

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE MECANISMOS DE
ACIONAMENTO DE BARRAS DE CONTROLE DE
REATORES PWR

FRANCISCO LOUZANO LEME

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Reatores

Orientador:
Dr. Miguel Mattar Neto

São Paulo
2003

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE MECANISMOS DE
ACIONAMENTO DE BARRAS DE CONTROLE DE REATORES
PWR**

FRANCISCO LOUZANO LEME



**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Reatores**

**Orientador :
Dr. Miguel Mattar Neto**

**São Paulo
2003**

À minha esposa, Jenny, e aos meus filhos, Fernando e Maurício.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, cuja dedicação e esforço, permitiu que eu alcançasse uma formação superior.

Ao Dr. Miguel Mattar Neto, mais que um orientador, um grande amigo, pelo apoio, e incentivo ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do CTMSP que sempre me apoiaram e incentivaram na realização deste trabalho.

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE MECANISMOS DE ACIONAMENTO DE BARRAS DE CONTROLE DE REATORES PWR

Francisco Louzano Leme

RESUMO

Os Mecanismos de Acionamento de Barras de controle (MABs) de um reator PWR (*Pressurized Water Reactor*) são equipamentos eletro-mecânicos integrados ao seu vaso de pressão, tendo como função movimentar e posicionar as barras de controle e segurança, garantindo o controle de potência e a operação de desligamento do reator, quer seja em operação normal, quer seja em situações de emergência ou acidentais.

Os tipos de MAB utilizados em reatores PWR, mostrados neste trabalho, são o Porca-Rolante (*Roller Nut*), e o Macaco Magnético (*Magnetic Jack*), cujas descrições detalhadas individuais são apresentadas.

O ambiente onde os MABs desempenham as funções operacionais citadas acima inclui o contato com o fluido de processo do interior do reator e as características químicas associadas a ele, o campo de radiação junto ao núcleo e também as condições de temperatura e pressão do vaso do reator. Assim são destacados os requisitos de projeto dos MABs associados às suas funções de segurança.

Para finalizar, são destacados aspectos relacionados ao projeto mecânico e estrutural dos MABs num estudo de caso, considerando os MABs de uma planta nuclear experimental PWR do CTMSP (Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo). O projeto e desenvolvimento desses equipamentos é discutido, incluindo aspectos relativos a construção e testes dos protótipos.

DEVELOPMENT AND DESIGN OF CONTROL ROD DRIVE MECHANISMS FOR PRESSURIZED WATER REACTORS.

Francisco Louzano Leme

ABSTRACT

The Control Rod Drive Mechanisms (CRDM) for a Pressurized Water Reactor (PWR) are equipments, integrated to the reactor pressure vessel, incorporating mechanical and electrical components designed to move and position the control rods to guarantee the control of power and shutdown of the nuclear reactor, during normal operation, either in emergency or accidental situations.

The type of CRDM used in PWR reactors, whose detailed individual description will be presented in this monograph are the Roller-Nut and Magnetic-Jack.

The environment, where the CRDM performs its above presented operational functions, includes direct contact with the fluid used as coolant peculiar to the interior of the reactor, and its associated chemical characteristics, the radiation field next to the reactor core, and also the temperature and pressure in the reactor pressure vessel. So the importance of the CRDM design requirements related to its safety functions are emphasized.

Finally, some aspects related to the mechanical and structural design of CRDM of a case study, considering the CRDM for a PWR from the experimental nuclear plant to be applied by CTMSP (Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo), are pointed out. The design and development of these equipments are discussed, including aspects related to construction and tests of the prototypes.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Posicionamento do Tema.....	01
1.2 Fundamentos Teóricos.....	02
1.3 Histórico.....	09
1.4 Objetivos.....	10
2 MABs de REATORES PWR.....	12
2.1 Tipos de MABs utilizados e seus Aspectos Funcionais.....	12
2.2 Funções e Classificações quanto a Segurança Nuclear.....	23
2.3 Descrição dos Componentes Principais	24
2.4 Seleção de Materiais – Composição e Critérios Gerais de Seleção.....	25
3 CÓDIGOS E NORMAS APLICÁVEIS AO PROJETO.....	31
3.1 Critérios Gerais de Projeto de Plantas Nucleares Relacionados aos MABs.....	32
3.2 Requisitos de Projeto para os Componentes Elétricos.....	34
3.3 Demonstração do Atendimento dos Requisitos de Segurança e dos Critérios de Projeto.....	35
4 INTEGRIDADE ESTRUTURAL.....	38
4.1 Influência dos Requisitos Estruturais no Projeto Mecânico.....	38
4.2 Desgaste, Fadiga e Corrosão.....	39
5 PROJETO MECÂNICO-MAB de PLANTAS NUCLEARES QUE OPERAM NO BRASIL.....	50
5.1 MAB da Usina Nuclear de Angra 1.....	50
5.2 MAB da Usina Nuclear de Angra 2.....	51

5.3	Comentários sobre os Projetos de Angra 1 e Angra 2.....	52
6	MAB da PLANTA PWR DO CENTRO TECNOLÓGICO DA MARINHA EM SÃO PAULO.....	54
6.1	Introdução.....	54
6.2	Breve Histórico do Desenvolvimento.....	54
6.3	Passos Principais para o Desenvolvimento do Projeto.....	55
6.4	Requisitos Operacionais.....	57
6.5	Seleção de Materiais.....	57
6.6	Desenvolvimento do Projeto Eletromecânico do MAB.....	58
6.7	Construção do Primeiro Protótipo Básico.....	62
6.8	Bancada de Teste Completa - Ensaios com o Protótipo Completo.....	74
6.9	Ensaios Desenvolvidos na Bancada de Testes Completa.do MAB.....	76
7	CONCLUSÕES.....	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIG.1.1 Elemento Combustível Típico de Reator PWR.....	06
FIG.1.2 Aranha com os Elementos de Controle.....	06
FIG.1.3 Corte de um Reator - PWR –Típico.....	07
FIG.1.4 Detalhes do Tampo de um Reator - PWR –Típico.....	07
FIG.1.5 Diagrama de Blocos do Sistema de Controle de um Reator PWR.....	08
FIG.2.1 Conjunto do MAB tipo Porca Rolante.....	14
FIG.2.2 Vista Explodida do Conjunto Rotor Bipartido e Haste.....	15
FIG.2.3 Rotor Bipartido.Conjunto.....	15
FIG.2.4 MAB tipo Macaco Magnético (Angra 1).....	17
FIG.2.5 Detalhes do Mecanismo do MAB – Macaco Magnético.....	18
FIG.2.6 Detalhe da posição das travas (haste fixa) – Macaco Magnético.....	19
FIG.2.7 Detalhe da posição das travas (subida da haste) – Macaco Magnético.....	19
FIG.2.8 Detalhe da posição das travas (descida da haste) – Macaco Magnético.....	20
FIG.2.9 Detalhe da posição das travas (inserção rápida da haste) – Macaco Magnético.....	20
FIG.4.1 Área de contato entre a haste de acionamento e o braço de trava....	40
FIG.4.2 Área desgastada do braço de trava.....	44
FIG.4.3 Exame microscópico da região principal de desgaste.....	45
FIG.4.4 Exame microscópico da região principal de desgaste.....	45
FIG.4.5 Correlação entre a profundidade de. de desgaste da trava e n° de passos.....	46
FIG.4.6 Correlação entre a taxa de desgaste com o tempo médio entre dois passos consecutivos.....	47

LISTA DE FIGURAS (continuação)

		Página
FIG.4.7	Determinação do valor $n=0,65$ usando o processo dos mínimos Quadrados.....	48
FIG.4.8	Correlação entre as observações obtidas na experiência de operação e o circuito fechado de teste.....	49
FIG.5.1	MAB de Angra 2.....	53
FIG.6.1	Diagrama de Blocos – Passos Principais do Desenvolv. /Projeto	56
FIG.6.2	Detalhe do modelo do rotor bipartido.....	59
FIG.6.3	Detalhe do modelo do tubo do rotor.....	59
FIG.6.4	Montagem do rotor bipartido com o tubo do rotor.....	60
FIG.6.5	Conjunto mecânico do MAB completo.....	61
FIG.6.6	Tubo do estator em aço.....	62
FIG.6.7	Dispositivo de ensaio do MAB.....	63
FIG.6.8	Rotor bipartido em aço.....	64
FIG.6.9	Montagem do rotor bipartido com molas.....	65
FIG.6.10	Atuação do Anel Sincronizador.....	66
FIG.6.11	Posicionamento do Anel de Sincronização.....	67
FIG.6.12	Montagem do Anel de Sincronização.....	68
FIG.6.13	Rotor bipartido e componentes para montagem dos roletes.....	69
FIG.6.14	Detalhes do tubo do rotor em aço.....	70
FIG.6.15	Dispositivo para medição do esforço de atracamento.....	71
FIG.6.16	Gráfico – torque máximo em função da corrente.....	73
FIG.6.17	Seção de ensaios da bancada de testes.....	75
FIG.6.18	Gráfico – posição em função do tempo no movimento de <i>scram</i>	76
FIG.6.19	Conjunto dahaste do MAB com proposta de modificação.....	77
FIG.6.20	Detalhes da Modificação do Tirante.....	78

LISTA DE TABELAS

	página
TAB.6.1	Leituras do Ensaio de Torque Máximo do MAB..... 73
TAB.6.2	Características químicas da água de processo da bancada..... 75
TAB.6.3	Características funcionais da bancada de testes do MAB..... 75

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ANS = American Nuclear Society
- ANSI = American National Standards Institute
- ASME = American Society of Mechanical Engineers
- ASTM = American Society for Testing and Materials
- CTMSP = Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
- IEEE = Institute of Electrical and Electronics Engineers
- MAB = Mecanismo de Acionamento de Barras de Controle de um Reator Nuclear
- PWR = Pressurized Water Reactor
- VPR = Vaso de Pressão do Reator

NOTAÇÕES

- ρ = Reatividade de um reator nuclear
- k = Fator de multiplicação de um reator nuclear
- i_t = Corrente de oxidação no processo de passivação do aço inox
- i_0 = Constante da equação da corrente de oxidação
- t = Variável de tempo
- t_0 = Constante da equação da corrente de oxidação
- n = Variável da equação da corrente de oxidação, expoente do tempo
- W = Profundidade de desgaste em um braço de trava de um MAB tipo Macaco Magnético
- N = Número de passos de movimentação de um MAB tipo Macaco Magnético
- K_i = Constantes para ajuste da curva de desgaste W
- Q = Quantidade de material retirado no processo de despassivação do aço inox

1 INTRODUÇÃO

Os mecanismos de acionamento de barras de controle (MABs) dos reatores nucleares refrigerados por água pressurizada (Pressurized Water Reactor, PWR) são equipamentos eletro-mecânicos integrados ao vaso de pressão do reator nuclear (VPR), tendo como função movimentar verticalmente as barras de controle ao longo da altura do núcleo, bem como posicioná-las em qualquer ponto com segurança, garantindo o controle de potência e a operação de desligamento, quer seja em operação normal, ou em situações de emergência (Freund,1963).

1.1 Posicionamento do Tema

No projeto de um reator PWR o MAB apresenta-se como um equipamento de elevada importância, merecendo atenção especial, por ser um item associado ao controle de potência e ao desligamento seguro do reator, funções que exigem confiabilidade e segurança, demandando do projetista um conhecimento tecnológico aliado a uma boa experiência de fabricação.

O projetista mecânico, de forma geral, precisa ter domínio das atribuições e aplicações da máquina ou equipamento que está projetando, das suas funções e requisitos de projeto, como materiais, regime de trabalho, solicitações estruturais dinâmicas e estáticas, além de uma estimativa da vida útil do equipamento.

No caso específico de um equipamento aplicado a uma planta nuclear, como acontece com os MABs, a confiabilidade relativa ao funcionamento de um equipamento em desenvolvimento só é obtida após exaustivos ensaios de qualificação com diversos protótipos, os quais representarão uma amostragem confiável de todos os tipos de problemas que possam surgir durante a vida útil do equipamento.

Essa confiabilidade bem como o sucesso na fabricação seriada e respectivo processo de fabricação só será possível, após o ensaio de algumas unidades.

1.2 Fundamentos Teóricos

Num reator nuclear de potência PWR processa-se a conversão de energia gerada pelas reações nucleares de fissão em energia elétrica. Assim, é necessário manter as reações nucleares controladas, a remoção do calor dessas reações e a sua transformação em energia elétrica.

Com a ocorrência das reações nucleares vai havendo o consumo de material fissil. Desse modo é necessário que o mesmo seja reabastecido periodicamente. Isso significa que este reator, logo após uma operação de recarga, possui material fissil em quantidade e densidade maior do que o necessário para simplesmente manter uma reação em cadeia estável.

Considera-se que, quando um reator mantém estável a reação em cadeia ele está na condição crítica, e apresenta reatividade nula. Qualquer adição de material fissil é considerada uma adição de reatividade, levando o reator a uma condição de supercriticalidade, e qualquer remoção de material fissil é considerada uma remoção de reatividade, levando o reator para uma condição de subcriticalidade.

Em termos matemáticos a reatividade é definida como sendo o desvio fracional do fator de multiplicação de um reator, isto é :

$$\rho = \frac{k-1}{k} \quad (1.1)$$

onde k é o fator de multiplicação do reator, ou seja, o número líquido de nêutrons produzidos no núcleo, dividido pelo número de nêutrons absorvidos (Glasstone & Sesonske, 1981) , (Lamarsh, 1966).

Dizer que um reator é crítico, significa que o mesmo tem $k=1$ e $\rho=0$, neste caso podemos dizer que o número de nêutrons produzidos é igual ao número de nêutrons absorvidos.

Se $\rho>0$ (reatividade positiva) significa que $k>1$ e portanto número de nêutrons produzidos é maior que o número de nêutrons absorvidos.

Se $\rho<0$ (reatividade negativa) significa que $k<1$ e portanto número de nêutrons produzidos é menor que o número de nêutrons absorvidos.

Existem dois modos de inserir reatividade positiva em um reator. A primeira é adicionando material fissil, e a segunda é retirando absorvedores de nêutrons.

Por outro lado, existem duas formas de inserir reatividade negativa em um reator: a primeira é retirando material físsil, e a segunda é adicionando material absorvedor de nêutrons.

É por meio da inserção e remoção de reatividade que é controlada a potência desenvolvida em um reator nuclear.

Para compensar a adição de material físsil, que funciona como um gerador de nêutrons, faz-se necessário adicionar, um material absorvedor de nêutrons, isto é, toda vez que se coloca uma quantidade positiva de reatividade, é necessário inserir uma quantidade negativa (de mesmo valor), a fim de ser mantida a reatividade nula, e conseqüentemente o reator na condição crítica (sob controle).

Para que um reator nuclear seja mantido nas condições de economia otimizada, é importante que a quantidade de material físsil inserido nas operações de recarga seja a máxima possível, (dentro dos padrões estabelecidos para a instalação). Portanto para manter a reatividade nula do reator deve-se inserir, também uma quantidade equivalente de material absorvedor de nêutrons. Esta reatividade negativa, chamada de reatividade de controle, é utilizada para quatro finalidades:

- a) compensar a queima de material físsil (combustível nuclear)
- b) permitir o ajuste do nível de potência do reator, fazendo com que o mesmo siga as demandas de potência estabelecidas pelas redes de consumo.
- c) Permitir o controle da distribuição de potência no interior do núcleo, evitando gradientes que possam comprometer a integridade do núcleo.
- d) Assegurar o desligamento do reator quando for detectada uma condição insegura da instalação.

Os métodos adotados para controle de potência de um reator nuclear podem ser (Lamarsh, 1966):

- a) adição de boro solúvel
- b) utilização de veneno queimável
- c) movimentação de barras absorvedoras (elementos de controle)

O boro é um absorvedor de nêutrons. Controlando-se a sua concentração no fluido de processo pode-se controlar, também a reatividade, e,

portanto a potência do reator. Em reatores PWR existem, muitas vezes, sistemas de injeção de boro na água de processo para auxiliar no controle de potência. Deve-se ressaltar, porém, que a atuação desse sistema tem uma resposta mais lenta no controle de potência, comparando com a movimentação de barras de controle (Glasstone & Sesonske, 1981).

Veneno queimável é o nome que se dá a um material que é colocado dentro do reator, com a finalidade de absorver nêutrons no início da operação do mesmo, e que devido a absorção de nêutrons vai sendo consumido, à medida que o reator opera (por esse motivo chamado de queimável).

Entre os métodos acima apresentados, a movimentação de barras de controle é o mais adequado para mudança de potência. Em geral, estas barras de controle são constituídas de tubos metálicos de pequeno diâmetro – conforme indicado na fig. 1.1 e 1.2 contendo no seu interior substância absorvedora de nêutron, como é o caso da liga Prata-Índio-Cádmio (Ag-In-Cd), ou Háfnio metálico, ou carbeto de boro (B_4C) compactado.

A movimentação das barras de controle é feita através de mecanismos chamados mecanismos de acionamento de barras – MAB.

Existem vários tipos de MABs, sendo classificados em dois grandes grupos:

a)MAB para reatores abertos (não pressurizados)

b)MAB para reatores pressurizados

Cada um é específico para um determinado tipo de reator.

O MAB objeto de estudo deste trabalho refere-se ao aplicado a um reator tipo PWR, portanto, MAB para reatores pressurizados.

Os MABs são equipamentos de alta precisão montados, em geral, no reatores PWR em bocais localizados no tampo superior do VPR, conforme mostrado nas fig. 1.3 e fig. 1.4, onde estão conjugados componentes mecânicos que deverão operar em contato com a água de processo do circuito de refrigeração do reator. O caráter severo desta aplicação impõe além de um cuidado especial na especificação de ajustes, tolerâncias e acabamento de superfície, uma seleção criteriosa de materiais capazes de suportar não só as condições de radiação nuclear, mas também resistir a pressões da ordem de 17 N/mm² e temperaturas da ordem de 350 °C além das características químicas

associadas ao fluido de processo do reator. Além disso, parte dos MABs compõem a barreira de pressão do sistema de refrigeração do reator tendo que desempenhar, também, as funções de segurança relacionadas a essa participação.

É importante ressaltar que os MABs estão, também, associados às operações de desligamento seguro do reator onde ocorre a inserção rápida das barras de controle e segurança no núcleo (Glasstone & Sesonske, 1981).

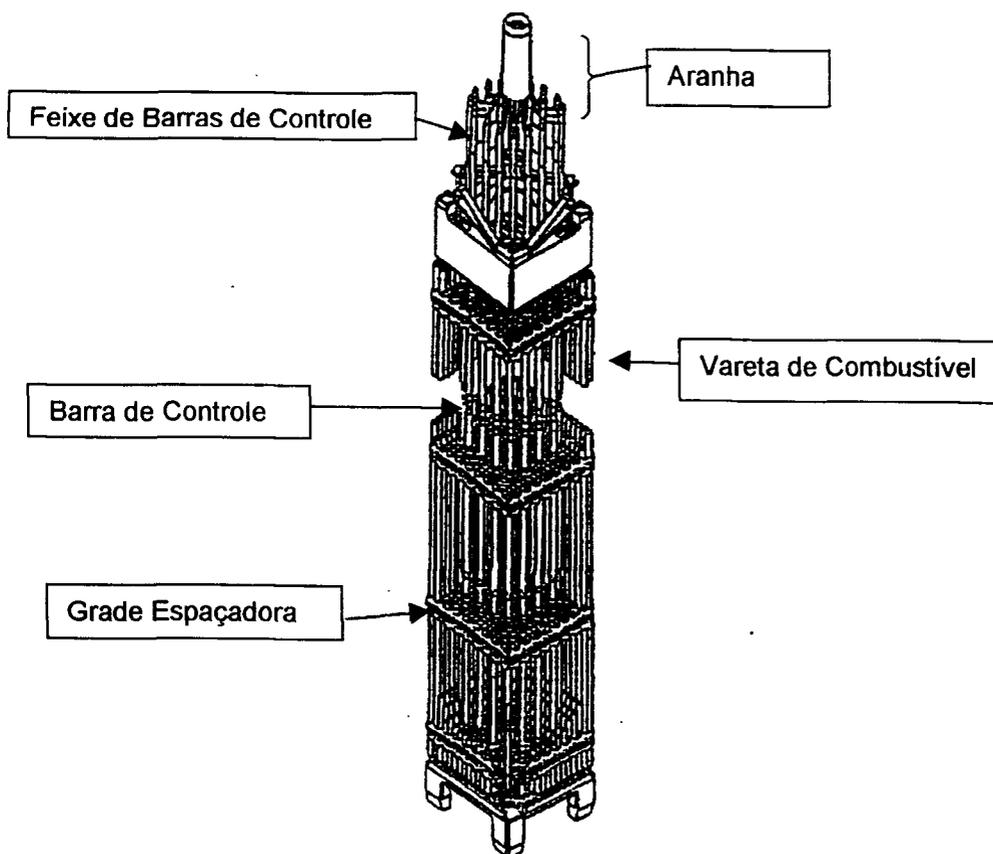
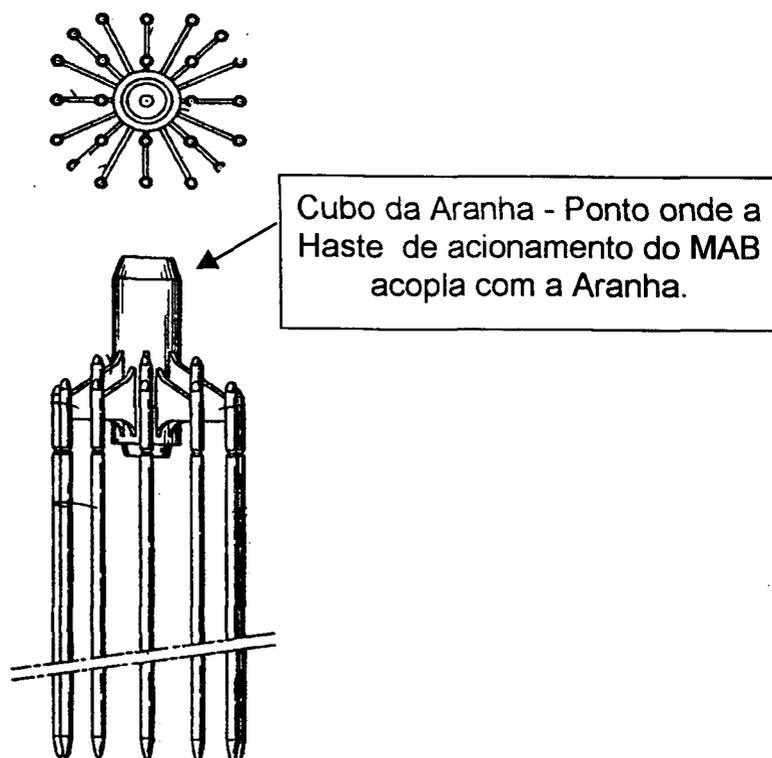


FIGURA 1.1. Elemento Combustível Típico de Reator PWR (feixe de varetas combustível +varetas de controle)



Cubo da Aranha - Ponto onde a Haste de acionamento do MAB acopla com a Aranha.

FIGURA 1.2. Aranha com os Elementos de Controle

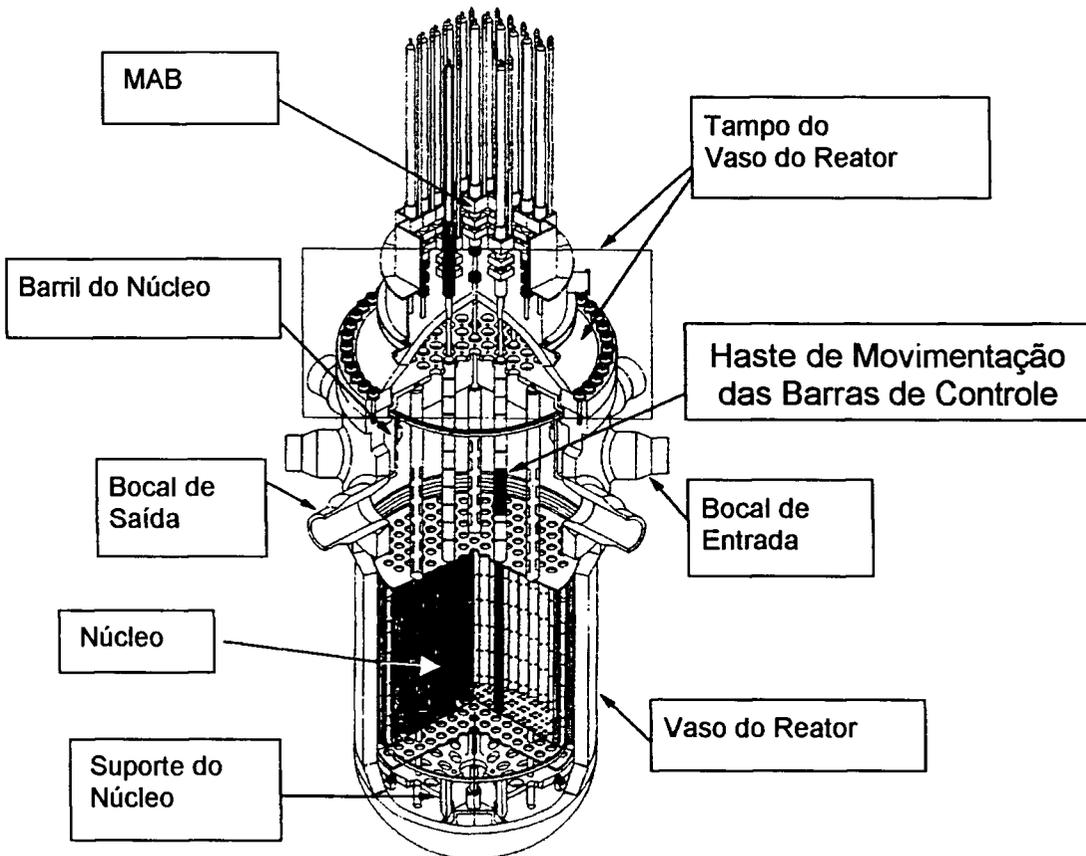


FIGURA 1.3. Corte de um Reator - PWR -Típico

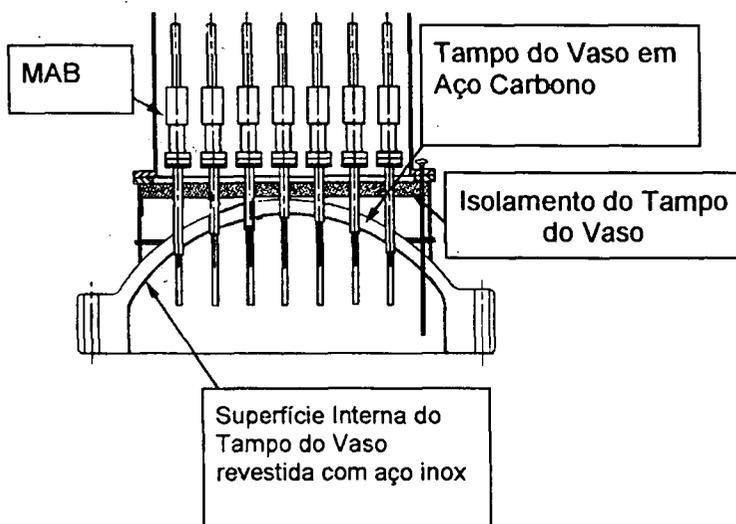


FIGURA 1.4. Detalhes do Tampo de um Reator - PWR -Típico

Os MABs fazem parte, também, do sistema de controle de um reator PWR.

