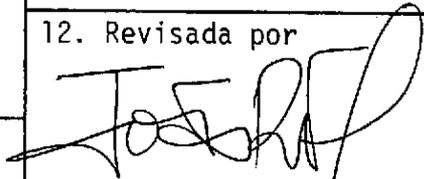
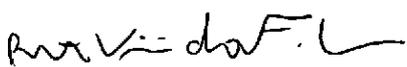
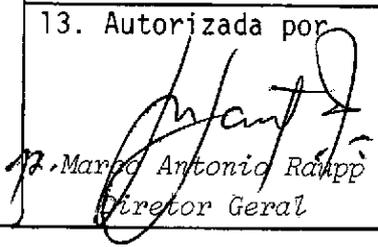
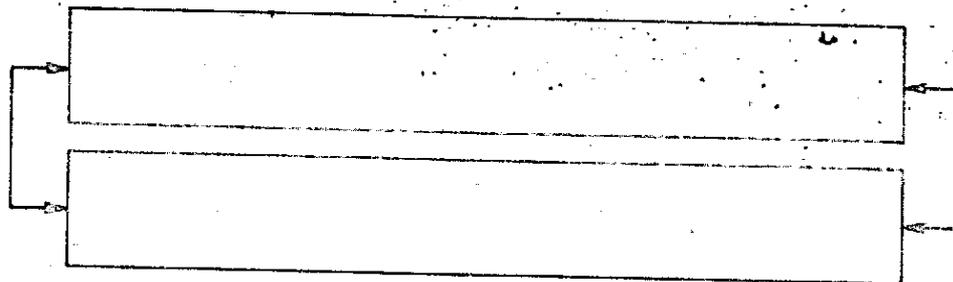


1. Publicação nº <i>INPE-4275-PRE/1147</i>	2. Versão	3. Data <i>Agosto 1987</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DMC</i>	Programa <i>A6A42 506435</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>AMORTECEDOR DE NUTAÇÃO ESTABILIZAÇÃO POR ROTAÇÃO SATÉLITES ARTIFICIAIS</i>			
7. C.D.U.: <i>629.7.062.2</i>			
8. Título <i>MODELAGEM DE UM AMORTECEDOR DE NUTAÇÃO PARA SATÉLITES ESTABILIZADOS POR ROTAÇÃO</i>		<i>INPE-4275-PRE/1147</i>	10. Páginas: <i>5</i>
			11. Última página: <i>4</i>
9. Autoria <i>Roberto V.F. Lopes</i>			12. Revisada por  <i>João R.F. Oliveira</i>
Assinatura responsável 			13. Autorizada por  <i>Marco Antonio Rapp</i> Diretor Geral
14. Resumo/Notas <i>Este artigo apresenta a modelagem de um amortecedor de nu- tação anular excêntrico parcialmente cheio. São abordados os diferen- tes modos de atuação do equipamento, bem como os testes experimentais para o cálculo de seu desempenho. O trabalho supriu de base teórica o projeto de um amortecedor de nutação para o primeiro satélite de Mis- são Espacial Completa Brasileira - MECB.</i>			
15. Observações <i>Este trabalho será submetido no IX Congresso Brasileiro de Eng^o Mecânico - COBEM/87, de 07 à 11 de Dezembro em Florianópolis Santa Catarina.</i>			



DO NOT WRITE IN THESE SPACES

SUMÁRIO

Este artigo apresenta a modelagem de um amortecedor de nutação anular excêntrico parcialmente cheio. São abordados os diferentes modos de atuação do equipamento, bem como os testes experimentais para o cálculo de seu desempenho. O trabalho supriu de base teórica o projeto de um amortecedor de nutação para o primeiro satélite da Missão Espacial Completa Brasileira - MECB.

INTRODUÇÃO

Satélites artificiais estabilizados por rotação estão sujeitos a desalinhamentos indesejáveis entre o vetor momento angular L e o eixo de rotação S . Este efeito surge pela ação perturbadora de torques ambientais e, em especial, de desbalanceamentos durante os processos de aquisição e correção de órbita e atitude. É oportuno frisar logo de início que o ângulo entre o vetor L e o eixo S , embora seja conhecido na Mecânica Clássica como ângulo de precessão, é denominado na Mecânica Espacial ângulo de nutação [1] e não deve ser confundido com o ângulo de deriva do vetor L devido à ação contínua de torques ambientais, este sim chamado ângulo de precessão.

