



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GGH 13
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERACAO HIDRAULICA

**APLICACAO DE MANCAL DEVA METAL LUBRIFICADO A AGUA EM MANCAL PRINCIPAL DE TURBINA
HIDRAULICA**

Paulo Sergio Martins Pereira

Federal Mogul Deva FmbH

RESUMO

Um significativo crescimento da conscientização da sociedade em relação ao respeito e proteção do meio ambiente tem levado a industria a utilizar cada vez mais produtos ecologicamente compatíveis e que não agridem o meio ambiente. O negocio relacionado a geração de energia também tem seguido essa tendência.

Uma das conseqüências dessa tendência tem sido a substituição da lubrificação a graxa ou óleo por lubrificação a água nos mancais principais de turbinas hidráulicas. O maior desafio apresentado pelo emprego da lubrificação a água é garantir a formação de um filme de lubrificação mesmo em condições operacionais de alta carga. Os mancais principais Deva.metal[®] por conter grafite em sua estrutura, proporcionam a formação de um filme de grafite ao redor do eixo que garante um bom desempenho tribológico do sistema mancal / eixo. Esse filme de grafite evita um excessivo desgaste no caso de atrito com componentes sólidos. As propriedades autolubrificantes dos mancais principais Deva.metal[®] garantem a turbina uma operação segura mesmo nos casos de interrupção acidental do fornecimento de água para lubrificação do sistema mancal / eixo. A Federal Mogul Deva já tem seus mancais em Deva.metal[®] em operação há mais de 30 anos em mais de 100 hidrelétricas o que comprova que essa é uma solução confiável.

PALAVRAS-CHAVE

Meio ambiente, ecologicamente, lubrificação, Deva.metal[®], água, mancal principal, solução confiável

1.0 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, uma crescente conscientização ecológica tem levado a utilização cada vez maior de produtos compatíveis com o meio ambiente e que respeitam o mesmo.

Por exemplo, podemos mencionar uma regulamentação da Bavária (Alemanha), feita sob a legislação Alemã relacionada com Recursos Hídricos [1], que estipula que a graxa ou o óleo usados para lubrificar mancais principais de turbina hidráulica devem ser classificados como classe 0 (zero) quanto ao impacto ambiental (não agressiva a água, não poluente).

Com o objetivo de atender a regulamentação mencionada acima, a Federal Mogul Deva desenvolveu uma solução com um mancal fabricado com seu produto deva. metal[®] e que utiliza água como lubrificante em substituição ao óleo.

Qualquer que seja a solução adotada para a lubrificação do sistema eixo principal / mancal principal da turbina, a turbina tem que ter a confiabilidade de sua operação garantida [2].

Por outro lado, ao mesmo tempo em que a utilização de lubrificantes biodegradáveis (óleo ou graxa), devem ser estimulados, também sua aplicação é muito problemática na prática. Deve-se considerar que a maioria dos produtos biologicamente degradáveis reagem hidroliticamente quando em contato com água. Isso é inevitável no caso dos mancais principais de turbinas hidráulicas uma vez que o sistema de vedação do eixo principal não garante a ausência total de água ou umidade. A decomposição hidrolítica pode alterar a consistência dos óleos ou graxas biodegradáveis podendo levar a interações imprevisíveis com os componentes do sistema mecânico. Por exemplo, pode reduzir ou até mesmo impedir uma lubrificação eficiente do mancal. Infelizmente, nenhum lubrificante biodegradável disponível no mercado faz referência a sua resistência "hidrolítica".

No entanto, o motivo explicado acima não deve significar que os produtos que contenham " bio" aditivos sejam necessariamente considerados uma fonte de problemas. Certamente a utilização de lubrificantes biodegradáveis devem ser considerados se razões ecológicas e econômicas justificarem e se os efeitos negativos não levarem a dificuldades operacionais do equipamento a ponto de comprometer sua confiabilidade e disponibilidade no sistema.

