

1. Publicação nº <i>INPE-3032-RPI/091</i>	2. Versão	3. Data <i>Março 1984</i>	5. Distribuição <input checked="" type="checkbox"/> Interna <input type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DMC/DGC</i>	Programa <i>CONTAT</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>IOIÔ</i> <i>DESACELERAÇÃO ANGULAR DE SATÉLITES</i>			
7. C.D.U.: <i>629.783:629.7.05</i>			
8. Título <i>INPE-3032-RPI/091</i>  <i>ANTEPROJETO DE UM SISTEMA IOIÔ: EQUACIONAMENTO E DIMENSIONAMENTO DE CABOS E PONTEIRAS</i>		10. Páginas: <i>49</i>	11. Última página: <i>B.4</i>
9. Autoria <i>Petrônio Noronha de Souza</i> <i>Ismael Emílio de Oliveira Júnior</i>		12. Revisada por  <i>Paulo Donato</i> <i>Paulo Donato A. Borges</i>	
Assinatura responsável <i>Petrônio Noronha de Souza</i>		13. Autorizada por  <i>Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor Geral</i>	
14. Resumo/Notas  <i>O objetivo deste documento é apresentar o equacionamento de um dispositivo ioiô para a desaceleração de satélites, tanto do ponto de vista cinemático quanto de seu dimensionamento. Apresenta-se uma metodologia para o dimensionamento e resolve-se um caso típico.</i>			
15. Observações			

ABSTRACT

*This document deals with the design of a yoyo device for de-spinning a satellite after its orbital injection. The work takes into account the equations of motion and the project of the device. A design methodology is presented and a typical case is solved.*



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	<i>v</i>
LISTA DE TABELAS .....	<i>vii</i>
LISTA DE SÍMBOLOS .....	<i>ix</i>
1 - <u>INTRODUÇÃO</u> .....	1
2 - <u>EQUACIONAMENTO</u> .....	2
2.1 - Introdução ao equacionamento .....	2
2.2 - Equacionamento cinemático .....	3
2.2.1 - Equações que regem a primeira fase .....	3
2.2.2 - Equações que regem a segunda fase .....	8
2.3 - Tração nos cabos .....	12
2.3.1 - Tração nos cabos durante a primeira fase .....	12
2.3.2 - Tração nos cabos durante a segunda fase .....	17
2.4 - Metodologia do dimensionamento .....	18
3 - <u>DIMENSIONAMENTO DE CABOS E PONTEIRAS</u> .....	20
4 - <u>CONCLUSÕES</u> .....	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	29
APÊNDICE A - AVALIAÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DA MASSA DO CABO	
APÊNDICE B - PROGRAMA DE COMPUTADOR	



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Referenciais utilizados durante a primeira fase .....	4
2 - Referenciais utilizados durante a segunda fase .....	9
3 - Gráfico para análise conjunta dos cabos .....	26



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1 - Análise do cabo A .....	21
2 - Análise do cabo B .....	22
3 - Análise do cabo C .....	23
4 - Análise do cabo D .....	24
5 - Análise do cabo E .....	25





## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	- Raio de enrolamento do cabo, m
$\epsilon$	- Energia cinética, $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$
$H$	- Quantidade de movimento angular, $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$
$I$	- Momento de inércia longitudinal do conjunto satélite, cone de acoplamento e motor de apogeu, $\text{kgm}^2$
$\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$	- Versores do referencial OXYZ
$k$	- Participação da massa do cabo na massa equivalente, kg
$\ell$	- Comprimento instantâneo do cabo, m
$L$	- Comprimento final do cabo, m
$m_p$	- Massa de cada uma das ponteiros, kg
$m$	- Massa equivalente ( $m = 2m_p + 2k$ ), kg
$r$	- Posição no referencial Oxyz, m
$T$	- Tração no cabo, $\text{kgms}^{-2}$
$\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}$	- Versores do referencial Oxyz
$v$	- Velocidade absoluta no referencial Oxyz, $\text{ms}^{-1}$
$x$	- Coordenada ao longo do cabo, m
$\beta$	- Ângulo do cabo com a tangente ao satélite, rad
$\lambda$	- Índice de inércia, $\text{m}^2$
$\rho$	- Densidade linear do cabo, $\text{kgm}^2$
$\psi$	- Ângulo de desenrolamento do cabo, rad
$\omega$	- Velocidade angular do satélite, $\text{s}^{-1}$
$\Omega$	- Velocidade angular do referencial Oxyz, $\text{s}^{-1}$
$o$	- Condição inicial de uma variável
$f_1$	- Quantidade final referente à fase um
$f$	- Quantidade final referente à fase dois
$p$	- Quantidade referente à ponteira

- c - Quantidade referente ao cabo inteiro
- máx - Quantidade máxima aproximada
- x - Quantidade referente a um ponto do cabo
- or - Referente à origem
- ( $\dot{\quad}$ ) - Derivada em relação ao tempo de ( )
- ( $\ddot{\quad}$ ) - Derivada segunda em relação ao tempo de ( )
- - Sobre uma variável indica versor
- $\rightarrow$  - Sobre uma variável indica vetor
- ( $\vec{\quad}$ )  $\cdot$  ( $\vec{\quad}$ ) - Produto escalar
- ( $\vec{\quad}$ )  $\wedge$  ( $\vec{\quad}$ ) - Produto vetorial

## 1. INTRODUÇÃO

No lançamento de um satélite, muitas forças perturbadoras tendem a alterar sua trajetória até que ele chegue à sua órbita de trabalho. Estas forças tornam-se particularmente críticas na fase de injeção em órbita, onde uma das alternativas para diminuir seus efeitos é imprimir uma rotação no satélite. Entretanto, atingida a órbita nominal, torna-se necessário eliminar esta rotação para que o satélite possa dar início à sua missão. Uma das formas mais simples para se conseguir isto é empregar um dispositivo de frenagem chamado "ioiô".

Um dispositivo ioiô consta basicamente de dois cabos em cujas pontas são fixados blocos com massa determinada, chamados ponteiros. Quando acionado o dispositivo, as ponteiros absorvem energia e quantidade de movimento angular do satélite, até que este último esteja com a velocidade angular desejada. Neste instante os cabos liberam-se do satélite e projetam-se no espaço, juntamente com as ponteiros. O princípio de funcionamento deste tipo de dispositivo baseia-se na conservação da energia e na conservação da quantidade de movimento angular do conjunto satélite mais ioiô.

Antes do acionamento, os cabos estão presos em ganchos que se ligam ao corpo do satélite e enrolados em guias, também solidárias ao satélite. Em sua outra extremidade, estão rigidamente fixadas as ponteiros, que permanecem fixas às suas bases por meio de parafusos explosivos (dispositivos pirotécnicos).

No instante do acionamento, um sinal é enviado aos dispositivos pirotécnicos que se cisalham e liberam as ponteiros, as quais começam a afastar-se do satélite pela ação da força centrífuga. Enquanto isto ocorre, sua velocidade de rotação em relação ao satélite cresce, ou seja, este último está fornecendo energia e quantidade de movimento angular às ponteiros. Quando os cabos estão totalmente desenrolados, eles ainda descrevem um ângulo de  $90^{\circ}$  em relação ao satélite, desde o instante em que eles estão tangentes à superfície de enrolamento até o

instante em que ficam radiais. Neste exato momento, os cabos soltam-se do satélite. O projeto ideal é aquele em que esta soltura dos cabos ocorre no momento em que o satélite está com a velocidade final desejada.

Existem dois tipos de ioiô: um que utiliza cabos extensíveis (molas), e outro que emprega cabos inextensíveis.

Os ioiôs extensíveis são empregados somente quando a rotação final do satélite é relativamente elevada. Este tipo de ioiô oferece grande vantagem quando a rotação inicial do satélite não é exatamente conhecida, pois sua elasticidade compensa a diferença em relação à situação nominal, oferecendo maior precisão na rotação final.

Quando a rotação final desejada do satélite é baixa (eventualmente nula), fazendo os cálculos para o ioiô extensível verifica-se que a rigidez necessária para os cabos é bastante elevada (eventualmente infinita), de onde se deduz que nestes casos deve-se empregar o ioiô inextensível.

No caso do primeiro satélite brasileiro, como a rotação final é baixa (~5 rpm), verificou-se que seria mais adequado o ioiô inextensível. Assim sendo, aborda-se, neste relatório, somente este tipo de ioiô.

## 2. EQUACIONAMENTO

### 2.1 - INTRODUÇÃO AO EQUACIONAMENTO

O equacionamento visa determinar as velocidades angulares e as forças envolvidas durante o desenrolamento e é desenvolvido com relação a um referencial colocado no satélite, supondo que há conservação da energia cinética de rotação em torno do centro de massa e da quantidade de movimento angular, também em relação ao centro de massa.

Tanto o satélite quanto as ponteiros e os cabos estão sujeitos à atração gravitacional que os mantém em órbita e a esforços perturbadores, tais como arrasto aerodinâmico, pressão de radiação, etc.

A despeito dessas forças, as duas hipóteses de conservação são aceitáveis, pois:

- o desenrolamento é muito rápido, não dando tempo para que as forças dissipativas, como o arrasto aerodinâmico, tenham efeito relevante;
- para o referencial colocado no satélite, o movimento orbital é uma queda livre e, portanto, é como se ele estivesse completamente isolado no espaço.

O equacionamento é dividido em duas fases. Na primeira delas o cabo está desenrolando-se e na segunda ele está articulado e buscando a direção radial para se soltar logo após.

## 2.2 - EQUACIONAMENTO CINEMÁTICO

### 2.2.1 - EQUAÇÕES QUE REGEM A PRIMEIRA FASE

Durante a primeira fase, o cabo desenrola-se mantendo uma posição tangente à superfície circular definida pelas guias sobre as quais ele é enrolado. A Figura 1 mostra o referencial fixo ao satélite (OXYZ) e o referencial que se move juntamente com o cabo (Oxyz).

Como esclarecido anteriormente, a equação do movimento é obtida supondo a conservação da energia cinética de rotação e da quantidade de movimento angular.

