

PROJETO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS DE REATORES NUCLEARES

por

José Augusto Perrotta

RESUMO -- É apresentado um resumo sobre projeto de elementos combustíveis de reatores nucleares. Optou-se por uma informação geral sobre projeto de elementos combustíveis, não sendo visto pontos específicos em um determinado tipo de reator ou um determinado tipo de combustível. Não é feita uma análise sobre cada fenômeno, problemas específicos ou descrição detalhada sobre métodos de análise, pois isto requereria uma definição prévia do tipo de reator e combustível. A metodologia ou os exemplos apresentados são de caráter geral e tem sua importância ou pertinência de aplicação quando de análises específicas do tipo de reator e tipo de combustível.

INTRODUÇÃO

As funções básicas do combustível no reator nuclear são:

- gerar as fissões nucleares
- transferir a energia gerada na fissão nuclear para o refrigerante
- reter os produtos de fissão

As principais características requeridas são:

- compatibilidade entre os materiais combustíveis, de ligação, de revestimento e refrigerante/moderador
- estabilidade (ou integridade) mecânica, térmica e à irradiação
- boa resistência a corrosão e corrosão sob tensão
- resistência à fadiga
- facilidade de fabricação (materiais/componentes/montagens)
- facilidade de reprocessamento
- boa economia de nêutrons
- longo tempo de operação no reator e alta queima (consumo de Urânio/Plutônio)
- baixo custo

Os combustíveis nucleares são formados dos elementos físseis e férteis (U, Th, Pu) sob diversas formas de compostos e de materiais estruturais que servem de elementos de ligação, revestimento e estrutura. A característica do combustível está associada às necessidades neutrônicas e térmicas e depende da compatibilidade do teor do material físsil/fértil com o processo de fabricação e também do seu desempenho sob irradiação. Pode-se ter, por exemplo, combustíveis com alto ou baixo enriquecimento de Urânio-235. Em realidade o que se pro

cura é uma relação de materiais físsil/fértil/estrutural que atendam as características neutrônicas necessárias mas também atendam ao fator tecnológico de fabricação e que tenha o desempenho adequado sob irradiação e condições de temperatura no reator. De uma maneira geral se procura associar o Urânio (Tório ou Plutônio) à materiais de baixa seção de choque de absorção de forma a se trabalhar com a relação teor de urânio/concentração isotópica de U-235 adequada pelos fatores anteriormente mencionados. A tabela 1 mostra uma relação de compostos de Urânio utilizados como combustível nuclear, verificando-se a relação do teor de Urânio nestes compostos, e a tabela 2 a relação entre absorção e produção de nêutrons para alguns desses compostos.

Os principais materiais combustíveis estão em forma de ligas metálicas, materiais cerâmicos e dispersões.

As principais ligas metálicas utilizadas como combustível nuclear são: Urânio Metálico, ligas de Urânio-Alumínio, ligas de Urânio-Zircônio, Urânio-Molibdênio, etc.

Os combustíveis de ligas metálicas tem as seguintes vantagens: boa economia de nêutrons, alta condutividade térmica, e boa fabricabilidade dentro de certos limites de teor de Urânio.

Urânio metálico apresenta um substancial inchamento sob irradiação (60% em combustíveis altamente irradiados). Também é altamente reativo quimicamente e tem compatibilidade a alta temperatura somente com alguns materiais refrigerantes (CO_2 e He). É usado em reatores plutoníferos, a baixa temperatura, e utilizado inicialmente em reatores ingleses (reatores de potência refrigerados a gás). Em ambos os tipos de reatores a queima é limitada em um valor baixo para diminuir os danos da irradiação e produção dos isótopos mais pesados de Plutônio.

Ligas U-Al são utilizadas em larga escala em reatores de pesquisa (MTR). As temperaturas envolvidas nestes reatores (150°C) permitem a utilização destas ligas associadas a revestimentos de Alumínio. A temperaturas mais altas há reações químicas entre Urânio e Alumínio, bem como há uma aceleração do processo de corrosão do revestimento. Normalmente são utilizados enriquecimentos de ordem de 40% a 93% de U-235 já que o teor de Urânio na liga é limitado. Recentemente, com a limitação internacional de fornecimento de Urânio enriquecido (limitado a 20% de enriquecimento) estas ligas têm sido menos usadas mas demonstraram um alto desempenho sob irradiação.

Ligas de U-Zr tem aplicação em reatores de potência. O Zircônio tem um alto ponto de fusão, baixa seção de choque de absorção, boa resistência a corrosão e o Urânio é pouco solúvel nele. Ligas contendo 14% de U foram utilizadas demonstrando um bom desempenho sob irradiação. Neste tipo de combustível não é possível ciclagens térmicas acima de 600°C pois há mudança de fase acarretando mudanças geométricas e estruturais. Ligas deste tipo são de bom desempenho para combustíveis altamente enriquecidos já que provém meios de diluir o combus-

tível altamente enriquecido através de uma estrutura que tem uma área adequada para transferir o calor gerado (reator de potência).

Ligas do tipo $U-ZrH_x$ são utilizadas em reatores de pesquisa tipo TRIGA. Têm como características um grande coeficiente de temperatura negativo, uma baixa taxa de liberação de produtos de fissão e uma maior capacidade de utilização a maiores temperaturas que a liga $U-Zr$. Valores desde $0.5gU/cm^3$ a $1.3gU/cm^3$ para densidade do Urânio são encontrados para este tipo de combustível. Valores maiores até $3.7gU/cm^3$ tem sido testados com algum sucesso /6/. Testes, fora do reator, mostram que a matriz de ZrH_x estabiliza o material combustível de forma que este é dimensionalmente estável quando ciclado termicamente à temperatura em torno da temperatura de mudança de fase do Urânio ($680^\circ C$).

O aumento do desempenho de combustíveis e da eficiência térmica de uma usina nuclear de potência requer que tanto a temperatura do combustível quanto a temperatura de operação da usina seja elevada ao máximo possível (rendimento térmico maior quanto maior o ΔT (fonte quente e fria) e maior o T_{med}). O aumento da temperatura de operação nos combustíveis metálicos pode resultar em dois efeitos adversos: (a) fusão na parte central do combustível devido ao baixo ponto de fusão das ligas utilizadas; b) inchamento e taxa de creep excessivos devido a instabilidade sob irradiação a alta temperatura.

Materiais cerâmicos são sólidos inorgânicos, materiais não metálicos que têm alto ponto de fusão. Nos cerâmicos a ligação interatômica é predominantemente iônica ou covalente. Os cerâmicos podem, portanto, ser processados ou operados a altas temperaturas podendo ser um combustível apropriado para alto desempenho. A vantagem de se usar materiais cerâmicos em combustíveis de reatores de potência são: (a) maiores temperaturas permitidas para o combustível devido ao alto ponto de fusão; (b) boa estabilidade a irradiação (dimensional e estrutural) devido a ausência de transformações de fase à baixas temperaturas; (c) alta resistência a corrosão e compatibilidade com o revestimento (zircaloy, aço inox) e o refrigerante (água, vapor) no reator.

Os principais materiais cerâmicos utilizados como combustível nuclear são: UO_2 , UO_2-PUO_2 , ThO_2 , UC , UN , U_3Si .

As propriedades nucleares básicas nos combustíveis cerâmicos são: (a) alto número de átomos de Urânio por unidade de volume evitando a necessidade de alto enriquecimento do Urânio; (b) baixo número de massa e baixa seção de choque de absorção dos elementos não físséis no composto.

Em reatores de potência a água leve (PWR, BWR) e água pesada (PHWR, CANDU) é utilizado combustível de UO_2 .

O combustível de UO_2 é mais comumente apresentado em forma de pastilhas cilíndricas sinterizadas com densidade na faixa de 92 a 95% da densidade teórica. (Processo de fabricação: compactação do pó de UO_2 na forma de pastilhas e sinterização posterior à $1600^\circ C$).

A condutividade térmica do UO_2 é um pouco mais baixa e com alta potência gerada no reator leva a existência de altos gradientes térmicos na pastilha com combustível. Como consequência, são geradas tensões térmicas que causam rachaduras no material cerâmico, mas que não causam grandes problemas de desempenho pois o revestimento metálico retém o material combustível. Altos níveis de potência podem levar a fusão da parte central da pastilha, no entanto isto é evitado em reatores térmicos pois pode gerar problemas de desempenho. As principais limitações no desempenho do UO_2 são o inchamento da pastilha causado por produtos de fissão (sólidos e gasosos) e a liberação de produtos de fissão gasosos para o ambiente contido pelo revestimento, deteriorando a transferência de calor do combustível para o refrigerante.

Combustíveis de UO_2 - PUO_2 e ThO_2 são utilizados em reatores rápidos (regeneradores).

Combustíveis de UC, UN têm sido pesquisados como combustíveis de alto desempenho sob irradiação com potencialidade de substituição do UO_2 em reatores de potência /8/.

"Cermets" (dispersões) são combinações de misturas metal-cerâmico ou combinações de metais com cerâmicos. As suas propriedades ficam entre as propriedades dos metais e as propriedades das cerâmicos que o constituem. A condutividade térmica de cermets, por exemplo, é normalmente mais baixa que o metal mas superior ao cerâmico que o compõe. Alguns itens de comparação entre cermets e cerâmicos são:

- cermets tem maior resistência mecânica e ductilidade que cerâmicos
- cermets tem maior resistência a choque térmico que cerâmicos, embora sejam ainda relativamente frágeis
- cermets tem as propriedades combinadas de metais e cerâmicos
- ambos têm uma alta resistência a irradiação e corrosão
- ambos são relativamente estáveis a altas temperaturas.

Os combustíveis nucleares constituídos de dispersões podem oferecer vantagens sobre os combustíveis de ligas metálicas tais como: (a) aumento da vida útil de operação do combustível no reator, pois os danos dos produtos de fissão ficam localizados em uma zona imediatamente adjacente da fase dispersa (contendo elemento físsil) minimizando os danos da matriz metálica e minimizando inchamento; (b) a seleção dos materiais pode ser estendida de modo a permitir o uso de materiais combustíveis cerâmicos diluídos em materiais metálicos conseguindo-se propriedades físicas, térmicas e mecânicas que não seriam alcançadas com o material combustível básico.

