \left(T \frac{dz}{ds} \right) = 0 \quad (10)$$

onde P e Q são as forças externas (por unidade de comprimento) nas direções radial e circunferencial respectivamente. Usando a condição de inextensibilidade e definindo as componentes de T como T_r, T_θ, T_z , nas direções r, θ, z respectivamente a seguinte relação é obtida:

$$T^2 \left\{ \left(\frac{dr}{ds} \right)^2 + \left(r \frac{d\theta}{ds} \right)^2 + \left(\frac{dz}{ds} \right)^2 \right\} = T^2 \quad (11)$$

ou
$$T_r^2 + T_\theta^2 + T_z^2 = T^2.$$

A equação (10) pode ser facilmente integrada uma vez para obter $dz/ds = T_{z0}/T$ onde T_{z0} é um constante. Usando-se as regras de diferenciais implícitas e rearranjando os termos, as equações acima podem ser transformadas no seguinte conjunto de equações (12) ordinárias de primeira ordem (EDO's) em z:

$$\frac{dr}{dz} = \dot{r} = \frac{T_r}{T_{z0}} \quad \frac{d\theta}{dz} = \dot{\theta} = \frac{1}{r} \frac{T_\theta}{T_{z0}} \quad (12)$$

$$\frac{dT_r}{dz} = \dot{T}_r = \frac{T_\theta}{r} \frac{T_\theta}{T_{z0}} - P \cdot \frac{T}{T_{z0}} \quad \frac{dT_\theta}{dz} = \dot{T}_\theta = -\frac{T_r}{r} \frac{T_\theta}{T_{z0}} - Q \cdot \frac{T}{T_{z0}}$$

A velocidade de alimentação do fio é geralmente baixa e, portanto, a aceleração de Coriolis pode ser admitida desprezível. Também, usualmente o fio não é muito inclinado durante sua passagem através do balão e o arrasto aerodinâmico pode ser admitido como atuando somente na direção circunferencial. Portanto, o fio pode ser considerado como um cilindro vertical (Hannah, 1955). Para a porção do fio que não toca o limite do cilindro (i.e. arco livre), as forças externas são os seguintes:

$$P = m\omega^2 r \quad (13) \quad Q = -\frac{1}{2}C_d D\rho(\omega r)^2 \quad (14)$$

onde m é a massa do fio por unidade de comprimento, C_d é o coeficiente de arrasto aerodinâmico na velocidade transversal (ou ωR_0) do fio, ρ é a densidade do ar e D é o diâmetro equivalente (De Barr e Catling, 1965).

Entre z_1 e z_2 o fio se arrasta na superfície interna do cilindro e, portanto, $r = R_0$ para esta porção (ou arco) do balão. Conseqüentemente pelas equações acima e a definição de T_r , $\dot{r} = \dot{T}_r = 0$, $P = T_\theta^2 / (T \cdot R_0)$, e $T_r = 0$ para este arco do balão. Também, a força resultante na direção radial é agora $P = m\omega^2 R_0 - N_r$ onde N_r é a componente normal da ação da parede no fio deslizante. Pela lei de Amonton, a força de arrasto transversal resultante é agora somente $Q = -\mu N_r$. Na ausência de forças impulsivas, T_r, T_θ, T_z são também contínuas no ponto onde se juntam os arcos livres e o arco que desliza na superfície do limitador. Obtém-se dois modelos:

a) Para os dois arcos livres

$$\dot{r} = \frac{T_r}{T_{z0}} \quad (15)$$

$$\dot{\theta} = \frac{T_\theta}{rT_{z0}} \quad (16)$$

$$\dot{T}_r = \frac{T_\theta^2}{rT_{z0}} - m\omega^2 r \frac{T}{T_{z0}} \quad (17)$$

$$\dot{T}_\theta = \frac{1}{2}C_d D\rho(\omega r)^2 \frac{T}{T_{z0}} - \frac{T_r T_\theta}{rT_{z0}} \quad (18)$$

b) Para o arco que desliza na superfície

$$\dot{r} = 0 \quad (19)$$

$$\dot{\theta} = \frac{T_{\theta}}{R_0 T_{z_0}} \quad (20)$$

$$\dot{T}_r = 0 \quad (21)$$

$$\dot{T}_{\theta} = \mu \left(m\omega^2 R_0 - \frac{T_{\theta}^2}{TR_0} \right) \frac{T}{T_{z_0}} \quad (22)$$

As condições de contorno para os três arcos são:

a) Para o arco livre superior

em $z=0$: $r = 0, \theta = 0, T_{\theta} = 0$, (T_r a ser determinado)

em $z=z_1$: $r = R_0, T_r = 0$ (z_1 a ser determinado)

b) Para o arco que desliza na superfície do limitador

em $z=z_1$: $r, \theta, T_r, T_{\theta}$ são contínuos

(z_2 a ser determinado)

c) Para o arco livre inferior

em $z=z_2$: $r, \theta, T_r, T_{\theta}$ são contínuos

em $z=z_f$: $r = R_f$

Um procedimento para resolver esses “two point boundary value problems” TPBVP's é primeiro determinar z_1 e z_2 . z_1 depende unicamente do arco livre superior e pode ser determinado fazendo-se uma estimativa inicial para T_r no guia fio (isto fixa T_{z_0} pois $T_{z_0}^2 = (T_0^2 - T_r^2)$ em $z = 0$). Então as quatro equações do arco livres superior são integradas desde $z = 0$ até $r = R_0$ usando-se um integrador numérico simples como um Runge-Kutta de 4ª ordem com passos fixos. A condição de contorno $T_r = 0$ é então verificada neste ponto z (onde $r = R_0$). Se esta condição não é satisfeita, outro valor inicial é escolhido para T_r (usando-se o esquema

Newton-Raphson) e nova integração é feita. O z obtido quando esse processo converge é o z_1 desejado. Para determinar z_2 , uma estimativa inicial é também feita para este valor. Como r, θ, T_r, T_θ são contínuos em z_1 , as EDO's podem ser integradas até z_2 . Neste ponto as equações para o arco livre inferior são usadas para levar a integração até $z = z_f$. A condição de contorno em z_f , $r = R_f$ é em seguida verificada. Se não satisfeita, uma outra interação é feita estimando-se um novo valor para z_2 . Quando a convergência é alcançada, o valor de z_2 é determinado.

Embora não estritamente necessárias, as duas seguintes EDO's adicionais podem ser de muita ajuda na integração:

$$\frac{ds}{dz} = s' = \frac{T}{T_{z_0}} \quad (23) \quad \text{e} \quad \frac{dT}{dz} = T' = -P \frac{T_r}{T_{z_0}} - Q \frac{T_\theta}{T_{z_0}}. \quad (24)$$

As condições iniciais associadas a essas EDO's que são ($z = 0$, $s = 0$ e $T = T_0$, s) e T contínuo em $z = z_1$ e $z = z_2$, são também contínuos em $z = z_1$. Essas EDO's podem ser convenientemente integradas em conjunto com as outras quatro. Quando z_1 e z_2 são encontrados, as outras variáveis podem ser calculadas. Em particular r e θ podem ser obtidas em função de z .

A figura 12a e 12b mostram um gráfico típico polar e radial dos resultados numéricos para dois valores de μ_t que diferem por pouco. Pode-se observar através desses pontos, que θ é muito sensível a μ_t , ao passo que r não é. Medindo θ_f , portanto, μ_t pode ser determinado.

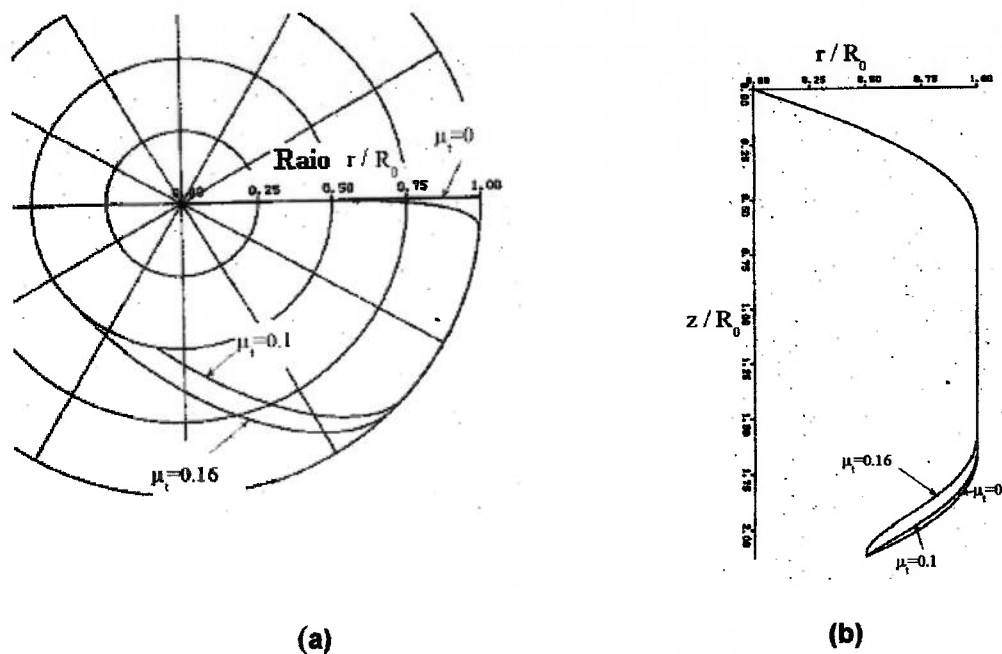


Figura 12 – Forma do balão do fio para diferentes valores de μ_t . (a) Gráfico polar (b) Gráfico radial.

Estas equações são resolvidas mediante um programa denominado CORDA codificado em linguagem FORTRAN para resolver as equações. O código fonte do programa é apresentado no anexo e o fluxograma do programa na figura 13.

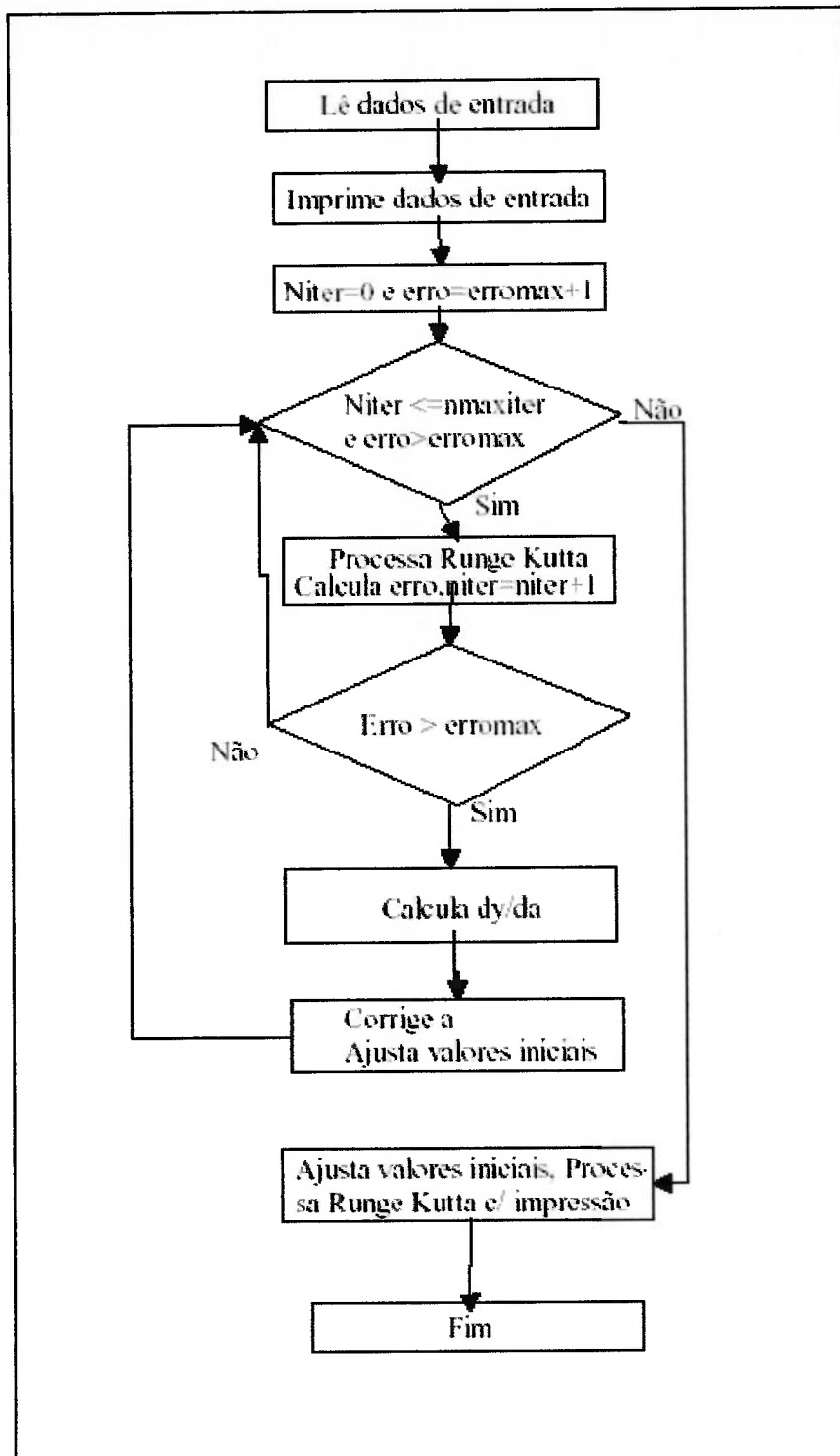


Figura 13: Diagrama de blocos do programa corda.

4.2 Escolha dos adimensionais.

Neste trabalho convém adotar valores adimensionais para algumas grandezas físicas: a altura do balão z_f , a tensão inicial do fio t_0 , o raio final r_f , o arrasto aerodinâmico por unidade de comprimento p_0 , e o número de Reynolds.