O aspecto geral desse sistema, pode ser observado no diagrama de blocos apresentado na fig. 1.5 (Glasstone & Sesonske, 1981):

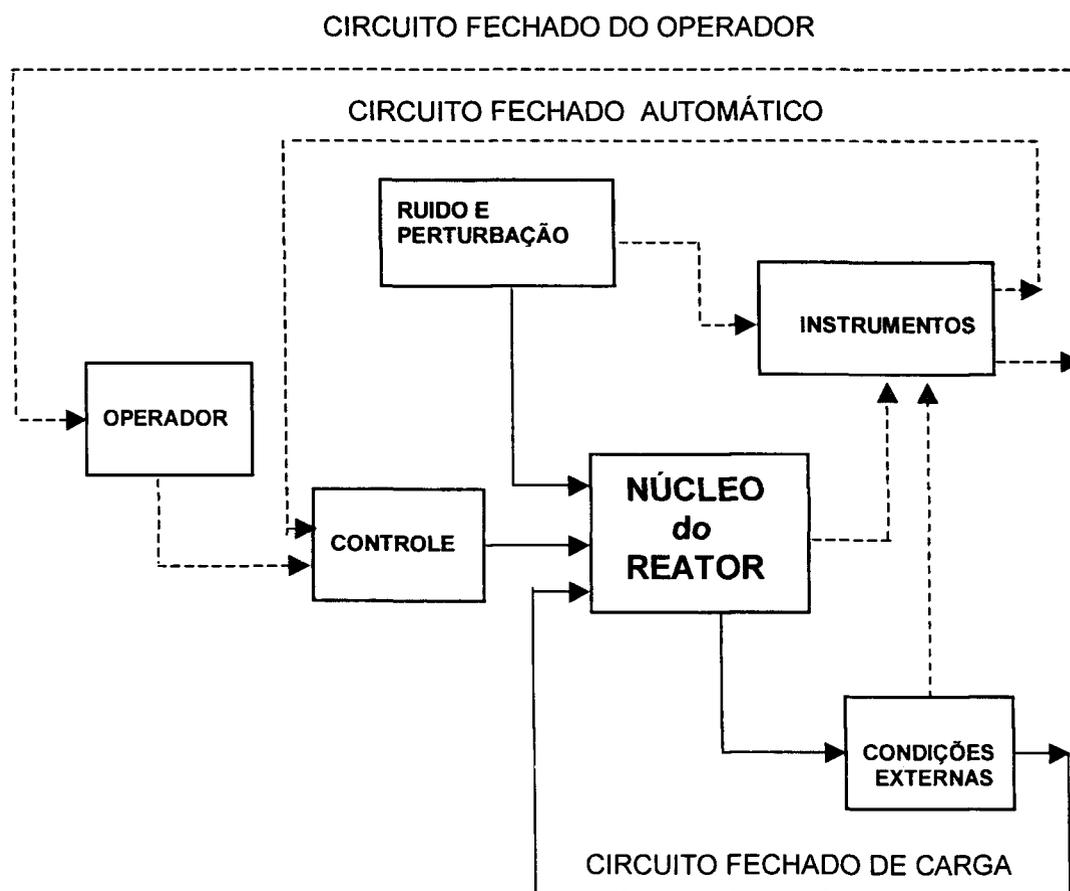


FIGURA 1.5. Diagrama de Blocos do Sistema de Controle de um Reator PWR

As setas indicam o sentido do fluxo de informações e ações. As linhas tracejadas significam fluxo de informações, enquanto que a linha cheia representa transmissão de potência para alimentar servo-atuadores como é o caso dos MABs. Seguindo as linhas que representam o circuito fechado do operador é possível observar que o reator afeta certos instrumentos que passam informações para o operador. Este último recebe a informação e por sua vez exerce ação apropriada ou envia um sinal para o bloco de controle.

É função do bloco de controle exercer a ação de controle desejada sobre o reator, usualmente com consumo de potência de uma fonte externa. No circuito fechado automático a informação recebida do reator pelos instrumentos é

introduzida diretamente para o bloco de controle, deixando o operador fora do circuito.

Um terceiro circuito fechado, mostrado no diagrama como circuito fechado de carga, tem a finalidade de representar as interações dos aspectos nucleares do reator, isto é, do elemento combustível, do moderador, e do refletor, com as condições externas ou aspectos não nucleares. Entre estes últimos pode-se incluir situações tais como a demanda da turbina que pode afetar a temperatura no núcleo e portanto afetar a reatividade, e também as condições das instalações de processo tal como água, ar e eletricidade são essenciais para a operação e que podem ser vistas, em termos gerais, como a carga no reator. O ciclo fechado no diagrama de blocos implica que a carga pode afetar o reator que por sua vez, influencia a carga. As mudanças nas condições externas são indicadas nos instrumentos apropriados e as informações mandadas de volta para o bloco de controle via operador e circuito fechado automático, de tal forma que qualquer ação necessária pode ser aplicada.

O bloco com o título “Ruído e Perturbações”, representa a possibilidade de variação randômica de qualquer grandeza física envolvida com o processo (ruído) bem como algum efeito não esperado e de grande intensidade (perturbação).

O conjunto dos MABs encontra-se localizado no bloco com o título “controle”, o qual quando receber um sinal de entrada vindo do circuito fechado automático ou do circuito fechado do operador irá reposicionar as barras interferindo no bloco correspondente ao núcleo do reator, onde estão montados os conjuntos das barras de controle (aranha + barras de controle).

1.3 Histórico

Desde o final da década de 40 quando se iniciou a pesquisa com reatores de potência, os MABs são objeto de preocupação como equipamentos mecânicos de precisão com alta confiabilidade.

Estas preocupações já refletiam os requisitos mecânicos e elétricos que deveriam ser atendidos diante das necessidades de reatores PWR, como pode ser visto no trabalho sobre problemas em projetos de MABs apresentado no *American Nuclear Society Meeting* em outubro de 1957 (Gerts & Flaherty, 1957)

As primeiras idéias sobre a concepção de funcionamento dos mecanismos podem ser constatadas através de consultas em patentes solicitadas desde essa época, onde pode ser observado a complexidade dos primeiros protótipos (U.S. Patent : Roman et alli, 1957); (U.S. Patent : Frisch, 1964); (U.S. Patent : DeWeese, 1975); (U.S. Patent : Lichtenberger, 1974); (U.S. Patent : Anikin et alli, 1980); (U.S. Patent : Brooks et alli, 1978); (U.S. Patent : Smith, 1984); (U.S. Patent : Tessaro, 1991); (U.S. Patent : Pysnik et alli, 1999); (U.S. Patent : Morton, 2002).

É importante ressaltar que ao longo do tempo o projeto deste tipo de equipamento nuclear adquiriu um caráter multidisciplinar, o qual envolve vários campos da tecnologia como por exemplo construção de máquinas, termo-hidráulica, circuitos elétricos aplicados em situações especiais, materiais aplicados em condições severas tanto de desgaste como de corrosão, além da tecnologia nuclear propriamente dita.

Uma questão importante que dever ser destacada é a confidencialidade envolvida no projeto dos MABs. Há poucas referências bibliográficas disponíveis sobre como são os projetos desses equipamentos e sobre os pontos fundamentais para o seu desenvolvimento (códigos e normas aplicáveis, seleção de materiais, requisitos funcionais, requisitos de fabricação e montagem, etc.). A maioria das informações disponíveis na literatura são patentes de diferentes MABs e de seu detalhes.

1.4 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo apresentar os aspectos principais do projeto e desenvolvimento mecânico e estrutural de MABs aplicados a reatores PWR, tais como: tipos de MABs, descrição de seu funcionamento, características operacionais, seleção de materiais, códigos e normas aplicáveis, etapas de desenvolvimento de um protótipo, testes de qualificação e aceitação.

Não serão, portanto, abordados detalhes e problemas de dimensionamento dos componentes estruturais e mecânicos, para não resultar em um trabalho excessivamente longo.

Esta abordagem foi considerada em um caso de estudo que é o projeto dos MABs de uma planta experimental estacionária PWR do CTMSP, que se encontra em fase de desenvolvimento, apresentada no item 6 deste trabalho.

Por meio da compilação de informações técnicas relativas aos MABs aplicados a reatores PWR, e que foram obtidas por meio do levantamento bibliográfico realizado, é possível obter uma visualização completa dos problemas a serem enfrentados e suas respectivas soluções para o desenvolvimento do projeto adequado de um MAB.

Para alcançar este objetivo é necessário considerar vários aspectos que envolvem o MAB como um equipamento auxiliar do reator, tais como aspectos de neutrônica, controle e monitoração de potência, balanço de energia, e aspectos cinemáticos. Deve-se também desenvolver uma metodologia para caracterizar o compromisso entre o projeto mecânico e estrutural com os requisitos funcionais do MAB.

Para uma concepção adequada do referido projeto, deve ser considerado também uma correta avaliação dos requisitos de integridade estrutural, como por exemplo os relacionados com barreira de pressão, desgaste, fadiga e corrosão, além de uma avaliação dos requisitos relativos aos aspectos de fabricação, inspeção e testes, bem como o gerenciamento da vida útil e do envelhecimento.

2 MABs de REATORES PWR

2.1 Tipos de MABs utilizados e seus Aspectos Funcionais

Ao contrário dos MABs de reatores abertos, tipo piscina, os MABs de reatores pressurizados apresentam maior dificuldade para sua concepção, uma vez que o conjunto de movimentação, que fica acoplado às barras de controle, deve ficar dentro de um vaso pressurizado, e a fiação elétrica, para acionamento do motor do MAB, deve ser externa ao mesmo.

O levantamento bibliográfico desenvolvido possibilitou identificar dois tipos principais de MABs aplicados a reatores do tipo PWR: Tipo Porca-Rolante (*Roller-Nut*) (U.S. Patent : Anikin et alli,1980), e o tipo Macaco-Magnético (*Magnetic-Jack*) (Deutsches Patent und Markenamt: DeWeese,1987).

Os aspectos funcionais desses dois tipos de MABs são apresentados a seguir.

2.1.1 MAB tipo Porca-Rolante:

Um MAB de reatores PWR tipo Porca-Rolante, indicado na fig. 2.1, é constituído mecanicamente por uma haste roscada sobre a qual acoplam-se quatro roletes com estrias transversais na superfície externa e eixo longitudinal inclinado em relação ao eixo da haste, o que permite um perfeito acoplamento com a rosca da haste anteriormente citada. Estes roletes estão montados internamente em um rotor bi-partido de um motor elétrico de relutância magnética, localizando-se dois em cada metade. Entre o referido rotor e o estator existe um tubo de contenção que confina a pressão interna do VPR, pois o mecanismo constituído de haste/roletes/rotor trabalha mergulhado no fluido refrigerante do reator (no caso de PWR – água de refrigeração do reator).

O acabamento superficial dos componentes dos MABs deve ser cuidadosamente especificado levando em consideração uma possível *necessidade de descontaminação superficial*.

2.1.1.1 MODOS DE OPERAÇÃO DO MAB TIPO PORCA-ROLANTE

O mecanismo de acionamento de barras de controle - MAB do tipo Porca - Rolante deverá operar do seguinte modo (U.S. Patent : Anikin et alli, 1980); (Ishida et alli, 2001); (Kusunoki et alli, 2000):

a) Operação de Inserção de barras - Ao girar o rotor bi-partido no sentido anti-horário (visto por cima do VPR), será transmitido para a haste, através dos roletes um movimento axial descendente.

b) Operação de Retirada das Barras - Ao girar o rotor bi-partido no sentido horário (visto por cima do VPR), será transmitido para a haste através dos roletes um movimento axial ascendente.

c) Operação de Manutenção das Barras - Em determinada posição- o rotor bi-partido permanece parado (sem girar). A haste permanece também travada axialmente, por estar acoplada aos roletes, pois o rotor está energizado magneticamente.

d) Operação de Inserção Rápida das barras - Nesta condição o rotor é desenergizado permitindo o desacoplamento entre roletes e haste, o que resulta na inserção rápida das barras de controle e segurança através da ação do peso do conjunto Haste+Barras de controle, auxiliado pela força de expansão da mola de compressão aplicada para essa finalidade.

A figura 2.1 apresenta um desenho de conjunto de um MAB tipo Porca-Rolante (*roller-nut*) onde estão destacados os componentes principais, ou seja:

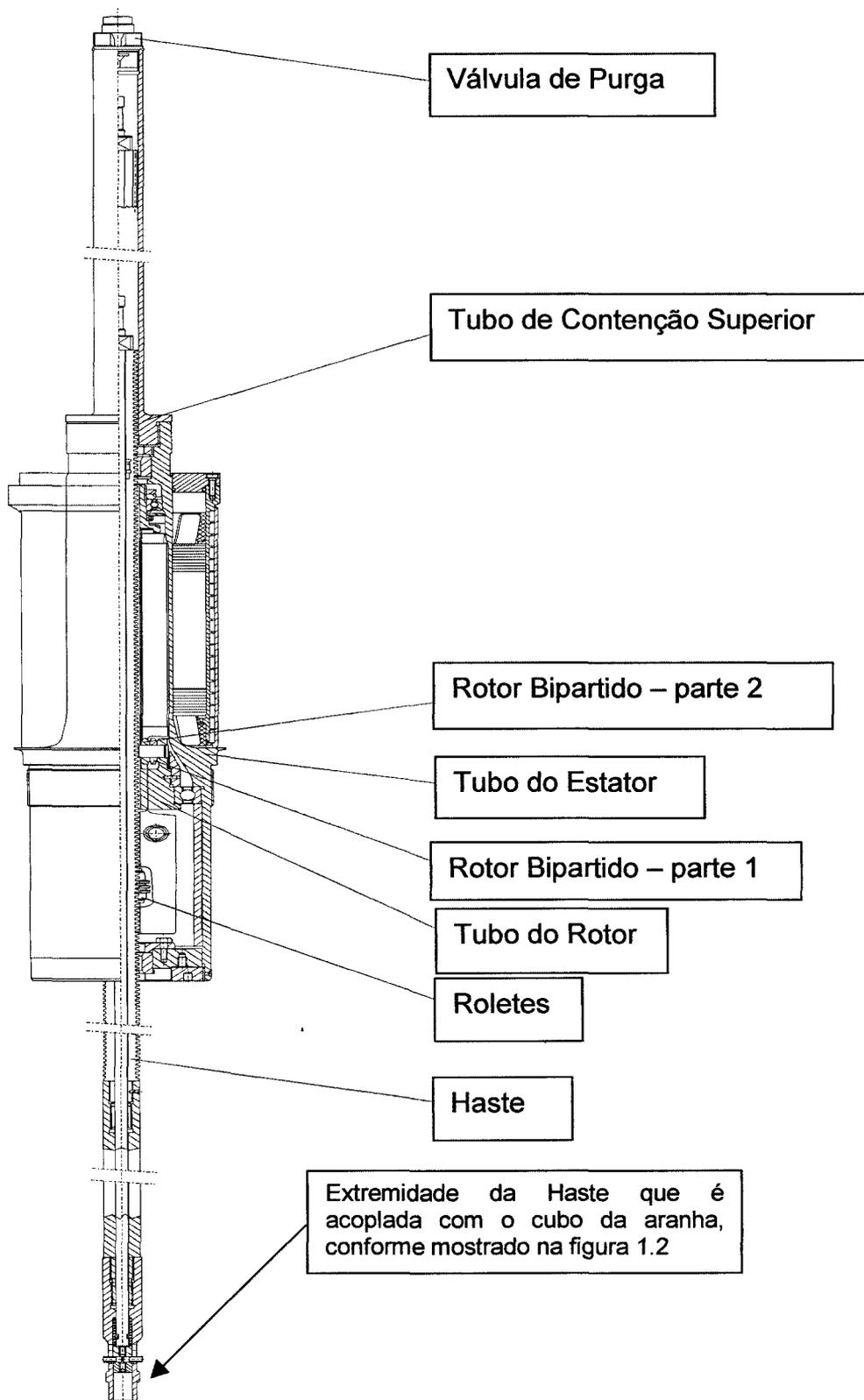


FIGURA 2.1. Conjunto do MAB tipo Porca Rolante

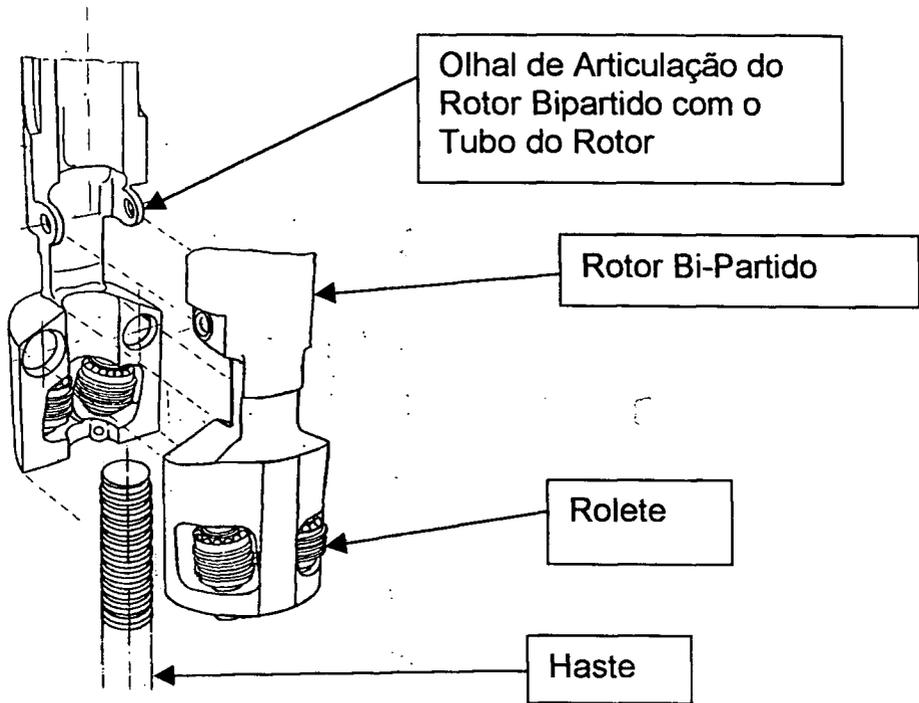


FIGURA 2.2. Vista Explodida do Conjunto Rotor Bipartido e Haste

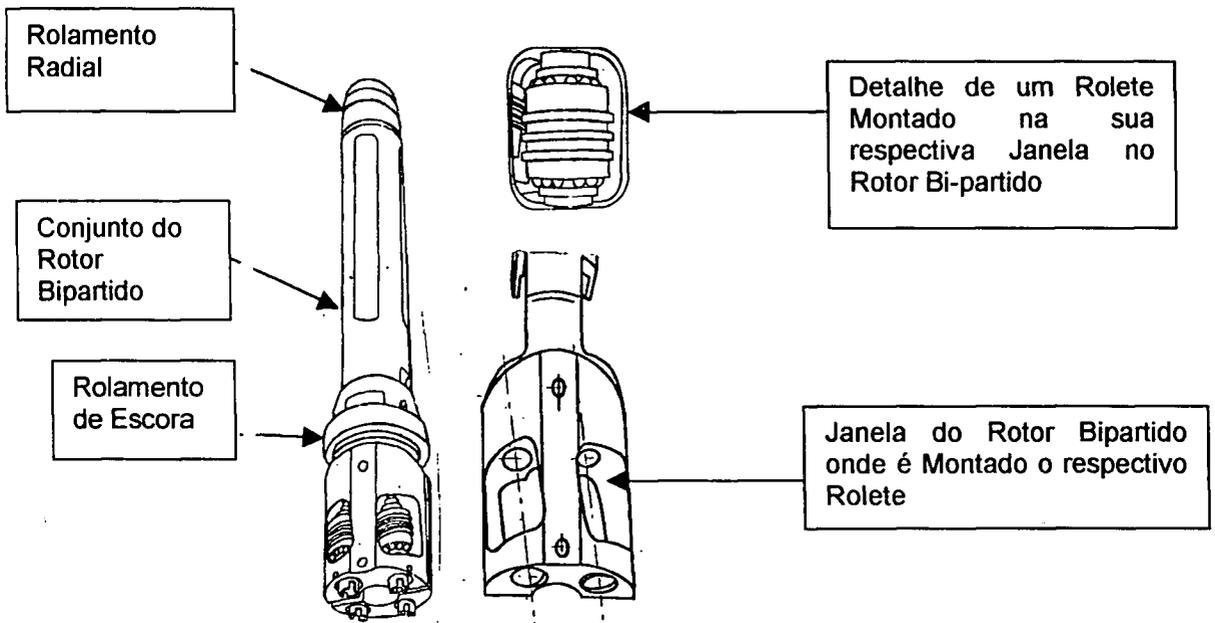


FIGURA 2.3. Rotor Bipartido Conjunto

2.1.2 MAB tipo Macaco-Magnético

O MAB do tipo Macaco-Magnético, é constituído por dois sistemas de travas acionadas por três bobinas magnéticas. Possui quatro partes principais conforme mostrado na figura 2.4:

- Barreira de pressão
- Bobinas de Movimentação
- Conjunto de catracas
- Haste de acionamento.

O princípio de funcionamento deste mecanismo baseia-se na aplicação de campos magnéticos, e é explicado a seguir, com base na figura 2.5, que mostra em detalhe as bobinas de movimentação, o conjunto de catracas e a haste de acionamento.

Os reatores PWR aplicados a plantas nucleoeletricas (usinas geradoras de energia elétrica usando como fonte primária a energia nuclear) estacionárias necessitam de uma otimização no consumo do combustível nuclear utilizado. Por isso usam como recurso para o controle de reatividade sistemas de injeção de boro, reservando os sistemas de barras de controle para situações de emergência. Assim o conjunto dos mecanismos de acionamento das barras de controle, que normalmente são do tipo Macaco-Magnético (*Magnetic-Jack*) devido a sua simplicidade construtiva, permanece na maior parte do tempo parado com as barras totalmente retiradas do núcleo. Um bom motivo para não permitir a movimentação das barras de controle no interior do núcleo é que a inserção e retirada das barras de controle provocaria indesejáveis distorções neutrônicas, acompanhadas de gradientes térmicos.

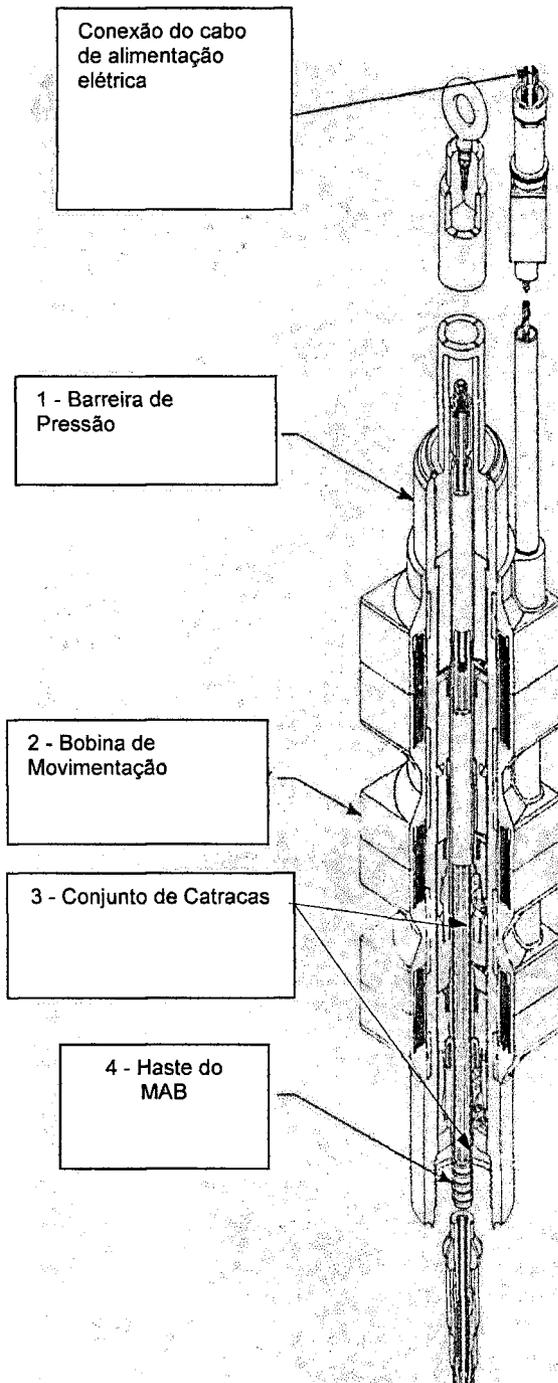


FIGURA 2.4. MAB tipo Macaco-Magnético (Magnetic-Jack) (Angra 1)