Os combustíveis nucleares de dispersões são constituídos, normalmente, de materiais combustíveis (UO_2 , U_3O_8 , UC, PUO_2 , U_3Si_2 , etc.) dispersos numa matriz contínua de um material estrutural não físsil (Al, zircaloy, aço inox, grafite). A fim de minimizar os danos da irradiação e prover resistência mecânica e ductilidade, o diluente (material estrutural) deve predominar no volume de for

A condutividade térmica do UO_2 é um pouco mais baixa e com alta potência gerada no reator leva a existência de altos gradientes térmicos na pastilha combustível. Como consequência, são geradas tensões térmicas que causam rachaduras no material cerâmico, mas que não causam grandes problemas de desempenho pois o revestimento metálico retém o material combustível. Altos níveis de potência podem levar a fusão da parte central da pastilha, no entanto isto é evitado em reatores térmicos pois pode gerar problemas de desempenho. As principais limitações no desempenho do UO_2 são o inchamento da pastilha causado por produtos de fissão (sólidos e gasosos) e a liberação de produtos de fissão gasosos para o ambiente contido pelo revestimento, deteriorando a transferência de calor do combustível para o refrigerante.

Combustíveis de UO_2 - PUO_2 e ThO_2 são utilizados em reatores rápidos (regeneradores).

Combustíveis de UC, UN têm sido pesquisados como combustíveis de alto desempenho sob irradiação com potencialidade de substituição do UO_2 em reatores de potência /8/.

"Cermets" (dispersões) são combinações de misturas metal-cerâmico ou combinações de metais com cerâmicos. As suas propriedades ficam entre as propriedades dos metais e as propriedades das cerâmicos que o constituem. A condutividade térmica de cermets, por exemplo, é normalmente mais baixa que o metal mas superior ao cerâmico que o compõe. Alguns itens de comparação entre cermets e cerâmicos são:

- cermets tem maior resistência mecânica e ductilidade que cerâmicos
- cermets tem maior resistência a choque térmico que cerâmicos, embora sejam ainda relativamente frágeis
- cermets tem as propriedades combinadas de metais e cerâmicos
- ambos têm uma alta resistência a irradiação e corrosão
- ambos são relativamente estáveis a altas temperaturas.

Os combustíveis nucleares constituídos de dispersões podem oferecer vantagens sobre os combustíveis de ligas metálicas tais como: (a) aumento da vida útil de operação do combustível no reator, pois os danos dos produtos de fissão ficam localizados em uma zona imediatamente adjacente da fase dispersa (contendo o elemento físsil) minimizando os danos da matriz metálica e minimizando inchamento; (b) a seleção dos materiais pode ser estendida de modo a permitir o uso de materiais combustíveis cerâmicos diluídos em materiais metálicos conseguindo-se propriedades físicas, térmicas e mecânicas que não seriam alcançadas com o material combustível básico.

Os combustíveis nucleares de dispersões são constituídos, normalmente, de materiais combustíveis (UO_2 , U_3O_8 , UC, PUO_2 , U_3Si_2 , etc.) dispersos numa matriz contínua de um material estrutural não físsil (Al, zircaloy, aço inox, grafite). A fim de minimizar os danos da irradiação e prover resistência mecânica e ductilidade, o diluente (material estrutural) deve predominar no volume de for

ma a se constituir numa matriz contínua envolvendo a fase físsil, e se constituir no material estrutural do combustível. Para se alcançar os objetivos desejados de desempenho num combustível de dispersão os seguintes itens devem ser observados. (a) o tamanho das partículas dispersas (físsil) deve ser grande comparado ao percurso médio de um fragmento de fissão; (b) a distribuição das partículas dispersas na matriz do metal deve ser o mais uniforme possível; (c) a densidade do material da fase dispersa (físsil) deve ser alta; (d) a fase contínua da matriz de metal deve ter o máximo de volume possível na dispersão. Com uma seleção apropriada do tamanho da partícula dispersa, distribuição uniforme das partículas, alta densidade do material físsil, e máximo volume possível da fase de matriz contínua pode-se minimizar os danos de irradiação no combustível. As dispersões podem, no entanto, ter dificuldades de manter a uniformidade de propriedades físicas, mecânicas e térmicas durante irradiação no reator, particularmente a resistência mecânica, ductilidade, resistência a corrosão e estabilidade sob irradiação. Os principais combustíveis com dispersões utilizados são:

- UO_2 disperso em aço inox ou zircaloy
 - (U, Th) C_2 ou UO_2 em matriz de grafite
 - U_3O_8 , U_3Si_2 , U_3Si disperso em matriz de Alumínio
- UO_2 disperso em aço inox tem aplicação em reatores de potência refrigerados a água.

As dispersões de carbetos e óxidos de Urânio e Tório em grafite são utilizadas em reatores de alta temperatura refrigerados a gás.

Como o Alumínio possui baixa seção de choque de absorção mas possui restrições em relação à faixa de temperatura que pode ser utilizado (baixo ponto de fusão - $650^\circ C$), ele é utilizado principalmente em combustíveis de reatores de pesquisa (MTR) onde podem ser obtidos altos fluxos de nêutrons a relativamente baixas temperaturas ($150^\circ C$). A utilização de dispersões de materiais de alta densidade em Urânio (U_3O_8 , U_3Si_2 , U_3Si , U_6Fe) em matriz de Alumínio foi a solução encontrada para substituir os combustíveis de alto enriquecimento dos reatores MTR (ligas de U-Al). Como mencionado anteriormente, por imposições internacionais, ficou limitado o fornecimento de Urânio a 20% de enriquecimento de U-235. A substituição de ligas de U-Al de alto enriquecimento (93%) foi alcançada através de combustíveis com estas dispersões de materiais de alta densidade de Urânio o que torna possível utilizar enriquecimento inferior a 20%. Programas a nível mundial foram elaborados /11/ de forma a pesquisar e qualificar combustíveis a base de dispersões com alta densidade de Urânio. A tabela 3 mostra uma perspectiva atual de combustíveis fabricados em alguns países.

Define-se Elemento Combustível como o componente do núcleo do reator que contém de forma apropriada o material combustível e os materiais estruturais. O núcleo do reator contém um conjunto de elementos combustíveis

Cada tipo de reator possui um tipo apropriado de material combustível e uma forma apropriada de elemento combustível que contém este material. Dentre

as diversas formas utilizadas, as principais são elementos tipo placa e elementos combustíveis com varetas cilíndricas.

Os elementos combustíveis tipo placa são utilizados na maioria dos reatores de pesquisa e em alguns reatores de potência refrigerados e moderados a água leve. Os elementos combustíveis com varetas cilíndricas são utilizados basicamente nos reatores de potência e em reatores de pesquisa tipo TRIGA também.

A diferença básica entre os dois tipos reside na relação de densidade de potência/área de transferência de calor, processos de fabricação e autonomia/desempenho em irradiação.

Por ter uma aplicação maior em reatores de pesquisa, são descritos a seguir, com um pouco mais de detalhes, os combustíveis tipo placa.

Os elementos combustíveis tipo placa tem basicamente os seguintes componentes: placa combustível, placas suportes laterais, bocal de extremidade (inferior), extremidade suporte de manuseio (superior).

As figuras 1 e 2 exemplificam dois tipos distintos de elementos combustíveis tipo placa para um reator MTR. Estes elementos combustíveis são constituídos basicamente de placas combustíveis colocadas paralelamente e suportadas pelas placas laterais (sem material físsil) e o bocal inferior. A extremidade suporte superior serve para manuseio do elemento. Alguns elementos possuem uma espécie de "pente" nas extremidades que alinham o espaçamento central das placas combustíveis. As dimensões de cada placa combustível, a quantidade de placas e o espaçamento entre placas são ditados pelo projeto neutrônico/termohidráulico tendo viabilidade comprovada pelos aspectos de processo de fabricação e desempenho sob irradiação. A configuração do núcleo do reator depende de sua aplicação e características, ou seja o número de elementos combustíveis e sua disposição depende das características do reator. A figura 5 exemplifica a disposição de elementos combustíveis em reatores do tipo MTR. Normalmente estes elementos são suportados apenas por uma placa matriz na qual estão apoiados.

As placas combustíveis contêm o material físsil. Elas são constituídas do cerne contendo o material físsil e um revestimento metálico. O cerne pode ser formado de ligas de U, dispersões com U, ou plaquetas cerâmicas de UO_2 . Os revestimentos mais utilizados são ligas de Alumínio, ligas de Zircônio e aço inox. Ligas de Alumínio são usadas quando o cerne é constituído de ligas de U-Al ou dispersões em matriz de alumínio. Zircaloy é utilizado como revestimento quando o cerne é constituído de plaquetas de UO_2 , ligas de U-Zr ou dispersões com matriz de zircônio. Aço inox é utilizado como revestimento em placas combustíveis com dispersões de UO_2 em aço inox.

Por questões de estabilidade mecânica, as placas podem ser planas ou curvas (em reatores MTR de alto fluxo neutrônico com alta vazão de água através do núcleo do reator).

Os processos de fabricação mais utilizados para a obtenção das placas combustíveis são: os de "moldura" ("picture frame") onde a liga de U ou dispersão é envolvida pelo material de revestimento e feita a laminação para as dimensões desejadas; e o processo de colingotamento onde o material de revestimento é fundido sobre o cerne contendo o material físsil e feita laminação posterior para as dimensões desejadas (figura 3 e 4). No caso de plaquetas de UO_2 ("caramel" - patente francesa) a fabricação da placa é feita através de soldagem das placas de revestimento já na sua configuração final (figura 2).

ANÁLISE DE PROJETO

O elemento combustível deve atender aos requisitos de projeto neutrônico e termohidráulico, e terá sobre si a responsabilidade de manter uma integridade mecânica e bom funcionamento ao longo da operação do reator. Se propõe como linha de ação de análise e projeto que:

- a) seja estabelecido um conjunto de requisitos funcionais para o elemento combustível
- b) seja estabelecido um procedimento no qual é exigido selecionar os eventos específicos em cada uma das condições operacionais de projeto
- c) seja estabelecida uma lista de parâmetros os quais são sabidos afetarem a capacidade do elemento combustível em atender um ou mais requisitos funcionais
- d) seja estabelecido um procedimento no qual é exigido:

- definir quais as considerações que afetam a capacidade do elemento combustível de preencher cada um dos requisitos funcionais sob cada evento postulado
- estabelecer limites apropriados para cada uma dessas considerações, os quais sendo ultrapassados serão interpretados como falha do elemento combustível.