Adota-se a altura do balão adimensional como a razão:

$$z_f = Z_f / R_0 \quad (25)$$

, onde Z_f é a altura do balão em metros e R_0 é o raio do limitador em metros.

Define-se a tensão inicial adimensional do fio pela razão:

$$t_0 = T_0 / m \omega^2 R_0 \quad (26)$$

, onde m é a massa por unidade de comprimento em kg/m, T_0 é a tensão inicial do fio em Newtons, ω é a velocidade angular do disco em rad/s e R_0 é o raio do limitador em metros.

O raio final adimensionalizado é simplesmente:

$$r_f = R_f / R_0 \quad (27)$$

, onde R_f é o raio final em metros e R_0 é o raio do limitador em metros.

O arrasto aerodinâmico adimensional é calculado por:

$$p_0 = 8 R_0 C_d \rho D / m \quad (28)$$

, onde R_0 é o raio do limitador em metros, C_d é o coeficiente de arrasto, ρ é a massa específica do ar $1,225 \text{ kg/m}^3$, D é o diâmetro do fio em metros e m é a massa por unidade de comprimento em kg/m.

Finalmente o número de Reynolds é calculado por:

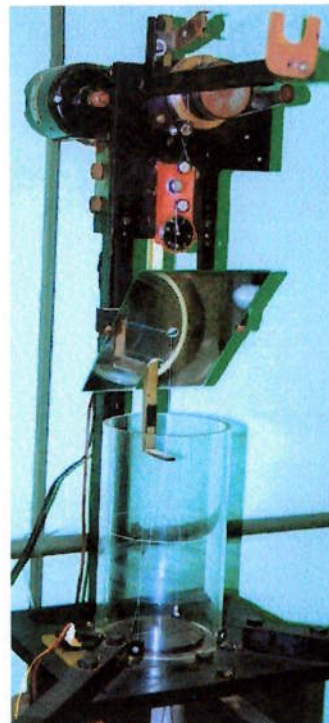
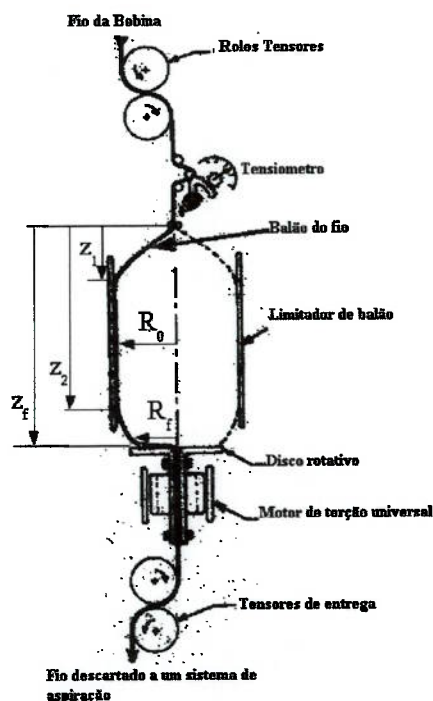
$$Re = V D / \nu \quad (29)$$

, onde V é a velocidade relativa entre o fio e o limitador em m/s, D é o diâmetro do fio em metros e $\nu = \mu / \rho$ onde a viscosidade $\mu = 2 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$ (temperatura $17^\circ\text{C} \pm 0.5$).

5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Marcicano, Tu e Rylander (2003) propuseram um método de medição do coeficiente de atrito transversal caracterizado por dois itens: um modelo teórico do sistema e um dispositivo experimental simples e confiável que permita medidas acuradas do ângulo final do balão gerado pela trajetória do fio, ver figura 15.

Foi construído um dispositivo de fuso oco acionado eletricamente similar ao fuso de uma retorcedeira que permite restringir o balão do fio de forma cilíndrica (figura 14a). Para que fosse possível confirmar a metodologia (e portanto o coeficiente de atrito) o cilindro é opticamente transparente. Porém, para a medição do coeficiente de atrito, em cilindros opacos, um espelho foi colocado a um ângulo de 45° em relação ao eixo de rotação (figura 14b).



(a)

(b)

Figura 14 – Dispositivo construído , (a) esquema e (b) fotografia.

Através de fotografias tiradas do topo do balão de fiação através de um espelho a 45° foi monitorado o ângulo final do balão e portanto, medido o coeficiente de atrito transversal μ_t .

A foto abaixo (figura 15) é um exemplo de foto de topo tirada com o espelho de 45°. Define-se ângulo final do balão, θ_f , como o ângulo entre a tangente do balão em $r = 0$ e a tangente do balão em $r = R_f$. A Tensão inicial, T_0 , foi medida usando-se um dinamômetro mecânico.

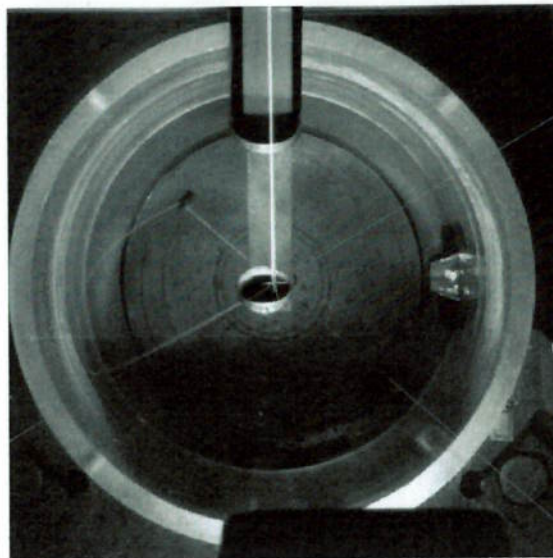


Figura 15: Foto do topo do balão de fiação

O modelo adotado de nenhum modo estudou a natureza do coeficiente de atrito transversal μ_t e deixou algumas dúvidas a serem respondidas. O μ_t varia com o aumento da velocidade de rotação e por conseqüência da força centrífuga? O μ_t é uma função do arraste aerodinâmico perto da parede sólida do limitador de balão? Como o μ_t varia com os diferentes materiais ou rugosidade do limitador?

Para poder responder as perguntas do parágrafo anterior, é preciso, porém, modificar o aparelho usado por Marcicano, Tu e Rylander permitindo que a força

normal seja modificada independentemente da velocidade tangencial. A figura 16 mostra o esquemático de um corte seccional do fio junto com a parede do limitador de balão. Como a velocidade longitudinal do fio é pequena e aproximadamente paralela ao vetor de rotação de arrastamento, a aceleração de Coriolis é desprezível. Portanto, a única força inercial é a devido à aceleração centrípeta que força o fio contra a parede do limitador (i.é., a força normal $N_r = m\omega^2 r$). Na parede, será admitido que só existe o arraste de fricção na direção tangencial, $Q = -\mu N_r$. Se for desejado ver se μ variar com a velocidade de arraste, $V = \omega R_o$, mantendo a força normal constante, é necessário varia V sem variar $N_r = m\omega^2 r$. Para isto, basta fazer com que o limitador cilíndrico possa girar com velocidade angular independentemente da velocidade do fuso.

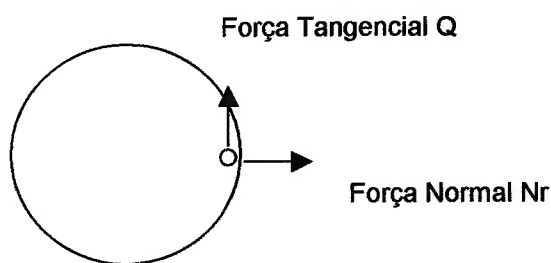


Figura 16: Esquema do corte do fio junto à parede do limitador de balão

O novo dispositivo foi, portanto, projetado com este objetivo em mente. O desenho de conjunto deste novo aparelho encontra-se no anexo desenho 1. Os desenhos de fabricação dos elementos adicionais que foram necessários para modificar o aparelho original também encontram-se em anexo.

A modificação é composta por um sistema de três eixos fixados na base do dispositivo a 120° de deslocamento, cada eixo possui dois rolamentos 6205 2RS SKF e suportam o limitador de balão permitindo que ele gire acionado por um motor

de corrente contínua que esta ligado a um variador de tensão. O acionamento do motor para o limitador e executado através de um anel de borracha também chamado de "o'ring " (figura 17).

O limitador de balão é um cilindro de alumínio com duas pistas para os rolamentos ficando o cilindro suspenso à cerca de um centímetro da base do dispositivo de ensaio. A rugosidade da superfície do cilindro de alumínio foi medida utilizando-se um rugosímetro da marca Taylor Hobson modelo Surtronic 3+ em cinco diferentes pontos da peça e obteve-se uma média de 1,104 Ra.

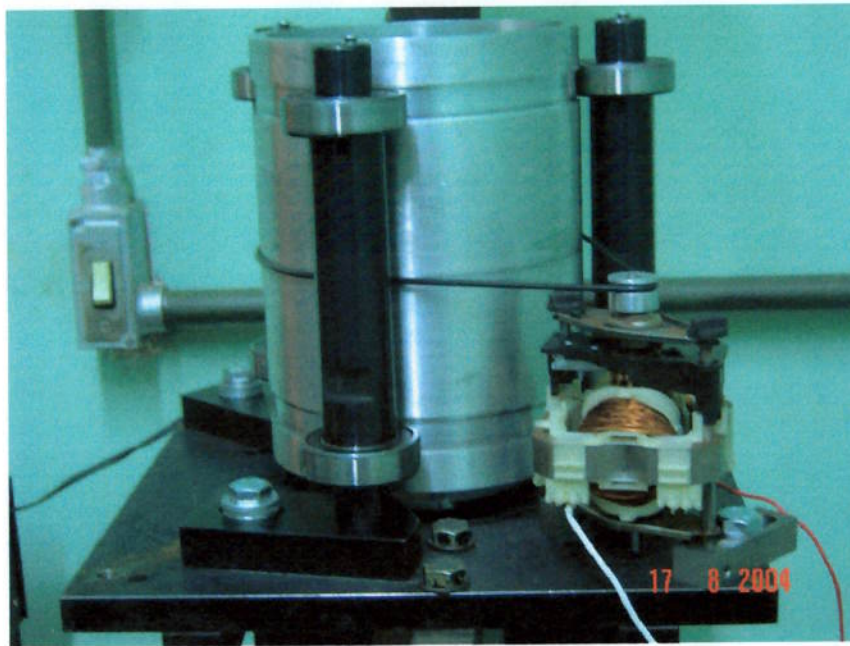


Figura 17: Detalhe do sistema que suporta o limitador de balão e seu motor de acionamento.

A tração do fio foi medida com o auxílio de um tensiômetro comum, a vista completa do aparelho esta mostrada na figura 18.



Figura 18: Detalhe do aparelho completo.

Neste trabalho foram ensaiados dois tipos de fios com as seguintes composições: 1) Fio 100% Acrílico 2/32 Nm ($6,25 \times 10^{-5}$ kg/m), doravante chamado de "100% PAC" e 2) Fio 50/50% Acrílico Algodão 2/30 Nm ($6,66 \times 10^{-5}$ kg/m), doravante chamado de "50% PAC/CO".

5.1 Procedimento de Medição

A velocidade do cilindro limitador de balão será variada durante o ensaio de 0 até a máxima velocidade periférica do limitador de balão de 360 m/min no sentido de giro contrário ao sentido de giro do disco rotativo acionado pelo motor de torção universal e velocidade periférica máxima de 420 m/min no mesmo sentido de giro do disco rotativo. O disco rotativo atingiu até cerca de 3000 rpm.

A velocidade periférica do limitador de balão foi medida com o auxílio de um tacômetro digital da marca Minipa modelo MDT 2238. A velocidade de rotação do

disco rotativo foi medida através de um sensor de velocidade ligado a um osciloscópio.

Foram tiradas fotografias do fio utilizando-se uma máquina fotográfica digital da marca Sony com o auxílio de um espelho colocado a 45° em relação ao eixo de rotação visando-se obter imagem do ângulo final do balão (figura 19).



Figura 19: Detalhe da montagem do espelho em ângulo de 45°

O coeficiente de atrito transversal foi estimado de modo a obter o mesmo ângulo final medido no ensaio. Para este propósito foi utilizado o programa CORDANI, que utilizou os dados mensurados e um valor tentativa para o coeficiente de atrito transversal, calculou o balão correspondente obtendo o ângulo final e utilizou o método de Newton-Raphson para corrigir o coeficiente de atrito transversal.

6. RESULTADOS

Com o auxílio do programa Open Office no módulo gráfico foi obtido o ângulo final do fio no cilindro constritor do balão. As fotos abaixo (figuras 20 e 21) apresentam como o ângulo foi calculado. O ângulo final é obtido pela diferença dos ângulos da tangente do fio no início do balão e o ângulo entre a reta definida pelo ilhós e o centro do disco rotativo.