Sem dúvidas a melhor contribuição ecológica deve ser aquela em que a solução técnica associa o benefício ecológico ao melhor desempenho do equipamento sem ter que aceitar "compromissos" de riscos de desempenho inferior ou efeitos colaterais. Isso nos leva a concluir que "lubrificação a água" é certamente a forma de resolver as questões ecológicas e o problema técnico de lubrificação do sistema eixo principal / mancal principal de turbina hidráulica.

O grande desafio técnico em se utilizar água como lubrificante está em sua baixa viscosidade que é muito menor do que a dos lubrificantes tradicionais para essa aplicação: óleo ou graxa.

Para superar esse desafio imposto pela baixa viscosidade da água, é necessário desenvolver um projeto do conjunto eixo / mancal de forma a garantir uma lubrificação hidrodinâmica adequada. O projeto precisa garantir que se mantenha uma película de água entre eixo / mancal suficientemente espessa para que haja equilíbrio do sistema mecânico mesmo numa condição de trabalho sob altas cargas e altas velocidades.

Essa questão pode ser resolvida de uma forma simples, ao se utilizar materiais especiais usados na fabricação de mancais autolubrificantes.

2.0 – SOLUÇÃO HIDRODINÂMICA COM MANCAL PRINCIPAL FABRICADO COM DEVA.METAL E LUBRIFICADO A ÁGUA

A solução da Federal Mogul Deva, consiste na utilização de mancais autolubrificantes fabricados com o material autolubrificante deva.metal[®], material com estrutura de bronze produzido por metalurgia do pó, e que contém micro partículas de lubrificante sólido (grafite) homogeneamente distribuídos em sua estrutura.

O conceito autolubrificante consiste em promover uma transferência do lubrificante sólido do mancal para o eixo, formando uma película de lubrificante ao redor do eixo que garante a lubrificação do conjunto eixo / mancal.

A utilização de grafite na presença de umidade ou mesmo de água, produz grandes vantagens tribológicas o que também garante ao sistema uma segurança adicional mesmo que ocorra uma interrupção no fornecimento de água (que nesse caso tem a função de lubrificante).

A estrutura metálica do mancal de bronze também permite uma boa transferência de calor através do mancal, e essa característica é muito importante para evitar danos no eixo caso ocorra uma interrupção no fornecimento de água para o sistema eixo/mancal. Essa é uma grande vantagem do mancal deva. metal[®] comparado com mancais não metálicos.

As propriedades mecânicas dos mancais deva. metal[®] minimizam os efeitos negativos da baixa viscosidade da água para essa aplicação e proporcionam ao conjunto eixo / mancal uma condição de trabalho que resulta em uma vida útil longa e confiável para a turbina com uma operação isenta de óleo e não agressiva ao ambiente.

O uso dos mancais deva. metal[®] reduzem a manutenção e uma vez que é possível estimar sua vida útil, as periodicidades de inspeção dos mancais podem ser planejadas com intervalos maiores.

Ao projetar um mancal em deva.metal com lubrificação a água para aplicação em eixo principal de turbina hidráulica, as seguintes regras devem ser seguidas:

- Analisar qual material deslizante deve ser utilizado,
- Calcular as dimensões do mancal e dados básicos do suprimento de água,
- Certificar-se de utilizar uma folga apropriada e tolerâncias,
- Analisar o contra-material (eixo), e certificar-se de que tenha as características adequadas quanto a rugosidade e dureza,
- Usinar o material deslizante, e garantir uma montagem adequada do material deslizante em seu respectivo “ container”

Cada projeto tem que apresentar soluções que evidenciem uma operação confiável. Essa é normalmente responsabilidade dos fabricantes de turbinas. Para poder disponibilizar suporte técnico adicional, a Federal Mogul Deva GmbH começou um projeto com o Instituto de Tribologia da Universidade Técnica de Clausthal (TUC, Alemanha). O objetivo desse projeto foi estabelecer um modelo teórico de calculo e comprova-lo utilizando a bancada de testes no laboratório da Federal Mogul Deva GmbH.