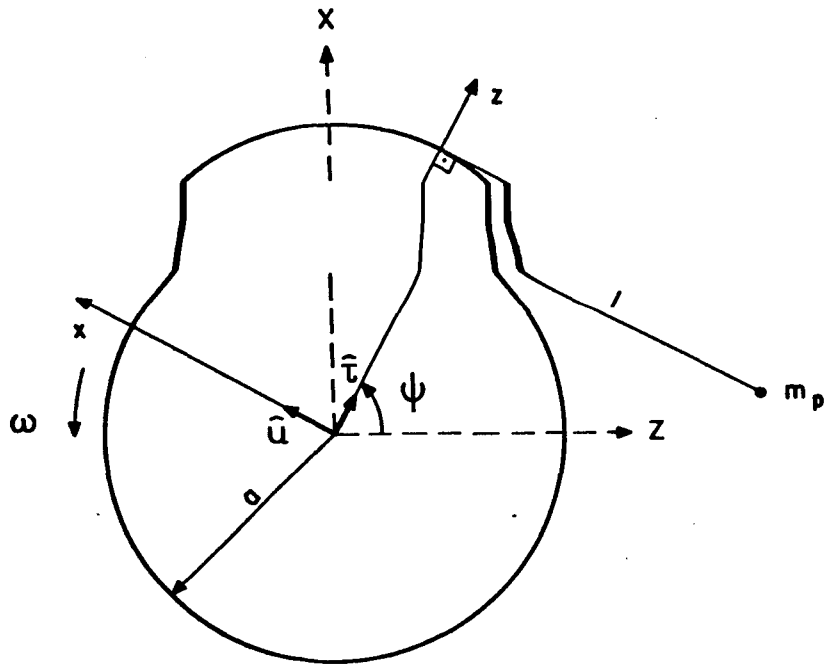


Fig. 1 - Referenciais utilizados durante a primeira fase.

A energia cinética de rotação inicial  $\bar{\epsilon}$  é dada por:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{2} I \omega_0^2 + \frac{1}{2} (2m_p + 2k) \omega_0^2 ,$$

ou seja:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{2} (I + ma^2) \omega_0^2 . \tag{1}$$

O primeiro termo corresponde à energia cinética do conjunto satélite mais cone de acoplamento e mais motor de apogeu, e o segundo termo corresponde à energia cinética do ioiô, admitindo-se que toda massa está concentrada na ponteira.

A quantidade do movimento angular inicial  $\bar{H}$  é dada por:

$$\vec{H}_0 = I \omega_0 \hat{j} + (2m_p + 2k) \omega_0 a^2 \hat{j} ,$$

ou seja:

$$\vec{H}_0 = (I + ma^2) \omega_0 \hat{j}. \quad (2)$$

O cálculo da energia cinética e da quantidade de movimento angular, após a soltura das ponteiros, exige o conhecimento de suas velocidades, que é calculada a seguir.

A equação geral para a velocidade de partículas em referenciais móveis é:

$$\vec{v}_p = \vec{v}_{or} + \vec{\Omega} \wedge \vec{r}_p + \dot{\vec{r}}_p, \quad (3)$$

onde para o caso em questão:

$$\vec{v}_{or} = \vec{0},$$

$$\vec{\Omega} = (\omega + \dot{\psi}) \hat{j}, \quad (4)$$

$$\vec{r}_p = a\hat{\tau} - a\psi\hat{u}, \quad (5)$$

ficando:

$$\vec{v}_p = (\omega + \dot{\psi})\hat{j} \wedge (\hat{\tau} - \psi\hat{u})a - a\dot{\psi}\hat{u} = (\omega + \dot{\psi})a\psi\hat{\tau} + \omega a\hat{u}. \quad (6)$$

A energia cinética durante o desenrolamento é dada por:

$$\epsilon = \frac{1}{2} I\omega^2 + \frac{1}{2} m[(\omega + \dot{\psi})^2 a^2 \psi^2 + \omega^2 a^2]. \quad (7)$$

A quantidade do movimento angular durante o desenrolamento é dada por:



$$\vec{H} = I\omega\hat{j} + m\vec{r}_p \wedge \vec{v}_p, \quad (8)$$

onde  $\vec{r}_p$  e  $\vec{v}_p$  são dadas pelas Equações 5 e 6, respectivamente.

Assim sendo:

$$\begin{aligned} m\vec{r}_p \wedge \vec{v}_p &= m(a\hat{\tau} - a\psi\hat{u}) \wedge [(\omega + \dot{\psi})a\psi\hat{\tau} + \omega a\hat{u}] = \\ &= [ma^2\omega + ma^2\psi^2(\omega + \dot{\psi})] \hat{j}. \end{aligned} \quad (9)$$

Substituindo a Equação 9 na Equação 8, tem-se:

$$\vec{H} = [I\omega + ma^2\omega + ma^2\psi^2(\omega + \dot{\psi})] \hat{j}. \quad (10)$$

A equação do movimento é obtida a partir do sistema de equações que surge ao se igualarem o valor de energia cinética, bem como o de quantidade de movimento angular durante o desenrolamento, aos seus valores iniciais. Assim, iguala-se a Equação 7 a 1 do seguinte modo:

$$\frac{1}{2} (I + ma^2)\omega_0^2 = \frac{1}{2} I\omega^2 + \frac{1}{2} m[(\omega + \dot{\psi})^2 a^2 \psi^2 + \omega^2 a^2].$$

Simplificando a expressão acima e fazendo  $\lambda = I/m + a^2$ , obtêm-se:

$$\lambda(\omega_0^2 - \omega^2) = a^2\psi^2(\omega + \dot{\psi})^2. \quad (11)$$

Igualando a Equação 10 a 2, chega-se a:

$$(I + ma^2)\omega_0 = (I + ma^2)\omega + ma^2\psi^2(\omega + \dot{\psi})$$

que, com a substituição de  $\lambda$ , fica:

$$\lambda(\omega_0 - \omega) = a^2\psi^2(\omega + \dot{\psi}). \quad (12)$$

Dividindo a Equação 11 pela 12, tem-se:

$$\frac{\lambda(\omega_0 - \omega)(\omega_0 + \omega)}{\lambda(\omega_0 - \omega)} = \frac{a^2\dot{\psi}^2(\omega + \dot{\psi})^2}{a^2\dot{\psi}^2(\omega + \dot{\psi})},$$

de onde se conclui que:

$$\omega_0 + \omega = \omega + \dot{\psi},$$

ou seja:

$$\dot{\psi} = \omega_0. \quad (13)$$

Isto significa que a velocidade angular do cabo, durante o desenrolamento, em relação ao referencial fixo ao satélite é igual à velocidade angular inicial deste.

Como:

$$l = a\psi \quad (14)$$

e

$$\psi = \omega_0 t, \quad (15)$$

tem-se que:

$$l = a\omega_0 t \quad (16)$$

que, substituído na Equação 12, fornece:

$$\lambda(\omega_0 - \omega) = a^2\omega_0^2 t^2(\omega + \omega_0),$$

ou seja:

$$\lambda\omega_0 - \lambda\omega = a^2\omega_0^2 t^2\omega + a^2\omega_0^2 t^2\omega_0 .$$

Isolando  $\omega$ , obtêm-se:

$$\omega = \frac{\lambda - a^2\omega_0^2 t^2}{\lambda + a^2\omega_0^2 t^2} \omega_0 .$$

Levando em conta a Equação 16, tem-se:

$$\omega = \frac{\lambda - \ell^2}{\lambda + \ell^2} \omega_0 . \quad (17)$$

Esta equação dá a velocidade angular do satélite em qual quer ponto durante a primeira fase. No final dela, quando  $\ell = L$ , a velocidade angular é dada por:

$$\omega f_1 = \frac{\lambda - L^2}{\lambda + L^2} \omega_0 . \quad (18)$$

### 2.2.2 - EQUAÇÕES QUE REGEM A SEGUNDA FASE

Durante a segunda fase, o cabo já totalmente desenrolado e preso ao cone de acoplamento por meio de um gancho, gira da posição tangente até a posição radial em relação ao eixo de simetria do cone.

Para o equacionamento dessa fase, recorre-se a um referencial móvel distinto daquele utilizado durante a primeira fase. Este novo sistema é apresentado na Figura 2.

Como foi feito durante a primeira fase, nesta nova etapa, o equacionamento também parte da conservação da quantidade de movimento angular e da energia cinética de rotação.

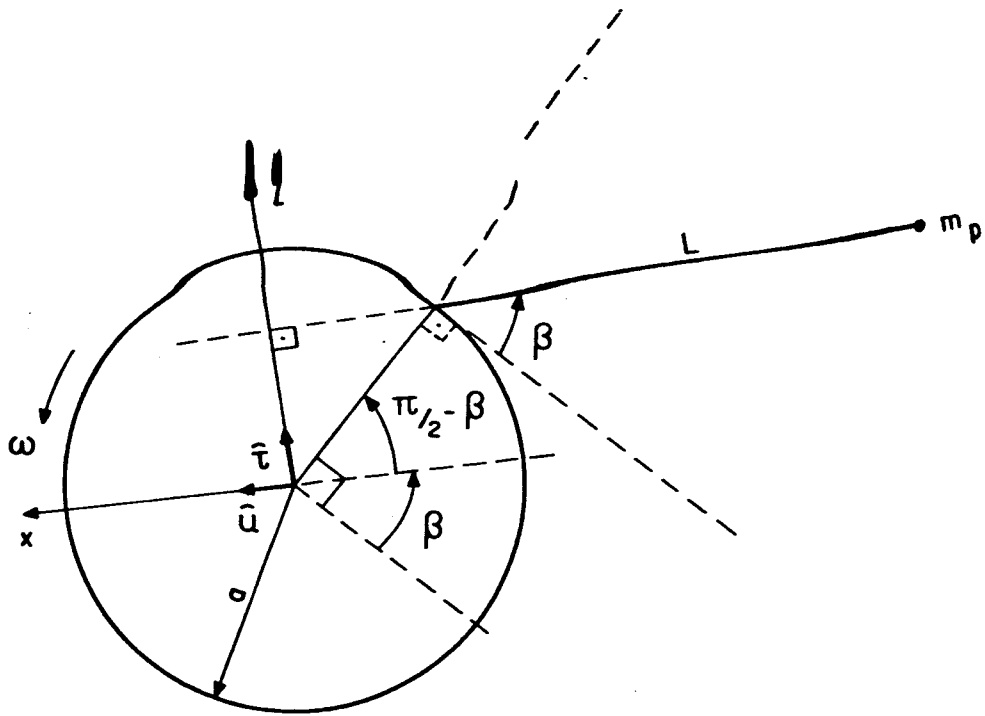


Fig. 2 - Referenciais utilizados durante a segunda fase.