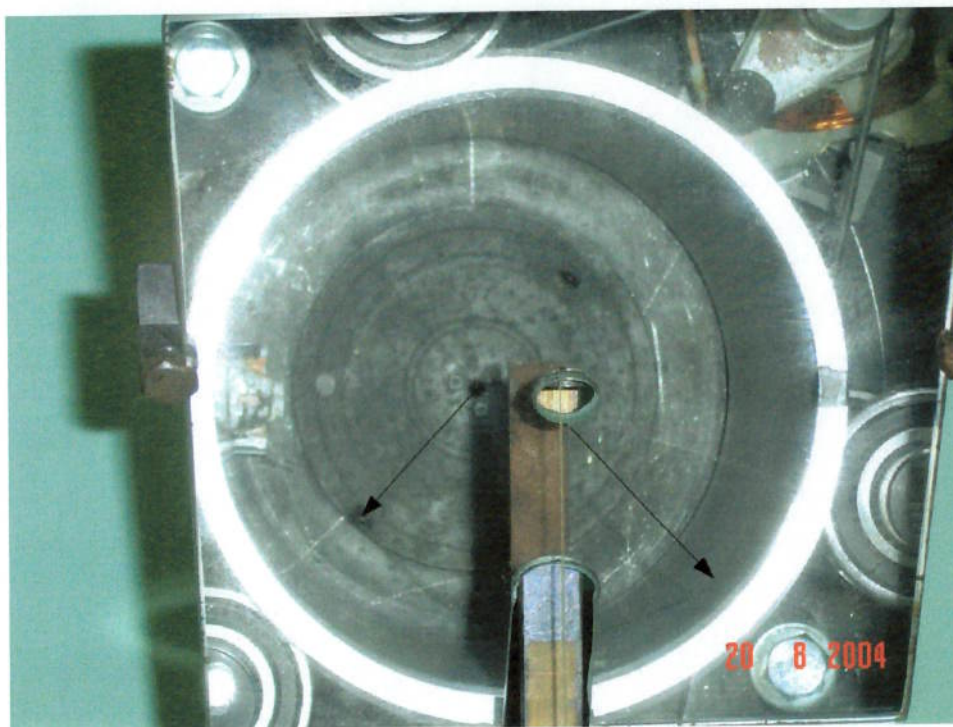


Figura 20: Cálculo do ângulo final do fio 50% PAC/CO

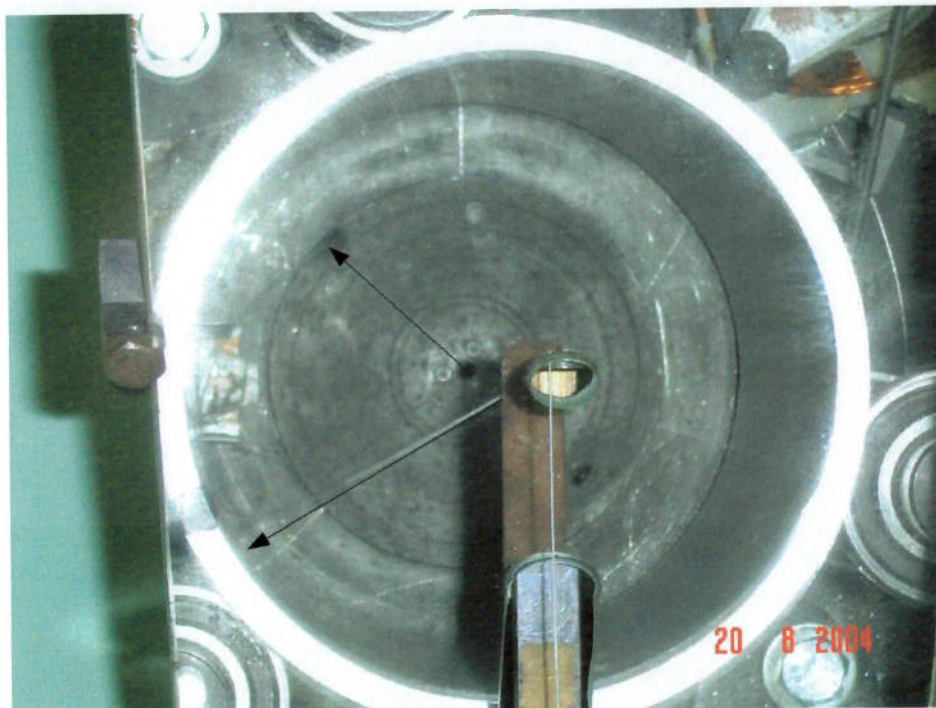


Figura 21: Cálculo do ângulo final do fio 100% PAC.

6.1 Dados Experimentais.

Para o fio 100% PAC os seguintes valores foram medidos e são apresentados na tabela 1:

Massa por unidade de comprimento $m = 62,5$ g/km

Diâmetro do fio $D = 0,586$ mm

Raio do limitador (R_0) = 72 mm

Raio final (R_f) = 50 mm

Altura final (Z_f) = 240 mm

Tabela 1: Valores medidos nas condições de ensaio para o fio 100% PAC

Ensaio	Vel. da parede (V_p) (m/min)	Período (τ) (ms)	Ângulo final (θ_f) (graus)	Tração (T_0) (g)
1	- 360	20,8	92,66	5,5
2	- 320	21	55,06	6
3	- 210	20,6	70,49	5,8
4	- 143	21	63,21	6
5	- 124	21	84,5	5
6	- 124	21	93,42	5
7	- 124	21	88,85	5

8	0	21	101,16	5
9	0	21	86,47	5
10	0	19,6	72,6	6,2
11	0	20,4	93,2	5,1
12	0	19,6	80,0	5,8
13	76	19,8	57,2	6,0
14	77	19,8	57,0	6,0
15	77	18,6	75,0	5,6
16	98	19,4	77,5	6,2
17	100	17,4	84,6	6,8
18	100	17,4	61,9	7,4
19	100	17,4	84,8	6,6
20	128	19,6	72,3	6,0
21	128	25,3	69,6	5,8
22	131	19,2	82,8	5,9
23	168	19,2	75,0	6,0
24	232	17,4	82,3	6,2
25	232	17,4	74,4	7,0
26	376	17,4	89,9	6,7
27	376	17,4	64,2	6,7
28	376	17,4	62,4	6,5
29	410	17,6	93,5	5,3
30	420	19,4	59,7	5,5

Para o fio 50% PAC/CO os seguintes valores foram medidos e apresentados na tabela 2:

Massa por unidade de comprimento $m = 66 \text{ g/km}$

Diâmetro do fio $D = 0,490 \text{ mm}$

Raio do limitador (R_0) = 72 mm

Raio final (R_f) = 50 mm

Altura final (Z_f) = 240 mm

Tabela 2: Valores medidos nas condições de ensaio para o fio 50% PAC/CO

Ensaio	Vel. da parede (V_p) (m/min)	Período (τ) (ms)	Ângulo final (θ_f) (graus)	Tração (T_0) (g)
1	- 210	22	78,7	5,1
2	- 210	22	73,35	5,5
3	- 203	22	68,81	5,1
4	- 203	22	94,35	4,8
5	- 178	22	71,21	5
6	- 178	22	63,18	5,2
7	- 140	22	51,56	5
8	- 140	22	76,06	5

9	- 115	22	80,07	5
10	0	22,4	79,65	5
11	0	22	75,04	5
12	0	17,4	124,79	5,8
13	0	18,2	69,2	6,4
14	0	18,4	71,4	6,2
15	96	18,4	83,8	6,0
16	96	17,4	124,8	5,8
17	96	17,4	108,9	6,0
18	106	17,4	101,7	6,0
19	113	19,2	66,8	6,0
20	142	18,8	84,4	6,5
21	144	17,4	92,0	6,4
22	145	18,2	70,9	6,5
23	151	18,0	100,6	5,5
24	180	18,4	55,0	6,7
25	183	18,4	72,6	7,0
26	183	18,2	103,1	5,5
27	214	18,4	89,0	5,5
28	214	17,4	95,2	6,2
29	315	17,4	97,3	6,2
30	328	18,2	68,8	6,0
31	340	18,2	52,8	7,0
32	342	17,4	114,8	5,7
33	348	18,2	65,9	6,0
34	351	18,4	70,3	5,2

Borelli, C. (2004) calculou o coeficiente de atrito longitudinal μ_d para os mesmos fios utilizados neste trabalho através do método “capstan” de acordo com a norma ASTM 3108-95

$$\mu_d = \frac{\ln(T_2/T_1)}{\phi}$$

Os resultados obtidos estão na tabela 3 abaixo:

Tabela 3: Valores do coeficiente de atrito longitudinal

50% PAC/CO			100% PAC		
T ₁	T ₂	μ_d	T ₁	T ₂	μ_d
2,58	6,50	0,2941	2,58	5,70	0,2523
4,65	11,00	0,2741	4,65	10,00	0,2437
10,40	23,50	0,2595	10,40	22,00	0,2385
20,70	46,00	0,2542	20,70	44,00	0,2400

6.2 Resultados Estimados

Determinação do coeficiente de atrito transversal entre o fio e o limitador:

Os adimensionais para os valores medidos nas condições de ensaio para o fio 100% PAC foram calculados através das equações 25, 26, 27, 28 e 29 e são apresentados na tabela 4:

Tabela 4: Valores adimensionais das condições de ensaio para o fio 100% PAC

Ensaio	t_0	z_f	r_f	p_0	θ_f (Rad)	Reynolds	C_d
1	1,8583	3,4583	0,6944	6,3922	-1,6172	747,0833	1
2	2,0273	3,4583	0,6944	6,3922	-0,9610	747,0833	1
3	2,0273	3,4583	0,6944	6,3922	-1,2303	747,0833	1
4	2,0273	3,4583	0,6944	6,3922	-1,1032	747,0833	1
5	1,6894	3,4583	0,6944	6,3922	-1,4748	747,0833	1
6	1,6894	3,4583	0,6944	6,3922	-1,6305	747,0833	1
7	1,6894	3,4583	0,6944	6,3922	-1,5507	747,0833	1
8	1,6894	3,4583	0,6944	6,3922	-1,7656	747,0833	1
9	1,6894	3,4583	0,6944	6,3922	-1,5092	747,0833	1
10	1,8248	3,4583	0,6944	6,3922	-1,2675	800,4464	1
11	1,6261	3,4583	0,6944	6,3922	-1,6268	769,0563	1
12	1,7071	3,4583	0,6944	6,3922	-1,3957	800,4464	1
13	1,8022	3,4583	0,6944	6,3922	-0,9989	792,3611	1
14	1,8022	3,4583	0,6944	6,3922	-0,9952	792,3611	1
15	1,4843	3,4583	0,6944	6,3922	-1,3095	843,4811	1
16	1,7878	3,4583	0,6944	6,3922	-1,3530	808,6984	1
17	1,5774	3,4583	0,6944	6,3922	-1,4765	901,6523	1
18	1,7165	3,4583	0,6944	6,3922	-1,0805	901,6523	1
19	1,5310	3,4583	0,6944	6,3922	-1,4795	901,6523	1
20	1,7660	3,4583	0,6944	6,3922	-1,2612	800,4464	1
21	2,8444	3,4583	0,6944	6,3922	-1,2144	620,1087	1
22	1,6664	3,4583	0,6944	6,3922	-1,4450	817,1224	1
23	1,6946	3,4583	0,6944	6,3922	-1,3088	817,1224	1
24	1,4382	3,4583	0,6944	6,3922	-1,4357	901,6523	1
25	1,6237	3,4583	0,6944	6,3922	-1,2990	901,6523	1
26	1,5542	3,4583	0,6944	6,3922	-1,5687	901,6523	1
27	1,5542	3,4583	0,6944	6,3922	-1,1202	901,6523	1
28	1,5078	3,4583	0,6944	6,3922	-1,0893	901,6523	1
29	1,2578	3,4583	0,6944	6,3922	-1,6312	891,4062	1
30	1,5859	3,4583	0,6944	6,3922	-1,0425	808,6984	1

O código fonte de CORDANI é apresentado no anexo e em linguagem estruturada a seguir:


```

Programa CordaNi
Lê Dados
Niter=0
erroθ=erromax + 1.0
Enquanto niter<nummaxiter e erroθ>erromax
[
  CalculaBalão paraμi
  Imprime μ.erroθ
  erroθ=θcalc-θobjetivo
  Se erroθ>erromax
    Então
    [
      CalculaBalão para μi-Δ
      CalculaBalão para μi+Δ
      erroθ =  $\frac{\text{erro}\theta}{2\Delta}$ 
       $\mu_{i+i} = \mu_i - \frac{\text{erro}\theta (\mu+\Delta) - \text{erro}\theta (\mu-\Delta)}{2\Delta}$ 
    ]
  ]
]

```

Os dados e resultados do programa CordaNi são apresentados no Anexo em coeficiente de atrito em função do ângulo final.

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 5:

Tabela 5: Coeficiente de atrito transversal calculado fio 100% PAC

Ensaio	Vel. da parede (V_p) (m/min)	Coef. de atrito (μ_t)
1	- 360	0,706
2	- 320	0,296
3	- 210	0,491
4	- 143	0,604
5	- 124	0,408
6	- 124	0,528
7	- 124	0,465
8	0	0,643
9	0	0,434
10	0	0,426
11	0	0,416
12	0	0,372
13	76	0,126
14	77	0,123
15	77	0,134
16	98	0,458
17	100	0,279
18	100	0,14
19	100	0,24
20	128	0,334

21	131	0,356
22	164	0,306
23	168	0,291
24	232	0,158
25	232	0,221
26	376	0,301
27	376	0,08
28	376	0,044
29	410	0,119
30	420	0,049

O gráfico 22 é um comparativo entre a velocidade (m/min) e o coeficiente de atrito transversal e mostra a tendência do coeficiente de atrito para a faixa de velocidade em questão.

