

PROJETO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS DE REATORES NUCLEARES

José Augusto Perrotta

Divisão de Engenharia do Núcleo
Departamento de Tecnologia de Reatores
RTN/RT - IPEN/CNEN-SP

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 têm sua importância ou pertinência quando de análises específicas do tipo de reator e tipo de combustível.

ABSTRACT

A short description on nuclear reactor fuel element 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.

1. Introdução

Este trabalho se constitui num ponto de vista pessoal sobre um esquema de organização para projeto de elementos combustíveis de reatores nucleares. São apontados os principais itens que constam da abordagem de projeto de elementos combustíveis [1]. São verificados: a necessidade de um conhecimento profundo sobre características de materiais e desempenho destes em condições existentes no reator; a necessidade de se conceber, mecanicamente, a melhor forma do combustível atender os requisitos funcionais no reator e que seja compatível com processos de fabricação; a necessidade de se estabelecer modelos analíticos/numéricos para demonstração de projeto utilizando-se, principalmente, programas computacionais; e a necessidade de uma infraestrutura experimental bastante grande já que o combustível se constitui na primeira barreira para liberação de produtos de fissão e sobre este pesa uma grande responsabilidade de segurança.

As idéias e os exemplos aqui apresentados estão direcionados, principalmente, para reatores de potência e de pesquisa moderados e refrigerados a água, mas a extensão dessas idéias é válida para qualquer tipo de combustível ou reator.

2. Tipos de Combustíveis

As funções básicas do combustível no reator nuclear são: gerar as fissões nucleares; transferir a energia gerada na fissão 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 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; baixo custo.

Os combustíveis nucleares são formados dos elementos físsis 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. De uma maneira geral se procura associar o Urânio (Tório ou Plutônio) a 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.

Os principais materiais combustíveis estão em forma de ligas metálicas, materiais cerâmicos e dispersões [2-7].

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.

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

- 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).

- Ligas de U-Al foram 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 da 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 embora tenham demonstrado 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 são possíveis ciclagens térmicas acima de 600°C pois há mudança de fase acarretando mudanças geométricas e estruturais.

- 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 $0.5\text{gU}/\text{cm}^3$ a $1.3\text{gU}/\text{cm}^3$ para densidade do Urânio são encontrados para este tipo de combustível. Valores maiores até $3.7\text{gU}/\text{cm}^3$ tem sido testados com algum sucesso [8].

O aumento do desempenho de combustíveis e da eficiência térmica de uma usina nuclear de potência requer aumento da temperatura do combustível. 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 têm alto ponto de fusão. Os cerâmicos podem ser processados ou operados a altas temperaturas podendo ser um combustível apropriado para alto desempenho. As vantagens de se usar materiais cerâmicos como combustível 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.

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

Os principais materiais cerâmicos utilizados como combustível nuclear são UO_2 , $\text{UO}_2\text{-PUO}_2$, ThO_2 , etc.

Em reatores de potência a água leve (PWR, BWR) e água pesada (PHWR, CANDU) é utilizado como combustível o UO_2 . O combustível de UO_2 é apresentado de várias formas tais como pastilhas cilíndricas, pastilhas anulares e plaquetas, sendo todas as formas sinterizadas com densidade na faixa de 92 a 97% da densidade teórica (processo de fabricação: compactação do pó de UO_2 na forma desejada e sinterização posterior à aproximadamente $1600^\circ C$). A condutividade térmica do UO_2 é um pouco baixa e com a alta potência gerada no reator leva a existência de altos gradientes térmicos no 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 do combustível, 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 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.

Define-se combustível tipo dispersão aquele constituído de cermetes ou de compostos intermetálicos de material físsil/fértil dispersos em matriz não físsil. Os combustíveis nucleares de dispersões são constituídos, normalmente, de materiais combustíveis (UO_2 , U_3O_8 , U_3Si_2 , etc.) dispersos numa matriz contínua de um material estrutural (Al, zircaloy, aço inox, etc.) A fim de minimizar os danos da irradiação e prover resistência mecânica e ductilidade, o diluente (material estrutural) deve predominar no volume formando uma 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. 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 e 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.

- 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). Programas a nível mundial foram elaborados [9] de forma a pesquisar e qualificar combustíveis a base de dispersões com alta densidade de Urânio.

