

TESE
178

**ESTUDO TEÓRICO DA PRESSÃO
DE TRABALHO EM MANCAIS DE
DESLIZAMENTO COM MATERIAIS
SECOS AUTO-LUBRIFICANTES.**

Celso Pinto Morais Pereira

ESTUDO TEÓRICO DA PRESSÃO
DE TRABALHO EM MANCAIS DE
DESLIZAMENTO COM MATERIAIS
SECOS AUTO-LUBRIFICANTES.

21 SET 1978



CELSO PINTO MORAIS PEREIRA

TESE APRESENTADA À COORDENAÇÃO DOS CURSOS
DE PÓS-GRADUAÇÃO DA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITA-
JUBÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA".

ITAJUBÁ (MG) - BRASIL
NOV/77

Class.	62-233.2, 001.2(043.2)
Cutl.	P436 e
Tombo	178

ESTUDO TEÓRICO DA PRESSÃO
DE TRABALHO EM MANCAIS
DESLIZAMENTO COM MATERIAIS
SECS AUTO-LUBRIFICANTES.

21 SET 1978



CELSONO PINTO KORAIS PEREIRA

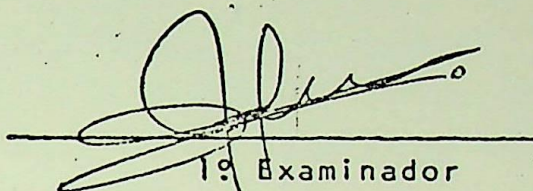
TESTE APRESENTADA À COORDENAÇÃO DOS CURSOS
DE PÓS-GRADUAÇÃO DA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITA-
JUBÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
"TESTE EM ENGENHARIA TÉCNICA".

ITAJUBÁ (RJ) - BRASIL
1977

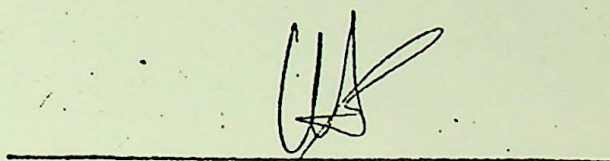
II

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica" e aprovada em sua forma final pela Comissão Examinadora e Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação.

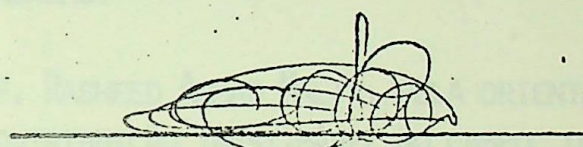
Comissão



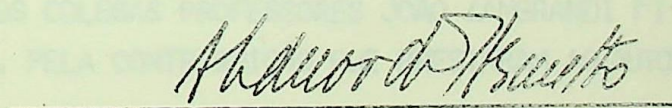
1º Examinador
Prof. Wagner José Oliva



2º Examinador
Prof. Marcio Tadeu de Almeida



3º Examinador
Prof. Ulderico Mandolesi



Prof. Antonio Eduardo Hermeto
Presidente da CPG

ITAJUBÁ (MG) - BRASIL
novembro/77

A G R A D E C I M E N T O S

AO PROF. ULDERICO MANDOLESÌ, PELO ESTÍMULO
AO DESENVOLVIMENTO DESTE TRABALHO.

AO PROF. RASHEED AHMAD MALIK, PELA ORIENTA
ÇÃO, SUGESTÕES VALIOSAS E CONTRIBUIÇÃO INESTIMÁVEL NO CAMPO DA
TRIBOLOGIA.

AOS COLEGAS PROFESSORES JOÃO ZANGRANDI FI-
LHO E NAZEM NASCIMENTO, PELA CONTRIBUIÇÃO QUE PRESTARAM AO AUTOR.

À LUCIANA PELA AJUDA NA PREPARAÇÃO DOS ORI-
GINAIS DESTE TRABALHO.

A TODOS, ME SINTO ENDIVIDADO.

SUMÁRIO

O PRESENTE TRABALHO TRATA DE UMA REVISÃO DA LITERATURA SOBRE AS PROPRIEDADES DE DESGASTE E ATRITO ASSIM COMO DE EXPERIÊNCIAS DOS MATERIAIS AUTO-LUBRIFICANTES EM MUCAIS DE DESLIZAMENTO ALÉM COMPARAÇÃO AOS MATERIAIS CONVENCIONAIS.

BASEADO NESTA REVISÃO, UMA EXPRESSÃO MATEMÁTICA FOI DESENVOLVIDA PELO AUTOR PARA A DETERMINAÇÃO TEÓRICA DA PRESSÃO DE TRATILHO DO MUCAL LEVANDO EM CONTA OS EFEITOS DE DEFORMAÇÃO E DESGASTE RADIAL, ASSIM COMO OUTROS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.

ESTA EXPRESSÃO ALÇA O EFEITO DO COEFICIENTE DE FRIÇÃO DO MUCAL PARA PREVER A VIDA ÚTIL DO MESMO. FOI MOSTRADO QUE ESTA EXPRESSÃO TEÓRICA PODE PREVER O EFEITO DA FOLSA DO MUCAL EM SUA VIDA ÚTIL E OS RESULTADOS TEÓRICOS CONCORDAM RAZOAVELMENTE COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

AOS MEUS PAIS.

SUMÁRIO

O PRESENTE TRABALHO TRATA DE UMA REVISÃO DA LITERATURA SOBRE AS PROPRIEDADES DE DESGASTE E ATRITO ASSIM COMO AS VANTAGENS DOS MATERIAIS AUTO-LUBRIFICANTES EM MANCAIS DE DESLIZAMENTO QUANDO COMPARADOS AOS MATERIAIS CONVENCIONAIS.

BASEADO NESTA REVISÃO, UMA EXPRESSÃO MATEMÁTICA FOI DESENVOLVIDA PELO AUTOR PARA A DETERMINAÇÃO TEÓRICA DA PRESSÃO DE TRABALHO DO MANCAL LEVANDO EM CONTA OS EFEITOS DE DEFORMAÇÃO E DESGASTE RADIAL, ASSIM COMO OUTROS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.

ESTA EXPRESSÃO ALOJA O EFEITO DO COEFICIENTE DE FOLGA DO MANCAL PARA PREDIZER A VIDA ÚTIL DO MESMO. FOI MOSTRADO QUE ESTA EXPRESSÃO TEÓRICA PODE PREDIZER O EFEITO DA FOLGA DO MANCAL EM SUA VIDA ÚTIL E OS RESULTADOS TEÓRICOS CONCORDAM RAZOAVELMENTE COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

S U M M A R Y

THE PRESENT WORK DEALS WITH A REVIEW OF THE LITERATURE CONCERNING FRICTIONAL AND WEAR PROPERTIES AND ADVANTAGES OF SELF-LUBRICATING SLEEVE BEARINGS AS COMPARED TO CONVENTIONAL BEARING MATERIALS.

BASED ON THIS REVIEW A MATHEMATICAL EXPRESSION HAS BEEN DEVELOPED BY THE AUTHOR FOR THE THEORETICAL DETERMINATION OF BEARING WORKING PRESSURE TAKING INTO CONSIDERATION SUCH FACTORS AS DEFORMATION AND RADIAL WEAR ALONG WITH OTHER GEOMETRICAL PARAMETERS.

THIS EXPRESSION ACCOMMODATES THE EFFECT OF BEARING CLEARANCE FOR THE PREDICTION OF BEARING USEFUL LIFE. IT HAS BEEN SHOWN THAT THIS THEORETICAL EXPRESSION CAN PREDICT THE EFFECT OF BEARING CLEARANCE ON ITS USEFUL LIFE AND THE THEORETICAL RESULTS AGREES REASONABLY WITH THE EXPERIMENTAL RESULTS.

VII

ÍNDICE

I. MATERIAIS AUTO-LUBRIFICANTES	01
1. Introdução	02
2. Mecanismo de atrito	03
3. Mecanismo de desgaste	05
II. REVISTA AOS PRINCIPAIS MATERIAIS AUTO-LUBRIFICANTES	06
1. Plásticos	07
1a. aplicações	09
1b. vantagens	09
1c. desvantagens	12
1d. comparação geral	13
2. Grafite	13
2a. mecanismo de lubrificação	17
2b. corpos carbono-grafite	21
2c. carbono grafite impregnado	24
2d. compostos metal-grafite	24
3. Fluorcarbonos	27
3a. características de atrito e desgaste	28
III. INTRODUÇÃO AOS TIPOS DE DESGASTE	32
1. Tipos de Desgaste	33
2. Importância da forma de desgaste para um sistema de mancal seco	37
3. Considerações para projeto de mancais secos	38
IV. PRESSÃO DE TRABALHO EM MANCAL SECO	41
1. Introdução	42
2. Ângulo de contato	45
3. Modelo e Análise da pressão de trabalho no mancal	47

VIII

V.	EFEITO DO DESGASTE RADIAL NA PRESSÃO DO MANCAL	55
1.	Introdução	56
2.	Aplicação numérica	60
3.	Curvas pressão de trabalho vs. desgaste radial ...	62
VI.	EFEITO DO COEFICIENTE DE FOLGA NA VIDA DO MANCAL	65
1.	Aspectos do critério PV sobre desgaste	66
2.	Efeito do coef. de folga sobre a pressão de trabalho	68
3.	Comprovação experimental	69
4.	Curvas "efeito do C_d/D sobre a pressão de trabalho ..	70
5.	Perfil de desgaste após 5 horas de operação	72
6.	Perfil de desgaste após 200 horas de operação	73
	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	76
	BIBLIOGRAFIA	80
APÊNDICE A	- Integração	83
APÊNDICE B	- Efeito da variação de folga com a temperatura sobre a pressão de trabalho em mancal.	84
APÊNDICE C	- Teoria da aderência por atrito	85
APÊNDICE D	- Equações de Hertz	87
APÊNDICE E	- Material "DU"	97
APÊNDICE F	- Viscoelasticidade	100
APÊNDICE G	- Programa das curvas "pressão de trabalho vs. desgaste radial"	104
APÊNDICE H	- Programa das curvas "efeito teórico de C_d/D sobre a pressão de trabalho do mancal.	108

ÍNDICE DE FIGURAS

01	Ilustração esquemática de superfícies metálicas	04
02	Polímeros termoplásticos	08
03	Polímeros thermosetting	08
04	Estrutura cristalina do grafite	17
05	Coeficiente de atrito e desgaste volumétrico/unidade de tempo para composições de carbono no ar e no vácuo	19
06	Efeito da temperatura sobre o atrito no grafite para o ar e no vácuo	20
07	Comparação entre o coef. de atrito e a razão da tensão de cisa- mentamento pela pressão efetiva de deformação	30
08	Aparência típica da falha da superfície por fadiga em seus está- gios iniciais	36
09	Posição da tensão máxima para contato elástico de superfícies cilíndrica e plana	36
10	Resultados de teste de desgaste para NYLON 6/6	39
11	Representação esquemática da distribuição de pressão e desgaste em uma bucha de mancal seco	44
12	Deformação Hertziana	56
13	Curva típica desgaste-tempo para os materiais	59
14	Curvas de pressão de trabalho vs. desgaste radial	62
15	Efeito teórico do coef. de folga sobre a pressão de trabalho no mancal	70
16	Perfil de desgaste inicial rápido no mancal	72
17	Perfil de desgaste contínuo no mancal	73
18	Curva de CREEP idealizada para uma tensão constante e uma tempe- ratura constante	100
19	Módulo de CREEP à tração vs. temperatura	101
20	Limite de resistência à tração vs. temperatura	102
21	CREEP sob tensão - material: NYLON 6/6	103

LISTA DE SÍMBOLOS

a ...	semi-largura da zona de contato Hertziana
A ...	área projetada do mancal
C_r ...	folga radial
C_d ...	folga diametral
E ...	módulo de elasticidade transversal
E_b ...	módulo de elasticidade transv. do material do mancal
E_j ...	módulo de elasticidade transv. do material do munhão
H ...	tempo (horas)
K_r ...	fator de desgaste radial
L ...	largura do mancal
O_b ...	centro do mancal
O_j ...	centro do munhão
P ...	pressão
P_e ...	pressão assumindo distribuição constante
P_c ...	pressão assumindo distribuição cossenoidal
P_m ...	pressão assumindo distribuição semi-elíptica
r_w ...	desgaste radial ao longo da linha de carga
R_w ...	desgaste radial máximo
R_b ...	raio do mancal
R_j ...	raio do munhão
t ...	espessura da bucha
V_w ...	volume total de material perdido no desgaste
V ...	velocidade
W ...	carga aplicada ao mancal
Φ_c ...	semi-ângulo de contato
μ ...	coeficiente de atrito
ν ...	coeficiente de Poisson
δ_r ...	deformação elástica para condições de não-desgaste

NOTAÇÃO DE ACORDO COM A REF. (1) .

MATERIAIS AUTO-LUBRIFICANTES

1. INTRODUÇÃO

MATERIAIS AUTO-LUBRIFICANTES

CAPÍTULO I

Nos últimos anos a tendência de aumento da velocidade de deslizamento a graus crescentes de tensões térmicas, mecânicas e químicas apresenta inevitavelmente novos problemas de atrito e desgaste.

Os óleos minerais convencionais não conseguem lubrificar de modo efetivo em temperaturas que excedam os limites de 150°C, e mesmo os lubrificantes sólidos sintéticos mais novos estão limitados a temperaturas acima de 350°C. À temperatura mais elevada há também muitas aplicações nas quais os lubrificantes à base de hidrocarbonetos são, por motivos de segurança, devido à contaminação.

Os dois métodos principais para solução destes problemas são: o primeiro, e o mais atrativo de imediato, é usar camadas finas de lubrificantes sólidos, tais como grafite e dióxido de silício, em uma ou ambas as superfícies deslizantes dos materiais convencionais. A segunda solução, entretanto, reside no desenvolvimento de novos materiais com uma estrutura intrínseca que exista baixo atrito e desgaste sem necessidade de lubrificação adicional.

O nosso objetivo é discutir o progresso que está sendo realizado atualmente nestas direções, com ênfase especial no desenvolvimento dos materiais auto-lubrificantes.

O desgaste, em geral, é um problema mecânico de importância maior que o atrito. Geralmente é possível compensar a dissipação de energia causada pelo atrito, mas, não se pode obter compensação pela dissipação de energia pelo desgaste.

MATERIAIS AUTO-LUBRIFICANTES

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a tendência de sujeitar superfícies de deslizamento a graus crescentes de tensões térmicas, mecânicas e ambientais apresentou inevitavelmente novos problemas de atrito e desgaste.

Os óleos minerais convencionais não conseguem lubrificar de modo efetivo em temperaturas que excedam em muito a 150°C , e mesmo os lubrificantes fluidos sintéticos mais novos estão limitados a temperaturas abaixo de 350°C . À temperaturas mais baixas há também muitas aplicações nas quais os lubrificantes à base de hidrocarbonos são, inefetivos ou inadmissíveis devido à contaminação.

Há dois métodos principais para solução destes problemas. O primeiro, e o mais atrativo de imediato, é usar camadas finas de lubrificantes sólidos, tais como grafite e dissulfeto de molibdênio, entre as superfícies deslizantes dos materiais convencionais. A última solução, entretanto, recai no desenvolvimento de novos materiais compostos que intrinsecamente exibem baixo atrito e desgaste, sem necessidade de lubrificação adicional.

O nosso objetivo é discutir o progresso que está sendo realizado atualmente nestas direções, mas com ênfase especial no comportamento dos materiais auto-lubrificantes.

O desgaste, em geral, é um problema tecnológico de importância maior que o atrito. Geralmente é possível compensar a dissipação de energia causada pelo atrito, mas, não se pode obter compensação pela dissipação de energia pelo desgaste.

Além do mais, os coeficientes de desgaste de diferentes combinações de materiais podem variar de muitas ordens de grandeza, e ao passo que os coeficientes de atrito geralmente variam de uma única ordem. O atrito não é somente muito mais conveniente para medida que o coeficiente de desgaste; os processos físicos envolvidos são mais simples e mais totalmente compreendidos.

A lei de atrito de AMONTONS: "a força de atrito é proporcional à carga e independe da área aparente de contato" é conhecida há mais de 250 anos, mas somente no decorrer da última década as leis de desgaste correspondentes foram estabelecidas. Como tanto o atrito como o desgaste são manifestações da interação durante o deslizamento de pequenas regiões localizadas das superfícies do mancal, é válido discutir-se em seguida os vários tipos de interação que podem ocorrer e de que maneira eles influenciam o coeficientes de atrito e o coeficiente de desgaste de um sistema de mancal-munhão.

2. MECANISMO DE ATRITO EM MATERIAIS AUTO-LUBRIFICANTES

Quando duas superfícies entram em contato, pequenas regiões da interface nominal são deformadas e as forças inter-atômicas provocam a aderência. Se a força de adesão é relativamente alta, a resistência de atrito ao movimento é então largamente determinada pela força tangencial necessária para cisalhar as regiões aderentes. Quando a aderência é pequena, entretanto, podem surgir significativas contribuições ao atrito da parte dos outros mecanismos, incluindo bloquear as asperezas e "arar" a superfície áspera tornando-a mais suave.

Sob condições atmosféricas normais, todas as superfícies de metal são cobertas por camadas de vapor e gás absorvidas fisicamente ou por produtos de reação química com o ambiente de contato, em geral óxidos, como na fig. (1). A aderência entre essas camadas da

superfície é; em geral, menor que entre os metais, e as camadas podem portanto ser consideradas como lubrificantes primários.

A força de atrito é reduzida a um mínimo quando as camadas da superfície conservam-se substancialmente intactas durante o deslizamento e portanto evitam o contato metal-metal. A extensão da penetração de uma camada depende do grau de deformação localizada que ocorre e também das propriedades mecânicas da camada relativa àquela de seu substrato

Até recentemente acreditava-se geralmente que a deformação localizada das asperezas da superfície era predominantemente plástica, e isso era apoiado pelo fato de que as leis de atrito de AMONTONS podiam e permitiam explicar isto com base na deformação plástica. O exame de superfícies desgastadas através de microscópio eletrônico de reflexão, entretanto, indica que a deformação elástica é provável com muito mais frequência durante deslizamentos do que como era comumente acreditado, e posteriormente ARCHARD mostrou que as leis de AMONTONS geralmente permanecem válidas, mesmo quando a deformação é totalmente elástica.

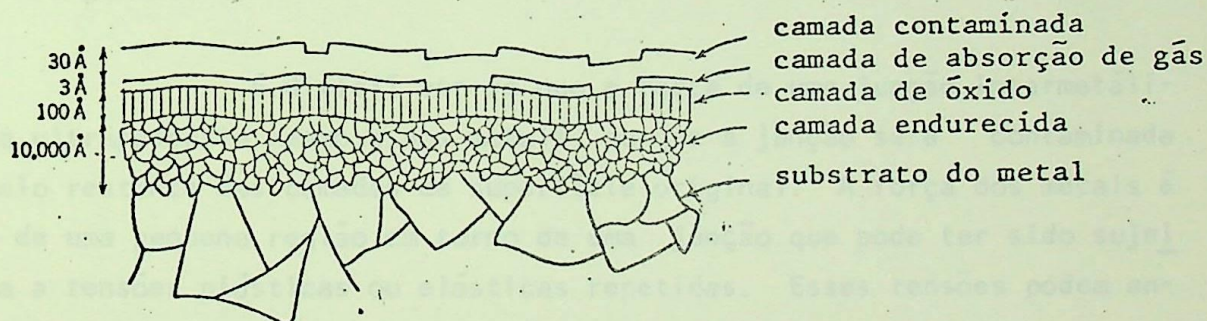


FIG. 1 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DE SUPERFÍCIES METÁLICAS (REF: 3)

A proteção contra contato intermetálico fornecida pelas camadas da superfície é maior quando as asperezas são deformadas elasticamente, porque as camadas podem ser penetradas somente durante a deformação plástica. Se a camada é relativamente compacta e quebradiça em com-

paração a seu substrato (por exemplo, óxidos em alumínio ou estanho), o fluxo do substrato remove o apoio da camada, levando à fratura. Todavia, quando as propriedades mecânicas da camada e seu substrato não diferem muito (por exemplo, óxidos em cobre ou ferro), uma maior quantidade de deformação da superfície inferior é permitida antes que a camada seja rompida, e a proteção contra o contato intermetálico pode, portanto, persistir diante de cargas maiores.

3. MECANISMO DE DESGASTE EM MATERIAIS AUTO-LUBRIFICANTES

A força de aderência de contatos intermetálicos que comumente ocorrem após a ruptura das camadas da superfície não só afetam a intensidade do atrito como também a quantidade de estragos e remoção da superfície. Se a aderência é fraca, as junções intermetálicas quebram na interface original, e os danos são insignificantes; se, todavia a aderência é maior que a força dos próprios metais, o cisalhamento se faz longe da interface original, resultando na transferência de pedaços de fragmentos.

É difícil ver-se que a força de uma junção intermetálica ultrapassaria mesmo a dos metais, porque a junção será contaminada pelo restante das camadas da superfície original. A força dos metais é a de uma pequena região em torno de uma junção que pode ter sido sujeita a tensões plásticas ou elásticas repetidas. Essas tensões podem enfraquecer o metal nesta região por causarem rachaduras na subface e assim tornarem os fragmentos mais facilmente detectáveis. Este mecanismo é um processo de fadiga e foi recentemente apresentado para aplicações, principalmente no caso de desgaste dos materiais de carbono e grafite.

REVISTA AOS PRINCIPAIS MATERIAIS AUTO-LUBRIFICANTES

1. PLÁSTICOS

O polímero químico teve seu primeiro impacto sobre o mundo da engenharia, há cerca de 45 anos atrás com o advento dos mancais de deslizamento constituídos de resinas de fenol-formaldeído reforçado com tecidos ou outras fibras. A partir de então, e mais particularmente durante os últimos anos, um crescente número de plásticos, tem tido suas aplicações sobre mancais. Talvez o termo "plástico" seja impróprio do ponto de vista da Engenharia. É uma palavra imprecisa, para praticamente todos os polímeros orgânicos de peso molecular elevado, com exceção das borrachas cujo comportamento tende a ser dominado por suas propriedades elásticas.

O primeiro estágio na produção de um plástico ocasiona de um modo conveniente, moléculas reativas ou grupos químicos para serem ligados em cadeia. As unidades reativas devem ser idênticas, tal como polietileno e poliestireno, ou combinadas como em polietileno "terephthalate" (TERILENE) e fenol-formaldeído (BAQUELITE), fig. (2) . Se pudermos introduzir reações químicas em determinado local dos polímeros lineares, então, uma reação adicional deve ser provocada dando origem a moléculas enormes ligadas em três dimensões, fig. (3) . Quando uma substância é aquecida, energia é absorvida, a vibração molecular cresce e, no caso de um polímero linear, é atingido um ponto no qual as cadeias individuais são capazes de deslizar umas sobre as outras. Quando isto ocorre, o material amolece e se o aquecimento continuar as cadeias se separam à medida que a substância se funde. Quanto ao resfriamento, o movimento das cadeias é novamente restrito e o material normalmente recupera suas propriedades originais, tais materiais são conhecidos ou referenciados como polímeros "termoplásticos" (materiais plásticos que amolecem e

permanecem moles durante o aquecimento). Contudo, se as próprias cadeias foram ligadas juntas, então, o movimento relativo é restrito e estes materiais, ainda que possam ligeiramente amolecer quando aquecidos, não se fundem, mas a temperaturas suficientemente altas as cadeias rompem-se irreversivelmente com decomposição e carbonização. Estes tipos, são conhecidos como polímeros "thermosetting" (materiais plásticos que endurecem permanentemente quando aquecidos).

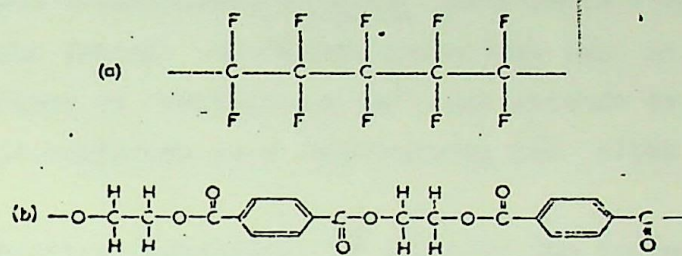


FIG. 2 - POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS, (a) Politetrafluoretileno (unidades reativas idênticas); (b) Polietileno "terephthalate" (unidades reativas mistas). (REF: 20)

Com estas diferenças básicas em propriedades térmicas e estruturais, é de se esperar que as características de manuais dos dois tipos de polímeros serão distintas e que o mecanismo de desgaste e atrito observado nos metais serão modificados.

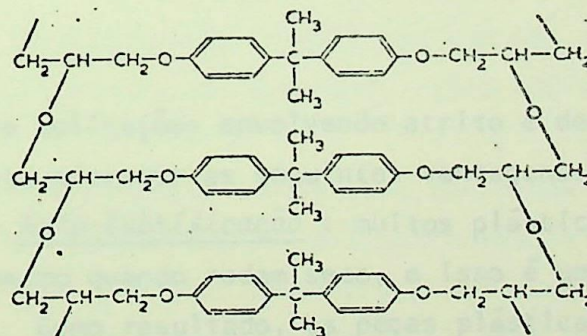


FIG. 3 - POLÍMEROS THERMOSETTING (REF: 20)

Convém salientar, que ambos os tipos de polímeros são hoje usados como materiais de mancais com adição de conteúdos pulverizados ou fibras reforçadoras para melhorar as propriedades mecânicas.

1.a - APLICAÇÕES

Plásticos são usados com sucesso em muitas aplicações envolvendo atrito e desgaste. Nylon, por exemplo, tem sido usado a muito tempo em engrenagens silenciosas, e Teflon para mancais de deslizamento que operam com pouco atrito. Menos bem conhecidas são as novas resinas poliamidas e os filmes de "phthalocyanine", que estende os limites de emprego dos materiais orgânicos para temperaturas tão altas como 650°C.

Mancais e engrenagens de plástico são feitos de todos os tamanhos, desde pequenos componentes eletromecânicos a mancais que sofre grandes cargas, como por exemplo, para laminadores, para rôtulas em grandes estruturas metálicas e mancais de leme de navios. Eles são operados, ou secos, com lubrificação à água ou com óleos convencionais e graxas sobre lubrificação hidrodinâmica marginal. Plásticos são usados na forma de massa pura ou com vários enchedores para melhorar suas propriedades de atrito mecânico, em ainda outros casos, plásticos são usados na forma de filmes finos ou como impregnanados dentro de sólidos porosos.

1.b - VANTAGENS

Para aplicações envolvendo atrito e desgaste, os plásticos podem geralmente oferecer as seguintes vantagens:

1 - Auto-lubrificação : muitos plásticos tem baixo coeficiente de atrito mesmo quando rodam seco, e isso é uma das razões principais para usá-los. Como resultado, as peças plásticas podem operar sob condições onde óleos e graxas não poderiam ser usados, por exemplo, aplicações criogênicas, onde óleos e graxas congelariam; equipamento de processamento de comidas, onde a contaminação por óleo ou graxas seria pro-

blemática; peças que devem operar por longos períodos de armazenagem. Embora plásticos possam operar a seco, seu desempenho é grandemente melhorado por lubrificação.

2 - Características anti-solda : plásticos podem ser selecionados porque tem pouca tendência à adesão, ou de soldar a frio aos metais, a menos sob condições extremas. A característica anti-adesão, do Teflon, por exemplo, são bem conhecidas, mesmo pelas donas de casa.

3 - Absorção de vibração : plásticos têm boa capacidade para absorver vibrações, e eles são especialmente úteis onde barulho ou vibração deve ser controlado. Esta característica é bem conhecida no caso de conjunto de engrenagens de Nylon.

4 - Resistência ao impacto : alguns dos plásticos têm excelente resistência ao impacto, e isto permitiu que eles fossem usados em mancais de esferas de veículos militares blindados, que devem suportar recuo e cargas pesadas sem apreciáveis desgastes.

5 - Densidade : as densidades dos plásticos são tão pequenas quanto um sexto ou um sétimo daquela do aço, ou cerca da metade daquela do magnésio. Então, as peças de plásticos geralmente pesam menos que aquelas comparáveis em metais.

6 - Tolerâncias : plásticos deformam mais prontamente do que os metais, para se ajustar às partes. Tolerâncias são menos críticas para os plásticos. Montagens e alinhamentos menos precisos são utilizados.

7 - Usinabilidade : plásticos tem boa usinabilidade e podem ser moldados com tolerâncias pequenas. Eles têm boa estabilidade dimensional.

8 - Contaminação : plásticos tem menos tendência a atração de poeira que os óleos e graxas, e a contaminação por poeira e detritos do desgaste é um problema menor com plásticos do que com metais. Os plásticos em si são resistentes à abrasão e eles permitem que contaminadores impregnados não provoquem desgaste das partes acasalantes e esta propriedade promove uma contaminação menos crítica com os componentes plásticos do que com aqueles fabricados de metal.