A posição da ponteira, conforme a Figura 2, é dada pela seguinte equação:

$$\vec{r}_p = a \operatorname{sen}(\pi/2 - \beta)\vec{\tau} - [a \operatorname{cos}(\pi/2 - \beta) + L]\vec{u} \quad (19)$$

A velocidade da mesma é dada pela sua derivada:

$$\begin{aligned} \vec{v}_p = & a \operatorname{cos}(\pi/2 - \beta)(-\dot{\beta})\vec{\tau} - [-a \operatorname{sen}(\pi/2 - \beta)(-\dot{\beta})]\vec{u} + \\ & + a \operatorname{sen}(\pi/2 - \beta)(\omega + \dot{\beta})\vec{j} \wedge \vec{\tau} - [a \operatorname{cos}(\pi/2 - \beta) + L](\omega + \dot{\beta})\vec{j} \wedge \vec{u} , \end{aligned}$$

onde  $\vec{\Omega}$  é dado pela Equação 4.

Assim, fica-se com:

$$\vec{v}_p = a \operatorname{cos}(\pi/2 - \beta)\omega\vec{\tau} + L(\omega + \dot{\beta})\vec{\tau} + a\omega \operatorname{sen}(\pi/2 - \beta)\vec{u} . \quad (20)$$

A energia cinética é dada pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \epsilon = & \frac{1}{2} m v_p^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{2} m [a^2 \cos^2(\pi/2 - \beta) \omega^2 + \\ & + L^2(\omega + \dot{\beta})^2 + a^2 \omega^2 \sin^2(\pi/2 - \beta) + \\ & + 2L\omega(\omega + \dot{\beta}) a \cos(\pi/2 - \beta)] + \frac{1}{2} I \omega^2 . \end{aligned}$$

Agrupando os termos e fazendo  $(\pi/2 - \beta) = 0$ , pois o interesse maior está voltado para o momento em que o cabo se solta, a energia cinética fica:

$$\epsilon = \frac{1}{2} (I + ma^2) \omega_f^2 + \frac{1}{2} m [L^2(\omega_f + \dot{\beta})^2 + 2La(\omega_f + \dot{\beta})\omega_f] . \quad (21)$$

A quantidade de movimento angular  $\vec{H}$  é dada por:

$$\vec{H} = I\vec{\omega} + m\vec{r}_p \wedge \vec{v}_p ,$$

ou seja:

$$\begin{aligned} \vec{H} = & I\vec{\omega} + m\{a \sin(\pi/2 - \beta)\hat{\tau} - [a \cos(\pi/2 - \beta) + \\ & + L]\hat{u}\} \wedge [a \cos(\pi/2 - \beta)\omega\hat{\tau} + L(\omega + \dot{\beta})\hat{\tau} + a\omega \sin(\pi/2 - \beta)\hat{u}] . \end{aligned}$$

Agrupando os termos  $(\pi/2 - \beta) = 0$ , tem-se:

$$\vec{H} = [(I + ma^2)\omega_f + mL^2(\omega_f + \dot{\beta}) + maL(2\omega_f + \dot{\beta})] \vec{j} . \quad (22)$$

As quantidades dadas pelas Equações 21 e 22 podem ser igualadas às mesmas quantidades calculadas no final da primeira fase, com base na Equação 18, ou igualadas aos valores dados pelas Equações 1 e 22. Esta última é considerada a melhor opção.

Antes disso é necessário que se faça uma simplificação na Equação 21. Para ela, vale a seguinte afirmativa:

$$L^2(\omega_f + \dot{\beta})^2 \gg 2La(\omega_f + \dot{\beta})\omega ;$$

dessa forma, a Equação 21 é simplificada, ficando:

$$\epsilon = \frac{1}{2}(I + ma^2)\omega_f^2 + \frac{1}{2} mL^2(\omega_f + \dot{\beta})^2 . \quad (23)$$

Igualando a Equação 23 a 1, tem-se:

$$\frac{1}{2}(I + ma^2)\omega_0^2 = \frac{1}{2}(I + ma^2)\omega_f^2 + \frac{1}{2} mL^2(\omega_f + \dot{\beta})^2$$

que, agrupada e com a substituição  $\lambda$ , torna-se:

$$\lambda(\omega_0^2 - \omega_f^2) = L^2(\omega_f + \dot{\beta})^2 . \quad (24)$$

Igualando a Equação 22 a 2, tem-se:

$$(I + ma^2)\omega_0 = (I + ma^2)\omega_f + mL^2(\omega_f + \dot{\beta}) + maL(2\omega_f + \dot{\beta}) ,$$

ou:

$$\lambda(\omega_0 - \omega_f) = L^2(\omega_f + \dot{\beta}) + aL(2\omega_f + \dot{\beta}) . \quad (25)$$

As Equações 24 e 25 formam um sistema de duas equações com as incógnitas  $\omega$  e  $\dot{\beta}$ . Isolando  $\dot{\beta}$  da Equação 24, tem-se:

$$\dot{\beta} = \frac{\sqrt{\lambda(\omega_0^2 - \omega_f^2)}}{L} - \omega_f .$$

Substituindo este valor na Equação 25 esta resulta em:

$$\lambda(\omega_0 - \omega_f) = L^2\left(\omega_f + \frac{\sqrt{\lambda(\omega_0^2 - \omega_f^2)}}{L} - \omega_f\right) + \\ + aL\left(2\omega_f + \frac{\sqrt{\lambda(\omega_0^2 - \omega_f^2)}}{L} - \omega_f\right) ,$$

que equivale a:

$$\lambda(\omega_0 - \omega_f) = L \sqrt{\lambda(\omega_0^2 - \omega_f^2)} + aL \left( \omega_f + \frac{\sqrt{\lambda(\omega_0^2 - \omega_f^2)}}{L} \right) \\ \lambda\omega_0 - (\lambda + aL)\omega_f = (L + a) \sqrt{\lambda(\omega_0^2 - \omega_f^2)} .$$

Dessa forma, a equação que dá a velocidade angular final em função das condições e das características do ioiô é a seguinte:

$$[(\lambda + aL)^2 + (L + a)^2\lambda]\omega_f^2 - 2\lambda\omega_0(\lambda + aL)\omega_f + \\ + [\lambda - (L + a)^2]\lambda\omega_0^2 = 0 . \quad (26)$$

### 2.3 - TRAÇÃO NOS CABOS

#### 2.3.1 - TRAÇÃO NOS CABOS DURANTE A PRIMEIRA FASE

A tração no cabo é a força exercida sobre ele pela ponteira e por ele próprio ao longo do movimento. O seu valor equivale às acelerações da ponteira e do cabo multiplicadas por suas respectivas massas.

A velocidade da ponteira  $\bar{v}$  é dada pela Equação 6 aqui re-  
petida:

$$\vec{v}_p = (\omega + \dot{\psi})a\psi\bar{\tau} + \omega a\bar{u} .$$

A velocidade de um ponto genérico do cabo, a uma distân-  
cia  $x$  do local onde o cabo tangencia as suas guias, é dada por:

$$\vec{v}_x = (\omega + \dot{\psi})x\bar{\tau} + \omega a\bar{u} . \quad (27)$$

A aceleração da ponteira  $\bar{v}$  é dada pela derivada da sua ve-  
locidade:

$$\dot{\vec{v}}_p = (\dot{\omega}a\psi + a\dot{\psi}^2 - a\omega^2)\bar{\tau} + [(\omega + \dot{\psi})^2a\psi + \dot{\omega}a]\bar{u} . \quad (28)$$

A tração corresponde à aceleração na direção de  $\bar{u}$ , dada  
por:

$$\dot{\vec{v}}_p \cdot \bar{u} = (\omega + \dot{\psi})^2a\psi + \dot{\omega}a . \quad (29)$$

A aceleração do cabo, na mesma direção, é dada por:

$$\dot{\vec{v}}_x \cdot \bar{u} = (\omega + \dot{\psi})^2x + \dot{\omega}a . \quad (30)$$

O valor de  $\dot{\omega}$  é obtido derivando a Equação 17:

$$\dot{\omega} = - \frac{4\ell\lambda a\omega_0^2}{(\lambda + \ell^2)^2} . \quad (31)$$

A tração total  $\bar{v}$  é dada por:

$$T = m_p(\dot{\vec{v}}_p \cdot \bar{u}) + \int_0^\ell \rho(\dot{\vec{v}}_x \cdot \bar{u})dx , \quad (32)$$

onde  $\ell$  é o comprimento instantâneo do cabo.



Cada uma das parcelas da Equação 32 pode ser avaliada separadamente.

A primeira parcela fica:

$$m_p (\dot{\vec{v}}_p \cdot \vec{u}) = m_p [(\omega + \dot{\psi})^2 a \psi + \dot{\omega} a] .$$

Substituindo as Equações 17 e 31 na equação acima, a tração graças à ponteira, que passa a ser chamada  $T_p$ , fica:

$$T_p = \frac{[(\lambda - \ell^2) + (\lambda + \ell^2)]^2 \ell \omega_0^2 - 4 \ell \lambda a^2 \omega_0^2}{(\lambda + \ell^2)^2} m_p ,$$

$$T_p = \frac{4 m_p \omega_0^2 \lambda \ell (\lambda - a^2)}{(\lambda + \ell^2)^2} . \quad (33)$$

A segunda parcela, que passa a ser chamada  $T_c$ , é:

$$\rho \int_0^{\ell} (\dot{\vec{v}}_x \cdot \vec{u}) dx = \rho \int_0^{\ell} [(\omega + \dot{\psi})^2 x + \dot{\omega} a] dx .$$

Com a substituição das Equações 17 e 31 na equação acima, tem-se:

$$\begin{aligned} T_c &= \rho \int_0^{\ell} \left\{ \frac{[(\lambda - \ell^2) + (\lambda + \ell^2)]^2 \omega_0^2 x - 4 \ell \lambda a^2 \omega_0^2}{(\lambda + \ell^2)^2} \right\} dx \\ &= \rho \int_0^{\ell} \frac{4 \lambda^2 \omega_0^2 x - 4 \lambda \omega_0^2 a^2 \ell}{(\lambda + \ell^2)^2} dx = \frac{4 \lambda \omega_0^2 \rho}{(\lambda + \ell^2)^2} \int_0^{\ell} (\lambda x - a^2 \ell) dx . \end{aligned}$$

Resolvendo esta última integral, o valor da tração torna-se:

$$T_c = \frac{4\lambda\omega_0^2\rho\ell^2}{(\lambda + \ell^2)^2} \left( \frac{\lambda}{2} - a^2 \right). \quad (34)$$

Somando as parcelas dadas pelas Equações 33 e 34, a tração fica:

$$T = \frac{4m_p\omega_0^2\lambda\ell(\lambda - a^2)}{(\lambda + \ell^2)^2} + \frac{4\rho\ell^2\omega_0^2\lambda(\lambda/2 - a^2)}{(\lambda + \ell^2)^2},$$

ou seja:

$$T = \frac{4\omega_0^2\lambda\ell}{(\lambda + \ell^2)^2} [m_p(\lambda - a^2) + \rho\ell(\lambda/2 - a^2)]. \quad (35)$$

Para o dimensionamento do cabo é necessário que se conheça a máxima tração durante o desenrolamento, ou seja, é preciso determinar o ponto de máximo da Equação 35.