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 principalmente nos reatores de potência. A diferença básica entre os dois tipos reside na relação de fluxo neutrônico/densidade de potência/área de transferência de calor, processos de fabricação, autonomia/desempenho em irradiação e rigidez estrutural.

O arranjo mecânico de cada elemento combustível depende do tipo de reator e sua aplicação. Reatores de pesquisa de alto fluxo requerem núcleos bem compactos e de alta rigidez. Nestes, os elementos combustíveis são compostos de placas curvas ou anulares. Reatores de pesquisa, de fluxo baixo ou intermediário, utilizam, normalmente, placas planas mantidas paralelas por placas suportes laterais formando uma estrutura simples mas com alta rigidez. Já reatores de potência comerciais têm núcleos compostos de varetas, com comprimentos elevados, possuindo pouca rigidez como estrutura, utilizando componentes mecânicos mais elaborados como, por exemplo, grades espaçadoras que necessitam de processos avançados de estamparia e soldagem.

3. 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 1 apresenta uma matriz em que estão relacionados, para um reator de potência PWR, 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 funcio-

nais necessários ao elemento combustível (preencher matriz) e seja demonstrado seu atendimento [10].

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 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 de potência, por exemplo, a base de projeto para operação normal é: "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 ocorram durante sua vida útil. Dano no revestimento é definido como perfuração, distorção excessiva ou ruptura como resultado direto de uma combinação particular de densidade de potência ou condições do refrigerante".

Neste caso, para a vareta combustível, é garantida sua integridade evitando temperaturas excessivas, evitando pressão interna excessiva devido à liberação de gases de fissão e evitando tensões e deformações altas no revestimento. Os limites impostos são: temperatura central da pastilha combustível $< 2500^{\circ}\text{C}$; pressão interna da vareta $<$ pressão do refrigerante; tensão equivalente máxima no revestimento $<$ tensão de escoamento ou tensão limite de corrosão sob tensão; deformação equivalente máxima $< 1\%$.

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, análise de sensibilidade, análise de caso desfavorável, referência a resultados experimentais, e análises combinadas das anteriormente mencionadas.

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 2 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/mecânica dos componentes. Unindo estes dois aspectos, material e geometria, está o equacionamento do problema envolvendo várias áreas através de métodos 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 [11].

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 análise do 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 3 e 4 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/análise de acidentes/materiais) e estão interligadas entre si, pois uma depende do resultado da outra para poder ser realizada. Estão anotadas nas figuras 3 e 4 os programas utilizados pelo RTN/RT.

Entende-se como desempenho do combustível a forma como se comportam parâmetros diversos 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 programas 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, e necessidade de interações sucessivas para convergência nos cálculos desenvolvidos pelos programas. A análise do combustível sob condições de acidentes envolve problemas complexos tanto de materiais, como de transferência de calor. Os programas para esta análise também são complexos e tem grande parte de seus modelos em bases experimentais, servindo os resultados desses programas como base para licenciamento e análise de falhas. As rotinas de um programa de análise de desempenho podem ser agrupadas em 4 itens 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 [12].

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 dividida a análise estrutural 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 os 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 programas 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 programa em elementos finitos. Na análise de vibrações induzidas pelo escoamento 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 programas, 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.

4-Qualificação de Combustíveis

Verificou-se na figura 2 a interligação de condições de projeto e requisitos funcionais para análise e demonstração dos componentes de um reator nu-

clear. 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 das 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 dos 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.

Laboratórios de materiais, reatores de teste de materiais (reatores de alto fluxo), e laboratórios de pós-irradiação (laboratórios com células quentes) são infraestruturas essenciais para desenvolvimento, qualificação e análise de combustíveis nucleares.