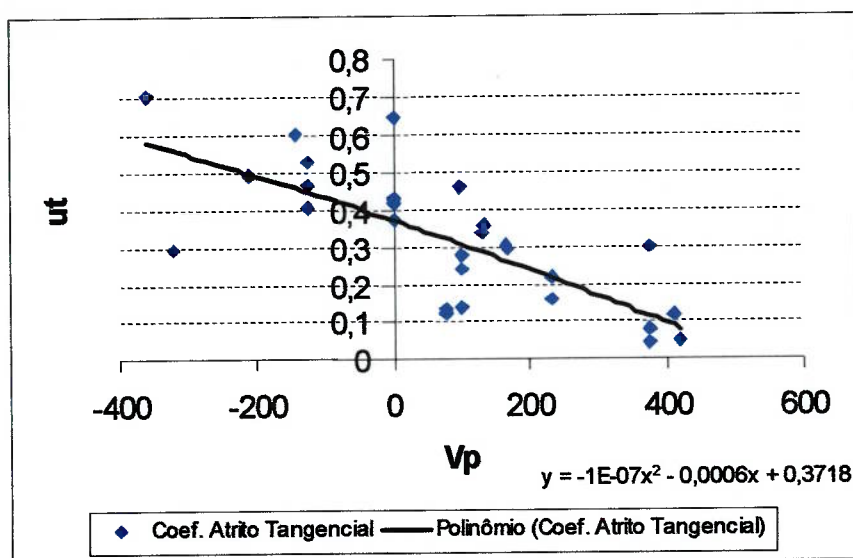


Figura 22 : Gráfico comparativo Coeficiente de atrito tangencial X Velocidade fio 100% PAC

Os adimensionais para os valores medidos nas condições de ensaio para o fio 50% PAC/CO foram calculados através das equações 25, 26, 27, 28 e 29 e são apresentados na tabela 6:

Tabela 6: Valores adimensionais das condições de ensaio para o fio 50% PAC/CO.

Ensaio	t_0	z_f	r_f	p_0	θ_f (Rad)	Reynolds	C_d
1	1,7909	3,4583	0,6944	5,7424	-1,3736	676,5052	1
2	1,9314	3,4583	0,6944	5,7424	-1,2802	676,5052	1
3	1,7909	3,4583	0,6944	5,7424	-1,2010	676,5052	1

4	1,6856	3,4583	0,6944	5,7424	-1,6467	676,5052	1
5	1,7558	3,4583	0,6944	5,7424	-1,2428	676,5052	1
6	1,8260	3,4583	0,6944	5,7424	-1,1027	676,5052	1
7	1,7558	3,4583	0,6944	5,7424	-0,8999	676,5052	1
8	1,7558	3,4583	0,6944	5,7424	-1,3275	676,5052	1
9	1,7558	3,4583	0,6944	5,7424	-1,3975	676,5052	1
10	1,8202	3,4583	0,6944	5,7424	-1,3902	664,4248	1
11	1,7558	3,4583	0,6944	5,7424	-1,3097	676,5052	1
12	1,5381	3,4583	0,6944	5,2305	-1,2071	744,8656	1
13	1,5229	3,4583	0,6944	5,2305	-1,2462	736,7692	1
14	1,4738	3,4583	0,6944	5,2305	-1,4617	736,7692	1
15	1,2740	3,4583	0,6944	5,2305	-2,1780	779,1123	1
16	1,3180	3,4583	0,6944	5,2305	-1,9003	779,1123	1
17	1,3180	3,4583	0,6944	5,2305	-1,7747	779,1123	1
18	1,6048	3,4583	0,6944	5,2305	-1,1664	706,0705	1
19	1,6668	3,4583	0,6944	5,2305	-1,4731	721,0933	1
20	1,4058	3,4583	0,6944	5,2305	-1,6052	779,1123	1
21	1,5621	3,4583	0,6944	5,2305	-1,2369	744,8656	1
22	1,2929	3,4583	0,6944	5,2305	-1,7553	753,1419	1
23	1,6458	3,4583	0,6944	5,2305	-0,9599	736,7692	1
24	1,7195	3,4583	0,6944	5,2305	-1,2675	736,7692	1
25	1,3218	3,4583	0,6944	5,2305	-1,7994	744,8656	1
26	1,3510	3,4583	0,6944	5,2305	-1,5540	736,7692	1
27	1,3619	3,4583	0,6944	5,2305	-1,6621	779,1123	1
28	1,3619	3,4583	0,6944	5,2305	-1,6982	779,1123	1
29	1,4420	3,4583	0,6944	5,2305	-1,2004	744,8656	1
30	1,6823	3,4583	0,6944	5,2305	-0,9212	744,8656	1
31	1,2521	3,4583	0,6944	5,2305	-2,0028	779,1123	1
32	1,4420	3,4583	0,6944	5,2305	-1,1505	744,8656	1
33	1,2773	3,4583	0,6944	5,2305	-1,2268	736,7692	1
34	1,4738	3,4583	0,6944	5,2305	-1,4188	736,7692	1

Os dados e resultados do programa são apresentados no Anexo em coeficiente de atrito em função do ângulo final 50% PAC/CO.

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7:

Tabela 7: Coeficiente de atrito transversal calculado fio 50% PAC/CO

Ensaio	Vel. da parede (V_p) (m/min)	Coef. de atrito (μ_t)
1	-210	0,633
2	-210	0,933
3	-203	0,427
4	-203	0,678
5	-178	0,418
6	-178	0,367
7	-140	0,106
8	-140	0,504

9	-115	0,581
10	0	0,74
11	0	0,486
12	0	0,232
13	0	0,241
14	0	0,304
15	96	0,32
16	96	0,309
17	96	0,277
18	106	0,261
19	113	0,571
20	142	0,254
21	144	0,248
22	145	0,252
23	151	0,153
24	180	0,474
25	183	0,287
26	183	0,237
27	214	0,281
28	214	0,292
29	315	0,164
30	328	0,147
31	340	0,275
32	342	0,142
33	348	0,09
34	351	0,285

O gráfico 23 é um comparativo entre a velocidade (m/min) e o coeficiente de atrito transversal e mostra a tendência do coeficiente de atrito para a faixa de velocidade em questão.

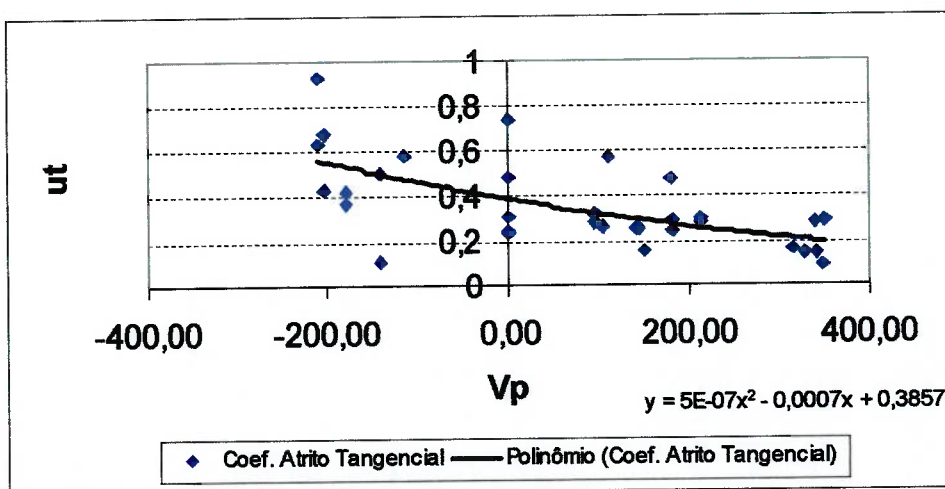


Figura 23: Gráfico comparativo Coeficiente de atrito X Velocidade fio 50%PAC/CO

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos apresentados na forma de gráficos (figura 22 e 23) demonstram que o valor do coeficiente de atrito transversal é influenciado pela velocidade da parede. O coeficiente de atrito diminui com a diminuição da velocidade relativa do fio em relação à parede. Entenda-se que a velocidade relativa é a velocidade tangencial do fio menos a velocidade tangencial da parede.

Este comportamento pode ser explicado pela alteração do coeficiente de atrito pela mudança da velocidade relativa do fio ou pelo arraste aerodinâmico que é desconsiderado no modelo utilizado para determinar o coeficiente de atrito.

Linz [LINZ,1972] demonstrou através de experimentos com fibras sintéticas que o coeficiente de atrito longitudinal aumenta significativamente com o incremento da velocidade. Nestes experimentos foi utilizado o método conhecido como “capstan” para determinar o atrito.

O arraste aerodinâmico do fio na região em que ele fica em contato com a parede é desprezado em diversos trabalhos que modelam o balão restrito (FRASER, 1993 a b; TU,1982) por se acreditar que a força de atrito é mais significativa que a força de arrasto. No livro de Zdravkovich [Zdravkovich,2003] são apresentados uma compilação de valores de coeficiente de arrasto e de sustentação para escoamento em torno de um cilindro encostado na parede. Para número de Reynolds da ordem de 20000, o coeficiente de arrasto é da ordem de 0,8 e o de sustentação 0,6. Considerando o coeficiente de arrasto com esta ordem de grandeza, a relação entre a força de atrito e força de arrasto vale aproximadamente 1.0, adotando um valor do coeficiente de atrito 0,5 e utilizando-se os valores de massa, diâmetro e raio do limitador deste trabalho.

Levando-se em conta a ausência de modelo de arrasto aerodinâmico é de se esperar que os valores do coeficiente de atrito calculados estejam superestimados porque a parcela do arrasto aerodinâmico é vista através de um aumento do valor do coeficiente de atrito. E pela velocidade do fio da ordem de mil metros por minuto esperam-se valores do coeficiente de atrito maiores que os medidos nas condições em que a norma ASTM D3108-89 recomenda, até 300 m/min. Os coeficientes de atrito transversal calculados variaram de 0,5 a 0,1 para o fio 100%PAC e de 0,6 a 0,2 para o fio 50%PAC/CO. Os valores do coeficiente de atrito longitudinal estimados por Borelli em um ensaio executado de acordo com a norma ASTM D3108-89 para estes dois fios valem aproximadamente 0,25. Os valores menores podem estar relacionados a dois fatores, 1) à influência da parede na velocidade do ar no interior do cilindro que influencia o arrasto do fio quando ele não está em contato com a parede ou 2) na natureza do atrito que, nos fios têxteis, pode ser influenciado pela direção do movimento com relação à orientação das fibras.

Resta avaliar como se propaga o erro de medida até o coeficiente de atrito transversal. Para tanto impõe-se uma perturbação positiva e outra negativa de 2% em cada um dos seguintes parâmetros: 1) diâmetro do fio D , 2) ângulo final θ_f , 3) tensão do fio T_0 e, 4) velocidade angular do disco ω . A perturbação resultante no coeficiente de atrito transversal encontra-se na tabela 8. Os valores não perturbados dos parâmetros de diâmetro do fio, ângulo final, tensão do fio e velocidade angular do disco encontram-se também na tabela 8.

Tabela 8: Propagação de erro de medida

Parâmetro	Coef. de atrito (μ_t)	Variação %
D Original	0,571	-
D +2%	0,553	-3,15
D -2%	0,590	+3,32

θ_f Original	0,571	-
θ_f +2%	0,598	+4,72
θ_f -2%	0,545	-4,55
T_0 Original	0,571	-
T_0 +2%	0,643	+12,6
T_0 -2%	0,511	-8,94
ω Original	0,571	-
ω +2%	0,730	+27,84
ω -2%	0,459	-19,61

A tabela 8 permite estimar a incerteza do coeficiente de atrito transversal levando em conta que a precisão no diâmetro do fio é da ordem de 2%, a precisão da estimativa do ângulo final é da ordem de 4%, a precisão na tensão do fio é da ordem de 4% e a precisão da velocidade angular do disco é de 0,5%. Deve-se observar que esta tabela tem valor apenas indicativo porque o sistema tem caráter não-linear.

8. COMENTÁRIOS FINAIS

Verifica-se que para uma pequena variação da velocidade relativa o valor do coeficiente de atrito transversal muda de forma significativa demonstrando a necessidade de estimá-lo uma vez que a velocidade relativa longitudinal normalmente é distinta da velocidade relativa tangencial e que ambos, coeficiente de atrito longitudinal e coeficiente de atrito tangencial são fortemente influenciados pela velocidade relativa. O estudo realizado pode contribuir para um melhor entendimento do que ocorre na região em que o fio está em contato com a parede já que uma estimativa mais precisa do atrito é importante para estimar o dano provocado nos fios processados.

A parede móvel que foi adaptada ao dispositivo desenvolvido Tu (TU, 1982) permitiu um melhor entendimento do comportamento do fio na região em ele fica em contato com a parede e uma estimativa do coeficiente de atrito transversal, ainda não reportada por outros pesquisadores.

Será necessário desenvolver um dispositivo que possa proporcionar uma rotação do cilindro limitador próxima ou igual à velocidade de rotação do disco rotativo. Com o dispositivo construído foi possível apenas chegar até cerca de 30% da velocidade do disco. Caso a rotação do disco for muito baixa não haverá formação do balão.

O controle da tensão do fio deve ser feito por um dispositivo com melhor precisão. O modelo atual utilizou dois motores variáveis que se mostraram um pouco ineficientes para velocidades da parede do limitador de balão maiores do que 100 m/min. Um controle de tensão por discos tensionados por uma mola (similar ao

modelo utilizado na indústria têxtil) também foi testado e não apresentou bons resultados.

O diâmetro do fio é um parâmetro que tem extrema influência na estimação do coeficiente de atrito, deve-se então dar preferência a fios produzidos em filamento contínuo pois estes são muito mais regulares do que fios fiados. Para os fios fiados recomenda-se que sejam tomadas várias medidas do diâmetro buscando um erro inferior a $\pm 2\%$ na média do diâmetro.

Para aprimorar o modelo para estimação do coeficiente de atrito recomenda-se medir a velocidade do ar no interior do limitador ou usar a geometria do balão na parte livre para estimar o efeito do fluxo de ar induzido pela rotação da parede.

Finalmente, a influência do arrasto aerodinâmico na região de contato do fio com a parede deveria ser incluída no modelo utilizado para a estimação do coeficiente de atrito.