O resultado desses estudos foi o estabelecimento de um modelo físico das condições de lubrificação da água utilizando-se a equação de Reynolds, que foi utilizado para desenvolver um software para simulação em computador. Essa simulação é feita através da execução de cálculos da folga mínima entre mancal e eixo. Ao mesmo tempo a DEVA desenvolveu uma bancada de testes para confirmar na pratica a confiabilidade operacional do modelo teórico. O procedimento está baseado em comparar dois mancais que tenham o mesmo valor do numero de SOMMERFELD. Esse é um numero “adimensional”, usado para comparação de mancais que tenham dimensões igualmente proporcionais (relação b/d, \bar{p} , relação de folga Ψ).

O calculo da capacidade de carga de um mancal deslizante hidrodinâmico está baseado na resolução da equação de Reynolds para cada ponto discreto no tempo. Não pode ser resolvida analiticamente, mas pode ser resolvida numericamente se algumas premissas forem assumidas.

3.0 – MODELO MATEMÁTICO E FÍSICO – EQUAÇÃO DE REYNOLDS

Ao resolver a equação de Reynolds para cada incremento de tempo é possível descrever a distribuição de pressão na folga de lubrificação na direção radial e axial se a posição e movimento do eixo é conhecido.

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\frac{h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{1}{2} \cdot (u_1 + u_2) \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t}$$

A integração da distribuição da pressão leva ao vetor da capacidade de carga do mancal. Isso complementar ao vetor da carga externa em quantidade e direção. A distribuição da pressão no caso do carregamento transiente em um mancal de apoio consiste em dois componentes de pressão. A distribuição da pressão por rotação e por deslocamento radial do eixo como mostrado na figura 1.

O carregamento da carga num mancal de apoio aumenta devido a rotação:

$$\omega_n = \omega_1 + \omega_2 - 2 \cdot \dot{\delta} \quad \text{onde} \quad :$$

ω_1 : velocidade angular do mancal

ω_2 : velocidade angular do eixo

$\dot{\delta} = d\delta/dt$: velocidade angular da folga mínima

No caso em analise a velocidade angular do mancal é zero.

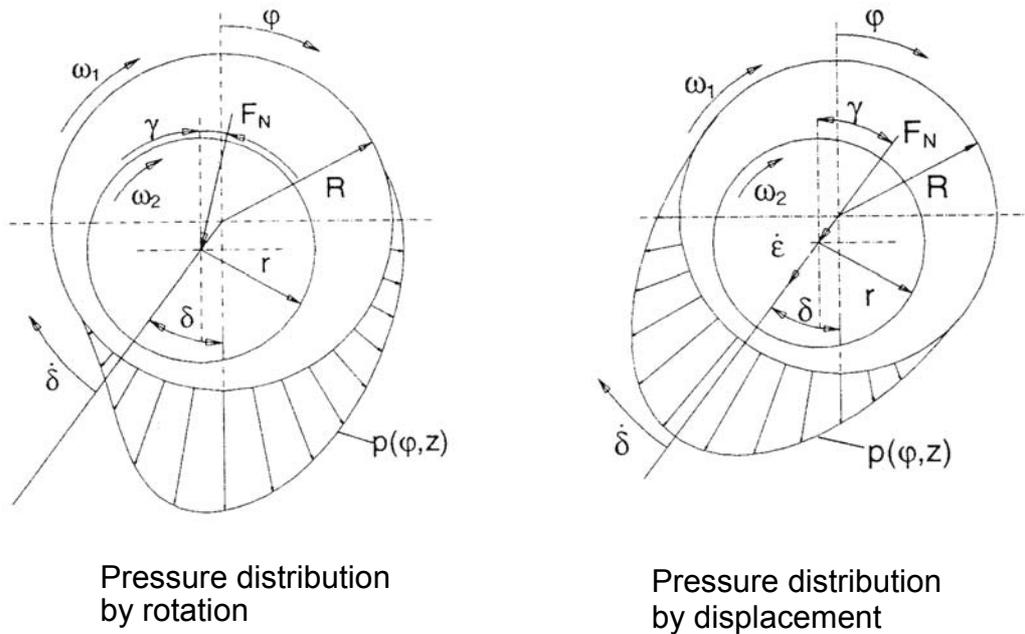


Figura 1: Aumento do carregamento de carga num mancal de apoio devido a rotação e deslocamento radial do eixo