REQUISITOS FUNCIONAIS	CONDIÇÕES DE PROJETO										
	1. Manter Geometria Aceitável	2. Permitir fluxo de refrigerante e transferência de calor aceitáveis	3. Manter barreiras de separação, do comb. e produtos de fissão c/ água	4. Permitir expansões diferenciais	5. Ter suporte próprio	6. Resistir às forças de escoamento do fluido	7. Permitir a inserção de barras de controle	8. Permitir o posicionamento da instrumentação, etc.	9. Acomodar efeitos químicos, térmicos, mecânicos e irradiação c/mat	10. Permitir manuseio, transporte, catregamento, etc.	11. Elementos Combustíveis compatíveis entre si
I- CONDIÇÃO I - OPERAÇÃO NORMAL E TRANS. OPER.											
1. Operação em estado estacionário e desligamento											
2. Manobras Operacionais											
3. Operação com desvios permissíveis											
4. Testes pré-operacionais											
5. Etc...											
II- CONDIÇÃO II - EVENTOS DE FREQUÊNCIA MODERADA											
1. Perda parcial do escoamento forçado do fluido											
2. Perda da água de alimentação normal											
3. Transiente de rejeição de carga de projeto											
4. Perda da água de alimentação											
5. Etc...											
III- CONDIÇÃO III- EVENTOS INFREQUENTES											
1. Perda do refrigerante do reator por pequenas rupturas											
2. Quebra da tubulação do secundário											
3. Retirada inadvertente de barra de controle											
4. Etc...											
IV- CONDIÇÃO IV - FALTAS LIMITANTES											
1. LOCA											
2. Etc...											

Figura 1. Matriz Condições de Projeto X Requisitos Funcionais

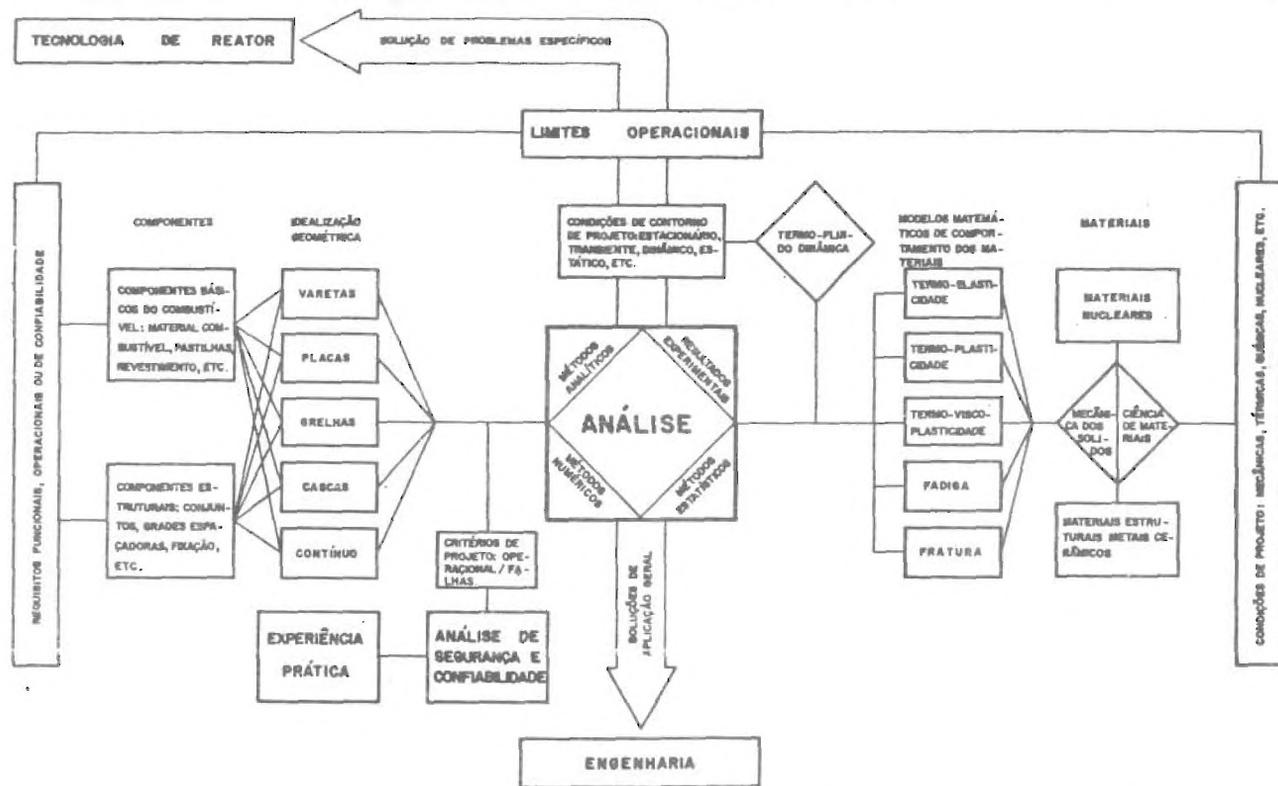


Figura 2. Esquema de Interligação de Condições de Projeto e Requisitos Funcionais para Análise de E.C.