A figura 6 apresenta uma matriz em que estão selecionados, por exemplo, alguns requisitos funcionais necessários ao elemento combustível e condições de projeto a que estará sujeito o reator. É estabelecido que para cada condição de projeto seja verificado quais os requisitos funcionais necessários ao elemento combustível e condições de projeto a que estará sujeito o reator. É estabelecido que para cada condição de projeto seja verificado quais os requisitos funcionais necessários ao elemento combustível (preencher matriz) e que seja demonstrado seu atendimento.

Os parâmetros de projeto utilizados na análise do elemento combustível devem ser identificados e analisados. Estes parâmetros estão, normalmente, na forma de propriedades materiais, características geométricas ou fenômenos físicos/químicos necessários à caracterização do elemento combustível. Estes parâmetros devem ser gerados através de métodos adequados de engenharia. Na maioria das propriedades mecânicas/físicas/químicas/geométricas devem ser levadas em conta os

efeitos de temperatura, fluxo de nêutrons e histórico de irradiação. A lista abaixo mostra alguns desses parâmetros, de forma genérica, sem particularizar para um determinado tipo de combustível.

a) condições gerais do reator:

temperatura do refrigerante, pressão do refrigerante, vazão do refrigerante, química do refrigerante, fluxo de nêutrons, potência do reator, variações de vazão, movimento de internos, etc.

b) materiais/componentes/conjuntos

aspectos físicos: dimensões, geometria, densidade, rugosidade superficial, espessuras, volume de vazios, pressão e composição de gases de enchimento (quando aplicável), etc.

aspectos químicos: composição, taxa de corrosão, reações, etc.

aspectos de propriedades materiais:

- térmicos: condutividade térmica, expansão térmica, calor específico, temperatura de mudança de fase, temperatura de fusão, etc.

- mecânicos: limite de elasticidade, limite de ruptura, módulo de elasticidade, dureza, coeficiente de Poisson, fadiga, creep, etc.

- metalúrgicos: tamanho e distribuição de grãos, tamanho e distribuição de poros, fatores de anisotropia, etc.

aspectos de modelos, teorias, mecanismos, correlações: liberação de gases de fissão, creep, inchamento, densificação, interação com combustível-revestimento, corrosão sob tensão, desempenho térmico, coeficientes de transferência de calor, desgaste, vibrações, etc.

Os limites de projeto devem ser estabelecidos com o objetivo de demonstrar que um requisito funcional, pertinente a uma determinada condição de projeto, é satisfeito. Estes limites são aplicados com a finalidade de garantir que exista uma suficientemente baixa probabilidade de falha relacionada ao requisito funcional. Em reatores tipo piscina, as bases de projeto são:

a) para condição normal e condição incomum de operação, o reator deve ser projetado tal que danos no revestimento do combustível ou fusão do combustível não ocorra durante sua vida útil. Dano no revestimento é definido como perfuração, distorção excessiva ou ruptura como um resultado direto de uma combinação particular de densidade de potência ou condições do refrigerante. É assumido ocorrer isto se o fluxo de calor iguala o valor correspondente ao início da transição de ebulição nucleada (DNB).

b) para condições de emergência ou de falta, o reator deve ser projetado de tal forma que qualquer dano no revestimento do combustível não deve interferir num desligamento seguro do reator e ter um resfriamento adequado.

Para condição normal, por exemplo, em placas combustíveis de elementos combustíveis tipo MTR, em reatores de potência $< 10\text{MW}$, é garantido sua integridade,

em condição normal de operação, evitando temperaturas excessivas na parede externa do revestimento, que aumentem a taxa de corrosão deste, não é permitido ebulição, e tensões abaixo daquelas que geram instabilidade (flambagem) na placa ou escoamento do material. Os limites impostos nestes casos são:

Temperatura Superfície Revestimento	$\leq \sim 100^{\circ}\text{C}$	(Al 1100, Al 1060)
Temperatura Superfície Revestimento	$\leq T_{0nb}$	
Tensão Equivalente Placa	$\leq \begin{cases} \sigma & \text{instabilidade} \\ \sigma & \text{escoamento} \end{cases}$	

Um valor suficiente de margem deve ser demonstrado, tal que as incertezas inerentes às previsões analíticas ou experimentais não resultem numa violação ao limite imposto para um determinado requisito funcional. É opcional o método utilizado pelo projetista para estabelecer que existe uma margem adequada, e pode ser selecionada dentre uma ou mais dos seguintes itens:

- análise probabilística na qual as variâncias estatísticas de parâmetros independentes são combinadas estatisticamente.
- análise de sensibilidade na qual o valor da variância do parâmetro dependente resultante é previsto como uma função de tolerâncias de variáveis independentes.
- análise de caso mais desfavorável no qual cada variável independente é deliberadamente variada de modo a produzir os mais adversos valores na previsão das variáveis dependentes.
- análises combinadas na qual certas variáveis independentes são "casos desfavoráveis" e outras são estatisticamente determinadas ou nominalmente escolhidas e ponderadas para sensibilidade no valor do parâmetro dependente previsto.
- referência de resultados experimentais ou comportamento operacional que claramente demonstra a adequação do projeto em preencher um requisito funcional específico para uma determinada condição.

É estabelecido que para cada condição de projeto sejam verificados quais os requisitos funcionais necessários ao elemento combustível e que seja analisado e demonstrado seu atendimento. Esta análise se faz através de uma metodologia analítica/numérica/estatística ou através de ensaios controlados que reproduzam o que se deseja analisar. Na metodologia de cálculo devem ser considerados parâmetros (propriedades, reações químicas, efeitos de irradiação, modos de falha, etc) envolvidos com o elemento combustível e para demonstração devem ser fixados valores limites e margens convenientes que delimitem a fronteira de aceitação para considerações que afetem a capacidade do elemento em preencher um determinado requisito. A figura 7 esquematiza a interligação entre condições de projeto e requisitos funcionais com uma metodologia de análise. De um lado estão as condições de projeto com as características de materiais empregados e seu equacionamento matemático. Do outro lado estão os requisitos funcionais com a idealização geométrica dos componentes. Unindo estes dois aspectos, material e geometria, está o equacionamento do problema envolvendo várias áreas através de mé

todos analíticos, numéricos, estatísticos ou aplicando resultados experimentais. Esta metodologia pode gerar resultados de aplicação geral em engenharia ou, através de critérios preestabelecidos, condições de contorno existentes e limites preestabelecidos, pode gerar resultados específicos de projeto.

Tendo como base principal as idéias resumidas até aqui, é apresentada, como exemplo, uma esquematização de como poderia ser uma metodologia de base analítico-numérica para análise de elementos combustíveis. Esta análise pode ser dividida em análise do combustível em si (placa, vareta), e o segundo que analisa o elemento combustível como um todo e seus componentes. Na análise do combustível são de interesse os vários parâmetros envolvidos tanto com o material combustível quanto com o revestimento durante irradiação. Na análise do elemento combustível e seus componentes são de interesse, principalmente, os aspectos estruturais. As figuras 8, 9, 10 esquematizam de uma maneira geral esta divisão. Há, também, uma divisão de estudo sob condições normais de operação e condições de acidentes, devido ao grau de complexidade dos fenômenos envolvidos em cada um dos casos. Essas análises recebem dados de entrada de várias áreas de atuação em projeto de reatores (neutrônica/termohidráulica) e estão interligadas entre si, pois uma depende do resultado da outra para poder ser realizada.

Entende-se como desempenho do combustível a forma como se comportam parâmetros mecânicos e térmicos tanto do combustível como do seu revestimento durante irradiação. A análise é dividida em condições normais e condições de acidentes. Em condições normais são analisadas situações de estado estacionário ou transientes de potência. Nas análises em estado estacionário determinam-se parâmetros para longos períodos de irradiação. Os códigos computacionais empregados para estes estudos procuram ser determinísticos, ou seja, tentam simular de uma maneira ampla os fenômenos envolvidos no combustível durante irradiação. A interligação entre os vários parâmetros torna a simulação complexa, existindo a necessidade de ajuste de modelos e parâmetros com dados experimentais. As figuras 11 e 12 esquematizam (para o caso de uma vareta combustível com pastilha cerâmica de UO_2 e revestimento metálico) a interligação entre parâmetros. Nota-se a dificuldade de se simular deterministicamente um combustível e da necessidade, as vezes, de interações sucessivas para convergência nos cálculos desenvolvidos pelos códigos.

A análise do combustível sob condições de acidentes envolve problemas complexos tanto de materiais, como de transferência de calor. Os códigos para esta análise também são complexos e tem grande parte de seus modelos em bases experimentais. Os resultados desses códigos servem de base para licenciamento e análise de falhas.

As rotinas de um código de análise de desempenho podem ser agrupadas em 4 grupos básicos: rotinas que caracterizam as propriedades dos materiais, rotinas que caracterizam fenômenos de irradiação, rotinas que fazem a análise térmica e rotinas que fazem a análise mecânica.

O elemento combustível é uma "peça mecânica" com vários componentes acoplados entre si. É necessário estipular uma sequência de cálculo que permita analisar estruturalmente cada componente em si e também o conjunto estrutural que eles formam.

Em operação normal vários carregamentos atuam sobre o elemento combustível, tais como gradientes térmicos, cargas provenientes do escoamento do fluido refrigerante e também cargas provenientes do meio externo como, por exemplo, a hipótese do sismo de desligamento seguro do reator.

É dividido o estudo em duas partes: uma de análise estática e outra de análise dinâmica.

Na análise estática o elemento combustível é caracterizado com todas as suas peculiaridades estruturais. É dividido o estudo em uma análise de componentes e uma análise de conjunto. Em ambos os casos, programas estruturais que utilizam o método de elementos finitos são de grande utilidade.