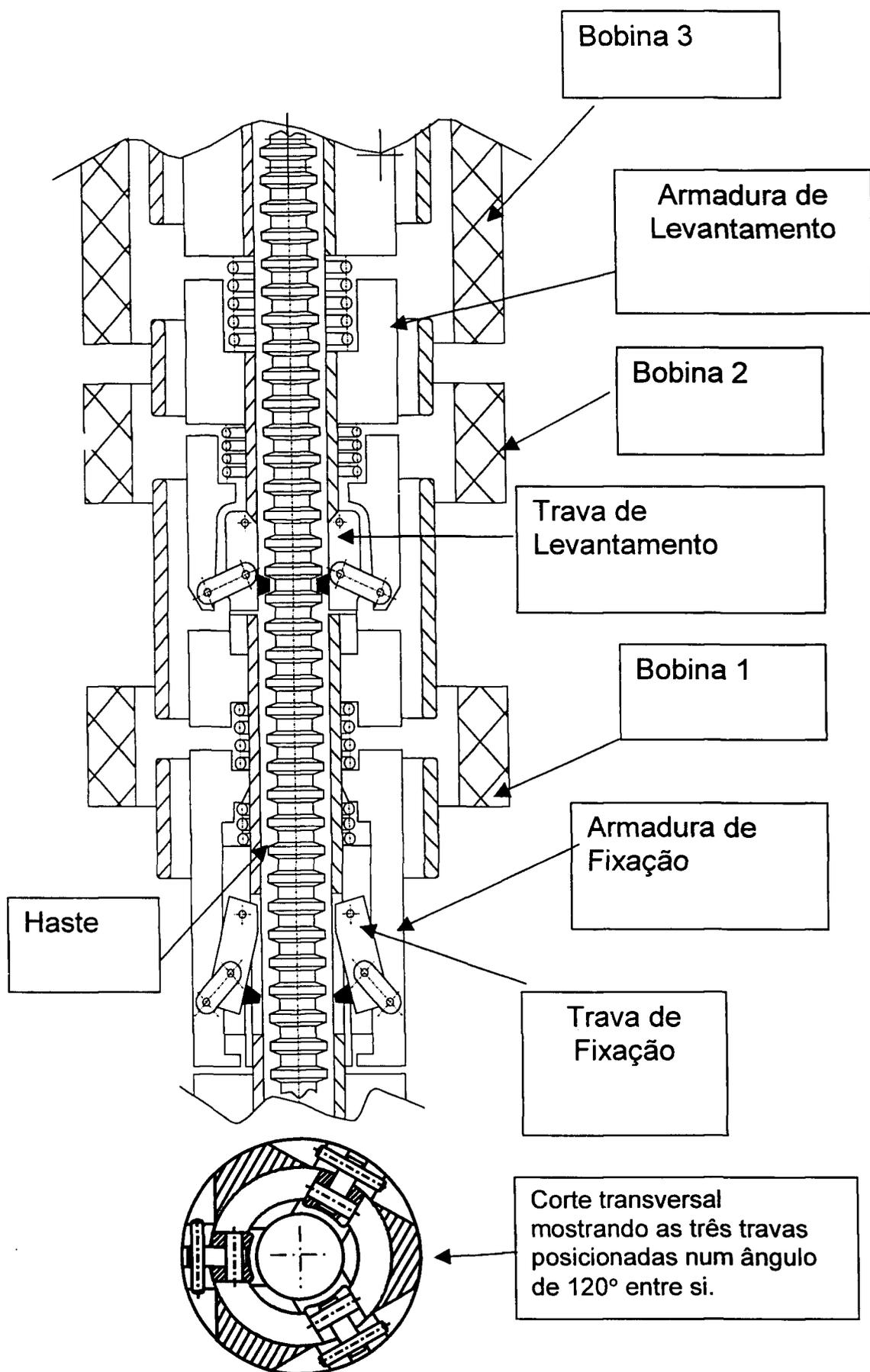


FIGURA 2.5. Detalhes do Mecanismo do MAB tipo Macaco-Magnético

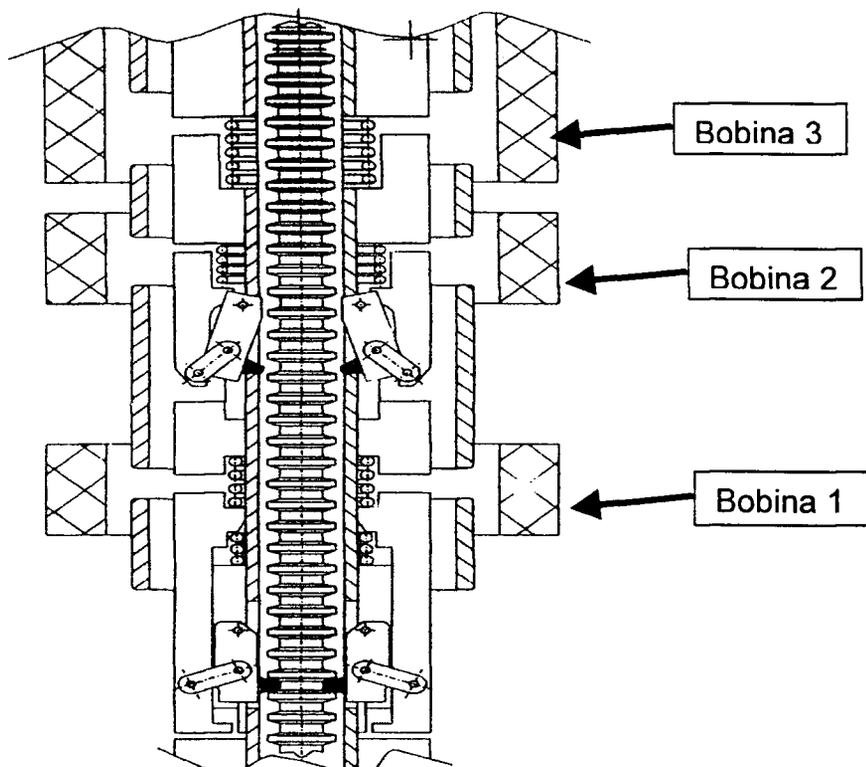


FIGURA 2.6. Detalhe do posicionamento das travas quando a haste de acionamento permanece fixa (manutenção do posicionamento das barras de controle).

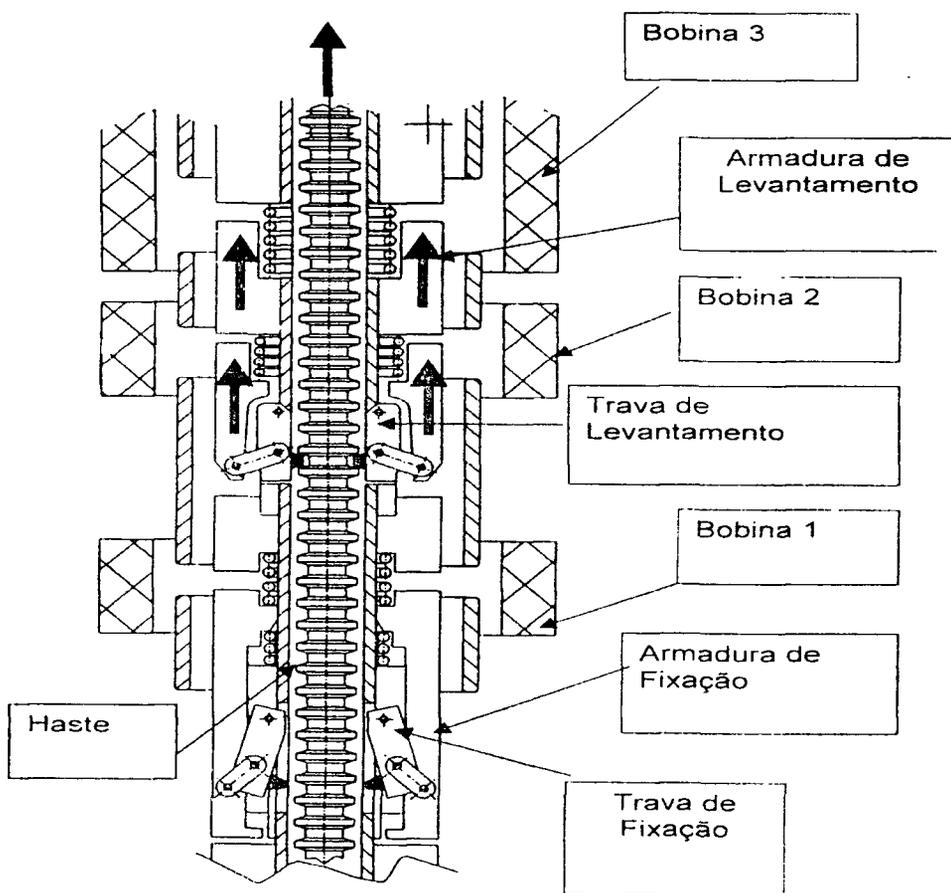


FIGURA 2.7. Detalhe do posicionamento das travas quando a haste desloca-se para cima (movimento de retirada das barras de controle).

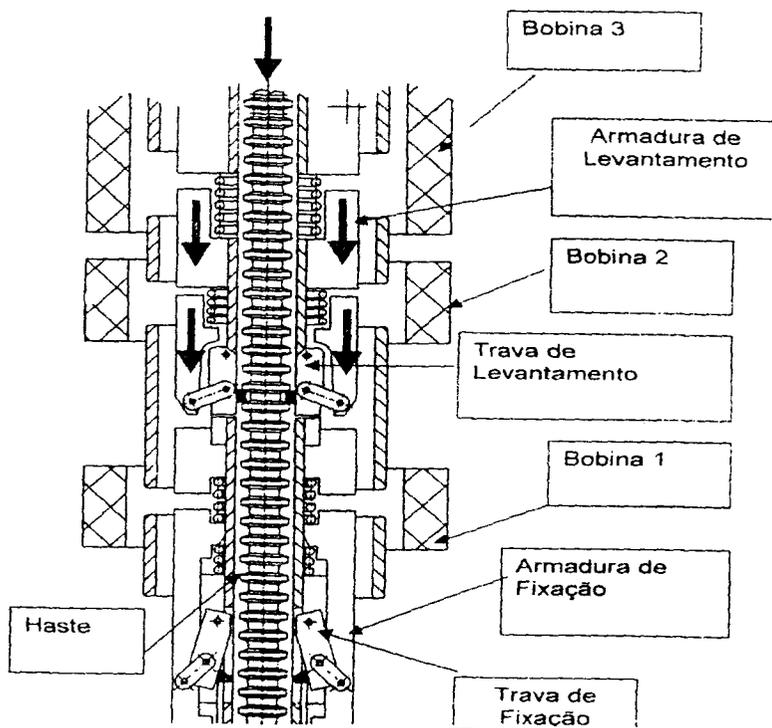


FIGURA 2.8. Detalhe do posicionamento das travas quando a haste desloca-se para baixo (movimento de inserção das barras de controle).

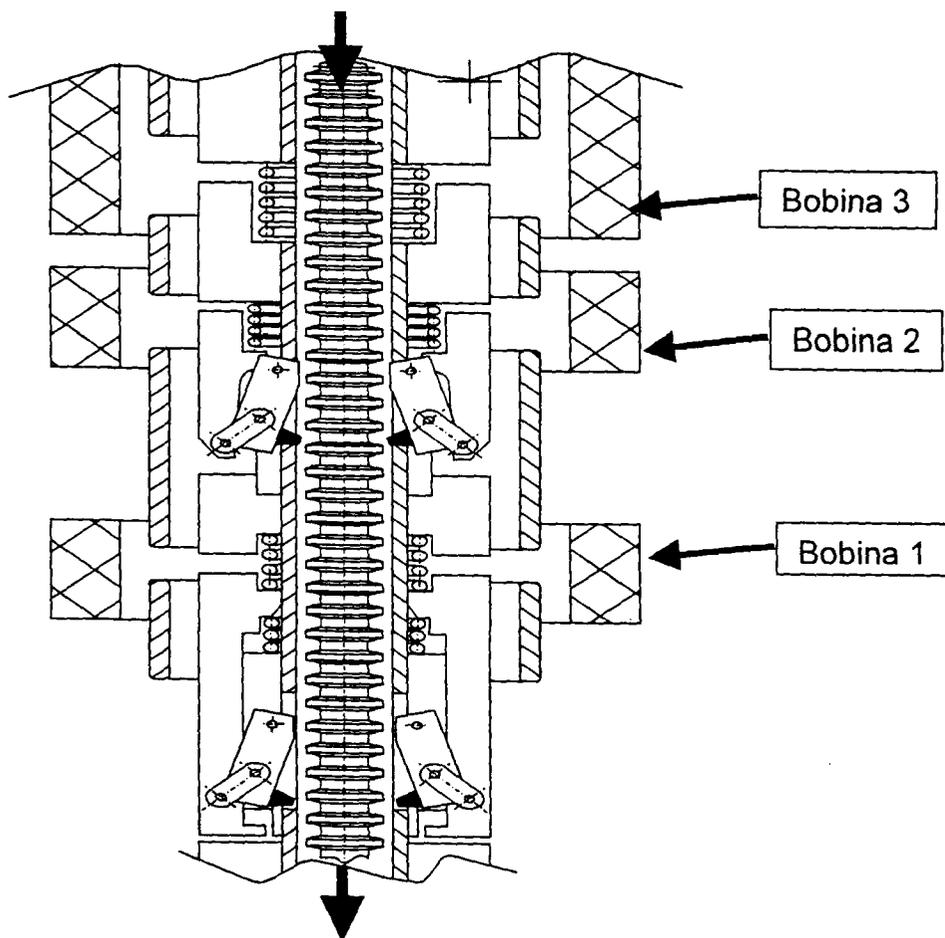


FIGURA 2.9. Detalhe do posicionamento das travas quando a haste realiza um comando de inserção rápida das barras de controle (scram).

2.1.2.1 Modos de Operação do MAB Tipo Macaco-Magnético

O mecanismo de acionamento de barras de controle MAB do tipo Macaco-Magnético deverá operar do seguinte modo de acordo com a fig. 2.5 (Deutsches Patent und Markenamt: DeWeese,1987):

a) Operação de Retirada das Barras - Uma corrente elétrica aplicada na bobina número 1 aciona as travas de fixação, que seguram a haste numa posição fixa, conforme mostrado na fig. 2.6. Em seguida uma corrente é aplicada na bobina número 2, que aciona as trava de levantamento. Estas são ligadas mecanicamente, a uma armadura de levantamento, feita de um material magnético. A corrente que passa na bobina número 1 é cortada ,liberando as travas de fixação e fazendo com que a haste seja sustentada pelas travas de movimentação. No instante seguinte uma corrente é aplicada à bobina número 3, atraindo a armadura de levantamento e fazendo com que ela seja deslocada para cima, conforme mostrado na fig. 2.7. Uma corrente é aplicada novamente na bobina número 1 acionando as travas de fixação que agora seguram a haste em uma posição deslocada . Por fim corta-se a corrente das bobinas 2 e 3 nesta ordem fazendo com que o sistema volte para a posição em que estava no início, conforme fig.2.6.

b) Operação de Inserção de barras - A operação de inserção de barras segue a seqüência oposta de eventos citados na operação de retirada das barras, ou seja Inicialmente as barras estão numa posição fixa com a bobina 1 energizada impondo um travamento da haste por meio do acoplamento dos dentes das travas nas ranhuras da mesma . Em seguida a bobina 3 é energizada possibilitando que o conjunto das travas superiores seja elevado de um passo ao longo da haste, sem que as referidas travas toquem a haste. Nesta nova posição a bobina 2 é energizada acoplando as travas superiores na posição elevada anteriormente citada. No instante seguinte a bobina 1 é desenergizada permitindo que as suas referidas travas desacoplem da haste fazendo com que a mesma permaneça suportada pelas travas superiores. Nestas condições a bobina 3 é desenergizada permitindo que a haste desça com um curso igual a um passo, conforme

mostrado na fig. 2.8. Nesta nova condição a bobina 1 é energizada novamente, garantindo esta nova posição da haste de acionamento. Finalmente com a haste fixada pelas travas inferiores correspondentes à bobina 1, a bobina 2 pode ser desenergizada fazendo com que o conjunto permaneça fixo na nova posição, conforme fig. 2.6.

c) Operação de Manutenção das Barras - O posicionamento constante das barras é obtido simplesmente mantendo a corrente elétrica na bobina número 1, conforme mostrado na fig.2.6.

d) Operação de Inserção Rápida das barras – A inserção rápida das barras é obtida através do corte de corrente de todas as bobinas, liberando-se todas as travas, conforme mostrado na fig. 2.9.

2.1.3 MABs para PWRs de Propulsão Naval

Os reatores PWR para propulsão naval são reatores chamados “seguidores de carga”, isto é sofrem muitas variações repentinas de potência decorrentes das solicitações da embarcação. Os reatores PWR de geração de energia elétrica tem perfil de operação diferente pois, em geral, operam numa dada potência (a máxima) sem muitas variações.

Além disso, as características de embarcação levam a arranjos mais compactos que os de plantas de geração de energia elétrica. Assim nas embarcações o sistema de injeção de boro na água do processo não é utilizado pois além de não ter uma atuação rápida para o seguimento de carga implica aumento do espaço ocupado.

Tomando-se como referência os fatos acima citados, fica claro que o sistema mais indicado para controle de reatividade do reator do CTMSP é o de movimentação de barras de controle ou barras absorvedora de nêutrons, que no caso pela falta da ação do boro, deverão movimentar-se continuamente para atender às solicitações de mudança de potência do reator.

O MAB do tipo Porca-Rolante apresenta-se mais adequado do que o tipo Macaco-Magnético, quando existir a necessidade de precisão de movimentos e posicionamento das barras de controle.

2.2 Funções e Classificações quanto a Segurança Nuclear

Os requisitos de segurança nuclear dos MABs de PWR e suas classificações estão baseados nos aspectos funcionais

Para reatores PWR, conforme a norma ANSI/ANS 51.1-83 (American Nuclear Society, 1983), a função de segurança nuclear do sistema de controle de reatividade do reator é atingir e manter a condição de subcriticalidade do núcleo para qualquer modo de operação normal ou evento normal. Deverá introduzir reatividade negativa ou limitar a introdução de reatividade positiva quando necessário.

A função de segurança não nuclear do sistema de controle de reatividade é resistir a falhas que poderiam impedir qualquer equipamento de segurança realizar sua função de segurança e realizar controle de reatividade de uma operação normal.

Os sistemas de controle de reatividade correspondem a:

a) Componentes de controle de reatividade necessários para o desligamento do reator tal como barras de controle, MABs e aquelas partes do MAB utilizadas para rápida inserção das barras de controle.

b) Sistemas de resfriamento auxiliar que funcionam para ajustar a concentração dos absorvedores de nêutrons.

c) Partes do sistema de resfriamento de emergência cuja função é injetar absorvedores de nêutrons no refrigerante do reator.

Assim o MAB é um equipamento importante para o desempenho das funções de controle de potência do reator, e portanto tem requisitos de segurança a serem obedecidos (Mattar Neto, 1994).

Com base nas funções de segurança, os componentes do MAB são classificados, de acordo com a norma ANSI/ANS 51.1-83 (American Nuclear Society, 1983), como classe de segurança 1 (SC-1) na fronteira de pressão (componentes de contenção - tubo do estator e tubo de contenção superior) e classe de segurança 3 (SC-3) no que se refere aos componentes mecânicos internos. Os componentes elétricos como o estator são classificados como classe de segurança não nuclear, porém as chaves (interruptores destinados a comandar a inserção rápida das barras (desligamento do estator) são classificadas como classe de segurança 3 (SC-3).

2.3 Descrição dos Componentes Principais

Considerando os dois tipos de mecanismos anteriormente expostos podemos destacar como componentes mais importantes os seguintes e as suas respectivas funções:

a) HASTE - Elemento de ligação entre o atuador e o conjunto das barras de controle acopladas pela aranha. No caso do MAB tipo Porca-Rolante este componente é representado pelo fuso com rosca sem fim, que permanecendo fixo será movimentado pelo efeito de porca girante. No caso do MAB tipo Macaco-Magnético (*Magnetic-Jack*) este componente é representado pelo fuso com estrias perpendiculares ao eixo longitudinal, o que permite que as travas acionadas pelas bobinas magnéticas possam movimentar o referido fuso.

b) ATUADOR – Conjunto de componentes responsáveis pela transmissão de movimentos para a haste. No caso do MAB tipo Porca-Rolante (*Roller-Nut*) apresenta-se na forma de um motor cujo rotor é bipartido, e cada parte suporta um par de roletes que permitem o acoplamento e desacoplamento com a haste, como pode ser visto nas figuras 2.2 e 2.3. O movimento de subida e descida da haste é transmitido pelo efeito de porca e parafuso. No caso do MAB tipo Macaco-Magnético (*Magnetic-Jack*) o atuador é representado por um conjunto de bobinas e travas articuladas no núcleo de ferro destas bobinas, realizando um acoplamento com a haste através do movimento axial dos núcleos de ferro das bobinas quando estas são energizadas.

c) TUBOS DE CONTENÇÃO - Tanto no MAB tipo Porca-Rolante como no tipo Macaco-Magnético, os tubos de contenção correspondem a componentes em forma tubular, os quais tem função de barreira de pressão para o circuito do primário.

2.4 Seleção de Materiais – Composição e Critérios Gerais de Seleção

Nesse capítulo serão dadas algumas informações sobre a seleção dos materiais aplicados nos diferentes componentes dos MABs considerando que os metais usados em MABs são, em geral, aços inoxidáveis, ligas a base de níquel, e ligas a base de cobalto (Freund, 1963).

2.4.1 Aços Inoxidáveis

Estes aços podem ser considerados como materiais estruturais básicos para componentes de mecanismos de precisão em reatores em temperaturas na faixa de 260 a 540 °C. Combinam boa resistência à corrosão e propriedades mecânicas desejáveis com relativo baixo custo e facilidade de fabricação. Quando as propriedades dos aços inoxidáveis são insuficientes para um determinado meio ou aplicação, ligas mais sofisticadas devem ser aplicadas.

Os aços inoxidáveis são basicamente ligas de ferro, carbono, cromo, e níquel. Ambos carbono e cromo são importantes no tratamento térmico e assim influem significativamente nas propriedades mecânicas. O carbono também aumenta a possibilidade aparecimento de trincas em soldas, enquanto que o cromo contribui muito para a resistência à corrosão, decrescendo entretanto a usinabilidade.

Em relação a outros elementos químicos dos aços inoxidáveis, o mais importante é o níquel cuja função é possibilitar a presença da austenita mesmo em temperatura ambiente. O níquel melhora a resistência à corrosão por meio de uma película passivadora mais estável, e abaixando o ponto de Curie (temperatura acima da qual o aço deixa de ser magnético e passa a ser paramagnético). Melhora a ductilidade, melhora ainda a resistência a queda de propriedades mecânicas em temperatura elevada. O magnésio e o nitrogênio ampliam o campo austenítico e podem parcialmente substituir o níquel e o carbono para essa função. O silício também melhora a resistência à oxidação indesejável mas baixa a estabilidade da austenita e desfavorece a soldabilidade. O titânio, o nióbio e o tântalo são formadores de carbonetos, que impedem a precipitação de carboneto de cromo em um aço inox austenítico exposto a temperaturas na faixa de 430 a 820 °C.

2.4.1.1 Aços Inoxidáveis Ferríticos, Austeníticos e Martensíticos

Os aços inoxidáveis contendo uma predominância de elementos formadores de ferrita são usualmente recozidos entre 700 e 870 °C para produzir uma matriz tipicamente ferrítica. Aquecimento à altas temperaturas, como em trabalho a quente, possibilita uma formação ferrítica na matriz. Grandes porcentagens de cromo revertem essa tendência.

Aços inoxidáveis com uma predominância de elementos formadores de austenita são normalmente recozidos entre 950 e 1120°C. Usualmente a matriz é totalmente austenítica. Alguma ferrita, chamada ferrita delta, para destacar do material de baixa temperatura, pode formar-se no aquecimento acima da faixa de recozimento normal. Normalmente, grandes porcentagens de formadores de austenita diminuem essa tendência.

Transformações na estrutura podem ocorrer no resfriamento dos aços inoxidáveis após o recozimento. Aços inoxidáveis que são balanceados para ser ferríticos entre 700 e 980°C não apresentam mudança de fase, permanecendo aços inoxidáveis ferríticos, como é o exemplo do aço tipo 430.

Aços inoxidáveis austeníticos são definidos como aqueles que contém austenita durante o resfriamento à temperatura ambiente depois do recozimento. Todos os aços da série 300 são austeníticos.

Aços martensíticos são austeníticos na temperatura de recozimento, mas transformam-se em martensíticos na temperatura ambiente em razão da composição de baixa liga.

Onde existirem componentes submetidos a fluxos magnéticos e que estejam também submetidos ao fluido de resfriamento do reator, como é o caso da fronteira de pressão envolvida pelas bobinas elétricas, foram aplicados aços inoxidáveis da série 400.

No desenvolvimento do projeto, a especificação do material acima citado foi feita seguindo requisitos que possibilitaram que o material apresentasse as seguintes propriedades:

- a) valor de saturação magnética alto
- b) alta permeabilidade
- c) baixa força coersitiva

- d) alta resistividade
- e) alto ponto de curie
- f) resistência à corrosão
- g) alta resistência ao impacto.

2.4.1.2 Aços Inoxidáveis Endurecidos por Precipitação

Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação foram desenvolvidos por meio de adição de certos elementos às ligas de base martensíticas, e austeníticas.

O endurecimento por precipitação ocorre em três etapas: a) tratamento térmico por solubilização; b) desenvolvimento de supersaturação; c) envelhecimento. O objetivo do tratamento térmico por solubilização é dissolver na matriz aqueles elementos que eventualmente formam os precipitados endurecíveis. Por serem muitos dos elementos de liga são mais solúveis na temperatura de recozimento de solubilização do que na temperatura ambiente, a supersaturação é alcançada, pela têmpera ou resfriamento rápido, assim limitando o tempo de difusão. Já na temperatura ambiente a difusão é tão lenta que a precipitação não ocorre. Muitos dos elementos de liga são também muito menos solúveis na martensita do que na austenita. Assim o grau de supersaturação pode ser aumentado pela transformação forçada da austenita em martensita tal como ocorre durante o resfriamento depois do condicionamento da austenita. O resfriamento por meio da faixa de temperatura da transformação da martensita deve ser suficientemente rápido para impedir a estabilização da austenita.

Envelhecimento é o tratamento da liga por um período de tempo numa temperatura intermediária. Este tratamento representa o compromisso entre variáveis termodinâmicas e cinéticas. Dois fatores dependentes, o grau de supersaturação (uma variável termodinâmica) e a taxa de difusão (uma variável cinética) controlam a quantidade de precipitação num dado período de tempo nesta temperatura intermediária. Enquanto a taxa de difusão cresce com a temperatura, o grau de supersaturação decresce com a mesma. Algum controle pode ser exercido sobre o tamanho e a distribuição das partículas precipitadas

pela variação da duração e da temperatura do tratamento por envelhecimento. Baixas temperaturas com longo tempo de permanência produz uma distribuição de partículas mais uniforme, com tamanhos menores que são mais resistentes. A medida que a temperatura aumenta pode ser obtido um efeito de endurecimento máximo em um intervalo de tempo menor. Contudo o máximo efeito de endurecimento decresce com o aumento da temperatura, especialmente na faixa onde os precipitados crescem rapidamente.

2.4.1.3 Limitações em Serviço

Aços inoxidáveis aplicados como materiais para MAB encontram as seguintes limitações: a) Certos aços inoxidáveis endurecidos por precipitação são tratados termicamente a uma temperatura baixa da ordem de 480°C e por isso não podem ser aplicados sob temperaturas acima deste valor. b) Há uma perda genérica de propriedades mecânicas na faixa de 430 a 670 °C , dependendo da liga específica, c) Os materiais mais resistentes à corrosão (aços inoxidáveis da série 300) são sujeitos a escamações quando aplicados ao desgaste, enquanto os materiais que melhor resistem ao desgaste, como os aços endurecíveis por precipitação , estão sujeitos freqüentemente a problemas específicos de corrosão.

2.4.2 Ligas a Base de Níquel

Embora a resistência à corrosão e ao desgaste das ligas à base de níquel qualifiquem estes materiais para aplicações específicas como por exemplo em mecanismos submersos em água e em sódio, a aplicação em situações com elevada temperaturas é que destaca as qualidades deste material.

Na classificação das ligas a base de níquel, a base de cobalto, e a base de ferro o termo superligas é empregado para abranger ligas que apresentam propriedade de alta resistência mecânica, e alta resistência à escamação na faixa de temperaturas entre 650 e 980 °C.

2.4.3 Ligas a Base de Cobalto

Destacam-se duas aplicações principais para a ligas de cobalto no MAB: a) como liga resistente ao desgaste , pois são superiores a maioria dos aços inoxidáveis, b) como ligas para molas.