REFERÊNCIAS

- MARCICANO, J.P.P., 2000 **Formato e Estabilidade do Balão Têxtil no Processo de Torção “Dois por Um” Descendente**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- SCHICK, M. J., 1980. **Friction and Lubrication of Synthetic Fibers**. : Textile Research Journal pg 675-678.
- LINZ, H., 1972. **The Problem of Interplay between Yarn na Yarn Guide Elements on High Speed Textile Machines**. Melliand Textilberichte (English Edition) pg 481-485.
- LATZKE, P. M., 1972. **Friction Measurement Errors in Yarn Guide Systems Of Electronic Yarn Tension Meters**. Melliand Textilberichte (English Edition) pg 960-963.
- HANSEN, W. W.; TABOR, D., 1985. **Hydrodynamic Factors in the Friction of Fibers and Yarns**. Textile Research Journal pg 300-308.
- De Barr, A.E. and Catling, H., 1965 **The Principles and Theory of Ring Spinning. Manual of Cotton Spinning, V**. The Textile Institute and Butterworths, Manchester, UK.
- Hannah, M., 1955, **Applications of a Theory of Spinning Balloon, I and II**, J. Textile Inst., **43**, T519 and **46**, T1.
- Tu, C.C., 1982. **Shape and Stability of the Cylindrically Constrained Yarn Balloon**, Doctoral Dissertation, University of Texas, Austin, TX, USA .
- FRASER, W.B., 1993a. **On the dynamics of the two-for one twister**. Proc. Royal Soc. London, A447, p. 409-425, 1993.

FRASER, W.B., 1993b. **Air Drag and Friction in the Two-for-One Twister: Results from the Theory**, J.Text.Inst, 84, no 3, 1993.

Borelli, C. 2004. **Estudo do Atrito entre o Fio Têxtil e Limitadores em Retorcedeiras**. Relatório parcial de programa de mestrado, Comunicação Interna.

Anexo 1

5.1 Corda

```

SUBROUTINE RANGEKUTA(H,N,X0,Y0,X,Y,NPAR,PAR,INTER,XF)
DOUBLE PRECISION H,X0,Y0(N),X,Y(N),PAR(NPAR),
+INTER,XULTIMP,AUX1,AUX2,AUX3,K(100,4),XF,MA,MD,HRES
INTEGER I,N,NPAR,J,IND,IND1

DO 80 I=1,N,1
  DO 90 J=1,4,1
    K(I,J)=0
90 CONTINUE
80 CONTINUE

HRES=H
XULTIMP=X0-2*INTER
IND=0
IND1=0

100 IF (X0-XULTIMP.GE.INTER.AND.INTER.NE.0.0) THEN
  IF (X0.GT.PAR(4).AND.X0.LT.PAR(5)) THEN
    MD=1
    MA=0
  ELSE
    MD=0
    MA=1
  ENDIF
* WRITE(12,*) X0,Y0(1),Y0(2),Y0(3),Y0(4)

  XULTIMP=X0
  ENDIF

  IF ((X0.GT.PAR(5)-0.1.AND.X0.LT.PAR(5)+0.1).OR.
+ (X0.GT.PAR(4)-0.1.AND.X0.LT.PAR(4)+0.1)) THEN
    H=HRES
  ELSE
    H=HRES*10
  ENDIF

  IF (IND.EQ.0.AND.X0.GE.PAR(4)) THEN
    PAR(14)=Y0(3)
    IND=1
  END IF

  IF (IND1.EQ.0.AND.X0.GE.PAR(5)) THEN
    PAR(15)=Y0(3)
    IND1=1
  END IF

  IF (X0.GT.PAR(4).AND.X0.LT.PAR(5)) THEN

    K(1,1)=1/SQRT(1-Y0(5)**2-(Y0(6)*Y0(2))**2)
    K(1,2)=K(1,1)
    K(1,3)=K(1,1)
    K(1,4)=K(1,1)

    K(2,1)=0
    K(2,2)=K(2,1)
    K(2,3)=K(2,1)
    K(2,4)=K(2,1)

    K(3,1)=Y0(6)*K(1,1)
    K(3,2)=K(3,1)
    K(3,3)=K(3,1)
    K(3,4)=K(3,1)

    AUX1=Y0(6)
    K(6,1)=K(1,1)*( PAR(9)*(PAR(1)*AUX1-1)**2-PAR(9)*Y0(4)*AUX1**2
+ -PAR(3)*AUX1*K(1,1) )/( (PAR(1)**2-Y0(4))*(1+(Y0(2)*AUX1*K(1,1))

```

```

+ **2) )
AUX1=Y0(6)+H*K(6,1)/2
K(6,2)=K(1,1)*( PAR(9)*( PAR(1)*AUX1-1)**2-PAR(9)*Y0(4)*AUX1**2
+ -PAR(3)*AUX1*K(1,1) )/( (PAR(1)**2-Y0(4))* (1+(Y0(2)*AUX1*K(1,1))
+ **2) )
AUX1=Y0(6)+H*K(6,2)/2
K(6,3)=K(1,1)*( PAR(9)*( PAR(1)*AUX1-1)**2-PAR(9)*Y0(4)*AUX1**2
+ -PAR(3)*AUX1*K(1,1) )/( (PAR(1)**2-Y0(4))* (1+(Y0(2)*AUX1*K(1,1))
+ **2) )
AUX1=Y0(6)+H*K(6,3)
K(6,4)=K(1,1)*( PAR(9)*( PAR(1)*AUX1-1)**2-PAR(9)*Y0(4)*AUX1**2
+ -PAR(3)*AUX1*K(1,1) )/( (PAR(1)**2-Y0(4))* (1+(Y0(2)*AUX1*K(1,1))
+ **2) )

K(4,1)=-K(1,1)**2*( (PAR(1)**2-Y0(4))*Y0(6)*K(6,1)*Y0(2)**2+
+ PAR(3) )
K(4,2)=-K(1,1)**2*( (PAR(1)**2-(Y0(4)+H*K(4,1)/2))*Y0(6)*K(6,1)
+ *Y0(2)**2+PAR(3) )
K(4,3)=-K(1,1)**2*( (PAR(1)**2-(Y0(4)+H*K(4,2)/2))*Y0(6)*K(6,1)
+ *Y0(2)**2+PAR(3) )
K(4,4)=-K(1,1)**2*( (PAR(1)**2-(Y0(4)+H*K(4,3)))*Y0(6)*K(6,1)
+ *Y0(2)**2+PAR(3) )

K(5,1)=0
K(5,2)=0
K(5,3)=0
K(5,4)=0

IF (INTER.NE.0.0) THEN
  K(7,1)=-K(1,1)*(Y0(2)**2/2+PAR(3)*X0)
  K(7,2)=-K(1,1)*(Y0(2)**2/2+PAR(3)*(X0+H/2))
  K(7,3)=-K(1,1)*(Y0(2)**2/2+PAR(3)*(X0+H/2))
  K(7,4)=-K(1,1)*(Y0(2)**2/2+PAR(3)*(X0+H))

  K(8,1)=-K(1,1)*Y0(2)*Y0(2)*PAR(1)*Y0(6)
  K(8,2)=K(8,1)
  K(8,3)=K(8,1)
  K(8,4)=K(8,1)

  K(9,1)=K(1,1)*PAR(9)*Y0(2)**2*( (PAR(1)*Y0(6)-1)**2 -
+ Y0(4)*Y0(6)**2 )*( Y0(3)+Y0(1)*Y0(6) )
  K(9,2)=K(9,1)
  K(9,3)=K(9,1)
  K(9,4)=K(9,1)

  K(10,1)=0
  K(10,2)=K(10,1)
  K(10,3)=K(10,1)
  K(10,4)=K(10,1)
END IF
ELSE
  if ((1-Y0(5)**2-(Y0(6)*Y0(2))**2).LE.0.0) then
    write(*,*) 'raiz menor que zero em x= ',x0, y0(5),y0(2),y0(6)
    read(*,*)
  end if

  K(1,1)=1/SQRT(1-Y0(5)**2-(Y0(6)*Y0(2))**2)
  K(1,2)=K(1,1)
  K(1,3)=K(1,1)
  K(1,4)=K(1,1)

  K(2,1)=Y0(5)*K(1,1)
  K(2,2)=K(2,1)
  K(2,3)=K(2,1)
  K(2,4)=K(2,1)

  K(3,1)=Y0(6)*K(1,1)
  K(3,2)=K(3,1)
  K(3,3)=K(3,1)
  K(3,4)=K(3,1)

  K(4,1)=-Y0(2)*K(2,1)-PAR(2)*(Y0(2)**3)*K(3,1)/16-PAR(3)

```

```

K(4,2)=K(4,1)
K(4,3)=K(4,1)
K(4,4)=K(4,1)

AUX1=PAR(1)**2-Y0(4)
AUX2=K(1,1)*( Y0(2)*AUX1*Y0(6)**2-2*Y0(2)*PAR(1)*Y0(6)+Y0(2) )
K(5,1)=( AUX2+K(4,1)*Y0(5) )/AUX1
K(5,2)=( AUX2+K(4,1)*(Y0(5)+H*K(5,1)/2) )/AUX1
K(5,3)=( AUX2+K(4,1)*(Y0(5)+H*K(5,2)/2) )/AUX1
K(5,4)=( AUX2+K(4,1)*(Y0(5)+H*K(5,3)) )/AUX1

IF (Y0(2).GT.0.0) THEN
  AUX1=Y0(2)*( PAR(1)**2-Y0(4) )
  AUX2=Y0(2)*K(4,1)-2*K(1,1)*( PAR(1)**2-Y0(4) )*Y0(5)
  AUX3=(2*PAR(1)*Y0(5)+PAR(2)*Y0(2)**2/16)*K(1,1)
  K(6,1)=(Y0(6)*AUX2+AUX3)/AUX1
  K(6,2)=( (Y0(6)+H*K(6,1)/2)*AUX2+AUX3)/AUX1
  K(6,3)=( (Y0(6)+H*K(6,2)/2)*AUX2+AUX3)/AUX1
  K(6,4)=( (Y0(6)+H*K(6,3))*AUX2+AUX3)/AUX1
ELSE
  K(6,1)=0
  K(6,2)=0
  K(6,3)=0
  K(6,4)=0
END IF

IF (INTER.NE.0.0) THEN
  K(7,1)=-K(1,1)*(Y0(2)**2/2+PAR(3)*X0)
  K(7,2)=-K(1,1)*(Y0(2)**2/2+PAR(3)*(X0+H/2))
  K(7,3)=-K(1,1)*(Y0(2)**2/2+PAR(3)*(X0+H/2))
  K(7,4)=-K(1,1)*(Y0(2)**2/2+PAR(3)*(X0+H))

  K(8,1)=-K(1,1)*(Y0(2)**2*PAR(1)*Y0(6)-2*PAR(1)*Y0(2)*
+   Y0(5)*Y0(3))
  K(8,2)=K(8,1)
  K(8,3)=K(8,1)
  K(8,4)=K(8,1)

  K(9,1)=0
  K(9,2)=K(9,1)
  K(9,3)=K(9,1)
  K(9,4)=K(9,1)

  K(10,1)=K(1,1)*PAR(2)*Y0(2)**3/16*(Y0(3)+Y0(6)*Y0(1) )
  K(10,2)=K(10,1)
  K(10,3)=K(10,1)
  K(10,4)=K(10,1)
END IF

END IF

DO 200 I=1,N,1
  Y(I)=Y0(I)+H*(K(I,1)+2*K(I,2)+2*K(I,3)+K(I,4))/6
200 CONTINUE
X=X0+H

X0=X
DO 300 I=1,N,1
  Y0(I)=Y(I)
300 CONTINUE

IF (X.LT.XF) GO TO 100

H=HRES
RETURN
END

SUBROUTINE VALINICIAIS(Y0,YI,PAR,X0,XOI,N,NPAR)
DOUBLE PRECISION Y0(100),YI(100),PAR(100),X0,XOI
INTEGER N,NPAR,I

DO 100 I=1,N,1
  Y0(I)=YI(I)

```

```

100 CONTINUE
    XO=XOI
    RETURN
    END

    SUBROUTINE LEDADOS(H,ERROMAX,ITERMAX,DELTA,INTER,XOI,YI,PAR,N,
+ NPAR)

    INTEGER N,NPAR,I,ITERMAX
    DOUBLE PRECISION H,ERROMAX,DELTA,INTER,XOI,YI(100),
+ PAR(100)

    OPEN (UNIT=10,FILE='I_NI.TXT',STATUS='OLD')
    OPEN (UNIT=11,FILE='O_NI.TXT',STATUS='UNKNOWN')

    READ(10,*) H,ERROMAX,ITERMAX,DELTA,INTER

    READ(10,*) N
    READ(10,*) XOI
    DO 100 I=1,N,1
        READ(10,*) YI(I)
100 CONTINUE
    READ(10,*) NPAR
    DO 200 I=1,NPAR,1
        READ(10,*) PAR(I)
200 CONTINUE

    WRITE(11,*) 'XO=',XOI
    WRITE(11,*) 'H= ',H
    WRITE(11,*) 'ERROMAX=',ERROMAX
    WRITE(11,*) 'ITERMAX=',ITERMAX
    WRITE(11,*) 'DELTA =',DELTA
    WRITE(11,*) 'PASSO DE IMPRESSAO DA SOLUCAO=',INTER
    WRITE(11,*) 'VALORES INICIAIS N= ',N
    DO 300 I=1,N,1
        WRITE(11,*) YI(I)
300 CONTINUE
    WRITE(11,*) 'PARAMETROS NPAR=',NPAR
    DO 400 I=1,NPAR,1
        WRITE(11,*) PAR(I)
400 CONTINUE
    RETURN
    END

    SUBROUTINE CONTROLA(H,ERROMAX,ITERMAX,DELTA,INTER,XOI,YI,PAR,N,
+ NPAR,Y,erroz1,erroz2,thetal)

    INTEGER N,NPAR,I,ITERMAX,NITER
    DOUBLE PRECISION XO,X,YO(100),Y(100),H,PAR(100),YI(100),XOI,
+DELTA,ERRO,INTER,ZERO,C1,C2,DC1DA,DC2DA,DC1DT,ERROMAX,
+DC2DT,DA,DT,YR(100),XOR,AUX,erroz1,erroz2,thetal

    ZERO=0.0D0

    NITER=0
    ERRO=ERROMAX+1.0D0

500 IF (NITER.LT.ITERMAX.AND.ERRO.GT.ERROMAX) THEN
        NITER=NITER+1

        CALL VALINICIAIS(YO,YI,PAR,XO,XOI,N,NPAR)
        CALL RANGEKUTA(H,N,XO,YO,X,Y,NPAR,PAR,ZERO,PAR(4))

        C1=Y(2)-PAR(8)
        C2=Y(5)-0

        IF (ABS(C1).GT.ABS(C2)) THEN
            ERRO=ABS(C1)
        ELSE