O estudo dinâmico é dividido em duas partes: uma que analisa o elemento combustível como um todo, solicitado por cargas dinâmicas de origem externa ao reator (sismo por exemplo), e outra que olha ou o elemento como um todo ou componentes isolados (placas ou varetas combustíveis) sendo que o carregamento é proveniente do escoamento do fluido refrigerante. Para análise estrutural do conjunto sob carregamentos dinâmicos externos poderão ser utilizados códigos de análise estrutural que façam análise dinâmica. O elemento combustível poderá ser caracterizado, estruturalmente, por uma viga equivalente simplificada ou poderá ser discretizada totalmente, por exemplo, por um código em elementos finitos. Na análise de vibrações induzidas pelo escoamentos do fluido refrigerante, entra uma componente de ensaios experimentais, ou seja, a análise não será baseada apenas em uma busca de modelos teóricos ou aplicação direta de códigos, mas será apoiada também em resultados de ensaios controlados em laboratórios.

Para análise do elemento combustível sob condições de acidentes, devem ser utilizados programas específicos que levem em conta a complexidade dos carregamentos e/ou fenômenos associados tais como não linearidades estruturais devido à alta temperatura e reações metal-água.

QUALIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS

Verificou-se na figura 7 a interligação de condições de projeto e requisitos funcionais para análise e demonstração dos componentes de um reator nuclear. Uma dessas análises é feita com base experimental. Isto é fundamental quando se trata de combustíveis de reatores nucleares pois sobre ele pesa a grande responsabilidade no que diz respeito ao aspecto de segurança. Devem ser feitos ensaios específicos de caracterização de materiais, teste de componentes e teste de conjunto em situações reais de operação ou situações extremas para demonstrar, obter ou analisar parâmetros diversos. Pode-se dividir as análises experimentais em três tipos básicos: análises pré-irradiação, desempenho durante

irradiação e análise pós-irradiação. Um combustível estará completamente caracterizado e qualificado quando da comprovação experimental englobando estes tipos de análise. A justificativa destes testes pode ser vista da seguinte forma:

a) do ponto de vista do projetista e fabricante

- verificar a conveniência dos materiais utilizados e conhecer as características destes nas condições de temperatura e irradiação, levantando dados sobre propriedades físicas, químicas, mecânicas e metalúrgicas.
- verificar a conveniência dos processos utilizados na fabricação e as especificações de projeto.
- analisar parâmetros de desempenho dos combustíveis (materiais, componentes, conjuntos) para comprovação de projeto e comparação com modelos teóricos adotados ou obtenção de formulação empírica para estes.
- diminuir as margens de incertezas utilizadas em projeto.
- investigar as causas de falhas de forma a implementar ou recomendar ações corretivas tanto em termos de projeto, fabricação como de estratégia de funcionamento do reator.

b) do ponto de vista de operação do reator

- detectar previamente um potencial de falha de combustíveis (materiais, componentes, conjuntos) utilizados nos reatores.
- desenvolvimento (aperfeiçoamento) dos combustíveis utilizados nos reatores.
- maior definição dos limites de operação para minimizar falhas de combustíveis.
- melhor conhecimento entre os valores de parâmetros de operação definidos por projetos e aqueles medidos após a operação.

c) do ponto de vista licenciamento (segurança)

- ter evidência experimental das margens (de segurança) assumidas no projeto do combustível e no gerenciamento do núcleo.
- investigar as falhas inexplicadas de combustíveis de forma a garantir a ausência de um problema de proporção generalizada no projeto do combustível ou na operação do reator.

Este procedimento é essencial para combustíveis tipo placa contendo dispersões. Nestes o fator fabricação é de importância relevante. As especificações procuram reproduzir as análises e conceitos teóricos para um desempenho adequado sob irradiação, mas os processos de fabricação impõem muitos desvios em relação ao ideal. Neste tipo de combustível análises pós-irradiação são fundamentais. Neste aspecto, por exemplo, programas internacionais /11/ foram realizados de forma a irradiar tanto miniplacas como combustíveis completos em reatores de pesquisa e feitas análises não destrutivas e destrutivas em laboratórios com células quentes de forma a verificar o desempenho e quantificar parâmetros

diversos. Neste caso as análises experimentais são utilizadas para demonstrar projeto ao invés de métodos analíticos. Já os métodos analíticos, utilizando combustíveis tipo vareta compostos de combustíveis cerâmicos, as análises analíticas/numéricas, baseadas em resultados experimentais, são utilizadas em projeto e reproduzem de forma satisfatória aspectos de desempenho do combustível sob irradiação.

REFERÊNCIAS

- /1/ ANSI/ANS 57.5 - 1981 - "Light Water Reactors Fuel Assembly Mechanical Design and Evaluation".
- /2/ Design Guide for Category III Reactors, Pool Type Reactor - BNL 50831-III
- /3/ EPRI, NP-1974 - "Control Rod Materials and Burnable Poisons - An Evaluation of State of the Art and Needs for Technology Development" - July 1980.
- /4/ FROST, B.R.T. - "Nuclear Fuel Elements" - Pergamon Press, 1968.
- /5/ GITTUS, J. - "Water Reactor Fuel Element Performance Computer Modelling" - Applied Science Publishers, 1983.
- /6/ IAEA - TECDOC 233 - "Research Reactor Core Conversion From the Use of Highly Enriched Uranium to the Use of Low Enriched Uranium Fuels - Guidebook" - IAEA, 1980.
- /7/ KAUFMANN, A.R. - "Nuclear Reactor Fuel Elements" - Butterworths Publishers, 1962.
- /8/ MA, B.M. - "Nuclear Reactor Materials and Applications" - Van Nostrand Reinhold Company, 1980.
- /9/ OLANDER, D. R. - "Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements" - Technical Information Center, Energy Research and Development Administration, 1976.
- /10/ PERIOTTA, J.A. - Apostila: "Curso de Introdução à Energia Nuclear - Engenharia do Núcleo", RNP/EPRI - EPRI/CNEN-Br.
- /11/ Proceedings of the 1984 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors - ANL/ERTR/TM 6.
- /12/ ROBERTSON, J.A.L. - "Irradiation Effects in Reactor Fuels" - Gordon and Breach Science Publishers, 1969.
- /13/ Structural Mechanics in Reactor Technology.
- /14/ WEISMAN, J. - "Elements of Nuclear Reactor Design" - Elsevier Scientific Publishing Company - 1977.


Tabela 1. Compostos de Urânio

Composto	Massa específica (g/cm ³)	% de Urânio (em peso)	Massa específica do Urânio no Composto (g/cm ³)	Temperatura Limite (°C)
U	18.9	100	18.9	1170
U ₆ Fe	17.7	96.1	17.0	815
U ₃ Si	15.6	96.2	15.0	930
UN	14.3	94.4	13.5	2050
UC	13.6	95.2	12.9	2350
U ₂ C ₃	12.9	93.0	12.0	1775
U ₃ Si ₂	12.2	92.4	11.3	1650
UC ₂	11.7	90.8	10.6	2500
UO ₂	10.96	88.2	9.7	2780
U ₃ O ₈	8.4	84.8	7.1	2500
UAl ₂	8.1	82.0	6.6	1580
UZr ₂	10.3	56.9	5.7	600
UAl ₃	6.7	74.0	4.9	1350
UAl ₄	6.0	68.8	4.1	730

Tabela 2. Algumas Propriedades Nucleares de Compostos de Urânio

Composto	Seção de Choque Macroscópica (0.025 eV) (cm ² /cm ³)		Número médio de nêutrons emitidos/nêutrons térmicos absorvidos
	Fissão (ΣF)	Absorção (Σa)	
UO ₂	0.102	0.185	1.34
U ₃ O ₈	0.065	0.120	1.34
UC	0.137	0.252	1.34
U ₂ C ₃	0.127	0.233	1.34
UC ₂	0.112	0.207	1.34
UN	0.143	0.327	1.00
U ₃ Si	0.159	0.293	1.33
USi	0.098	0.184	1.32

Tabela 3. Status de Desenvolvimento de Combustíveis à Base de Dispersões /11/.



Fuel Type	UAl ₄	U ₃ O ₈	U ₃ Si ₂	U ₃ Si _{1,5}	U ₃ Si _{1,1}	U ₃ Si
U-Density max. (g U/cm ³ meat)	2,2	3,1	5,3	6,0	6,5	6,9
Fuel Fines <40µm (%)	<50	<25	$\frac{<25}{<50}$	<25	<25	<25
Pictures Al-coated	no	no	no	yes	yes	$\frac{no}{yes}$
Burnable Poison B ₄ C	no	no	no	$\frac{no}{yes}$	$\frac{no}{yes}$	no
Fission Density (f/cm ³ meat) × 10 ²¹	1,5	1,9	1,9	1,2*		2,5

* 1 test interrupted, one plate defect

Test Plate Investigations

(Status Aug 1987)

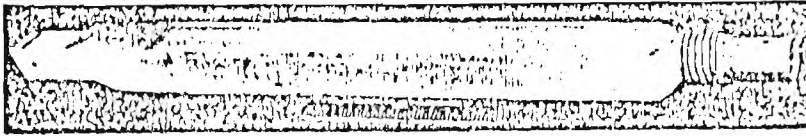
CERCA

SEP. 87

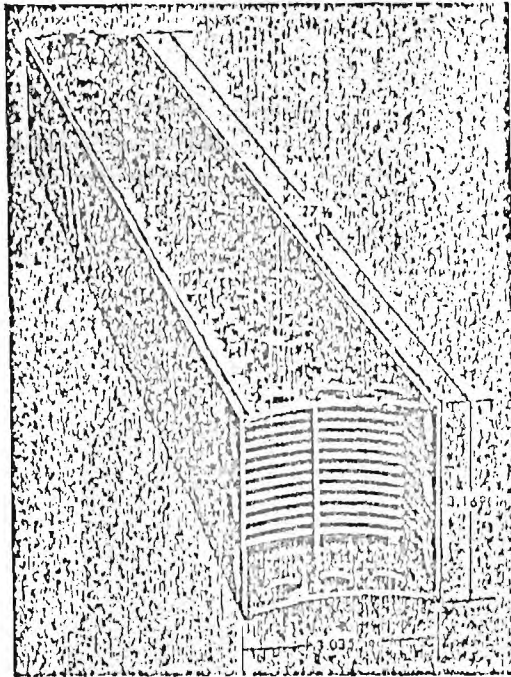
CERCA U₃Si₂ and U₃Si IRRADIATION PROGRAM STATUS
ENRICHMENT : 20 %