Como material resistente ao desgaste, seu uso tem sido em reatores resfriados a água e reatores resfriados com sódio. Sua aplicação tem sido freqüente como revestimentos com camadas grossas, e neste caso não pode ser considerada como material estrutural. Estes revestimentos são bem mais espessos do que um simples revestimento de proteção do tipo a base de cromo.

Como ligas para molas, os materiais a base de cobalto apresentam excelente resistência a fluência. Outras ligas a base de cobalto apresentam boas características para aplicação estrutural a altas temperaturas. Contudo em razão das propriedades nucleares indesejáveis do cobalto , essas ligas serão consideradas em caracter secundário em relação às ligas a base de níquel para reatores a alta temperatura.

As ligas a base de cobalto destinadas para aplicações de desgaste, são genericamente compostas por até 35% de cromo, até 15 % de tungstênio e até 3% de carbono.

2.4.4 Comentários

Todas as partes funcionais do MAB com exceção do estator do motor, e indicador de posição, operam submersas na água do processo, sob pressões de até 25 N/mm² e temperatura de até 350°C. Conseqüentemente a resistência à corrosão imposta pelo fluido do primário sob condições de operação é da maior importância. Estes requisitos impõem um certo cuidado na especificação de materiais.

Os aços inoxidáveis austeníticos os quais são adequados para resistir à corrosão, encontram larga aplicação no circuito do primário onde não existem solicitações de desgaste. Para superfícies submetidas a desgaste mais rigoroso os aços inox endurecíveis como por exemplo o 17-4 PH e os aços da série AISI-400 e as ligas a base de cobalto como por exemplo o Stellite, são os mais recomendados.

O principal problema na seleção destes materiais é a ausência de lubrificação . Embora a água esteja presente no sistema, as partes não operam em velocidades altas o suficiente para induzir uma lubrificação hidrodinâmica.

Diante das características acima expostas a escolha de materiais adequados para as aplicações nos MABs deve seguir a seguinte orientação :

a) Os materiais para os componentes que servem de barreira de pressão para o circuito do primário deverão ser de aço inoxidável da série 400 para resistir a pressão e ao mesmo tempo garantir a permeabilidade magnética no caso do tubo do estator para o MAB do tipo Porca-Rolante e no caso do tubo das bobinas para o MAB tipo Macaco-Magnético. No caso em que é possível, diante das possibilidades de arranjo, uma espessura de parede compatível com a pressão do primário, deverá ser dada preferência para materiais paramagnéticos como é o caso dos aços da série 300, os quais tem uma resistência mecânica menor que os da série 400.

b) Os componentes mecânicos solicitados com esforços mais severos deverão ser feitos de aço inoxidáveis endurecíveis por precipitação.

c) Os componentes mecânicos submetidos a um desgaste mais intenso, como é o caso dos rolamentos no MAB tipo Porca-Rolante, deverão ser feitos em materiais de liga de cobalto, que possuem boas características antiescamação.

d) Componentes mecânicos do tipo mola, deverão ser feitos de materiais a base de níquel como é o caso do Inconel.

3 CÓDIGOS E NORMAS APLICÁVEIS AO PROJETO

No Brasil o projeto, construção e testes de equipamentos nucleares devem seguir conforme orientação da CNEN, a norma CNEN-NE-1.04 (CNEN, 1984), e normas técnicas compatíveis com a importância da função de segurança nuclear a ser desempenhada.

Para o caso do MAB não existe normalização brasileira específica que norteie o projeto do referido equipamento.

Nesta situação a norma CNEN-NE-1.04, no item 6.5.2 cita que na ausência de normalização brasileira adequada, devem ser usadas preferencialmente códigos e recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica, e, na inexistência destes, normas internacionais ou de países desenvolvidos, desde que tais normas sejam aceitas pela CNEN.

Adotando critérios americanos, aceitos pela CNEN, parte-se do texto legal do Código de Regulamentos Federais Americanos - 10CFR-50 (Título 10, Capítulo 1, Parte 50 – *Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities*) (US Nuclear Regulatory Commission, 1984). Nos moldes do código supra citado, para que uma instalação nuclear tenha permissão de funcionamento, é necessário que sejam observados uma série de requisitos técnicos (Parágrafo 50.34) os quais deverão ser citados no Relatório Preliminar de Segurança, cujo conteúdo deverá apresentar itens abordando entre outros assuntos, os seguintes:

a) Descrição e avaliação de segurança do local no qual a instalação deverá estar localizada, com especial atenção para detalhes de projeto.

b) Descrição e discussão sumária da instalação com atenção especial às características de projeto e de operação, com as devidas considerações de segurança.

c) O projeto preliminar da instalação incluindo: critérios gerais de projeto para plantas nucleares (conforme Apêndice A do 10 CFR 50) (US Nuclear Regulatory Commission, 1984), bases de projeto, informações de materiais, avaliações do projeto, e desempenho dos sistemas estruturais.

3.1 Critérios Gerais de Projeto de Plantas Nucleares Relacionados aos MABs

Os Critérios Gerais de Projeto de Plantas Nucleares incluem:

a) Considerações sobre as necessidades de desenvolvimento do projeto com a finalidade de evitar-se falhas simples de componentes passivos nos sistemas fluidos, que sejam importantes para a segurança.

b) Considerações de redundância e requisitos diversos para os circuitos fluídicos importantes para a segurança.

c) Considerações do tipo, dimensão e orientação para possíveis falhas em componentes da barreira de pressão do circuito do refrigerante do reator na determinação dos requisitos para viabilizar uma proteção contra falhas postuladas.

d) Considerações sobre a possibilidade de falhas sistemáticas, não randômicas e simultâneas dos elementos redundantes no projeto dos sistemas de proteção e sistemas de controle de reatividade.

Os critérios de aceitação do projeto, relacionados aos MABs, previstos para o relatório de análise de segurança (US Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan, 1981), baseiam-se no 10 CFR 50 (US Nuclear Regulatory Commission, 1984) podendo-se destacar:

- **Critério Geral de Projeto- critério 23 – Modo de Falha do**

Sistema de Proteção:

O sistema de proteção deve ser projetado para ser enquadrado numa condição de segurança ou numa condição que possa ser demonstrada como aceitável diante de outras bases definidas, se a instalação for submetida a condições tais como : desligamento de sistemas, perda de energia (ex. energia elétrica, ar de instrumentação) ou situações adversas postuladas(ex. extremo aquecimento ou resfriamento, fogo, pressão, vapor, água e radiação)

- Critério Geral de Projeto- critério 25 – Requisitos do Sistema de Proteção para funcionamento inadequado do controle de reatividade.

O sistema de proteção deve ser projetado para assegurar que os limites aceitáveis especificados de projeto do combustível não sejam excedidos para qualquer funcionamento inadequado dos sistemas de controle de reatividade, como uma retirada acidental (que não seja ejeção ou retirada simplesmente) das barras de controle.

- Critério Geral de Projeto- critério 26 – Redundância e Capacidade do Sistema de Controle de Reatividade.

Dois sistemas de controle de reatividade independentes de princípios de atuação diferentes devem ser fornecidos. Um dos sistemas deve usar barras de controle, preferencialmente incluindo um meio positivo para inserir as barras e ser capaz de variações no controle de reatividade de maneira segura para garantir essa atuação sob condições normais de operação, incluindo ocorrências operacionais previstas e com margem apropriada para funcionamentos inadequados, tal como varetas danificadas e limites de projeto do combustível que não sejam excedidos. O segundo sistema de controle de reatividade deve ser capaz de ter o controle seguro da taxa de variação de reatividade resultante da variação de potência planejada (incluindo queima do xenônio) para assegurar que limites aceitáveis de projeto do combustível não sejam excedidos. Um dos sistemas deve ser capaz de manter o núcleo do reator subcrítico sob condições frias.

- Critério Geral de Projeto- critério 27 – Capacidade dos Sistemas de Controle de Reatividade Combinada.

Os sistemas de controle de reatividade devem ser projetados para ter uma capacidade combinada - em conjunto com a adição de veneno (substância absorvedora de nêutrons) pelo sistema de resfriamento de emergência do núcleo, - de controlar com segurança as variações de reatividade, com a finalidade de garantir que a capacidade de resfriar o núcleo seja mantida sob condições de acidente postulados e, com margens de segurança adequadas para problemas com barras emperradas (travadas).

- Critério Geral de Projeto- critério 28 – Limites de Reatividade

Os sistemas de controle de reatividade devem ser projetados com limites apropriados na quantidade potencial de reatividade e sua taxa de aumento para assegurar que os efeitos dos acidentes postulados não possam : (1) resultar em tensões na barreira de pressão do refrigerante do reator maiores que o limite local de escoamento; (2) nem perturbar suficientemente o núcleo, sua estrutura suporte – ver fig.1.3 – ou outro interno do vaso de pressão de modo a prejudicar significativamente a capacidade de resfriamento do núcleo.

Critério Geral de Projeto- critério 29 – Proteção contra Ocorrências Operacionais Postuladas.

Os sistemas de proteção e reatividade devem ser projetados para assegurar uma probabilidade extremamente alta de executar suas funções de segurança no evento de ocorrência operacionais previamente postuladas.

3.2 Requisitos de Projeto para os Componentes Elétricos

Considerando os critérios mencionados e o recomendado pela norma ANSI/ANS-51.1-83 (American Nuclear Society,1983) não existem requisitos especiais sob o ponto de vista de segurança nuclear para o projeto elétrico do MAB. Cabe ressaltar, porém, que o sistema de proteção elétrico deverá apresentar interruptores de corrente suficientemente seguros e de operação confiável capazes de produzir um desligamento seguro do estator do motor no caso do MAB tipo Porca -Rolante, e bobinas no caso do tipo Macaco Magnético. Além disso no regime de operação normal o sistema de alimentação elétrica deverá fornecer uma tensão constante para o bom funcionamento do referido estator de acordo com os comandos do sistema de comutação responsável pelo controle da rotação no tipo Porca-Rolante (*Roller-Nut*) e no acionamento dos passos nas bobinas no tipo Macaco-Magnético (*Magnetic-Jack*).

Além dos componentes descritos no capítulo 2, os componentes elétricos do MAB são motor (estator), bobinas magnéticas , cabos, painéis de controle, chaves interruptoras e sistemas elétricos auxiliares. Com base na norma ANSI/ANS-51.1-83 (American Nuclear Society,1983) os componentes elétricos

classe de segurança 3 (SC-3) devem atender os requisitos correspondentes a norma IEEE – Classe 1E (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1971, 1974, 1975, 1976, 1977, 1980, 1982)

Assim, detalhando, o motor (estator e bobinas magnéticas) deve atender as normas IEEE-334 ,e IEEE-344; os cabos devem atender as normas IEEE-334,e IEEE-383 (Institute of Electrical and Electronics Engineers,1982); os painéis de controle devem atender as normas IEEE-344; as chaves interruptoras a norma IEEE-344 ; os componentes elétricos dos sistemas auxiliares do MAB, como é o caso do sistema de resfriamento do estator, devem atender as normas IEEE-279, IEEE-336, IEEE-338, IEEE-352, IEEE-379, IEEE-577(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1971, 1980, 1977, 1975, 1977,1976). Com base nas exigências dessas normas são estabelecidos os requisitos de projeto a serem atendidos, incluindo aqueles relacionados ao projeto mecânico dos componentes elétricos.

3.3 Demonstração do Atendimento dos Requisitos de Segurança e dos Critérios de Projeto

Diante dos requisitos de segurança e operacionalidade, o projeto do MAB deve contemplar que o bom desempenho está intimamente ligado às condições econômicas e de segurança das plantas. Muitas vezes são necessários programas experimentais de desenvolvimento e qualificação de MABs (Xu-Yuanhui et alli,1997).

A metodologia para desenvolvimento do projeto exige que sejam observados para os aspectos de segurança, os códigos e normas aplicáveis a várias situações. Para exemplificar, dentro de uma base normativa americana, podem ser mencionados os seguintes documentos:

10 CFR 50 (US Nuclear Regulatory Commission,1987)

Appendix A : General Design Criteria for Nuclear Power Plants

USNRC “Standard Format” (US Nuclear Regulatory Commission,1981)

Chapter 3 –Design of Structures, Components, Equipment, and Systems

3.9.4 – Control Rod Systems

Chapter 4 -Reactor

4.5.1 – Control Rod Drive System Structural Materials

4.6 – Functional Design of Reactivity Control Systems

USNRC “ Standard Review Plan” (US Nuclear Regulatory Commission,1987)

Chapter 4 :

4.5.1 –Control Rod Drive Structural Materials

4.6 – Functional Design of Control Rod Drive System

ANSI –ANS 51.1 - American National Standard – Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactor Plants.(American Nuclear Society,1983)

Com base nesses documentos citados acima, os aspectos de segurança e econômicos associados aos MABs são descritos em partes de relatórios de segurança como os mencionados abaixo:

-Reference Safety Analysis Report (US Nuclear Regulatory Commission,1981)

Chapter 4

4.2 – Mechanical Design

4.2.3.2.2 – Control Rod Drive Mechanism

4.2.3.3.2 – Design Evaluation – Control Rod Drive Mechanism

4.2.3.4.2 – Tests, Verifications and Inspections – C R D M

Nesses relatórios de segurança deve-se demonstrar que os MABs são suficientemente robustos para servir como parte da barreira de pressão (barreira

à liberação de material radioativo) tendo características que permitam o controle de potência e do desligamento sob as diversas condições de operação dos reatores nucleares e seus respectivos casos de carregamento, inclusive os de acidentes postulados (esses aspectos de integridade estrutural e de integridade funcional e o compromisso entre eles justificam o estudo do projeto mecânico e estrutural desses componentes) (Hanliang et alli, 2000).

4 INTEGRIDADE ESTRUTURAL

4.1 Influência dos Requisitos Estruturais no Projeto Mecânico

De acordo com os requisitos da norma ANSI/ANS-51.1-83 (American Nuclear Society,1983) os componentes do MAB que fazem parte da barreira de pressão do circuito de refrigeração do reator são classe de segurança SC-1 e, portanto, devem ser projetados de acordo com os requisitos da norma ASME - Boiler and Pressure Vessel Code - Section III Division 1 - Nuclear Power Plant Components Subsection NB Class 1 Components (ASME-1998). Para esses componentes essa norma estabelece os requisitos para a escolha de materiais, para o projeto mecânico e estrutural, para a fabricação e montagem, e para os testes de qualificação e aceitação.

Nos demais componentes devem ser aplicados critérios compatíveis aos indicados acima ressaltando a escolha de materiais capazes de resistir às condições de corrosão característica da composição química do fluido de processo.

As partes dos MABs que fazem parte da barreira de pressão do circuito de refrigeração do reator devem ser incluídos nos relatórios de análise de tensão e de fadiga dos componentes desse mecanismo, onde se demonstra a sua adequação aos carregamentos de projeto, e às condições de operação da planta (normal, anormal, de emergência, de falha e de testes). Desse modo, seguindo recomendações da norma ANSI/ANS-51.1-83 (American Nuclear Society,1983) pode-se afirmar que os carregamentos principais são os decorrentes de operação dos MABs, a pressão, os carregamentos decorrentes dos transitórios termo-hidráulicos relacionados às condições de operação da planta, e os carregamentos sísmicos (Sismo Básico de Operação – SOB e Sismo de Desligamento Seguro – SDS).

Para outras partes do MAB devem ser demonstrados, por análise, por testes, ou por uma combinação de ambos, que os requisitos funcionais também são atendidos.

4.2 Desgaste, Fadiga e Corrosão

Em reatores resfriados a água os componentes mecânicos trabalham mergulhados na água do processo sem o benefício de qualquer tipo de lubrificação. Quando aborda-se o termo desgaste deve ser salientado esta principal característica da aplicação mecânica do equipamento em estudo.

Para solucionar o problema acima citado, destacamos em especial o material aplicado aos rolamentos no caso do MAB tipo Porca-Rolante que trabalham mergulhados em água, sem lubrificação convencional, e que nestas condições deve-se prevenir o desprendimento de eventuais partículas, resultante do fenômeno de fadiga das pistas de rolamento das esferas.

O MAB insere, retira ou fixa as barras em resposta aos sinais elétricos do sistema de controle do reator, sendo esta uma característica importante e que demonstra com clareza o tipo de solicitação a que o MAB está sujeito.

O movimento das barras de acionamento em incrementos discretos ou passos, no caso do MAB tipo Macaco-Magnético, ou mesmo continuamente, no caso do MAB tipo Porca-Rolante, submete os componentes a desgastes.

4.2.1 Avaliação de um caso em MAB tipo Macaco Magnético

Visando identificar problemas potenciais de desgaste em MABs e ações para evitá-los, apresenta-se a seguir o estudo desenvolvido pela empresa Eletricité de France em conjunto com a Framatome e sua subsidiária Jeumont Industrie para MABs tipo Macaco-Magnético (Lemaire & Calvar, 2000).

As metas desta pesquisa foram as seguintes:

- a) Caracterizar a metalurgia básica dos materiais.
- b) Caracterizar o comportamento do equipamento ao desgaste.
- c) Avaliação do efeito da corrosão em materiais de componentes de reatores tipo PWR submetidos à água do circuito primário.
- d) Analisar os dados de desgaste dos MABs da planta e do MAB do circuito de teste.
- e) Exame da superfície e metalográfico de amostras fornecidas pela planta em estudo e pelo circuito de teste.

f) Identificação do mecanismo de desgaste principal e a respectiva lei de desgaste.

Foi tomado como base uma instalação nuclear de 1300MWe, em que o MAB de controle do reator apresenta uma haste de 7 m de comprimento, possuindo uma movimentação com velocidade de 72 passos por minuto, com 292 ranhuras circunferenciais, feita de aço inoxidável martensítico tipo 410.

As travas que acoplam-se a esta haste foram feitas de aço inoxidável tipo 304 LN e na área de contato tinham um revestimento de liga a base de cobalto para reforçar a resistência da mesma ao desgaste. O acabamento superficial era de $3,2 \mu\text{m}$ para ambas faces. Na área de contato a temperatura era de 200 a 250 °C. O fluido refrigerante que banhava o referido mecanismo era condicionado por hidrogênio, ácido bórico e hidróxido de lítio.

Com referência ao programa de ensaios citado, o MAB mais carregado foi submetido a um solicitação de $3,5 \times 10^6$ passos, durante os quais a trava interagiu com a haste conforme mostrado na fig. 4.1.

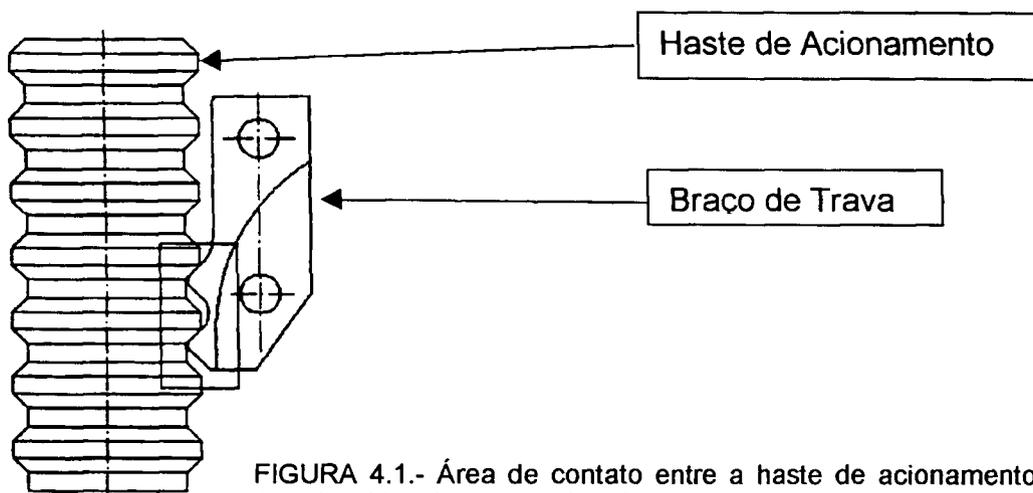


FIGURA 4.1.- Área de contato entre a haste de acionamento (aço inoxidável martensítico tipo 410) e o braço de trava (aço inoxidável austenítico tipo 304L). A superfície em forma de cone possui uma área de 80mm^2 . Três braços de trava são dispostos em torno da haste de acionamento em distâncias angulares de 120° conforme mostrado na fig. 2.5.

4.2.1.1 Considerações e Recomendações do Estudo (Lemaire & Calvar, 2000).

As recomendações feitas apontaram que a taxa de desgaste foi bem maior do que o que se esperava, sendo da ordem de quatro vezes maior para o mesmo número de passos.

O desgaste foi observado somente nas superfícies da trava (ver FIG. 4.1) a qual estava recoberta com Stellite grau 6, na região onde a interação mecânica ocorre entre o fuso e a haste.

Para que seja feita uma análise da corrosão e do desgaste é necessário fazer algumas considerações sobre os materiais utilizados bem como a metalurgia do MAB.

A liga a base de cobalto Stellite grau 6 tem sido largamente usada na indústria nuclear devido as combinações de propriedades de desgaste e corrosão. A micro estrutura do Stellite grau 6 varia com a composição química e o processo de deposição usado, que no caso em questão foi o endurecimento superficial por oxi-acetileno.

A dureza superficial é especificada para estar entre 39 e 47 HRC (dureza na escala Rockweell C)

O desgaste das ligas de cobalto foram extensamente estudadas. Os 4 tipos básicos de desgaste devido ao atrito sólido foram identificados como: abrasão, fadiga, adesão e oxidação.

Outro fenômeno relevante notado foi a cavitação causada por condições hidrodinâmicas locais. A maioria dos estudos disponíveis ignora as reações triboquímicas que podem ocorrer durante o desgaste de deslizamento na água. A corrosão tribológica correspondente a uma perda acelerada de material devido a interação de fenômenos eletroquímicos e mecânicos. Para os Stellites a corrosão tribológica não foi muito estudada e nem considerada quanto a avaliação da taxa de desgaste.

A caracterização de filmes óxidos formados em metais mergulhados no fluido de processo de um reator PWR tem sido objeto de estudos por muitos anos. Esta característica é muito importante uma vez que a natureza dos filmes óxidos governa a taxa de liberação de corrosão no fluido de processo e porque os óxidos estão envolvidos na avaliação da dosimetria da planta.

O filme óxido formado no Stellite grau 6 tem uma estrutura de 2 camadas. A camada interna é rica em cromo, com uma estrutura cristalina cujo espectro característico de raio X aproxima-se do CoCr_2O_4 . A camada externa formada por precipitações, principalmente de ferro, tem uma estrutura de Magnetita (M_3O_4). A espessura da camada interna segue uma lei de formação parabólica. A espessura do filme é estimada para ter aproximadamente 20nm depois de 100h de imersão. Os filmes óxidos formados no Stellite grau 6 são de fato muito similares àqueles formados no aço inoxidável 304 L. Consequentemente o Stellite grau 6 é um material que exhibe passividade e suas características eletroquímicas no fluido do primário do PWR assemelham-se a aços inoxidáveis do tipo austenítico.

Acredita-se que o filme óxido formado no Stellite não pode produzir desgaste por oxidação, isto é, por um mecanismo de desgaste mais brando, onde filmes óxidos protetores rompem-se e aparecem como partículas de desgaste. A dimensão crítica para o desgaste por oxidação é usualmente estimada para ser igual ou maior que $1 \mu\text{m}$. A espessura do filme óxido no Stellite é menor que $0,1 \mu\text{m}$.

Para aços inoxidáveis em ambiente aquoso à temperatura ambiente, tem sido mostrado que o potencial da corrosão decresce, e a corrente de corrosão aumenta em duas dezenas quando aplica-se uma força perpendicular na superfície do aço inoxidável usando um pino sobre um disco tribométrico. Durante a corrosão tribológica, (processo de micro-abrasão) assume-se que o aumento da corrente é causado pelo rompimento da camada de óxido protetor e subseqüentemente repassivação. Isto implica que a superfície realmente dissolve-se após o contato, preferencialmente ao fato de perder óxido durante o contato.

O formato dos transientes de corrente é bastante compatível com o modelo previsto baseado no comportamento de repassivação do aço inox.

Embora todos os detalhes do mecanismo não tenham sido totalmente estabelecidos, o comportamento da passivação do aço inox em alta temperatura já está particularmente bem descrito. A variação da densidade de corrente de oxidação durante o período do transitório, a qual ocorre quando o óxido protetor é danificado é dado pela relação empírica geral :

$$i_t = i_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^{-n} \quad (4.1)$$

onde i_t é a corrente, t é o tempo, i_0 e t_0 são constantes, e $0,3 \leq n \leq 1$.

Esta relação foi verificada para ligas de ferro de variadas composições com cromo e tempos entre 100 e 1000s. É razoável para diferentes tipos de experimentos de despassivação (teste de penetração, queda de potencial, fratura durante o teste mecânico). Os valores das constantes para um dado material variam com a composição química da água. Para um aço inox 304 L na água de processo de um reator PWR, considerando o pH e as condições de condutividade, o valor de n deve estar entre 0,5-0,7. Com base em medições diretas para o Stellite grau 6 usando o método de queda do potencial, foi determinado que o valor de n está também entre 0,5 e 0,7.

Os aços inox martensíticos tipo 410 são temperados e revenidos à temperaturas maiores que 600°C. A resistência ao escoamento é maior que 550 MPa e a dureza é de 400-450 HV₃₀ (escala Vickers de 30g).

Como foram utilizados diferentes braços de travas, exames metalográficos foram realizados em todos esses componentes com a finalidade de cobrir uma larga faixa de condições de operação. Tomando-se como referência componentes (braços) não usados, examinou-se braços de travas testados em bancadas com um número de passos até 10×10^6 , e braços de travas removidos de reatores com um número de passos até $2,1 \times 10^6$. Foram feitas observações nas seções transversais e na superfície com o uso de microscópio eletrônico de varredura.

Os resultados foram muito similares tanto para os braços de trava desmontados de reatores como para os testados com bancadas. A área desgastada consistia de duas regiões dos braços de trava, conforme mostrado na figura 4.2. A região primeira e principal correspondente ao volume removido pelo desgaste é caracterizada pelo perfil reto o qual é paralelo ao perfil original usinado. A segunda é uma transição de áreas entre a região principal e a área não desgastada cujo perfil é curvo. A região de predomínio do desgaste e a região de transição correspondem a áreas onde o contato com a haste de acionamento ocorre durante cada passo de movimento imposto pelo mecanismo, dependendo da excentricidade da haste de acionamento.



FIGURA 4.2. A área desgastada do braço de trava tem duas regiões como ilustrado por essa seção transversal. A região principal, à frente da extremidade do dente é reta (1); a outra é a região de transição que tem o formato curvo(2).

A superfície da região de desgaste principal é perfeitamente suave e parece uma superfície polida, espelhada, como se tivesse sido preparada para uma análise metalográfica (fig. 4.3a). A microestrutura próxima da superfície parece trabalhada a frio; é perceptível até $5\mu\text{m}$ abaixo da superfície. Alguns carbonetos estão quebrados e achatados na superfície na direção do deslocamento. (fig. 4.3b).