```

```

ERRO=ABS(C2)
END IF

WRITE(*,*) 'ITERAÇÃO 0-Z1',NITER,' ERRO=',erro,' r(z1)=' ,y(2),' z1=' ,par(4),'
dr/ds=' ,yI(5)

IF (ERRO.GT.ERROMAX) THEN

CALL VALINICIAIS(YO,YI,PAR,XO,XOI,N,NPAR)
YO(5)=YI(5)-DELTA
CALL RANGEKUTA(H,N,XO,YO,X,Y,NPAR,PAR,ZERO,PAR(4))
DC1DA=Y(2)-PAR(8)
DC2DA=Y(5)-0

CALL VALINICIAIS(YO,YI,PAR,XO,XOI,N,NPAR)
YO(5)=YI(5)+DELTA
CALL RANGEKUTA(H,N,XO,YO,X,Y,NPAR,PAR,ZERO,PAR(4))
DC1DA=(Y(2)-PAR(8)-DC1DA)/(2*DELTA)
DC2DA=(Y(5)-0-DC2DA)/(2*DELTA)

CALL VALINICIAIS(YO,YI,PAR,XO,XOI,N,NPAR)
AUX=PAR(4)
PAR(4)=AUX-DELTA
CALL RANGEKUTA(H,N,XO,YO,X,Y,NPAR,PAR,ZERO,PAR(4))
DC1DT=Y(2)-PAR(8)
DC2DT=Y(5)-0

CALL VALINICIAIS(YO,YI,PAR,XO,XOI,N,NPAR)
PAR(4)=AUX+DELTA
CALL RANGEKUTA(H,N,XO,YO,X,Y,NPAR,PAR,ZERO,PAR(4))
DC1DT=(Y(2)-PAR(8)-DC1DT)/(2*DELTA)
DC2DT=(Y(5)-0-DC2DT)/(2*DELTA)

IF (ABS(DC1DA*DC2DT-DC1DT*DC2DA).LE.1.0D-300.OR.
+ ABS(DC2DT).LE.1.0D-300) THEN

NITER=2*ITERMAX
DA=0
DT=0
ELSE
DA=(C1*DC2DT-DC1DT*C2)/(DC1DA*DC2DT-DC1DT*DC2DA)
DT=(C2-DC2DA*DA)/DC2DT
END IF

YI(5)=YI(5)-DA
PAR(4)=AUX-DT
END IF
GO TO 500
END IF

erroz1=erro
thetal=y0(3)

IF (INTER.NE.ZERO) THEN
CALL VALINICIAIS(YO,YI,PAR,XO,XOI,N,NPAR)
CALL RANGEKUTA(H,N,XO,YO,X,Y,NPAR,PAR,INTER,PAR(4))

WRITE(11,*) 'RESULTADO 0-Z1'
WRITE(11,*) 'NUMITER,ERRO:',NITER,ABS(ERRO)
WRITE(11,*) 'X,Y(1)..Y(N):',X,(Y(I),I=1,N)
WRITE(11,*) 'XOI,YI(1)..YI(N)',XOI,(YI(I),I=1,N)
WRITE(11,*) 'PAR(1)..PAR(NPAR):',(PAR(I),I=1,NPAR)

ENDIF

* CALCULO DE Z1 ATE ZF

DO 700 I=1,N,1
YR(I)=YI(I)
YI(I)=Y(I)
700 CONTINUE
XOR=XOI
XOI=X

```



```

NITER=0
ERRO=ERROMAX+1.000

800 IF (NITER.LT.ITERMAX.AND.ERRO.GT.ERROMAX) THEN
    NITER=NITER+1

    CALL VALINICIAIS(Y0,YI,PAR,X0,XOI,N,NPAR)
    CALL RANGEKUTA(H,N,X0,Y0,X,Y,NPAR,PAR,ZERO,PAR(6))

    C1=Y(2)-PAR(7)

    ERRO=ABS(C1)

    WRITE(*,*) 'ITERAÇÃO Z1-ZF',NITER,' ERRO=',erro,' Rf= ',y(2),' Z2=',par(5)

    IF (ERRO.GT.ERROMAX) THEN

        CALL VALINICIAIS(Y0,YI,PAR,X0,XOI,N,NPAR)
        C2=PAR(5)
        PAR(5)=C2-DELTA
        CALL RANGEKUTA(H,N,X0,Y0,X,Y,NPAR,PAR,ZERO,PAR(6))

        DC1DA=Y(2)-PAR(7)

        CALL VALINICIAIS(Y0,YI,PAR,X0,XOI,N,NPAR)

        PAR(5)=C2+DELTA
        CALL RANGEKUTA(H,N,X0,Y0,X,Y,NPAR,PAR,ZERO,PAR(6))

        DC1DA=(Y(2)-PAR(7)-DC1DA)/(2*DELTA)

        IF (DC1DA.EQ.0.0) THEN

            NITER=2*ITERMAX
            DA=0
            DT=0

            WRITE(*,*) 'Erro na determinacao do balao'
            go to 800

        ELSE
            DA=C1/DC1DA
        END IF

        PAR(5)=C2-DA

    END IF
    GO TO 800
END IF
erroz2=erro

IF (INTER.NE.ZERO) THEN
    CALL VALINICIAIS(Y0,YI,PAR,X0,XOI,N,NPAR)
    CALL RANGEKUTA(H,N,X0,Y0,X,Y,NPAR,PAR,INTER,PAR(6))

    WRITE(11,*) 'RESULTADO Z1-ZF'
    WRITE(11,*) 'NUMITER,ERRO:',NITER,ABS(ERRO)
    WRITE(11,*) 'X,Y(1)..Y(N):',X,(Y(I),I=1,N)
    WRITE(11,*) 'XOI,YI(1)..YI(N)',XOI,(YI(I),I=1,N)
    WRITE(11,*) 'PAR(1)..PAR(NPAR):',(PAR(I),I=1,NPAR)

ENDIF

DO 900 I=1,N,1
    YI(I)=YR(I)
900 CONTINUE
XOI=XOR

```

```
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE CALCNI
```

```
INTEGER N,NPAR,I,ITERMAX,nproc,nensaio,niter
DOUBLE PRECISION H,ERROMAX,DELTA,INTER,X0I,YI(100),
+ PAR(100),Y(100),ERRO,C1,C2,DC1DA,DA,erroz1,erroz2,thetal
```

```
erroz1=0
erroz2=0
thetal=0
```

```
CALL LEDADOS(H,ERROMAX,ITERMAX,DELTA,INTER,X0I,YI,PAR,N,
+ NPAR)
```

```
read(10,*) nproc
```

```
do 50 i=1,nproc,1
```

```
read(10,*) NENSAIO,YI(4),PAR(6),PAR(7),PAR(2),PAR(13)
write(11,*) 'Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F '
write(11,10) NENSAIO,YI(4),PAR(6),PAR(7),PAR(2),PAR(13)
10 FORMAT (I8, 5D15.3)
```

```
NITER=0
ERRO=ERROMAX+1.0D0
```

```
100 IF (NITER.LT.ITERMAX.AND.ERRO.GT.ERROMAX) THEN
NITER=NITER+1
```

```
CALL CONTROLA(H,ERROMAX,ITERMAX,DELTA,INTER,X0I,YI,PAR,N,
+ NPAR,Y,erroz1,erroz2,thetal)
```

```
if (erroz1.GT.erromax.or.erroz2.GT.erromax) then
write(11,*) 'Erro na determinacao do balao'
endif
```

```
C1=Y(3)-PAR(13)
```

```
ERRO=ABS(C1)
```

```
WRITE(*,*) NITER,'NI= ',PAR(9),' ERRO=',ERRO,' Of=',Y(3)
```

```
IF (ERRO.GT.ERROMAX) THEN
```

```
C2=PAR(9)
PAR(9)=C2-DELTA
```

```
CALL CONTROLA(H,ERROMAX,ITERMAX,DELTA,INTER,X0I,YI,PAR,N,
+ NPAR,Y,erroz1,erroz2,thetal)
```

```
if (erroz1.GT.erromax.or.erroz2.GT.erromax) then
write(11,*) 'Erro na determinacao do balao'
endif
```

```
DC1DA=Y(3)-PAR(13)
```

```
PAR(9)=C2+DELTA
```

```
CALL CONTROLA(H,ERROMAX,ITERMAX,DELTA,INTER,X0I,YI,PAR,N,
+ NPAR,Y,erroz1,erroz2,thetal)
```

```
if (erroz1.GT.erromax.or.erroz2.GT.erromax) then
write(11,*) 'Erro na determinacao do balao'
```

```
endif

DC1DA=(Y(3)-PAR(13)-DC1DA)/(2*DELTA)

IF (DC1DA.EQ.0.0) THEN

    NITER=2*ITERMAX
    DA=0

ELSE
    DA=C1/DC1DA
END IF

PAR(9)=C2-DA

END IF
GO TO 100
END IF
write(11,*) ' u , thetad , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , thetad , z2 '
write(11,20) PAR(9),Y(3),NITER,ERRO, YI(5) , par(4) , thetad , par(5)
20  format( 2D15.3,I10,5D15.3)
write(11,*)
50  continue
    CLOSE (UNIT=11)
    CLOSE (UNIT=10)
RETURN
END

PROGRAM CORDA

CALL CALCNI
read(*,*)

STOP
END
```

5.2 coeficiente de atrito em função do ângulo final 50% PAC/CO

```

X0= 0.000000000000000E+000
H= 1.000000000000000E-006
ERROMAX= 1.000000000000000E-005
ITERMAX= 10
DELTA = 1.000000000000000E-004
PASSO DE IMPRESSAO DA SOLUCAO= 0.000000000000000E+000
VALORES INICIAIS N= 10
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
1.240000000000000
0.760000000000000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
PARAMETROS NPAR= 15
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
4.600000000000000E-004
1.500000000000000
2.850000000000000
3.500000000000000
0.636000000000000
1.000000000000000
0.200000000000000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
2271 0.182D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.574D+01 -0.139D+01
u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
0.740D+00 -0.139D+01 5 0.402D-05 0.687D+00 0.174D+01 -0.133D+00
0.219D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
2272 0.176D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.574D+01 -0.131D+01
u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
0.486D+00 -0.131D+01 5 0.501D-05 0.697D+00 0.170D+01 -0.134D+00
0.230D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
2273 0.176D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.574D+01 -0.140D+01
u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
0.581D+00 -0.140D+01 4 0.428D-05 0.697D+00 0.170D+01 -0.134D+00
0.225D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
2274 0.176D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.574D+01 -0.900D+00
u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
0.106D+00 -0.900D+00 5 0.131D-05 0.697D+00 0.170D+01 -0.134D+00
0.248D+01

```

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
 2275 0.176D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.574D+01 -0.133D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.504D+00 -0.133D+01 5 0.182D-05 0.697D+00 0.170D+01 -0.134D+00
 0.229D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
 2276 0.176D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.574D+01 -0.124D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.418D+00 -0.124D+01 4 0.633D-05 0.697D+00 0.170D+01 -0.134D+00
 0.234D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
 2277 0.183D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.574D+01 -0.110D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.367D+00 -0.110D+01 4 0.318D-06 0.686D+00 0.175D+01 -0.133D+00
 0.235D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
 2278 0.179D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.574D+01 -0.120D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.427D+00 -0.120D+01 4 0.902D-05 0.691D+00 0.172D+01 -0.133D+00
 0.233D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
 2279 0.169D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.574D+01 -0.165D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.678D+00 -0.165D+01 5 0.462D-06 0.709D+00 0.164D+01 -0.134D+00
 0.215D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
 2280 0.179D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.574D+01 -0.137D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.633D+00 -0.137D+01 4 0.407D-05 0.691D+00 0.172D+01 -0.133D+00
 0.223D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
 2281 0.193D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.574D+01 -0.128D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.933D+00 -0.128D+01 5 0.454D-05 0.670D+00 0.182D+01 -0.132D+00
 0.217D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
 2644 0.154D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.523D+01 -0.121D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.232D+00 -0.121D+01 3 0.339D-05 0.736D+00 0.153D+01 -0.123D+00
 0.251D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
 2645 0.152D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.523D+01 -0.125D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.241D+00 -0.125D+01 3 0.586D-05 0.739D+00 0.151D+01 -0.123D+00
 0.251D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
 2646 0.147D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.523D+01 -0.146D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.304D+00 -0.146D+01 4 0.379D-05 0.749D+00 0.147D+01 -0.124D+00
 0.247D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
 2319 0.127D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.523D+01 -0.218D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2

