

aplicável a instalações nucleares com inventário limitado, estabelece a seguinte classificação:

Classe C - Instalações que podem ser projetadas de acordo com códigos e normas da indústria convencional, sem considerar aspectos sísmicos.

Classe B - Instalações para as quais se deve garantir que as estruturas civis não sofram colapso, a piscina ou outras estruturas de contenção preservem sua estanqueidade e nenhuma falha generalizada do núcleo ou do combustível causada por fragmentos que caiam sobre eles (se isto puder resultar em criticalidade ou fusão do combustível).

Classe A - Instalações para as quais funções de segurança adicionais devem ser garantidas durante e após um terremoto.

Nesse caso, para as instalações das classes A e B, que são sísmicas, as estruturas e componentes tem uma categorização adicional:

Categoria I - itens cujo funcionamento deve ser mantido durante o chamado Terremoto Básico de Projeto.

Categoria II - itens cujas perdas de função podem ser permitidas mas que devem ser projetados para não sofrerem o colapso estrutural na ocorrência do chamado Terremoto Básico de Projeto.

Não-Categorizados - todos os outros itens

Outra referência [6], de aplicação somente a reatores de pesquisa, também indica uma classificação. Nesse caso, são considerados todos os eventos externos extremos (e não apenas os terremotos) e algumas características dos reatores tais como o excesso de reatividade, nível de potência e capacidade de remoção de calor, tipo de elemento combustível, inventário dos produtos de fissão, tipo de contenção ou de confinamento e tipo de dispositivos experimentais. Os reatores de pesquisa são, então, separados em três grupos cujas características gerais são indicadas abaixo:

Grupo I. Nesse grupo estão reatores com baixa potência, baixo excesso de reatividade, e inventário pequeno de produtos de fissão. Para eles não devem ocorrer problemas de liberação de radioatividade ou de danos ao público e ao ambiente mesmo na situação de falha generalizada provocada por eventos externos extremos. Usualmente, reatores que operam até 500 kW estão nesse grupo.

Grupo II. Os reatores desse grupo tem potência, excesso de reatividade e inventário de produtos de fissão moderados. É necessário atender a requisitos de projeto simples para algumas estruturas como o prédio do reator para proteção contra eventos externos extremos. Reatores que operam na faixa de potência de 500 kW a 2 MW estão, em geral, incluídos nesse grupo.

Grupo III. Os reatores desse grupo têm potência, excesso de reatividade e inventário de produtos de fissão mais altos e, portanto, necessitam de proteção mais complexa contra os eventos externos extremos. Reatores de pesquisa com potências de 2 MW até 10 MW estão normalmente nesse grupo.

Há, a princípio, uma correlação entre os grupos definidos em [6] com as classes definidas em [5] de modo que o grupo I corresponde à classe C, o II à B e o III à C.

O Departamento de Energia dos E. U. A. ("US Department of Energy - USDOE") elaborou um código [7] cujo escopo tem aplicação restrita às instalações administradas por ele. Apesar disso, há vários aspectos muito interessantes e abrangentes nessa referência cujos conceitos podem ser aplicados a qualquer tipo de instalação nuclear. Nesse caso, a classificação das instalações em relação aos eventos externos extremos é feita como indicado abaixo:

Categoria de Desempenho 0 ("Performance Category: 1 - PC 0"): não há considerações de segurança ou econômicas;

Categoria de Desempenho 1 (PC 1): deve-se manter a segurança ocupacional;

Categoria de Desempenho 2 (PC 2): deve-se manter a segurança ocupacional e manter a operacionalidade com o mínimo de interrupções;

Categoria de Desempenho 3 (PC 3): deve-se manter a segurança ocupacional, a operacionalidade contínua e o confinamento de conseqüências de acidentes;

Categoria de Desempenho 4 (PC 4): deve-se manter a segurança ocupacional, a operacionalidade contínua e o confinamento de conseqüências de acidentes com alto grau de confiabilidade.