Existem diversos tipos de equipamentos que lidam com o problema da nutação em satélites estabilizados por rotação. No caso de satélites em que o eixo de rotação é o de maior momento de inércia, amortecedores passivos são frequentemente utilizados para reduzir o ângulo de nutação a uma faixa residual desprezível. O princípio de funcionamento destes dispositivos consiste em reagir ao movimento de nutação com uma força dissipativa, reduzindo assim a energia cinética de rotação do satélite. Considerando o movimento livre de torques externos, o teorema da conservação do momento angular garante que L permanece constante no referencial inercial. Porém, no referencial definido pelos eixos principais de inércia do satélite, L é forçado a se mover em busca do elipsóide de mínima energia para a mesma esfera de momento angular (conforme indica a Figura 1). A solução de mínima energia corresponde ao alinhamento entre L e S .

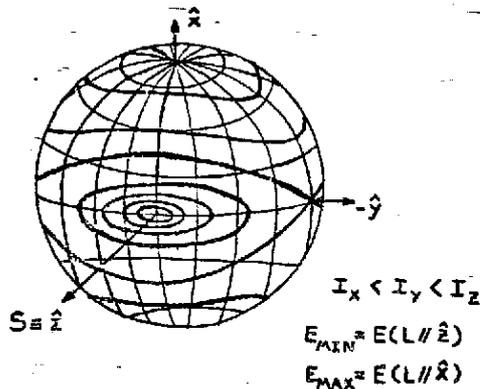


Fig. 1 Famílias de intersecções de elipsóides de energia com a esfera de momento angular.

Modos de Atuação. Neste trabalho considera-se um amortecedor de nutação do tipo anular excêntrico, parcialmente preenchido com líquido viscoso (conforme ilustra a Figura 2). Entre os fluidos tipicamente utilizados com esta finalidade citam-se o mercúrio e o silício. O modelo clássico linearizado deste problema, válido para pequenos ângulos, baseia-se no método do sorvedouro de energia e permite relacionar, ainda que aproximadamente, a constante de tempo do amortecimento com os parâmetros de projeto do amortecedor. Segundo esta abordagem existe um valor de transição (θ^*) do ângulo de nutação no qual o fluido passa de um modo de circulação síncrona com a frequência de nutação para outro modo caracterizado por um movimento oscilatório em torno do ponto de equilíbrio estável, cuja distância ao eixo S é máxima. Estes modos são denominados respectivamente nutação-síncrono e spin-síncrono. A excentricidade do anel em relação ao eixo S garante que em ambos os modos o fluido permanece aglutinado, evitando assim o modo degenerado que ocorre no tipo concêntrico, em que o líquido se esparrama no interior do tubo quando a nutação é pequena (contudo ainda não desprezível) e praticamente pára de dissipar.

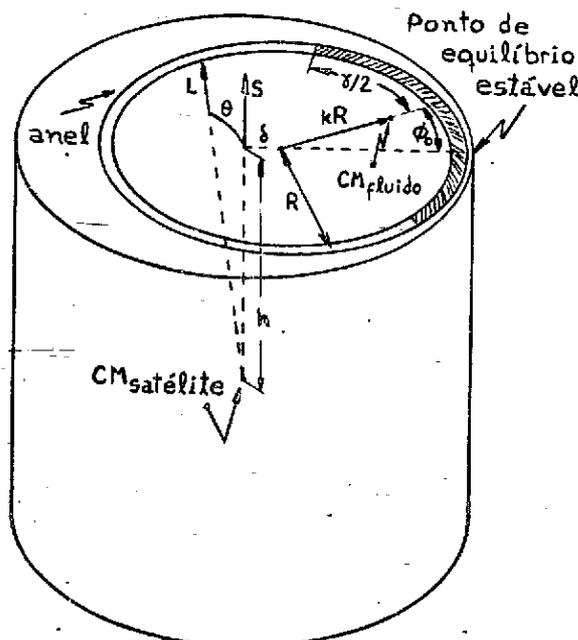


Fig. 2 Vista esquemática do amortecedor de nutação no satélite.