0.320D+00	-0.218D+01	6	0.344D-05	0.793D+00	0.130D+01	-0.127D+00
0.237D+01 Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F						
Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F						
2320	0.132D+01	0.346D+01	0.694D+00	0.523D+01	-0.190D+01	
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2						
0.309D+00	-0.190D+01	5	0.496D-05	0.783D+00	0.134D+01	-0.126D+00
0.245D+01						
Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F						
2321	0.132D+01	0.346D+01	0.694D+00	0.523D+01	-0.177D+01	
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2						
0.277D+00	-0.177D+01	4	0.982D-05	0.783D+00	0.134D+01	-0.126D+00
0.251D+01						
Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F						
2649	0.160D+01	0.346D+01	0.694D+00	0.523D+01	-0.117D+01	
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2						
0.261D+00	-0.117D+01	4	0.891D-05	0.724D+00	0.158D+01	-0.122D+00
0.248D+01						
Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F						
2647	0.167D+01	0.346D+01	0.694D+00	0.523D+01	-0.147D+01	
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2						
0.571D+00	-0.147D+01	4	0.233D-05	0.713D+00	0.163D+01	-0.122D+00
0.228D+01						
Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F						
2323	0.141D+01	0.346D+01	0.694D+00	0.574D+01	-0.161D+01	
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2						
0.254D+00	-0.161D+01	5	0.848D-05	0.763D+00	0.142D+01	-0.137D+00
0.249D+01						
Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F						
2651	0.156D+01	0.346D+01	0.694D+00	0.523D+01	-0.124D+01	
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2						
0.268D+00	-0.124D+01	3	0.456D-05	0.732D+00	0.155D+01	-0.123D+00
0.248D+01						
Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F						
2652	0.129D+01	0.346D+01	0.694D+00	0.523D+01	-0.176D+01	
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2						
0.252D+00	-0.176D+01	4	0.517D-05	0.789D+00	0.131D+01	-0.126D+00
0.255D+01						
Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F						
2650	0.165D+01	0.346D+01	0.694D+00	0.523D+01	-0.960D+00	
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2						
0.153D+00	-0.960D+00	4	0.385D-05	0.716D+00	0.161D+01	-0.122D+00
0.252D+01						
Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F						
2654	0.172D+01	0.346D+01	0.694D+00	0.523D+01	-0.127D+01	
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2						
0.474D+00	-0.127D+01	4	0.642D-05	0.703D+00	0.167D+01	-0.122D+00
0.234D+01						
Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F						
2653	0.132D+01	0.346D+01	0.694D+00	0.523D+01	-0.180D+01	
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2						
0.287D+00	-0.180D+01	4	0.129D-05	0.782D+00	0.134D+01	-0.126D+00
0.250D+01						
Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F						
2656	0.135D+01	0.346D+01	0.694D+00	0.523D+01	-0.155D+01	
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2						

0.237D+00 -0.155D+01 4 0.493D-05 0.775D+00 0.137D+01 -0.125D+00
0.256D+01

2326 0.136D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.523D+01 -0.166D+01

u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2

0.281D+00 -0.166D+01 7 0.581D-05 0.773D+00 0.138D+01 -0.125D+00
0.251D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F

2328 0.136D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.523D+01 -0.170D+01

u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2

0.292D+00 -0.170D+01 3 0.256D-05 0.773D+00 0.138D+01 -0.125D+00
0.249D+01

2657 0.144D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.523D+01 -0.120D+01

u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2

0.164D+00 -0.120D+01 4 0.469D-05 0.756D+00 0.145D+01 -0.124D+00
0.259D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F

2658 0.168D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.523D+01 -0.921D+00

u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2

0.147D+00 -0.921D+00 3 0.853D-05 0.710D+00 0.164D+01 -0.122D+00
0.251D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F

2333 0.125D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.523D+01 -0.200D+01

u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2

0.275D+00 -0.200D+01 4 0.940D-05 0.798D+00 0.127D+01 -0.127D+00
0.250D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F

2659 0.144D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.523D+01 -0.115D+01

u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2

0.142D+00 -0.115D+01 4 0.146D-05 0.756D+00 0.145D+01 -0.124D+00
0.260D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F

2661 0.128D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.523D+01 -0.123D+01

u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2

0.907D-01 -0.123D+01 4 0.949D-05 0.792D+00 0.130D+01 -0.127D+00
0.270D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F

2660 0.147D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.523D+01 -0.142D+01

u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2

0.285D+00 -0.142D+01 4 0.890D-05 0.749D+00 0.147D+01 -0.124D+00
0.249D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F

2270 0.186D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.662D+01 -0.145D+01

u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2

0.706D+00 -0.145D+01 5 0.781D-05 0.680D+00 0.178D+01 -0.154D+00
0.214D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F

2268 0.189D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.123D+01

u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2

0.491D+00 -0.123D+01 4 0.857D-05 0.676D+00 0.179D+01 -0.149D+00
0.225D+01

5.3 coeficiente de atrito em função do ângulo final 100% PAC

```

X0= 0.000000000000000E+000
H= 1.000000000000000E-006
ERROMAX= 1.000000000000000E-005
ITERMAX=      10
DELTA = 1.000000000000000E-004
PASSO DE IMPRESSAO DA SOLUCAO= 0.000000000000000E+000
VALORES INICIAIS N=      10
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
1.240000000000000
0.760000000000000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
PARAMETROS NPAR=      15
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
4.600000000000000E-004
1.500000000000000
2.850000000000000
3.500000000000000
0.636000000000000
1.000000000000000
0.200000000000000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000
Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
2260  0.169D+01  0.346D+01  0.694D+00  0.639D+01  -0.177D+01
u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
0.643D+00 -0.177D+01  4  0.965D-05  0.708D+00  0.165D+01  -0.150D+00
0.208D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
2261  0.169D+01  0.346D+01  0.694D+00  0.639D+01  -0.151D+01
u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
0.434D+00 -0.151D+01  4  0.662D-05  0.708D+00  0.165D+01  -0.150D+00
0.226D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
2262  0.169D+01  0.346D+01  0.694D+00  0.639D+01  -0.147D+01
u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
0.408D+00 -0.147D+01  3  0.357D-05  0.708D+00  0.165D+01  -0.150D+00
0.228D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
2263  0.169D+01  0.346D+01  0.694D+00  0.639D+01  -0.163D+01
u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
0.528D+00 -0.163D+01  4  0.341D-05  0.708D+00  0.165D+01  -0.150D+00
0.218D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F

```


2264 0.169D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.155D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.465D+00 -0.155D+01 4 0.981D-05 0.708D+00 0.165D+01 -0.150D+00
 0.223D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2266 0.203D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.110D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.604D+00 -0.110D+01 8 0.464D-05 0.655D+00 0.189D+01 -0.148D+00
 0.223D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2268 0.203D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.123D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.101D+01 -0.123D+01 6 0.581D-05 0.655D+00 0.189D+01 -0.148D+00
 0.215D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2269 0.203D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.961D+00
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.296D+00 -0.961D+00 6 0.371D-05 0.655D+00 0.189D+01 -0.148D+00
 0.231D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2270 0.186D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.162D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.126D+01 -0.162D+01 6 0.407D-05 0.680D+00 0.177D+01 -0.149D+00
 0.201D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2627 0.182D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.127D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.426D+00 -0.127D+01 4 0.329D-06 0.685D+00 0.175D+01 -0.149D+00
 0.228D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2628 0.163D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.163D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.416D+00 -0.163D+01 4 0.601D-05 0.719D+00 0.160D+01 -0.151D+00
 0.225D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2629 0.171D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.140D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.372D+00 -0.140D+01 4 0.446D-05 0.705D+00 0.166D+01 -0.150D+00
 0.231D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2632 0.180D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.999D+00
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.126D+00 -0.999D+00 5 0.750D-05 0.689D+00 0.173D+01 -0.149D+00
 0.242D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2633 0.180D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.995D+00
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.123D+00 -0.995D+00 4 0.478D-05 0.689D+00 0.173D+01 -0.149D+00
 0.243D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2634 0.148D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.131D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2

0.134D+00 -0.131D+01 4 0.942D-06 0.746D+00 0.149D+01 -0.152D+00
0.253D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
2631 0.179D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.135D+01
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2
0.458D+00 -0.135D+01 5 0.390D-05 0.691D+00 0.172D+01 -0.149D+00
0.226D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
2334 0.158D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.148D+01
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2
0.279D+00 -0.148D+01 4 0.551D-05 0.728D+00 0.156D+01 -0.151D+00
0.238D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
2335 0.172D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.108D+01
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2
0.140D+00 -0.108D+01 4 0.563D-05 0.703D+00 0.167D+01 -0.150D+00
0.245D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
2336 0.153D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.148D+01
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2
0.240D+00 -0.148D+01 4 0.438D-05 0.737D+00 0.153D+01 -0.152D+00
0.243D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
2636 0.177D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.126D+01
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2
0.334D+00 -0.126D+01 4 0.511D-05 0.695D+00 0.171D+01 -0.149D+00
0.233D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
2635 0.167D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.144D+01
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2
0.356D+00 -0.144D+01 4 0.814D-05 0.712D+00 0.163D+01 -0.150D+00
0.232D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
2337 0.162D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.144D+01
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2
0.306D+00 -0.144D+01 3 0.654D-05 0.720D+00 0.160D+01 -0.151D+00
0.236D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
2639 0.169D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.131D+01
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2
0.292D+00 -0.131D+01 6 0.744D-05 0.707D+00 0.165D+01 -0.150D+00
0.236D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
2341 0.144D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.144D+01
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2
0.158D+00 -0.144D+01 5 0.456D-05 0.756D+00 0.145D+01 -0.153D+00
0.253D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F
2342 0.162D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.130D+01
u, thetaf, num.iter, erro, dr/ds (0), z1, theta1, z2
0.221D+00 -0.130D+01 4 0.139D-05 0.720D+00 0.160D+01 -0.151D+00
0.243D+01

Num Ensaio, T, Zf, Rf, p0, Tetha F

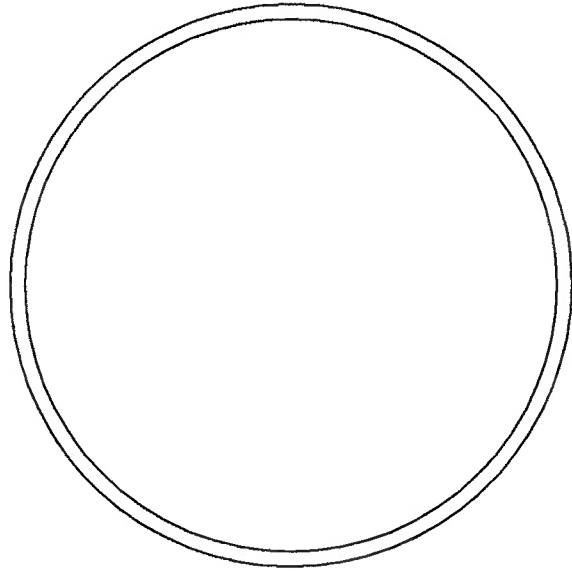
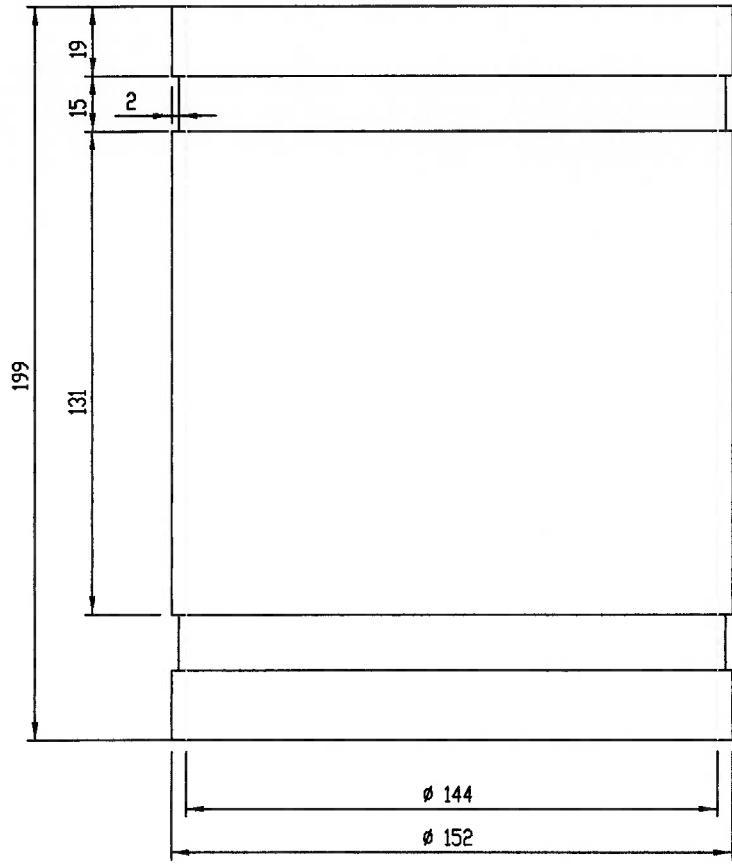
2343 0.155D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.157D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.301D+00 -0.157D+01 4 0.731D-05 0.733D+00 0.154D+01 -0.152D+00
 0.236D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2344 0.155D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.112D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.784D-01 -0.112D+01 5 0.286D-05 0.733D+00 0.154D+01 -0.152D+00
 0.254D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2345 0.151D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.109D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.442D-01 -0.109D+01 4 0.814D-05 0.742D+00 0.151D+01 -0.152D+00
 0.258D+01