A essas categorias são associadas as instalações com diferentes funções que vão daquelas não nucleares (PC 0) aos reatores nucleares com potências maiores que 10 MW (PC 4), passando por instalações do ciclo do combustível nuclear e outros reatores (PC 1 até PC 3). Nesse código [7] há uma abordagem probabilística para a classificação das instalações em função do impacto radiológico para o público e para o ambiente que sua operação, sob condições normais ou acidentais, pode causar. Há, também, um conservadorismo que aumenta conforme aumenta a categoria de desempenho.

Há, também, uma certa correlação entre as categorias de [7] com as classificações de [5] e [6], sendo que em [7] ocorre uma maior estratificação.

Essa etapa de classificação sísmica (ou em relação a outros eventos) é fundamental pois define o esforço que deverá ser feito para a qualificação e licenciamento da instalação e de suas estruturas e componentes. É importante ressaltar que a classificação deve ser a mais precisa possível, evitando conservadorismo que poderá causar dificuldades técnicas e econômicas ou uma classificação branda que cause dificuldades no licenciamento.

### III. INFORMAÇÕES DO LOCAL

No caso da instalação ter sido classificada como sísmica, isto é, onde a avaliação sísmica é necessária devem ser obtidas as informações geológicas, geotécnicas e sismológicas do local para a definição dos carregamentos sísmicos.

Os aspectos que devem ser enfocados nessa busca são:

- (a) Características geológicas regional e do local;
- (b) Características geotécnicas do local;
- (c) Sismicidade regional e do local;

- (d) Aspectos tectônicos e de falhamento regional e do local;
- (e) Estabilidade de taludes no local;
- (f) Liquefação no local.

Essas informações devem ser obtidas por meio de dados e registros existentes, por ensaios e sondagens no local, por ensaios de laboratório em corpos de prova colhidos no local e por meio de análises geotécnicas.

#### IV. MOVIMENTOS SÍSMICOS

Para instalações nucleares (exceto os reatores de potência) os movimentos sísmicos aplicáveis ao local da instalação são estabelecidos em um único nível chamado de Terremoto Básico de Projeto. Esses movimentos são, em geral, definidos como um registro na superfície, admitido como ocorrendo em uma rocha sã aflorante. Os registros podem ser dados na forma de espectros de resposta, de históricos do movimento ou de densidades espectrais de potência, tendo como um fator de normalização a aceleração de período nulo.

Os movimentos podem ser estabelecidos por meio de uma abordagem determinística ou probabilística.

No primeiro caso são utilizadas técnicas sismotectônicas para identificação da região, das estruturas sísmicamente ativas e dos correspondentes potenciais de terremotos máximos assim como das províncias sismotectônicas e dos correspondentes potenciais de terremotos máximos. Mais ainda, são avaliados os movimentos sísmicos produzidos no local de interesse a partir da ocorrência de terremotos originados na estrutura sísmicamente ativa mais próxima do local ou nas bordas da província sismotectônica onde a instalação está localizada.

No caso da abordagem probabilística busca-se determinar o nível do movimento sísmico que tem uma probabilidade aceitavelmente pequena de ser excedido durante a vida útil da instalação. São requeridas as intensidades sísmicas na região obtidas de registros de terremotos ocorridos, um modelo probabilístico para correlacioná-las e o estabelecimento de um valor limite de probabilidade aceitavelmente baixo.

Seja com uma abordagem ou com outra, obtém-se geralmente o nível do Terremoto Básico de Projeto como uma intensidade na escala Mercalli Modificada. A partir dessa intensidade pode-se obter a aceleração de período nulo por meio de correlações entre as intensidades e as acelerações obtidas por comparações de registros sísmicos existentes para o local ou para regiões com características semelhantes.

Com a aceleração de período nulo estabelecida, os registros aplicáveis são definidos de forma imediata, por meio de uma normalização, a esse parâmetro, de movimentos do local (se existirem) ou de movimentos artificiais.

A forma mais comum é a utilização de registros na forma de espectros de resposta de projeto (artificiais) e a geração, também artificial, de históricos de movimento ou de densidades espectrais de potência, a partir dos primeiros.

As normas [5] e [6] utilizam uma abordagem determinística, sendo que os registros de terremotos ocorridos devem ser feitos para uma região com raio de 100 km a 200 km (onde houver poucos registros) tendo como centro o local da instalação e num período de coleta de 100 anos. As correlações entre as intensidades máximas, nível de intensidade de projeto e aceleração de período nulo são dadas na Tabela 1.