FUEL	REACTOR	URANIUM DENSITY (g/cm ³)	NUMBER OF EIT	IRRADIATION		AVERAGE BURN-UP (%)
				START	END	
U ₃ Si ₂	ORR	4.8	1 EIT	Apr. 83	Oct. 83	56 (54)*
			1 EIT	Apr. 83	Aug. 84	82
	SILOE	2.0 3.7 5.2 5.4	1 Plate	Jul. 84	Jan. 86	78
			1 Plate			76
			1 Plate			75
			1 Plate			75
SILOE	5.2	1 EIT	Feb. 86		54	
R2	4.8	1 EIT	Nov. 86		10	
ORR	4.8	20 EIT	Jan. 86		Up to 52	
	HFR Pelton	4.8	1 EIT	FABRICATION COMPLETED		
U ₃ Si _{1,1}	OSIRIS	4.7	1 EIT	Nov. 86		60
	HFR Pelton	5.5	1 EIT	FABRICATION COMPLETED		
U ₃ Si	SILOE	5.5	2 Plates	Jun. 82	Nov. 83	56 (53)*
		6.0	2 Plates	Jun. 82	Nov. 83	58 (54)*
	SILOE	6.0	1 EIT	Sept. 84	Oct. 85	55

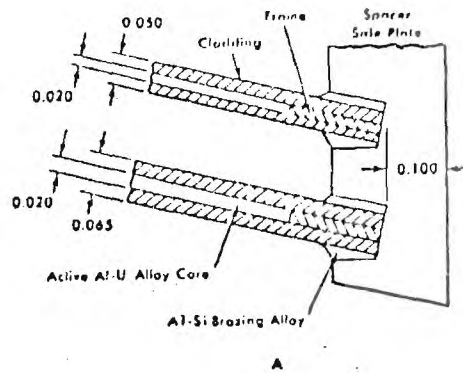
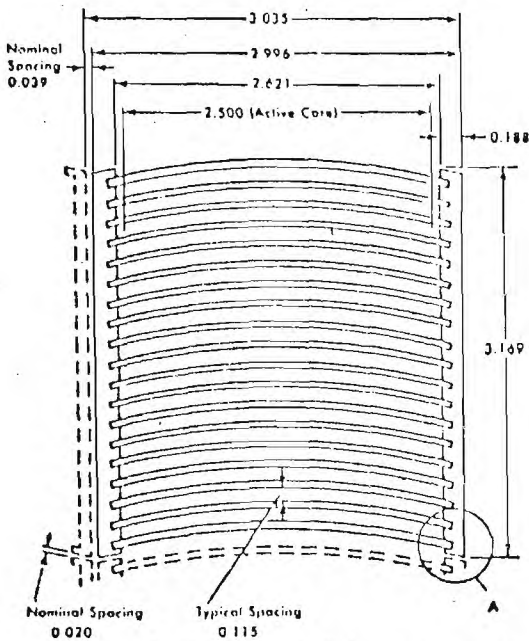
* NUMBER BETWEEN () : MEASURED VALUE



Finished MTR fuel element. (Oak Ridge National Laboratory.)

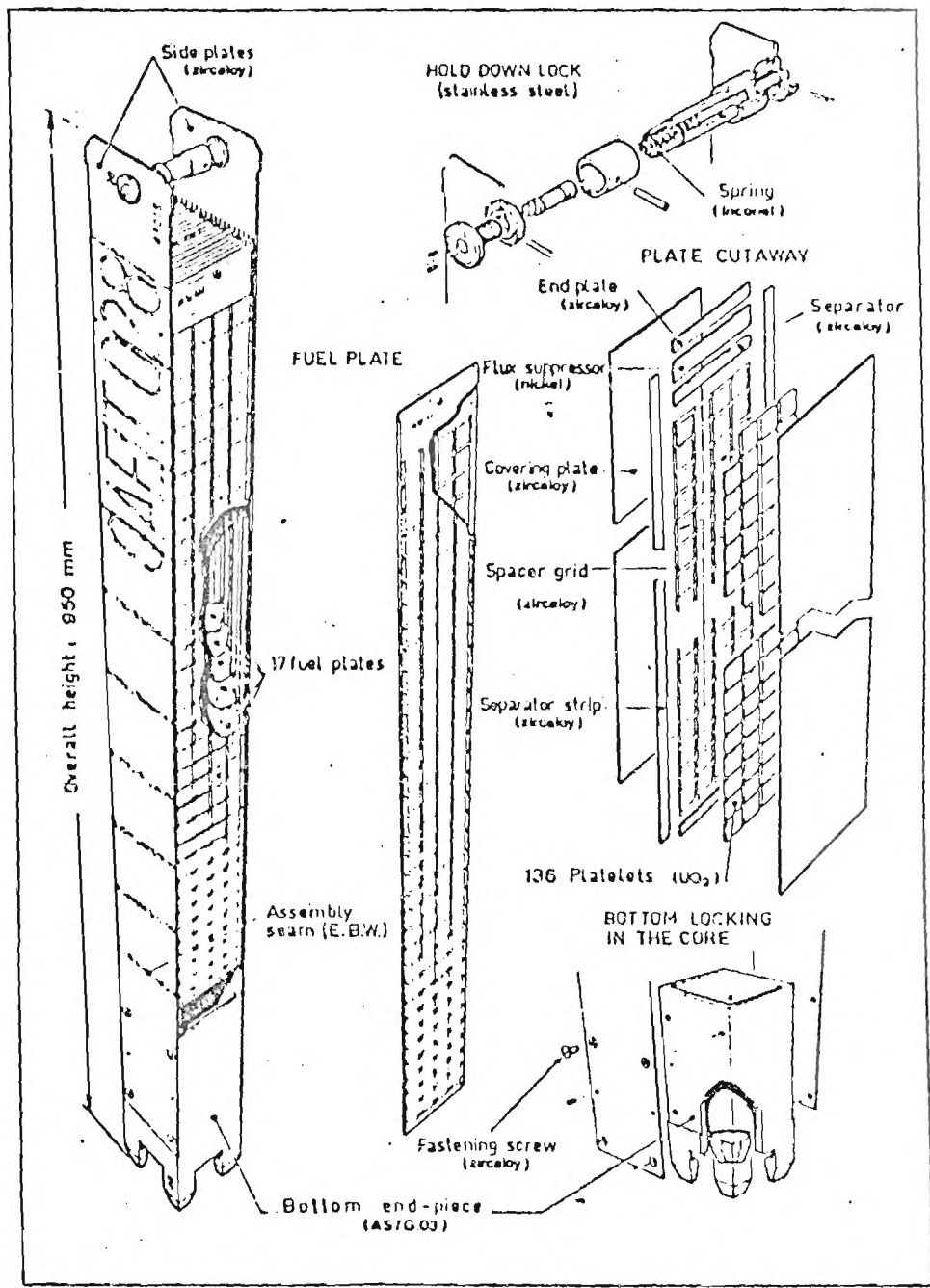


MTR fuel assembly of curved plates without end boxes. (Oak Ridge National Laboratory.)



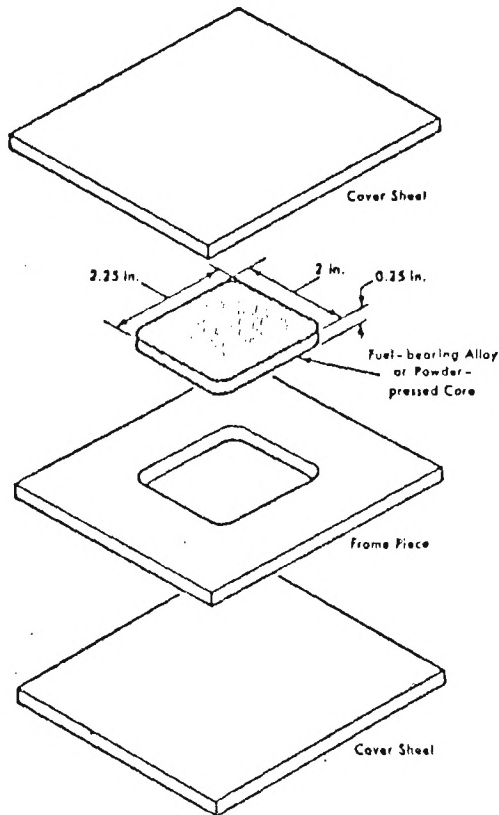
Sketch of MTR fuel-element cross section. Note that the two outer fuel plates are 0.005 in. thick and the internal fuel plates are 0.50 in. thick. Dimensions are in inches.

Figura 1. Elemento Combustível Tipo Placa de Réator Tipo MTR

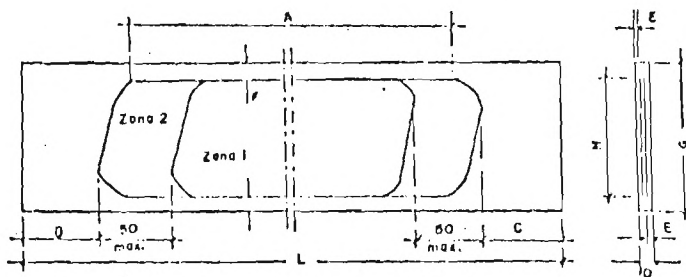


OSIRIS Standard Fuel Assembly

Figura 2. Elemento Combustível Tipo Placa de Reator Tipo MTR



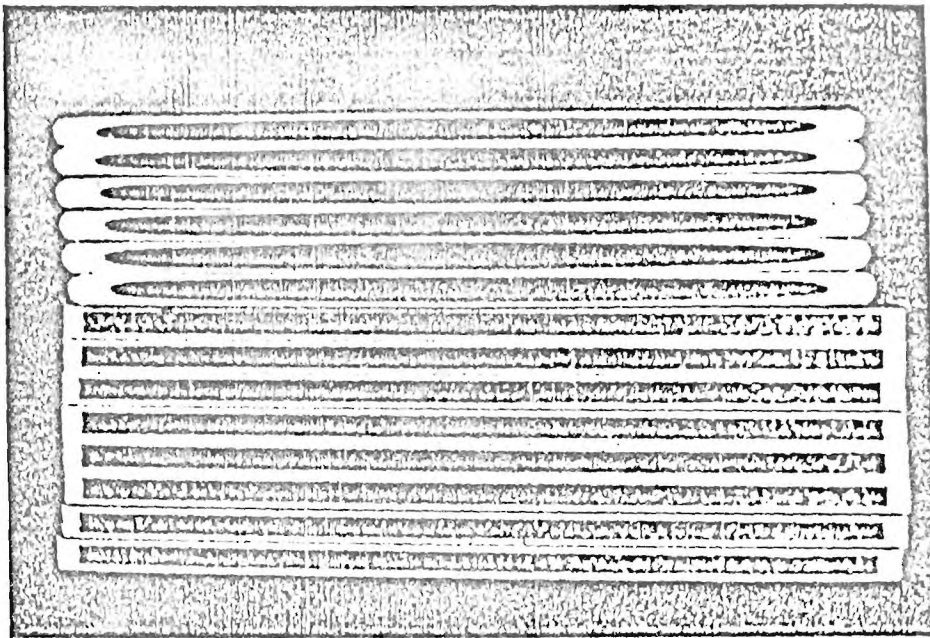
Exploded view of MTR composite fuel plate prior to rolling."