A área de transição é mecanicamente afetada em uma profundidade maior do que $20\mu\text{m}$. Na superfície a adesão de partículas vindas da haste de acionamento é observada em áreas eutéticas ricas em carbonetos, conforme indicado nas figura 4.4a. As partículas transferidas correspondem bem as partículas removidas da haste de acionamento por fadiga superficial. São observadas também algumas trincas causadas pelo alto gradiente de deformação próximo da superfície. Parece que estas trincas iniciam na interface entre a matriz metálica e os carbonetos. As trincas propagam-se na matriz com uma orientação paralela à superfície, conforme indicado na fig.4.4 b .

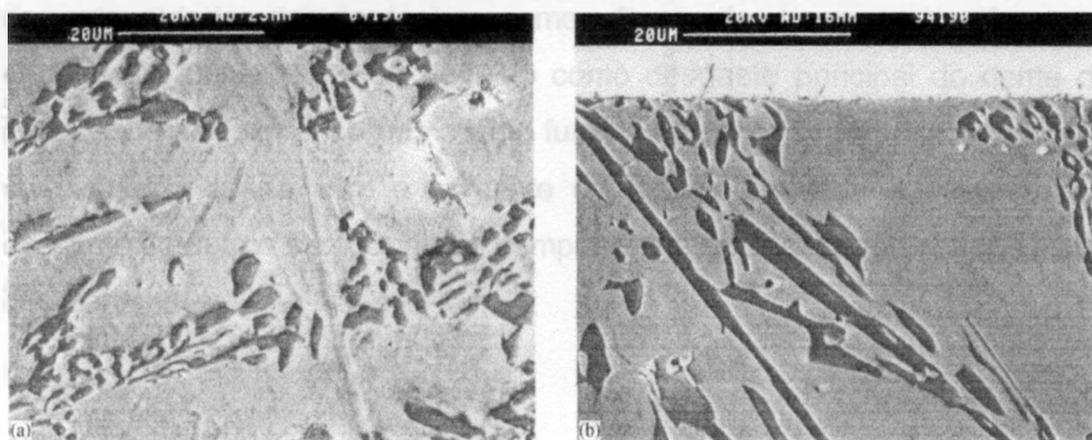


FIGURA 4.3. Exame microscópico da região principal de desgaste.(a) Exame da superfície indica que o material aparece finamente polido . (b) A seção transversal ilustra que alguns carbonetos estão quebrados e achatados na superfície na direção do deslizamento

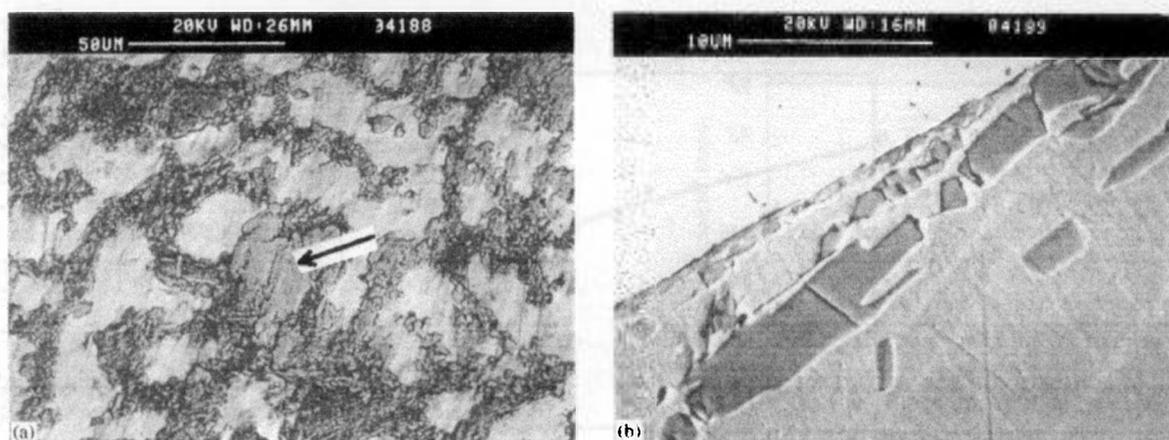


FIGURA 4.4. Exame microscópico da região principal de desgaste.(a) O exame da superfície mostra partículas vindas da haste de acionamento e aderidas à superfície das travas. Este fenômeno ocorre principalmente nas áreas eutéticas ricas em carbonetos (veja a seta indicativa) (b) O exame da seção transversal indica que o material é plasticamente deformado em uma profundidade considerável quando comparado à região principal. Carbonetos quebrados são visíveis bem abaixo da superfície e trincas paralelas à superfície são observadas na matriz.

Os dados sobre desgaste foram obtidos por inspeções não destrutivas (telemetria das extremidades dos dentes) e exames diretos das travas removidas dos MABs. O desgaste observado (W) definido como desgaste principal do dente de cada trava, pode ser expresso como uma função do número de passos (N). A melhor correlação é obtida com a seguinte expressão derivada do estudo prévio de desgaste de outros componentes nucleares submetidos a impacto e deslizamento :

$$W(\text{mm}) = \frac{K_1 - K_3}{K_2} [1 - e^{-K_2 \cdot N}] + K_3 \cdot N \quad (4.2)$$

onde K_1 , K_2 e K_3 são parâmetros ligados às curvas.

A existência de dois regimes aparentes na taxa de desgaste (Fig. 4.5) foi inicialmente atribuído à adaptação de uma superfície com a outra. Esta explicação, porém, não é satisfatória diante dos resultados relacionados com o estudo teórico do contato entre as superfícies. Considerando, portanto, a curva apresentada na Fig. 4.5, podemos identificar um primeiro regime de desgaste mais rápido onde o intervalo entre os passos é curto, e outro regime de desgaste mais lento onde o intervalo entre os passos é mais longo.

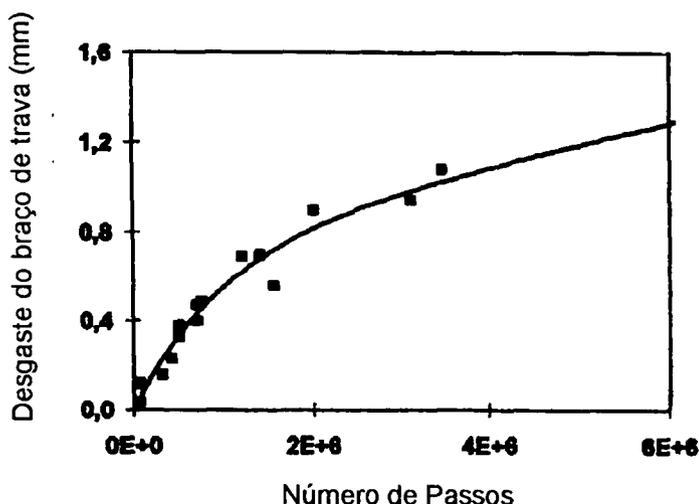


FIGURA 4.5 – Correlação entre a profundidade de desgaste da trava e o número de passos usando a Eq. (4.2)

Análises posteriores dos dados mostraram que o desgaste observado é dependente do tempo. Quanto menor a duração entre dois passos, menor foi a taxa de desgaste observada. A mesma pode ser expressa como a razão entre a profundidade do desgaste e o número de passos como indicado na fig.4.6,

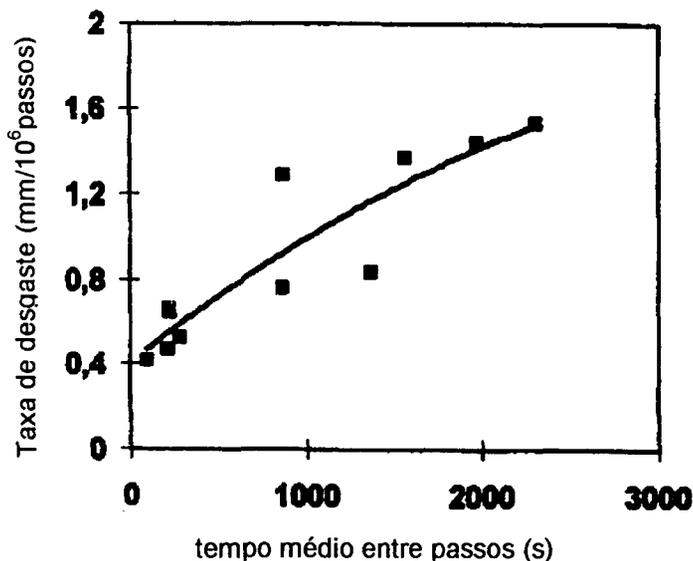


FIGURA 4.6. – Correlação entre a taxa de desgaste (expressa como a razão entre a profundidade e o número de passos) com o tempo médio entre dois passos consecutivos (expresso como a razão entre o tempo de operação e o número de passos)

mesmo que a taxa de desgaste fosse estabelecida para diferentes tempos de operação (como por exemplo um tempo longo entre dois passos para um pequeno número de passos e vice versa). Esta relação de dependência do tempo sugere que a corrosão deve desempenhar um papel significativo no mecanismo de desgaste dos braços de trava.

Exames metalográficos mostraram que as áreas principais de desgaste dos braços de trava tem uma aparência de polimento espelhado. Isto significa que o desgaste por oxidação não pode ocorrer, mas o desgaste apresentado deve-se a processos microabrasivos ou devido à tribocorrosão. Como o desgaste parece ser alguma função da freqüência do contato, conclui-se que a tribocorrosão é o mecanismo de desgaste principal.

Considerando que a pressão total é de 150MPa e a distância de deslizamento é de 100 μ m, assume-se que nas proximidades toda superfície é despessada em cada contato.

Usando a equação (4.3) e a lei de Faraday, a quantidade de material Q, perdida por passo é dado por

$$Q = i_t t = \int_{t_0}^t i_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-n} dt = k t^{1-n} \quad (4.3)$$

onde K é uma constante. Para N passos, a expressão para o desgaste (W) para N passos fica :

$$W = k.Nf^{1-n} \quad (4.4)$$

Baseado nesta fórmula, o valor de n que melhor relaciona os dados de desgaste de plantas (os mesmos dados da fig.4.5) e os circuitos fechados é determinado usando o método dos mínimos quadrados. O valor de n minimizando o erro é 0,65 (fig.4.7). Este valor está perfeitamente de acordo com o valor esperado obtido pelos experimentos de corrosão em circuitos primários de reatores PWR. O valor de k é também da mesma ordem esperada de magnitude para corrosão em ambientes primários de reatores PWR. Aplicando este modelo à

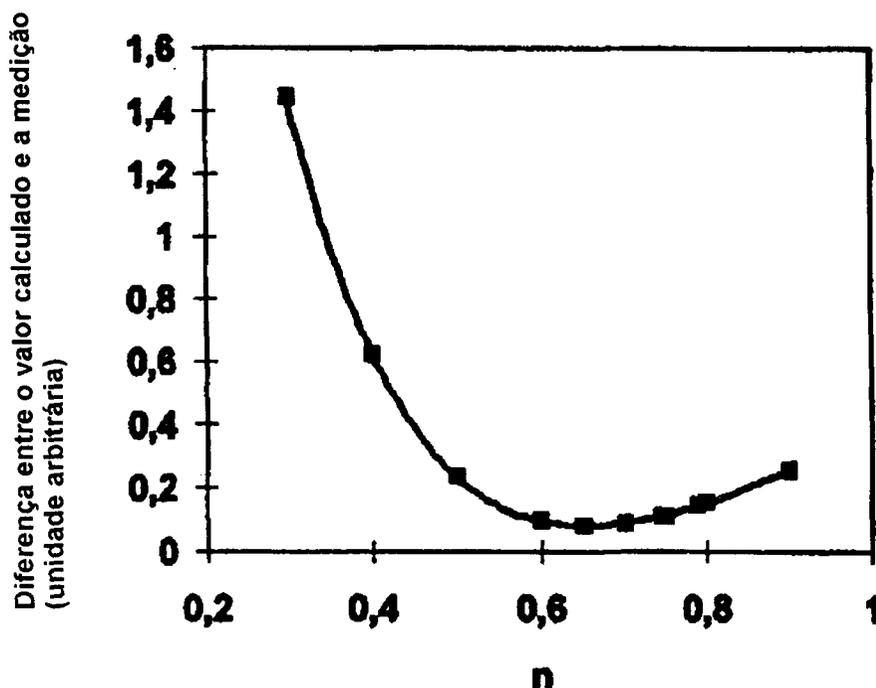


FIGURA 4.7 – Determinação do valor $n=0,65$ usando o processo dos mínimos quadrados

experiência obtida durante operações com plantas e circuitos fechados de testes resulta em uma boa correlação mostrada na fig. 4.8.

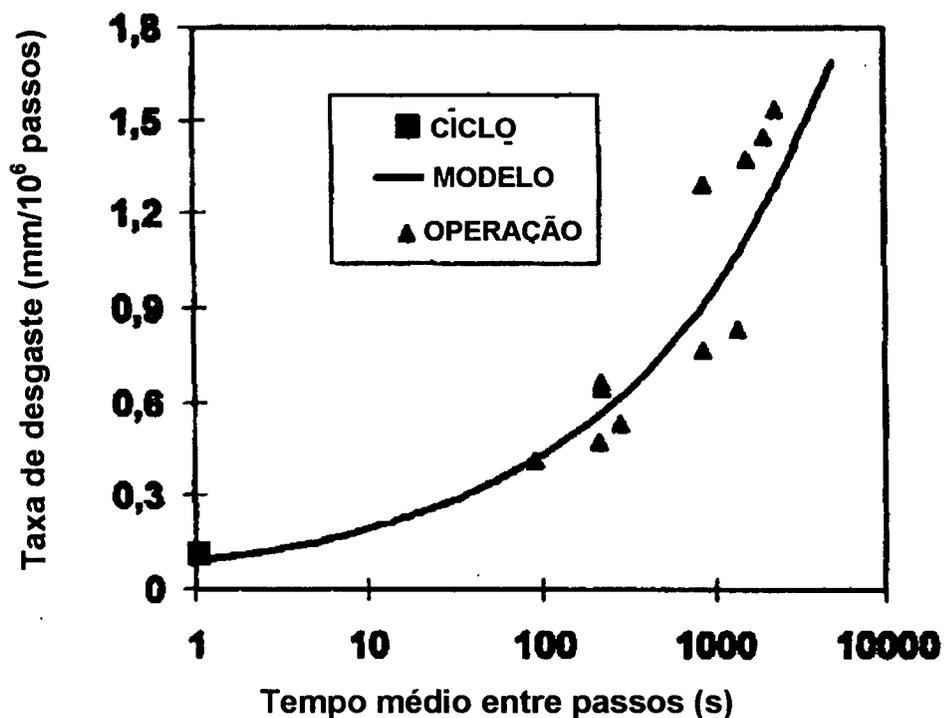


FIGURA 4.8 – Aplicando o modelo levando em conta a média de duração entre dois passos (Eq. (4.3)) resulta em uma boa correlação entre as observações obtidas na experiência de operação e o circuito fechado de teste.

Os estudos estabeleceram que as consequências do desgaste podem não ser cruciais sob o ponto de vista de segurança, mas o assunto deve ser sempre avaliado para estimativa da vida útil dos componentes dos MABs.

5 PROJETO de MABs DE PLANTAS NUCLEARES PWR QUE OPERAM NO BRASIL

5.1 MABs da Usina Nuclear de Angra 1

5.1.1 Materiais

Todos os componentes mecânicos expostos ao fluido de resfriamento do Reator são feitos de metais que resistem à corrosão. Em uma classificação genérica os metais aplicados a este MAB podem ser classificados como : aços inoxidáveis, inconel e ligas a base de cobalto. (Eletrobrás Termonuclear, 1979)

Os materiais dos componentes que constituem a barreira de pressão foram especificados de acordo com a norma *ASME Boiler and Pressure Vessel Code –Section III*.

As ligas de cobalto são usadas para pinos e travas. O Inconel é usado para molas e travas. O aço inox tipo 304 é usado para a contenção de pressão. Os componentes que apresentam desgaste por contato são revestidos com Stellite grau 6 (liga de Cobalto).

5.1.2 Requisitos Funcionais.

O MAB aplicado no controle do reator da usina de Angra 1, mostrado na fig. 2.3, apresenta os seguintes requisitos funcionais:

- a) Tipo – Macaco-Magnético (*Magnetic Jack*)
- b) Pressão de Projeto = 18 N/mm^2
- c) Temperatura de Projeto = $343 \text{ }^\circ\text{C}$
- d) Carga de Operação (haste +conjunto de controle) = 1600 N
- e) Velocidade = 1140 mm/min
- f) tempo de queda livre (scram) = 2,8 s

5.2 MABs da Usina Nuclear de Angra 2

5.2.1 Materiais

O projeto da usina de Angra 2, baseia-se em um projeto de usina alemã já existente – Usina de Grafenrheinfeld, localizada na Bavária – apresentando portanto uma especificação de materiais em conformidade com a norma DIN. Porém, para os materiais que compõe a barreira de pressão foram desenvolvidas especificações adicionais para que o projeto fosse feito de acordo com a norma *ASME Boiler and Pressure Vessel Code –Section III*. (Eletrobrás Termonuclear,1999)

Os materiais dos componentes que não pertencem à barreira de pressão foram especificados com base na experiência operacional garantida de equipamentos já existentes e que demonstraram operacionalidade.

Os materiais aplicados na barreira de pressão são:

Mat. No. 1.4550 de acordo com DIN 17440 (AISI 347)

Mat. No. 1.4313 de acordo com VdTÜv-Werkstoffblatt 395

Mat. No. 1.4986 de acordo com DIN 17240

Mat. No. 1.4923 de acordo com DIN 17240

Os materiais aplicados em outros componentes são

Mat. No. 1.4006 de acordo com DIN 17440 (AISI 410)

Mat. No. 1.4006 de acordo com DIN 17440 (AISI 347)

Mat. No. 1.4006 de acordo com DIN 17440(AISI 321)

Mat. No. 1.4006 de acordo com DIN 17440(AISI 316)

Inconel X 750 de acordo com AMS 5698 (somente para molas)

Haynes Alloy 25 AMS 5759

5.2.2 Requisitos Funcionais :

O MAB aplicado no controle do reator da usina de Angra 2, mostrado na fig. 5.1 apresenta as seguintes características:

- a) Tipo – Macaco-Magnético (*Magnetic Jack*)
- b) Pressão de Projeto = 23,5 N/mm²
- c) Temperatura de Projeto = 250 °C
- d) Carga de Operação (haste +conjunto de controle) = 1128 N
- e) Velocidade = 1140 mm/min
- f) Curso de operação =3940 mm

5.3 Comentários sobre os projetos de Angra 1 e 2

As concepções de projeto de Angra 1 e Angra 2 apresentam características muito semelhantes.

Tanto Angra 1 como Angra 2 apresentam MAB do tipo Macaco-Magnético, o que é uma característica típica de usinas núcleo elétricas.

A seleção de materiais aplicados à barreira de pressão, apresentada pelos dois projetos baseia-se na responsabilidade que a classificação de segurança nuclear impõe para esses componentes.

Conforme a norma ANSI/ANS-51.1-83 os componentes da barreira de pressão são classificados como classe de segurança 1, o que impõe uma seleção de materiais que atendam os requisitos da norma ASME - *Boiler and Pressure Vessel Code –Section III*, no caso de Angra 1 ou especificações adicionais para adequação aos requisitos dessa norma caso de Angra 2.

As especificações dos materiais dos componentes mecânicos que não constituem a barreira de pressão apresentam características que tem como finalidade garantir a integridade funcional do MAB, isto é as peças sujeitas a atrito são especificadas em ligas a base de cobalto pois apresentam características que minimizam a liberação de partículas no fluido de processo diante de uma condição de desgaste excessivo. Os componentes que tem contato direto com o fluido de processo e que não estejam sujeitos a fluxo magnético são especificados em aço inoxidável tipo 304. Os componentes submetidos a fluxo magnético, como é o caso do núcleo das bobinas são especificados em aço inoxidável da série 400. As molas são especificadas em Inconel (liga a base de níquel), pois são ligas que suportam melhor as condições de corrosão sob tensão.

Deve ser observado também que os MABs de Angra1 e de Angra 2 atendem os critérios gerais de projeto cuja demonstração é feita em relatórios de segurança como os citados no item 3.1 deste trabalho.

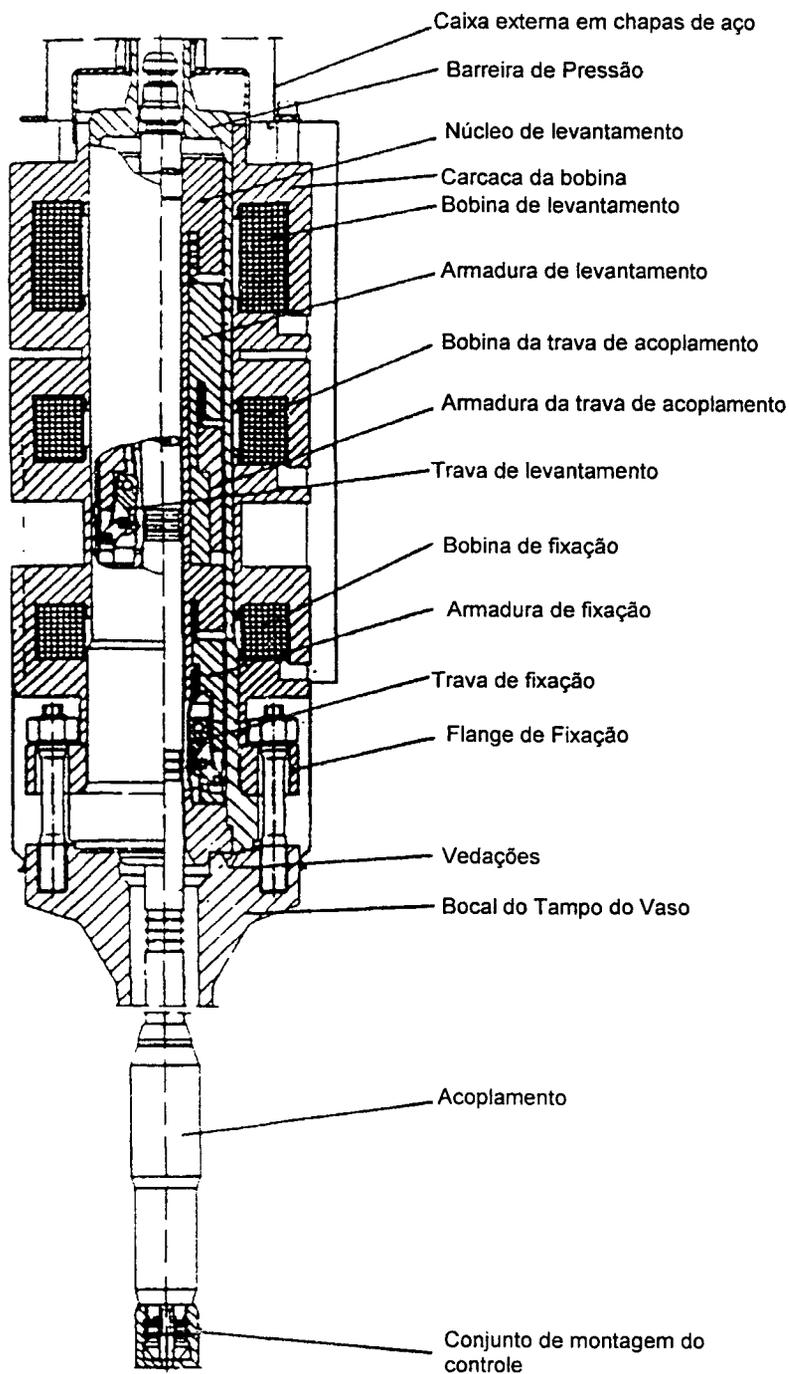


FIGURA 5.1. MAB de Angra 2.
 Tipo : Macaco-Magnético (*Magnetic-Jack*)

6 MABs DA PLANTA PWR DO CENTRO TECNOLÓGICO DA MARINHA EM SÃO PAULO

6.1 Introdução

Todos os aspectos abordados nesse trabalho serão discutidos em um estudo de caso que é o dos MABs de uma planta PWR do CTMSP. É importante destacar que a planta PWR do CTMSP corresponde a uma instalação de teste estacionária (isto é, em terra) com requisitos que visam a simulação de uma instalação de propulsão.

Como já foi mencionado anteriormente neste trabalho (item 2.1.3) no caso em questão o MAB tipo Porca-Rolante é a escolha mais adequada pelos aspectos de seguimento de carga e de restrição de espaço na instalação.

6.2 Breve Histórico do Desenvolvimento

O histórico do desenvolvimento do projeto do MAB do CTMSP começou em 1984 com a formação de uma equipe técnica para dar início a um trabalho de pesquisa e desenvolvimento.

Em 1987 foram concluídos os desenhos para a fabricação do primeiro protótipo básico, citado no parágrafo 6.7.

A construção do protótipo acima citado realizou-se em 1987, quando a então Coordenadoria para Projetos Especiais contratou junto ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo o trabalho de usinagem de todos os componentes necessários para montagem mecânica do referido protótipo. No mesmo ano foi encomendado junto à firma Equacional a construção do estator responsável pelo campo magnético necessário para o acionamento do motor do referido MAB.

Em 1988 concluiu-se a elaboração dos desenhos de fabricação do protótipo completo, bem como o projeto de uma bancada de ensaios para simular as condições reais de projeto, em termos de pressão e temperatura do fluido de processo, no qual o MAB deverá operar imerso.

Em 1989 a COPESP encomendava junto às firmas TREU e BREVET a fabricação respectivamente da bancada de ensaios e de três protótipos completos para serem ensaiados na referida bancada.

6.3 Passos Principais para o Desenvolvimento do Projeto

Com base nos aspectos estudados nesse trabalho o projeto de um MAB deve contemplar os seguintes passos, conforme resumido no diagrama de blocos apresentado na FIG. 6.1:

- a) Estabelecer os requisitos operacionais que deverão nortear o dimensionamento e as características de funcionamento.
- b) Com auxílio dos códigos e normas aplicáveis, bem como os requisitos de materiais, elaborar o projeto conceitual.
- c) A partir dos dados dimensionais que caracterizam o arranjo dos elementos combustíveis no núcleo do reator, elaborar o projeto básico.
- d) Tomando-se como referência o estudo dos processos de fabricação adequados, e o potencial de fabricação do fornecedor selecionado, elaborar o projeto detalhado.
- e) Após a construção do protótipo proceder aos teste de aceitação e qualificação do equipamento com o auxílio de uma bancada de ensaios capaz de simular as condições de funcionamento do circuito primário do reator.

Deve-se destacar que nas etapas do projeto conceitual e do projeto básico podem ser necessárias bancadas e modelos de análise para validação de alternativas propostas.