Testes Experimentais. Embora a estimativa feita pelo método do sorvedouro de energia seja útil na fase de dimensionamento de um amortecedor, são necessários testes experimentais para obter valores mais realistas para a constante de tempo do amortecimento. Entretanto, dadas as dificuldades operacionais evidentes de simular em ambiente gravitacional condições orbitais de equilíbrio dinâmico, e também pelo interesse em estabelecer melhor as características dos dois modos de atuação, são necessários testes funcionais específicos para simular isoladamente cada um destes modos. Assim, para simular o modo nutação-síncrono planejou-se um teste [2] com o amortecedor fixo a uma mesa de rotação controlada girando inclinada em relação à vertical local. Ao girar, o anel tende a arrastar o líquido de sua posição de equilíbrio estático para outra de equilíbrio cinemático se parada daquela por um ângulo proporcional ao coeficiente de amortecimento do modo nutação-síncrono. Logo, medindo este ângulo determina-se o coeficiente.

No caso do modo spin-síncrono o teste, idealizado originalmente por Bhuta e Koval [3] para o caso do tubo completamente cheio, consiste em fixar o anel em um pêndulo. O coeficiente de amortecimento referente ao modo spin-síncrono pode ser calculado a partir da constante de tempo de amortecimento das amplitudes de oscilação do pêndulo.

As seções subsequentes apresentam os principais resultados obtidos, nos quais se baseou o dimensionamento de um amortecedor [4] para o Satélite de Coleta de Dados atualmente em desenvolvimento no Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE-MCT), como parte da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB). Uma apresentação mais detalhada destes resultados encontra-se em Lopes [5].

LISTA DE SÍMBOLOS

- a - Raio da seção reta do anel.
- c - Coeficiente de amortecimento.
- c_N - Coeficiente de amortecimento do modo nutação-síncrono.
- c_S - Coeficiente de amortecimento do modo spin-síncrono.
- g - Aceleração gravitacional.
- h - Altura do anel em relação ao centro de massa do satélite.
- k - Razão entre a flecha até o centro de massa de um arco de circunferência e seu raio.
- l - Distância do pivô ao centro do anel, no pêndulo.
- l_0 - Distância do pivô ao centro de massa do pêndulo.
- m - Massa do fluido viscoso.
- s - Velocidade angular da mesa de rotação controlada.
- t - Tempo.
- t^* - Tempo adimensional.
- F_V - Força viscosa.
- I_0 - Momento de inércia do pêndulo (incluindo o amortecedor) em relação ao pivô.
- I_S - Momento principal de inércia do satélite em relação ao eixo de simetria S.
- I_T - Momento principal de inércia do satélite em relação a um eixo qualquer transversal a S.
- L - Momento angular do satélite.
- M - Massa total do pêndulo incluindo o amortecedor.
- R - Raio do anel.
- S - Eixo de simetria e de maior momento de inércia.
- T - Energia cinética de rotação.

- β - Ângulo entre a vertical local e o eixo de rotação da mesa de rotação controlada.
- γ - Ângulo do setor do anel preenchido pelo fluido.
- δ - Distância do centro do anel ao eixo de simetria S.
- θ - Ângulo de nutação.
- θ^* - Ângulo de transição entre os modos nutação-síncrono e spin-síncrono.
- λ - Frequência natural de oscilação do pêndulo.
- ν - Viscosidade cinemática do fluido.
- ρ - Densidade de massa do fluido.
- σ - Razão de momentos de inércia.
- τ_N - Constante de tempo de amortecimento do modo nutação-síncrono.
- τ_S - Constante de tempo de amortecimento do modo spin-síncrono.
- ϕ_0 - Ângulo de deslocamento do centro de massa do fluido em relação à posição de equilíbrio estável.
- Ω - Velocidade de rotação do satélite.

DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS

$$c = 8 \nu / [a^2 \Omega (\sigma - 1)]$$

$$k = \frac{\sin \gamma / 2}{\gamma / 2}$$

$$m = \rho \pi R a^2 \gamma$$

$$t^* = (\sigma - 1) \Omega t$$

$$A = \delta k (\sigma - 1)^{-2} / R$$

$$B = \sigma^2 (\sigma - 1)^{-2} h k / R$$

$$D_S = B / \sqrt{c^2 + (A - 1)^2}$$

$$K = g k \lambda^{-2} / R$$

$$\theta^* = \arctg \left[\sqrt{c^2 + A^2} / B \right]$$

$$e_S = - \arctg [c / (A - 1)]$$

$$\lambda = \sqrt{M g l_0 / I_0}$$

$$\sigma = I_S / I_T$$

$$\Lambda = 1 + l k / R$$

EQUAÇÕES DO MOVIMENTO DO FLUIDO

Admitindo o modelo de Poiseuille para escoamento laminar em regime permanente de fluido incompressível no interior de um tubo retilíneo com seção reta circular, obtêm-se a força viscosa na parede do tubo:

$$F_V = - 8 \pi \nu \gamma R^2 \dot{\phi}_0 \quad (1)$$

Admitindo agora o fluido como um tarugo de inércia desprezível em relação à do satélite, e considerando o movimento livre deste último com um pequeno ângulo de nutação em torno do eixo de simetria S, $I_S > I_T$, obtêm-se para o equilíbrio dinâmico do tarugo a seguinte expressão adimensionalizada:

$$\phi_0'' = - A \sin \phi_0 - B t g \theta \sin (\phi_0 - t^*) - c \dot{\phi}_0 \quad (2)$$

onde ' denota derivada em relação ao tempo adimensional t^* e c é denominado coeficiente de amortecimento. Se $\theta \gg \theta^*$, então a Equação 2 admite a seguinte solução aproximada:

$$\phi_0 = t^* \quad (3)$$

que define o modo nutação-síncrono. O modo spin-síncrono surge quando $\theta \ll \theta^*$. Neste caso a solução de regime permanente é dada por:

$$\phi_0 = D_S \text{tg} \theta \text{sen}(t^* + \epsilon_S), \quad (4)$$

desde que a amplitude de oscilação $D_S \text{tg} \theta$ seja pequena.

MÉTODO DO SORVEDOURO DE ENERGIA

A energia cinética de rotação do satélite em função do ângulo de nutação é expressa por:

$$T(\theta) = \frac{L^2}{2} \left(\frac{\text{sen}^2 \theta}{I_T} + \frac{\text{cos}^2 \theta}{I_S} \right) \quad (5)$$

Dadas as equações de movimento do fluido nos dois modos básicos, o método do sorvedouro de energia consiste em igualar a potência média dissipada pela ação das forças viscosas à taxa de variação da energia cinética de rotação. Fazendo isto conclui-se que no modo nutação-síncrono o cosseno de θ cresce exponencialmente com constante de tempo dada por:

$$\tau_N = \left\{ (\sigma - 1)^2 \Omega \text{cm} R^2 / I_S \right\}^{-1} \quad (6)$$

até haver a transição para o modo spin-síncrono. Neste segundo modo o decaimento torna-se exponencial com constante de tempo dada por:

$$\tau_S = \frac{c + (A-1)^2/c}{B^2 (\sigma - 1)^2 \Omega \frac{1}{2} m R^2 / I_S} \quad (7)$$

No modo nutação-síncrono o fluido dissipa energia a uma taxa mais elevada que no modo spin-síncrono, sendo por isso mais eficiente. Assim, o ângulo de nutação cai rapidamente até atingir o ângulo de transição, após o que o fluido passa a operar em torno da velocidade nula em movimento oscilatório (veja Figura 3). A eficiência do modo spin-síncrono pode entretanto ser otimizada escolhendo um fluido cuja viscosidade seja tal que $c = |A-1|$, o que sintoniza o amortecedor, isto é, minimiza τ_S .

TESTES FUNCIONAIS

Análises de resultados experimentais [2,3,6] mostram que as estimativas baseadas no método do sorvedouro de energia ou em métodos semelhantes apresentam erros significativos e, portanto, servem apenas como guia para a fase de dimensionamento de um amortecedor. Comparações com resultados obtidos por integração numérica das equações exatas derivadas da formulação lagrangeana indicam a validade das aproximações feitas na solução das equações do movimento [6,7]. O problema principal parece estar associado à incapacidade do modelo de Poiseuille em representar adequadamente o fenômeno. De fato, este modelo ignora elementos relevantes tais como a curvatura do tubo, a tensão superficial do líquido, a aderência de uma película na parede do tubo e oscilações no perfil de velocidades do escoamento. Não obstante pode-se ainda insistir em considerar as Relações 6 e 7 formalmente válidas, redefinindo o valor do coeficiente de amortecimento de modo a incorporar os efeitos não-modelados. Na prática isto requer que se calcule um valor equivalente de c para cada modo de atuação. Embora alguns esforços tenham sido feitos para estimar teoricamente os novos coeficientes, os resultados obtidos não prescindem dos testes experimentais.