Com a parcela referente à ponteira tem grande predominância sobre a correspondente ao cabo, o problema pode ser visto separando as parcelas e examinando as suas condições de máximo.

Para a ponteira vale a Equação 33. Para determinar o seu ponto de máximo basta derivá-la da seguinte maneira:

$$\frac{\partial T_p}{\partial \ell} = \frac{4\lambda m_p \omega_0^2 (\lambda - a^2) [(\lambda + \ell^2)^2 - \ell(\lambda + \ell^2)^2 4\ell]}{[(\lambda + \ell^2)^2]^2}.$$

O ponto de máximo está em  $\varrho^*$ , onde:

$$\left. \frac{\partial T_p}{\partial \varrho} \right|_{\varrho^*} = 0 ;$$

portanto,

$$(\lambda + \varrho^2)^2 - \varrho^2(\lambda + \varrho^2)4 = 0 ,$$

logo:

$$\varrho^* = \sqrt{\frac{\lambda}{3}} . \quad (36)$$

Aplicando o mesmo procedimento na Equação 34, chega-se à conclusão de que a tração cresce continuamente.

O cálculo exato do ponto de máximo mostra que ele situa-se um pouco além de  $\varrho^*$ , e seu valor também difere menos de 1% do valor da tração neste ponto. Dessa forma, o valor  $\varrho^*$  será adotado como ponto de maior tração.

A expressão que dá a tração máxima é obtida com a substituição do valor de  $\varrho^*$  na Equação 35.

$$T_{\text{m}\bar{\text{a}}\text{x}} = \frac{4\omega_0^2\lambda}{(\lambda + \lambda/3)^2} \left[ m_p(\lambda - a^2) \sqrt{\frac{\lambda}{3}} + \rho \frac{\lambda}{6} (\lambda - 2a^2) \right] ,$$

ou:

$$T_{\text{m}\bar{\text{a}}\text{x}} = \frac{9\omega_0^2}{4\lambda} \left[ m_p(\lambda - a^2) \sqrt{\frac{\lambda}{3}} + \rho(\lambda - 2a^2) \frac{\lambda}{6} \right] \quad (37)$$

A máxima tração ocorre no ponto em que o cabo se desprende do satélite.

A velocidade da ponteira é dada pela Equação 20:

$$\vec{v}_p = [a \cos(\psi - \beta)\omega + L(\omega + \dot{\beta})]\hat{\tau} + a\omega \sin(\psi - \beta)\hat{u}.$$

A aceleração é obtida através da sua derivada. O seu resultado, após a consideração de que  $\psi - \beta = 0$  e  $\dot{\psi} = 0$ , é a Equação 38, ou seja:

$$\dot{\vec{v}}_p = [\dot{\omega}(a + L) + L(\dot{\omega} + \ddot{\beta})]\hat{\tau} + [a\omega^2 + L(\omega + \dot{\beta})^2]\hat{u}. \quad (38)$$

Como a tração leva em conta apenas a aceleração na direção de  $\hat{u}$ , tem-se:

$$T_p = \vec{F} \cdot \hat{u} = m_p \dot{\vec{v}}_p \cdot \hat{u},$$

ou seja:

$$T_p = m_p [a\omega^2 + L(\omega + \dot{\beta})^2], \quad (39)$$

que pode ser avaliada com a substituição do valor de  $\dot{\beta}$  calculado para este instante.

A tração devida ao cabo é dada por:

$$T_c = \rho \int_0^L [a\omega^2 + x(\omega + \dot{\beta})^2] dx. \quad (40)$$

Verifica-se que a soma das duas parcelas é inferior à tração máxima durante a primeira fase.

## 2.4 - METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO

Inicialmente pressupõem-se conhecidos os valores de:

- momento de inércia do conjunto a ser desacelerado,  $I$ ;
- raio de enrolamento dos cabos,  $a$ ;
- velocidade angular inicial do conjunto,  $\omega_0$ ;
- velocidade angular final do conjunto,  $\omega_f$ .

A partir destes dados e com base na Equação 26, constrói-se uma tabela de  $\lambda$  em função de  $L$ .

Em seguida, necessita-se do valor da tração máxima exercida sobre o cabo, para que se possa determinar quais os cabos que eventualmente podem ser empregados. Entretanto, verifica-se que a Equação 35, que permite calcular este valor, utiliza a densidade linear do cabo e o valor das massas das ponteiras, ainda desconhecidas. Para contornar este problema, adota-se um valor de tração máxima aproximada, com base na mesma Equação 35, para a qual admite-se que o cabo tenha massa desprezível. A equação resultante é:

$$T_{\text{m}\bar{\text{a}}\text{x ap}} = \frac{3\sqrt{3}}{8} \omega_0^2 \frac{I}{\sqrt{\lambda}} .$$

Depois deste cálculo e de posse de catálogos de cabos, procuram-se aqueles que mais se prestem a esta tração.

Para cada um destes cabos, pode-se determinar o valor da massa das ponteiras a partir da definição de  $\lambda$ , dada no Apêndice A, ou seja:

$$\lambda = \frac{I}{(2 m_p + 2\rho L/3)} + a^2 .$$

Utiliza-se, então, a Equação 35 para obter o valor exato da tração máxima, com a qual se determinam os coeficientes de segurança para cada cabo, em função de L.

O próximo passo é a especificação do comprimento do cabo, que se vincula às seguintes exigências:

- deve corresponder a um número inteiro de voltas;
- deve ser suficientemente curto para minimizar os efeitos de uma eventual precessão do satélite durante o desenrolamento;
- deve ser suficientemente logo para não provocar acelerações angulares excessivas na estrutura, bem como para não exigir ponteiros muito pesadas.

Escolhido o comprimento do cabo e de posse das tabelas de  $\lambda$  e de esforços para cada cabo, constrói-se um gráfico que fornece, em função da densidade linear dos cabos, os valores dos coeficientes de segurança nominal e mínimo<sup>1</sup>, da razão  $R^2$ , e da massa total do ioiô; a partir deste gráfico determina-se qual o cabo mais adequado ao dispositivo.

---

<sup>1</sup> O coeficiente de segurança nominal é calculado a partir dos esforços resultantes de um acionamento em condições nominais de velocidade angular do satélite; por outro lado, o coeficiente de segurança mínimo baseia-se em esforços advindos de condições não-nominais, nas quais a velocidade angular do satélite está acima da nominal; para estes cálculos, estimou-se um acréscimo de cerca de 15% na rotação nominal.

<sup>2</sup> A importância da razão R decorre do fato de que o equacionamento leva em conta a massa do cabo somente de forma aproximada, o que implica uma imprecisão; assim, quanto menor for a massa do cabo em relação à massa total (quanto maior for R), menor será esta imprecisão.

### 3 - DIMENSIONAMENTO DE CABOS E PONTEIRAS

Nesta seção apresenta-se um projeto preliminar do dispositivo ioiô para o primeiro satélite brasileiro.

Os dados utilizados neste projeto são fornecidos a seguir e são as melhores estimativas de que se dispõe até o momento sobre as grandezas envolvidas.

Observe-se que com a evolução do projeto do satélite, alguns destes dados poderão modificar-se, o que implicará uma obsolescência do projeto desenvolvido aqui.

Assim, tem-se como dados iniciais:

- momento de inércia<sup>1</sup> do conjunto a ser desacelerado  $I = 36,86 \text{ kgm}^2$ ;
- velocidade angular inicial do conjunto,  $\omega_0 = 18,85 \text{ rad/s}$ ;
- velocidade angular final do conjunto,  $\omega_f = 0,524 \text{ rad/s}$ ;
- raio de enrolamento dos cabos,  $a = 0,395 \text{ m}$ .

De posse destes dados e seguindo o procedimento explicado na Seção 2.4, chega-se às Tabelas 1, 2, 3, 4 e 5, relativas a cinco cabos diferentes, todos considerados viáveis, denominados respectivamente A, B, C, D e E.

---

<sup>1</sup> O momento de inércia total mencionado foi calculado através da seguinte composição:

- momento de inércia do satélite:  $9,78 \text{ kgm}^2$ , obtido segundo o "Relatório Final do Grupo de Trabalho para Definição do Arranjo Físico do Satélite de Coleta de Dados";
- momento de inércia do último estágio do lançador no final da combustão:  $22,08 \text{ kgm}^2$ , calculado com base no documento "Lanceur du Satellite Brésilien, Dossier Technique", de fevereiro de 1979;
- momento de inércia da baía de equipamentos:  $5 \text{ kgm}^2$ , estimado com base no anexo 2 do "Ante-projeto de satélite", de dezembro de 1979.