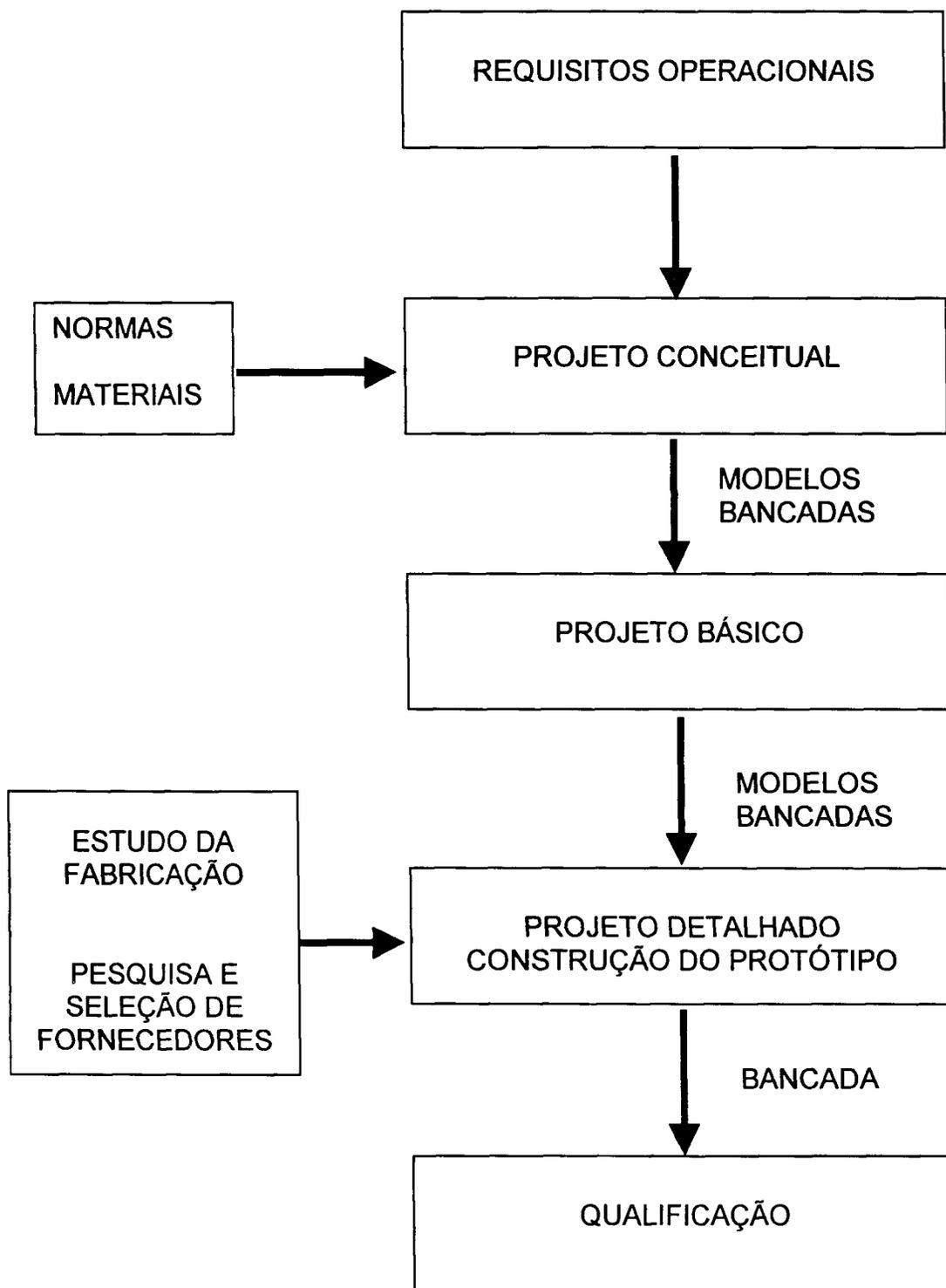


FIGURA 6.1. Diagrama de Blocos resumindo os passos principais para o desenvolvimento do projeto de um MAB.

6.4 Requisitos Operacionais

Para satisfazer as necessidades de controle de potência do reator, os requisitos operacionais estabelecidos para atendimento do projeto foram os seguintes:

- a) Pressão de Projeto = 17 N/mm^2
- b) Temperatura de Projeto = $345 \text{ }^\circ\text{C}$
- c) Carga de Operação (haste +conjunto de controle) = 1290 N
- d) Velocidade = 60 mm/min
- e) Passo da rosca da Haste de Acionamento: 6 mm
- f) Rotação do Motor do MAB : 10 RPM
- g) Curso de Operação = 972 mm

Os requisitos de pressão e temperatura de projeto referem-se às características de operação do circuito do primário.

A carga de operação refere-se à somatória dos pesos dos componentes do conjunto de controle (aranha, barras de controle e mola de inserção rápida das barras de controle). No caso das barras de controle deve ser salientado a concentração e densidade das substâncias especificadas para a função de absorção de nêutrons(boro, cádmio, háfnio, liga prata-índio-cádmio).

Os requisitos do passo da rosca e a velocidade de movimentação da haste de acionamento estão ligados à característica de resolução para a variação de potência desejada.

6.5 Seleção de Materiais

Para satisfazer os requisitos estruturais, os materiais dos componentes que constituem a barreira de pressão foram especificados de acordo com a norma ASME Pressure Vessel Code –Section III.

Os materiais que constituem a barreira de pressão ou seja o tubo do estator e tubo de contenção do indicador de posição são respectivamente AISI tipo 414 e AISI tipo 304.

Os componentes sujeitos a desgaste mais intenso e sem lubrificação convencional, o qual ocorre submerso no fluido de processo, como é o caso dos rolamentos, são feitos de Stellite grau 6 nas pistas e grau 1 nos corpos rolantes.

A haste de acionamento sendo também submetida um desgaste elevado, através do contato com os roletes, nas mesmas condições citadas acima, é feita de aço inox endurecido por precipitação – 17- 4PH.

As molas como devem suportar bem as condições de corrosão sob tensão, são feitas de Inconel X 750 UNS N° 07750

O rotor bipartido como deve satisfazer aos requisitos magnéticos citados no item 2.4.1.1, é feito em aço ASTM – A 473 tipo 420

6.6 Desenvolvimento do Projeto Eletromecânico do MAB.

A primeira referência para o arranjo mecânico de posicionamento dos MABs foi imposto pela distribuição dos elementos combustíveis no núcleo do reator, correspondente à potência desenvolvida, e o conseqüente posicionamento das aranhas com as barras de controle em cada elemento combustível.

Considerando que a linha de centro das aranhas coincide com a linha de centro de cada elemento combustível e que em cada cubo de aranha estará acoplado a uma haste de acionamento, então as distâncias entre centros destas barras vai determinar a distância entre centros do MABs.

O diâmetro máximo dos estatores fica portanto limitado à citada distância entre as linhas de centro.

Com base nas solicitações de carga a serem suportadas pelos MABs e com base no trabalho proposto por D.A. Guerdan – “ Theory and Design of Canned Reluctance Motors with Slip-on Stators and Collapsible Rotors” publicado na Bettis Technical Review em Setembro de 1962, foi possível após algumas considerações de dimensionamento, estabelecer um diâmetro para o estator a ser aplicado no MAB da planta PWR do CTMSP. Para o projeto deste estator foram considerados os requisitos citados no item 3.2 deste trabalho, possibilitando que este componente esteja de acordo com os requisitos de classificação de segurança nuclear em conformidade com a norma ANSI/ANS-51.1-83.

Para possibilitar análises de funcionamento e possíveis interferências de montagens foram construídos modelos em poliuretano e polietileno do tubo do rotor e do rotor bipartido conforme mostrado nas figuras 6.2, 6.3, e 6.4.

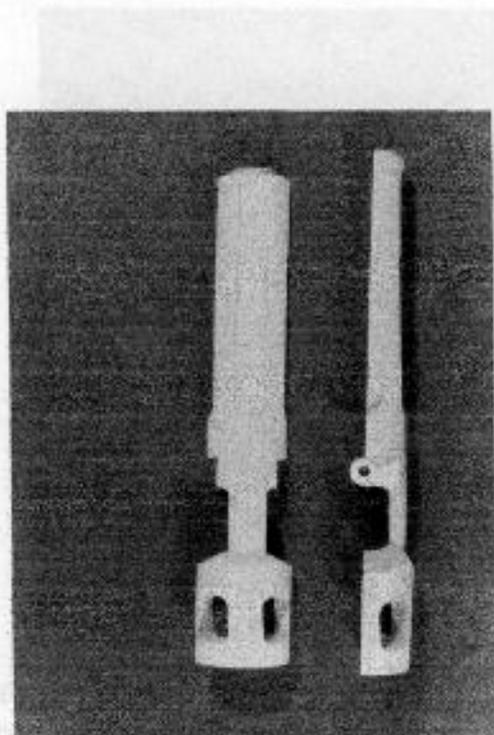


FIGURA 6.2. Detalhe do modelo do rotor bipartido construído em poliuretano

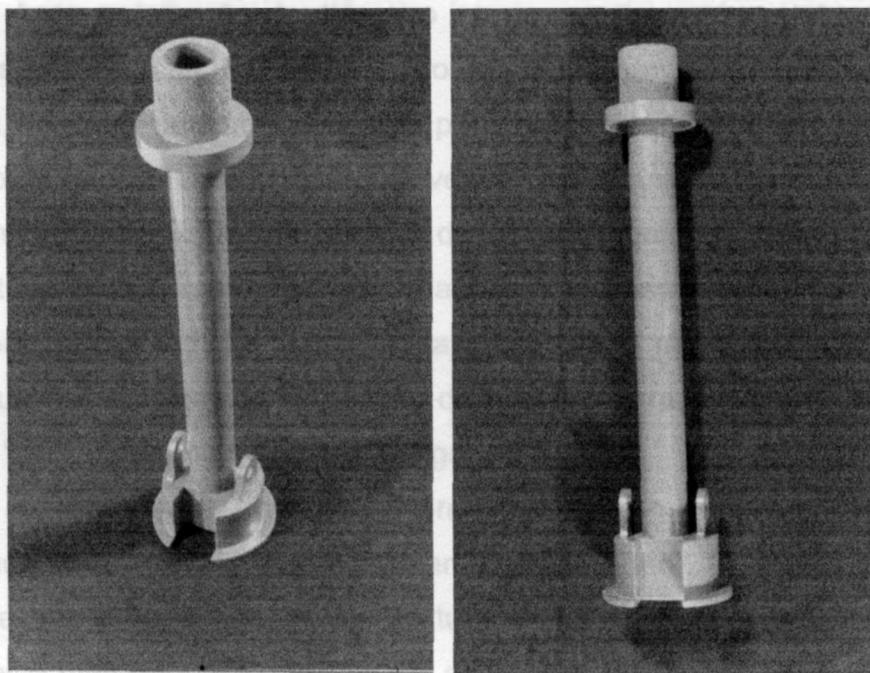


FIGURA 6.3. Detalhe do modelo do tubo do rotor do MAB para análise de dimensões e interferências.

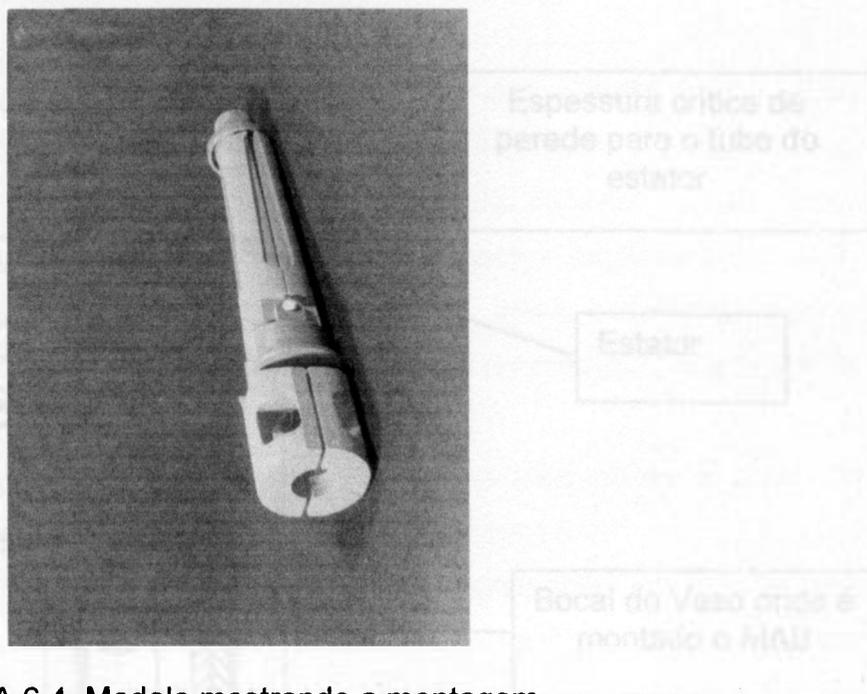


FIGURA 6.4. Modelo mostrando a montagem do tubo do rotor com o rotor bipartido.

Após a definição do diâmetro interno e externo do estator, bem como as dimensões do rotor bi-partido e do tubo do rotor, definidos pela mesma referência, foi feito um projeto básico para determinar como os componentes: rotor, tubo do rotor e tubo do estator deveriam ser arranjados para não exceder o espaço limitado pelo diâmetro interno do estator, conforme indica a figura 6.5. Desse estudo e do compromisso entre aspectos de permeabilidade magnética e de resistência mecânica foi estabelecida a espessura disponível para o tubo do estator, que é a fronteira da contenção de pressão para o fluido de processo na tampa do VPR, conforme mostrado na figura 6.5

A espessura mínima ocorre na região do tubo do estator correspondente à interface com o enrolamento do estator. Com esta espessura e com a pressão atuante no interior do tubo verificou-se qual tensão admissível deveria ter o material para que fossem satisfeitos os limites estabelecidos pela norma ASME Pressure Vessel Code – Section III, resultando na especificação do material ASME – SA 479 - tipo 414 para o material do tubo do estator.

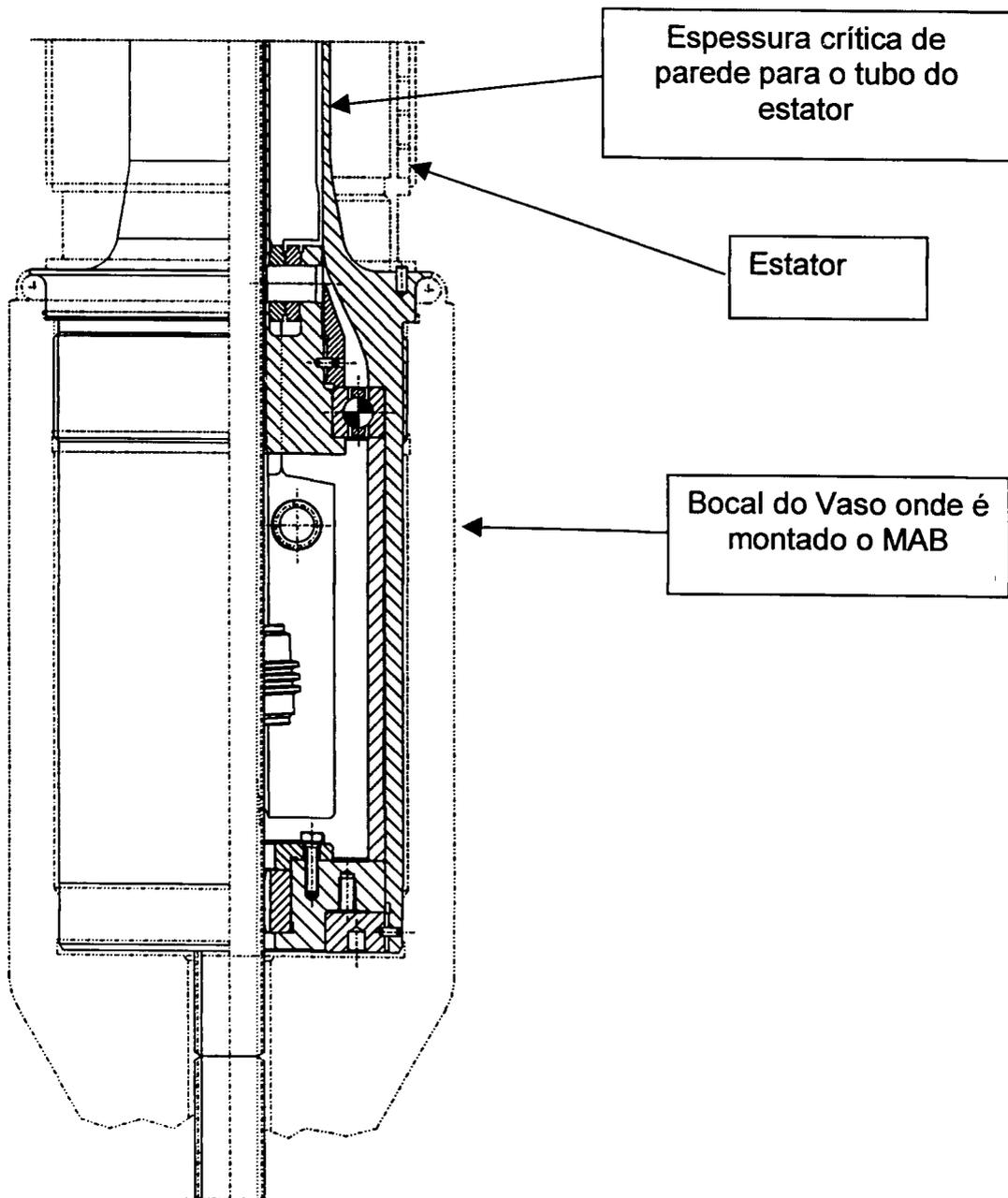


FIGURA 6.5. Detalhe do Conjunto mecânico do MAB mostrando a região crítica estrutural do Tubo do Estator

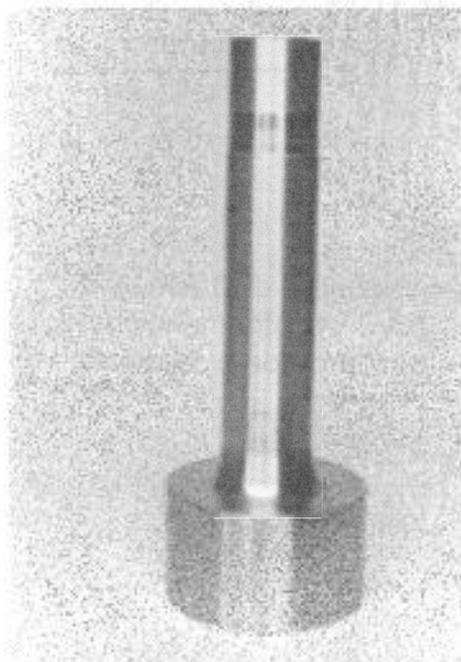
6.7 Construção do Primeiro Protótipo Básico .

Com os requisitos funcionais e com as constatações obtidas por meio de ensaios de montagem realizados com os modelos mostrados nas figuras 6.2, 6.3 e 6.4, foram desenvolvidos os desenhos de fabricação para construção de um modelo em aço, onde fosse possível estudar os aspectos funcionais do MAB, visualizando possíveis interferências mecânicas, bem como o desempenho do mecanismo concebido para o acoplamento do conjunto de roletes com a haste de acionamento.

Assim foi concebido um dispositivo para a montagem deste protótipo mecânico completo cujo aspecto geral é o indicado na figura 6.7.

Nesse desenvolvimento já houve uma preocupação de atender aos códigos e normas aplicáveis aos projetos mecânico e elétrico, principalmente para a garantia do dimensionamento. Não houve, no entanto, uma consideração de todos os requisitos de segurança e de qualificação do equipamento além de uma substituição de materiais para facilitar a fabricação de protótipos.

Nessa etapa (projeto básico) procurou-se consolidar a compatibilidade dos espaços disponíveis com o desempenho funcional mecânico dos componentes, estabelecendo os primeiros ensaios que confirmaram na prática o que havia sido previsto na concepção teórica.



Como o MAB a ser ensaiado neste dispositivo opera sem estar em contato com água, foi possível fabricar o tubo do estator a partir de um material mais fácil para obtenção no mercado, ou seja o ASME – SA 473 - tipo 420.

FIGURA 6.6. Tubo do estator fabricado em aço ASTM – A 473 - tipo 420.

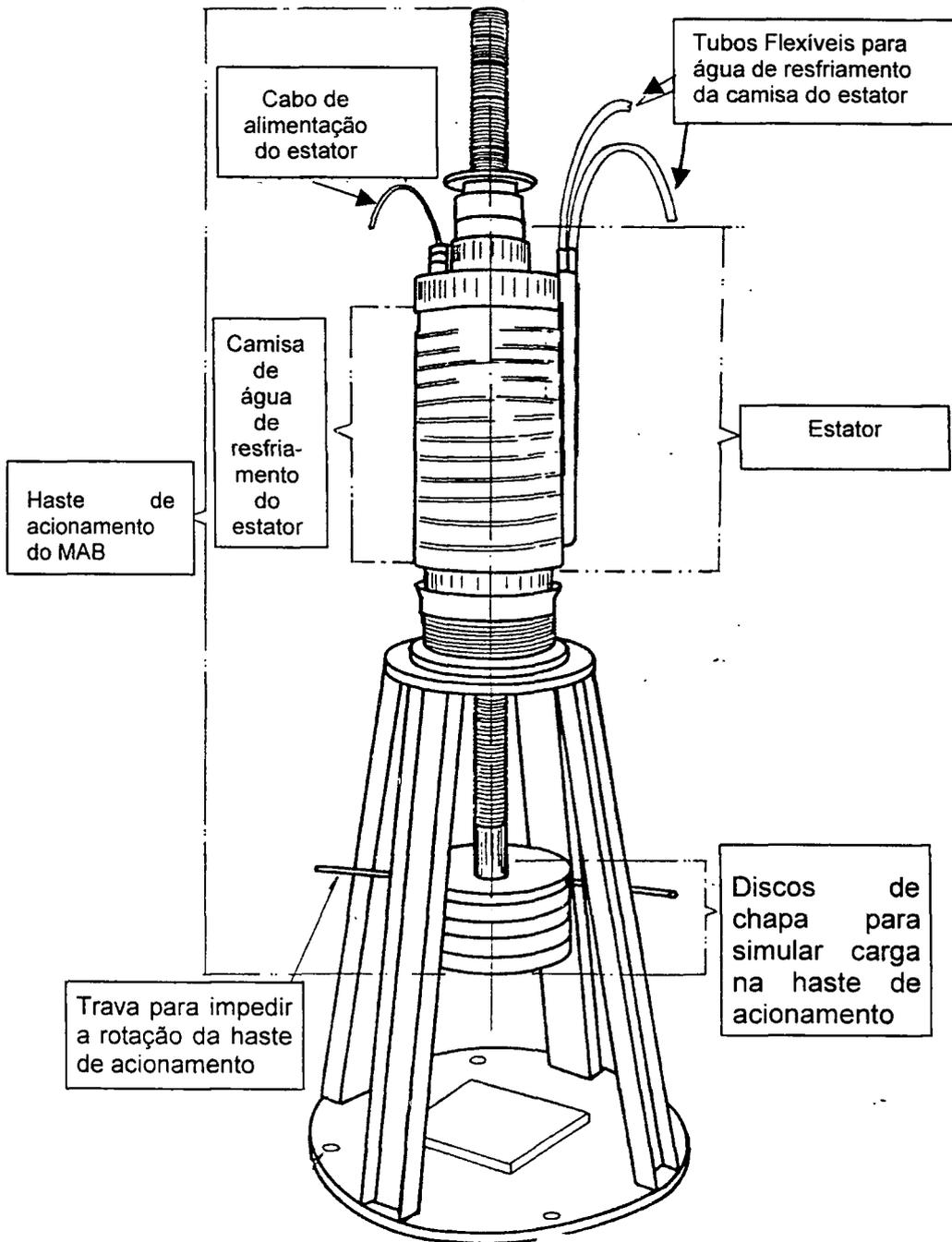


FIGURA 6.7. Dispositivo simulador de carga para ensaio do funcionamento do MAB sem estar mergulhado no fluido de processo e sob pressão.

Os componentes do conjunto mecânico correspondente ao primeiro protótipo foram fabricados da seguinte forma:

a) Tubo do Estator: Com base nas informações bibliográficas obtidas para dimensionamento do estator e dos componentes do rotor, e com base nos estudos de concepção de montagem, conforme indicado na figura 6.7, foi fabricado um tubo de estator que fosse compatível com a montagem prevista no dispositivo de ensaio do MAB a seco. Este componente teria somente o compromisso de suportar o estator posicionando-o corretamente para possibilitar o funcionamento do motor do MAB. O componente assim fabricado apresentou as características mostradas na figura 6.6.

b) Fabricação do Rotor bipartido- material aço ASTM – A473 tipo 420 com acabamento superficial máximo de $3 \mu\text{m}$ (rugosidade média), e seguindo o desenho desenvolvido a partir das informações obtidas com a construção dos modelos em polietileno, e cujo aspecto geral pode ser observado na figura 6.8.

Na figura 6.9 é possível observar a montagem das molas que permitem o afastamento das duas partes do rotor bipartido quando for desejável a inserção rápida das barras (*scram*).