3.1 - O Número SOMMERFELD

O numero Sommerfeld não tem unidade, é um numero comparativo usado para comparar mancais de tamanhos diferentes e com parâmetros operacionais diferentes. Os coeficientes individuais refletem a reação da pressão hidrodinâmica e, portanto a capacidade de carregamento de carga.

$$So = \frac{p \cdot \psi^2}{\eta \cdot \omega}$$

onde:

$$p = \frac{F}{b \cdot d} \quad \text{carga específica [MPa]}$$

$$\psi = \frac{D - d}{d} \quad \text{folga relativa do mancal}$$

$$\eta \quad \text{viscosidade dinâmica [Pas]}$$

$$\omega \quad \text{velocidade rotacional [s⁻¹]}$$

Valores normais para o numero Sommerfeld estão entre 1 e 15.

3.2 - Resultados da Simulação

Os resultados dos cálculos feitos usando o programa de computador são apresentados através de diagramas que contém varias curvas para tamanhos físicos. A próxima seção apresenta como exemplo de simulação um resumo de alguns resultados e alguns gráficos. Com relação a influencia da velocidade rotacional, pode-se afirmar que uma velocidade maior tem um efeito positivo na capacidade de carregamento de carga porque a largura da folga mínima aumenta quando a velocidade aumenta, conforme mostra a figura 2. No caso do mancal usado como exemplo aqui, com diâmetro de 250 mm, 1‰ de folga operacional e uma carga de 0,5 MPa, a folga mínima reduz de 8 µm para 2 µm após a redução de velocidade de 480 1/min para 100 1/min.

Um exame da relação largura/diâmetro demonstrou que quanto maior a relação b/d maior será as folgas de lubrificação (Figura 3). Mas a influencia é apenas pequena nesse caso. No caso do mancal mencionado com diâmetro de 250 mm, a folga do mancal de 1‰ e uma carga de 0,5 Mpa, a diferença entre a largura do mancal com b/d = 0,8 e um com b/d = 1,0 somente chega a 1 µm.

A influência do **fator tamanho $H_{\min}/(D-d)$** na folga mínima de lubrificação está mostrada na figura 4. Resultados obtidos com a ajuda de uma folga de lubrificação “adimensional” mostra que o numero Sommerfeld não depende somente nas dimensões absolutas do mancal. As mínimas folgas de lubrificação dos mancais que são similares do ponto de vista geométrico são independentes do tamanho dos mancais. É evidente que sob as mesmas condições operacionais, a folga de lubrificação “adimensional” $H_{\min}/(D-d)$ tem o mesmo resultado para qualquer tamanho de mancal.