9 - Corrosão : plásticos são livres de corrosão pela maioria dos ácidos e outros agentes químicos.

10 - Compatibilidade : plásticos são compatíveis com grande quantidade de substâncias químicas, com óleos e graxas. Estes materiais podem ser adicionados para lubrificação ou para proteger contra corrosão outras partes em contato, sem danificar os componentes plásticos.

11 - Baixo custo : muitos plásticos podem ser moldados e fabricados por injeção em grandes quantidades e a baixo custo. Formas complexas podem ser moldadas em uma operação, onde metais requereriam vários passos da máquina. Enquanto as ligas de mancais de chumbo, estaño, cobre e zinco estão tomando altos preços, as de plásticos estão geralmente tornando-se mais baratas.

12 - Flexibilidade de projeto : as peças de materiais de plásticos podem ser moldadas em projetos complicados. Várias partes podem ser combinadas em uma peça (por exemplo: eixos, engrenagens, cames e mancais) donde há uma redução de custo total das peças e de montagem.

13 - Isolação elétrica : os plásticos são geralmente bons isolantes elétricos, e podem portanto isolar eletricamente partes metálicas uma da outra.

14 - Baixas temperaturas : muitos plásticos guardam suas propriedades úteis mesmo em temperaturas criogênicas (baixas temperaturas), abaixo daquelas às quais muitos óleos e graxas podem tornar-se muito viscosas para serem lubrificantes úteis.

15 - Vácuo : a volatilidade dos corpos plásticos é substancialmente menor que óleos e graxas, tal que eles podem ser mais usados que óleos e graxas sob condições de vácuo ultra alto.

16 - Fluência : plásticos auto-lubrificantes são úteis em instrumentos mecânicos e outros aparelhos onde óleo e graxas fluem das peças que requerem lubrificação.

17 - Esterilização : plásticos podem ser limpos com vapor sem que haja dano algum, já que os materiais metálicos sofreriam algum problema de corrosão ou mesmo deformações permanentes.

1.c - DESVANTAGENS

Plásticos sofrem certas desvantagens quando comparados aos metais. Seria impróprio generalizar tão amplamente aqui, desde que desvantagens não são sempre comuns a todos os plásticos. Também muitos graus de especialidades e técnicas são disponíveis para vencer tais desvantagens. Com essas reservas, entre as desvantagens gerais de plásticos sob condições de desgaste e atrito incluem-se as seguintes:

1 - Condutividade térmica : a condutividade térmica dos plásticos é muito menor do que os dos metais. Consequentemente, eles são menos sujeitos a dissipar o atrito friccional gerado por interfaces que se esfregam, e as partes plásticas trabalham mais quentes que aquelas similares metálicas. Estas desvantagens podem ser vencidas usando o plástico como um filme fino sobre um metal, tal que o metal pode conduzir o calor de atrito mais eficientemente. Outras técnicas para chegar a esse propósito incluem adição de fibras de metal ou pó como enchedores ou tela de encosto metálica.

2 - Expansão térmica : plásticos tem alto coeficiente de expansão térmica. Estes seus coeficientes de expansão térmica são normalmente dez ou mais vezes aqueles do aço e outros metais. Adicionando enchedores podemos reduzir a razão de expansão dos plásticos.

3 - Resistência à temperatura : a massa plástica não pode ser usada a altas temperaturas como pode o aço. Geralmente amolecem e não deveriam ser usada acima de 120°C , embora poliamidas são úteis a 310°C (600°F) para o serviço contínuo.

4 - Velocidade de operação : como consequência das três limitações anteriores o uso de plásticos é restrito a velocidades mais baixas do que aquelas com as quais os aços podem ser usados.

5 - Resistência estrutural : plásticos são mais fracos e menos rígidos que os aços, tal que a capacidade de cargas em engrenagem e mancal de plástico é menor que aquela para uma peça de aço do mesmo tamanho.

6 - Rigidez : plásticos são muito menos rígidos do que

metais. Seu módulo de elasticidade sendo tipicamente da ordem de 7000 a 100000 kgf/cm² quando comparado a 2100000 kgf/cm² para os aços.

1.d - COMPARAÇÃO GERAL

A tabela (1) compara as propriedades e a utilização dos vários tipos de plásticos para aplicações envolvendo atrito e desgaste. Dentro de cada tipo as propriedades podem ser alteradas amplamente usando enchedores ou outras técnicas.

2. GRAFITES

Grafite é o exemplo clássico de sólido de baixo coeficiente de atrito. Suas qualidades de lubrificação são bem conhecidas e seu uso tem larga aplicação na lubrificação de mecanismos delicados.

O termo "grafite" refere-se exatamente a uma das duas maneiras ou formas cristalinas do carbono; a outra forma cristalina trata-se do diamante. O termo "carbono" é habitualmente usado na indústria referindo-se ao carbono amorfo (não cristalino).

O grafite natural é um mineral que existe sob as formas de veias ou flocos com variados graus de cristalinidade, variando de amorfo até altamente cristalino, e de 80 a 90% em pureza de carbono. O grafite sintético ou fabricado é obtido pelo aquecimento do coque do petróleo de uns 2550°C, e tem em média uma pureza de 98,5% em carbono.

Convém ressaltar que, não é um material específico, mas uma família de materiais, da qual cada membro é essencialmente carbono puro que difere dos outros membros em grau de cristalinidade, orientação dos cristais, estrutura porosa, etc.

TABELA 1 : COMPARAÇÕES GERAIS DE PLÁSTICOS NAS APLICAÇÕES DE ATRITO E DESGASTE

MATERIAL	VANTAGENS	DESVANTAGENS	USOS TÍPICOS
NYLON	Baixo coeficiente de atrito; lubrificação desnecessária mas podendo ser usada; tenaz; boa conformabilidade; baixa taxa de desgaste; alta resistência de abrasão; boa resistência química; fácil moldagem com tolerâncias res-tritas; reduzido barulho e vibrações proporcionando uma operação tranqui-la.	Absorve água; baixa condutividade térmica e alta expansão térmica; pode-se reduzir os problemas de condicionamento e projeto próprio.	Pinos-mestre automotivos; eixos de pedal com base giratória; maneta de porta; alavanca de deslocamento de máquina de escrever; polia tensora de máquinas de lavar; rodas de carrinho de bebê e triciclos; pino de dobradiça para amortecedor de dutos industriais; maquinaria textil e agrícola; leme marítimo e outros controles; máquina de pinos esféricos; barbeadores elétricos medidores de gás e água; etc.
TEFLON (fluorcarbono com marca registrada da Du Pont's)	Coeficiente de atrito muito baixo; lubrificação desnecessária mas podendo ser usada; excelente resistência ao calor; insensível à água, óleo e a maioria dos produtos químicos alta resistência ao choque útil a temperaturas criogênicas; boa usinabilidade boa absorção de vibração; baixa taxa de desgaste; disponível em forma de fibra ou tecido.	Relativamente caro; baixa condutividade térmica e alta expansão.	Junções automotivas e juntas esféricas; motor a jato tipo after burners.

Fresadora de aço e outras máquinas para trabalhos pesados; suspensões automotivas; bombas motor de relógios elétricos; ro-lamentos de esferas de alta pressão; aparelhos elétricos e interruptores.

Absorve água; baixa condutividade térmica em tamanhos grandes.

Alta resiliência e resistência a choques e impactos violentos; baixas taxas de desgaste; boa usinabilidade; pode ser lubrificado com água; resistente a óleos, gorduras e produtos químicos não ácidos; leve; vibração reduzida.

LAMINADO
FENÓLICO

Rodas de caminhão industrial; dobradiças de porta; engrenagem de direção e pedal, corre-diga de cortinas; barbeadores elétricos; rolos de cortadores de grama; correias transportadoras; etc

Baixa resistência ao calor; folgas abundantes são necessárias.

Baixo coeficiente de atrito; lubrificação desnecessária mas podendo ser usada; rígido mas tenaz a temperaturas altas e baixas; resistente a água, lubrificantes e a maioria dos solventes; barato.

DELRIN
(Acetal, com marca registrada da Du Pont's)

Está sendo testado para várias aplicações.

Alto coeficiente de atrito.

Boa resistência ao calor e ao impacto; boa estabilidade dimensional; boa resistência à flexão; boa usinabilidade para tolerâncias pequenas.

LEXAN
(poli-carbonato, com marca registrada da GE)

POLIETILENO Excelente resistência a Relativa dificuldade de impacto e boas propriedades de fabricação.
DE PESO MO- des de desgaste.
LECULAR ELE
VADO.

ACRILONITRI- Baixo coeficiente de atrito; alta resistência de Expansivo dentro de certos limites.
LA-BUTADIENO abrasão; baixa deformação -
ESTIRENO ção; baixa contração em molde; lubrificação desnecessária mas podendo ser usada.

Cortador de grama e rodas de patins onde rodas e rolamentos são integrais; rodas de máquinas industriais de lavar minérios.

Inúmeras aplicações.

POLIAMIDA Baixo coeficiente de atrito; excelente resistência a alta solidez; baixa expansão térmica; resistência a solventes e a maioria dos produtos químicos; excelentes propriedades de mancais

A estrutura cristalina do grafite consiste de camadas paralelas de anéis planos condensados de C_6 , como mostra a fig. (4).

2.a - MECANISMO DE LUBRIFICAÇÃO

A tabela (2) contém alguns valores para o coeficiente de atrito do grafite. A excelente qualidade lubrificante, ou capacidade de lubrificação do grafite pode ser percebida pela comparação dos coeficientes de películas de grafite (0,07 - 0,15 sob condições de deslizamento) com aqueles obtidos sobre superfícies não lubrificadas e com aqueles que usam o óleo mineral como lubrificante.

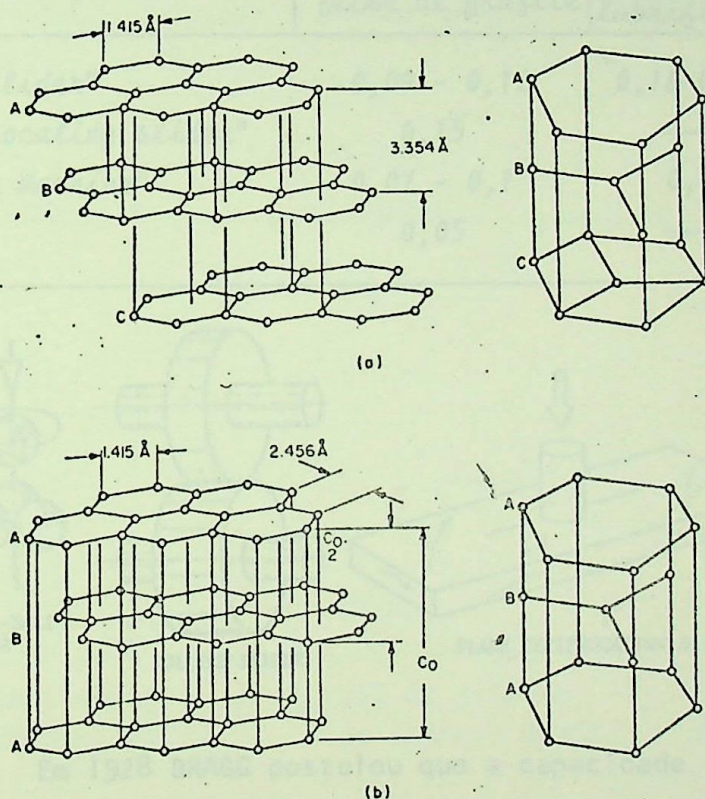
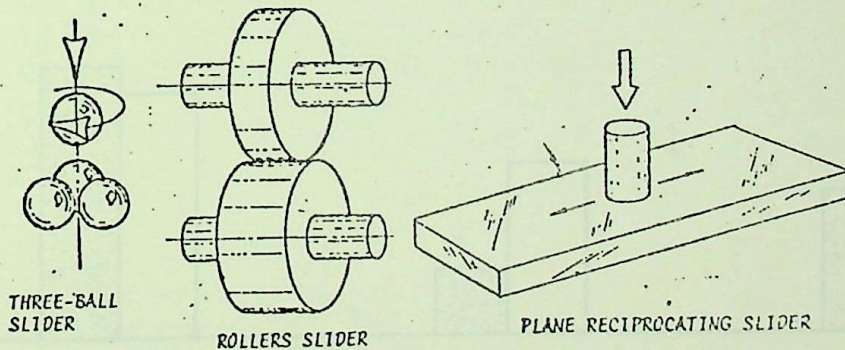


FIG. 4 - ESTRUTURA CRISTALINA DO GRAFITE . (a) Forma hexagonal da estrutura do grafite; (b) Forma romboédrica da estrutura do grafite. (REF: 4)

A fig. (5) mostra o efeito do conteúdo de grafite sobre o atrito e desgaste do composto carbono-grafite. Sob condições atmosféricas normais (pressão de 760 mmHg), o desgaste e atrito do carbono amorfo é significativamente menor tanto do grafite de 20% em carbono amorfo como do carbono 100% grafitizado. A fig. (5) mostra também que para pressões reduzidas (i.ê, sob condições de vácuo), materiais de grafite apresentam atrito duas vezes maior e desgaste 100 vezes mais rápido que no ar.

TABELA 2 - COEF. DE ATRITO APRESENTADOS POR FILMES DE GRAFITE

DISPOSITIVOS PARA ATRITO E DESGASTE (ref. 29)	coeficientes de atrito		
	filme de grafite	metal não lubrificado	óleo mineral
"three-ball slider"	0,09 - 0,12	0,16-0,18	0,15-0,17
"plane reciprocating slider"	0,15	—	—
"Bowden-Leben Machine"	0,07 - 0,1	0,4	0,17-0,22
"rollers"	0,05	—	0,07



Em 1928 BRAGG postulou que a capacidade de lubrificação do grafite deve-se ao seu tipo laminar de estrutura cristalina, que permite aos planos dos átomos de carbono deslizar facilmente uns sobre os outros sem desintegração. Este comportamento foi atribuído às fortes forças de ligação entre os átomos individuais de carbono situados nos

planos e às forças relativamente fracas entre os planos.

Observações subsequentes demonstraram que a capacidade de lubrificação do grafite não se deve apenas à estrutura cristalina mas também à presença de vapores condensados, tais como a água (mistura). Este laço de intrínseca qualidade lubrificante apresentou o seu primeiro problema no início de 1940, quando descobriu-se que o desgaste de escovas de carbono em motores e geradores de aviões era acelerado à altitudes elevadas (acima de 6000m). Sob estas condições de rápido desgaste, o coeficiente de atrito do grafite crescia para aproxi-

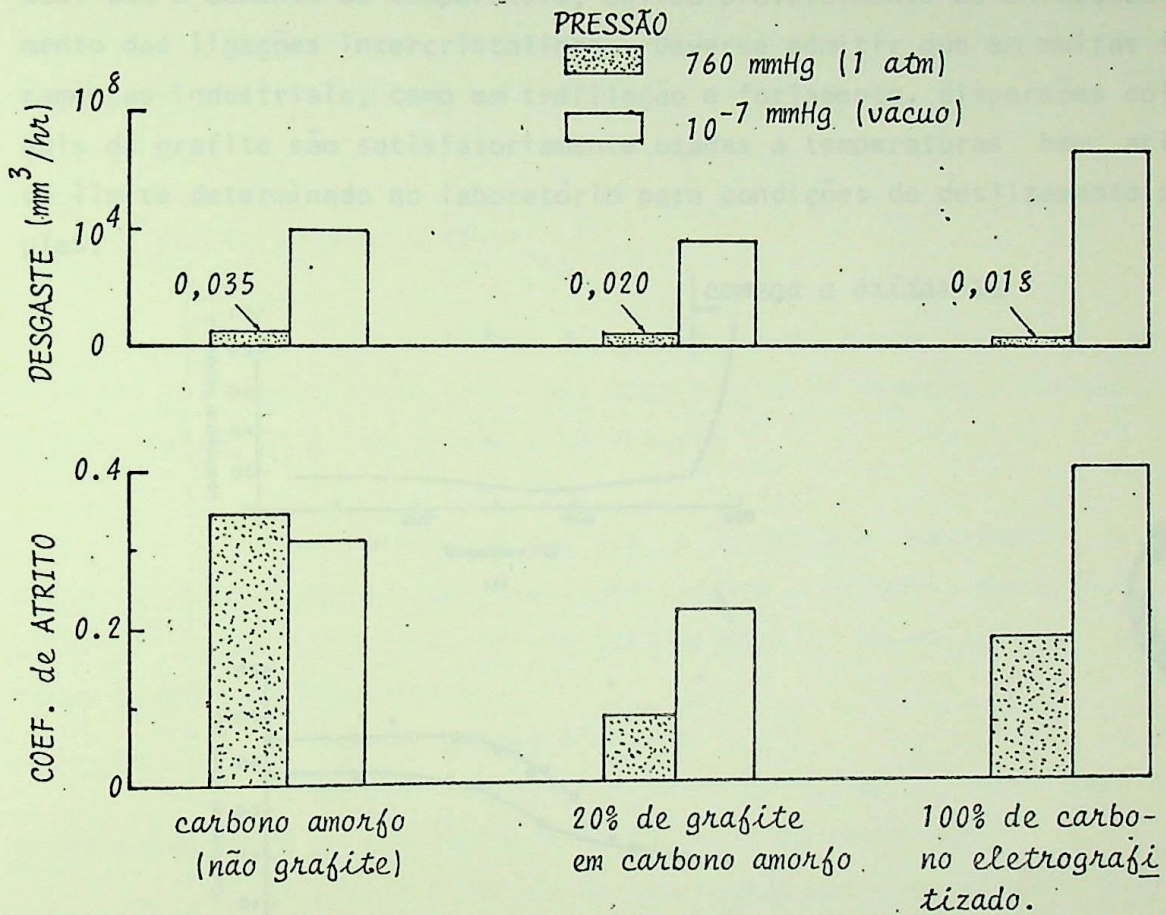


FIG. 5 - COEFICIENTE DE ATRITO E DESGASTE VOLUMÉTRICO / UNIDADE DE TEMPO PARA COMPOSIÇÕES DE CARBONO NO AR E NO VÁCUO. (REF: 4)

madamente 0,5 e a taxa de desgaste aumentava de várias ordens de amplitude, como ilustra a fig. (5). Estes problemas foram solucionados com a adição de fluoreto de bário, dissulfeto de molibdênio e outros complementos.

A figura (6) mostra o efeito da temperatura sobre o atrito do grafite no ar e no vácuo. Sob condições atmosféricas normais, o grafite mantém sua capacidade lubrificante até cerca de 600°C, em cuja temperatura o grafite começa a oxidar-se rapidamente e o coeficiente a crescer abruptamente. Ainda assim, o coeficiente sofre uma redução gradual com o aumento da temperatura, devido provavelmente ao enfraquecimento das ligações inter cristalinas. Deve-se admitir que em muitas ferramentas industriais, como em tréfilagem e forjamento, dispersões coloidais de grafite são satisfatoriamente usadas a temperaturas bem acima do limite determinado no laboratório para condições de deslizamento simples.

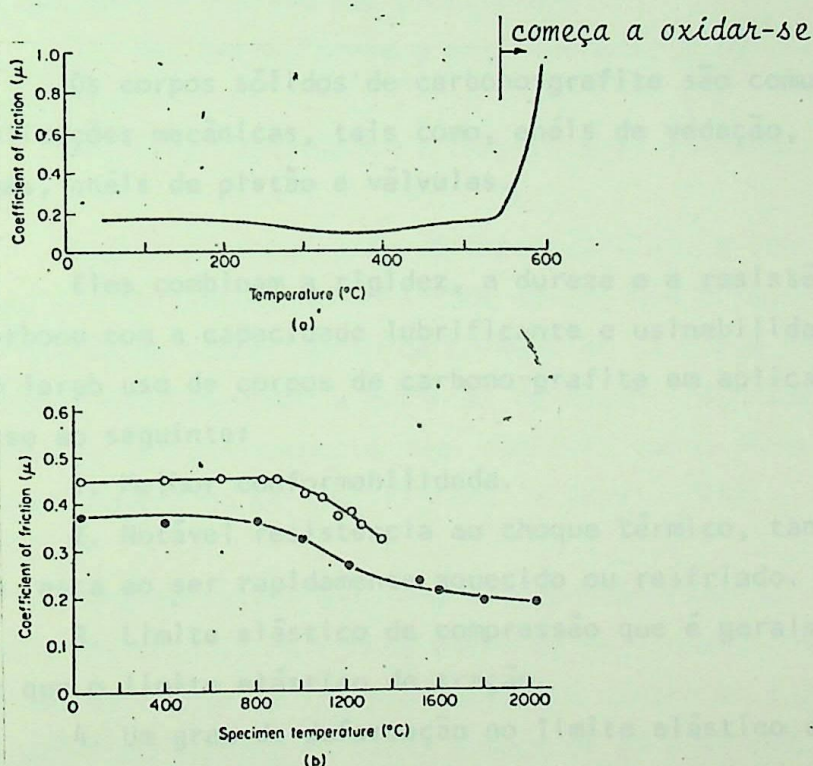


FIG. 6 - EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE O ATRITO NO GRAFITE PARA NO AR E NO VÁCUO : a) grafite no ar; b) grafite no vácuo. (REF: 22 e 23) .

Vários pesquisadores têm insinuado que a capacidade de lubrificação do grafite deve-se à sua capacidade para formar camadas ou películas de transferência que aderem fortemente à superfície do metal e, esta aderência é reforçada pela presença de óxidos ou gases condensados que proporcionam uma ligação atômica entre o metal e o grafite.

Tem-se insinuado também que o vapor penetra na estrutura do grafite e reduz a força de cisalhamento entre as camadas de átomos. Uma explicação mais apurada sobre o mecanismo pelo qual o grafite lubrifica, não há. Somos forçados a concordar com a conclusão proferida pelos pesquisadores desta área que dizem ser necessária uma pesquisa adicional antes que tenhamos um completo entendimento da capacidade lubrificante do grafite e o papel de vapores absorvidos.

2.b - COMPOSTOS CARBONO-GRAFITE

Os corpos sólidos de carbono-grafite são comumente usados para aplicações mecânicas, tais como, anéis de vedação, MANCAIS, peças de bombas, anéis de pistão e válvulas.

Eles combinam a rigidez, a dureza e a resistência de desgaste do carbono com a capacidade lubrificante e usinabilidade fácil do grafite. O largo uso de corpos de carbono-grafite em aplicações mecânicas deve-se ao seguinte:

1. Melhor conformabilidade.
2. Notável resistência ao choque térmico, tanto que não racha e nem lasca ao ser rapidamente aquecido ou resfriado.
3. Limite elástico de compressão que é geralmente 5 a 10 vezes maior que o limite elástico de tração.
4. Um grau de deformação no limite elástico de tração razoavelmente comparável com aquele do ferro fundido.
5. Melhor usinabilidade, o carbono-grafite é facilmente

usinado com pequenas tolerâncias.

6. Tem características verdadeiramente elásticas, ou se ja, fratura no limite elástico.

7. Compressibilidade, que tem sua importância nos diver sos mancais de deslizamento ajustados para pressões e contrações, desde que o diâmetro interno do mancal se mantenha constante.

8. Auto-lubrificante na presença de vapores condensados.

9. Dimensionalmente estável dentro de uma variação gran de de temperatura, tanto que não empena, não deforma e nem se rompe de pois de repetidos aquecimentos e resfriamentos.

10. Resistente ao ataque químico e corrosão; inerte quimi_{camente} para a maioria dos ácidos, cáusticos e solventes.

11. Alta condutividade térmica, o que auxilia na transfe rência de calor durante um aquecimento ou resfriamento rápido.

12. Baixo coeficiente de expansão térmica (cerca de 1/6 da maioria dos metais e 1/100 dos plásticos).

13. Não umidificante e anti-aderente a metais fundidos, vidros ou escórias.

14. Alta resistência a temperaturas elevadas.

Quando os mancais de carbono-grafite são lubrificados de ve-se manter o lubrificante em um estado úmido. Não é recomendado o uso de graxas, devido ao envolvimento da umidade ou da graxa com os detri tos de carbono, enfraquecendo o material do mancal. A espessura da pe lícula e a folga de funcionamento deve aumentar com o diâmetro do mu nhão, tal como sugere os valores típicos da tabela (03).

O grafite tem uma taxa de expansão térmica mais baixa que a maioria dos metais. As buchas poderiam ser submetidas a compres são usando uma ajustagem de interferência que cresce de 0,25 a 0,75 mm, enquanto o diâmetro externo da bucha cresce de 65 a 500 mm. Ajustes de interferência superiores devem ser usados por causa da elevada resistên cia compressiva do grafite, porém, ajustes de pressão maiores que

0,75 - 1,00mm de interferência deveriam ser evitados, pois a parede po de ser destruída. Se a temperatura provocar um ajuste de interferência nos mancais de 0,75 - 1,00mm para tornar-se livre, carcaça deverá ser ajustada com a contração dos mancais. A fim de deixar as buchas firmes em seu lugar, ajustes de contração e interferência auxiliam na transfe rência de calor de fricção da bucha de grafite à carcaça, da qual pode ser dissipado para a atmosfera mantendo o equilíbrio da estrutura.

TABELA 3 - RECOMENDAÇÕES PARA O PROJETO DE BUCHAS DE CARBONO-GRAFITE

Diâm. MUNHÃO (mm)	FOLGA MÍNIMA ($\times 10^{-3}$ mm)	Espes. m̃n. da PAREDE (mm)
6,35	25,4	2,28
12,7	50,8	3,17
25,4	76,2	4,57
38,1	101,6	7,87
50,8	152,4	10,9
76,2	203,2	15,7
101,6	228,6	19,0
127,0	279,4	25,4

(ref. 4)

Materiais acasalados deveriam possuir de preferência uma dureza de C-55 Rockwell, ou maior. Aço temperado aço-cromo galvaniza-do, aços inoxidáveis temperáveis e algumas cerâmicas funcionam bem con tra o carbono. Aço 1040 não temperado é adequado para cargas leves e a baixas velocidades, mas o alumínio e o latão são pobres materiais para acasalar.

O mecanismo de desgaste de corpos carbono-grafite é abra são, que ocorre quando as asperezas das duas superfícies móveis se to cam e os fragmentos de desgaste se separam das superfícies. As ranhu ras são sulcadas no carbono-grafite pelo material acasalado mais sólido e as partículas soltas de desgaste, são por isso removidas. Uma superffí cie bem galvanizada minimiza o desgaste pela abrasão.

A taxa de desgaste aumenta com a carga, no início mais lentamente e em seguida numa taxa crescente. A velocidade de deslizamento tem um leve efeito sobre a taxa de desgaste e geralmente provoca o aumento do coeficiente de atrito, aparentemente como consequência, da temperatura mais elevada causada pelo aumento do calor de atrito.

O desgaste é geralmente proporcional à distância de deslizamento, ainda que algumas vezes ocorra um grande desgaste inicial antes que uma película apropriada de funcionamento se deposite sobre a superfície de acasalamento. Geralmente, o coeficiente de atrito decresce com a distância de deslizamento enquanto uma película de funcionamento se estabelece sobre a face de acasalamento. Ao aumentarmos a temperatura ambiente, de um modo geral aumentarão o desgaste e o atrito.

2.c - CARBONO-GRAFITE IMPREGNADO

A tabela (04) contém as propriedades do carbono-grafite, impregnado com vários conteúdos. Uma das razões principais para impregnação é a redução da porosidade e principalmente a permeabilidade.

A impregnação também aperfeiçoa o acasalamento de uma superfície usinada, reduz o desgaste e o atrito, aumenta a resistência, e retarda a oxidação. Estes benefícios permitem operar mancais a cargas e temperaturas mais elevadas do que com o convencional corpo de carbono-grafite. A impregnação é geralmente realizada através da saturação do corpo de carbono-grafite em seu estado usinado aquecendo em seguida para desenvolver as melhores propriedades do impregnante.

2.d - COMPOSTOS METAL-GRAFITE

Normalmente existem dois tipos de compostos metal-grafi-

TABELA 4 -		PROPRIEDADES DE CARBONO-GRAFITE IMPREGNADO			
PROPRIEDADES	CARBONO-GRAFITE convencional.	CARBONO-GRAFITE impregnado com:			
		Cerâmica	Resina	Metal	Carbono
Densidade aparente (g/cm ³)	1,55 - 1,9	1,68-2,00	1,78-1,85	2,35-2,60	1,87
Dureza (Shore)	20 - 85	40-80	60-85	45-90	—
Tensão de Compressão (kgf/cm ²)	246 - 210	703-1940	1400-2280	1050-2990	630
Tensão de Flexão (kgf/cm ²)	176 - 630	315-770	530-770	490-915	330
Tensão de Tração (kgf/cm ²)	105 - 530	245-525	390-530	330-700	245
Temp. Limite, atmosférica neutra (°C)	194 - 3330	690-830	110-275	830	3330
Oxidação atmosférica (°C)	194 - 500	550-700	110-250	280-500	—
Coeff. de expansão térmica (mm/mm - °C x 10 ⁻⁶)	0,61 - 1,6	0,88-1,9	1,22-1,38	1,66-2,2	1,33

(ref. 4)

te, a saber:

1. METAL IMPREGNADO NA ESTRUTURA DO CARBONO - neste tipo um metal fundido é impregnado nos poros do grafite ou carbono-grafite e sob forma sólida em molde. O metal aumenta a resistência e a condutividade térmica do composto. Os metais mais usados são: cobre, bronze, babit, cádmio e prata.