TABELA 1. Correlação entre as Intensidades e Acelerações Sísmicas [5]-[6]

Intensidade Histórica Máxima (na escala Mercalli Modificada)	Nível da Intensidade de Projeto	Aceleração de Projeto (em $g \cdot s^{-2}$ )
VII < I < VIII	1	0,08
VIII < I < IX	2	0,15
IX < I	3	0,30

a. g - aceleração da gravidade

No caso da referência [7] é utilizada uma abordagem probabilística com as probabilidades associadas à definição das intensidades variando conforme a categoria, com o aumento do conservadorismo em função do risco da instalação. Os valores usuais de [7] são dados na Tabela 2.

TABELA 2: Informações sobre Riscos Sísmicos conforme [7]

Categoria de Desempenho	Probabilidade anual	Período de Retorno (anos)
PC 1	2 E-3	500
PC 2	1 E-3	1.000
PC 3	5 E-4	2.000
PC 4	1 E-4	10.000

Uma decorrência dessa abordagem é o estabelecimento de mapas de risco sísmico onde o risco é dado como a possibilidade de ocorrência de eventos com uma intensidade igual ou maior a uma intensidade dada, durante um certo intervalo de tempo (tempo de retorno).

#### V. MÉTODOS DE ANÁLISE

A avaliação sísmica de uma instalação nuclear compreende a análise estrutural dos seus prédios e dos seus componentes. As características do carregamento sísmico, que é um movimento variável com o tempo, aplicado aos prédios e ao que está dentro deles, a partir das fundações, fazem com que as análises estruturais sejam dinâmicas, à primeira vista. Assim, a análise dinâmica seria feita considerando as características de rigidez, de massa e de amortecimento de todas as partes envolvidas, isto é, das rochas e solo onde a instalação se apoia, das suas

fundações, dos seus prédios e dos seus componentes, e das relações de acoplamento entre eles.

Pode-se, no entanto, executar a análise sísmica utilizando procedimentos simplificados que permitem, conseqüentemente, análises dinâmicas simplificadas ou até mesmo análises estáticas equivalentes. Além disso, em função das características de massa e rigidez, podem ser feitas modelos separados dos prédios e dos componentes. Finalmente, o nível de refinamento das análises e dos modelos pode ser dosado de acordo com a classe ou categoria da instalação.

São dadas as seguintes recomendações em [5] quanto à avaliação sísmica:

- (a) Os projetos dos prédios podem ser separados dos projetos dos componentes internos;
- (b) No projeto dos prédios pode-se utilizar uma análise dinâmica simplificada no caso de instalações de Classe A e análise estática equivalente para instalações Classe B;
- (c) No projeto dos componentes internos deve-se empregar a análise dinâmica simplificada;
- (d) Há indicações específicas para a consideração de várias situações tais como o caso do movimento de superfícies livres de líquidos ("sloshing"), da avaliação do potencial de liquefação, da avaliação de parafusos e placas de ancoragem, da avaliação de linhas de tubulação e de conexões por meio de cabos ou de tubulações de equipamentos em posições diferentes.

A análise dinâmica simplificada pode ser entendida como uma análise espectral onde os prédios ou os componentes são modelados como sistemas massas-molas discretos. Na análise estática equivalente os prédios e os componentes são admitidos como tendo somente as características de rigidez. Em ambos os casos os carregamentos sísmicos são forças dadas por

$$F_i = a_g \cdot C_i \cdot W_i \quad (1)$$

onde  $F_i$  são as forças de inércia correspondentes à massa  $i$ ,  $a_g$  é a aceleração de projeto aplicável,  $C_i$  são os coeficientes de amplificação correspondentes à massa  $i$ , e  $W_i$  é o valor da massa  $i$ , incluindo as massas do prédio e dos componentes internos. As diferenças entre a análise dinâmica simplificada e a análise estática equivalente podem ser resumidas em dois pontos:

- (a) Os coeficientes de amplificação são obtidos de modo diferente em cada situação, dependendo das características de vibração no caso da análise dinâmica simplificada e da posição no prédio no caso da análise estática equivalente;
- (b) Há, no cálculo dos coeficientes de amplificação na análise dinâmica simplificada, termos relacionados com o acoplamento entre as massas e molas do modelo, isto é, que depende da relação entre as massas e entre as frequências, e com o amortecimento.