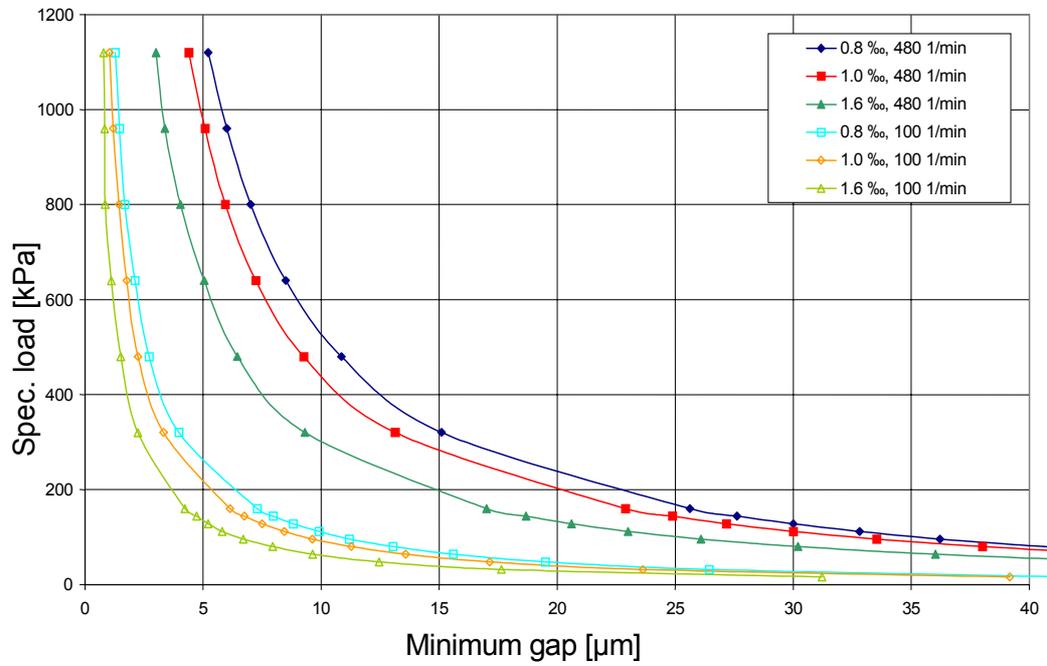


Figura 2 Influência da velocidade rotacional: carga específica como função da folga mínima para $d = 250$ mm e $b/d = 1.0$

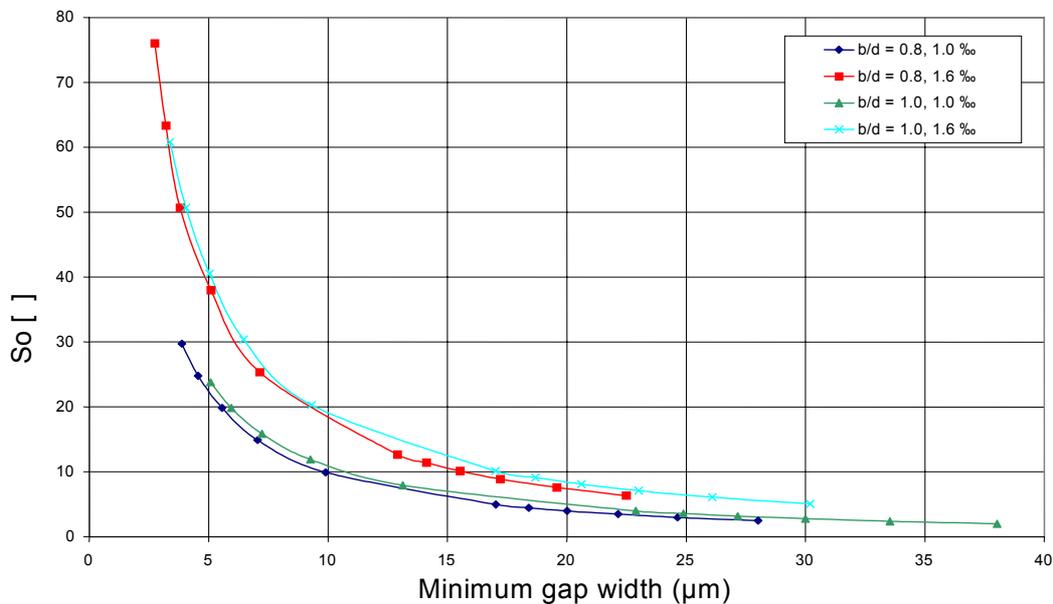


Figura 3: Influência da relação b/d . Numero Sommerfeld como função da folga mínima para $d = 250$ mm e $n = 480$ 1/min

Com a ajuda dos diagramas agora é possível chegar a uma conclusão quanto à folga teórica mínima esperada. Com os parâmetros de entrada (por exemplo, carga, número de revoluções, viscosidade da água, folga do mancal e os parâmetros geométricos do mancal) DEVA pode prever a confiabilidade operacional com relação a condição em regime estável do mancal.