**TABELA 1**  
**ANÁLISE DO CABO A**

MARCA: A  
MATERIAL: GALVANIZADO 160-180  
CONSTRUÇÃO: 7X7  
DIMENSÃO: 5/64"

L (M)	LAMBDA (M*2)	RD (KG/M)	CARRUP (N)	TM (N)	CS -	M (KG)	MP (KG)	MT (KG)	R -	CSMI -
4.0	20.51	+0143	2264.	1877.	1.206	1.811	0.886	1.887	12.497	0.886
4.1	21.45	+0143	2264.	1835.	1.233	1.731	0.846	1.809	14.427	0.906
4.2	22.42	+0143	2264.	1795.	1.261	1.656	0.808	1.736	13.452	0.926
4.3	23.40	+0143	2264.	1757.	1.288	1.586	0.772	1.668	12.562	0.947
4.4	24.41	+0143	2264.	1720.	1.316	1.520	0.739	1.604	11.746	0.967
4.5	25.43	+0143	2264.	1685.	1.344	1.458	0.708	1.544	10.996	0.987
4.6	26.48	+0143	2264.	1651.	1.371	1.400	0.678	1.488	10.310	1.007
4.7	27.55	+0143	2264.	1619.	1.399	1.346	0.650	1.435	9.677	1.028
4.8	28.64	+0143	2264.	1587.	1.426	1.294	0.624	1.386	9.094	1.048
4.9	29.75	+0143	2264.	1557.	1.454	1.246	0.599	1.339	8.554	1.068
5.0	30.88	+0143	2264.	1528.	1.481	1.200	0.576	1.295	8.059	1.088
5.1	32.04	+0143	2264.	1500.	1.509	1.156	0.554	1.253	7.594	1.109
5.2	33.21	+0143	2264.	1473.	1.537	1.115	0.533	1.214	7.165	1.129
5.3	34.41	+0143	2264.	1447.	1.564	1.076	0.513	1.177	6.767	1.149
5.4	35.62	+0143	2264.	1422.	1.592	1.039	0.494	1.142	6.396	1.170
5.5	36.86	+0143	2264.	1398.	1.620	1.004	0.476	1.109	6.051	1.190
5.6	38.12	+0143	2264.	1374.	1.648	0.971	0.459	1.078	5.729	1.211
5.7	39.40	+0143	2264.	1351.	1.675	0.939	0.442	1.048	5.428	1.231
5.8	40.70	+0143	2264.	1329.	1.703	0.909	0.427	1.020	5.147	1.251
5.9	42.02	+0143	2264.	1308.	1.731	0.880	0.412	0.993	4.884	1.272
6.0	43.37	+0143	2264.	1287.	1.759	0.853	0.398	0.967	4.636	1.292
6.1	44.73	+0143	2264.	1267.	1.787	0.827	0.384	0.943	4.406	1.313
6.2	46.12	+0143	2264.	1248.	1.815	0.802	0.371	0.920	4.189	1.333
6.3	47.53	+0143	2264.	1229.	1.843	0.778	0.359	0.898	3.985	1.354
6.4	48.95	+0143	2264.	1210.	1.871	0.755	0.347	0.877	3.793	1.374
6.5	50.40	+0143	2264.	1192.	1.899	0.734	0.336	0.857	3.613	1.395
6.6	51.87	+0143	2264.	1175.	1.927	0.713	0.325	0.839	3.442	1.416
6.7	53.37	+0143	2264.	1158.	1.955	0.693	0.314	0.820	3.282	1.436
6.8	54.88	+0143	2264.	1142.	1.983	0.674	0.304	0.803	3.130	1.457
6.9	56.41	+0143	2264.	1126.	2.011	0.655	0.295	0.787	2.987	1.478
7.0	57.97	+0143	2264.	1110.	2.039	0.638	0.285	0.771	2.851	1.498
7.1	59.55	+0143	2264.	1095.	2.067	0.621	0.276	0.756	2.723	1.519
7.2	61.14	+0143	2264.	1080.	2.096	0.604	0.268	0.742	2.602	1.540
7.3	62.76	+0143	2264.	1066.	2.124	0.589	0.260	0.728	2.487	1.561
7.4	64.40	+0143	2264.	1052.	2.152	0.574	0.252	0.715	2.376	1.581
7.5	66.06	+0143	2264.	1038.	2.181	0.559	0.244	0.702	2.274	1.602
7.6	67.74	+0143	2264.	1025.	2.209	0.545	0.236	0.690	2.176	1.623
7.7	69.45	+0143	2264.	1012.	2.238	0.532	0.229	0.679	2.082	1.644
7.8	71.17	+0143	2264.	999.	2.266	0.519	0.222	0.668	1.993	1.665
7.9	72.92	+0143	2264.	986.	2.295	0.507	0.216	0.657	1.909	1.686



TABELA 2

ANÁLISE DO CABO B

MARCA: B  
 MATERIAL: AÇO GALVANIZADO  
 CONSTRUÇÃO: 7x7  
 DIMENSÃO: 1/16"

L (M)	LAMBDA (M*2)	RO (KG/M)	CARRUP (N)	TM (N)	CS -	M (KG)	MP (KG)	MT (KG)	R -	CSMI -
4.0	20.51	0.110	1627.	1878.	0.867	1.811	0.891	1.870	20.240	0.637
4.1	21.45	0.110	1627.	1836.	0.886	1.731	0.850	1.791	19.850	0.651
4.2	22.42	0.110	1627.	1796.	0.906	1.656	0.813	1.718	19.580	0.666
4.3	23.40	0.110	1627.	1757.	0.926	1.586	0.777	1.649	19.430	0.680
4.4	24.41	0.110	1627.	1721.	0.946	1.520	0.744	1.585	19.370	0.695
4.5	25.43	0.110	1627.	1686.	0.965	1.458	0.713	1.524	19.397	0.709
4.6	26.48	0.110	1627.	1652.	0.985	1.400	0.683	1.468	19.503	0.724
4.7	27.55	0.110	1627.	1619.	1.005	1.346	0.656	1.415	19.681	0.738
4.8	28.64	0.110	1627.	1588.	1.025	1.294	0.629	1.365	19.922	0.753
4.9	29.75	0.110	1627.	1558.	1.044	1.246	0.605	1.317	19.221	0.767
5.0	30.88	0.110	1627.	1529.	1.064	1.200	0.581	1.273	19.572	0.782
5.1	32.04	0.110	1627.	1501.	1.084	1.156	0.559	1.231	9.972	0.796
5.2	33.21	0.110	1627.	1474.	1.104	1.115	0.539	1.191	9.414	0.811
5.3	34.41	0.110	1627.	1448.	1.124	1.076	0.519	1.154	8.897	0.826
5.4	35.62	0.110	1627.	1423.	1.144	1.039	0.500	1.118	8.415	0.840
5.5	36.86	0.110	1627.	1398.	1.163	1.004	0.482	1.085	7.965	0.855
5.6	38.12	0.110	1627.	1375.	1.183	0.971	0.465	1.053	7.548	0.869
5.7	39.40	0.110	1627.	1352.	1.203	0.939	0.449	1.023	7.157	0.884
5.8	40.70	0.110	1627.	1330.	1.223	0.909	0.433	0.994	6.791	0.899
5.9	42.02	0.110	1627.	1309.	1.243	0.880	0.419	0.967	6.449	0.913
6.0	43.37	0.110	1627.	1288.	1.263	0.853	0.405	0.941	6.129	0.928
6.1	44.73	0.110	1627.	1268.	1.283	0.827	0.391	0.916	5.828	0.943
6.2	46.12	0.110	1627.	1249.	1.303	0.802	0.378	0.893	5.546	0.957
6.3	47.53	0.110	1627.	1230.	1.323	0.778	0.366	0.871	5.281	0.972
6.4	48.95	0.110	1627.	1212.	1.343	0.755	0.354	0.849	5.031	0.987
6.5	50.40	0.110	1627.	1194.	1.363	0.734	0.343	0.829	4.790	1.001
6.6	51.87	0.110	1627.	1176.	1.383	0.713	0.332	0.810	4.575	1.016
6.7	53.37	0.110	1627.	1160.	1.403	0.693	0.322	0.791	4.366	1.031
6.8	54.88	0.110	1627.	1143.	1.423	0.674	0.312	0.773	4.169	1.046
6.9	56.41	0.110	1627.	1127.	1.443	0.655	0.302	0.756	3.983	1.060
7.0	57.97	0.110	1627.	1112.	1.463	0.638	0.293	0.740	3.807	1.075
7.1	59.55	0.110	1627.	1097.	1.483	0.621	0.284	0.725	3.640	1.090
7.2	61.14	0.110	1627.	1082.	1.504	0.604	0.276	0.710	3.482	1.105
7.3	62.76	0.110	1627.	1068.	1.524	0.589	0.268	0.696	3.333	1.120
7.4	64.40	0.110	1627.	1054.	1.544	0.574	0.260	0.682	3.191	1.134
7.5	66.06	0.110	1627.	1040.	1.564	0.559	0.252	0.669	3.056	1.149
7.6	67.74	0.110	1627.	1027.	1.585	0.545	0.245	0.657	2.928	1.164
7.7	69.45	0.110	1627.	1014.	1.605	0.532	0.238	0.645	2.807	1.179
7.8	71.17	0.110	1627.	1001.	1.625	0.519	0.231	0.633	2.691	1.194
7.9	72.92	0.110	1627.	989.	1.645	0.507	0.224	0.622	2.581	1.209

TABELA 3

ANÁLISE DO CABO C

MARCA: C  
 MATERIAL: AÇO GALVANIZADO  
 CONSTRUÇÃO: 7X7  
 DIMENSÃO: 2/64"