DADOS DA PLACA COMBUSTÍVEL		
	Enriquecimento 19.75%	Enriquecimento 93.0%
U	12.50 ± 5	12.50 ± 5
C	12.50 ± 5	12.50 ± 5
D	1.52 ± 0.075	1.52 ± 0.075
E	zona 1: 0.30	0.505
	zona 2: 0.30	0.505
F	min. 2.80	2.80
G	70.79 ± 0.15	70.79 ± 0.15
L	625.0 ± 0.20	625.0 ± 0.20
A	min. 560	560
H	min. 60.35	60.35

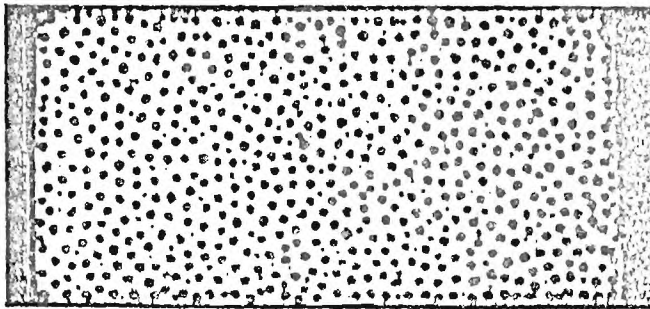
- Características das placas combustíveis com alto e baixo enriquecimento em U-235.

Figura 3. Esquema de Montagem e Dimensões de Placa Combustível



Cross-section of fuel plates containing meat consisting of a U_3O_8 Al-cermet
 (Above) Fabricated by coextrusion: elliptical cross-section, nonuniform can thickness.
 (Below) Fabricated by the picture-frame technique: rectangular cross-section, uniform thickness.

Source: NUKEM.



Cross-section of a typical UO_2 -steel cermet, 10X magnification. Source: Frost et al., 3rd Geneva Conference.

Figura 4. Exemplos de Seções de Placas Combustíveis

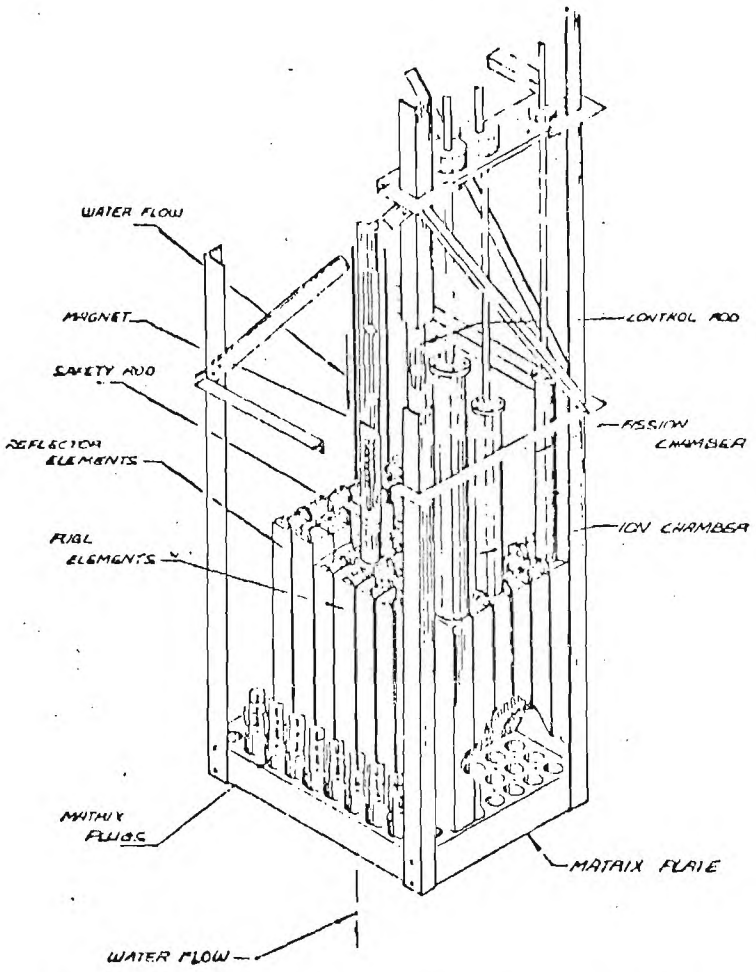
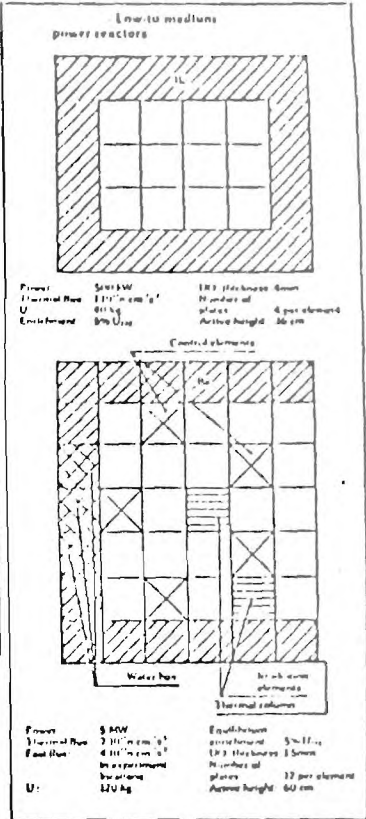
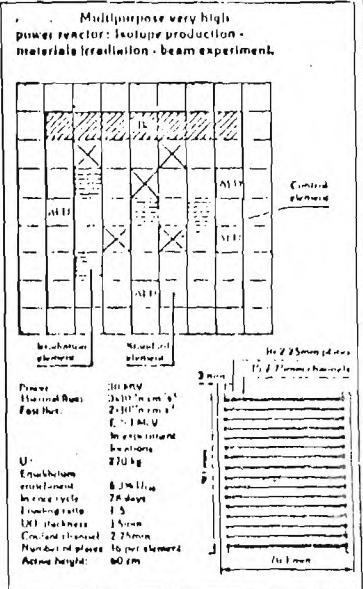
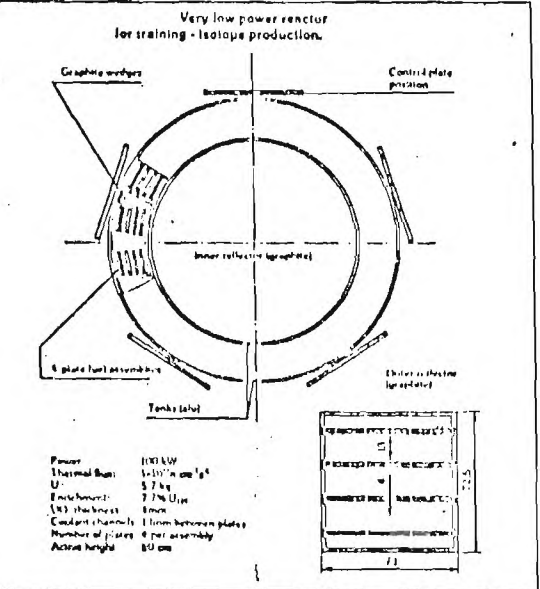


Figura 5. Exemplo de Arranjos de Núcleos de Reactores Tipo MTR

REQUISITOS FUNCIONAIS		
CONDIÇÕES DE PROJETO	CONDIÇÃO NORMAL	CONDIÇÃO INCOMUM
Manter geometria aceitável	Permitir fluxo de refrigerante e transferência de calor aceitáveis	Manter barreira de separação do combustível e produtos de fissão com a água.
Permitir expansões diferenciais	Ter suporte próprio	Resistir às forças de escoamento do fluido refrigerante
Permitir inserção de elementos de controle	Permitir posicionamento de instrumentação, etc...	Acomodar efeitos químicos, térmicos mecânicos e de irradiação.
Permitir manuseio, transporte, carregamento e descarregamento nonúcleo, etc.	Compatibilidade entre elementos combustíveis.	
<p>Eventos que são planejados ocorrer regularmente na operação do reator. Ex.: partida, desligamento, etc...</p> <p>INCIDENTES ou ocorrências de moderada frequência que podem ocorrer muitas vezes durante a vida útil da instalação. Ex.: perda de energia elétrica, desligamento inadvertente do reator, etc....</p>		<p>CONDIÇÃO DE EXERCÍCIO</p> <p>Incidentes ou ocorrências infrequentes que podem ocorrer durante a vida útil da instalação. Ex.: acidente de retirada de barra, etc....</p>
<p>CONDIÇÃO FALTOSA</p> <p>Eventos que são faltas limitantes e não são esperados ocorrer durante a vida útil da instalação mas são postulados porque suas consequências podem incluir o potencial de liberação de quantidades significativas de material radioativo e porque representam limite superior de falhas ou acidentes com uma probabilidade de ocorrência suficiente alta para requerer sua consideração em projeto. Ex.: acidente de perda de refrigerante.</p>		