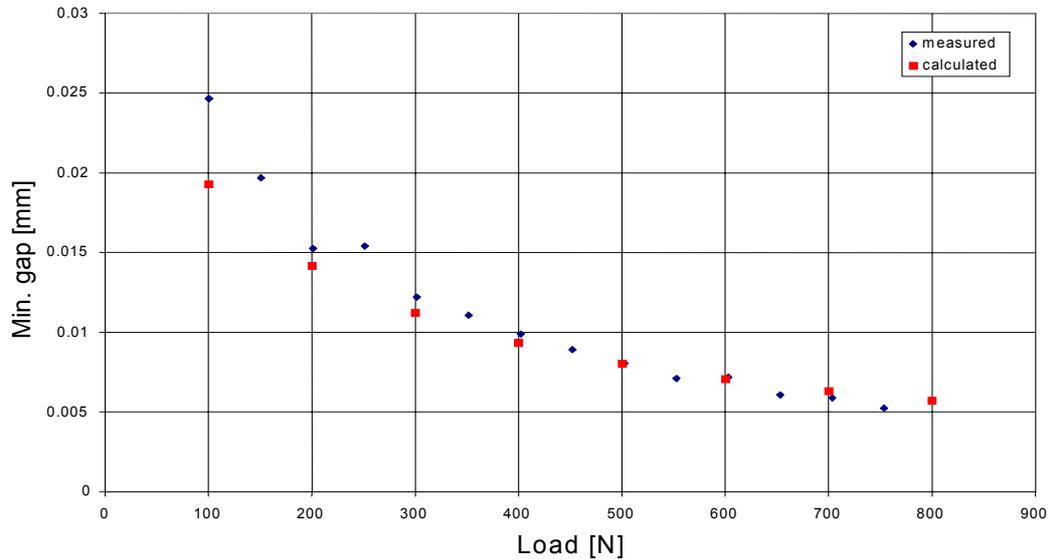


Figura 4: Folga mínima de lubrificação h_{\min} . Comparação entre o cálculo teórico e o medido em banco de teste

A comparação entre a folga mínima calculada e a medida h_{\min} é mostrada na Figura 5. O valor medido é determinado a partir dos valores h_1 e h_2 como mencionado acima. Há uma pequena diferença entre as duas curvas no caso de cargas baixas e grandes folgas resultantes. Mas, fora isso, há uma grande conformidade entre os dados calculados e os medidos.

4.0 – LISTA DE REFERÊNCIAS:

País	Hidrelétrica	Turbina Tipo	Potencia (kW)	Comiss.	Cliente	Eixo dia (mm)
Suécia	Äglund	Kaplan	6400	1988	GE Sweden	350
Alemanha	Ay I	Francis	408	1980	Voith	240
Italia	Arcy	Kaplan	2600	1992		
Alemanha	Bayerbach	Francis	96	1977	Voith	150
Alemanha	Calenberg	Francis	523	1980	Voith	245
Alemanha	Dellmensingen	Francis	75	1975	Voith	150
Polonia	Dobcyce	Kaplan		1995		
Alemanha	Dreiwerden	Francis	270	1997	WKA	320
Alemanha	Echthausen	Kaplan	830	1996	WKA	270
Luxemburgo	Esch-Sauer 4	Kaplan	430	1997	WKA	225
Alemanha	Ettringen	Kaplan	720	1996	WKA	300
Alemanha	Forst			2000	WKA	320
Suécia	Furudal	Propeller	1950	1979	GE Sweden	350
Alemanha	Gronau	Francis	195	1975/2000	Voith/WKA	220
Alemanha	Herbitzheim	Francis	152	1975	Voith	220
Noruega	Högfors	Kaplan	6800	1988	GE Sweden	450
Alemanha	Kempten	Francis	368	1974	Voith	220
Alemanha	Kemptenwoll	Francis	606	1976	Voith	245
Alemanha	Kiefersäge	Francis	69	1975	Voith	128
Alemanha	Landauer	Francis	45	1974	Voith	128
Alemanha	Lengham	Francis	81	1979	Voith	150
Alemanha	Limmritz	Francis		1997	WKA	225
Alemanha	Luisenthal	Francis	81	1979	Voith	150
Alemanha	Marburg	Kaplan	100	1991	WKA	214
Suécia	Maredfors	Kaplan	2500	1989	GE Sweden	350
Alemanha	Möckmühl	Francis	100	1981	Voith	150
Alemanha	Mosermühle	Francis	71	1977	Voith	150
Alemanha	Münsterhaus.	Francis	40	1980	Voith	130
Alemanha	Neckarst. II	Kaplan	2200	1999	WKA	420
Alemanha	Niedermühle	Francis	103	1977	Voith	150
Alemanha	Oberbaumühle	Francis	62	1979	Voith	128
Hungria	Oroszlany	Kaplan	500	1994		
Finlandia	Pyhäskoski I	Kaplan	37600	Nov 98	D Power Engineer	760
Alemanha	Rainmühle	Francis	414	1980	Voith	220
Alemanha	Rittersdorf	Francis	24	1981	Voith	128
Alemanha	Röttweilwehr	Francis	100	1975	Voith	128
Italia	Spigno	Francis	4500	1995		
Alemanha	Steinerbrückl	Francis	48	1981	Voith	128
Alemanha	Ulm – Wibling.	Francis	48	1968	Voith	250
Alemanha	Unkelmühle II	Francis	220	1988	Voith	
Alemanha	Unterreichenb.	Francis	48	1981	Voith	150
Alemanha	Untertürkheim	Francis	268	1982	Voith	220
Alemanha	Waldstettenw.	Francis	244	1977	Voith	200
Austria	Weisshaus	Kaplan	7200	1991/1993	MCE	400