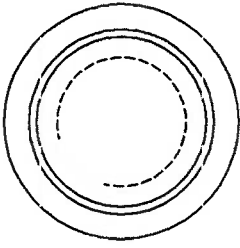
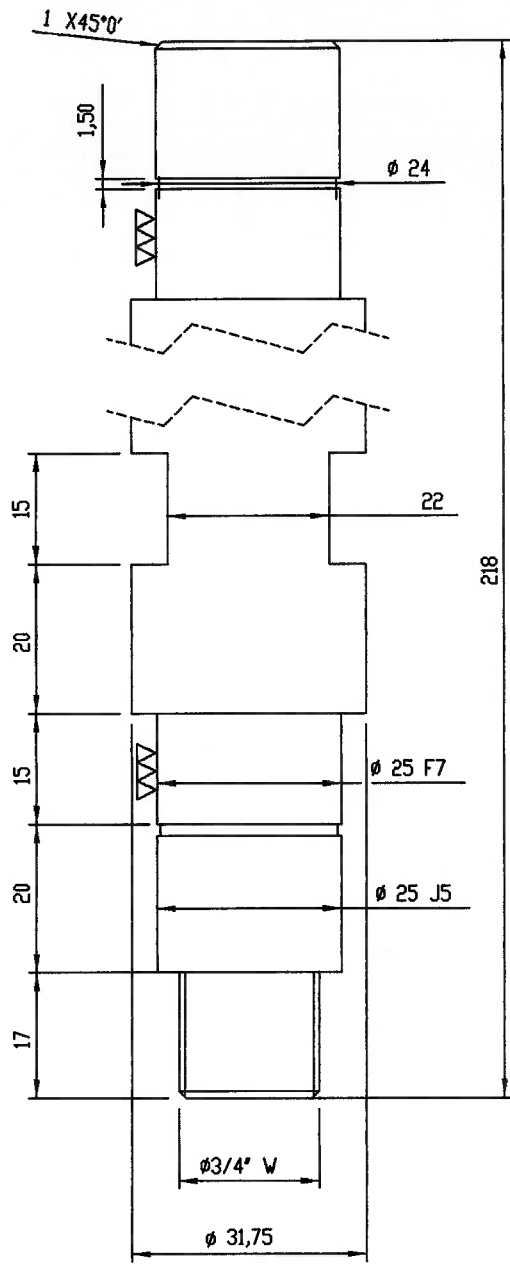
Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2642 0.126D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.163D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.119D+00 -0.163D+01 4 0.667D-05 0.796D+00 0.128D+01 -0.156D+00
 0.264D+01

Num Ensaio, T , Zf , Rf , p0 , Tetha F
 2643 0.159D+01 0.346D+01 0.694D+00 0.639D+01 -0.104D+01
 u , thetaf , num.iter , erro, dr/ds (0) , z1 , theta1 , z2
 0.496D-01 -0.104D+01 4 0.535D-05 0.727D+00 0.157D+01 -0.151D+00
 0.254D+01



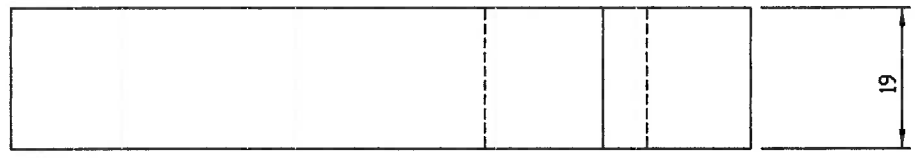
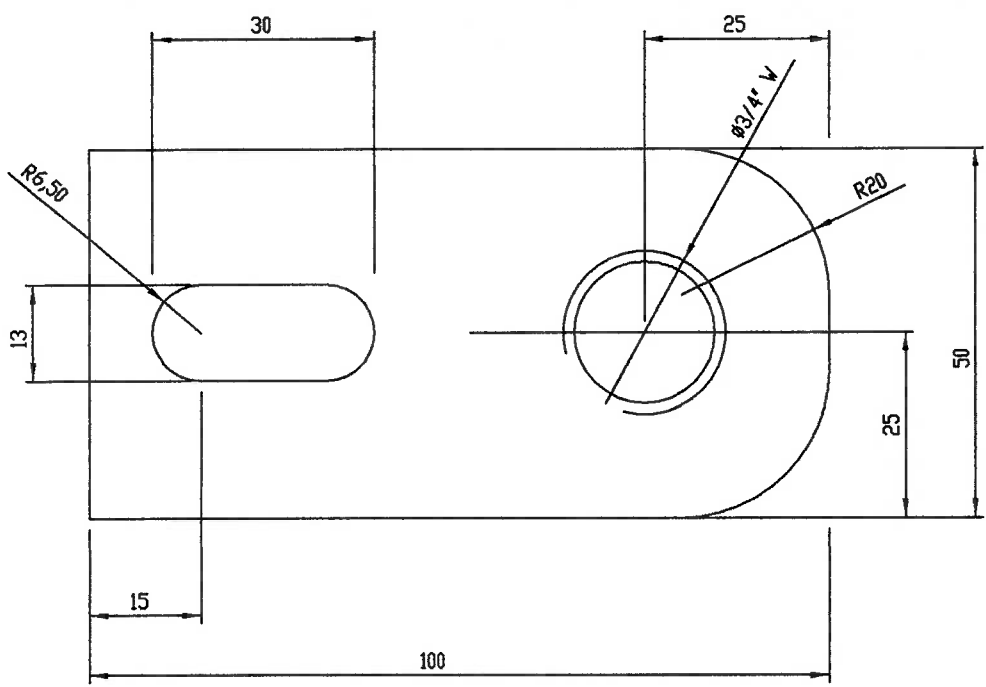
1 PEÇA

outros não especificados		regulamento		posição		PANELA ANTI-BALÃO		Escala		1:2	
dimensões em milímetros				1							
tolerâncias: +/- 0,05											
angular: +/- 0° 30'											
nome		assinatura		data							
				25/05/04							
des.											
rec.											
EV.				material		PESO					
				ALUMINIO						A4	



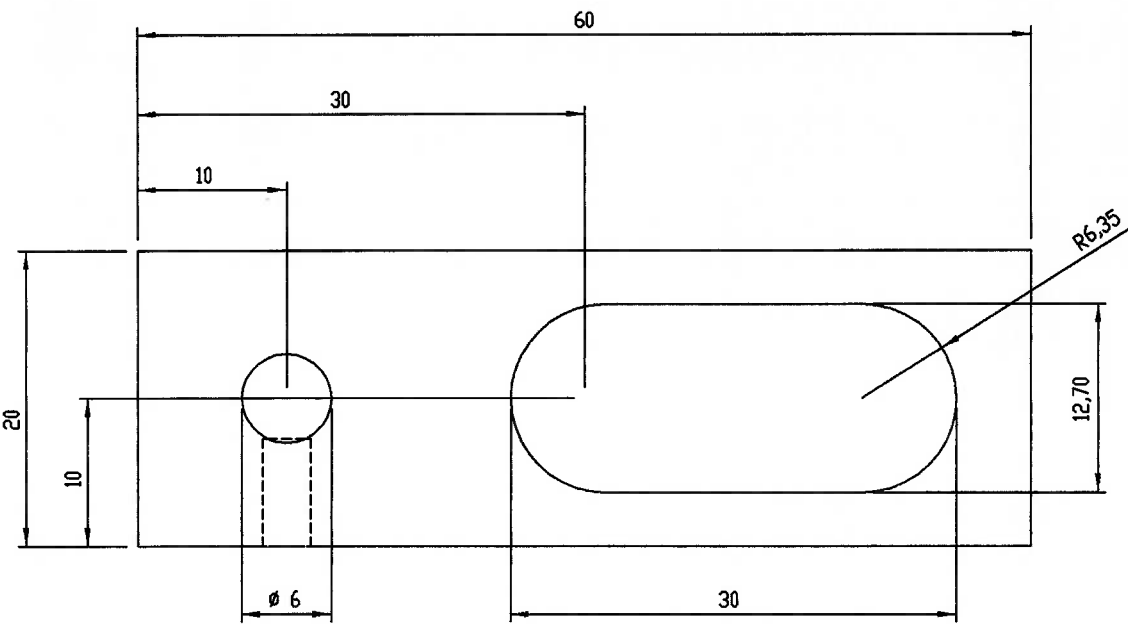
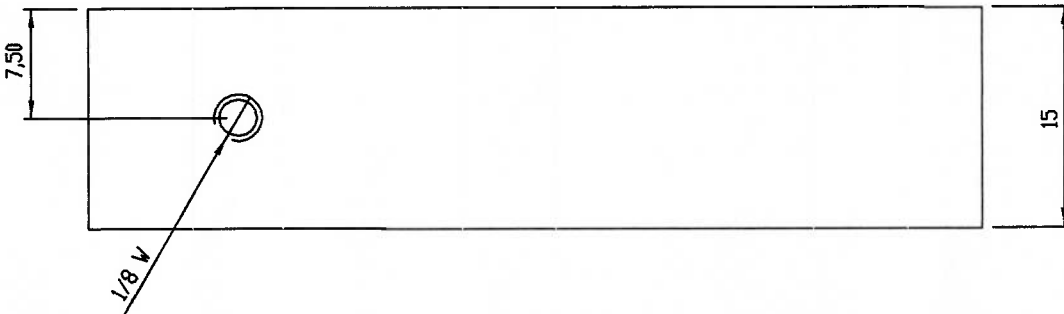
3 PEÇAS

dimensões não especificadas em milímetros		tolerâncias: +/- 0,05		angular: +/- 0° 30'		posição		EIXO		Escala	
						2				1:1	
ES.	nome	assinatura	data					peça nº			
REC.			25/05/04								
EV.				material:		PESU				A4	
				AÇO SAE 1045							



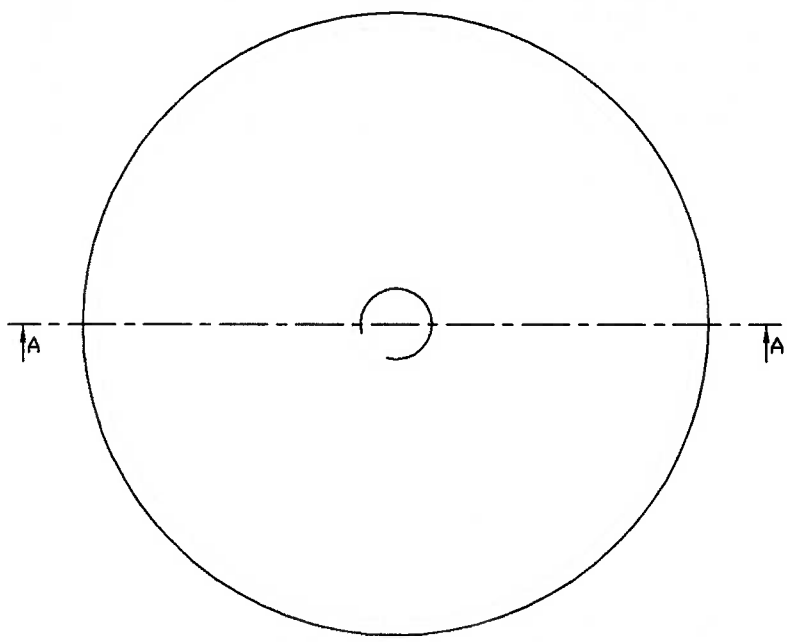
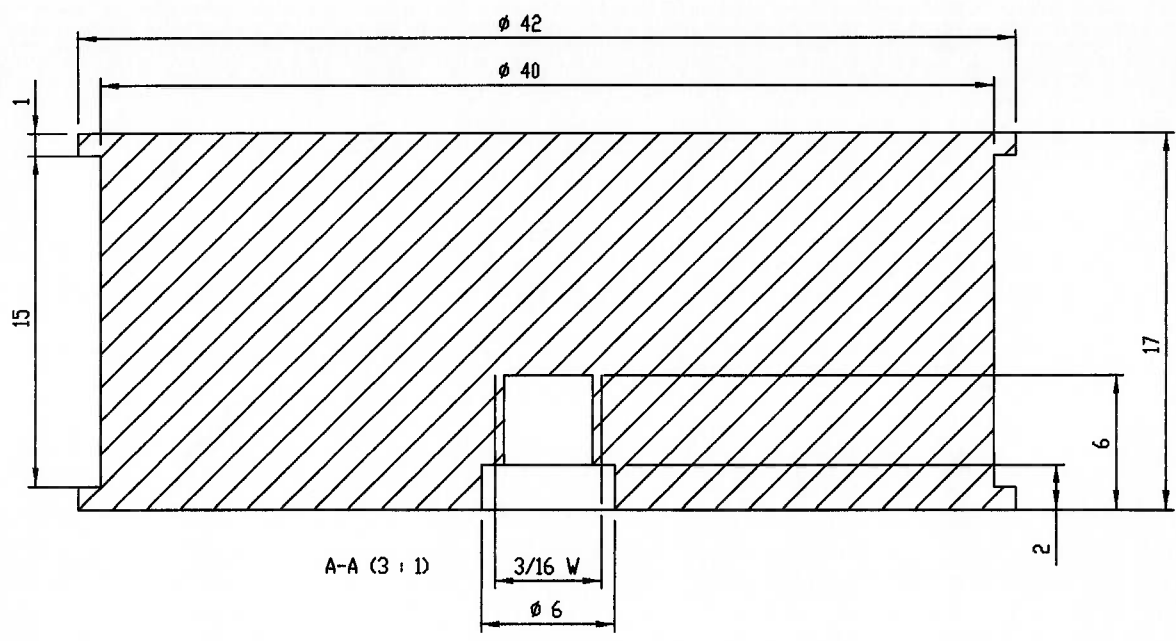
3 PEÇAS

dimensões não especificadas em milímetros			tolerâncias: +/- 0,05		angular: +/- 0° 30'		posição		4		MANCAL DO EIXO		Escala 1:1	
nome		assinatura		data		material		PESS		peça nº		A4		
				25/05/04		AÇO SAE 1020								
des.		rec.		EV.										



2 PEÇAS

dimensões não especificadas em milímetros			posiçao		BASE DO MOTOR		Escala 2:1	
tolerancias: +/- 0,05			6					
angular: +/- 0° 30'								
nome		assinatura		data		peça nº		
				25/05/04				
IS:								
EC:								
IV:				material		PESO		A4
				AÇO 1020				



1 PEÇA

dimensões não especificadas em milímetros		posição		POLIA DO MOTOR		Escala 2:1	
tolerâncias: +/- 0,05		8					
angular: +/- 0° 30'							
nome	assinatura	data		peça nº			
		25/05/04					
ES.							
EC.							
EV.		material	PESU			A4	
		ALUMINIO					