L (M)	LARGURA (M*2)	RO (KG/M)	CARRUP (N)	TM (N)	CS -	M (KG)	MP (KG)	MT (KG)	R -	CSMI -
4.0	20.51	•0132	2000.	1877.	1.065	1.811	0.888	1.881	10.316	0.783
4.1	21.45	•0132	2000.	1836.	1.090	1.731	0.847	1.803	10.657	0.801
4.2	22.42	•0132	2000.	1796.	1.114	1.656	0.809	1.730	11.001	0.818
4.3	23.40	•0132	2000.	1757.	1.138	1.586	0.774	1.661	11.336	0.836
4.4	24.41	•0132	2000.	1721.	1.162	1.520	0.741	1.598	11.753	0.854
4.5	25.43	•0132	2000.	1685.	1.187	1.458	0.709	1.538	12.142	0.872
4.6	26.48	•0132	2000.	1651.	1.211	1.400	0.680	1.481	12.197	0.890
4.7	27.55	•0132	2000.	1619.	1.235	1.346	0.652	1.428	12.512	0.908
4.8	28.64	•0132	2000.	1588.	1.260	1.294	0.626	1.379	12.879	0.926
4.9	29.75	•0132	2000.	1557.	1.284	1.246	0.601	1.332	13.295	0.944
5.0	30.88	•0132	2000.	1528.	1.309	1.200	0.578	1.288	13.755	0.961
5.1	32.04	•0132	2000.	1500.	1.333	1.156	0.556	1.246	14.254	0.979
5.2	33.21	•0132	2000.	1473.	1.357	1.115	0.535	1.207	14.790	0.997
5.3	34.41	•0132	2000.	1447.	1.382	1.076	0.515	1.169	15.358	1.015
5.4	35.62	•0132	2000.	1422.	1.406	1.039	0.496	1.134	15.957	1.033
5.5	36.86	•0132	2000.	1398.	1.431	1.004	0.478	1.101	16.583	1.051
5.6	38.12	•0132	2000.	1374.	1.455	0.971	0.461	1.069	17.234	1.069
5.7	39.40	•0132	2000.	1352.	1.480	0.939	0.445	1.040	17.908	1.087
5.8	40.70	•0132	2000.	1330.	1.504	0.909	0.429	1.011	18.604	1.105
5.9	42.02	•0132	2000.	1308.	1.529	0.880	0.414	0.984	19.319	1.123
6.0	43.37	•0132	2000.	1288.	1.553	0.853	0.400	0.959	20.052	1.141
6.1	44.73	•0132	2000.	1267.	1.578	0.827	0.387	0.934	20.801	1.159
6.2	46.12	•0132	2000.	1248.	1.603	0.802	0.374	0.911	21.566	1.177
6.3	47.53	•0132	2000.	1229.	1.627	0.778	0.361	0.889	22.345	1.196
6.4	48.95	•0132	2000.	1211.	1.652	0.755	0.350	0.868	23.137	1.214
6.5	50.40	•0132	2000.	1193.	1.677	0.734	0.338	0.848	23.941	1.232
6.6	51.87	•0132	2000.	1176.	1.701	0.713	0.327	0.829	24.757	1.250
6.7	53.37	•0132	2000.	1159.	1.726	0.693	0.317	0.811	25.583	1.268
6.8	54.88	•0132	2000.	1142.	1.751	0.674	0.307	0.793	26.419	1.286
6.9	56.41	•0132	2000.	1126.	1.776	0.655	0.297	0.777	27.264	1.305
7.0	57.97	•0132	2000.	1111.	1.801	0.638	0.288	0.761	28.117	1.323
7.1	59.55	•0132	2000.	1096.	1.825	0.621	0.279	0.746	28.970	1.341
7.2	61.14	•0132	2000.	1081.	1.850	0.604	0.271	0.731	29.846	1.360
7.3	62.76	•0132	2000.	1066.	1.875	0.589	0.262	0.717	30.722	1.378
7.4	64.40	•0132	2000.	1052.	1.900	0.574	0.254	0.704	31.604	1.396
7.5	66.06	•0132	2000.	1039.	1.925	0.559	0.247	0.691	32.491	1.415
7.6	67.74	•0132	2000.	1025.	1.950	0.545	0.239	0.679	33.385	1.433
7.7	69.45	•0132	2000.	1012.	1.976	0.532	0.232	0.667	34.284	1.451
7.8	71.17	•0132	2000.	1000.	2.001	0.519	0.225	0.656	35.187	1.470
7.9	72.92	•0132	2000.	987.	2.026	0.507	0.219	0.646	36.096	1.488

TABELA 4

ANÁLISE DO CABO D

MARCA: D  
 MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL  
 CONSTRUÇÃO: 7X7  
 DIMENSÃO: 1/16"

L (M)	LAZADA (M*2)	RO (KG/M)	CARRUP (N)	TM (N)	CS	M (KG)	MP (KG)	MT (KG)	R	CSMI
4.0	20.51	•0110	1627.	1878.	0.867	1.811	0.891	1.870	22.240	0.637
4.1	21.45	•0110	1627.	1836.	0.886	1.731	0.850	1.791	19.656	0.651
4.2	22.42	•0110	1627.	1796.	0.906	1.656	0.813	1.718	17.585	0.666
4.3	23.40	•0110	1627.	1757.	0.926	1.586	0.777	1.649	15.430	0.680
4.4	24.41	•0110	1627.	1721.	0.946	1.520	0.744	1.585	13.370	0.695
4.5	25.43	•0110	1627.	1686.	0.965	1.458	0.713	1.524	11.397	0.709
4.6	26.48	•0110	1627.	1652.	0.985	1.400	0.683	1.468	9.503	0.724
4.7	27.55	•0110	1627.	1619.	1.005	1.346	0.656	1.415	7.681	0.738
4.8	28.64	•0110	1627.	1588.	1.025	1.294	0.629	1.365	5.922	0.753
4.9	29.75	•0110	1627.	1558.	1.044	1.246	0.605	1.317	4.221	0.767
5.0	30.88	•0110	1627.	1529.	1.064	1.200	0.581	1.273	2.572	0.782
5.1	32.04	•0110	1627.	1501.	1.084	1.156	0.559	1.231	9.972	0.796
5.2	33.21	•0110	1627.	1474.	1.104	1.115	0.539	1.191	7.414	0.811
5.3	34.41	•0110	1627.	1448.	1.124	1.076	0.519	1.154	4.897	0.826
5.4	35.62	•0110	1627.	1423.	1.144	1.039	0.500	1.118	2.415	0.840
5.5	36.85	•0110	1627.	1398.	1.163	1.004	0.482	1.085	9.966	0.855
5.6	38.12	•0110	1627.	1375.	1.183	0.971	0.465	1.053	7.548	0.869
5.7	39.40	•0110	1627.	1352.	1.203	0.939	0.449	1.023	5.157	0.884
5.8	40.70	•0110	1627.	1330.	1.223	0.909	0.433	0.994	2.791	0.899
5.9	42.02	•0110	1627.	1309.	1.243	0.880	0.419	0.967	4.449	0.913
6.0	43.37	•0110	1627.	1288.	1.263	0.853	0.405	0.941	2.129	0.928
6.1	44.73	•0110	1627.	1268.	1.283	0.827	0.391	0.916	9.826	0.943
6.2	46.12	•0110	1627.	1249.	1.303	0.802	0.378	0.893	7.546	0.957
6.3	47.53	•0110	1627.	1230.	1.323	0.778	0.366	0.871	5.281	0.972
6.4	48.95	•0110	1627.	1212.	1.343	0.755	0.354	0.849	3.031	0.987
6.5	50.40	•0110	1627.	1194.	1.363	0.734	0.343	0.829	7.796	1.001
6.6	51.87	•0110	1627.	1176.	1.383	0.713	0.332	0.810	4.575	1.016
6.7	53.37	•0110	1627.	1160.	1.403	0.693	0.322	0.791	7.356	1.031
6.8	54.88	•0110	1627.	1143.	1.423	0.674	0.312	0.773	4.169	1.046
6.9	56.41	•0110	1627.	1127.	1.443	0.655	0.302	0.756	3.983	1.060
7.0	57.97	•0110	1627.	1112.	1.463	0.638	0.293	0.740	3.807	1.075
7.1	59.55	•0110	1627.	1097.	1.483	0.621	0.284	0.725	3.640	1.090
7.2	61.14	•0110	1627.	1082.	1.504	0.604	0.276	0.710	3.482	1.105
7.3	62.76	•0110	1627.	1068.	1.524	0.589	0.268	0.696	3.333	1.120
7.4	64.40	•0110	1627.	1054.	1.544	0.574	0.260	0.682	3.191	1.134
7.5	66.06	•0110	1627.	1040.	1.564	0.559	0.252	0.669	3.056	1.149
7.6	67.74	•0110	1627.	1027.	1.585	0.545	0.245	0.657	2.928	1.164
7.7	69.45	•0110	1627.	1014.	1.605	0.532	0.238	0.645	2.807	1.179
7.8	71.17	•0110	1627.	1001.	1.625	0.519	0.231	0.633	2.691	1.194
7.9	72.92	•0110	1627.	989.	1.646	0.507	0.224	0.622	2.581	1.209

TABELA 5

ANÁLISE DO CABO E

MARCA: E  
 MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL  
 CONSTRUÇÃO: 7X7  
 DIMENSÃO: 3/32"

L (M)	LAMBDA (M*2)	RO (KG/M)	CARRUP (N)	TM (N)	CS -	M (KG)	MP (KG)	MT (KG)	R -	CSMI -
4.0	20.51	.0200	3146.	1877.	1.676	1.811	0.879	1.918	10.985	1.232
4.1	21.45	.0200	3146.	1835.	1.714	1.731	0.838	1.840	10.221	1.260
4.2	22.42	.0200	3146.	1795.	1.753	1.655	0.800	1.768	9.523	1.288
4.3	23.41	.0200	3146.	1757.	1.791	1.586	0.764	1.700	8.887	1.316
4.4	24.41	.0200	3146.	1720.	1.829	1.520	0.731	1.637	8.303	1.344
4.5	25.43	.0200	3146.	1684.	1.868	1.458	0.699	1.578	7.768	1.372
4.6	26.46	.0200	3146.	1650.	1.906	1.400	0.669	1.523	7.277	1.400
4.7	27.55	.0200	3146.	1618.	1.945	1.346	0.641	1.471	6.824	1.429
4.8	28.64	.0200	3146.	1587.	1.983	1.294	0.615	1.422	6.407	1.457
4.9	29.75	.0200	3146.	1556.	2.021	1.246	0.590	1.376	6.021	1.485
5.0	30.88	.0200	3146.	1527.	2.060	1.200	0.566	1.333	5.665	1.514
5.1	32.02	.0200	3146.	1499.	2.099	1.156	0.544	1.292	5.334	1.542
5.2	33.21	.0200	3146.	1472.	2.137	1.115	0.523	1.254	5.028	1.570
5.3	34.41	.0200	3146.	1446.	2.176	1.076	0.503	1.218	4.743	1.599
5.4	35.62	.0200	3146.	1421.	2.214	1.039	0.484	1.183	4.478	1.627
5.5	36.82	.0200	3146.	1396.	2.253	1.004	0.465	1.151	4.231	1.655
5.6	38.12	.0200	3146.	1373.	2.292	0.971	0.448	1.120	4.001	1.684
5.7	39.41	.0200	3146.	1350.	2.331	0.939	0.432	1.091	3.786	1.712
5.8	40.71	.0200	3146.	1328.	2.370	0.909	0.416	1.064	3.585	1.741
5.9	42.02	.0200	3146.	1306.	2.409	0.880	0.401	1.038	3.397	1.770
6.0	43.37	.0200	3146.	1285.	2.448	0.853	0.387	1.013	3.221	1.798
6.1	44.73	.0200	3146.	1265.	2.487	0.827	0.373	0.990	3.056	1.827
6.2	46.12	.0200	3146.	1246.	2.526	0.802	0.360	0.967	2.900	1.856
6.3	47.53	.0200	3146.	1227.	2.565	0.778	0.347	0.946	2.754	1.884
6.4	48.95	.0200	3146.	1208.	2.604	0.755	0.335	0.926	2.617	1.913
6.5	50.41	.0200	3146.	1190.	2.643	0.734	0.323	0.907	2.488	1.942
6.6	51.87	.0200	3146.	1173.	2.683	0.713	0.312	0.889	2.366	1.971
6.7	53.37	.0200	3146.	1156.	2.722	0.693	0.302	0.871	2.251	2.000
6.8	54.86	.0200	3146.	1139.	2.762	0.674	0.291	0.855	2.143	2.029
6.9	56.41	.0200	3146.	1123.	2.801	0.655	0.282	0.839	2.041	2.058
7.0	57.97	.0200	3146.	1107.	2.841	0.638	0.272	0.824	1.944	2.087
7.1	59.55	.0200	3146.	1092.	2.881	0.621	0.263	0.810	1.852	2.116
7.2	61.14	.0200	3146.	1077.	2.920	0.604	0.254	0.796	1.765	2.146
7.3	62.76	.0200	3146.	1063.	2.960	0.589	0.246	0.783	1.683	2.175
7.4	64.40	.0200	3146.	1049.	3.000	0.574	0.238	0.771	1.605	2.204
7.5	66.06	.0200	3146.	1035.	3.040	0.559	0.230	0.759	1.531	2.234
7.6	67.74	.0200	3146.	1021.	3.081	0.545	0.222	0.748	1.461	2.263
7.7	69.45	.0200	3146.	1008.	3.121	0.532	0.215	0.737	1.394	2.293
7.8	71.17	.0200	3146.	995.	3.161	0.519	0.208	0.727	1.330	2.323
7.9	72.92	.0200	3146.	983.	3.202	0.507	0.201	0.717	1.270	2.352