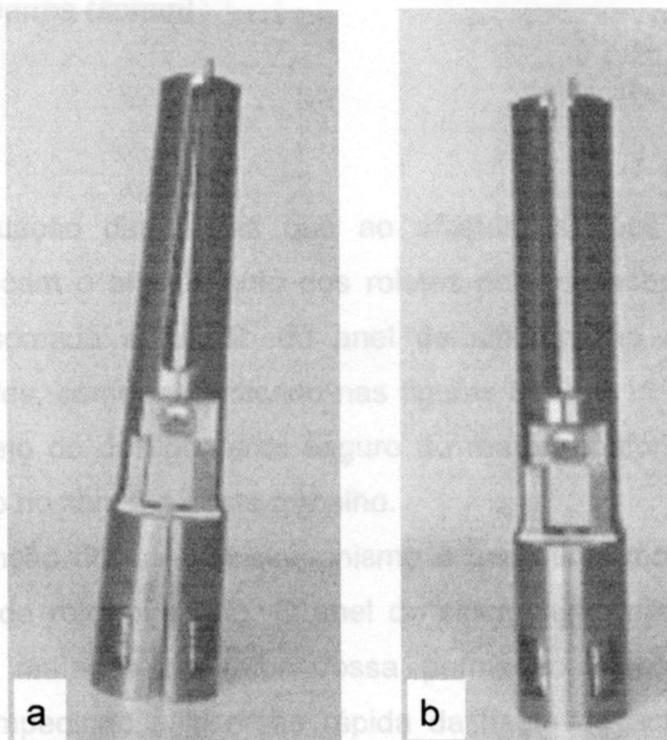


FIGURA 6.8. Protótipo em aço ASTM – A 473 tipo 420, do rotor bipartido, mostrado na condição aberto (a), quando o estator estiver desenergizado, e condição fechado (b), quando o rotor impõe o acoplamento dos roletes com a haste de acionamento

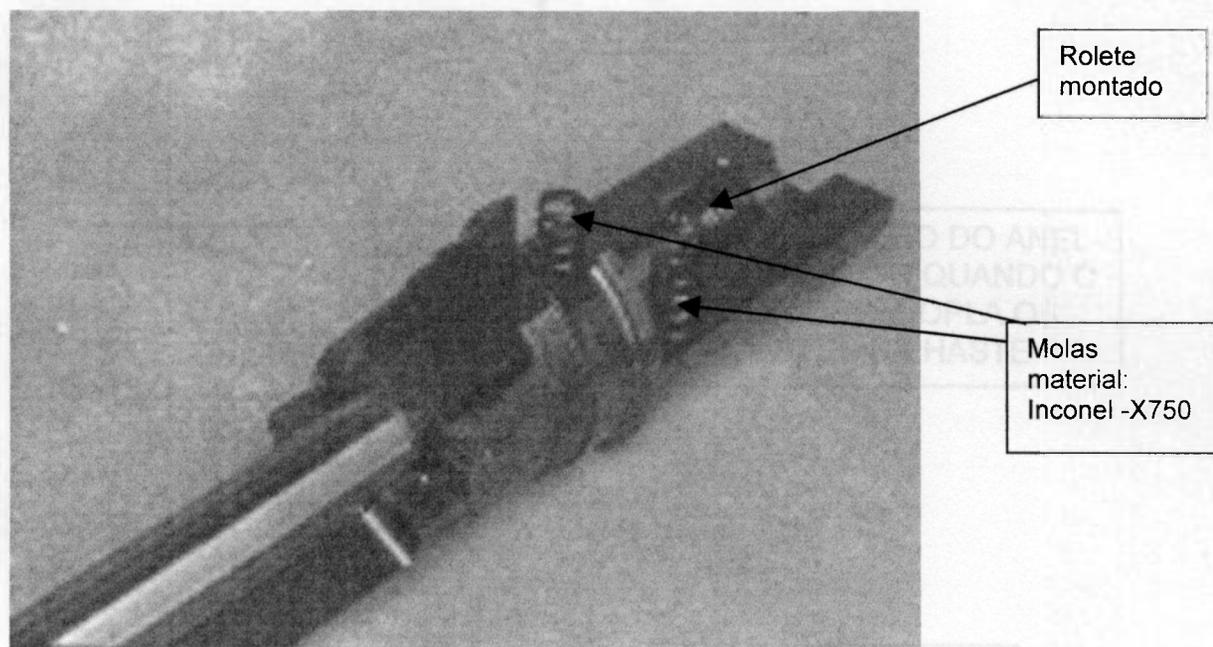
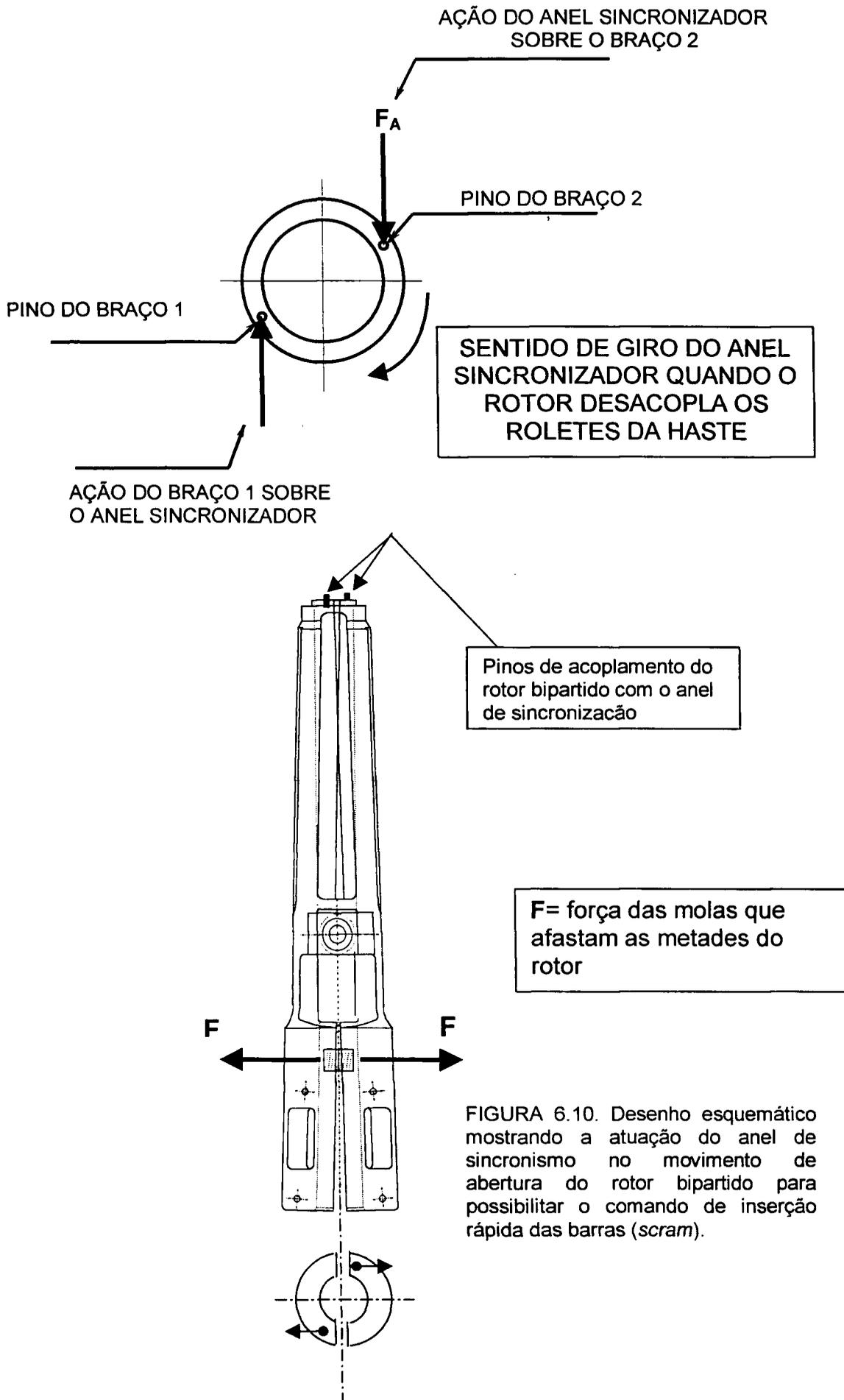


FIGURA 6.9. Rotor bipartido mostrando a montagem das molas que ajudam a separar as duas partes para o desacoplamento dos roletes na condição de inserção rápida das barras (*scram*)

A atuação das molas que ao afastar as duas metades do rotor bipartido, provocam o afastamento dos roletes para desacoplarem da haste de acionamento, somado à função do anel de sincronismo do movimento das referidas metades, conforme indicado nas figuras 6.10, 6.11 e, 6.12, atendem o critério de projeto do desligamento seguro do reator, conforme o critério 23 do 10CFR50 citado no item 3.1 deste trabalho.

A função do anel de sincronismo é garantir o movimento simultâneo das duas metades do rotor-bipartido. O anel de sincronismo não permite, portanto, que uma das metades do rotor possa permanecer acoplada à haste de acionamento, impedindo a inserção rápida da haste de acionamento em uma situação de emergência.



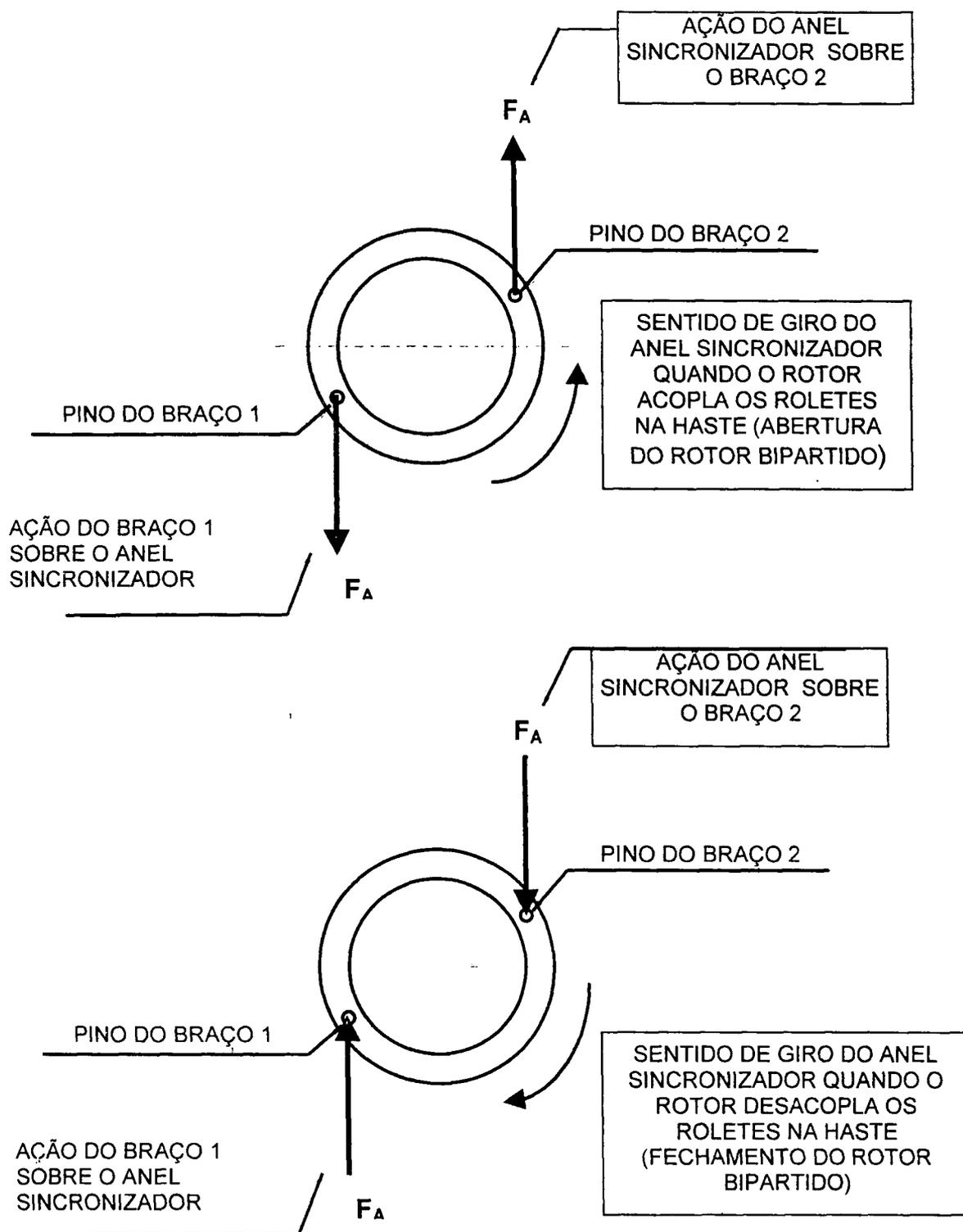


FIGURA 6.11. Desenho esquemático do Anel de Sincronização nas duas situações possíveis de movimentação – Abertura e Fechamento do Rotor Bipartido.

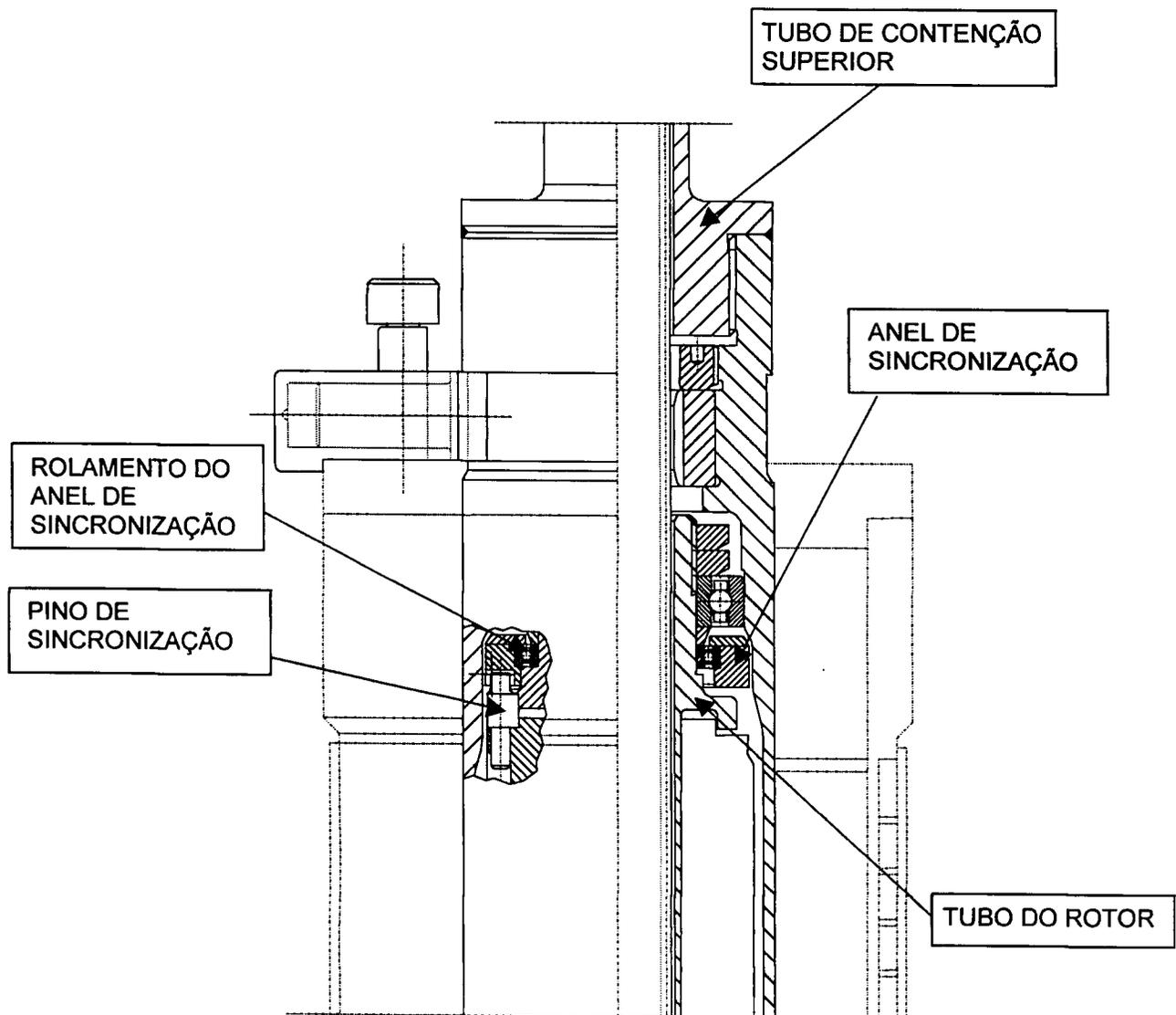


FIGURA 6.12. Detalhe da Montagem do Mecanismo do Anel de Sincronização, mostrando o acoplamento do mesmo com o rotor bipartido

c) Fabricação dos roletes - os roletes como são componentes de alta solicitação ao desgaste, foram fabricados com material correspondente a liga de cobalto do tipo Stellite -6 , conforme mostrado na figura 6.13.

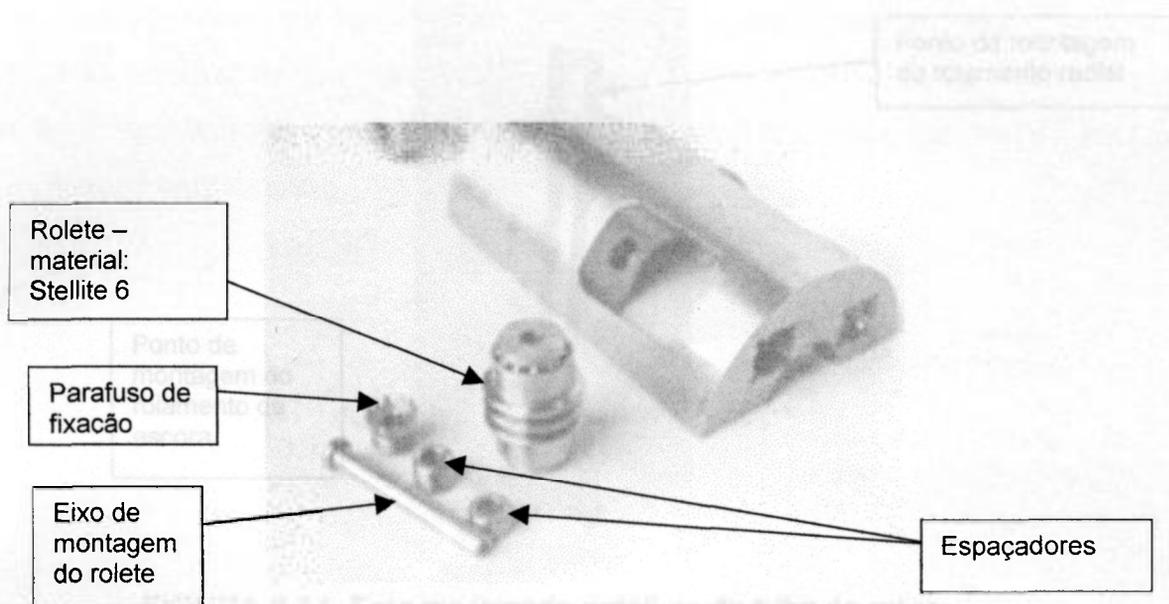


FIGURA.6.13. Rotor bipartido com rolete desmontado, mostrando outros componentes do conjunto do rolete, como eixo, espaçadores e parafuso de fixação

d) Fabricação do Tubo do Rotor :- O rotor bipartido articula suas partes no componente denominado tubo do rotor, que a partir do modelo mostrado na figura 6.3 foi fabricado em aço ASTM – A – 473 tipo 420 para ser montado no dispositivo de ensaios mostrado na figura 6.6, e cujas características podem ser vistas na fig. 6.14.

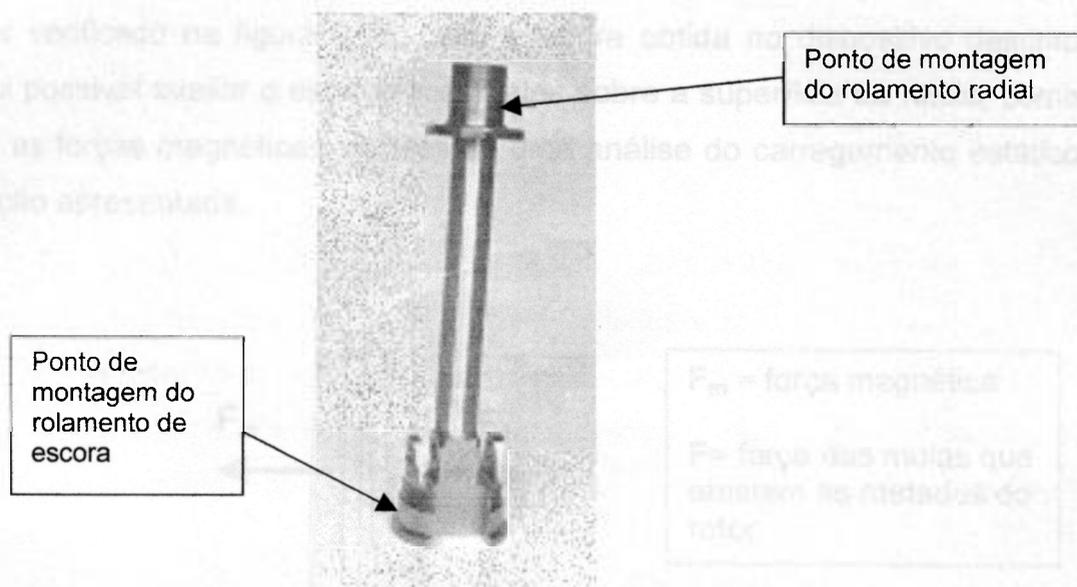


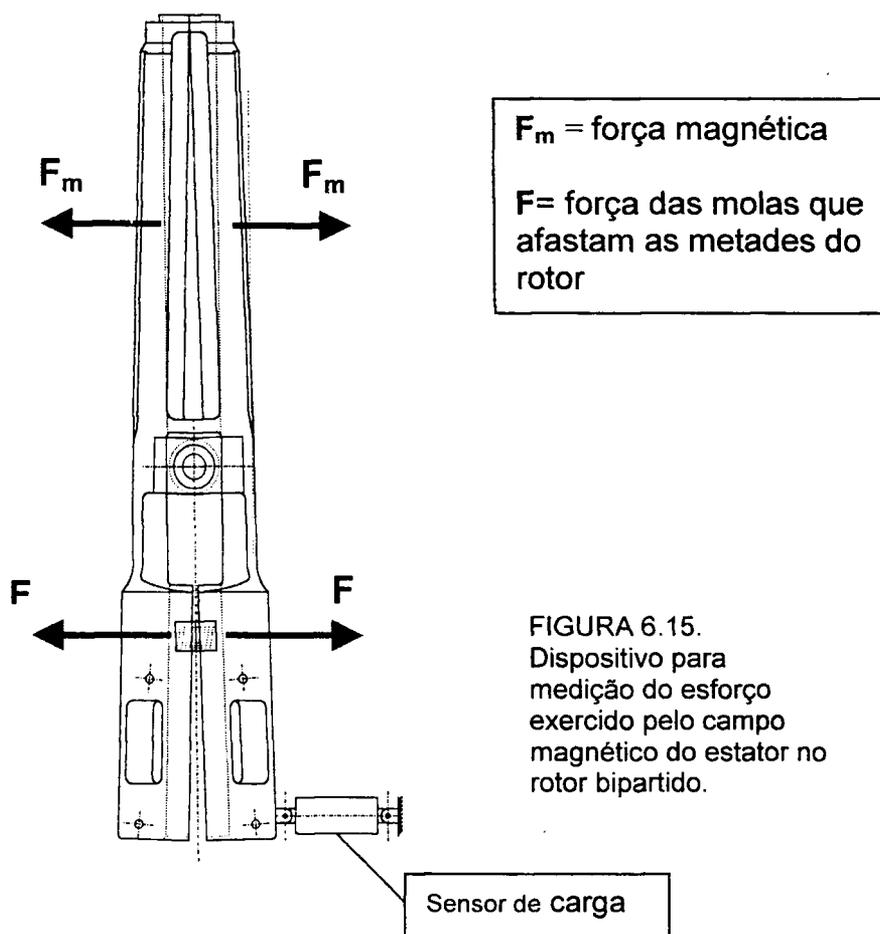
FIGURA 6.14. Foto mostrando detalhes do tubo do rotor.

O protótipo aberto que foi denominado de MAB 1, montado como mostra o desenho esquemático apresentado na figura 6.6, possibilitou a medição da velocidade real de subida e descida da barra em conformidade com a rotação imposta ao motor. Possibilitou também avaliar o torque real relacionado com a carga imposta na extremidade da barra, bem como verificar os esforços reais de atração dos roletes na haste de acionamento.

6.7.1 Ensaio para verificar os esforços de atração dos roletes na haste de acionamento

O ensaio para verificação dos esforços reais de atração dos roletes na haste de acionamento permitiu a medição dos esforços de atração magnética do rotor bipartido no campo magnético gerado pelo estator.

Para este ensaio foi instalado um sensor de carga na base do rotor bipartido, no MAB instalado na bancada de ensaio mostrada na figura 6.7, e que pode ser verificado na figura 6.15. Com a leitura obtida no dispositivo descrito acima foi possível avaliar o esforço dos roletes sobre a superfície da haste, como também as forças magnéticas, através de uma análise do carregamento estático da situação apresentada.



O resultado do ensaio mostrou que para uma situação em que foi aplicada no estator uma corrente de 4 A, a força máxima lida no sensor de carga foi de 47634,2 N

6.7.2 Ensaio para medição do Torque em função da carga na haste de acionamento.

O objetivo deste ensaio foi levantar as curvas de torque do motor do MAB em função da corrente de alimentação das fases do estator.

Estes ensaios possibilitaram também o conhecimento da característica de acoplamento do rotor e roletes com a haste de acionamento quando excitado estaticamente nas seguintes condições:

- a) com uma fase energizada
- b) com duas fases energizadas
- c) com três fases energizadas

Os resultados deste ensaio foram comparados com os valores calculados no projeto e, com isso foi possível realimentá-lo.

Para realização deste ensaio a carcaça do estator do motor foi acoplada a um transdutor de torque, de tal maneira que a ancoragem desta carcaça ficou submetida ao transdutor que assim detectava o esforço solicitante correspondente.

Assim o resultado obtido para um ensaio de torque máximo está indicado na tabela 6.1 e na fig. 6.16.

TABELA 6.1 – Leituras do Ensaio de Torque Máximo do MAB

Leitura Número	Torque Máximo (N.m)	Tensão nas Fases Energizadas em [V]			Corrente nas Fases Energizadas em [A]			Corrente total [A]
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	
1	21,9	137,8	137,5	138,0	3,9	3,9	4,5	12,2
2	20,4	123,0	124,4	123,6	3,6	3,6	3,6	10,7
3	18,6	99,0	99,0	99,1	3,1	3,1	3,1	9,3
4	15,0	79,2	79,1	79,2	2,7	2,7	2,7	8,0
5	11,7	59,3	59,2	59,3	2,1	2,1	2,1	6,3
6	7,4	39,6	39,5	39,6	1,5	1,5	1,5	4,4
7	2,3	19,7	19,6	19,7	0,8	0,8	0,8	2,3

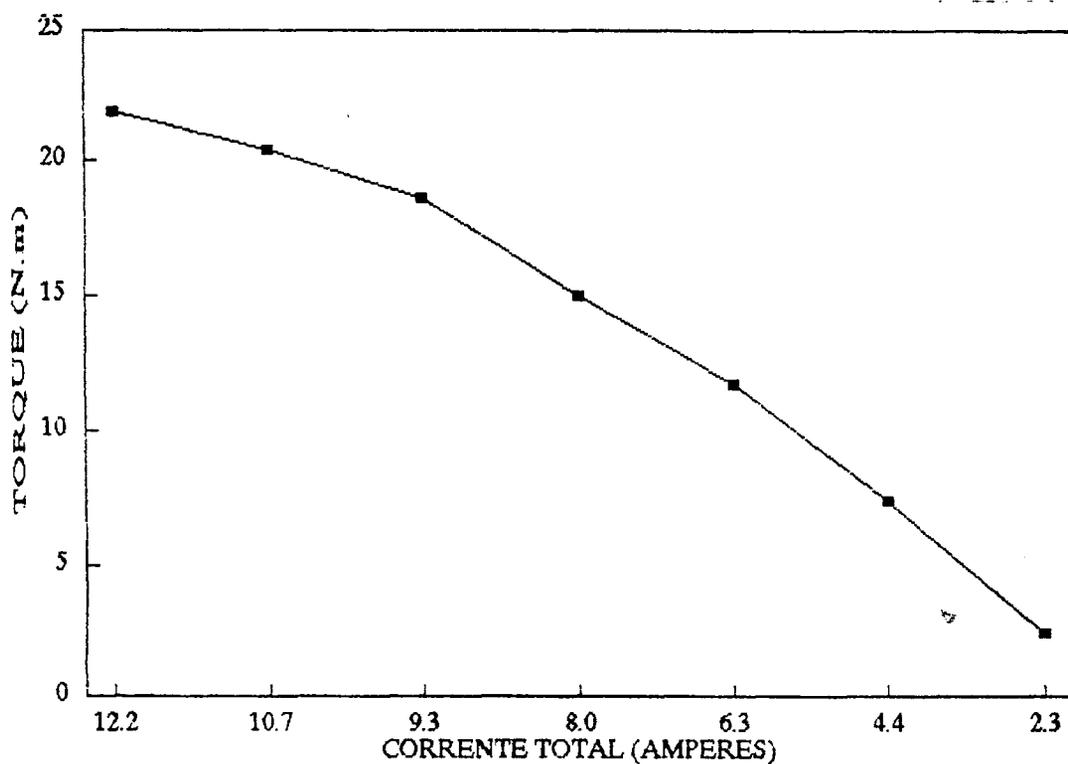


FIGURA 6.16. Torque máximo em função da Corrente

6.8– Bancada de Teste Completa - Ensaios com o protótipo completo

Entende-se como protótipo completo o correspondente em aspectos construtivos mecânicos ao equipamento que será montado no reator, e submetido às pressões e temperaturas do circuito do primário. (CTMSP,1987)

O protótipo aqui, ainda, não é o equipamento finalizado, mas o MAB do início do processo de qualificação e certificação quanto aos requisitos de segurança, funcionais e estruturais.