Por esta razão os coeficientes equivalentes de amortecimento, c_N e c_S , são obtidos experimentalmente a partir de ensaios com uma mesa de rotação controlada e com um pêndulo.

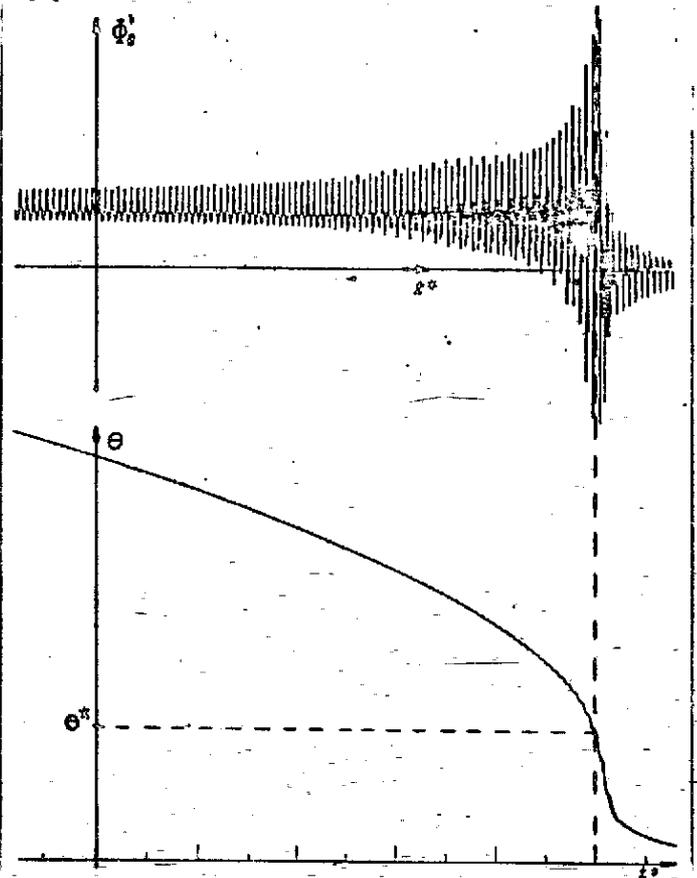


Fig. 3 - Ilustração dos dois modos de amortecimento.

Seguindo a mesma metodologia das Seções anteriores obtém-se para a constante de tempo do amortecimento do pêndulo a seguinte expressão:

$$\tau_S = \frac{I_0}{\frac{1}{2} m R^2} \frac{c_S + (1-K)^2/c_S}{\lambda (A-K)^2} \quad (8)$$

A ambigüidade na determinação de c_S pela Equação 8 pode ser eliminada repetindo o experimento com os parâmetros do pêndulo ligeiramente diferentes. Comparando as Equações 7 e 8 verifica-se que as condições para que o pêndulo simule o modo nutação-síncrono do amortecedor no satélite são:

$$K = A, \quad \lambda = (\sigma - 1) \Omega, \quad \frac{I_0}{(A-K)^2} = \frac{I_S}{(\sigma - 1) B^2} \quad (9)$$

No caso do ensaio com a mesa de rotação controlada, impondo o equilíbrio de forças obtém-se:

$$c_N = \frac{k g \text{sen} \beta}{R s^2} \text{sen} \psi \quad (10)$$

A simulação do modo spin-síncrono do amortecedor no satélite é obtida fazendo $s = (\sigma - 1) \Omega$.

CONCLUSÕES

Apresentou-se a modelagem de um amortecedor de nutação do tipo anular excêntrico parcialmente preenchido de líquido viscoso. Foram considerados os dois modos básicos de operação do amortecedor em função do ângulo de nutação. O primeiro modo, denominado nutação-síncrono, ocorre quando a nutação é acentuada e é o mais eficiente pois o fluido nesta situação circula no interior do tubo dissipando energia a uma taxa elevada. No segundo modo o fluido oscila em relação ao tubo provocando um decaimento exponencial do ângulo de nutação. Expliou-se também a metodologia de obtenção experimental dos coeficientes de amortecimento dos dois modos distintos de atuação através dos testes funcionais.