2. COMPOSTOS PRENSADOS E SINTERIZADOS - compostos de metal e grafite abundantes em metal podem ser fabricados pelas técnicas e processos de metalurgia, no qual as misturas dos pós são prensados com sinterização a frio ou a quente no estado sólido. A preparação dos compostos ricos em grafite através das técnicas de pulverização da metalurgia, contudo, se restringe não apenas ao "suor" do metal fundido pelos poros do grafite durante a sinterização a temperaturas acima do ponto de fusão do metal (fase líquida da sinterização) como também pela pequena resistência devida à ligação inadequada em temperaturas de sinterização menores que a do ponto de fusão do metal (fase sólida de sinterização). A tendência de metais líquidos em "suar" durante o estado líquido de sinterização deve-se a fraca capacidade de umedecer dos mesmos e do grafite. Adicionando uma pequena quantidade de cálcio como liga de cálcio-silício às misturas de grafite e ferro pulverizado possibilita-se a solução para este problema bem como a produção de compostos fortes de ligação de metal contendo 40 a 90% de grafite.

3. FLUORCARBONOS

Fluorcarbonos são essencialmente hidrocarbonos em que todos ou aproximadamente todos os *hidrogênios* foram substituídos ordenadamente por *flúor*. Embora o termo "teflon" signifique fluorcarbono, para aqueles não versados em química este termo significa apenas um produto comercial registrado da Du Pont.

Fluorcarbonos são termoplásticos. Suas mais notáveis características para aplicações envolvendo atrito e desgaste reside apresentar baixos coeficientes de atrito e boa resistência ao calor. Eles são usados a temperaturas até 250°C. E não absorvem água, além de conservar suas estabilidades dimensionais. Eles conservam rigidez e flexibilidade a temperaturas criogênicas, são inertes à maioria dos solventes químicos, e são excelentes dielétricos. Todavia, fluorcarbonos têm relativamente altos coeficientes de expansão térmica, são sujeitos a escoamentos a frio sob tensão (creep), não conduzem calor assim como os plásticos e são relativamente expansivos.

Para vencer essas desvantagens, resinas de fluorcarbonos, especialmente preparadas e básicas, são misturadas com vários aditivos. Outras formas úteis são os filmes aglutinados a substratos convenientes como impregnação a metais porosos e assim como em fibras e pós.

Superfícies compostas de películas consistindo de P.T.F.E (politetrafluorretileno), também denominado de teflon T.F.E., dispersado em uma matriz metálica mais dura podem ser obtidas por impregnação, (produzidas por técnicas metalúrgicas) de pós em superfícies metálicas porosas. Como exemplo, podemos citar o material "Du-bearing" que tem sido muito usado em investigações atuais. Veja no apêndice E comentários a respeito deste material.

3.a - CARACTERÍSTICAS DE ATRITO E DESGASTE

O coeficiente de atrito para o teflon T.F.E. é menor que o do grafite, dissulfeto de molibdênio (MoS_2), ou qualquer outro sólido conhecido. Um valor de 0,04 é usualmente adotado para estes coeficientes contra aços, e um valor tão baixo como 0,016 tem sido apresentado para cargas muito altas.

O coeficiente de atrito varia com as condições de teste e a tabela (05) apresenta alguns valores típicos. Cargas normais altas e velocidades de deslizamento baixas geralmente produzem um atrito menor.

Na prática real, películas finas de T.F.E. são transferidas para superfícies deslizantes e estas outras superfícies ficam recobertas com ele tal que a verdadeira condição se torne T.F.E. deslizando contra T.F.E.. Em baixas velocidades (ou altas temperaturas), o baixo atrito do teflon é associado com a formação de um filme fino altamente orientado de teflon de espessura entre 100 e 400Å.

O atrito alto e velocidades altas (ou baixas temperaturas ambientais) são associadas com a transferência relativamente alta de pedaços (fragmentos) de teflon. O teflon sofre uma transição de fase em temperatura ambiente; abaixo da temperatura ambiente normal o atrito pode ser metade do valor obtido à temperatura ambiente.

Substituindo átomos de fluor por átomos de cloro na molécula de fluorcarbono, aumenta-se o atrito e o desgaste. Por exemplo, se substituirmos apenas 10% de átomos do fluor por átomos de cloro no teflon T.F.E., aumenta-se de seis vezes o seu coeficiente cinético de atrito. Analogamente, os coeficientes estáticos de atrito aumentariam na sequência 0,10; 0,30; 0,45 e 0,69 para aço deslizando em teflon TFE, em um polímero de tetrafluoretileno e polietileno na proporção 1:1, num cloreto de polivinil, e cloreto de polivinilideno, respectivamente.

Estas observações tem o mesmo efeito sobre a umidade, adesão líquida, energia livre da superfície de sólidos poliméricos, quando a substituição é feita com um halogênio,

As características de atrito do teflon T.F.E. são excelentes uma vez que seu coeficiente de atrito é cerca de 1/3 do valor da relação: esforço cisalhante / "pressão efetiva de deformação, (σ_p)", sendo

TABELA 5 - COEFICIENTES DE ATRITO APRESENTADOS PELO TEFLON T.F.E.

<i>condições de teste</i>	<i>coef. de atrito</i>
TEFLON TFE sobre AÇO em máquina Bowden-Leben; veloc, 0,01-1,0 cm/s; carga 0,9-9 kgf; temperatura, 68°-392°C .	0,04
Idem, velocidade menor que 1,0cm/s; carga 10kgf	0,10
AÇO escorregaando sobre TEFLON TFE polido a quente em máquina Bowden-Leben	0,15
TEFLON TFE em aplicação de mancais	0,20-0,27
Anel de AÇO micropolido sobre anel de TEFLON TFE sob cargas altas (até 250 kgf/cm ²)	0,016-0,029
Cilindro seccionado de TEFLON TFE e AÇO polido; carga de 0,45-2,3 kgf; veloc. 4-184 cm/s	0,09-0,21
Filme de TEFLON TFE sinterizado sobre COBRE, testado em máquina Bowden-Leben (deslizando); temp, 20°C; carga, 4kgf; veloc., 0,1 cm/s	0,04-0,14
Filme de TEFLON TFE contra filme de TEFLON TFE; carga, 10-1000 gf; veloc., 0,01 cm/s	0,15

(ref. 17 e 18)

do que os coeficientes para outros plásticos e a maioria dos metais são iguais ou maiores que essa proporção, como mostra a *teoria do mecanismo de corte de Bowden's*, ilustrado no apêndice C, e nas figuras (7) para o teflon T.F.E. e o Polythene.

De acordo com esta teoria, quando pressionamos materiais limpos juntos geralmente formam-se fortes vínculos através da interface e, em se tratando de materiais deslizantes, o vínculo pode tornar-se rapidamente forte a ponto de romper a estrutura do material mais fraco.

Assim, o efeito cortante ocorre com mais frequência no interior do material do que na superfície, e o coeficiente de atrito de veria ser aproximado pela proporção do esforço cortante pela "pressão e efetiva de deformação" (τ / σ_p).

(ref: 21).

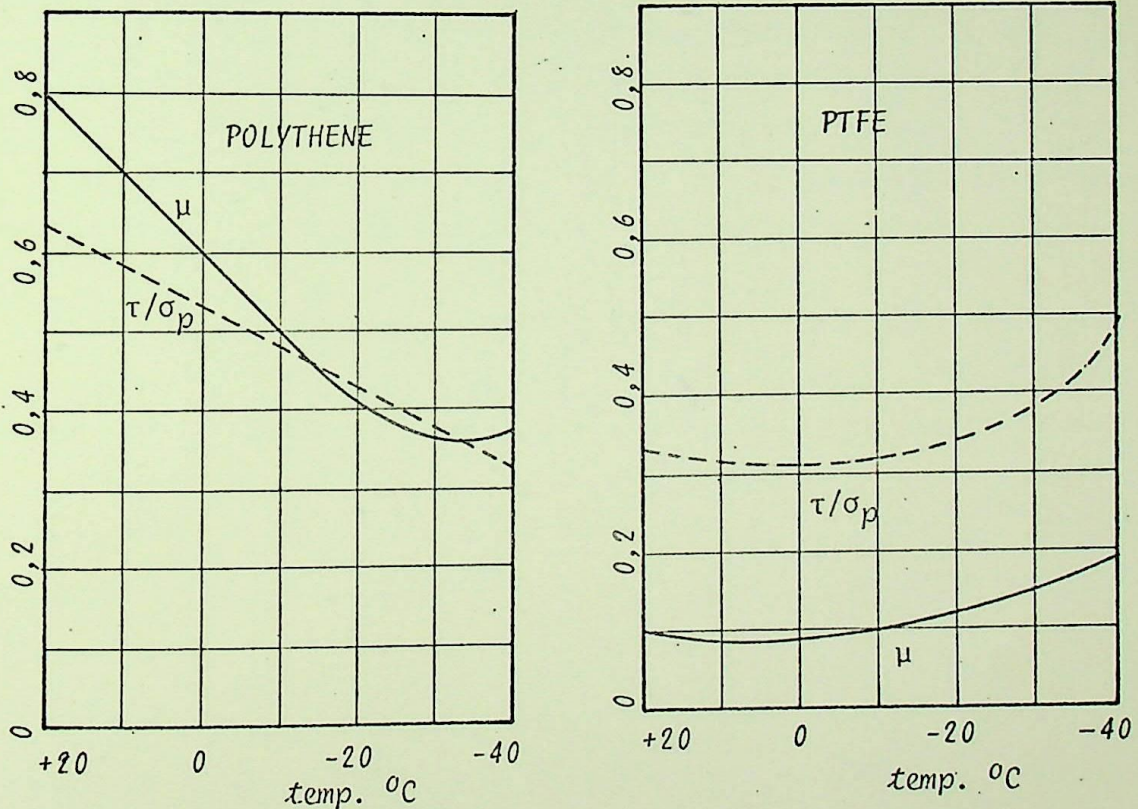


FIG. 7 - COMPARAÇÃO ENTRE O COEF. DE ATRITO (μ) E A RAZÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO PELA PRESSÃO EFETIVA DE DEFORMAÇÃO (τ/σ_p), para os materiais plásticos: TEFLON TFE e POLYTHENE em função da temperatura.

Quando o teflon T.F.E. é pressionado contra outro material, a estrutura molecular do T.F.E. impede a formação de vínculos na interface, e o efeito cortante ocorre ao longo da superfície. Outra explicação é que o baixo atrito está relacionado com a adesão intrinsecamente baixa entre as cadeias moleculares do material devido à interferência entre as cadeias rígidas no volume do plástico.

INTRODUÇÃO AOS TIPOS DE DESGASTE

1. TIPOS DE DESGASTE

INTRODUÇÃO AOS TIPOS DE DESGASTE

CAPÍTULO III

- a) Desgaste Adesivo ou Regime de
- b) Desgaste Abrasivo
- c) Desgaste Erosivo
- d) Desgaste Corrosivo
- e) Fadiga de Superfície

No caso de metais, estes têm sido discutidos com detalhes por vários pesquisadores, sendo importante mencioná-los em relação aos materiais sólidos para metais. Dados comparativos para desgaste em metais em função dos materiais lubrificantes sólidos sob condições especiais de fadiga têm sido analisados conforme mostrado na ref. (15).

o DESGASTE ADESIVO OU REGIME DE - o mecanismo local de desgaste adesivo é produzido entre superfícies em contato sob condições de movimento relativo. Este fenômeno ocorre na formação de pontos metálicos que são de natureza adesiva e que se deslocam sob a influência da tensão de cisalhamento. No caso de materiais metálicos, o material é removido da superfície metálica e resulta o desgaste adesivo por regulação.

Quando uma superfície de um material lubrificante sólido, este comportamento é denominado "tribologia", onde a ação é sobre a superfície do metal e resulta em desgaste adesivo. Também, com certos materiais (metais e cerâmicas) sob condições de fadiga, o desgaste ocorre devido à formação de pontos metálicos, onde a tensão de cisalhamento é suficiente para remover o material da superfície.

INTRODUÇÃO AOS TIPOS DE DESGASTE

1. TIPOS DE DESGASTE

O desgaste tem sido definido como sendo "uma remoção involuntária de material das superfícies atritantes" e vários tipos principais são reconhecidos:

- a) *Desgaste Adesivo ou Roçamento*
- b) *Desgaste Cisalhante*
- c) *Desgaste Abrasivo*
- d) *Desgaste Corrosivo*
- e) *Fadiga de Superfície*

No caso de metais, estes tem sido discutidos com detalhes por vários pesquisadores, mas é importante examiná-los em relação aos materiais sólidos para mancais. Dados comparativos para desgaste total de um número de materiais lubrificantes sólidos sob condições específicas tem sido analisado em detalhes conforme mostrado na ref. (15) .

a) *DESGASTE ADESIVO OU ROÇAMENTO* - o aquecimento local intenso e pressões altas produzidas por colisões rugosas na interface de metais atritantes resulta na formação de junções metálicas que são de tamanho apreciável em padrões moleculares. No cisalhamento dessas micro-soldas, o material é removido da superfície mais macia e aumenta o desgaste adesivo ou desgaste por roçamento.

Quando uma das superfícies é um material lubrificante sólido, este comportamento é modificado. O "thermoplastic", amacia e adere à superfície do metal e mostra um desgaste adesivo. Todavia, com certos termoplásticos (material plástico que amolece quando aquecido e que permanece mole durante o aquecimento), notavelmente o P.T.F.E., a adesão natu

ral é tão baixa que este tipo de desgaste é quase eliminado, exceto para condições de carregamento ou velocidades altas.

Em contraste, as resinas "thermosetting" (material plástico que endurece permanentemente quando aquecido) não amaciam em pontos quentes e qualquer soldagem com superfícies metálicas é difícil de visualizar. Todavia, o desgaste das rugosidades do polímero ainda ocorrem dando lugar à degradação térmica e à despolimerização.

b) *DESGASTE CISALHANTE* - quando duas superfícies diferem grandemente em dureza, as rugosidades da superfície do material mais duro penetram na superfície do material mais macio e arrancam material.

Todos os plásticos e materiais lubrificantes sólidos são mais macios que os materiais metálicos usuais em engenharia e são mais macios que os materiais metálicos usuais em engenharia e são muito mais susceptíveis a desgaste deste tipo. Consequentemente, é essencial preparar e manter bem acabada as superfícies com materiais lubrificantes sólidos. Geralmente o acabamento da superfície do eixo na faixa de 0 a 40 microns de centímetros é recomendada para acasalar com os materiais auto-lubrificantes.

c) *DESGASTE ABRASIVO* - quando um terceiro corpo (na forma de partículas de sujeira ou grão de qualquer material abrasivo) está presente entre duas superfícies atritantes pode desgastar uma ou ambas de acordo com a dureza relativa e a maioria dos experimentos industriais este mecanismo representa uma fonte significativa de desgaste. Em vários casos as partículas estranhas podem tornar-se envolvidas pela superfície mais macia e então serve para desgastar a superfície mais macia e então serve para desgastar a superfície mais dura. Este fenômeno tem sido observado com materiais macios e com materiais termoplásticos, exceto para polímeros "thermosetting", devido as suas propriedades de natureza plástica serem menores quanto à pronta retenção de partículas.

las estranhas; se estas partículas são suficientemente grandes, este tipo de polímero desgasta preferencialmente a superfície do material mais duro.

d) *DESGASTE CORROSIVO* - umidade, oxigênio, dióxido de enxofre e dióxido de carbono estão todos presentes no ar industrial, e em experimentos químicos e marítimos outras substâncias potencialmente corrosivas podem ocorrer. Metais expostos a estas substâncias reagem ao aparecimento de películas de óxidos, hidróxidos ou sais que são em geral facilmente removíveis por atrito.

As superfícies de munhões ou mancais metálicos estão se desgastando continuamente por um processo de corrosão. Em geral, materiais lubrificantes secos tem uma grande resistência à corrosão e são virtualmente não afetados por elementos corrosivos da atmosfera. Onde mancais são requeridos a operar em soluções químicas ou em condições de corrosão não usuais, as propriedades dos lubrificantes secos para mancais devem ser particularmente estudadas com maiores detalhes.

Infelizmente, materiais secos lubrificantes não conferem resistência crescente à corrosão para os munhões (exceto, os polímeros termoplásticos que podem "untar" o munhão devido ao desgaste adesivo) Qualquer cavidade ou aspereza na superfície do munhão fará crescer rapidamente o desgaste cisalhante e se os produtos corrosivos são bastante duros, o desgaste abrasivo pode também ser promovido.

e) *FADIGA DE SUPERFÍCIE* - este tipo de desgaste é associado primariamente com superfícies de contato rolante. O desgaste não se desenvolve gradualmente mas ocorre subitamente devido a cavidades ou lascas de metal em escala relativamente grande, usualmente terminando a vida do mecanismo.

A fadiga é induzida por tensões repetidas na superfície,

e é explicada pelo fato de que a tensão máxima de cisalhamento gerada nos corpos em contato rolante sempre ocorrem em pequenas distâncias logo abaixo da superfície. Consequentemente, quando uma trinca desenvolve, resulta na separação de uma seção relativamente grande da superfície. Para ilustrar este fenômeno apresentamos as figs. (08) e (09).

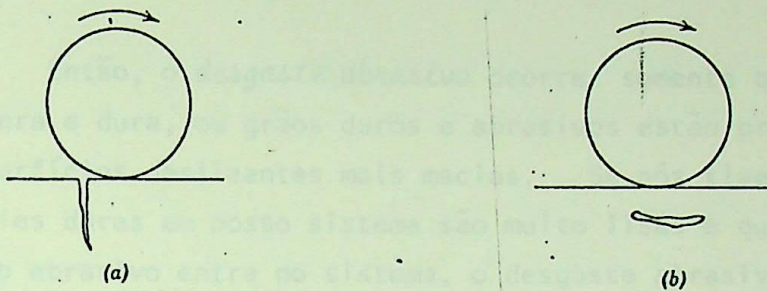


FIG. 8 - APARÊNCIA TÍPICA DA FALHA DA SUPERFÍCIE POR FADIGA EM SEUS ESTÁGIOS INICIAIS, (a) trinca na superfície (b) trinca abaixo da superfície. (REF: 3)

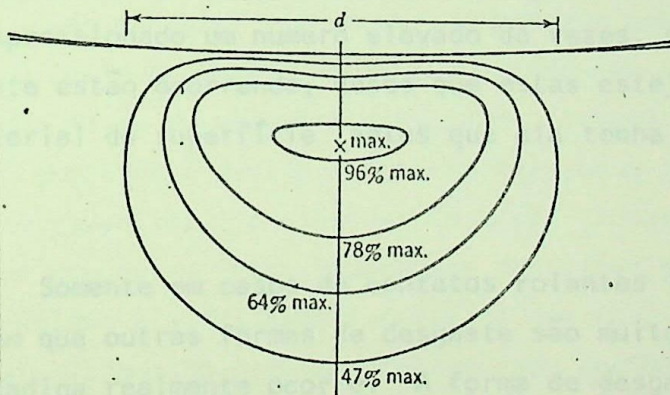


FIG. 9 - POSIÇÃO DA TENSÃO MÁXIMA PARA CONTATO ELÁSTICO DE SUPERFÍCIES CILÍNDRICA E PLANA. (REF: 3)

2. IMPORTÂNCIA DA FORMA DE DESGASTE PARA UM SISTEMA DE MANCAL SECO

Em vista do fato de haver não menos de cinco formas de desgaste, pode ser observado que materiais em contato deslizante apreciam qualquer espécie de vida útil. Devemos notar, todavia, que todas exceto uma das formas, de desgaste podem ser neutralizadas sem muita dificuldade, ou mesmo ser grandemente minimizadas.

Então, o *desgaste abrasivo* ocorre somente quando uma superfície áspera e dura, ou grãos duros e abrasivos estão presentes entre duas superfícies deslizantes mais macias. Se nós tivermos certeza que superfícies duras em nosso sistema são muito lisas e que nenhum detrito ou grão abrasivo entra no sistema, o desgaste abrasivo pode ser eliminado. Semelhantemente, o *desgaste corrosivo* é prevenido se nós tivermos certeza de que os materiais deslizantes não reagem quimicamente, com a atmosfera ou com o lubrificante em que estão operando.

Desgaste devido à *fadiga de superfície* ocorre somente em sistema onde o mesmo volume de material na superfície deslizante é pressionado e despressionado um número elevado de vezes, porém, outras formas de desgaste estão ocorrendo, desde que estas estejam continuamente removendo material da superfície antes que ela tenha chance de se tornar fatigada.

Somente em casos de contatos rolantes (rolamentos ou engrenagens), em que outras formas de desgaste são muito baixas, o desgaste devido à fadiga realmente ocorre. A forma de desgaste de fratura em materiais quebradiços ocorre analogamente, porém, estas situações excepcionais são raras.

Por um processo de eliminação, pode ser concluído que o *desgaste adesivo* é o mais comum, e a menos prevenível das formas de desgaste. Como é conhecido, esta forma de desgaste é universal em todos

sistemas de mancais com lubrificantes sólidos em que dois sólidos escorregam em contato um com outro. Não pode ser eliminada, somente reduzida. Embora o desgaste adesivo seja a forma mais universal de desgaste não é necessariamente a mais perigosa, pois as razões de desgaste adesivo são usualmente muito pequenas.

3. CONSIDERAÇÕES PARA PROJETO DE MANCAIS SECOS

O *desgaste* é a base primária para projetos e seleção de material, desde que ele determina quanto tempo uma parte pode operar antes de ser removida.

O *atrito* em geral tem importância secundária, de tal modo que devemos tomar cuidado para evitar excessivo arraste e aquecimento por atrito. Infelizmente, não há nenhuma relação entre desgaste e o coeficiente de atrito de um material, e os testes de desgaste são necessários. Todavia, os autores tentam relacionar o efeito do coeficiente de atrito com a pressão do mancal na zona de contato. As figs. (10) e (13) mostram resultados típicos de um teste de desgaste.

Convém notar que as curvas mostram uma razão de desgaste alta durante o período de amaciamento, e em seguida achatam-se essencialmente a uma razão de desgaste constante. Desgaste rápido durante o amaciamento é geralmente devido a fatores tais como desalinhamento, folga, acabamento superficial e expansão térmica. Todavia, os autores costumam postular que outro fator importante contribui para o amaciamento, ou desgaste rápido: é a *deformação elástica* dos materiais de fricção macia. Este fator tem sido previamente ignorado quando se calcula o desgaste ou a vida do mancal.

O amaciamento é normalmente completado em poucas horas, ao passo que o desgaste em estado-contínuo (ou de operação) é de interresse principal na maioria das aplicações. O desgaste operacional pode ser estimado multiplicando o valor $P.V$ da aplicação, pelo tempo de o-

peração H e o fator de desgaste radial K_h , então:

$$R_w = K_h \cdot P \cdot V \cdot H$$

onde: R_w é o desgaste radial

PV produto pressão-velocidade

Os fatores de desgaste radial (K_h) são geralmente estabelecidos para os vários materiais por testes relativamente simples e a equação acima permite a esta afirmação ser generalizada e usada para prever tempo de serviço de mancais, vedações, anéis de pistão e outros componentes, sob uma variedade de cargas e velocidades de deslizamento encontradas na prática.

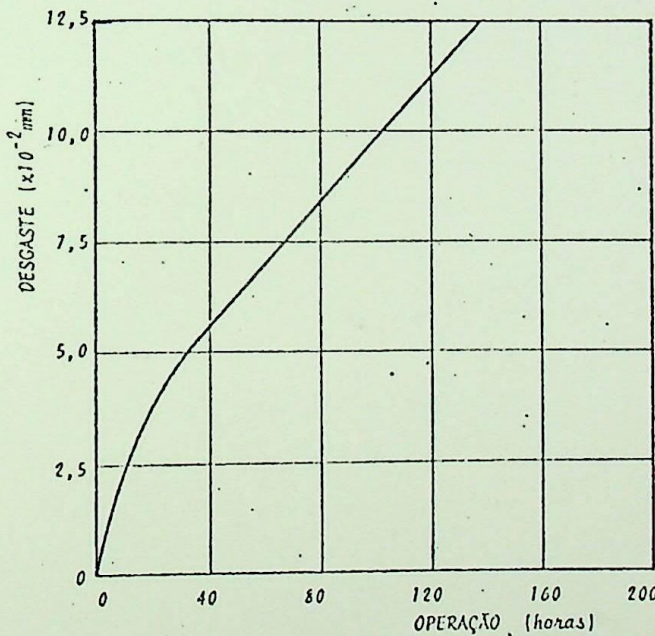


FIG. 10 - RESULTADOS DE TESTE DE DESGASTE PARA NYLON 6/6.

Plástico (NYLON 6/6) acasalado com aço AISI 1040; pressão, 7,0 kg/cm²; velocidade, 0,25m/s; temp. ambiente -38°C; sem lubrificação. Fator de desgaste radial, K_r , 70×10^{-10} (baseado na inclinação da curva desgaste vs. tempo após o desgaste rápido inicial) (REF: 19)

O fator de desgaste radial (K_r) é normalmente determinado medindo-se a soma de desgastes que uma bucha-suporte sofre quando operada por um período de tempo sob condições especificadas de acabamento do eixo, temperatura ambiente, etc. Os fatores de desgaste são geralmente considerados constantes sobre a faixa PV da maioria de materiais de mancais com lubrificantes secos, assim como outras condições são mantidas constantes. Discutiremos mais adiante, os fatores adicionais que devem ser levados em consideração quando calculando a pressão efetiva em mancais ou o tempo útil do mancal.



PRESSÃO DE TRABALHO EM MANCAIS SECOS

1. INTRODUÇÃO

PRESSÃO DE TRABALHO EM MANCAIS SECOS

CAPÍTULO IV

Se está presente em um mancal de deslizamento a lubrificação, a expressão: $P = F / L \cdot D$, que indica uma distribuição de pressão uniforme na área projetada do mancal, isto é, $L \cdot D$. Além disso, isto só ocorre verdadeiramente em um mancal, ou seja, quando o ângulo de contato for 180° . Porém, esta situação é inevitavelmente evitada na operação devido ao real para os sistemas de mancais, sendo especialmente ocorre o contato sobre uma área menor que $L \cdot D$. Além do mais, durante o processo de desgaste folcloreiro, uma contínua variação ocorre na área de contato, e a distribuição de pressão pode ser alterada.

O problema de cálculo da distribuição de pressão é muito mais complexo do que o caso de uma distribuição uniforme de pressão sobre toda a área de contato. A pressão interna, elástica e viscoelástica com o movimento de uma superfície, a deformação elástica ou viscoelástica do material do mancal, e a deformação plástica ou viscoelástica do material do mancal, também introduzem certamente novos efeitos significativos.