Nesta fase do projeto iniciou-se o desenvolvimento dos desenhos definitivos para a fabricação do referido protótipo, prevendo uma montagem em uma bancada de testes especialmente construída para simular as condições de trabalho do reator, onde o MAB deverá funcionar.

Passou-se nessa etapa então, a planejar os ensaios e testes necessários para comprovar o bom funcionamento do mecanismo submetido às condições reais de operação.

Esta bancada de ensaios possibilita avaliar o funcionamento integrado do MAB com o Elemento de Controle, para as condições operacionais do reator.

O vaso de pressão que simula as condições do reator na bancada corresponde a uma situação onde existe o modelo de um só elemento combustível, com a estrutura guia correspondente para a movimentação das barras de controle, como pode ser visto na figura 6.17.

Em operação normal, um dispositivo do MAB monitora todas as posições de inserção do Elemento de Controle, dentro do Elemento Combustível. A construção mecânica real da aranha com a mola de Scram está também presente na bancada, possibilitando ensaios de queda de barra para que seja avaliado o tempo mínimo de inserção rápida das barras (*scram*) necessário para que sejam atendidos os requisitos de segurança nas condições de acidente.

As características químicas da água de processo da bancada estão indicadas na tabela 6.2, as características funcionais são indicadas na tabela 6.4, e o aspecto construtivo da seção de ensaios está mostrado nas figuras 6.16.

TABELA 6.2 – Características Químicas da Água de Processo da Bancada

Característica Química	Valores
PH a 25 °C	>8,5
Condutividade	<1,0 $\mu\text{s}/\text{cm}$
Oxigênio dissolvido	<5 ppb
Cloretos	<0,15 ppm
Fluoretos	<0,15 ppm
Sólidos em suspensão	<10 ppm
Sílica	<5 ppb
Alcalinidade p/ hidróxido	zero

TABELA 6.3 Características Funcionais da Bancada de Ensaio Completa do MAB

Parâmetro	Unidade	Operação	Projeto
temperatura	°C	275	300
pressão	N/mm^2	13,5	16,5
vazão	Kg/s	20	20

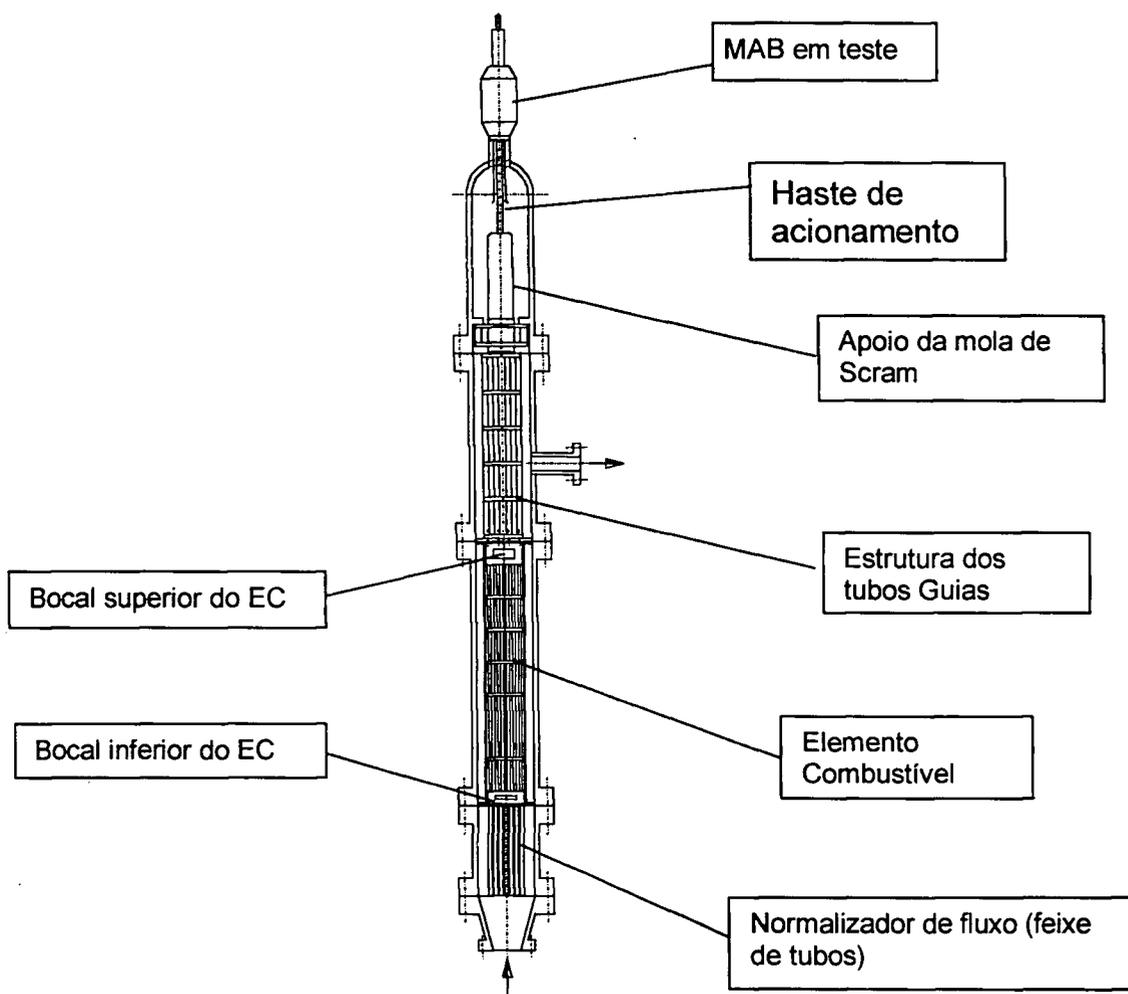


FIGURA 6.17. Seção de Ensaio da Bancada de Testes do MAB

6.9 Ensaios Desenvolvidos na Bancada de Testes Completa do MAB

6.9.1 Ensaio de Queda de Barras – Determinação do Tempo

O primeiro ensaio desenvolvido na bancada de teste com o protótipo completo foi o ensaio que possibilitou a determinação do tempo de queda de barras em uma simulação de inserção rápida de barras (*scram*).

A partir de uma rotina experimental previamente desenvolvida iniciaram-se os primeiros testes de queda de barra na bancada.

Tais testes tinham como objetivo avaliar parâmetros de funcionamento do conjunto do MAB sob condições simuladas de pressão, temperatura e vazão do fluido refrigerante encontradas na operação real.

O parâmetro de referência para avaliação do tempo de queda de barra levantado no ensaio da bancada era ≤ 1 segundo, com uma velocidade final de impacto ≤ 1 m/s.

O resultado obtido como pode ser observado na fig. 6.18, indicou um tempo excessivamente longo, não atendendo aos requisitos postulados de projeto para desligamento seguro do reator.

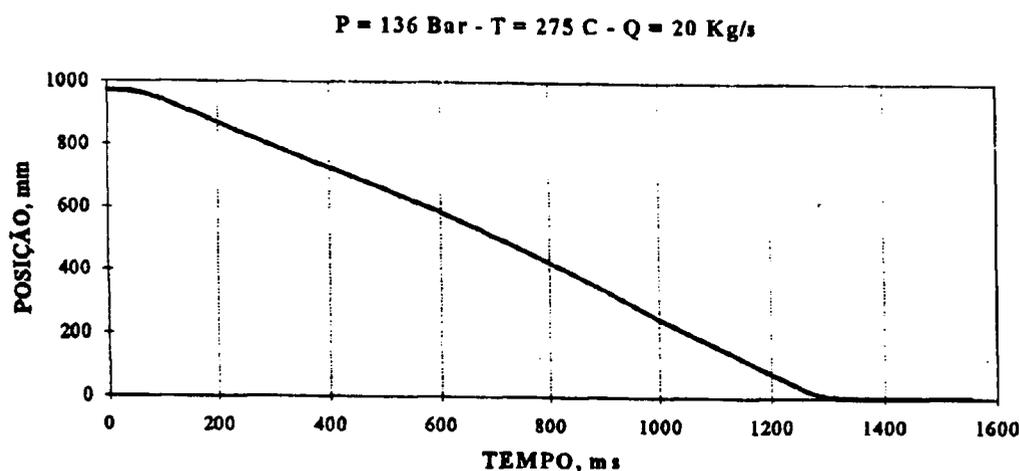
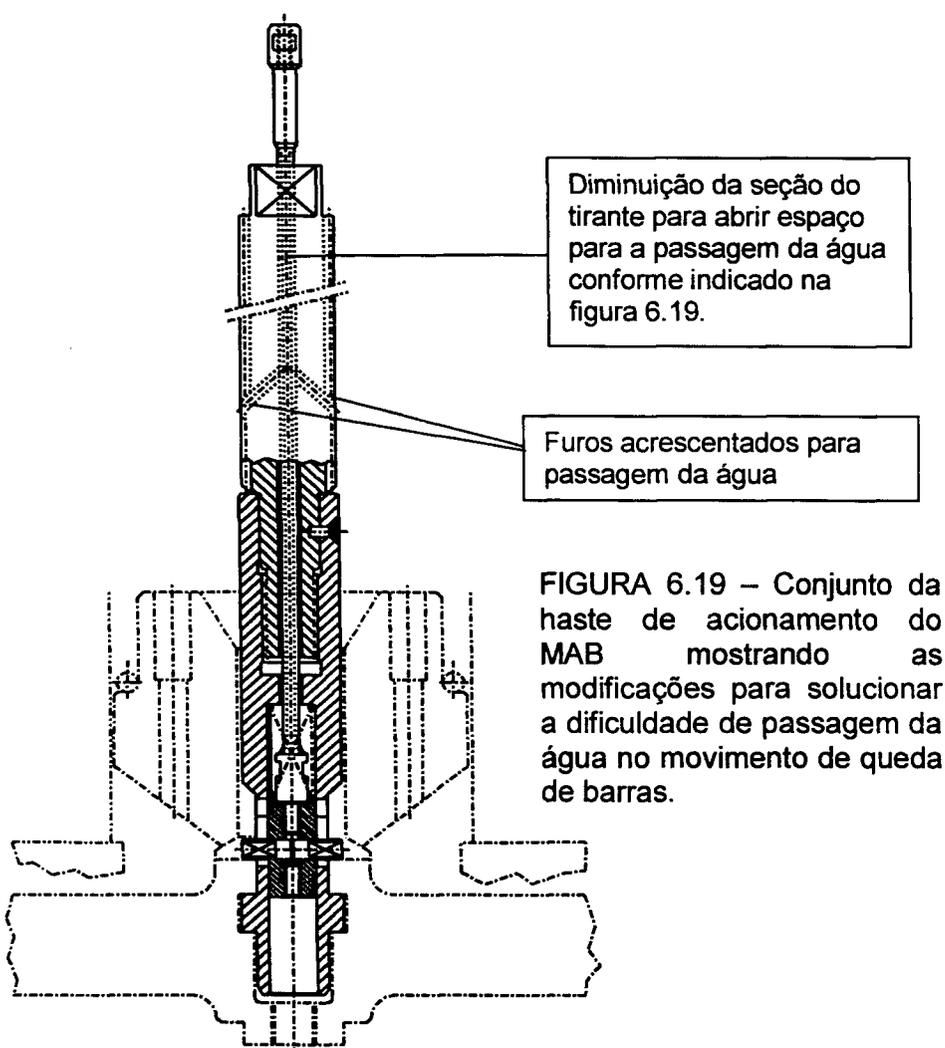


FIGURA 6.18. Curva Posição em função do Tempo para uma inclinação da Bancada = 0°

6.9.2 Análise do resultado do ensaio para determinar o tempo de queda de barras quando é comandado uma Inserção Rápida de Barras (*scram*):

O resultado do ensaio que revelou um tempo de queda de barras maior do que o desejado teve como causa provável a resistência hidrodinâmica atuando na barra de acionamento quando esta deslocava-se no interior do tubo de contenção superior do MAB. Este fenômeno ocorreu porque a folga entre a haste e o tubo citado é muito pequena dificultando a passagem da água que deve deslocar-se da parte inferior do MAB para a parte superior.(CTMSP,1987)

Assim, para corrigir esta ocorrência, foi proposta uma modificação no núcleo da haste de acionamento, possibilitando um espaço para a água escoar pelo seu núcleo, conforme indicado na figura 6.18 e 6.19, diminuindo assim a resistência hidrodinâmica do deslocamento da haste no movimento de inserção rápida das barras(*scram*).



O resultado obtido com as modificações propostas, mostrou que o tempo de queda de barras passou de 1,39 segundos para 0,98 segundos, porém mostrou também que a temperatura do isolamento dos enrolamentos do estator ficou muito próxima do limite de 220°C estabelecido pelas condições de funcionamento do motor elétrico do MAB.

Este fenômeno é explicado pelo fato de ocorrer uma circulação natural através da nova configuração de folgas, para passagem da água, na modificação indicada nas figuras 6.18 e 6.19, levando água quente até o extremo superior da estrutura do MAB, causando o citado aquecimento do estator.

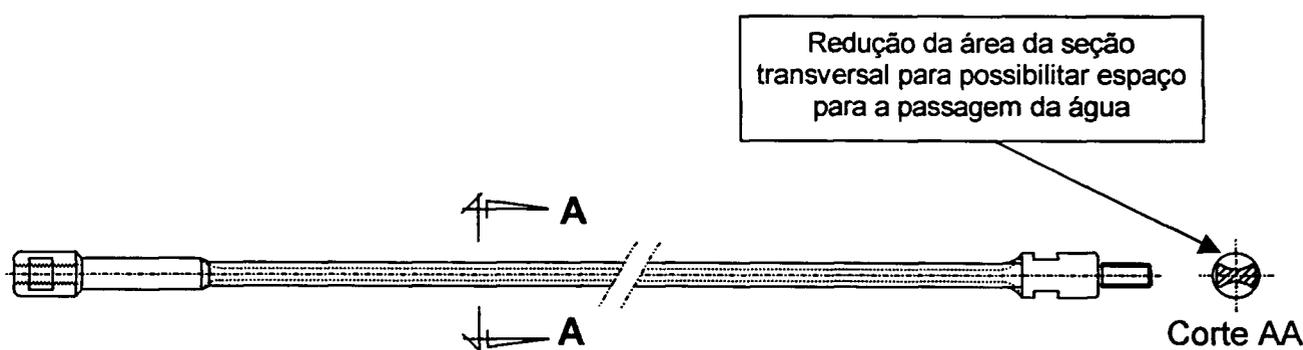


FIGURA 6.20. Detalhes da modificação da seção transversal do tirante central da haste de acionamento do MAB (fig. 6.18)

Diante do resultado encontrado optou-se por restabelecer as condições originais da geometria do núcleo da haste de acionamento, onde não há possibilidade da ocorrência da circulação natural da água do primário.

Para tornar viável a aceitação do tempo de queda de barras de 1,39 segundos, foi reconsiderado o ponto de comando de inserção rápida das barras para o aumento inadvertido do nível de potência de 110% para 108% da potência nominal, compensando assim o aumento do referido tempo que deveria ser de 0,98 segundos.

7 CONCLUSÕES

No desenvolvimento deste trabalho foi possível mostrar as dificuldades não só do desenvolvimento do projeto de um equipamento mecânico aplicado na área nuclear, mas também o esforço dispendido para vencer os obstáculos encontrados quando a meta é desenvolver um projeto com tecnologia nacional.

Assim, com base neste trabalho foi possível chegar a uma capacitação para o desenvolvimento do projeto mecânico e estrutural de um MAB, considerando o resultado de experimentos e experiências no país (CTMSP, ANGRA 1 e 2) e no exterior (trabalhos publicados), bem como do conjunto de normas aplicáveis a este tipo de equipamento.

A pesquisa sobre os tipos de MABs aplicados em reatores PWR revelou a existência de dois tipos: o tipo Macaco-Magnético e o tipo Porca-Rolante. Para reatores PWR estacionários de geração de energia onde existam sistemas de injeção de boro para o controle de potência o tipo Macaco Magnético mostra-se mais adequado enquanto para aplicações em reatores de propulsão o tipo Porca Rolante é o recomendado. Além disso, foram apresentadas as descrições de como os MABs operam.

Foram apresentados os tipos de materiais que devem ser utilizados em MABs e alguns critérios para a escolha de materiais para diversos componentes.

Os códigos e normas aplicáveis ao projeto de MABs foram apresentados. Além disso, foram indicados como os MABs devem satisfazer os critérios de projeto de plantas PWR, as associações entre os códigos e normas aplicáveis aos componentes com classificação de segurança nuclear e os pontos a serem atendidos nos relatórios de análise de segurança (qualificação e certificação dos MABs).

Os requisitos de integridade estrutural foram apresentados. Há também, a apresentação de considerações sobre questões associadas à corrosão e ao desgaste de componentes dos MABs onde o contato mecânico ocorre sem lubrificação convencional, mas submerso no fluido do processo.

São apresentadas as características do MAB tipo Macaco-Magnético das usinas nucleares Angra 1 e Angra 2, e, alguns comentários relacionados aos seus aspectos funcionais, seleção de materiais e projeto mecânico.

No estudo de caso que é o MAB da instalação nuclear PWR de teste do CTMSP, do tipo Porca-Rolante, são apresentados: um breve histórico do desenvolvimento, dos passos principais do desenvolvimento do projeto, isto é o que foi feito nas etapas do projeto conceitual, básico e detalhado, considerando os requisitos funcionais, seleções de materiais, os códigos e normas aplicáveis, a qualificação quanto aos requisitos de segurança, a integridade funcional e estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 American Nuclear Society. **Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactor Plants**. La Grange Park, (USA), April 29, 1983 (ANSI/ANS-51.1-1983)
- 2 American Society Of Mechanical Engineers. ASME, **Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Nuclear Power Plant Components**. New York, 1998
- 3 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6023** :informação e documentação : referências :elaboração. Rio de Janeiro, 2002.
- 4 Centro Tecnológico da Marinha Em São Paulo - CTMSP. **Descrição de Equipamento – Bancada de Teste do MAB**. São Paulo, 1987.
- 5 Centro Tecnológico da Marinha Em São Paulo - CTMSP. **Relatório Preliminar de Análise de Segurança- RPAS**. São Paulo, 2000.
- 6 Centro Tecnológico da Marinha Em São Paulo - CTMSP. **Relatório Técnico – Ensaio de Queda de Barras de Controle do Reator**. São Paulo, 1987.
- 7 Centro Tecnológico da Marinha Em São Paulo - CTMSP. **Relatório Técnico – Levantamento das Causas do Aumento do Tempo de Queda de Barras de Controle do Reator**. São Paulo, 1994.
- 8 Comissão Nacional de Energia Nuclear. **CNEN-NE-1.04** Licenciamento de Instalações Nucleares. Rio de Janeiro, 1984.

- 9 Deutsches Patent Und Markenamt. John L. DeWeese. **Schrittweise arbeitender elektromagnetischer Steuerstabantrieb für Kernreaktoren** . Pat. Nr. DE 24 59 871 C2.18. 12. 74 , 7. 5. 87.
- 10 Eletrobrás Termonuclear SA – **Final Safety Analysis Report – Central Nuclear Almirante Alvaro Alberto – unit-1**. Rio de Janeiro, August, 1979
- 11 Eletrobrás Termonuclear SA – **Final Safety Analysis Report – Central Nuclear Almirante Alvaro Alberto – unit-2**. Rio de Janeiro, August, 1999
- 12 Freund, G. A., “**Materials for Control Drive Mechanisms**”, Western Nuclear Corp., New York , 1963
- 13 Gerts, J.; FLAHERTY, J. **Problems in Design of Control Rod Drive Mechanisms for Pressurized Water Reactors**. American Nuclear Society Meeting. New York, October, 1957
- 14 Glasstone, S.; Sesonske, A – **Nuclear Reactor Engineering** , Van Nostrand Reinhold Company Regional Officers, New York, NY, 1981.
- 15 Hanliang, B.; Wenxiang, Z. Duo, D. “**Studies on the Performance of the Hydraulic Control Rod Drive For the NHR – 200**”. Nuclear Engineering and Design 195 (2000) p.117-121.
- 16 Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE - **Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Station Protection Systems Engineers IEEE-352** - New York, NY, 1975
- 17 Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE - **Guide for the Application of the Single Failure Criterion to Nuclear Power Generating Station Class 1E IEEE- 379--** New York, NY, 1977

- 18 Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE – **Installation , Inspection and Testing Requirements for Instrumentation and Electric Equipment During the Construction of Nuclear Power Generating Stations- IEEE-336--** New York, NY, 1980

- 19 Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE - **Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Generating Station IEEE-344--** New York, NY, 1982

- 20 Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE - **Requirements for Reliability Analysis in the Design and Operation of Safety Systems for Nuclear Power Generating Stations IEEE-577--** New York, NY, 1976

- 21 Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE - **Standard Criteria for the Periodic Testing of Nuclear Power Generating Station Class 1E Power and Protection Systems IEEE-338--** New York, NY, 1977

- 22 Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE – **Standard for Type Tests of Continuous Duty Class 1E Motors for Nuclear Power Generation Stations IEEE-334-** New York, NY 1982.

- 23 Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE - **Standard for Type Test of Class 1E Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generation Stations IEEE-383-** New York, NY 1974

- 24 Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE - **Criteria for Protection Systems for Nuclear – Power Generating Stations IEEE-279-** New York, NY 1971

- 25 Ishida, T. et alli , **Development of In-Vessel Type Control Rod Drive Mechanism for Marine Reactor.** Journal of Nuclear Science and Technology, vol38, No. 7 p. 557-570. July,2001.

- 26 Kusunoki, T. et al. " **Design of Advanced Integral Type Marine Reactor, MRX**", Nuclear Engineering Design, 201, 155-175 2000
- 27 Lamarsh, J. R.- **Introduction to Nuclear Reactor Theory**. Reading, Massachusetts. Addison – Wesley Publishing Company, Inc, 1996.
- 28 Lemaire E., Calvar M. Le. " **Evidence of Tribocorrosion Wear in Pressurized Water Reactor**" – Jeumont Industrie – Wear 249 (2002) 338-344 –November 2000
- 29 Mattar Neto, M. N. **Uma Abordagem para a Definição de Critérios , Códigos e Normas para o Projeto Mecânico e Estrutural de Componentes de Centrais Nucleares** Conferência Geral sôbre Energia Nuclear- CGEN-Rio de Janeiro - 1994-ANAIS PROCEEDINGS, p.1055-1059.
- 30 Rong-Fong ,F. ; Ken-Wang ,C.; Jia-Yush, Y. " **Fuzzy Sliding Mode Controlled Slider-Crank Mechanism Using a Permanent Magnet (PM) Synchronous Servo Motor Drive**".- International Journal of Mechanical Sciences 41- 337-355. Taipei, China, 1999
- 31 United States Nuclear Regulatory Commission. **Code of Federal Regulations, Title 10, Chapter 1, Part 50, Appendix A, Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities (10CFR50)** Washington, 1987
- 32 United States Nuclear Regulatory Commission. **Standard Format and Content of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants- LWR Edition, (NUREG-0800)**, Washington, DC, July 1981
- 33 United States Nuclear Regulatory Commission. **Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants- LWR Edition. USA, (NUREG-0800)** Washington, DC, July 1981

- 34 United States Patent Office. Alexandr A. Anikin et al. **Drive of Nuclear Reactors Control Element**. Pat. Nr. 4,238,288. May 24, 1978, Dec. 9, 1980.
- 35 United States Patent Office. Erlig Frisch. **Grippe Type Linear Motion Device**. Pat. Nr. 3,158,766 – Apr. 30, 1962, Nov. 24, 1964.
- 36 United States Patent Office. Gregory W. Morton **Nuclear Reactor Rod Drop Time Testing Method**. Pat. Nr. 6,404,835 B1. Mar. 22, 2000, Jun. 11, 2002.
- 37 United States Patent Office. Harold V. Lichtenberger et al. **Self-Closing Control Rod Grippers** – Pat. Nr. 3,825,160. Dec. 23, 1971, July 23, 1974.
- 38 United States Patent Office. James G. Brooks et al. **Drive Mechanism Nuclear Reactor Control Rod**. Pat. Nr. 4,125,432 – Jan. 24, 1977, Nov. 14, 1978
- 39 United States Patent Office. Jay E. Smith. **Linear Motion Device and Method for Inserting and Withdrawing Control Rods** - Pat. Nr. 4,484,093. Dec. 8, 1982, Nov. 20, 1984.
- 40 United States Patent Office. John E. Tessaro. **Curvilinear Translating Latch and Linkage Arrangement in a Control Rod Drive Mechanism of a Nuclear Reactor**. Pat. Nr. 5,009,834. Aug. 14, 1990, Apr. 23, 1991.
- 41 United States Patent Office. John L. DeWeese. **Fail Safe Linear Motion Device**. Pat. Nr. 3,882,333. Apr. 17, 1973, May 6, 1975.
- 42 United States Patent Office. Joseph Pysnik, et al. **Method and Apparatus for Control Rod Drive Mechanism Analysis using Coil Current Signals**. Pat. Nr. 5,999,583. Apr. 29, 1996, Dec. 7, 1999.

- 43 United States Patent Office. Walter G. Roman et al. **Linear Motion Device**.
Pat. Nr. 2,780,740 – March 25, 1955, Feb. 5, 1957.
- 44 Ware, A.G. , “**Aging Considerations for PWR Control Rod Drive Mechanics and Reactor Internals**”, American Nuclear Society Meeting, Snowbird, (USA), 1988.
- 45 Xu-Yuanhui; Yao-Meisheng; Liu-Jiguo; Zhuo-Huizhong; Ju-Huaimin (Institute of Nuclear Energy Technonolgy, Beijing –China). “HTR-10 Engineering Experiments”.- International Atomic Energy Agency, Viena (Austria). **High Temperature Gas Cooled Reactor Technology Development**. Proceedings of a Technical Comittee Meeting.. 470 p. p. 321-332. Beijing, China, Dec 1