Os resultados aqui apresentados serviram de base para a escolha dos parâmetros de um amortecedor de nutação para o Satélite de Coleta de Dados, o primeiro da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB). Os coeficientes de amortecimento servirão para calcular as constantes de tempo do amortecimento e ainda para interpretar os resultados do teste final de desempenho feito com o amortecedor instalado no satélite, girando sobre uma mesa de mancal esférico sob a ação natural da gravidade.

REFERÊNCIAS

- [1] Wertz, J.R. Spacecraft Attitude Determination and Control. D.Reidel Publ. Co., London, 1978.
- [2] Hinada, M. and Inatani, Y. Liquid Behavior in Passive Nutation Dampers for Spin Stabilized Satellites. Trans. Japan Soc. Aerospace Sci., vol. 27, No 78, 1984, pp. 217-227.
- [3] Bhuta, P.G. and Koval, L.R. A Viscous Ring Damper for a Freely Precessing Satellite. Int. J. Mech. Sci. Pergamon Press Ltda. 1966, vol.8., pp. 383-395.
- [4] Lopes, R.V.F.; Ricci, M.C. and Guedes, U.T.V. Partially Filled Viscous Ring Nutation Damper: Brief Description and Preliminary Design. INPE, São José dos Campos, Jun., 1986. [NTI-AMNUT-007-DMC/86].
- [5] Lopes, R.V.F. Partially Filled Ring Nutation Damper: Modelling for Small Nutation Angles. INPE, São José dos Campos, Jun., 1986. [NTI-AMNUT-006-DMC/86].
- [6] Alfried, K.T. Partially Filled Viscous Ring Nutation Damper. J. Spacecraft, Jul. 1974, pp. 456-462.
- [7] Cruz, J.J. e Lopes, R.V.F. Validação do Método do Sorvedouro de Energia para Avaliar a Constante de Tempo de um Amortecedor de Nutação. (Submetido para publicação no Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, Gramado, RS, 7 a 12 de Setembro de 1987).

ABSTRACT

This paper presents the modelling of a partially filled off set ring nutation damper. The different actuation modes of this equipment as well as the experimental tests for its performance evaluation were considered. The work supplied the theoretical basis to the design of a nutation damper for the first MECB' satellite.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

PROPOSTA PARA
PUBLICAÇÃO

- DISSERTAÇÃO
- TESE
- RELATÓRIO
- OUTROS

TÍTULO Modelagem de um Amortecedor de Nutação para Satélites Estabilizados por Rotação

IDENTIFICAÇÃO

AUTOR(ES)

Roberto V.F.Lopes

ORIENTADOR

CO-ORIENTADOR

LIMITE

DEFESA

CURSO

ORGÃO

— / — / —

— / — / —

DIVULGAÇÃO

EXTERNA

INTERNA

RESTRITA

EVENTO/MEIO COBEM

CONGRESSO

REVISTA

OUTROS

NOME DO REVISOR

João Ricardo de Freitas Oliveira

RECEBIDO

DEVOLVIDO

ASSINATURA

— / — / —

— / — / —

[Handwritten signature]

WILSON OLIVEIRA DE SILVA

Responsável
Chefe do Departamento de
Mecânica Espacial e Controle
(Substituto)

APROVADO

DATA

ASSINATURA

SIM
 NÃO

— / — / —

[Handwritten signature]

REV. LINGUAGEM

Nº

PRIOR

RECEBIDO

NOME DO REVISOR

115

1

19/5/87

Gloria Belli

PÁG

DEVOLVIDO

ASSINATURA

20/5/87

— / — / —

[Handwritten signature]

OS AUTORES DEVEM MENCIONAR NO VERSO INSTRUÇÕES ESPECÍFICAS, ANEXANDO NORMAS, SE HOUVER

RECEBIDO

DEVOLVIDO

NOME DA DATILOGRÁFA

— / — / —

marli

Nº DA PUBLICAÇÃO

4275 PRE/1147

CÓPIAS

Nº DISCO

LOCAL

AUTORIZO A PUBLICAÇÃO

SIM

NÃO

— / — / —

OBSERVAÇÕES E NOTAS