Então, uma análise preliminar para a determinação da pressão de trabalho no mancal requer a inclusão dos seguintes fatores:

- 1) a distribuição de pressão;
- 2) a deformação elástica e viscoelástica;
- 3) a deformação plástica;
- 4) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 5) a deformação plástica do material do mancal;
- 6) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 7) a deformação plástica do material do mancal;
- 8) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 9) a deformação plástica do material do mancal;
- 10) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 11) a deformação plástica do material do mancal;
- 12) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 13) a deformação plástica do material do mancal;
- 14) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 15) a deformação plástica do material do mancal;
- 16) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 17) a deformação plástica do material do mancal;
- 18) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 19) a deformação plástica do material do mancal;
- 20) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 21) a deformação plástica do material do mancal;
- 22) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 23) a deformação plástica do material do mancal;
- 24) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 25) a deformação plástica do material do mancal;
- 26) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 27) a deformação plástica do material do mancal;
- 28) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 29) a deformação plástica do material do mancal;
- 30) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 31) a deformação plástica do material do mancal;
- 32) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 33) a deformação plástica do material do mancal;
- 34) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 35) a deformação plástica do material do mancal;
- 36) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 37) a deformação plástica do material do mancal;
- 38) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 39) a deformação plástica do material do mancal;
- 40) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 41) a deformação plástica do material do mancal;
- 42) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 43) a deformação plástica do material do mancal;
- 44) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 45) a deformação plástica do material do mancal;
- 46) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 47) a deformação plástica do material do mancal;
- 48) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 49) a deformação plástica do material do mancal;
- 50) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 51) a deformação plástica do material do mancal;
- 52) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 53) a deformação plástica do material do mancal;
- 54) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 55) a deformação plástica do material do mancal;
- 56) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 57) a deformação plástica do material do mancal;
- 58) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 59) a deformação plástica do material do mancal;
- 60) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 61) a deformação plástica do material do mancal;
- 62) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 63) a deformação plástica do material do mancal;
- 64) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 65) a deformação plástica do material do mancal;
- 66) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 67) a deformação plástica do material do mancal;
- 68) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 69) a deformação plástica do material do mancal;
- 70) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 71) a deformação plástica do material do mancal;
- 72) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 73) a deformação plástica do material do mancal;
- 74) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 75) a deformação plástica do material do mancal;
- 76) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 77) a deformação plástica do material do mancal;
- 78) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 79) a deformação plástica do material do mancal;
- 80) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 81) a deformação plástica do material do mancal;
- 82) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 83) a deformação plástica do material do mancal;
- 84) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 85) a deformação plástica do material do mancal;
- 86) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 87) a deformação plástica do material do mancal;
- 88) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 89) a deformação plástica do material do mancal;
- 90) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 91) a deformação plástica do material do mancal;
- 92) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 93) a deformação plástica do material do mancal;
- 94) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 95) a deformação plástica do material do mancal;
- 96) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 97) a deformação plástica do material do mancal;
- 98) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;
- 99) a deformação plástica do material do mancal;
- 100) a deformação elástica e viscoelástica do material do mancal;

PRESSÃO DE TRABALHO EM MANCAIS SECOS

1. INTRODUÇÃO

Geralmente a pressão de trabalho, aquela que efetivamente está presente em um mancal de deslizamento é calculada usando-se a expressão: $P = W / L.D$, que assume uma distribuição de pressão uniforme na área projetada do mancal, isto é, $L.D$. Pois bem, isto só seria verdadeiro em um mancal, ou bucha, gastos quando o ângulo de contacto for 180° . Porém, esta situação é invariavelmente evitada na operação atual ou real para um sistema de mancal seco e geralmente ocorre o contato sobre uma área menor que $(L.D)$. Além do mais, durante o processo de desgaste friccional uma contínua variação ocorre na área de contato, daí a distribuição de pressão poder ser alterada.

O problema de cálculo da distribuição de pressão é fundamentalmente o mesmo que aquele da pressão entre dois corpos em contato. O MUNHÃO (parte interna, cilíndrica e usualmente com movimento de rotação ou oscilação), o contínuo desgaste do MANCAL (superfície de apoio) e a deformação elástica ou viscoelástica do material do mancal, contudo introduzem certamente novos efeitos significativos.

Então, uma análise matemática para a estimativa da pressão de trabalho no mancal requeriria a inclusão dos seguintes fatores:

- a) *desgaste radial do mancal*
- b) *área aparente de contato e sua variação com o desgaste*
- c) *distribuição da pressão verdadeira no contorno da superfície de desgaste, isto é, área aparente de contato*
- d) *efeito das forças tangenciais sobre a superfície de contato aparecendo devido a força de atrito*
- e) *variação da folga com a temperatura*
- f) *deformação característica do material do mancal e do*

munhão.

g) efeito da temperatura nas propriedades viscoelásticas do material do mancal.

Matematicamente, o valor real da pressão do mancal será função da carga, do tempo, da temperatura e do desgaste radial, para um sistema de mancal seco dado.

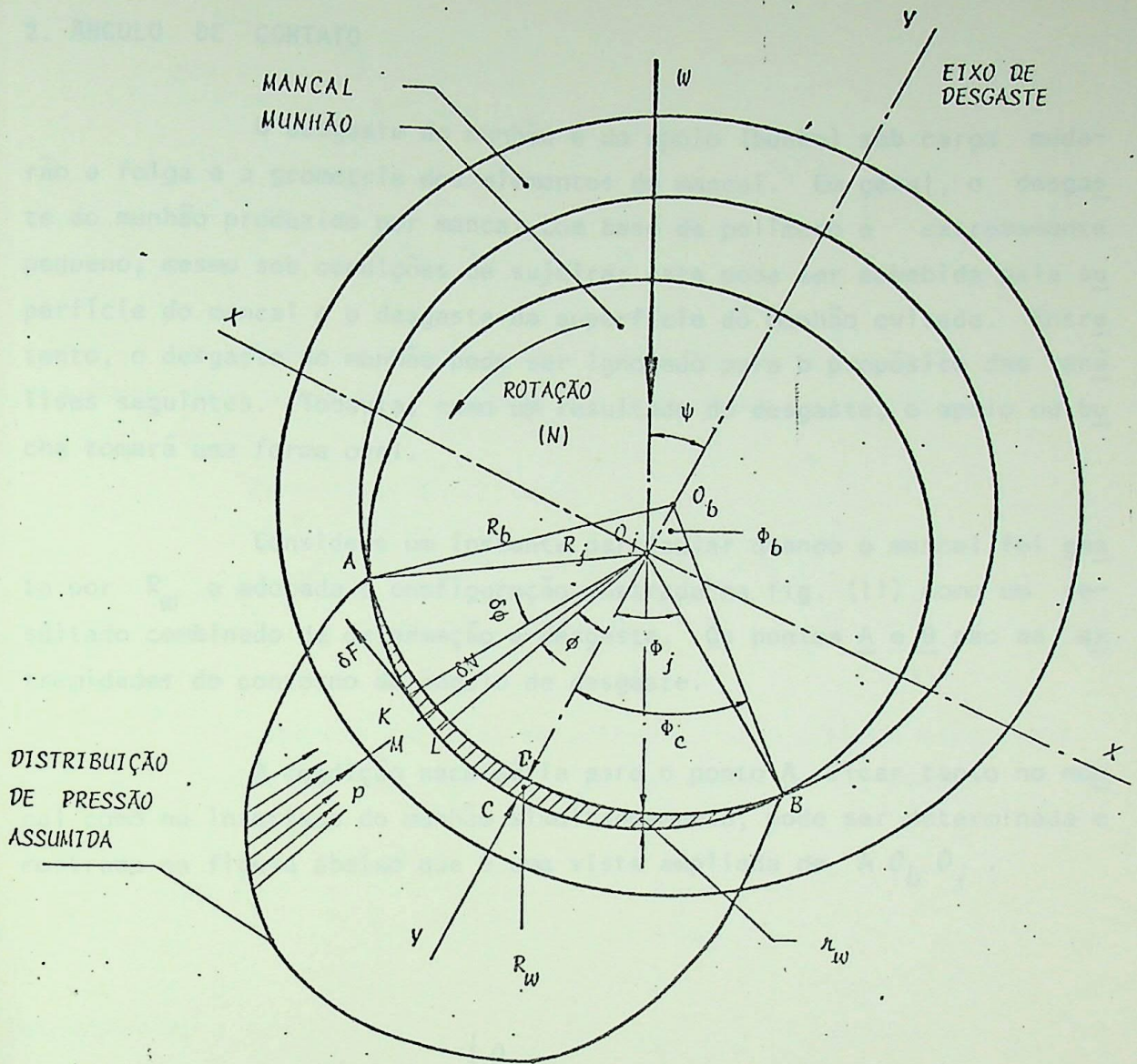
No estudo a seguir, uma tentativa foi feita para estimar a pressão de trabalho em mancal seco levando-se em consideração os fatores a, b, c, d, e e, com isso uma expressão apropriada foi encontrada.

O método teórico para determinar o desgaste básico real em mancal desta expressão sugerida é descrito adiante, e alguns resultados experimentais são comparados. Foi mostrado que esta expressão não é válida para prever a pressão de trabalho no mancal durante condição estática devido à omissão do fator f. Todavia, esta omissão é razoavelmente justificável quando o mancal é gasto apreciavelmente.

A consideração do fator g requeriria complicado entrosamento matemático das equações de fluxo de calor, equações de tensão, e apropriado modelo matemático definindo o comportamento viscoelástico do material do mancal (ver ref. 10).

Materiais polímeros para apoio de mancal são amplamente usados e usualmente adicionados a pões e reforços fibrosos (ver ref. 13) para melhorar as propriedades mecânicas. Foi concluído no término deste trabalho que para tais materiais usados em mancais, o efeito do fator g pode ser negligenciado.

O procedimento teórico para estimar o ângulo de contorno de desgaste do mancal, e o método para prever o efeito da razão de folga na vida do mancal são descritos no desenrolar do trabalho.



- r_w = desgaste radial ao longo da linha de carga
 R_w = desgaste radial máximo
 C_n = folga radial = $R_b - R_j$
 O_b, O_j = $C_n + R_w = n$
 R_b = raio do mancal
 R_j = raio do munhão
 ϕ_c = semi-ângulo de contato

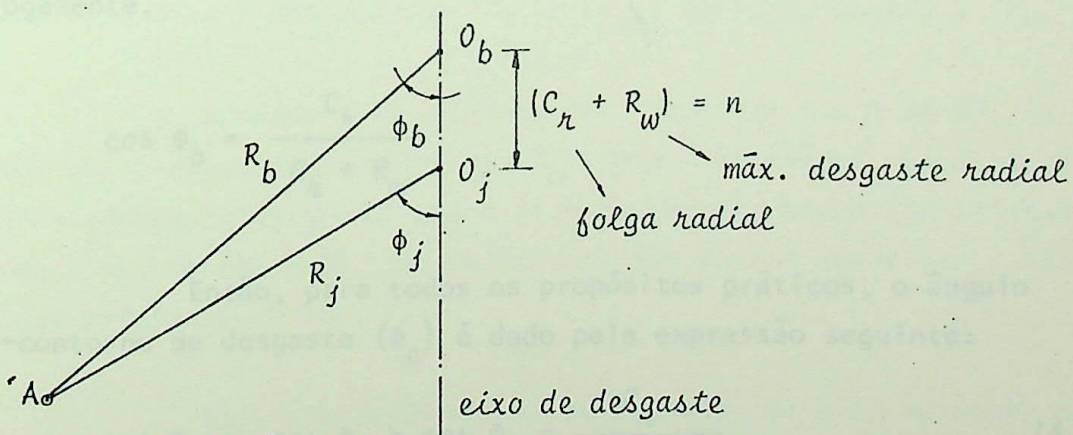
FIG. 11 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO E DESGASTE EM UMA BUCHA DE MANCAL SECO

2. ÂNGULO DE CONTATO

O desgaste do munhão e do apoio (bucha) sob carga mudam a folga e a geometria dos elementos do mancal. Em geral, o desgaste do munhão produzido por mancal com base de polímero é extremamente pequeno, mesmo sob condições de sujeira; esta pode ser embebida pela superfície do mancal e o desgaste da superfície do munhão evitada. Entretanto, o desgaste do munhão pode ser ignorado para o propósito das análises seguintes. Todavia, como um resultado do desgaste, o apoio ou bucha tomará uma forma oval.

Considere um instante particular quando o mancal foi gasto por R_w e adotada a configuração mostrada na fig. (11) como um resultado combinado de deformação e desgaste. Os pontos A e B são as extremidades do contorno do ângulo de desgaste.

A condição necessária para o ponto A ficar tanto no mancal como na interface do munhão simultaneamente, pode ser determinada e mostrada na figura abaixo que é uma vista ampliada de $A O_b O_j$.



Então:

$$\cos \Phi_j = \frac{R_b^2 - R_j^2 - n^2}{2 \cdot R_j \cdot n} \quad (4.1)$$

$$\cos \Phi_b = \frac{R_b^2 - R_j^2 + n^2}{2 \cdot R_b \cdot n} \quad (4.2)$$

Agora as equações (4.1) e (4.2) definem o ângulo de semi-contato para o munhão e o mancal em relação aos seus centros.

Da equação (4.1), vem:

$$\cos \Phi_j = \frac{(R_b + R_j) \cdot (R_b - R_j) - (C_h + R_w)^2}{2 \cdot R_j \cdot (C_h + R_w)}$$

Como uma primeira aproximação, os quadrados e produtos de C_h e R_w podem ser negligenciados da expressão acima, dando:

$$\cos \Phi_j \approx \frac{2 \cdot C_h \cdot R_j}{2 \cdot R_j \cdot (C_h + R_w)} = \frac{C_h}{C_h + R_w}$$

Analogamente,

$$\cos \Phi_b = \frac{C_h}{C_h + R_w}$$

Então, para todos os propósitos práticos, o ângulo do semi-contorno de desgaste (Φ_c) é dado pela expressão seguinte:

$$\cos \Phi_c \approx \cos \Phi_j \approx \cos \Phi_b \approx \frac{C_h}{C_h + R_w} \quad (4.3)$$

onde: $(2 \cdot R_j \cdot \Phi_c)$ é o comprimento do arco de contato

3. MODELO E ANÁLISES DA PRESSÃO DE TRABALHO NO MANCAL

Representamos na fig. (11) o sistema de mancal seco em que o munhão está girando com uma velocidade N rpm em torno de seu eixo O_j . O mancal foi tomado com uma forma oval, conforme mostrado, como resultante de seu desgaste e deformação. A deformação do material do mancal poderia ser elástica, plástica ou viscoelástica dependendo da natureza do material e da intensidade da carga W no sistema. Para o propósito desta análise, o efeito da deformação do material do munhão é negligenciado tomando-o como perfeitamente rígido.

A deformação do material do mancal devido à carga é também ignorado assumindo ser muito pequena em comparação com o desgaste, isto é, $\delta_h \ll R_w$, exceto durante o período básico inicial.

Inicialmente as condições de contato dependem do grau de conformidade das duas superfícies e da característica de deformação do material do mancal e do munhão. O desgaste, então, inicia-se no material mais fraco causando condições de contato e daí alterando a distribuição de pressão. Como o eixo de rotação (munhão) e a força aplicada são fixadas, é claro que condições contínuas eventualmente deveriam ser alcançadas sendo que o desgaste se desenvolve ao longo do eixo de desgaste, isto é, a linha que une O_j e O_b , conforme mostra a fig. (11)

Considere um instante particular em que o mancal foi gasto com uma profundidade radial de R_w como é mostrado. As dimensões e as quantidades relacionadas com o arco de contato podem ser calculadas usando a expressão (4.3). O significado das várias quantidades são claras com referência à fig. (11).

Seja a pressão normal no ponto M , da área aparente do arco de contato, dada por p . Considerando um pequeno elemento KL fazendo um ângulo $\delta\phi$ na origem, então:

$$\delta N = p \cdot R_j \cdot L \cdot \delta \Phi$$

$$\delta F = \mu \cdot \delta N = \mu \cdot p \cdot R_j \cdot L \cdot \delta \Phi$$

Considerando as forças atuando no sistema de mancal ao longo e normal ao eixo de desgaste, respectivamente, temos:

$$W \cdot \cos \Psi = \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \delta N \cdot \cos \Phi + \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \delta F \cdot \sin \Phi \quad (4.4)$$

$$W \cdot \sin \Psi = \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \delta F \cdot \cos \Phi - \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \delta N \cdot \sin \Phi \quad (4.5)$$

Substituindo os valores de δN e δF nas equações (4.4) e (4.5), vem:

$$W \cdot \cos \Psi = \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} p \cdot R_j \cdot L \cdot \cos \Phi \cdot d\Phi + \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \mu \cdot p \cdot R_j \cdot L \cdot \sin \Phi \cdot d\Phi \quad (4.6)$$

$$W \cdot \sin \Psi = \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \mu \cdot p \cdot R_j \cdot L \cdot \cos \Phi \cdot d\Phi - \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} p \cdot R_j \cdot L \cdot \sin \Phi \cdot d\Phi \quad (4.7)$$

onde:

$$\cos \Phi_c \approx C_h / (C_h + R_w) \quad e \quad \Phi_c \approx \Phi_b \approx \Phi_j$$

Para calcular a integral das equações (4.6) e (4.7), a distribuição de pressão sobre o contorno da área de desgaste deve ser conhecida. A seguir, três diferentes distribuições de pressão foram consideradas no contorno da área de desgaste instantânea do mancal e as

equações (4.6) e (4.7) resolvidas para elas.

CASO A : DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO UNIFORME NO CONTORNO DA ÁREA DE DESGASTE.

Assumindo distribuição de pressão uniforme no contorno da área de desgaste instantânea, i. é, pressão normal $p = P_e$, as equações (4.6) e (4.7), reduzem-se a:

$$\begin{aligned}
 W. \cos \Psi &= \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} P_e \cdot R_j \cdot L \cdot \cos \Phi \cdot d\Phi + \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \mu \cdot P_e \cdot R_j \cdot L \cdot \sin \Phi \cdot d\Phi = \\
 &= P_e \cdot R_j \cdot L \cdot (\sin \Phi) \Big|_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} + \mu \cdot P_e \cdot R_j \cdot L \cdot (\cos \Phi) \Big|_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} = \\
 &= 2 \cdot P_e \cdot R_j \cdot L \cdot \sin \Phi_c \quad (4.8)
 \end{aligned}$$

Analogamente,

$$\begin{aligned}
 W. \sin \Psi &= \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \mu \cdot P_e \cdot R_j \cdot L \cdot \cos \Phi \cdot d\Phi - \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} P_e \cdot R_j \cdot L \cdot \sin \Phi \cdot d\Phi = \\
 &= \mu \cdot P_e \cdot R_j \cdot L \cdot (\sin \Phi) \Big|_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} - P_e \cdot R_j \cdot L \cdot (-\cos \Phi) \Big|_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} = \\
 &= 2 \cdot \mu \cdot P_e \cdot R_j \cdot L \cdot \sin \Phi_c \quad (4.9)
 \end{aligned}$$

Das equações (4.8) e (4.9), $\tan \Psi = \mu$ (força cisalhante/força normal), portanto:

$$W = 2 \cdot \mu \cdot P_e \cdot R_j \cdot L \cdot \sin \Phi_c \cdot \frac{(1 + \mu^2)^{1/2}}{\mu}$$

ou,

$$P_e = \frac{W}{2 \cdot R_j \cdot L \cdot \sin \Phi_c \cdot (1 + \mu^2)^{1/2}} \quad (4.10)$$

onde: $\Phi_c = \cos^{-1} \{ C_h / (C_h + R_w) \}$

CASO B : DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO DA FORMA $p = P_c \cdot \cos \Phi$ NO CONTORNO ANGULAR DE DESGASTE

Substituindo $p = P_c \cdot \cos \Phi$ nas equações (4.6) e (4.7) e re solvendo para condições de contorno apropriadas, vem:

$$W \cdot \cos \Psi = \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} P_c \cdot \cos \Phi \cdot R_j \cdot L \cdot \cos \Phi \cdot d\Phi + \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \mu \cdot P_c \cdot \cos \Phi \cdot R_j \cdot L \cdot \sin \Phi \cdot d\Phi =$$

seja,

$$\begin{aligned} A_1 &= \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} P_c \cdot R_j \cdot L \cdot \cos^2 \Phi \cdot d\Phi = P_c \cdot R_j \cdot L \cdot \left\{ \sin \frac{2\Phi}{4} + \frac{\Phi}{2} \right\} \Big|_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} = \\ &= P_c \cdot R_j \cdot L \cdot (\sin \Phi_c \cdot \cos \Phi_c + \Phi_c) \end{aligned}$$

semelhantemente,

$$A_2 = \mu \cdot P_c \cdot R_j \cdot L \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \cos \Phi \cdot \sin \Phi \cdot d\Phi = \text{zero}$$

Portanto:

$$W. \cos \Psi = A_1 + A_2 = P_c \cdot R_j \cdot L \cdot (\sin \Phi_c \cdot \cos \Phi_c + \Phi_c) \quad (4.11)$$

analogamente,

$$\begin{aligned} W. \sin \Psi &= \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \mu \cdot P_c \cdot R_j \cdot L \cdot \cos^2 \Phi \, d\Phi - \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} P_c \cdot R_j \cdot L \cdot \sin \Phi \cdot \cos \Phi \cdot d\Phi = \\ &= \mu \cdot P_c \cdot R_j \cdot L \cdot (\sin \Phi_c \cdot \cos \Phi_c + \Phi_c) \end{aligned} \quad (4.12)$$

agora,

$$\mu = \operatorname{tg} \Psi = \frac{W. \sin \Psi}{W. \cos \Psi}$$

então, da equação (4.12), vem:

$$W = \mu \cdot P_c \cdot R_j \cdot L \cdot (\sin \Phi_c \cdot \cos \Phi_c + \Phi_c) \cdot \frac{(1 + \mu^2)^{1/2}}{\mu}$$

ou,

$$P_c = \frac{W}{R_j \cdot L \cdot (\sin \Phi_c \cdot \cos \Phi_c + \Phi_c) (1 + \mu^2)^{1/2}} \quad (4.13)$$

CASO C : DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO DA FORMA SEMI-ELÍPTICA NO CONTORNO DA ÁREA DE DESGASTE

Assumindo distribuição de pressão no contorno da área de desgaste instantânea sendo semi-elíptica, i. é,

$$p = P_m \cdot (1 - x^2/a^2)^{1/2}$$

substituindo na equação (4.7),

$$W. \operatorname{sen} \Psi = \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \mu. P_m. (1 - x^2/a^2)^{1/2} . R_j. L. \cos \Phi. d\Phi - \\ - \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} P_m. (1 - x^2/a^2)^{1/2} . R_j. L. \operatorname{sen} \Phi. d\Phi$$

ou,

$$W. \operatorname{sen} \Psi = A_3 - A_4$$

sendo que, para o caso presente, temos:

$$a = R_j. \operatorname{sen} \Phi_j \simeq R_j. \operatorname{sen} \Phi_c$$

$$x = R_j. \operatorname{sen} \Phi$$

substituindo esses valores na integral acima, vem:

$$A_3 = \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \mu. P_m. (1 - \operatorname{sen}^2 \Phi / \operatorname{sen}^2 \Phi_c)^{1/2} . L. R_j. \cos \Phi. d\Phi = \\ = \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} \mu. P_m. (1 - \operatorname{cosec}^2 \Phi_c . \operatorname{sen}^2 \Phi)^{1/2} . L. R_j. \cos \Phi d\Phi = \\ = \mu. P_m. L. R_j. \left\{ \frac{(1 - \operatorname{cosec}^2 \Phi_c . \operatorname{sen}^2 \Phi_c)^{1/2} . \operatorname{sen} \Phi}{2} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} . \frac{1}{\operatorname{cosec} \Phi_c} . \operatorname{sen}^{-1} (\operatorname{cosec} \Phi_c . \operatorname{sen} \Phi) \right\}_{-\Phi_c}^{+\Phi_c}$$

(Para solução desta integral ver APÊNDICE A)

esta integral reduz a expressão ã seguinte forma:

$$A_3 = \mu \cdot P_m \cdot L \cdot R_j \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \text{sen}\Phi_c$$

analogamente,

$$\begin{aligned} A_4 &= P_m \cdot L \cdot R_j \cdot \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} (1 - \text{sen}^2\Phi / \text{sen}^2\Phi_c)^{1/2} \cdot \text{sen}\Phi \, d\Phi = \\ &= P_m \cdot L \cdot R_j \cdot \int_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} (1 - \text{cosec}^2\Phi_c \cdot \text{sen}^2\Phi)^{1/2} \cdot \text{sen}\Phi \, d\Phi = \\ &= P_m \cdot L \cdot R_j \cdot \left\{ \frac{-(1 - \text{cosec}^2\Phi_c \text{sen}^2\Phi)^{1/2} \cdot \cos\Phi}{2} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1 - \text{cosec}^2\Phi_c}{2 \text{cosec}\Phi_c} \cdot \ln (\text{cosec}\Phi_c \cdot \cos\Phi + (1 - \text{cosec}^2\Phi_c \cdot \text{sen}^2\Phi)) \right\}_{-\Phi_c}^{+\Phi_c} = \\ &= \text{ZERO} \end{aligned}$$

Então,

$$\begin{aligned} W \cdot \text{sen}\Psi &= A_3 - A_4 \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot \text{sen}\Phi_c \cdot P_m \cdot R_j \cdot L \cdot \mu \end{aligned} \quad (4.14)$$

analogamente,

$$W \cdot \cos\Psi = \frac{\pi}{2} \cdot \text{sen}\Phi_c \cdot P_m \cdot R_j \cdot L \quad (4.15)$$

portanto:

$$\text{tg } \Psi = W \cdot \text{sen}\Psi / W \cdot \cos\Psi = \mu$$

agora na equação (4.15), vem:

$$W = \frac{\pi}{2} \cdot P_m \cdot R_j \cdot L \cdot \sin \phi_c \cdot (1 + \mu^2)^{1/2}$$

ou,

$$P_m = \frac{2 \cdot W}{\pi \cdot R_j \cdot L \cdot \sin \phi_c \cdot (1 + \mu^2)^{1/2}} \quad (4.16)$$

ou ainda, alternativamente,

$$P_m = \frac{4}{\pi} \left(\frac{W}{2 \cdot R_j \cdot L \cdot \sin \phi_c \cdot (1 + \mu^2)^{1/2}} \right) \quad (4.17)$$

comparativamente,

$$P_m = \frac{4}{\pi} \cdot P_e = 1,27 \cdot P_e$$

EFEITO DO DESGASTE RADIAL (ϵ_r) NA PRESSÃO DO MANCAL

INTRODUÇÃO

EFEITO DO DESGASTE RADIAL NA PRESSÃO DO MANCAL

CAPÍTULO V

$$\text{CASO 1: } P = \frac{W}{\pi \cdot L \cdot R_f \cdot \sin \phi} \quad (5.1)$$

$$\text{CASO 2: } P = \frac{W}{\pi \cdot L \cdot R_f \cdot (\sin \phi_c \cos \phi_c + \mu \sin \phi_c)} \quad (5.2)$$

$$\text{CASO 3: } P = \frac{W}{\pi \cdot L \cdot R_f \cdot \sin \phi_c} = 1,57 P_c \quad (5.3)$$

Seja uma carga estabilizada, W , aplicada a um sistema de mancal sobre o qual é deformação elástica na zona de contato, sendo que a semi-espessura da zona de contato horizontal é (Fig. 12) a de ser calculada de acordo com a expressão:

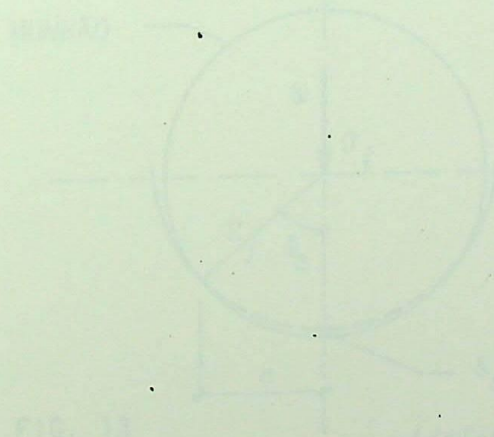


FIG. 12

(deformação elástica)

EFEITO DO DESGASTE RADIAL (R_w) NA PRESSÃO DO MANCAL

INTRODUÇÃO

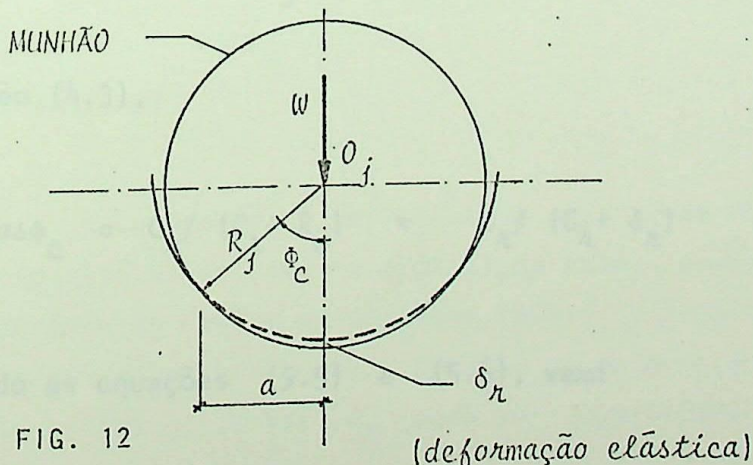
Para $\mu \leq 0,3$, como é geralmente o caso com os materiais de mancais seco, o grupo $(1 + \mu^2)^{1/2}$ pode ser desprezado para todas aplicações práticas e as equações (4.10), (4.13) e (4.17) podem ser rescritas como segue:

$$\text{CASO A : } P_e = \frac{W}{2 \cdot L \cdot R_f \cdot \text{sen} \Phi_c} \quad (5.1)$$

$$\text{CASO B : } P_c = \frac{W}{R_f \cdot L \cdot (\text{sen} \Phi_c \cdot \cos \Phi_c + \Phi_c)} \quad (5.2)$$

$$\text{CASO C : } P_m = \frac{2 W}{\pi \cdot L \cdot R_f \cdot \text{sen} \Phi_c} = 1,27 P_e \quad (5.3)$$

Seja uma carga estabilizada $\underline{W}$ aplicada a um sistema de mancal seco: devido à deformação elástica ela toma a forma mostrada, sendo que a semi-largura da zona de contato Hertziana $\underline{a}$ (Fig. 12) pode ser calculada da seguinte expressão:



$$a = 0,8 (W/L)^{1/2} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot R_b \cdot R_j}{R_b - R_j} \left(\frac{1 - \nu_b^2}{E_b} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \right) \right\}^{1/2} \quad (5.4)$$

onde: R_b = raio do mancal
 R_j = raio do munhão
 ν = coef. de Poisson
 E = módulo de Young

(Dedução da expressão 5.4 encontra-se no APÊNDICE D)

O coeficiente de Poisson (ν) não varia muito com os diferentes metais e não é sempre precisamente conhecido. Para os plásticos o coeficiente de Poisson é geralmente uma função do tempo e da tensão e ou do grau de deformação assim como o módulo de fluência (CREEP) compressivo. Para mancais com base de plásticos, seu valor pode ser assumido, com boa aproximação a 0,3 para plástico "rígido" e aproximadamente 0,5 para plástico "flexível".