Para o caso da análise sísmica dos componentes a equação (1) também é utilizada porém com diferentes coeficientes de amplificação (e diferentes amortecimentos).

No caso da referência [7], as análises estáticas equivalentes são aceitáveis nos casos das categorias PC 1 e PC 2. Para as instalações PC 3 e PC 4 devem ser utilizadas análises dinâmicas espectrais ou análises dinâmicas no domínio do tempo, com modelos mais completos dos prédios e dos componentes.

## VI. CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO

A partir das avaliações estruturais utilizando análises estáticas equivalentes, análises dinâmicas simplificadas ou análises dinâmicas completas são obtidos esforços internos e tensões nos elementos estruturais dos prédios e dos componentes. Para completar a avaliação sísmica, estas tensões calculadas devem ser comparadas com valores admissíveis. A referência [5] recomenda que os valores admissíveis a serem utilizados nas comparações sejam os valores indicados nos códigos de estruturas metálicas e de concreto convencionais majorados por fatores que levem em conta o caráter de carregamento extremo do terremoto. O mesmo conceito é recomendado em [7].

## VII. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

É muito importante fazer uma classificação sísmica precisa da instalação, das suas estruturas e dos seus componentes pois a qualificação quanto a esse carregamento depende fortemente dessa classificação nos aspectos de segurança e econômicos.

Para instalações nucleares que não sejam reatores de potência ou mesmo reatores de pesquisa com potências elevadas (maiores que 5 MW), é possível fazer a qualificação sísmica por meio de análises dinâmicas simplificadas ou estáticas equivalentes que diferem pouco das análises estruturais feitas usualmente em instalações não nucleares pois o carregamento sísmico aparece como um carregamento externo a mais. Deve-se ressaltar que os limites admissíveis são majorados para as combinações onde o carregamento sísmico estiver incluído. Nesse caso, mesmo para instalações existentes, a determinação de margens no projeto é relativamente simples desde que se disponha de informações mínimas de projeto (desenhos e especificações).

As normas e códigos disponíveis tem muitas semelhanças pois utilizam conceitos correlatos de classificação e de avaliação sísmica. Em [7] são empregadas abordagens probabilísticas que permitem o estabelecimento de carregamentos sísmicos menos conservadores que as abordagens determinísticas de [5] e [6].

## REFERENCES

- [1] International Atomic Energy Agency, **Safety Assessment of Research Reactors and Preparation of**

**the Safety Analysis Report.** Safety Series No. 35-G1, Vienna, 1994.

[2] International Atomic Energy Agency, **Safety in the Utilization and Modification of Research Reactors.** Safety Series No. 35-G2, Vienna, 1994.

[3] United States Nuclear Regulatory Commission, **Guidelines for Preparing and Reviewing Applications for the Licensing of Non-Power Reactors, Format and Content.** NUREG-1537 Part 1, Washington, D. C., USA, 1996.

[4] United States Nuclear Regulatory Commission, **Guidelines for Preparing and Reviewing Applications for the Licensing of Non-Power Reactors, Standard Review Plan and Acceptance Criteria.** NUREG-1537 Part 2, Washington, D. C., USA, 1996.

[5] International Atomic Energy Agency, **Earthquake Resistant Design of Nuclear Facilities with Limited Radioactive Inventory.** IAEA-TECDOC-348, Vienna, 1985.

[6] International Atomic Energy Agency, **Siting of Research Reactors.** IAEA-TECDOC-403, Vienna, 1987.

[7] United States Department of Energy, **Natural Phenomena and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities.** DOE-STD-1020-94, Washington, D. C., USA, 1994.

#### ABSTRACT

Some considerations regarding extreme external events, natural or man-induced, such as earthquakes, floods, air crashes, etc, shall be done for nuclear facilities to minimizing the potential impact of the installation on the public and on the environment. In this paper it will be presented the main aspects of the seismic evaluation of nuclear facilities (except the nuclear power reactors) based on different codes and standards.