Figura 6. Matriz Condições de Projeto x Requisitos Funcionais (Reatores Tipo Piscina)

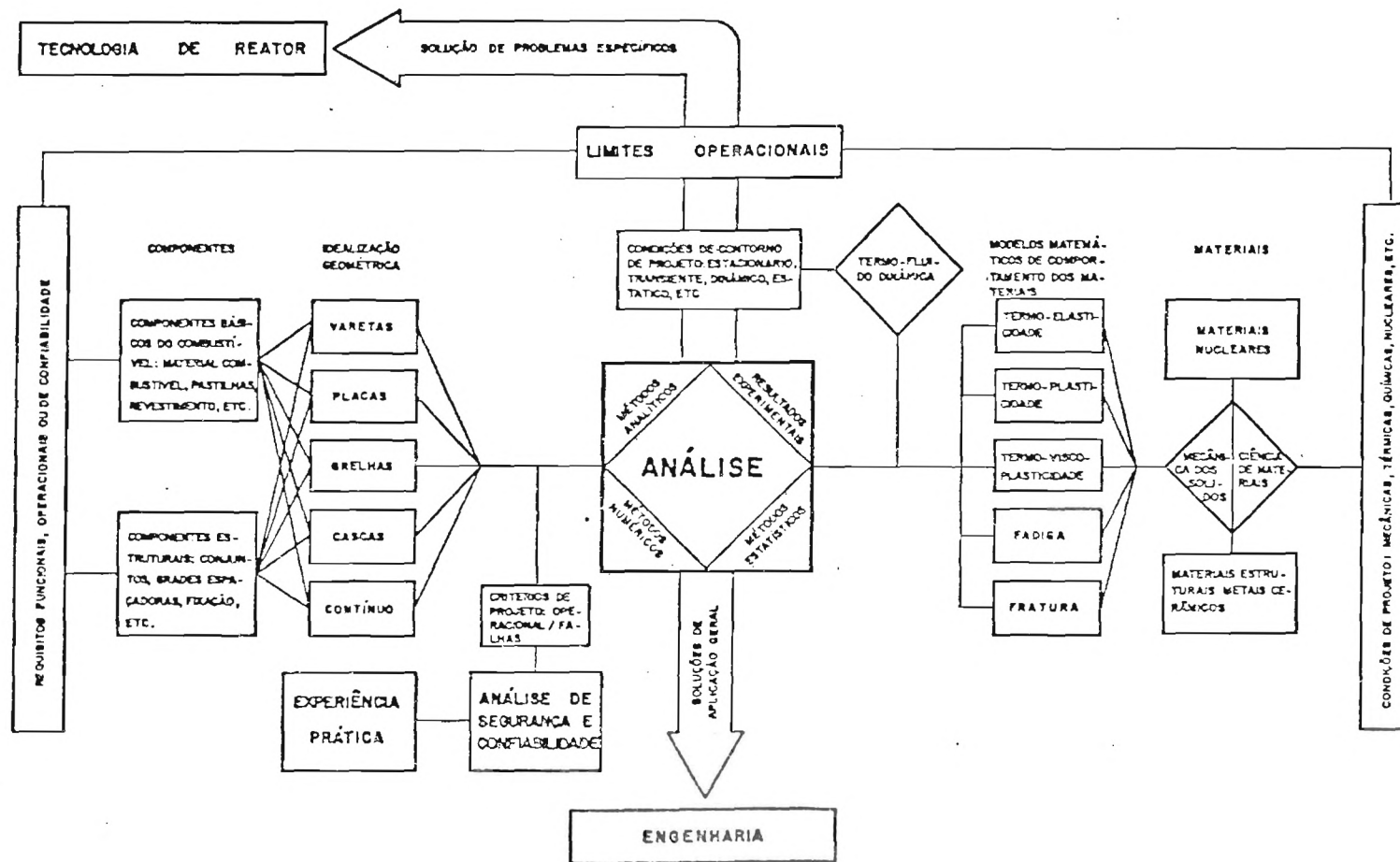


Figura 7. Esquema de Interligação de Condições de Projeto e Requisitos Funcionais para Análise de E.C. /13/.

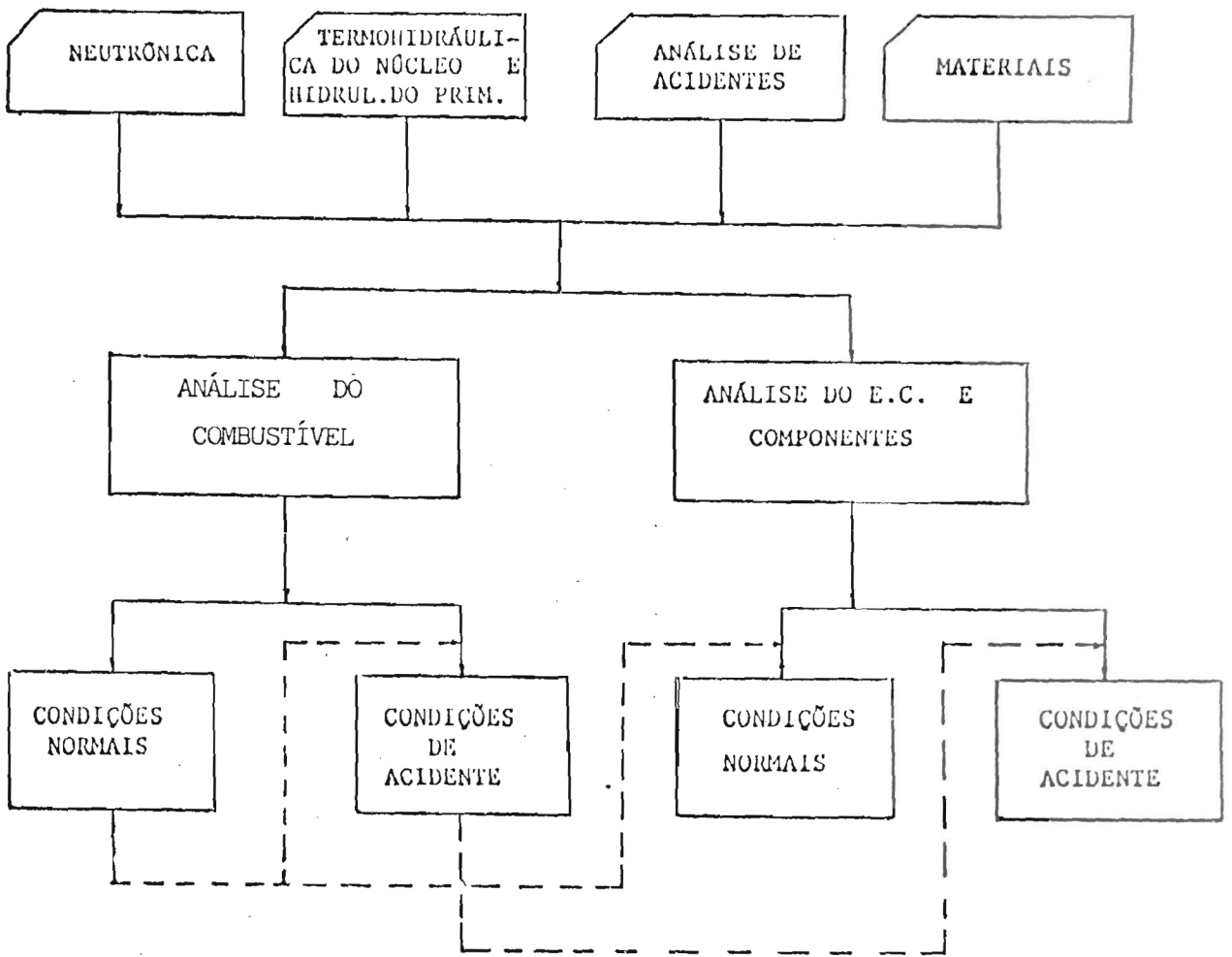
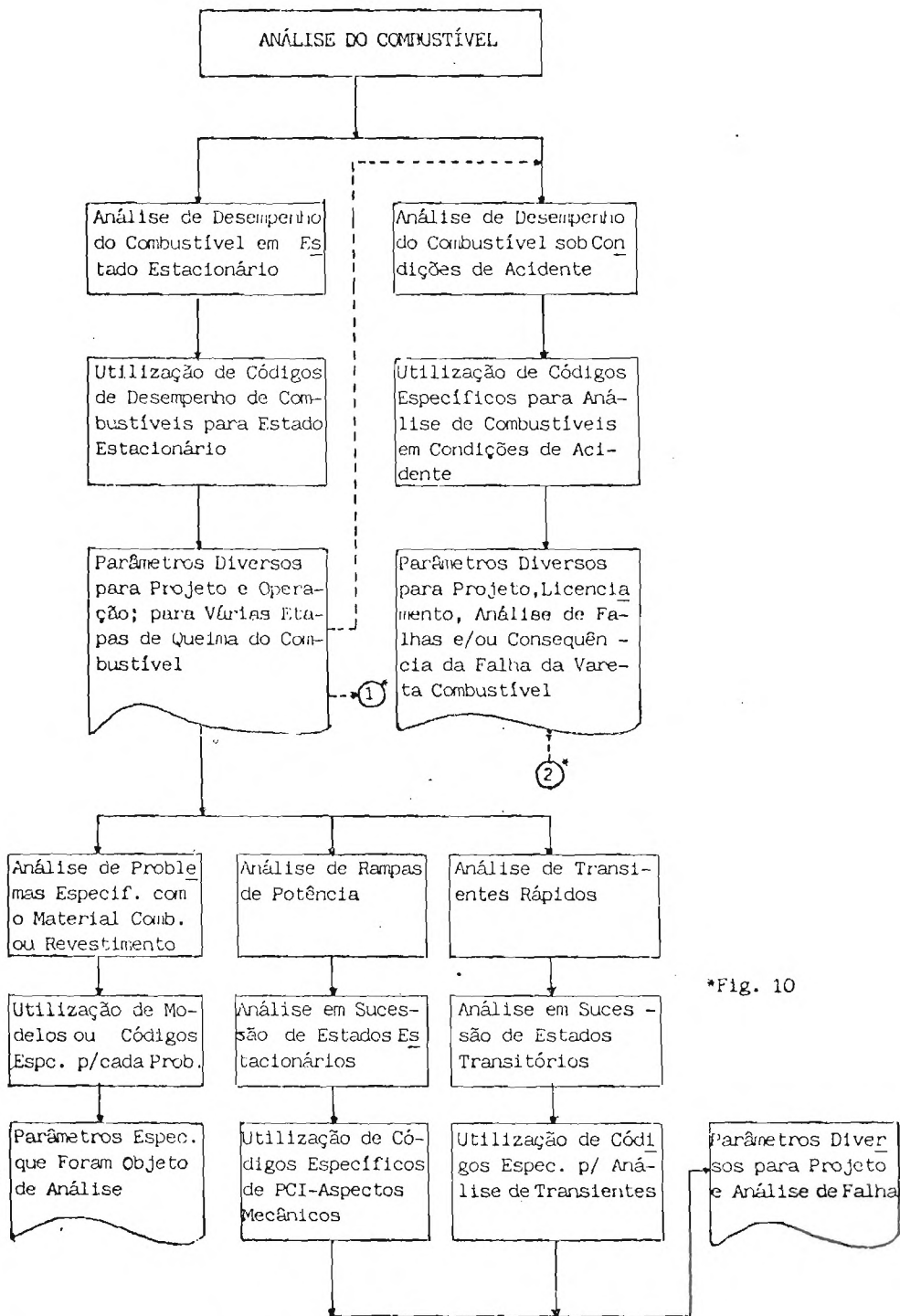