Da fig. (12), vem:

$$\cos \Phi_c = \frac{(R_j^2 - a^2)^{1/2}}{R_j} \quad (5.5)$$

E da equação (4.3),

$$\cos \Phi_c \approx C_h / (C_h + R_w) \approx C_h / (C_h + \delta_h) \quad (5.6)$$

Equacionando as equações (5.5) e (5.6), vem:

$$\frac{C_h}{C_h + \delta_h} = \frac{(R_j^2 - a^2)^{1/2}}{R_j}$$

Portanto,

$$\delta_h = C_h \left(\frac{R_j}{(R_j^2 - a^2)^{1/2}} - 1 \right) \quad (5.7)$$

Esta expressão nos permite determinar a deformação elástica (δ_h) estática do mancal devido a uma carga estacionária $\underline{w}$ aplicada ao sistema de mancal seco através do eixo (munhão).

Agora, quando o munhão começa a girar, o mancal começará a desgastar nesta posição deformada. É bem conhecido que o mancal, de deslizamento, se desgasta rapidamente durante o período inicial, porém, uniformemente após esta fase (fig. 13).

Como uma primeira aproximação pode ser assumido que o mancal se desgasta rapidamente até uma profundidade de deformação elástica (δ_h) e a carga se ajusta uniformemente nesta nova área gerada, i. é,

$$P_{mH} = \frac{w}{2 \cdot a \cdot L} \quad (5.8)$$

(Hertziana)

Esta pressão é representada pela linha AB na fig. (14) . O mancal deformará elasticamente após algum tempo, porém, como a pressão está decrescendo devido ao desgaste radial, a soma da deformação elástica diminui apreciavelmente. O valor da deformação elástica (δ'_h) quando o mancal foi gasto até δ_h pode ser determinado aproximadamente

pela seguinte expressão:

$$\frac{\delta'_h}{t} = \frac{\sigma_y}{E_b} - \nu_b \frac{\sigma_z}{E_b} - \nu_b \frac{\sigma_x}{E_b} \quad (5.9)$$

(lei de Hooke generalizada)

isto é, a deformação radial total ao longo do eixo de desgaste deveria

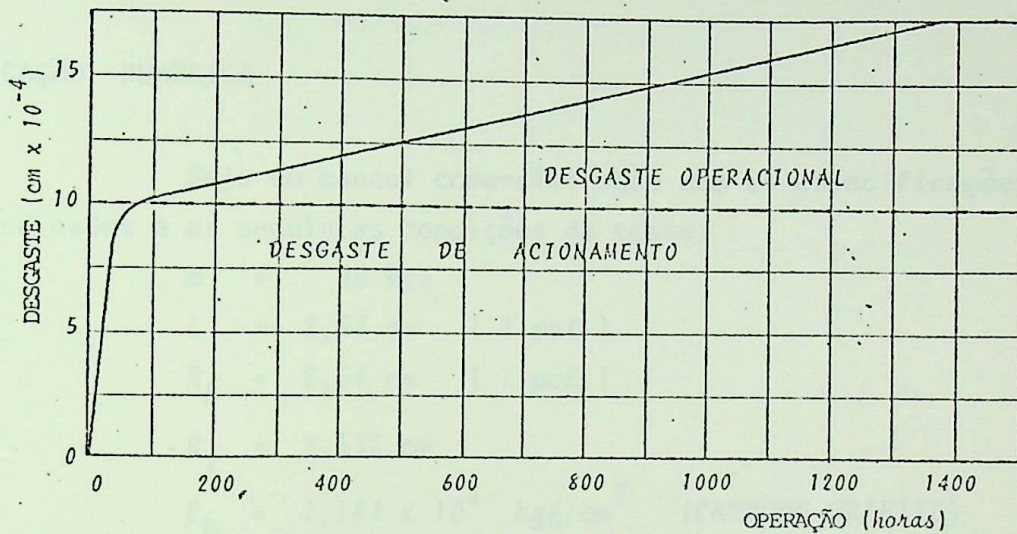


FIG. 13 - CURVA TÍPICA DESGASTE-TEMPO PARA OS MATERIAIS.
(REF: 26)

ser a soma da deformação naquela direção resultante de todas as forças individuais. Ignorando a deformação em outras direções a expressão acima poderia ser escrita como:

$$\frac{\delta'_h}{t} \approx \frac{\sigma_y}{E_b} = \frac{P_{mH}}{E_b} \quad (5.10)$$

ou,

$$\delta'_h \approx P_{mH} \cdot t / E_b \quad (5.11)$$

Empiricamente afirma-se que esta deflexão é cerca de 10% da deflexão elástica determinada inicialmente para condições de não-desgaste.

APLICAÇÃO NUMÉRICA

Seja um mancal comercial seco com as especificações abaixo indicadas e as seguintes condições de teste:

$$W = 90 \text{ kgf}$$

$$L = 2,54 \text{ cm} \quad (1 \text{ pol.})$$

$$R_b = 2,54 \text{ cm} \quad (1 \text{ pol.})$$

$$R_f = 2,532 \text{ cm}$$

$$E_b = 1,188 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2 \quad (\text{CARBONO-GRAFITE})$$

$$E_f = 2,109 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2 \quad (\text{AÇO})$$

$$C_h = 0,0076 \text{ cm}$$

$$v = 0,3$$

$$t = 0,3 \text{ cm} \quad (\text{espessura da bucha})$$



A equação (5.4), nos dá:

$$\begin{aligned} a &= 0,8(90/2,54)^{1/2} \cdot \left\{ \frac{2(2,54)(2,532)}{2,54 - 2,532} \left(\frac{1 - 0,09}{1,188 \times 10^4} - \frac{1 - 0,09}{2,109 \times 10^6} \right) \right\}^{1/2} \\ &= 1,68 \text{ cm} \end{aligned}$$

A deformação elástica (δ_r) para condições de não-desgaste, será:

$$\delta_h = 0,0076 \left(\frac{2,532}{2,532^2 - 1,68^2} - 1 \right) = 0,00256 \text{ cm}$$

A pressão média Hertziana, da equação (5.8) ,

$$P_{mH} = \frac{90}{2 \times 1,68 \times 2,54} = 10,5 \text{ kgf/cm}^2$$

A pressão nominal do mancal,

$$P = W / (LD) = 90 / (2,54)(2 \times 2,54) \approx 7 \text{ kgf/cm}^2$$

A deformação elástica (δ'_h) quando o mancal foi gasto até δ_h , será:

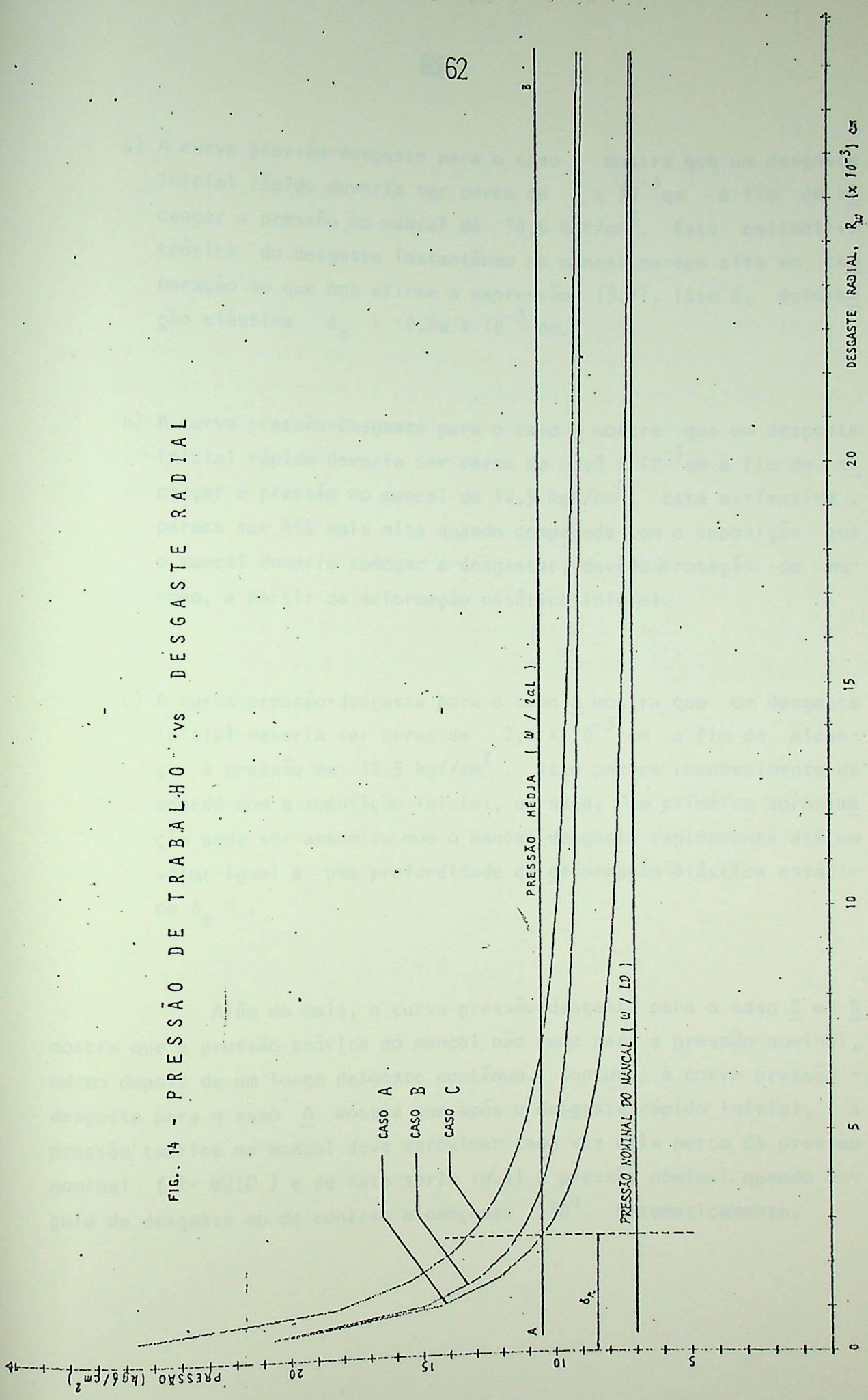
$$\delta'_h = (10,5)(0,3) / 1,188 \times 10^4 = 0,00028 \text{ cm}$$

(cerca de 10,9% de δ_h)

Agora, lançando mão de um computador e feita a devida programação (veja APÊNDICE G), este, com auxílio de seu "plotter" traçou-nos as curvas *pressão de trabalho versus desgaste radial* (veja fig. 14) para o exemplo em apreço baseado nas expressões (5.1) , (5.2) e (5.3), que representam os casos A, B e C respectivamente.

Analisando-se a fig. (14), pode ser concluído das curvas pressão-desgaste para os casos A , B e C em conjunção com a linha de pressão média Hertziana AB, que:

FIG. 14 - PRESSÃO DE TRABALHO VS DESGASTE RADIAL



- a) A curva pressão-desgaste para o caso C mostra que um desgaste inicial rápido deveria ser cerca de $7 \times 10^{-3} \text{ cm}$ a fim de alcançar a pressão no mancal de $10,5 \text{ kgf/cm}^2$. Esta estimativa teórica do desgaste instantâneo no mancal parece alta em comparação ao que nos afirma a expressão (5.7), isto é, deformação elástica $\delta_h = 2,56 \times 10^{-3} \text{ cm}$.
- b) A curva pressão-desgaste para o caso B mostra que um desgaste inicial rápido deveria ser cerca de $3,7 \times 10^{-3} \text{ cm}$ a fim de alcançar a pressão no mancal de $10,5 \text{ kgf/cm}^2$. Esta estimativa, parece ser 45% mais alta quando comparada com a suposição que o mancal deveria começar a desgastar, devido à rotação do munhão, a partir da deformação estática inicial.
- c) A curva pressão-desgaste para o caso A mostra que um desgaste inicial deveria ser cerca de $2,6 \times 10^{-3} \text{ cm}$ a fim de alcançar a pressão de $10,5 \text{ kgf/cm}^2$. Isto parece razoavelmente de acordo com a suposição inicial, ou seja, "em primeira aproximação pode ser assumido que o mancal desgasta rapidamente até um valor igual a uma profundidade de deformação elástica estática δ_h ".

Além do mais, a curva pressão-desgaste para o caso C e B mostra que a pressão teórica do mancal não muda para a pressão nominal, mesmo depois de um longo desgaste contínuo. Contudo, a curva pressão-desgaste para o caso A mostra que após o desgaste rápido inicial, a pressão teórica no mancal deve aproximar cada vez mais perto da pressão nominal ($P = W/LD$) e de fato seria igual a pressão nominal quando ângulo de desgaste ou de contato alcançasse 130° . Matematicamente,

$$\lim_{\Phi_c \rightarrow \pi/2} P_e = \lim_{\Phi_c \rightarrow \pi/2} \frac{W}{2 \cdot L \cdot R_j \cdot \sin \Phi_c} \rightarrow \frac{W}{L \cdot D} \rightarrow P$$

Na fig. (13) é mostrado o comportamento desgaste-tempo em um sistema de mancal seco encontrado na prática. Isto indica que o mancal desgasta uniformemente na direção radial após um desgaste rápido. A explicação para isto pode ser encontrada nas curvas A, B e C que indicam que o decréscimo na pressão é pequeno e contínuo após o desgaste rápido inicial.

Contudo, uma estimativa razoável do desgaste rápido inicial e uma aproximação contínua em direção à pressão nominal é adequadamente apresentada pela curva pressão-desgaste do caso A. Isto sugere que a pressão de trabalho no mancal seco pode ser razoavelmente calculada da equação (5.1).

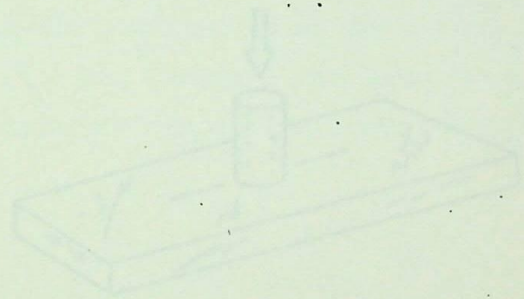
Uma limitação da equação (5.1) é que não será válida para ângulos de contorno de desgaste muito pequenos. A razão para isto é que tinha-se deduzido da geometria de contato e ignorado as propriedades de deformação do sistema de mancal. Matematicamente,

$$\lim_{\Phi_c \rightarrow 0} P_e = \lim_{\Phi_c \rightarrow 0} \frac{W}{2 \cdot L \cdot R_j \cdot \sin \Phi_c} \rightarrow \infty$$

EFEITO DO COEFICIENTE DE FOLGA NA VIDA DO MANCAL

EFEITO DO COEFICIENTE DE FOLGA NA VIDA DO MANCAL

CAPÍTULO VI



$$L_{10} = 10^6 \cdot \left(\frac{W}{P} \right)^3$$

V = velocidade

H = tempo de operação

Os dados numéricos do volume perdido (V_p) são considerados de pequeno valor para os projetistas, porém, na variação da espessura da parede do eixo, a largura total X é geralmente considerada de maior importância prática para o projeto de eixos e mancais.

Portanto,

$$X_p \cdot A = W \cdot V \cdot H$$

EFEITO DO COEFICIENTE DE FOLGA NA VIDA DO MANCAL

1. ASPECTOS DO CRITÉRIO PV SOBRE DESGASTE

Tal como foi elucidado em capítulo anterior, onde tece_umos considerações para o projeto de mancais de deslizamento com lubrifi_ucantes secos, afirmávamos que o amaciamento de um mancal é normalmente completado em poucas horas (vide fig. 13), ao passo que o desgaste-contínuo é de interesse principalmente na maioria das aplicações.

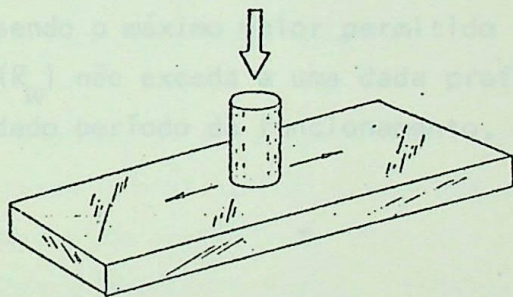
Foi observado em vários testes realizados por pesquisado_ures do assunto (ref. 29), utilizando vários dispositivos para analisar atrito e desgaste, que o volume total de material perdido (V_w) num sis_utema deslizante era proporcional à carga suportada, multiplicada pela distância percorrida, isto é,

$$V_w \propto W \cdot l \propto W \cdot (V \cdot H)$$

onde:

V = velocidade

H = tempo de operação



Os dados numéricos do volume perdido (V_w) são considera_udos de pequeno valor para os projetistas, porém, uma variação na espes_usura da parede do mancal (desgaste radial R_w) é geralmente considerada de maior importância prática para o projeto de mancais secos.

Portanto,

$$R_w \cdot A \propto W \cdot V \cdot H$$

onde: $\underline{A}$ é a área projetada do mancal (=LD)

Ainda,

$$R_w \propto P \cdot V \cdot H$$

onde: $\underline{P}$ é a pressão no mancal

Ou,

$$R_w = K_h \cdot P \cdot V \cdot H$$

(6.1)

sendo: K_h chamado de FATOR DE DESGASTE RADIAL do mancal

Este CRITÉRIO PV (assim chamado pela maioria dos autores) é um processo muito usado e aceito na escolha de materiais de mancal seco, geralmente tomado como sendo o máximo valor permitido no produto PV, caso o desgaste radial (R_w) não exceda a uma dada profundidade radial pré-estabelecida, em um dado período de funcionamento, digamos: 1,3 mm em 1000 horas.

Um roteiro típico da seleção de materiais em mancal seco baseado no CRITÉRIO PV e na vida operante é dado na tabela 06.

TABELA 6 - PRESSÃO MÁXIMA E COEFICIENTE DE ATRITO			
material	pressão máx. (kgf/cm ²)	coef. de atrito	temp. máx. do meio ambiente do mancal (°C)
THERMOPLÁSTICOS	50	0,2 - 0,4	100
THERMOPLÁSTICOS ADICIONADOS	100	0,2 - 0,4	100
THERMOSETS REFORÇADOS	210	0,2 - 0,4	150
P . T . F . E .	30	0,05 - 0,25	250
PTFE ADICIONADO	70	0,05 - 0,30	250
PTFE impregnado com chumbo metálico	280	0,05 - 0,30	280
GRAFITES	70	0,1 - 0,3	500
GRAFITE em metal	210	0,08 - 0,2	350
PTFE em fibras	700	0,05 - 0,3	250

(ref. 24)

Os fatores de desgaste radial (K_h) são geralmente estabelecidos para os vários materiais por testes relativamente simples e a equação (6.1) permite a esta informação ser generalizada e usada para *predizer* o tempo de serviço de mancais, vedações, anéis de pistão e outros componentes sob uma grande gama de pressões, cargas e velocidades de deslizamento encontradas na prática.

2. EFEITO DO COEFICIENTE DE FOLGA (C_d/D)

Sabemos que normalmente o fator de desgaste radial (K_h) é determinado medindo-se a soma de desgastes que uma bucha-suporte sofre quando operada por um período de tempo sob condições específicas de acabamento superficial do eixo, temperatura ambiente, etc ... Porém, o *fator de desgaste radial K_h não leva em conta o efeito da folga na pressão do mancal*, sendo considerados constantes sobre a faixa PV da maioria dos materiais de mancais secos com auto-lubrificantes.

Assim considerando, a expressão (6.1) torna-se insensível a uma mudança de diâmetros do sistema mancal-munhão o que não é totalmente correto. Daí, concluímos que este critério de desgaste radial quando usado *em conjunção com a curva pressão-desgaste* indicaria a variação da vida útil do mancal com os diferentes coeficientes de folga (C_d/D).

Convém salientar, que de um modo geral e prático, considera-se *VIDA ÚTIL* para um mancal o período requerido para desgastar radialmente uma profundidade máxima de 1,25mm (aproximadamente); além do qual surgem problemas de vibração que são prejudiciais ao sistema.

3. COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL

Dada a impossibilidade de obter-se em nossos laboratórios os perfis de desgaste para um mancal seco em diferentes instantes va lemo-nos da ref. (5) onde se apresenta um mancal com as caracteris ticas e condições indicadas a seguir, emprestando-nos ainda esta dita referência os perfis de desgaste para o mancal após 5 horas de desgaste (desgaste inicial rápido) e após 200 horas de operação; para que pudéssemos verificar a comprovação experimental desejada.

O mancal ensaiado apresentava inicialmente as seguintes características geométricas:

Díâmetro (D)	=	5,08	cm
Largura (L)	=	3,17	cm
Folga diametral (C_d)	=	0,019	cm
Carga normal aplicada	=	106	kgf
Velocidade (V)	=	54,3	cm/s
Produto P.V	=	357	kgf/cm ² x cm/s

Módulo de Young do material do mancal (GRAFLON HY-22)

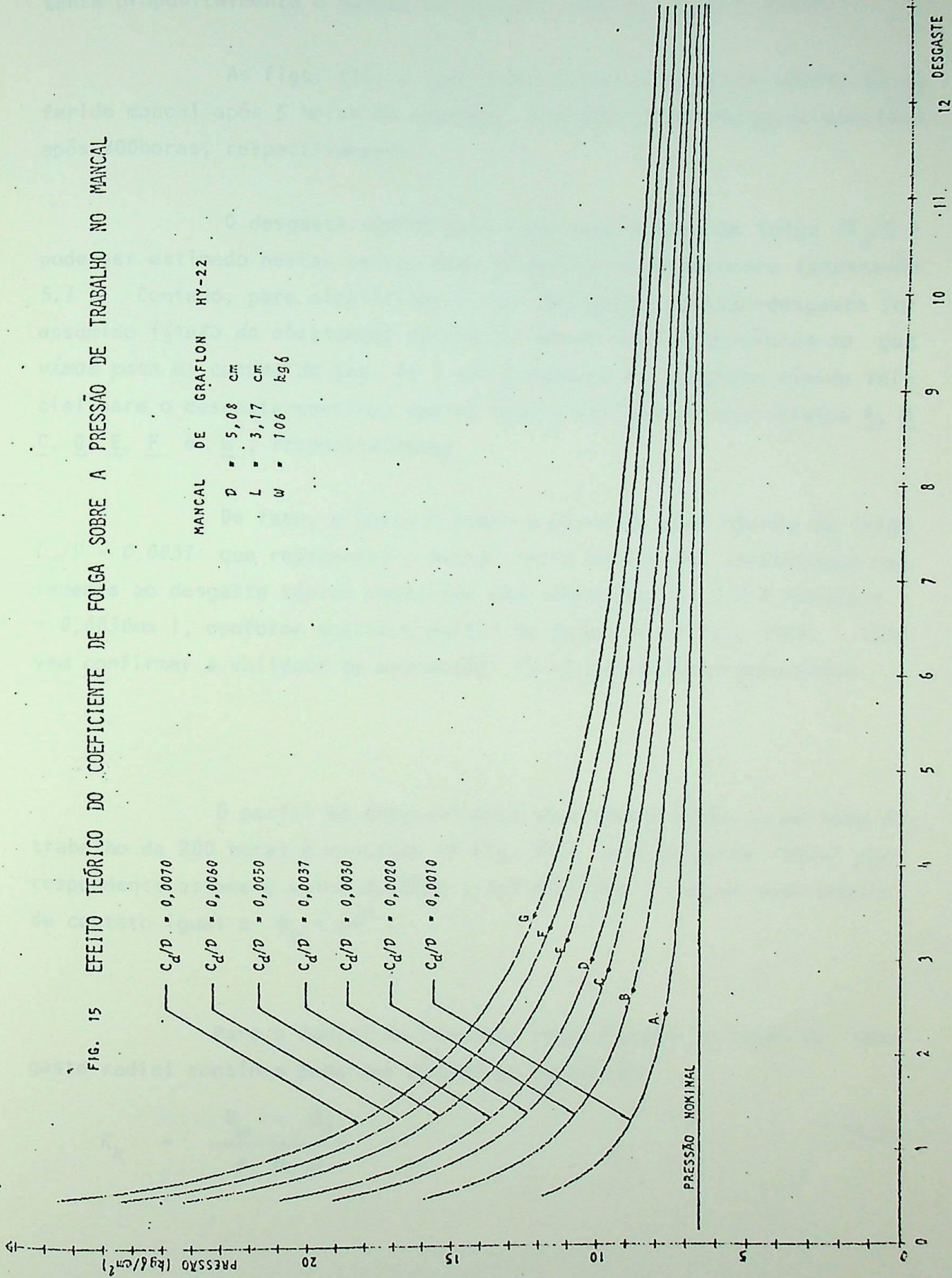
$$E_b = 1,188 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$$

Módulo de Young do material do munhão (AÇO)

$$E_j = 2,109 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$$

As curvas teóricas de pressão-desgaste radial computadas da expressão (5.1) para diferentes coeficientes de folga (C_d/D) são apresentadas na fig. (15) e toda a programação é apresentada no APÊNDICE (H). Note-se que dentre essa "família" de curvas uma repre

FIG. 15 EFEITO TEÓRICO DO COEFICIENTE DE FOLGA SOBRE A PRESSÃO DE TRABALHO NO MANCAL



senta propositalmente o mancal em apreço, isto é, $C_d/D = 0,0037$.

As figs. (16) e (17) apresentam o desgaste rápido do referido mancal após 5 horas de operação e o perfil de desgaste-contínuo após 200 horas, respectivamente.

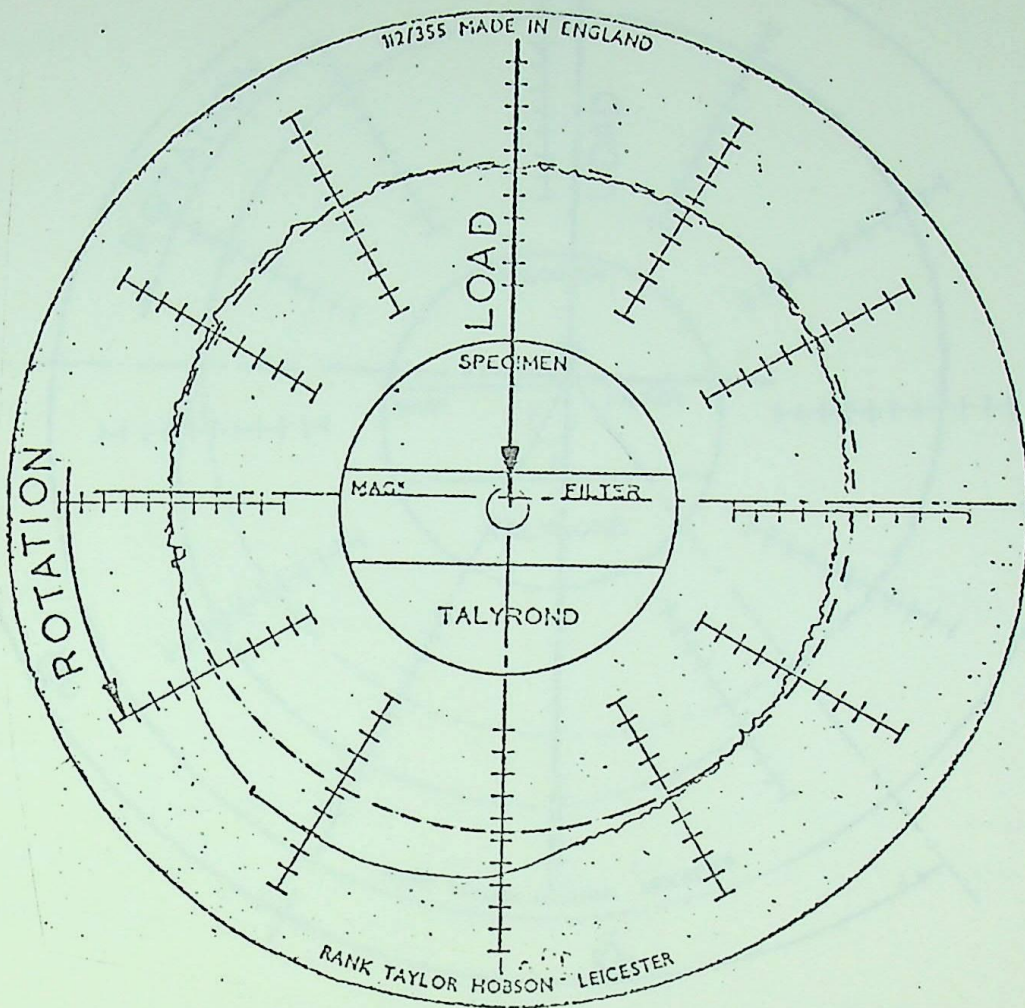
O desgaste rápido para cada coeficiente de folga (C_d/D) pode ser estimado nestas curvas como discutido anteriormente (expressão 5.7). Contudo, para simplificar o uso das curvas pressão-desgaste foi assumido (fruto da observação direta às curvas e em consonância ao que vimos para as curvas da fig. 14) que a mudança do desgaste rápido inicial para o desgaste-contínuo radial ocorre nos pontos assinalados A, B, C, D, E, F e G, respectivamente.