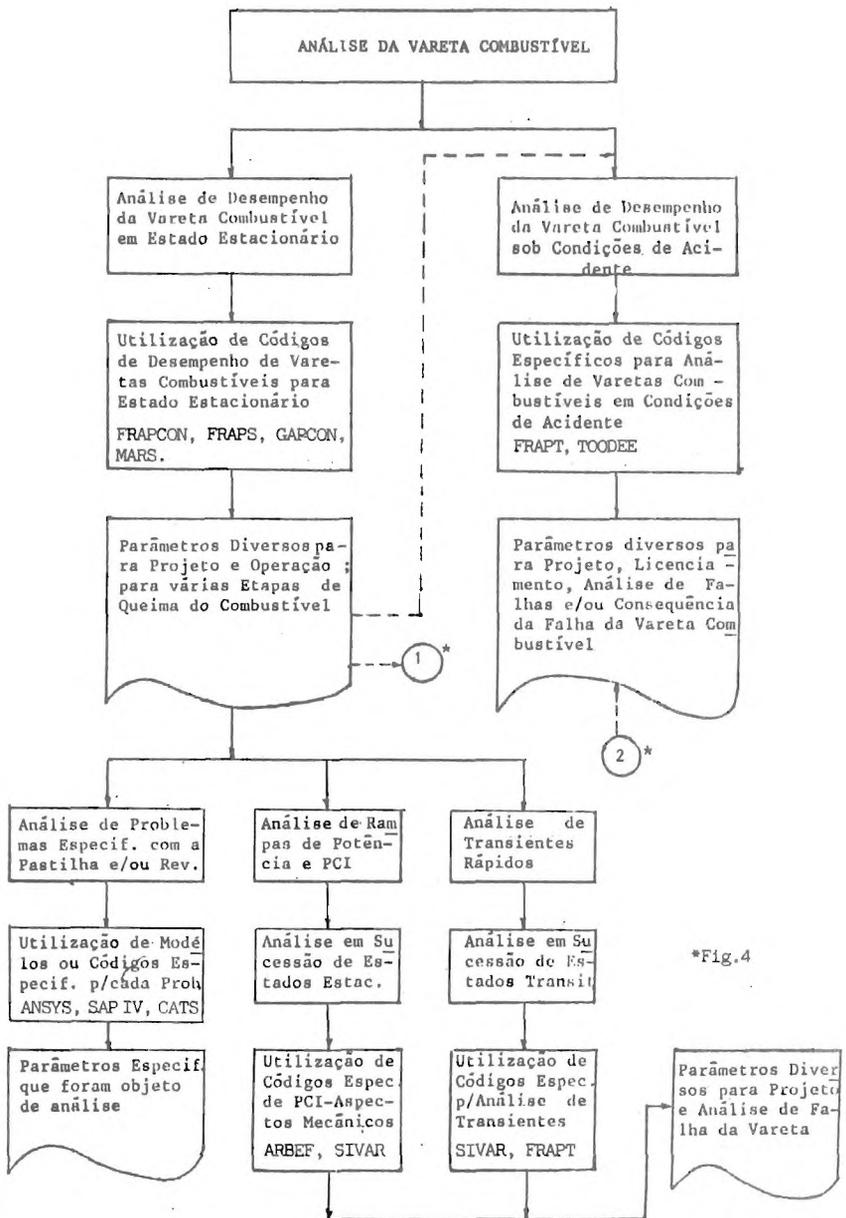


Figura 3. Esquema de Análise de Vareta Combustível

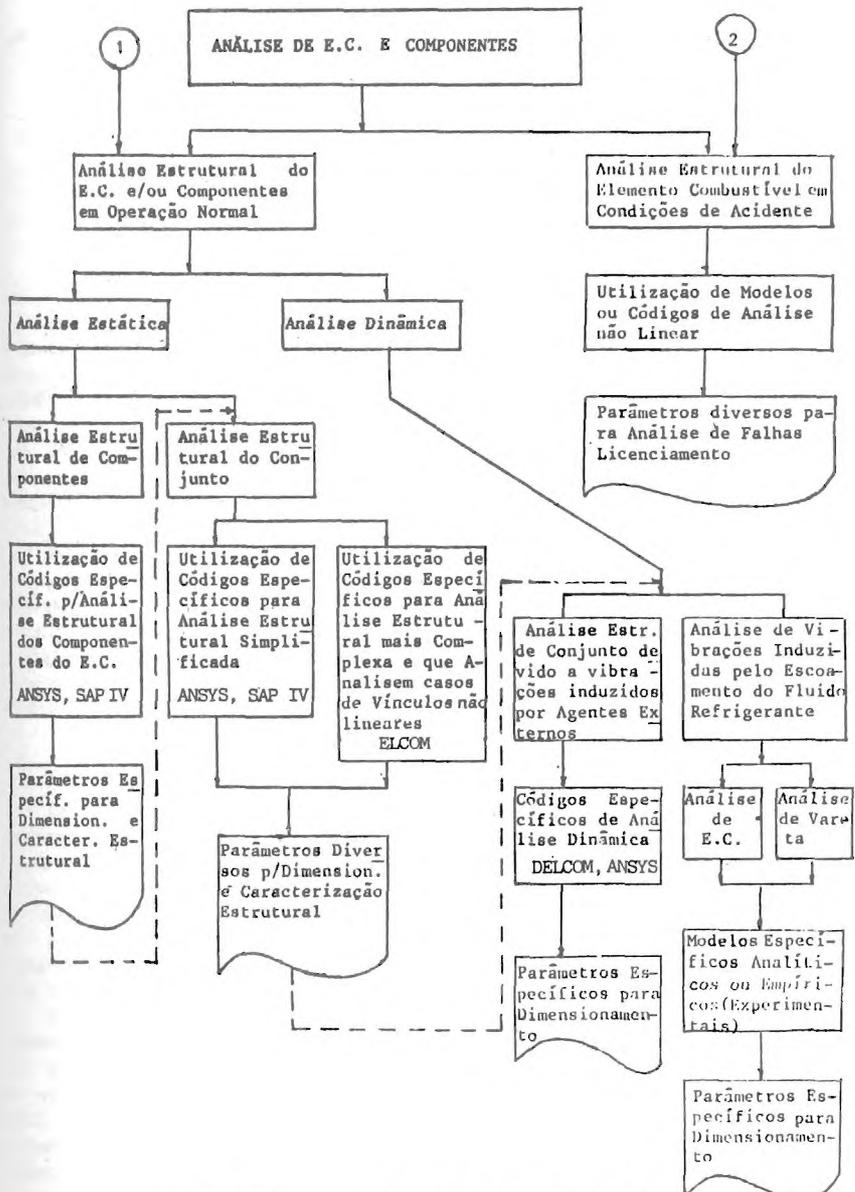


Figura 4. Esquema de Análise Estrutural de E.C.

5. Referências

- [1] J. A. Perrotta, Apostila: "Curso de Introdução à Energia Nuclear - Engenharia do Núcleo", RTN/RT - IPEN/CNEN-SP.
- [2] B.R. T. Frost, "Nuclear Fuel Elements" - Pergamon Press, 1982.
- [3] A. R. Kaufmann, "Nuclear Reactor Fuel Elements" - Interscience Publishers, 1962.
- [4] B. M. Ma, "Nuclear Reactor Materials and Applications" - Van Nostrand Reinhold Company, 1983.
- [5] J. A. L. Robertson - "Irradiation Effects in Nuclear Fuels" - Gordon and Breach Science Publishers, 1969.
- [6] J. Weisman - "Elements of Nuclear Reactor Design" - Elsevier Scientific Publishing Company - 1977.
- [7] D. R. Olander, "Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements" - Technical Information Center, Energy Research and Development Administration, 1976.
- [8] 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.
- [9] Proceedings of the 1984 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors. ANL/RERTR/TM-6.
- [10] ANSI/ANS 57.5 - 1981 - "Light Water Reactors Fuel Assembly Mechanical Design and Evaluation".
- [11] Structural Mechanics in Reactor Technology, capa dos volumes do 5º Congresso.
- [12] J. Gittus, "Water Reactor Fuel Element Performance Computer Modelling" - Applied Science Publishers, 1983.