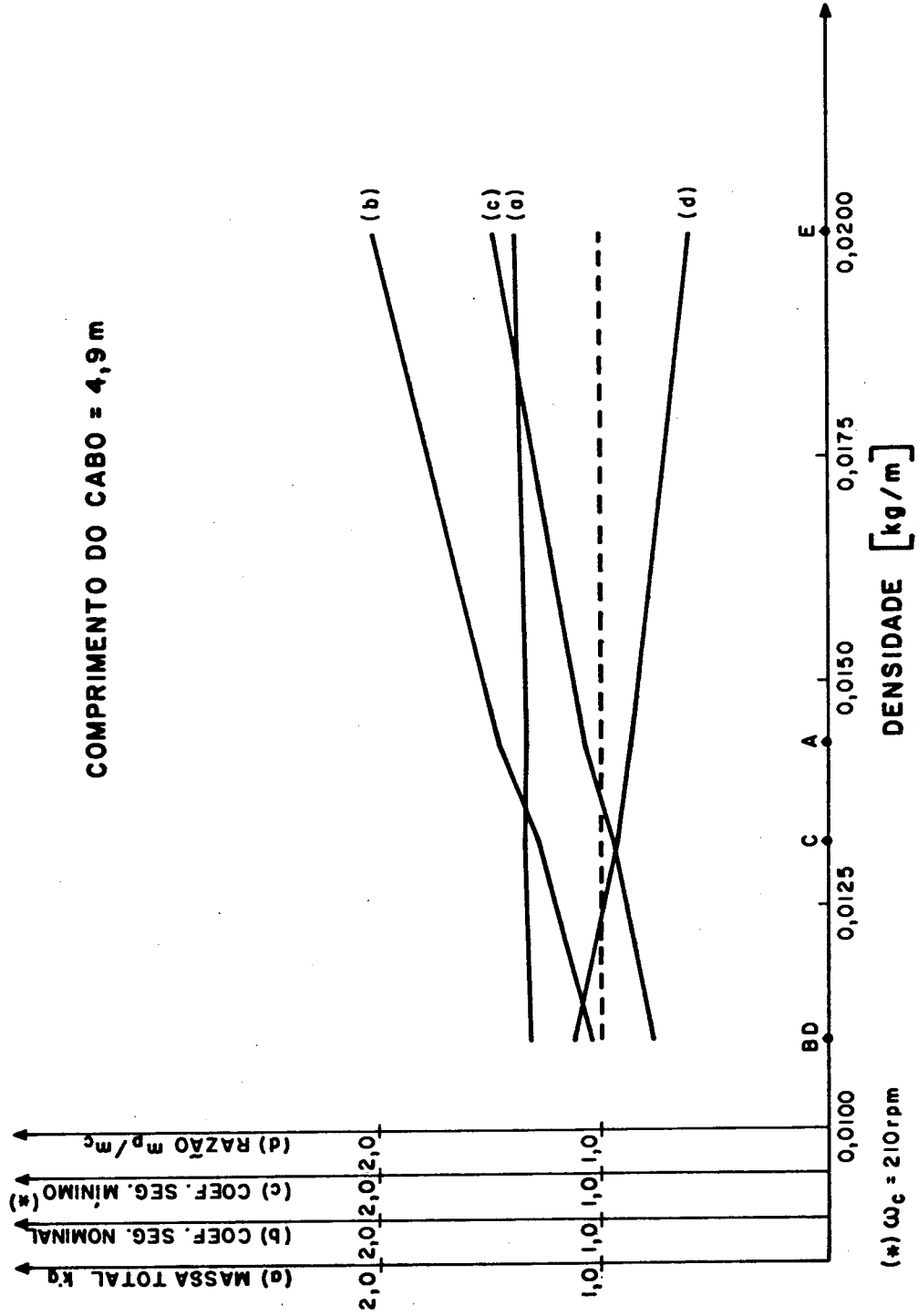


Fig. 3 - Análise conjunta dos cabos.

O comprimento do cabo é escolhido como sendo 4,9 m, o que equivale ao fato de o cabo dar 2 voltas em seu suporte. Com este comprimento e com as Tabelas 1 a 5, constrói-se o gráfico apresentado na Figura 3, que é utilizada como base para a escolha do cabo. Desta forma, o cabo escolhido é o A e a constituição básica do dispositivo é:

- duas ponteiras com massa de 0,599 kg cada;
- dois cabos de aço galvanizado, com resistência à tração do material na faixa 160 - 180 kgf/mm<sup>2</sup>, construção 7 x 7, diâmetro nominal de 5/64" e comprimento de 4,9 m cada.

#### 4 - CONCLUSÕES

O equacionamento e o dimensionamento do ioiô, desenvolvidos neste trabalho, foram comparados com outros existentes, de outros autores, tendo-se chegado à conclusão de que há concordância entre os procedimentos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORGES, P.D.A. *Análise dinâmica da trajetória e da atitude de um veículo espacial na fase de injeção*. Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial, São José dos Campos, INPE, abr. 1982. 231 p. (INPE-2845-TDL/142).
- INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *Estudo da viabilidade do satélite brasileiro*. São José dos Campos, dez. 1979. Anexo 2.
- CORNILLE JUNIOR, H.J. *A method of accurately reducing the spin rate of a rotating spacecraft*. Maryland, NASA, Goddard Space Flight Center, 1962.
- FEDOR, J.V. *Theory and design curves for a yo-yo de-spin mechanism for satellites*. Maryland, NASA, Goddard Space Flight Center, 1961.
- CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES (CNES). *Dimensionnement des masses yoyo du système de dérotation cas du vol réel*. Toulouse, Centre Spatial de Toulouse, 1973.





## APÊNDICE A

### AVALIAÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DA MASSA DO CABO

Durante o equacionamento de ambas as fases, a massa do ioiô foi suposta totalmente concentrada na extremidade dos cabos na forma de uma massa equivalente, constituída pela massa das ponteiros mais uma parcela devida aos cabos.

O desenvolvimento feito a seguir avalia esta parcela.

Este equacionamento é feito quanto à energia e quanto à quantidade e movimento angular durante a primeira fase.

#### A.1 - PARTICIPAÇÃO DO CABO NA ENERGIA CINÉTICA

Dado um cabo de densidade linear  $\rho$ , as velocidades de suas partículas são dadas pela Equação 27:

$$\vec{V}_x = (\omega + \dot{\psi})x\vec{\tau} + \omega a\vec{u} .$$

A energia cinética total é dada por:

$$\epsilon = \frac{1}{2} I\omega^2 + \frac{1}{2} 2m_p [(\omega + \dot{\psi})^2 \ell^2 + \omega^2 a^2] + 2 \cdot \epsilon_e . \quad (\text{A.1})$$

A parcela devida a um cabo é a seguinte:

$$\epsilon_c = \frac{1}{2} \rho \int_0^\ell (\omega + \dot{\psi})^2 x^2 dx + \frac{1}{2} \rho \ell \omega^2 a^2 . \quad (\text{A.2})$$

Resolvendo a integral e substituindo-a em A.1, tem-se:

$$\epsilon = \frac{1}{2} I\omega^2 + m_p [(\omega + \dot{\psi})^2 \ell^2 + \omega^2 a^2] + \rho(\omega + \dot{\psi})^2 \frac{\ell^3}{3} + \rho\ell\omega^2 a^2. \quad (\text{A.3})$$

A Equação A.3 deve ser equivalente à Equação 7.

Da Equação A.3 pode-se avaliar k em função da massa total do cabo, dado por  $\rho\ell$ .

Dessa forma:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} I\omega^2 + m_p [(\omega + \dot{\psi})^2 \ell^2 + \omega^2 a^2] + \rho(\omega + \dot{\psi})^2 \frac{\ell^3}{3} + \rho\ell\omega^2 a^2 &= \\ &= \frac{1}{2} I\omega^2 + (m_p + k) [(\omega + \dot{\psi})^2 \ell^2 + \omega^2 a^2]. \end{aligned}$$

Simplificando:

$$(\rho\ell) (\omega + \dot{\psi})^2 \frac{\ell^3}{3} + (\rho\ell) \cdot \omega^2 a^2 = k [(\omega + \dot{\psi})^2 \ell^2 + \omega^2 a^2],$$

o que implica que:

$$k = (\rho\ell) \cdot \frac{\omega^2 a^2 + (\omega + \dot{\psi})^2 \ell^2 / 3}{\omega^2 a^2 + (\omega + \dot{\psi})^2 \ell^2}.$$

Notando que  $\frac{\ell^2}{3} (\omega + \dot{\psi})^2 \gg \omega^2 a^2$ ;

chega-se a:

$$k = \frac{\rho\ell}{3}. \quad (\text{A.4})$$

Dessa forma, a expressão de  $\lambda$  fica:

$$\lambda = \frac{I}{2m_p + 2/3 \rho L} + a^2 . \quad (\text{A.5})$$

## A.2 - PARTICIPAÇÃO DO CABO NA QUANTIDADE DE MOVIMENTO ANGULAR

A quantidade de movimento angular do sistema  $\bar{e}$  dada por:

$$H = I\omega + 2m_p a^2 \omega + 2m_p \ell^2 (\omega + \dot{\psi}) + 2H_c . \quad (\text{A.6})$$

A parcela relativa ao cabo  $\bar{e}$  dada por:

$$H_c = \int_0^\ell \rho [a^2 \omega + (\omega + \dot{\psi}) x^2] dx , \quad (\text{A.7})$$

que foi obtida com base nas Equações 27 e 5.