De fato, o ponto D sobre a curva de coeficiente de folga $C_d/D = 0,0037$ que representa o mancal-teste em estudo, corresponde exatamente ao desgaste rápido observado experimentalmente (2,4 divisões = 0,0030mm), conforme mostra o perfil de desgaste da fig. (16). Isto vem confirmar a validade da expressão (5.1) deduzida anteriormente.

O perfil de desgaste para este mancal após um período de trabalho de 200 horas é mostrado na fig. (17) e o desgaste radial correspondente assume o valor 0,089mm (3,5 divisões) com um semi-ângulo de contato igual a $\Phi_c = 64^\circ$.

Para o mancal da presente investigação, o fator de desgaste radial contínuo pode ser obtido da expressão:

$$K_{\mathcal{H}} = \frac{R_w - \delta_{\mathcal{H}}}{P \cdot V \cdot H} \quad (6.2)$$



(ref: 5)

ESCALA : 0,0005 pol./divisão ou 0,0127 mm/divisão

MANCAL DE GRAFLON HY-22

$$D = 5,08 \text{ cm}$$

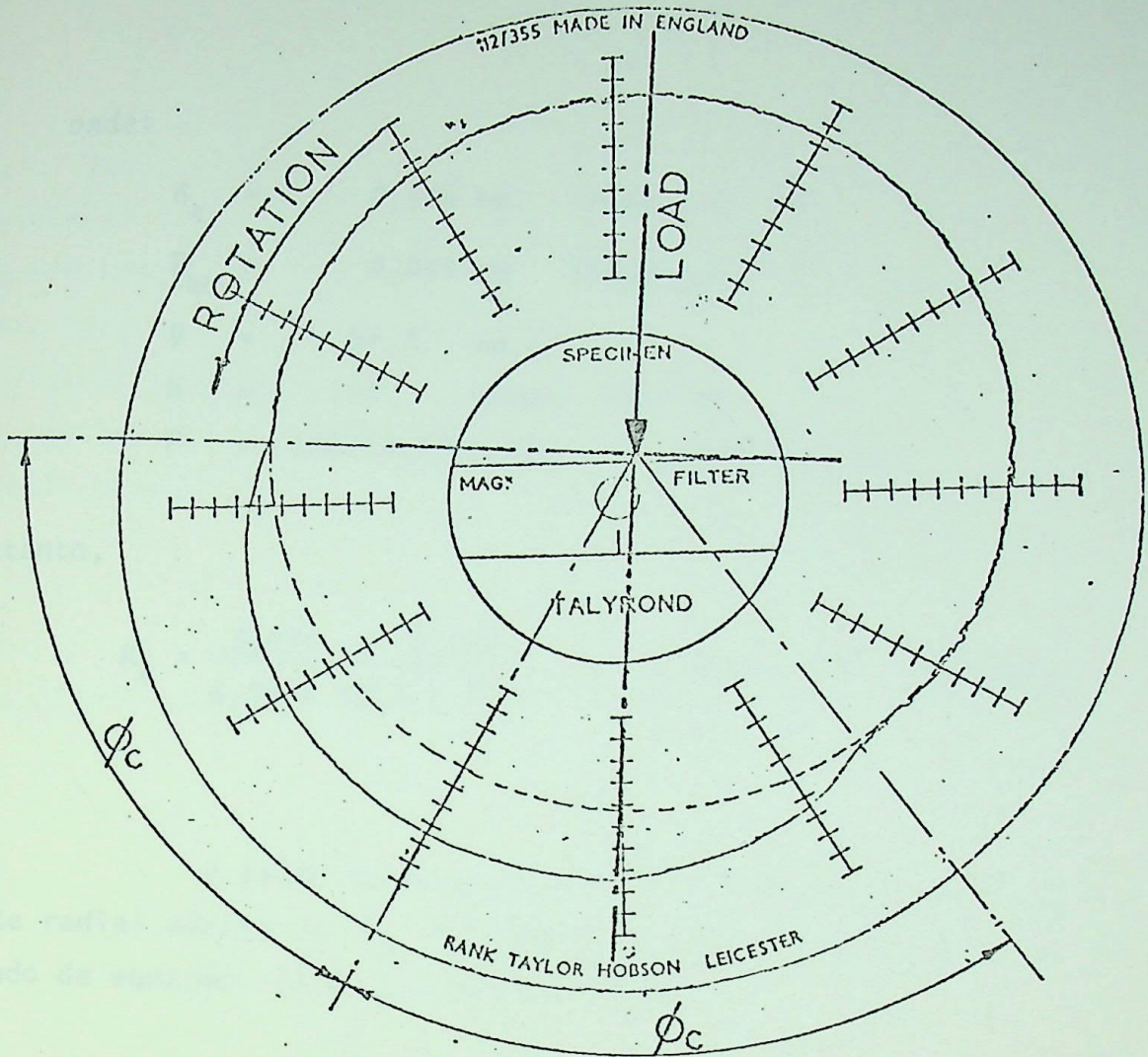
$$L = 3,17 \text{ cm}$$

$$C_d = 0,019 \text{ cm}$$

$$W = 106 \text{ kgf}$$

$$P.V = 357 \text{ kgf/cm}^2 \times \text{cm/s}$$

FIG. 16 - DESGASTE INICIAL RÁPIDO NO MANCAL DE GRAFLON HY-22
após 5 horas de operação.



(ref: 5)

ESCALA : 0,001 pol./divisão ou 0,0254 mm/divisão

MANCAL DE GRAFLON HY-22

D	=	5,08	cm
L	=	3,17	cm
C_d	=	0,019	cm
W	=	106	kgf
$P.V$	=	357	kgf/cm ² x cm/s
ϕ_c	=	64°	

FIG. 17 - PERFIL DE DESGASTE NO MANCAL DE GRAFLON HY-22 após 200 horas de operação.

onde:

$$\delta_h = 0,030 \text{ mm (vide fig. 16)}$$

$$R_w = 0,089 \text{ mm (vide fig. 17)}$$

$$V = 54,3 \text{ cm/s}$$

$$H = 195 \text{ horas (200-5)}$$

$$P = 106 / (3,17 \times 5,08) = 6,58 \text{ kgf/cm}^2$$

Portanto,

$$K_h = \frac{0,089 - 0,030}{6,58 \times 54,3 \times 195} = 8,468 \times 10^{-7} \text{ mm/PVH}$$

O tempo de desgaste necessário teoricamente, para um desgaste radial máximo de $R_w = 0,125 \text{ mm}$ para cada uma dessas buchas foi calculado da equação (6.2) e tabelado abaixo:

C_d/D	δ_h (mm) vide fig. 15	$(0,125 - \delta_h)$ (mm)	P_e (kgf/cm ²) vide fig. 15	HORAS PARA FALHA baseado no K_h
0,0010	0,024	0,101	7,7	285
0,0020	0,027	0,098	8,8	242
0,0030	0,029	0,096	9,6	217
0,0037	0,030	0,095	10,0	206
0,0050	0,032	0,093	11,0	184
0,0060	0,034	0,091	11,5	172
0,0070	0,035	0,090	12,0	163

Poderia ser argumentado que a vida do mancal deveria ser maior quanto menor fossem os coeficientes de folga (C_d/D). Porém, a evidência experimental disponível nos afirma que a vida de um mancal seco é afeta não só ao coeficiente de folga como também a inúmeros outros fatores negativos: podemos citar a questão de que os materiais auto-lubrificantes apresentam baixa condutividade térmica, dificultando o escoamento do calor gerado pelo atrito e consequentemente causando uma grande expansão térmica. Logo, uma pequena folga seria problemática.

O uso das curvas de pressão-desgaste nos fornecem *valores ótimos* para a vida do mancal.

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O presente trabalho de tese teve como objetivo a crescentar alguns subsídios a todos aqueles que estão enfronhados na fascinante arte de projetar. Despertou nosso interesse pela problemática de lubrificação, a escassa literatura existente sobre o assunto.

Como a presente pesquisa destina-se não só aqueles que pretendam se aprofundar no estudo da lubrificação, mas também, aos engenheiros e estudantes de Engenharia, procuramos apresentá-la de maneira bem didática e acessível mesmo ao leigo no assunto, trazendo à bibliografia nacional alguma contribuição.

Inicialmente estudamos o comportamento dos materiais auto-lubrificantes, suas vantagens e desvantagens, seus mecanismos de atrito e desgaste e suas aplicações, fazendo-se uma revisão dos principais materiais auto-lubrificantes atualmente usados. Em seguida, fizemos uma introdução aos tipos de desgaste das superfícies atritantes mostrando a importância relativa da forma de desgaste para o projeto de um sistema de mancal seco com material auto-lubrificante. Isto apresentado, iniciamos o estudo teórico para a determinação da pressão de trabalho que efetivamente ocorre nos mancais secos, levando-se em conta os aspectos geométricos e os efeitos de deformação e desgaste do sistema.

Após um extenso desenvolvimento matemático chegamos a uma expressão geral (eq. 5.1) que reúne todos esses efeitos possibilitando a determinação da pressão de trabalho em mancais secos com materiais auto-lubrificantes:

$$P_e = \frac{W}{2 \cdot L \cdot R_j \cdot \sin \Phi_c} \quad (5.1)$$

Com a ajuda de computador através de seu "plotter" traçamos as curvas pressão de trabalho vs. desgaste radial do mancal e, de posse destas curvas analisamos e concluimos ser a expressão razoavelmente correta e geral. Esta expressão vem substituir $P = W / (LD)$ que só é válida quando o ângulo de contato torna-se igual a 180° .

Isto posto, prosseguimos a pesquisa no sentido de desenvolver um processo gráfico-analítico para estimar a vida útil de um mancal, levando-se em consideração o efeito do coeficiente de folga C_d/D do sistema de mancal seco, disto obtendo um método, tal como mostrado pelas curvas da fig. (15).

Diante destes desenvolvimentos teóricos partimos, para a comprovação experimental utilizando informações e ensaios realizados por outros pesquisadores neste campo. Confrontando as observações empíricas com as expressões por nós desenvolvidas chegamos a comprovação experimental das mesmas.

Convém salientar que as equações (4.10), (4.13) e (4.17) são derivadas da geometria de desgaste do mancal sem nenhuma suposição concernente às propriedades de deformação do sistema. As possíveis restrições a esta análise surgiriam devido a omissão dos fatores (f) e (g) declarados no cap. IV e que seriam necessários para uma estimativa real da distribuição de pressão de trabalho.

Também, materiais polímeros empregados em mancais são viscoelásticos por natureza. Então, a geometria e a extensão do contorno de desgaste seria apreciavelmente afetada pelo tempo de carregamento (CREEP) afetando conseqüentemente a distribuição de pressão (vide o apêndice F).

Geralmente, mancais secos são apropriados para altas cargas e baixas velocidades ocasionando deformações altas nas zonas carregadas. Estas cargas exercerão considerável influência na área de contato com o tempo de carregamento. Seria necessário conhecer as propriedades de CREEP do material do mancal a fim de se estimar corretamente a área de contato de desgaste e daí a pressão de trabalho no mancal.

Com o aumento da temperatura, devido ao aquecimento gerado pelo atrito, as propriedades mecânicas dos polímeros mudam como mostrado nas figs. (19) e (20) (vide apêndice F) para NYLON e PTFE respectivamente. Então, a inclusão da temperatura é também importante para a estimativa da pressão de trabalho no mancal, o que influenciará a área de contato no mancal seco. Mas, tal estudo requeriria um cômputo matemático extenso que certamente está além do escopo da presente investigação.

Apesar da importância do efeito da temperatura, não existe método detalhado para obter uma estimativa fidedigna da variação da folga com a temperatura e desgaste sob todas as possíveis condições. Tentativas foram feitas por alguns investigadores (REF: 11 e 14) para oferecer determinação teórica da variação de folga com temperatura. Contudo, foi mostrado no apêndice B que a equação (5.1) é insensível à variação de folga com a temperatura pois este efeito é inerente à expressão.

CONTENTAMO-NOS apenas em citar estes aspectos por considerá-los pouco significativos, dando ênfase as variáveis mais influentes. É deixado à disposição de novos pesquisadores um estudo mais aprofundado do assunto.

EM SUMA, diante do que relatamos podemos:

1.- Explicar o processo de funcionamento do mancal — mostrado no capítulo V ;

2.- Negligenciar, com grande margem de segurança, o efeito da variação da folga com a temperatura que é de fato inerente à expressão: $\cos \Phi_c \approx C_h / (C_h + R_w)$ — conforme explicado no apêndice B ;

3.- Predizer teoricamente o efeito da folga do mancal na vida útil do mesmo — mostrado no capítulo VI — e pré-estabelecer valores ótimos de C_d/D ;

4.- Predizer a vida útil de mancais, a grandeza do ângulo de contato e a profundidade do desgaste rápido inicial — como discutido no capítulo V.

B I B L I O G R A F I A

- (01) CAMERON, A. - The Principles of Lubrication , Longmans Green Co. Ltd., London, 1966.
- (02) FREEMAN, P. - Lubrication and Friction , Sir Isaac Pitmann, Sons Ltd., London, 1962.
- (03) RABINOWICZ, E. - Friction and Wear of Materials , John Wiley and Sons, Inc., New York, 1965.
- (04) CLAUSS, F.J. - Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids , Academic Press, Inc., London, 1972.
- (05) MALIK, R. A. & FREEMAN, P., The Wear Performance Limitations of the PV-Criterion for Self-lubricating Sleeve Bearings , First World Conference in Industrial Tribology, New Delhi, 1972.
- (06) PIRES E ALBUQUERQUE, O. A. L. - Lubrificação , Ed. McGrawHill do Brasil Ltda., 1973.
- (07) MOURA, C.R.S. & CARRETEIRO, R.P. - Lubrificantes e Lubrificação Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio, 1975.
- (08) BOWDEN, F.P. & TABOR, D. - The Friction and Lubrication of solids , 2nd edn., Oxford University Press, 1954.
- (09) GRADSHTEYN, I.S. & RYZHIK, I.M. - Table of Integral Series and Products Academic Press, New York , 1965 (p.158).
- (10) HILTON, H.H. - Viscoelastic Analysis , Engineering Design for Plastics, Ed. by E. Baer Reinhold Pub. Corp., Ch 4, 1964.



- (11) BRAND, R.S. & DAVIS, W. - Determining Clearances for Non-metallic Journal Bearings, Mach. Design, 27, 199-201 , 1955.
- (12) THORKILDSEN, R.L. - Mechanical Behaviour , Ch. 5, Engineering Design for Plastics, Ed. by E. Baer Reinhold Pub. Corp., 1964.
- (13) GILTROW, J.P. & LANCASTER, J.K. - Carbon Fibre Reinforced Polymer as Self-lubricating Materials , Proc. I. Mech. E (London), Trib. Conv., 147-157, 1968.
- (14) BURTON, R.A. - Thermal Aspects of Bearing Seizure Wear, n° 8 , pg. 157-172 , 1965.
- (15) BENNET, S. - The Performance of Dry Bearings in Air and High Vacuum , Ph.D Thesis, University of Sheffield, 1970, pg. 175.
- (16) MITCHELL, D.C. - The Wear of PTFE Impregnated Metal Bearings Materials , Proc. Conf. Lubn. and Wear, I. Mech. E (London), 396-404.
- (17) KAY, E. & TINGLE, E.D. - The Use of Polytetrafluorethylene as a Lubricant , Brit. J. Appl. Phys. 9, 17-25 , 1958.
- (18) FORT, T. Jr. - Absorption and Boundary Friction on Polymers Surfaces , J.Phys. Chem. 66, 1136-1143 , 1962.
- (19) LEWIS, R.B. - Predicting the Wear of Sliding Plastic Surfaces Mech. Eng. 86, 32-35, fig. 3 , 1964.
- (20) PINCHBECK, P.H. - A Review of Plastics Bearings, Wear, 5 , 1962 pg. 85-113 .
- (21) ROWE, G.W. - Plastic , Wear , 3, 274-285 , 1960.

- (22) KING, R.F. & TABOR, D. - The Effect of Temperature on the Mechanical Properties and the Friction of Plastics , Proc. Phys. Soc. London, pg. 728-736 , fig. 3 , 1953.
- (23) DEACON, R.F. & GOODMAN, J.F. - Proc. Roy. Soc. Ser. A. 243 , pg. 464-482 , 1958.
- (24) CONWAY-JONES, J.M. - Dry and Plastics Bearings Glacier Metal Co. Ltd., Alpertton, pg.2 , 1969.
- (25) NEAL, M.J. - Dry Bearings and Materials, Designer's Handbook n° 2 , Glacier Metal Co. Ltd., London
- (26) OGORKIEWICZ, R.M. - Engineering Properties of Thermoplastics Wiley, New York, 1964
- (27) ASLE - American Society of Lubrication Engineers
Friction and Wear Devices - 2a. ed , 1976
- (28) "DU" DRY BEARINGS , Designers' Handbook, n° 2, 1a.Ed.
Glacier Metal Co. Ltd., London

APÊNDICE A

INTEGRAÇÃO (conforme ref. 9)

$$\begin{aligned} \int (1-k^2 \cdot \text{sen}^2 x)^{1/2} \cdot \cos x \, dx &= \\ &= \frac{(1-k^2 \cdot \text{sen}^2 x)^{1/2} \cdot \text{sen} x}{2} + \frac{1}{2k} \cdot \text{arc sen } (k \cdot \text{sen} x) \end{aligned}$$

e,

$$\begin{aligned} \int (1-k^2 \cdot \text{sen}^2 x)^{1/2} \cdot \text{sen} x \, dx &= \\ &= \frac{-(1-k^2 \cdot \text{sen}^2 x)^{1/2} \cdot \cos x}{2} - \frac{(1-k^2)}{2k} \ln \{ k \cdot \cos x + (1-k^2 \cdot \text{sen}^2 x)^{1/2} \} \end{aligned}$$

APÊNDICE B

EFEITO DA VARIAÇÃO DE FOLGA COM A TEMPERATURA SOBRE A PRESSÃO DE TRABALHO EM MANCAL .

Na expressão (5.1), deduzida anteriormente, a folga inicial do mancal pode ser usada em vez da folga de operação do mancal sem que sejam cometidos grandes erros nos valores computados de P_e ou $\cos \Phi_c$ como mostra-se abaixo. A pressão de trabalho é dada pela expressão:

$$P_e = \frac{W}{2.L.R_j \cdot \sin \Phi_c} \quad (5.1)$$

onde,

$$\Phi_c = \cos^{-1} \left(\frac{C_h}{C_h + R_w} \right) \quad \text{vide eq. (4.3)}$$

Seja δC_h a variação na folga inicial C_h com a temperatura; então, o correspondente valor de $\cos \Phi_c$ e $\cos \Phi_c^*$, é aproximadamente igual:

$$\begin{aligned} \cos \Phi_c^* &= \frac{(C_h + \delta C_h)}{(C_h + \delta C_h) + R_w} = \frac{C_h (1 + \delta C_h / C_h)}{(C_h + R_w) (1 + (\delta C_h / C_h + R_w))} = \\ &= \cos \Phi_c \left(1 + \frac{\delta C_h}{C_h} \right) \cdot \left\{ 1 + \frac{\delta C_h}{C_h + R_w} \right\}^{-1} = \\ &= \cos \Phi_c \left(1 + \frac{\delta C_h}{C_h} - \frac{\delta C_h}{C_h + R_w} \right) \approx \cos \Phi_c \end{aligned}$$

(Porque para todos os fins práticos o produto de R_w e δC_h pode ser desprezado) .

A P Ê N D I C E C

TEORIA DA ADERÊNCIA POR ATRITO

A teoria da aderência por atrito originalmente foi aplicada aos metais por BOWDEN & TABOR (ref: 8). Baseia-se primariamente no aspecto de que o processo de deslizamento envolve o cisalhamento de juntas formadas pela forte adesão das regiões de contato presentes. Pode-se expressar isso quantitativamente do seguinte modo: quando um material "duro" desliza sobre um outro mais "mole" sob uma carga W e área de contato A, podemos escrever,

$$W = A \cdot \sigma_p$$

onde: σ_p é a chamada "pressão efetiva de de
formação" do material mais "mole" dur
ante o deslizamento.

Sobre esta área de contato íntimo, formam-se v
rias junções de resistência ao cisalhamento específico " τ " comparável com aquele do material mais "mole" propriamente.

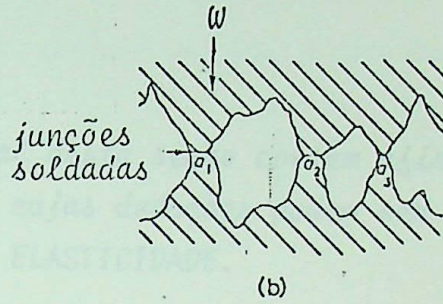
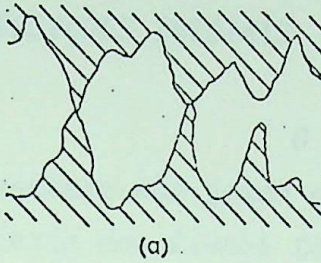
A força para resistir ao cisalhamento destas v
rias junções, que é considerada como a resistência de atrito observado é,

$$F = A \cdot \tau$$

É, contudo, possível, como uma primeira aproximação, expressar o atrito em termos da pressão efetiva de deformação e resistência ao cisalhamento específico dos materiais deslizantes.

Portanto,

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{A \cdot \tau}{A \cdot \sigma_p} = \frac{\tau}{\sigma_p}$$



- (a) Somente um pouco de altas asperidades constitui o contato íntimo;
 (b) Assim que a carga (W) é aplicada, formam-se junções metal-metal de áreas a_1 , a_2 , a_3 ; etc por um processo de "mício-soldas".

A área REAL de contato íntimo é proporcional a carga. A área real A é a somatória das áreas a_i .

APÊNDICE D

EQUAÇÕES DE HERTZ

(ref. 1)

a) SUPOSIÇÕES INICIAIS

O ponto inicial desta seção contém afirmações que simplesmente não foram provadas mas cujas deduções podem ser encontradas na maioria dos livros textos sobre ELASTICIDADE.

Considere a deflexão δ em um ponto (x, y) devida a carga pontual $\underline{W}$ aplicada em (x_1, y_1) , sendo R a distância entre (x, y) e (x_1, y_1) . Esta deflexão δ é,

$$\delta = \frac{1 - \nu^2}{\pi \cdot E} \cdot \frac{dW}{r}$$

onde,

ν = coef. de Poisson

E = módulo de Young

Se em lugar de uma carga pontual $\underline{W}$ houver uma pressão distribuída sobre a área, então, em qualquer ponto, $\delta = p \cdot dx_1 \cdot dy_1$. A deflexão total em (x, y) devida a pressão é agora a integral sobre o campo de pressão,

$$\delta = \frac{1 - \nu^2}{\pi \cdot E} \iint \frac{p \, dx_1 \cdot dy_1}{r} \quad (1)$$

Será suposto e provado a posteriori que a distribuição da pressão produzida pelo contato de dois corpos curvados deve

ser semi-elíptica, i. é, no caso de uma zona de contato circular de ra io a e origem no centro, qualquer ponto a uma distância radial r tem uma pressão de:

$$p = P_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2}$$

Também para um contato de faixa com largura de 2a vale,

$$p = P_{\max} \left(1 - x^2/a^2 \right)^{1/2}$$

b) CONTATO LINEAR

Se dois cilindros estão em contato, a pressão se distribui sobre um retângulo de lados $x = \pm a$ e $y = \pm b$. O deslocamento em um ponto (x, y) devido à carga $(p \cdot dx_1 \cdot dy_1)$ em (x_1, y_1) é,

$$\delta = \frac{1 - \nu^2}{\pi E} \int_{-b}^{+b} \int_{-a}^{+a} \frac{p \, dx_1 \, dy_1}{R}$$

onde R é a distância entre (x_1, y_1) e (x, y) . Para cilindros a pressão não varia com y ; na verdade a extensão na direção y é infinita. Pode-se considerar o deslocamento em $y = 0$, então:

$$R = \{(x - x_1)^2 + y_1^2\}^{1/2} = \{(\rho^2 + y_1^2)\}^{1/2}$$

Considere a integral :

$$\int_{-b}^{+b} \frac{p \cdot dy_1}{\{\rho^2 + y_1^2\}^{1/2}}$$

Agora p é uma função de y pois a integral é simétrica em relação a $y=0$ e pode-se escrever:

$$2 \int_0^b \frac{p \cdot dy_1}{(\rho^2 + y_1^2)^{1/2}} = 2 \cdot p \left| \ln y_1 + \{(\rho^2 + y_1^2)\}^{1/2} \right|_0^b =$$

$$= 2 \cdot p \cdot \ln \left\{ \frac{b + \{(\rho^2 + b^2)\}^{1/2}}{\rho} \right\}$$

Se $b \gg \rho$, ρ^2 pode ser desprezado com respeito a b^2 , resultando,

$$2p (\ln 2b/\rho) = 2p \cdot \ln 2b - 2p \cdot \ln \rho$$

A deflexão $\bar{e}$ então:

$$\delta = \frac{1 - \nu^2}{\pi E} 2 \int_{-a}^{+a} (p \cdot \ln 2b - p \cdot \ln \rho) dx_1 =$$

$$= \frac{1 - \nu^2}{\pi E} \left(\frac{2 \cdot W}{L} \cdot \ln 2b - 2 \int_{-a}^{+a} p \cdot \ln \rho dx_1 \right)$$

onde W/L = carga por unidade de comprimento = $\int_{-a}^{+a} p \cdot dx_1$.

Quando $b \rightarrow \infty$ o primeiro termo do parênteses fornece um deslocamento infinito e constante. Isto é ignorado, pois tudo que é necessário é a diferença de deflexões, e portanto, o termo constante. Reciprocamente o infinito pode ser pensado como sendo similar à deflexão infinita prevista por uma carga finita sobre um barbante elástico infinitamente comprido, e neste caso, o elástico médio é equivalente ao barbante infinito. A deflexão é então:

$$\delta = - \frac{1 - \nu^2}{\pi E} 2 \int_{-a}^{+a} p \cdot \ln(x - x_1) dx_1$$

onde, $p = p_{\max} (1 - x_1^2/a^2)^{1/2}$

é esta equação que precisa de solução.

Fazendo-se $x_1 = a \cdot \cos\theta$, tal que $p = p_{\max} \cdot \sin\theta$ e $dx_1 = -a \sin\theta d\theta$ e invertendo-se a ordem de integração de $\underline{0}$ para $\underline{\pi}$, isto é, de $\underline{a}$ para $\underline{-a}$. Então,

$$\delta = - \frac{1 - \nu^2}{\pi E} 2 p_{\max} \cdot a \int_0^\pi \sin^2\theta \ln (x - a \cos\theta) d\theta$$

Esta equação fornece a deflexão em x devido a uma pressão distribuída semi-elíptica sobre a faixa $\pm a$.