5.0 - CONCLUSÃO

Esse trabalho cobre investigações teóricas e praticas em mancal lubrificado a água usado como mancal principal de eixo principal de turbina hidráulica. A influencia da folga do mancal na folga mínima de lubrificação é

investigada, tanto quanto a influencia da velocidade de deslizamento, a relação largura/diâmetro e a folga do mancal.

Os métodos de calculo e as condições de contorno para as equações matemáticas e físicas são apresentadas. O modelo matemático demonstra a dependência da folga mínima de lubrificação da folga rel. do mancal Ψ , carga, velocidade de deslizamento e outros parâmetros. A folga "adimensional" mínima $H_{\min}/(D-d)$ é introduzida para explicar a independência do numero Sommerfeld e as dimensões do mancal.

Para verificar os resultados dos cálculos, uma bancada de testes para mancais hidrodinâmicos foi construído na Federal Mogul Deva GmbH. A folga mínima de um mancal de teste de 40 mm de diâmetro interno foi definida sob condições pré-determinadas. Uma boa combinação entre os cálculos teóricos e as medições na bancada de teste foi conseguida.

Os resultados das investigações teóricas, as experiências na bancada de testes somadas a experiência resultante da instalação de mancais fabricados com o material deva.metal® com lubrificação a água em mancais principais de turbinas hidráulicas em mais de 100 hidrelétricas nos últimos 30 anos, habilitam a Federal Mogul Deva GmbH a disponibilizar essa solução técnica confiável a seus clientes tanto para turbinas novas como para reformas.

6.0 - LEITURA RECOMENDADA:

- [1] Design of specifications for HBV equipment in hydroelectric power stations pursuant to article 19 g WHG, Association of German Electric Power Stations (VDEW), 1992.
- [2] General administrative regulation concerning more detailed ascertainment of water hazardous materials and their classification according to hazard. Federal Republic of Germany, Joint Ministerial Pamphlet (GMBI) 41 (1990) No.8.
- [3] Grupp, H.: Biologically degradable lubricants; ALLIANZ Report 69 (1996), issue 3.
- [4] Schwarze, H., Prof. Dr. Ing.: DEVA water lubricated main bearings in hydraulic machines, 1999

7.0 - O AUTOR:

Paulo Sergio Martins Pereira

Nascido na cidade de São Paulo em 10 de Julho de 1959.

Graduação (1984) em Engenharia Mecânica: Universidade Católica de Petrópolis

Empresa: Federal Mogul Deva GmbH – Alemanha , desde 2004 - Gerente de Aplicação – Hidrelétricas

Empresa: GGB Brasil – de 1996 a 2004 - Gerente de Vendas Industrial / Hidrelétricas