Assim, resolvendo a integral e substituindo-a na Equação A.6, fica-se com:

$$H = I\omega + 2m_p a^2 \omega + 2m_p \ell^2 (\omega + \dot{\psi}) + \rho a^2 \omega \ell + \rho (\omega + \dot{\psi}) \frac{\ell^3}{3} . \quad (\text{A.8})$$

Igualando as Equações A.8 e 10, tem-se:

$$\begin{aligned} I\omega + 2m_p a^2 \omega + 2m_p \ell^2 (\omega + \dot{\psi}) + 2\rho a^2 \omega \ell + 2\rho (\omega + \dot{\psi}) \frac{\ell^3}{3} = \\ = I\omega + (2m_p + 2k) a^2 \omega + (2m_p + 2k) \ell^2 (\omega + \dot{\psi}) . \end{aligned}$$

Simplificando:

$$2(\rho\ell) a^2\omega + 2\rho\ell(\omega + \dot{\psi}) \frac{\ell^2}{3} = 2ka^2\omega + 2k\ell^2(\omega + \dot{\psi}) ,$$

ou

$$k = (\rho\ell) \frac{a^2\omega + (\omega + \dot{\psi}) \ell^2/3}{a^2\omega + (\omega + \dot{\psi}) \ell^2} .$$

Notando que:

$$\frac{\ell^2}{3} (\omega + \dot{\psi}) \gg \omega a^2 ,$$

chega-se a:

$$k = \frac{\rho\ell}{3} .$$

Se o mesmo procedimento for aplicado para a segunda fase, serão obtidos os mesmos resultados.

## APÊNDICE B

### PROGRAMA DE COMPUTADOR

Este programa gera as tabelas de análise dos cabos e está escrito em ALGOL.

As variáveis de saída do programa são as seguintes:

- L - Comprimento do cabo;
- LAMBDA - Índice de inércia;
- RO - Densidade linear do cabo;
- CARRUP - Carga de ruptura do cabo;
- TM - Tração máxima do cabo;
- M - Massa equivalente;
- MP - Massa da ponteira;
- MT - Massa total ( $MT = 2MP + 2.RO.L$ );
- R - Razão massa da ponteira/massa do cabo;
- CSMI - Coeficiente de segurança mínimo.

```
1005 ******
1010 *PROGRAMA IOIO
1020 ******
1030 *PROGRAMA PARA O DIMENSIONAMENTO DOS CABOS E MASSAS DO IOIO
1040 ******
1050 *
1060 BEGIN
1070 *
1080 *ESPECIFICACAO DOS COMANDOS DE IMPRESSAO
1090 FILE LEIA(KIND=REMDTE),ESCREVA(KIND=REMDTE),IMPRIMA(KIND=PRINTER);
1100 *
1110 *DEFINICAO DAS VARIAVEIS INTEIRAS E REAIS DAS MATRIZES E OAS
1120 *VARIAVEIS ALFANUMERICAS
1130 REAL A,B,C,L,I,RO,CARRUP,WF,W0,A1,B1,C1,WZE,PI;
1140 REAL ARRAY LAMBDA=TM1,ML,MT,M,R,CS,CSM[[40:100],WFI,TM[40:100,150:210];
1150 INTEGER J,K,JJ,N,II,TJJ;
1160 ALPHA ARRAY TITULO[1:5,1:4];
1170 *
1180 *DEFINICAO DE COMANDO DE IMPRESSAO
1190 DEFINE EIXO =WRITE(IMPRIMA,<<X23,"VELOCIDADE ANGULAR INICIAL",/,X6,
1200 16(X2,FS.1),/,,"LAMBDA",/,/,FOR WZE=150 STEP 4 UNTIL 210 DD WZL);#;
1210 *
1220 *DADOS
1230 PI=3.1415927;
1240 *
1250 *RAIO DO PONTO DE FIXACAO DO IOIO
1260 AI=395;
1270 *
1280 *MOMENTO DE INERCIA EM ROLAMENTO
1290 *SATELITE=9.7794KGM**2,AKM=22.0KGM**2,BAIA=5.0KGM**2
1300 I=36.86;
1310 *
1320 *VELOCIDADE ANGULAR INICIAL
1330 W0=18.85;
1340 *
1350 *VELOCIDADE ANGULAR FINAL
1360 WF=0.5236;
1370 *
1380 *COMANDO QUE SOLICITA O NUMERO DE SIMULACOES
1390 WRITE(ESCREVA,<</,X10,"INDIQUE O NUMERO DE REPLICACOES">>);
1400 READ(LEIA,/,N);
1410 FOR JJ=1 STEP 1 UNTIL N DO
1420 BEGIN
1430 *
1440 *COMANDOS QUE SOLICITAM OS DADOS DO(S) CABO(S)
1450 WRITE(ESCREVA,<<X10,"FORNECA A MARCA DO CABO">>);
1460 READ(LEIA,<<A6>>FOR JJ=1 STEP 1 UNTIL 4 DD TITULO[1,JJ]);
1470 WRITE(ESCREVA,<</,X10,"FORNECA O MATERIAL DO CABO">>);
1480 READ(LEIA,<<A6>>FOR JJ=1 STEP 1 UNTIL 4 DD TITULO[2,JJ]);
1490 WRITE(ESCREVA,<</,X10,"INDIQUE A CONSTRUCAO DO CABO">>);
1500 READ(LEIA,<<A6>>FOR JJ=1 STEP 1 UNTIL 4 DD TITULO[3,JJ]);
1510 WRITE(ESCREVA,<</,X10,"FORNECA A DIMENSAO DO CABO">>);
1520 READ(LEIA,<<A6>>FOR JJ=1 STEP 1 UNTIL 4 DD TITULO[4,JJ]);
1530 WRITE(ESCREVA,<</,X10,"FORNECA OS VALORES DA OENSIDADE E DA LARGA DE ",
1540 "RUPATURA">>);
1550 READ(LEIA,/,RO,CARRUP);
1560 WRITE(IMPRIMA[SKIP 1]);
```

```

1570 *
1580 *COMANDOS QUE IMPRIMEM O CABECALHO
1590 WRITE(IMPRIHA,<X28,"MARCA: ",A6,>X28,"MATERIAL: ",A6,>
1600 X28,"CONSTRUCAO: ",A6,>X28,"DIMENSAO: ",A6,>FOR II=1 STEP 1
1610 UNTIL 4 DO FOR JJ=1 STEP 1 UNTIL 4 DO TITULO(II,JJ)
1620 WRITE(IMPRIHA,<Y2,"L",X5,"LAMBDA",X5,"RD",X6,"CARRUP",X4,"TM",X7,
1630 "CS",X7,"M",X8,"HP",X7,"MT",X7,"R",X6,"CSMI",X1,"(N)",X5,"(M*2)",A3,
1640 "(K0/M)",X5,"(N)",X5,"(N)",X7,"-",X7,"(KG)",X5,"(KG)",X6,"-",
1650 X6,"-",>);
1660 *
1670 *COMANDO QUE ESPECTIFICA A FAIXA DE COMPRIMENTOS DA SIMULACAO
1680 FOR LI=4 STEP .1 UNTIL 8 DO
1690 BEGIN
1700 JI=10*LI
1710 B1=((M0*WF)+(L+A)**2+2*A*L*WF)/(WF*W0)
1720 C1=(A*L*WF/(WF*W0))**2
1730 *
1740 *CALCULO DE LAMBDA
1750 LAMBDA[J]=((SQRT(B1**2-4*C1)-R)/2)
1760 *
1770 *CALCULO DA MASSA DA EXPRESSAO DE LAMBDA
1780 M[J]=I/(LAMBDA[J]-A**2)
1790 *
1800 *CALCULO DA MASSA DA PONTEIRA
1810 ML[J]=(4*(L*10)-2*L*RD)/3/2
1820 *
1830 *CALCULO DA MASSA TOTAL
1840 MT[J]=2*ML[J]+2*L*RD
1850 *
1860 *CALCULO DA RAZAO MASSA DA PONTEIRA/MASSA DO CABO
1870 P[J]=ML[J]/(L*RD)
1880 *
1890 *CALCULO DA TRACAO MAXIMA DURANTE A PRIMEIRA FASE
1900 TM1[J]=9*W0**2*(ML[J]*(LAMBDA[J]-A**2)+SQRT(LAMBDA[J]/3)+
1910 RD*(LAMBDA[J]-2*A**2)+LAMBDA[J]/6)/(4*LAMBDA[J])
1920 *
1930 *CALCULO DO COEFICIENTE DE SEGURANCA NOMINAL
1940 CS[J]=CARRUP/TM1[J]
1950 A1=(LAMBDA[J]+A*L)**2+(A*L)**2+LAMBDA[J]
1960 *
1970 *CALCULO DAS MATRIZES DE SENSIBILIDADE
1980 FOR WZE=150 STEP 4 UNTIL 210 DO
1990 BEGIN
2000 B1=(LAMBDA[J]+A*L)+LAMBDA[J]*WZE*PI/15
2010 C1=(LAMBDA[J]-A*L)**2+LAMBDA[J]*(WZE*PI/30)**2
2020 MF1[J,WZE]=((n*SQRT(B1**2-4*A1+C1)+B1)*15)/(A1*PI)
2030 TM[J,WZE]=9*(WZE*PI/30)**2*(ML[J]*(LAMBDA[J]-A**2)+SQRT(LAMBDA[J]
2040 /3)+RD*(LAMBDA[J]-2*A**2)+LAMBDA[J]/6)/(4*LAMBDA[J])
2050 END
2060 *
2070 *CALCULO DO COEFICIENTE DE SEGURANCA MINIMO
2080 CSMI[J]=CARRUP/TM1[J,210]
2090 *
2100 *IMPRESSAO DA TABELA
2110 WRITE(IMPRIHA,<F4.1,X4,F6.2,X4,F5.4,X5,F5.0,X3,F5.0,6(X3,F6.3)>
2120 L,LAMBDA[J],RD,CARRUP,TM1[J],CS1[J],M[J],ML[J],MT[J],R[J],
2130 CSMI[J])
2140 ENDS
2150 ENDS
2160 *

```