A integral tem uma singularidade quando $x = x_1$ ($= a \cdot \cos\theta$) e esta dificuldade pode ser evitada escrevendo x como um número complexo z , onde $z = x + i\xi$. A finalidade de fazer isto é, como foi, resguardar x durante a integração, levando-o da linha de x_1 para o plano complexo. Após ter acabado a integral para o caso geral do número complexo $z = x + i\xi$, ξ pode tornar-se zero novamente de forma que $z = x$ (real), onde x pode ser tanto maior quanto menor que $\underline{a}$. A largura da faixa, i. é, x pode ser posto tanto dentro como fora da área de contato. A integral agora necessária é,

$$\int_0^\pi \ln (z - a \cdot \cos\theta) \sin^2\theta d\theta$$

que será escrita I e deve ser avaliada para o caso onde x está dentro da área de contato $z = x < a$, tal que:

$$\delta = \frac{1 - \nu^2}{\pi E} p_{\max} \cdot 2a \cdot I$$

com I avaliada para os dois casos de $x \gg a$ e $x \ll a$. Antes de tudo a integral I será reescrita, fazendo $z = B(1 + \alpha^2)$ e $a = 2B\alpha$ onde B é uma constante a ser calculada. A integral I torna-se:

$$\frac{1}{2} \int_0^\pi \ln B(1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos \theta) (1 - \cos 2\theta) d\theta$$

A primeira integral é simplesmente $\pi/2 \cdot \ln(B)$ e a segunda exige um estudo mais aprofundado.

Pode-se demonstrar, fazendo,

$$\cos \theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2}$$

e fatorando por desenvolvimento direto, que:

$$\ln(1 - 2\alpha \cos \theta + \alpha^2) = -2\alpha \cos \theta - \frac{2\alpha^2}{2} \cos 2\theta - \frac{2\alpha^3}{3} \cos 3\theta - \dots$$

que converge para $\alpha < 1$. Além disso, sabe-se da teoria de Fourier, o seguinte resultado:

$$\begin{aligned} \int_0^\pi \cos m\theta \cos n\theta d\theta &= 0 && \text{se } m \neq n \\ &= \pi/2 && \text{se } m = n \end{aligned}$$

Portanto,

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int_0^\pi (-2\alpha \cos \theta - \frac{2\alpha^2}{2} \cos 2\theta - \frac{2\alpha^3}{3} \cos 3\theta - \dots) (1 - \cos 2\theta) d\theta \\ = \alpha^2 \cdot \pi/4 \end{aligned}$$

logo,

$$I = \frac{\pi}{2} \left(\ln B + \frac{\alpha^2}{2} \right)$$

Sabe-se agora a deflexão em termos de z :

$$\delta = - \frac{1 - \nu^2}{\pi E} \pi a \left(\ln B + \frac{\alpha^2}{2} \right) P_{\max}$$

Tudo que resta fazer é considerar $\xi = 0$ para que o número complexo $z = x + i\xi$ torne-se simplesmente $z = x$, i. e., real e então fazer $x \leq a$ ou $x \geq a$.

Primeiro, B e α devem ser encontrados pelas substituições iniciais (eq.: $a = 2B\alpha$ e $z = B(1 + \alpha^2)$).

Se as duas relações são comparadas,

$$B = \frac{z}{1 + \alpha^2} = \frac{a}{2\alpha}$$

temos,

$$\alpha^2 - 2z\alpha/a + 1 = 0 \quad \text{e,} \quad \alpha = z/a \pm \left\{ \left(\frac{z^2}{a^2} - 1 \right) \right\}^{1/2}$$

Considere a deflexão dentro da zona de contato. A solução geralmente encontrada é:

$$\delta = - \frac{1 - \nu^2}{\pi E} 2 p_{\max} \cdot a I$$

com,

$$I = \frac{\pi}{2} \left(\ln B + \frac{\alpha^2}{2} \right) \quad \text{e} \quad \alpha = \frac{x}{a} \pm \left\{ (x^2/a^2 - 1) \right\}^{1/2}$$

como,

$$\frac{x}{a} \leq 1$$

então,

$$\alpha = \frac{x}{a} \pm i(1 - x^2/a^2)^{1/2}$$

e,

$$B = \frac{a}{2\alpha} = \frac{a}{2} \cdot \left\{ \frac{x}{a} \pm i(1 - x^2/a^2)^{1/2} \right\}^{-1/2}$$

vem,

$$\ln B = \ln \frac{a}{2} + \ln \left\{ \frac{x}{a} \pm i(1 - x^2/a^2)^{1/2} \right\}$$

Portanto precisa-se da parte real da integral 1, i. é, da parte real de $\ln B$ e de α^2 .

Ora, $\operatorname{tg}^{-1} \phi = \frac{i}{2} \ln \left(\frac{1 - i\phi}{1 + i\phi} \right)$ e a substituição de direção mostra que,

$$\begin{aligned} \ln \left\{ \frac{x}{a} \pm i(1 - x^2/a^2)^{1/2} \right\} &= \\ &= \pm i \operatorname{tg}^{-1} \frac{(1 - x^2/a^2)^{1/2}}{x/a} \end{aligned}$$

Portanto,

$$\ln B = \ln \frac{a}{2} \pm i \cdot \operatorname{tg}^{-1} \frac{(1 - x^2/a^2)^{1/2}}{x/a}$$

e a parte real de $\ln B$ é $\ln (a/2)$.

$$\text{De,} \quad \alpha = \frac{x}{a} \pm (x^2/a^2 - 1)^{1/2} \quad \text{vem,}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha^2 &= \left\{ \frac{x}{a} \pm i(1 - x^2/a^2)^{1/2} \right\}^2 = \\
 &= \frac{x^2}{a^2} \pm 2i \frac{x}{a} \{(x^2/a^2 - 1) - (1 - x^2/a^2)\}^{1/2} = \\
 &= \frac{2x^2}{a^2} - 1 \pm \frac{2ix}{a} (x^2/a^2 - 1)^{1/2}
 \end{aligned}$$

então, a parte real de $\alpha^2 \bar{e}$: $\frac{2x^2}{a^2} - 1$

A parte real de $(\pi/2) (\ln B + \alpha^2/2) \bar{e}$ é portanto:

$$\frac{\pi}{2} \left(\ln \frac{a}{2} + \frac{x^2}{a^2} - \frac{1}{2} \right)$$

que é a integral I que se precisa, e como:

$$\delta = - \frac{1 - \nu^2}{\pi E} \cdot 2 P_{\max} \cdot a I$$

a deflexão dentro da zona de contato é,

$$\delta = - \frac{1 - \nu^2}{\pi E} a P_m \cdot (x^2/a^2 + \ln a/2 - 1/2)$$

Esta é a deflexão dentro da zona de pressão distribuída sobre a superfície de um plano (de raio infinito de curvatura). A suposição feita é que se esta pressão fosse aplicada em uma superfície "curvada" as mesmas deflexões ocorreriam.

Se considerarmos superfícies de um mancal que tenha raios de curvatura R_b e R_j e constantes elásticas ν_j, ν_b ; E_j e E_b e, antes que fossem submetidas a carga estas superfícies apenas se tocariam em $x = 0$. A folga entre elas em $x = \pm a$ seria:

$$\frac{a^2}{2} (1/R_j - 1/R_b) = a^2/2R \quad \text{onde, } 1/R = 1/R_j - 1/R_b$$

Se as superfícies agora carregam-se juntas tal que a zona de contato estende-se até $x = \pm a$, a distribuição de pressão é obviamente:

$$p = p_{\max} (1 - x^2/a^2)^{1/2}$$

e em todo ponto $|x| \leq a$ a pressão é a mesma para ambas as superfícies.

Até aqui consideramos apenas uma superfície mas para ambas a deflexão total é simplesmente:

$$\delta_j + \delta_b = - \left(\frac{1 - \nu_j^2}{E_j} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right) a \cdot p_{\max} \cdot \left(\frac{x^2}{a^2} + \ln \frac{a}{2} - \frac{1}{2} \right)$$

e de modo análogo para a região $x > a$. Assim, o movimento entre $x = 0$ e $x = a$ é:

$$\left(\frac{1 - \nu_j^2}{E_j} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right) a \cdot p_{\max}$$

e isto deve ser igual a $\left(\frac{a^2}{2R} \right)$. Portanto:

$$\frac{a^2}{2R} = \left(\frac{1 - \nu_j^2}{E_j} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right) a \cdot p_{\max}$$

A carga por unidade de comprimento W/L pode ser calculada por simples integração como:

$$\frac{W}{L} = \int_{-a}^{+a} p \cdot dx = p_{\max} \cdot \int_{-a}^{+a} \left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right)^{1/2} dx = \frac{\pi}{2} \cdot p_{\max} \cdot a$$

tal que,

$$p_{\max} \cdot a = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{W}{L}$$

ou, genericamente:

$$P = \frac{2 W}{\pi L} (1 - x^2/a^2)^{1/2}$$

vem,

$$\frac{a^2}{2R} = \left(\frac{1 - \nu_j^2}{E_j} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right) \cdot \frac{2 W}{\pi L}$$

que resulta,

$$a = \left\{ \left(\frac{1 - \nu_j^2}{E_j} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right) \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{W R}{L} \right\}^{1/2}$$

ou,

$$a = \left(\frac{W}{L} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \right)^{1/2} \cdot (R)^{1/2} \cdot \left(\frac{1 - \nu_j^2}{E_j} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right)^{1/2}$$

ou ainda,

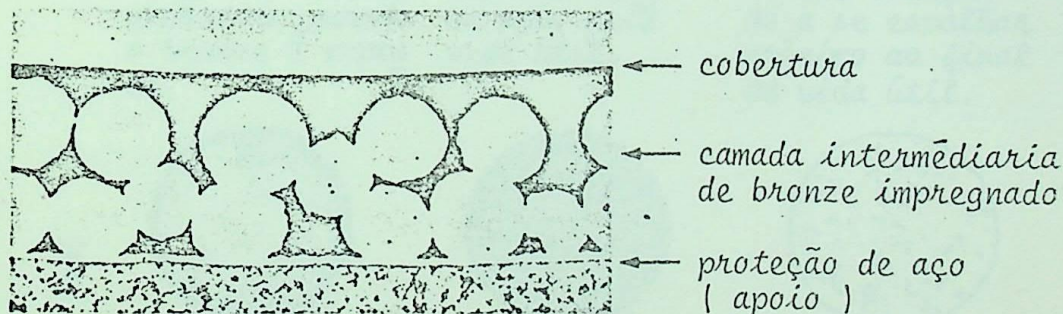
$$a = \left(\frac{W}{L} \right)^{1/2} \cdot 0,8 \cdot \left\{ \frac{2 R_j \cdot R_b}{R_b - R_j} \left(\frac{1 - \nu_j^2}{E_j} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right) \right\}^{1/2}$$

A P Ê N D I C E E

MATERIAL "DU"

Este material do tipo P.T.F.E. (politetrafluoretileno) e chumbo, impregnados de bronze sinterizado, é por si só soldável à proteção de aço. Há uma fina camada adicional de P.T.F.E. (Teflon) aderente à superfície do mancal, como mostra a figura abaixo.

Este material pode operar sem lubrificante sob variação muito grande de temperatura (-200°C a $+280^{\circ}\text{C}$) proporcionando uma vida longa e baixo coeficiente de atrito. O material "DU" resiste à maioria dos solventes, líquidos e gases industriais, inclusive óleo e água; não apresenta "emperramento"; trabalha suave e tranquilamente; tolera ambiente poeirento e é igualmente adaptado para aplicações de rotação, oscilação, deslizamento ou movimento de vai-vém.



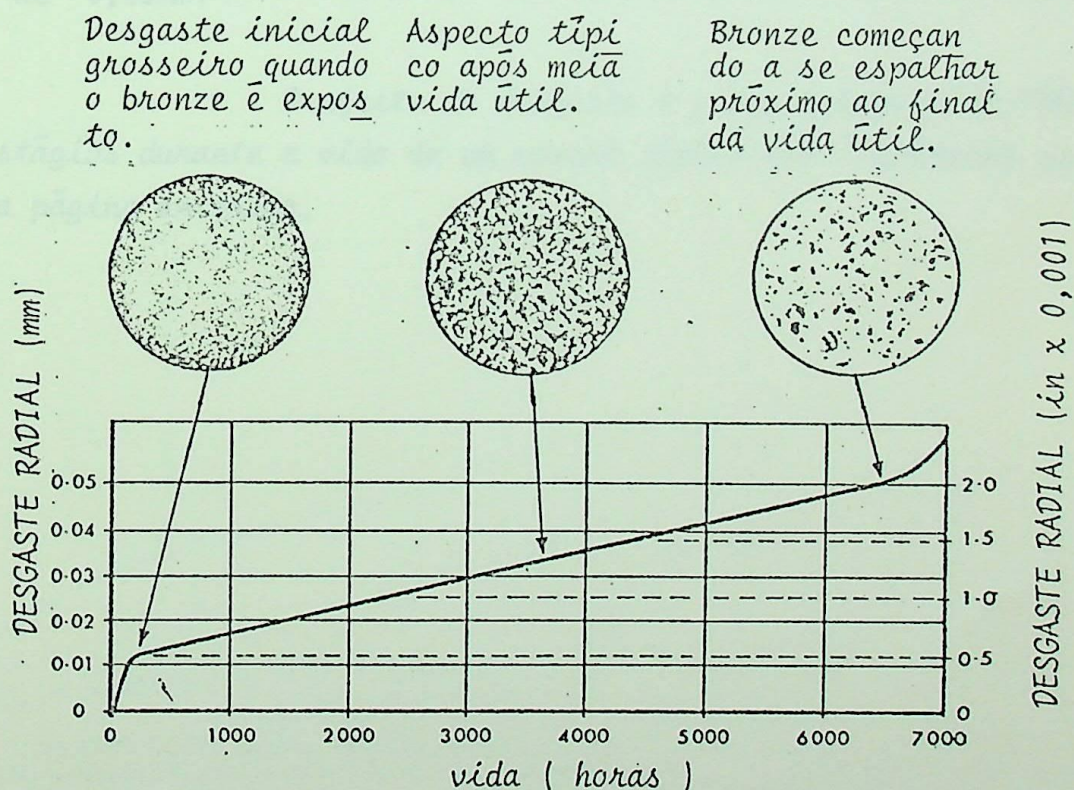
A microestrutura do pó de bronze "DU" é sinterizada em um metal de proteção e impregnada com uma mistura de PTFE e chumbo.

O P.T.F.E. no estado sólido oferece baixa resistência de atrito, grande variação de temperatura de serviço, resiste à maioria dos solventes e a água. Em seu estado puro, todavia, o mate

rial apresenta certas limitações devido a sua pequena resistência mecânica, expansão térmica elevada e baixa condutividade térmica.

O material composto consiste em três camadas interligadas : uma faixa de proteção de aço, uma matriz de bronze poroso e uma sobrecamada impregnada com PTFE e material de mancal de chumbo. A proteção de aço proporciona resistência mecânica e a camada intermediária de bronze, impregnada com PTFE e mistura de bronze, proporciona forte vínculo mecânico para o revestimento. Esta construção promove uma estabilidade dimensional e melhora a condutividade térmica, e reduz portanto a temperatura na superfície do mancal.

Durante a operação normal, uma película fina é transferida do revestimento do PTFE para a superfície oposta, onde permanece durante todo tempo de operação do mancal.



EFEITO DO DESGASTE SOBRE SUPERFÍCIE DE MANCAL "DU". (ref. 28)

Durante a operação normal do mancal "DU", há um desgaste inicial rápido aproximadamente de 0,013mm, enquanto parte do revestimento de chumbo do PTFE transfere-se e liga-se fisicamente à superfície contígua, como mostrado na figura anterior.

A superfície de fricção do mancal geralmente adquire uma coloração verde-cinza e a matriz de bronze pode ser vista sobre aproximadamente 10% da superfície do mancal. Qualquer excesso na camada da superfície de PTFE/chumbo será perdido em finas partículas.

No decorrer do período operacional a taxa de desgaste reduz-se a um mínimo enquanto a porcentagem do bronze exposto aumenta gradativamente. Após um extenso período operacional a taxa de desgaste torna-se maior e o componente aproxima-se do fim de sua vida útil como mancal seco. Neste estágio, pelo menos 70% da superfície do material será bronze exposto e terá ocorrido um desgaste radial aproximado de 0,05mm.

O efeito do desgaste e o aparecimento de "DU" em três estágios durante a vida de um mancal típico são ilustrados na figura da página anterior.

APÊNDICE F

VISCOELASTICIDADE

Em temperaturas ambientes a maioria dos metais usados em Engenharia apresentam a relação "tensão-deformação" não dependendo do tempo de aplicação da carga. Todavia, para materiais polímeros (plásticos) e mesmo para metais submetidos a altas temperaturas e a uma determinada tensão, a deformação continua a se modificar com o tempo.

Uma curva típica de deformação versus tempo, dada por uma tensão axial σ e a uma temperatura constante T , para os materiais polímeros é mostrada na fig. (18). Usualmente dividida em cinco partes: na DEFORMAÇÃO INICIAL, que é a soma das componentes ELÁSTICA e PLÁSTICA, refere-se a deformação que ocorre imediatamente após a apli

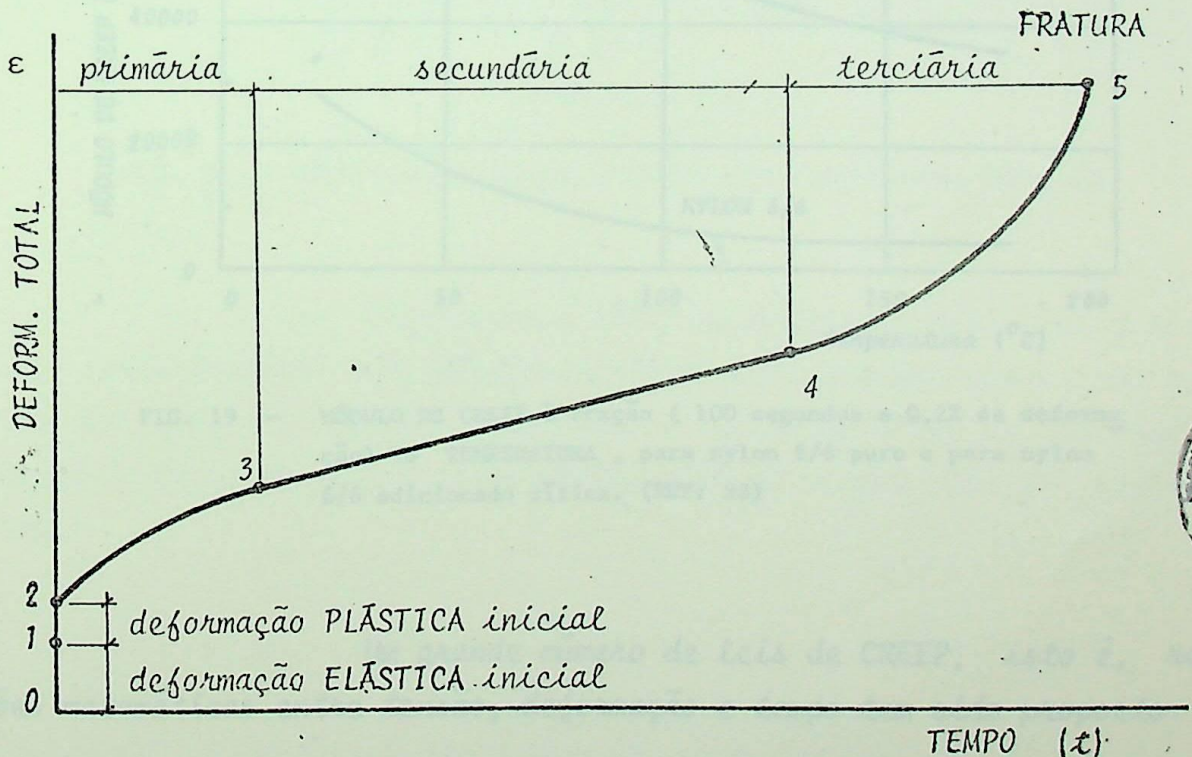


FIG. 18 - CURVA DE "CREEP" IDEALIZADA PARA UMA TENSÃO CONSTANTE E A UMA TEMPERATURA CONSTANTE.

cação da carga; isto é seguido pelo creep primário em que a deformação ocorre rapidamente mas em uma razão menor. O creep secundário (ou estado-contínuo, ou razão mínima de creep) refere-se a porção linear em que o material comporta-se como material viscoso linear (Newtoniano)

A tendência que ocorre depois e, que cresce mais rapidamente, é o chamado creep terciário (ou creep terminal). O ponto (5) assinalado na fig. (18) indica o tempo e a deformação em que ocorre a fratura ou falha por CREEP (alguns autores já traduzem a palavra CREEP por FLUÊNCIA). Convém adiantar que este diagrama representa um material idealizado, pois alguns materiais não apresentam o creep secundário e também o creep terciário é evidente somente em altas tensões.

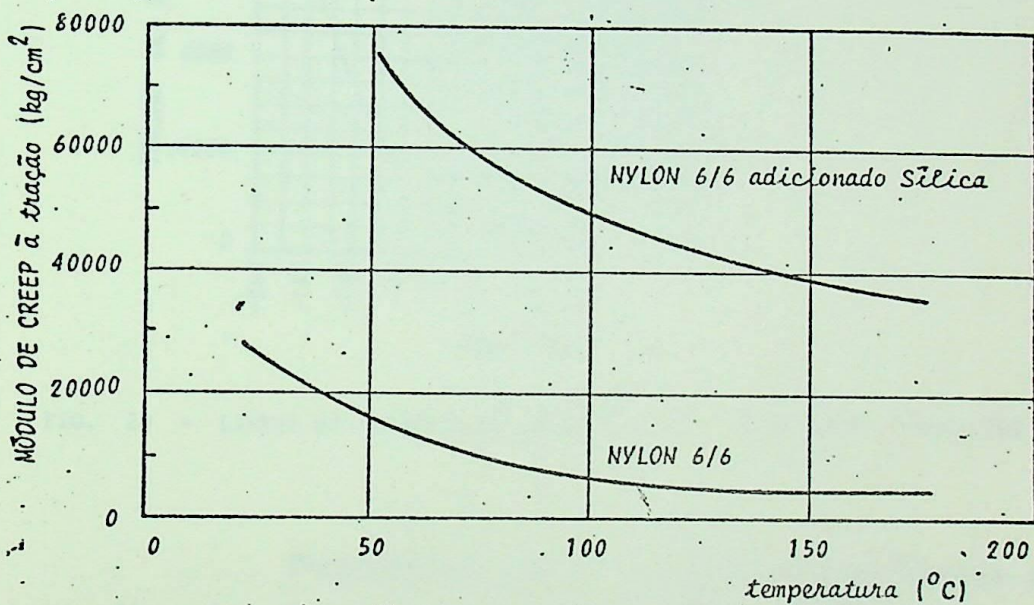


FIG. 19 - MÓDULO DE CREEP à tração (100 segundos e 0,2% de deformação) VS TEMPERATURA , para nylon 6/6 puro e para nylon 6/6 adicionado sílica. (REF: 28)

Um grande número de leis de CREEP, isto é, relações matemáticas entre tensão, deformação e tempo tem sido proposto pa

ra vários materiais incluindo polímeros (REF: 12). Mas apesar desses adiantamentos feitos para determinação das leis de CREEP para os polímeros, poucas tabelas de creep são disponíveis para polímeros-básicos para mancais secos. Algumas das tabelas típicas mostradas nas fig. (19) e (21) foram feitas a uma carga ou temperatura específica e isto permite destas um uso restrito.

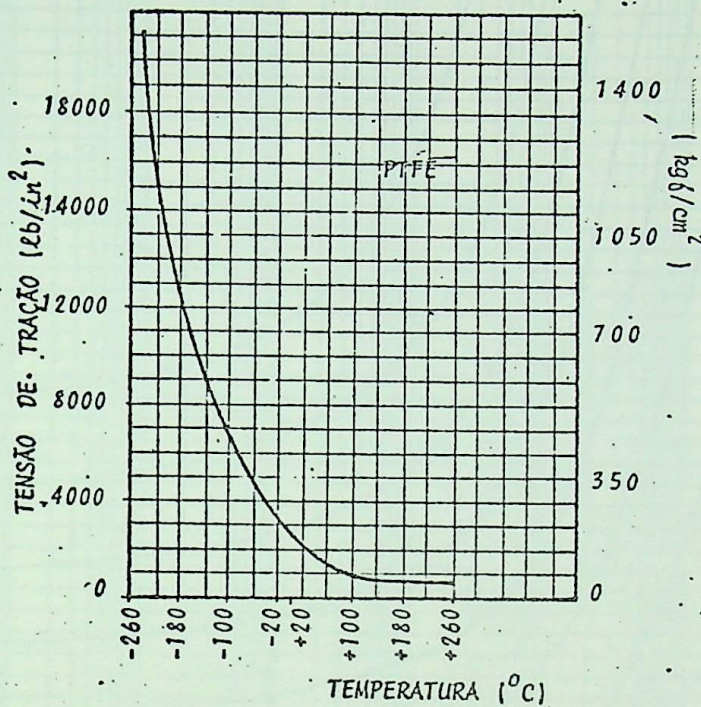


FIG. 20 - LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO VS. TEMPERATURA (REF: 28)

Propriedades CREEP de materiais polímeros puros podem ser melhorados por adicionamento de outras substâncias como mostrado na fig. (19) e para tais casos o efeito do CREEP no contorno do ângulo de desgaste ou a pressão de trabalho no mancal pode ser negligenciado.