Figura 8. Esquema de Análise de E.C.



*Fig. 10

Figura 9. Esquema de Análise do Combustível

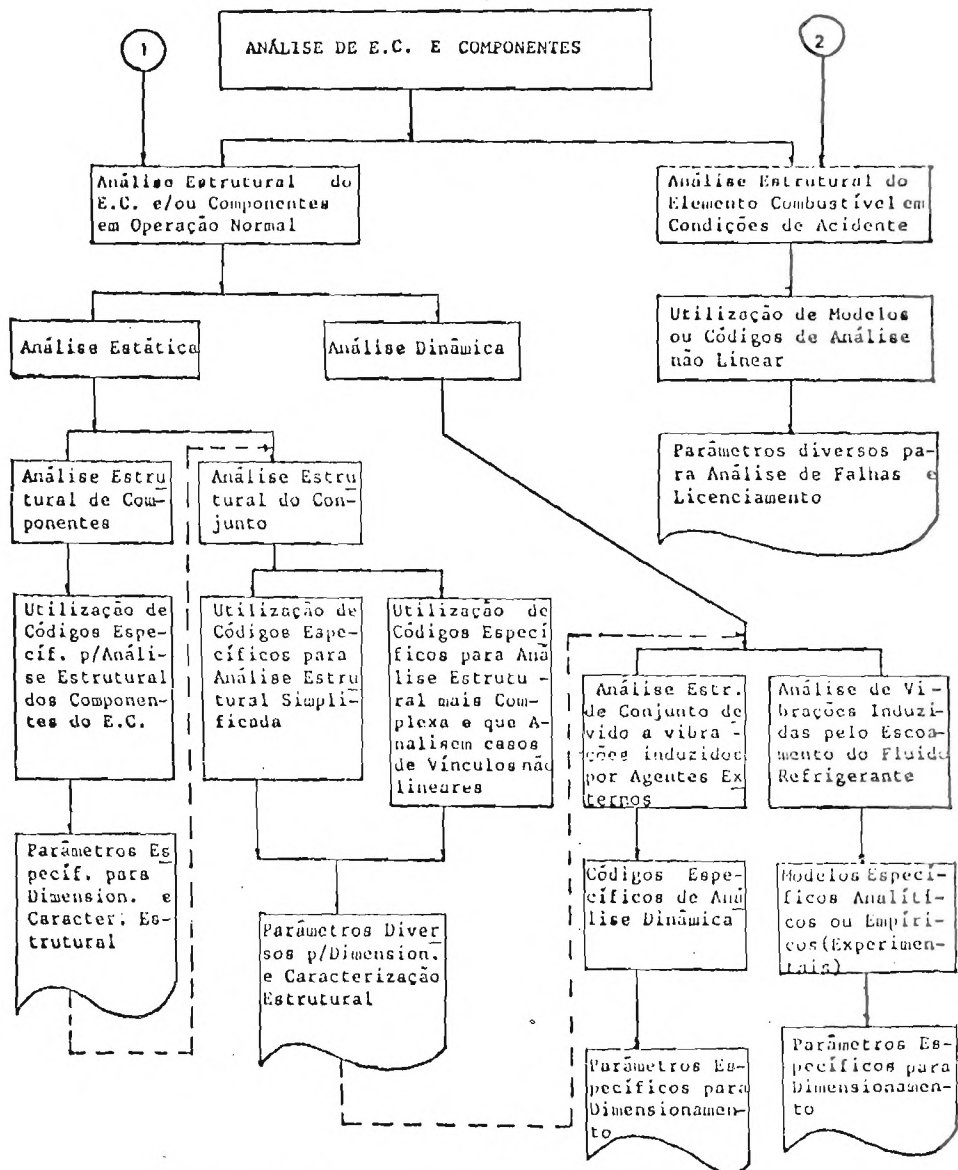


Figura D. Esquema de Análise Estrutural de E.C.

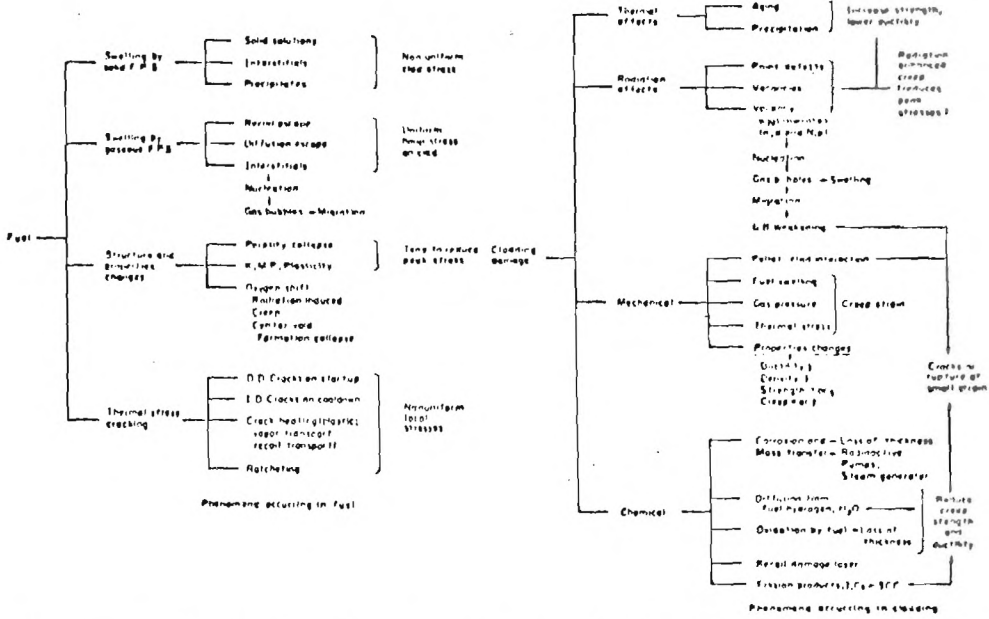


Figura 11. Fenômenos que Ocorrem no Revestimento e Combustível de uma Vareta Combustível /4 /.

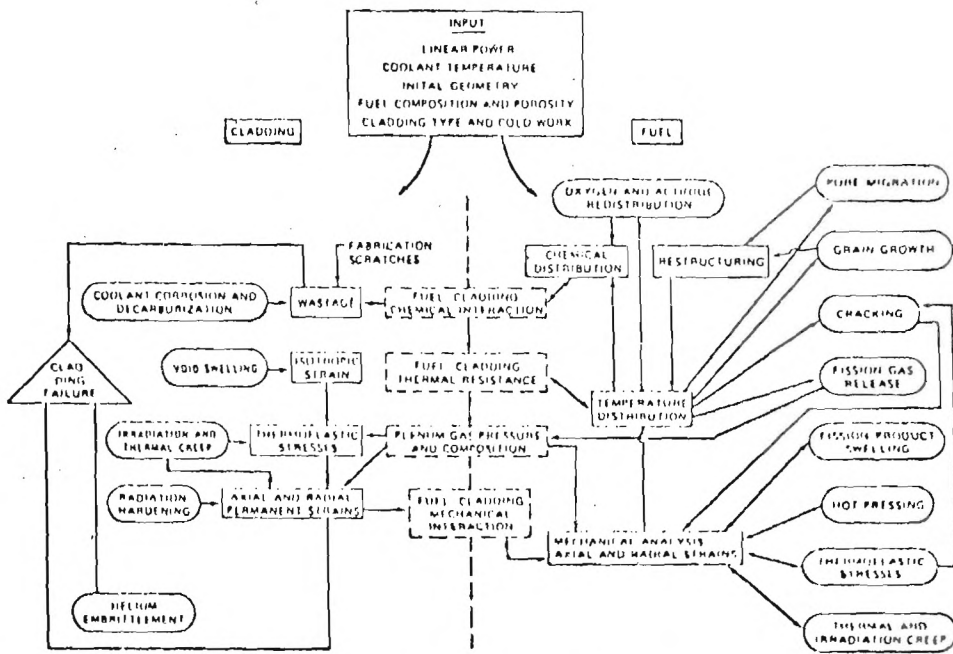


Figura 12. Interligação de Processos Mecânicos, Metalúrgicos e Químicos no Desempenho sob Irradiação de uma Vareta Combustível /4 /.

DESIGN OF NUCLEAR REACTORS FUEL ELEMENTS

by

José Augusto Perrotta

ABSTRACT-- A short description on nuclear reactors fuel elements design is presented. A general information on fuel element design is focused instead of specific details of a particular fuel element of a particular reactor. It is neither done any analysis' on phenomena or particular problems nor detailed description on analysis methods. The analysis' methods and examples presented are of general application and have to be discussed if applied to a particular fuel element and reactor type.