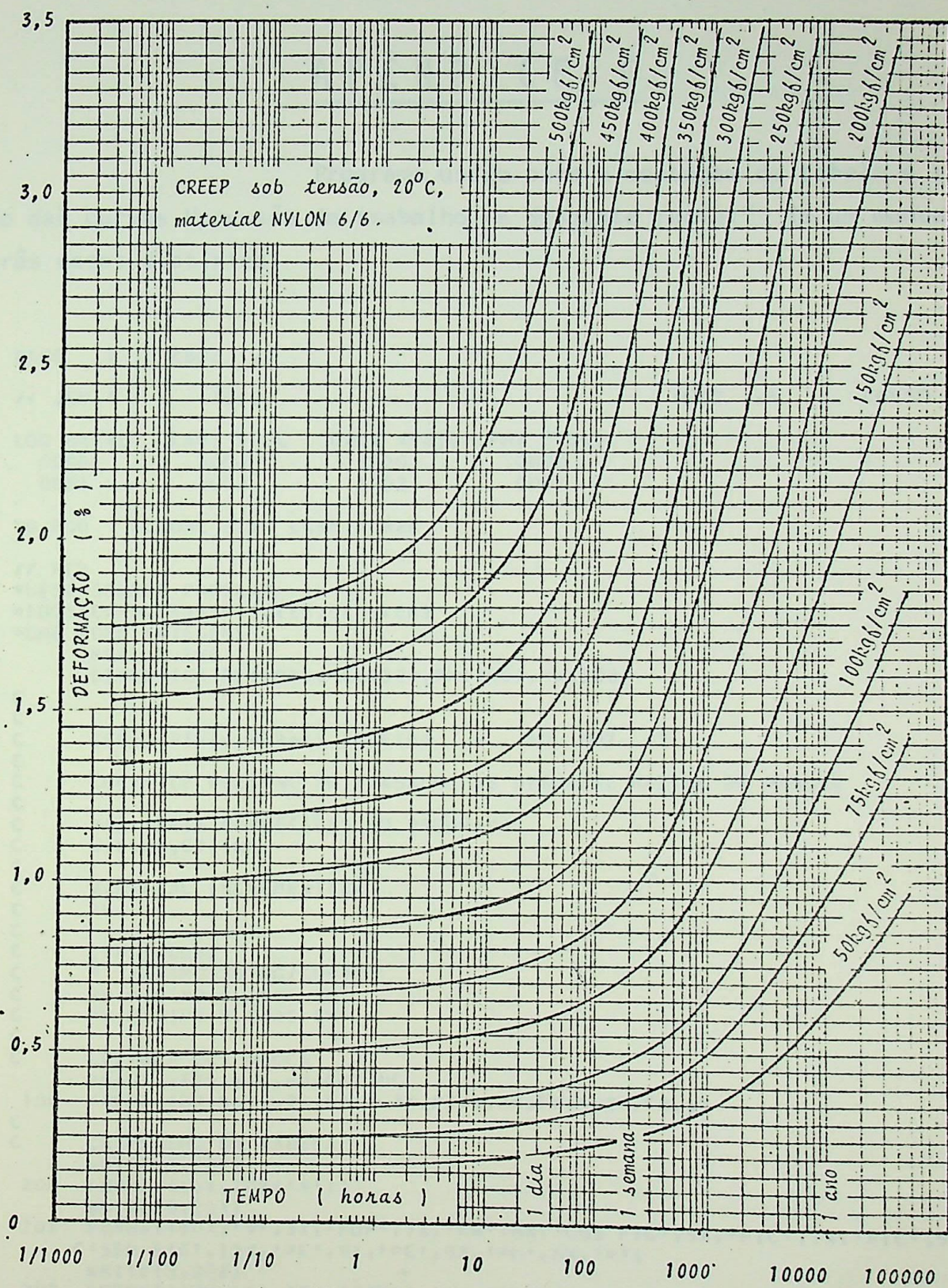


FIG. 21 - CREEP sob tensão, 20°C,
material NYLON 6/6

APÊNDICE G

Programa usado para a montagem da tabela e traça do das curvas "pressão de trabalho vs desgaste radial" de um mancal em três casos distintos:

```

PAGE 1 CB02 ,A
// JCB T 1002 OB02 ,A CELSO

LOG DRIVE CART SPEC CART AVAIL PHY DRIVE
0000 3000 3000 0000
0001 1002 1002 0001

VO M00 ACTUAL 32K CCONFIG 32K

// FCR
*LIST SOURCE PROGRAM
*IOCS(CARD,1403 PRINTER,PLOTTER)
*ONE WORD INTEGERS
REAL L,INC
DIMENSION PE(100),PC(100),PM(100),RW(100)

C
C
C CELSO PINTO MORAIS PEREIRA - 10. OUT. 77
C
C CURVA DE PRESSAO DE TRABALHO VS DESGASTE RADIAL DE MANCAL
C
C VARIÁVEIS FORNECIDAS NO PROGRAMA
C W,L,RJ,CR,INC
C
C VARIÁVEL INCREMENTADA
C RW
C
C LIMITAÇÕES
C P MAXIMO 30 KG/CM**2
C RW MINIMO 0.0005 CM
C RW MAXIMO 0.0300 CM
C
C LEITURA DOS DADOS
READ(2,100)W,L,RJ,CR,INC
100 FORMAT(2X,F6.2,2X,F6.2,2X,F7.3,2X,F8.4,2X,F8.4)
C
C CABECALHO DA TABELA
WRITE(5,200)
200 FORMAT(10X,102('#'))
WRITE(5,201)
201 FORMAT(10X,'#',3X,'NUM',7X,'RW',6X,'COS FIC',5X,'FIC',7X,'FIC',5X,
C'SEN FIC',13X,'PE',9X,'PC',9X,'PM',5X,'#')
WRITE(5,202)
202 FORMAT(10X,'#',12X,'(CM)',16X,'(RAD)',4X,'(GRAUS)',19X,'(KG/CM**2)
C',1X,'(KG/CM**2)',1X,'(KG/CM**2)',1X,'#')
WRITE(5,200)
WRITE(5,302)

```


(continuação)

```

302  FORMAT(10X,'*',100X,'*')
      N=0.0295/INC+0.5
      RW(1)=0.0005
C
C    IMPRESSAO DA TABELA
      DO 150 I=1,N
      CCF1=CR/(CR+RW(I))
      SEF1=SGRT(1-COF1**2)
      TANF1=SEF1/CCF1
      FIR=ATAN(TANF1)
      FIG=FIR*57.296
      PE(1)=W/(2.*L*RJ*SEF1)
      PC(1)=W/(RJ*L*(SEF1*CCF1+FIR))
      PM(1)=2.*W/(3.14*RJ*L*SEF1)
      WRITE(5,203) I, RW(1), CCF1, FIR, FIG, SEF1, PE(1), PC(1), PM(1)
203  FORMAT(10X,'*',3X,I3,5X,3(F7.4,3X),F7.2,3X,F7.4,6X,3(6X,F5.2),3X,'
      C*')
150  RW(I+1)=RW(I)+INC
      WRITE(5,302)
      WRITE(5,200)
C
C    TRACAGEM DO GRAFICO
      PAUSE
      CALL SCALF(0.05,0.3,0.0,0.0)
      CALL FGRID(0,0.0,0.0,10.0,30)
      CALL FFLCT(2,302.0,0.0)
      CALL PCINT(2)
      CALL FFLCT(1,0.0,0.0)
      CALL FGRID(1,0.0,0.0,1.0,30)
      CALL FFLCT(2,0.0,30.33)
      CALL PCINT(5)
      CALL FFLCT(1,0.0,0.0)
      CALL FFLCT(1,10000*RW(1),PE(1))
      DO 160 I=1,N
160  CALL FFLCT(2,10000*RW(I),PE(I))
      CALL FFLCT(1,10000*RW(I),PC(1))
      DO 165 I=1,N
165  CALL FFLCT(2,10000*RW(I),PC(I))
      CALL FFLCT(1,10000*RW(I),PM(1))
      DO 170 I=1,N
170  CALL FFLCT(2,10000*RW(I),PM(I))
      CALL EXIT
      END

```

FEATURES SUPPORTED
ONE WORD INTEGERS
IOCS

CORE REQUIREMENTS FOR
COMMON C VARIABLES 828 PROGRAM 630

END OF COMPILATION

// XEQ

NUM	RW (CM)	COS FIC	FIC (RAD)	FIC (GRAUS)	SEN FIC	PE (KG/CM**2)	PC (KG/CM**2)	PM
1	0.0005	0.9382	0.3531	20.23	0.3458	20.22	20.64	25.76
2	0.0010	0.8735	0.5083	29.12	0.4867	14.37	14.99	18.21
3	0.0016	0.8172	0.6142	35.19	0.5763	12.14	12.89	15.46
4	0.0022	0.7676	0.6955	39.85	0.6408	10.91	11.78	13.90
5	0.0028	0.7238	0.7614	43.63	0.6899	10.14	11.09	12.91
6	0.0034	0.6846	0.8166	46.78	0.7238	9.60	10.63	12.22
7	0.0040	0.6495	0.8637	49.49	0.7602	9.20	10.30	11.72
8	0.0046	0.6178	0.9047	51.83	0.7862	8.89	10.06	11.23
9	0.0052	0.5891	0.9407	53.90	0.8080	8.65	9.87	11.03
10	0.0058	0.5629	0.9728	55.73	0.8264	8.46	9.73	10.78
11	0.0064	0.5390	1.0015	57.38	0.8423	8.30	9.61	10.58
12	0.0070	0.5170	1.0274	58.86	0.8559	8.17	9.51	10.41
13	0.0076	0.4967	1.0509	60.21	0.8679	8.06	9.44	10.27
14	0.0082	0.4779	1.0724	61.44	0.8783	7.96	9.37	10.14
15	0.0088	0.4606	1.0921	62.57	0.8876	7.88	9.32	10.04
16	0.0094	0.4444	1.1102	63.61	0.8958	7.81	9.27	9.95
17	0.0100	0.4293	1.1269	64.57	0.9031	7.74	9.23	9.86
18	0.0106	0.4153	1.1425	65.46	0.9096	7.69	9.20	9.79
19	0.0112	0.4021	1.1569	66.28	0.9155	7.64	9.17	9.73
20	0.0118	0.3897	1.1704	67.06	0.9209	7.59	9.15	9.67
21	0.0124	0.3791	1.1830	67.78	0.9257	7.55	9.12	9.62
22	0.0130	0.3671	1.1948	68.46	0.9301	7.52	9.10	9.58
23	0.0136	0.3568	1.2059	69.09	0.9341	7.49	9.09	9.54
24	0.0142	0.3470	1.2163	69.69	0.9378	7.46	9.07	9.50
25	0.0148	0.3377	1.2262	70.25	0.9412	7.43	9.06	9.47
26	0.0154	0.3290	1.2355	70.79	0.9443	7.40	9.05	9.43
27	0.0160	0.3206	1.2443	71.29	0.9471	7.38	9.03	9.41
28	0.0166	0.3127	1.2527	71.77	0.9498	7.36	9.02	9.38
29	0.0172	0.3052	1.2606	72.22	0.9522	7.34	9.02	9.36
30	0.0178	0.2980	1.2681	72.66	0.9545	7.33	9.01	9.33

(continuação)

31	0.0184	0.2911	1.2753	73.07	0.5566	7.31	9.00	9.31	*
32	0.0190	0.2846	1.2821	73.46	0.5586	7.29	8.99	9.29	*
33	0.0196	0.2783	1.2886	73.83	0.5604	7.28	8.99	9.28	*
34	0.0202	0.2724	1.2949	74.19	0.5621	7.27	8.98	9.26	*
35	0.0208	0.2666	1.3008	74.53	0.5637	7.25	8.98	9.24	*
36	0.0214	0.2611	1.3065	74.86	0.5652	7.24	8.97	9.23	*
37	0.0220	0.2558	1.3120	75.17	0.5667	7.23	8.97	9.22	*
38	0.0226	0.2508	1.3172	75.47	0.5680	7.22	8.97	9.20	*
39	0.0232	0.2459	1.3222	75.76	0.5692	7.21	8.96	9.19	*
40	0.0238	0.2412	1.3271	76.03	0.5704	7.21	8.96	9.18	*
41	0.0244	0.2367	1.3317	76.30	0.5715	7.20	8.96	9.17	*
42	0.0250	0.2324	1.3362	76.56	0.5726	7.19	8.95	9.16	*
43	0.0256	0.2282	1.3405	76.80	0.5736	7.18	8.95	9.15	*
44	0.0262	0.2241	1.3446	77.04	0.5745	7.17	8.95	9.14	*
45	0.0268	0.2202	1.3486	77.27	0.5754	7.17	8.95	9.13	*
46	0.0274	0.2165	1.3525	77.49	0.5762	7.16	8.94	9.13	*
47	0.0280	0.2128	1.3562	77.70	0.5770	7.16	8.94	9.12	*
48	0.0286	0.2093	1.3598	77.91	0.5778	7.15	8.94	9.11	*
49	0.0292	0.2059	1.3633	78.11	0.5785	7.15	8.94	9.10	*

A P Ê N D I C E H

Programa e tabela relativa as curvas " efeito
teórico do coeficiente de folga sobre a pressão de trabalho do man
cal " :

```

PAGE      1      CB02 ,A
// JGB T                                     OB02 ,A      CELSO

LOG DRIVE   CART SPEC   CART AVAIL   PHY DRIVE
0000        3000        3000        0000

VO MOO      ACTUAL 32K   CONFIG 32K

// FOR
*LIST SOURCE PROGRAM
*IOCS(CARD,1403 PRINTER,PLOTTER)
*ONE WORD INTEGERS
    REAL L
    DIMENSION PE(130,10),CODE(10),RWE(130)

C
C
C      CELSO PINTO MORAIS PEREIRA - 10. OUT. 77
C
C      EFEITO TEORICO DO CCEF. DE FOLGA SOBRE A PRESSAO DE TRABALHO
C
C      VARIAVEIS FORNECIDAS AO PROGRAMA
C      W,L,D
C
C      VARIAVEIS INCREMENTADAS
C      RW,CDD
C
C      LIMITACCES
C      P MAXIMO 30 KGF/CM**2
C      RW MINIMO 0.0005 CM
C      RW MAXIMO 0.0150 CM
C
C      LEITURA DOS DADOS
C      READ(2,100)W,L,D
100    FORMAT(2X,F6.2,2X,F6.2,2X,F6.2)
C
C      CALCULO DAS PRESSOES
C      DC 600 IRW=5,130
C      RW=IRW/10000.
C      RWE(IRW)=RW
C      DC 700 ICDD=1,7
C      IF(ICDD-4)10,20,30
10      CDD=ICDD/1000.
C      GO TO 50
20      CDD=0.0037
C      GO TO 50
30      CDD=ICDD/1000.
50      CODE(ICDD)=CDD
C      CCFI=(CDD*D)/(CDD*D+2.*RW)

```


(continuação)

```

PE(IRW,ICDD)=W/(D*L*(1.-CDD)*SQRT(1.-COF1**2))
700 CONTINUE
600 CONTINUE
C
C IMPRESSAO DA TABELA
WRITE(5,200)
200 FORMAT(21X,81('*'))
WRITE(5,210)
210 FORMAT(21X,'*',9X,'*',69X,'*')
WRITE(5,220)
220 FORMAT(21X,'*',3X,'KW',4X,'*',9X,'PRESSAO DE TRABALHO NC MANCA
CL (KGF/CM**2)',14X,'*')
WRITE(5,210)
WRITE(5,230)
230 FORMAT(21X,'*',9X,71('*'))
WRITE(5,240)
240 FORMAT(21X,'*',2X,'(CM)',3X,'*',7(' CD/D *'))
WRITE(5,250) (CDD(I),ICDD=1,7)
250 FORMAT(21X,'*',9X,'*',7(1X,F6.4,2X,'*',))
WRITE(5,200)
DO 400 I=5,130
400 WRITE(5,250) RWE(I), (PE(I,J),J=1,7)
260 FORMAT(21X,'*',2X,F6.4,1X,'*',7(2X,F5.2,2X,'*'))
WRITE(5,200)
C
C TRACAGEM DO GRAFICO
PAUSE
CALL SCALF(0.1,0.3,0.0,0.0)
CALL FGRID(0,0.0,0.0,10.0,15)
CALL FPLOT(2,151.0,0.0)
CALL PCINT(2)
CALL FPLOT(1,0.0,0.0)
CALL FGRID(1,0.0,0.0,1.0,30)
CALL FPLOT(2,0.0,30.33)
CALL PCINT(5)
CALL FPLOT(1,0.0,0.0)
PE(5,8)=0.0
CALL FPLOT(-2,10000*RWE(5),PE(5,1))
DO 380 J=1,7
DO 390 I=5,130
390 CALL FPLOT(2,10000*RWE(I),PE(I,J))
380 CALL FPLOT(1,10000*RWE(5),PE(5,J+1))
CALL EXIT
END

```

FEATURES SUPPORTED
ONE WORD INTEGERS
IOCS -

CORE REQUIREMENTS FOR
COMMON 0 VARIABLES 2906 PROGRAM 588

END OF COMPILEATION

// XEQ

RW		PRESSAO DE TRABALHO NO MANCAL (KGF/CM**2)																	
(CM)		CD/D		CD/D		CD/D		CD/D		CD/D		CD/D		CD/D		CD/D		CD/D	
		0.0010		0.0020		0.0030		0.0037		0.0050		0.0060		0.0070		0.0070		0.0070	
0.0005	11.99	15.94	19.11	21.05	22.27	24.27	26.48	28.54	30.54	32.54	34.54	36.54	38.54	40.54	42.54	44.54	46.54	48.54	50.54
0.0006	11.21	14.74	17.50	19.36	20.74	22.28	24.29	26.16	28.16	30.16	32.16	34.16	36.16	38.16	40.16	42.16	44.16	46.16	48.16
0.0007	10.61	13.83	16.44	18.06	20.74	22.59	24.29	26.16	28.16	30.16	32.16	34.16	36.16	38.16	40.16	42.16	44.16	46.16	48.16
0.0008	10.15	13.10	15.52	17.02	19.51	21.17	22.59	24.29	26.16	28.16	30.16	32.16	34.16	36.16	38.16	40.16	42.16	44.16	46.16
0.0009	9.77	12.50	14.76	16.16	18.49	20.11	21.17	22.59	24.29	26.16	28.16	30.16	32.16	34.16	36.16	38.16	40.16	42.16	44.16
0.0010	9.46	12.00	14.12	15.44	17.64	19.17	20.11	21.17	22.59	24.29	26.16	28.16	30.16	32.16	34.16	36.16	38.16	40.16	42.16
0.0011	9.20	11.58	13.53	14.83	16.91	18.36	19.17	20.11	21.17	22.59	24.29	26.16	28.16	30.16	32.16	34.16	36.16	38.16	40.16
0.0012	8.98	11.22	13.11	14.29	16.28	17.66	18.36	19.17	20.11	21.17	22.59	24.29	26.16	28.16	30.16	32.16	34.16	36.16	38.16
0.0013	8.79	10.90	12.70	13.83	15.72	17.04	17.66	18.36	19.17	20.11	21.17	22.59	24.29	26.16	28.16	30.16	32.16	34.16	36.16
0.0014	8.62	10.62	12.34	13.42	15.23	16.49	17.04	17.66	18.36	19.17	20.11	21.17	22.59	24.29	26.16	28.16	30.16	32.16	34.16
0.0015	8.47	10.38	12.02	13.05	14.79	16.01	16.49	17.04	17.66	18.36	19.17	20.11	21.17	22.59	24.29	26.16	28.16	30.16	32.16
0.0016	8.34	10.16	11.73	12.72	14.39	15.57	16.01	16.49	17.04	17.66	18.36	19.17	20.11	21.17	22.59	24.29	26.16	28.16	30.16
0.0017	8.23	9.96	11.47	12.42	14.04	15.17	15.57	16.01	16.49	17.04	17.66	18.36	19.17	20.11	21.17	22.59	24.29	26.16	28.16
0.0018	8.13	9.78	11.23	12.15	13.71	14.80	15.17	15.57	16.01	16.49	17.04	17.66	18.36	19.17	20.11	21.17	22.59	24.29	26.16
0.0019	8.03	9.62	11.01	11.90	13.41	14.47	14.80	15.17	15.57	16.01	16.49	17.04	17.66	18.36	19.17	20.11	21.17	22.59	24.29
0.0020	7.95	9.47	10.82	11.68	13.14	14.16	14.47	14.80	15.17	15.57	16.01	16.49	17.04	17.66	18.36	19.17	20.11	21.17	22.59
0.0021	7.87	9.33	10.63	11.47	12.88	13.88	14.16	14.47	14.80	15.17	15.57	16.01	16.49	17.04	17.66	18.36	19.17	20.11	21.17
0.0022	7.80	9.21	10.47	11.27	12.65	13.62	13.88	14.16	14.47	14.80	15.17	15.57	16.01	16.49	17.04	17.66	18.36	19.17	20.11
0.0023	7.74	9.09	10.31	11.10	12.43	13.36	13.62	13.88	14.16	14.47	14.80	15.17	15.57	16.01	16.49	17.04	17.66	18.36	19.17
0.0024	7.68	8.99	10.17	10.93	12.23	13.15	13.36	13.62	13.88	14.16	14.47	14.80	15.17	15.57	16.01	16.49	17.04	17.66	18.36
0.0025	7.63	8.89	10.03	10.77	12.04	12.94	13.15	13.36	13.62	13.88	14.16	14.47	14.80	15.17	15.57	16.01	16.49	17.04	17.66
0.0026	7.58	8.79	9.91	10.63	11.86	12.74	12.94	13.15	13.36	13.62	13.88	14.16	14.47	14.80	15.17	15.57	16.01	16.49	17.04
0.0027	7.53	8.71	9.79	10.49	11.70	12.55	12.74	12.94	13.15	13.36	13.62	13.88	14.16	14.47	14.80	15.17	15.57	16.01	16.49
0.0028	7.49	8.63	9.68	10.36	11.54	12.38	12.55	12.74	12.94	13.15	13.36	13.62	13.88	14.16	14.47	14.80	15.17	15.57	16.01
0.0029	7.45	8.55	9.59	10.24	11.39	12.21	12.38	12.55	12.74	12.94	13.15	13.36	13.62	13.88	14.16	14.47	14.80	15.17	15.57
0.0030	7.41	8.48	9.43	10.13	11.25	12.05	12.21	12.38	12.55	12.74	12.94	13.15	13.36	13.62	13.88	14.16	14.47	14.80	15.17
0.0031	7.38	8.41	9.39	10.02	11.12	11.90	12.05	12.21	12.38	12.55	12.74	12.94	13.15	13.36	13.62	13.88	14.16	14.47	14.80
0.0032	7.35	8.35	9.30	9.92	11.00	11.76	11.90	12.05	12.21	12.38	12.55	12.74	12.94	13.15	13.36	13.62	13.88	14.16	14.47
0.0033	7.32	8.29	9.22	9.82	10.88	11.63	11.76	11.90	12.05	12.21	12.38	12.55	12.74	12.94	13.15	13.36	13.62	13.88	14.16
0.0034	7.29	8.24	9.14	9.73	10.76	11.50	11.63	11.76	11.90	12.05	12.21	12.38	12.55	12.74	12.94	13.15	13.36	13.62	13.88
0.0035	7.26	8.18	9.07	9.65	10.66	11.38	11.50	11.63	11.76	11.90	12.05	12.21	12.38	12.55	12.74	12.94	13.15	13.36	13.62
0.0036	7.24	8.13	8.99	9.56	10.55	11.26	11.38	11.50	11.63	11.76	11.90	12.05	12.21	12.38	12.55	12.74	12.94	13.15	13.36
0.0037	7.21	8.09	8.93	9.49	10.46	11.15	11.26	11.38	11.50	11.63	11.76	11.90	12.05	12.21	12.38	12.55	12.74	12.94	13.15
0.0038	7.19	8.04	8.86	9.41	10.36	11.05	11.15	11.26	11.38	11.50	11.63	11.76	11.90	12.05	12.21	12.38	12.55	12.74	12.94
0.0039	7.17	8.00	8.80	9.34	10.27	10.95	11.05	11.15	11.26	11.38	11.50	11.63	11.76	11.90	12.05	12.21	12.38	12.55	12.74
0.0040	7.15	7.96	8.75	9.27	10.19	10.85	10.95	11.05	11.15	11.26	11.38	11.50	11.63	11.76	11.90	12.05	12.21	12.38	12.55
0.0041	7.13	7.92	8.69	9.20	10.11	10.76	10.85	10.95	11.05	11.15	11.26	11.38	11.50	11.63	11.76	11.90	12.05	12.21	12.38
0.0042	7.11	7.88	8.64	9.14	10.03	10.67	10.76	10.85	10.95	11.05	11.15	11.26	11.38	11.50	11.63	11.76	11.90	12.05	12.21
0.0043	7.10	7.85	8.59	9.08	9.95	10.58	10.67	10.76	10.85	10.95	11.05	11.15	11.26	11.38	11.50	11.63	11.76	11.90	12.05
0.0044	7.08	7.81	8.54	9.02	9.88	10.51	10.58	10.67	10.76	10.85	10.95	11.05	11.15	11.26	11.38	11.50	11.63	11.76	11.90
0.0045	7.06	7.78	8.49	8.97	9.81	10.42	10.51	10.60	10.69	10.78	10.87	10.95	11.04	11.13	11.22	11.31	11.40	11.49	11.58
0.0046	7.05	7.75	8.45	8.91	9.74	10.34	10.42	10.51	10.59	10.68	10.77	10.85	10.94	11.03	11.12	11.21	11.30	11.39	11.48
0.0047	7.04	7.72	8.40	8.86	9.68	10.27	10.34	10.42	10.50	10.58	10.66	10.74	10.82	10.90	10.98	11.06	11.14	11.22	11.30
0.0048	7.02	7.69	8.36	8.81	9.62	10.20	10.27	10.34	10.41	10.48	10.55	10.62	10.69	10.76	10.83	10.90	10.97	11.04	11.11
0.0049	7.01	7.66	8.32	8.77	9.56	10.13	10.20	10.27	10.34	10.41	10.48	10.55	10.62	10.69	10.76	10.83	10.90	10.97	11.04
0.0050	7.00	7.64	8.29	8.72	9.50	10.06	10.13	10.20	10.27	10.34	10.41	10.48	10.55	10.62	10.69	10.76	10.83	10.90	10.97
0.0051	6.99	7.61	8.25	8.68	9.44	10.00	10.06	10.13	10.20	10.27	10.34	10.41	10.48	10.55	10.62	10.69	10.76	10.83	10.90
0.0052	6.98	7.59	8.21	8.63	9.39	9.94	10.00	10.06	10.13	10.20	10.27	10.34	10.41	10.48	10.55	10.62	10.69	10.76	10.83
0.0053	6.96	7.56	8.18	8.59	9.34	9.88	9.94	10.00	10.06	10.13	10.20	10.27	10.34	10.41	10.48	10.55	10.62	10.69	10.76
0.0054	6.95	7.54	8.14	8.55	9.28	9.82	9.88	9.94	10.00	10.06	10.13	10.20	10.27	10.34	10.41	10.48	10.55	10.62	10.69</

(continuação)

**	0.0086	*	6.77	*	7.10	*	7.48	*	7.75	*	8.24	*	8.61	*	8.97
**	0.0087	*	6.76	*	7.10	*	7.47	*	7.73	*	8.22	*	8.59	*	8.95
**	0.0088	*	6.76	*	7.09	*	7.45	*	7.72	*	8.20	*	8.56	*	8.92
**	0.0089	*	6.76	*	7.08	*	7.44	*	7.70	*	8.18	*	8.54	*	8.89
**	0.0090	*	6.75	*	7.07	*	7.43	*	7.69	*	8.16	*	8.52	*	8.86
**	0.0091	*	6.75	*	7.06	*	7.42	*	7.67	*	8.14	*	8.49	*	8.84
**	0.0092	*	6.75	*	7.06	*	7.41	*	7.66	*	8.12	*	8.47	*	8.81
**	0.0093	*	6.75	*	7.05	*	7.39	*	7.64	*	8.10	*	8.45	*	8.79
**	0.0094	*	6.74	*	7.04	*	7.38	*	7.63	*	8.08	*	8.43	*	8.76
**	0.0095	*	6.74	*	7.04	*	7.37	*	7.62	*	8.07	*	8.41	*	8.74
**	0.0096	*	6.74	*	7.03	*	7.36	*	7.60	*	8.05	*	8.39	*	8.72
**	0.0097	*	6.74	*	7.02	*	7.35	*	7.59	*	8.03	*	8.37	*	8.69
**	0.0098	*	6.73	*	7.02	*	7.34	*	7.58	*	8.01	*	8.35	*	8.67
**	0.0099	*	6.73	*	7.01	*	7.33	*	7.56	*	8.00	*	8.33	*	8.65
**	0.0100	*	6.73	*	7.01	*	7.32	*	7.55	*	7.98	*	8.31	*	8.63
**	0.0101	*	6.73	*	7.00	*	7.31	*	7.54	*	7.97	*	8.29	*	8.61
**	0.0102	*	6.72	*	6.99	*	7.30	*	7.53	*	7.95	*	8.27	*	8.58
**	0.0103	*	6.72	*	6.99	*	7.29	*	7.52	*	7.93	*	8.25	*	8.56
**	0.0104	*	6.72	*	6.98	*	7.29	*	7.51	*	7.92	*	8.23	*	8.54
**	0.0105	*	6.72	*	6.98	*	7.28	*	7.50	*	7.91	*	8.22	*	8.52
**	0.0106	*	6.72	*	6.97	*	7.27	*	7.49	*	7.89	*	8.20	*	8.50
**	0.0107	*	6.71	*	6.97	*	7.26	*	7.47	*	7.88	*	8.18	*	8.49
**	0.0108	*	6.71	*	6.96	*	7.25	*	7.46	*	7.86	*	8.17	*	8.47
**	0.0109	*	6.71	*	6.96	*	7.24	*	7.45	*	7.85	*	8.15	*	8.45
**	0.0110	*	6.71	*	6.95	*	7.24	*	7.44	*	7.84	*	8.13	*	8.43
**	0.0111	*	6.71	*	6.95	*	7.23	*	7.43	*	7.82	*	8.12	*	8.41
**	0.0112	*	6.70	*	6.94	*	7.22	*	7.42	*	7.81	*	8.10	*	8.39
**	0.0113	*	6.70	*	6.94	*	7.21	*	7.42	*	7.80	*	8.09	*	8.38
**	0.0114	*	6.70	*	6.93	*	7.21	*	7.41	*	7.78	*	8.07	*	8.36
**	0.0115	*	6.70	*	6.93	*	7.20	*	7.40	*	7.77	*	8.06	*	8.34
**	0.0116	*	6.70	*	6.92	*	7.19	*	7.39	*	7.76	*	8.04	*	8.33
**	0.0117	*	6.70	*	6.92	*	7.18	*	7.38	*	7.75	*	8.03	*	8.31
**	0.0118	*	6.69	*	6.92	*	7.18	*	7.37	*	7.74	*	8.02	*	8.29
**	0.0119	*	6.69	*	6.91	*	7.17	*	7.36	*	7.72	*	8.00	*	8.28
**	0.0120	*	6.69	*	6.91	*	7.16	*	7.35	*	7.71	*	7.99	*	8.26
**	0.0121	*	6.69	*	6.90	*	7.16	*	7.35	*	7.70	*	7.98	*	8.25
**	0.0122	*	6.69	*	6.90	*	7.15	*	7.34	*	7.69	*	7.96	*	8.23
**	0.0123	*	6.69	*	6.90	*	7.15	*	7.33	*	7.68	*	7.95	*	8.22
**	0.0124	*	6.69	*	6.89	*	7.14	*	7.32	*	7.67	*	7.94	*	8.20
**	0.0125	*	6.68	*	6.89	*	7.13	*	7.31	*	7.66	*	7.93	*	8.19
**	0.0126	*	6.68	*	6.89	*	7.13	*	7.31	*	7.65	*	7.91	*	8.18
**	0.0127	*	6.68	*	6.88	*	7.12	*	7.30	*	7.64	*	7.90	*	8.16
**	0.0128	*	6.68	*	6.88	*	7.12	*	7.29	*	7.63	*	7.89	*	8.15
**	0.0129	*	6.68	*	6.88	*	7.11	*	7.28	*	7.62	*	7.88	*	8.13
**	0.0130	*	6.68	*	6.87	*	7.11	*	7.28	*	7.61	*	7.87	*	8.12



EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200178



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA