



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS  
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

## **A análise dinâmica de edificações nucleares no histórico do tempo** **Benjamin Ernani Diaz<sup>1</sup>, Silvio de Souza Lima<sup>2</sup>, Raissa Laubenbacher Sampaio de Toledo<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>SEBED/ ernani.diaz@uol.com.br

<sup>2</sup> Escola Politécnica da UFRJ/ Departamento de Estruturas/ silvio.poli.ufrj@gmail.com

<sup>3</sup>SEBED/ raissalst@gmail.com

### **Resumo**

A solução de centrais elétricas com base em energia nuclear é uma forma de obter energia elétrica eficientemente e sem a emissão de gases na atmosfera, que podem produzir uma piora do efeito estufa. As soluções de engenharia utilizadas nesta indústria precisam ser extremamente bem estudadas a fim de garantir uma segurança bem maior do que para aquelas aplicações cujos acidentes ou insucessos não são tão nefastos para o meio ambiente. Todas as instalações nucleares precisam ser avaliadas para diversas ações que podem produzir efeitos dinâmicos cuja análise precisa ser feita de forma rigorosa. Entre estas ações podem ser citadas: sismo, tornado, explosões postuladas de TNT, rupturas postuladas de tubulações e vento. Serão apresentados procedimentos de análises de edificações nucleares com uma sistemática nova aplicada no Brasil, em que é feita uma modelagem completa da estrutura com elementos de pórtico espacial e de cascas e a análise dinâmica é feita no histórico do tempo. Para as ações de sismo é necessário criar terremotos artificiais, especificamente determinados com base nos espectros de resposta normativos. Os procedimentos aplicados e testados em projetos serão apresentados, abordando os seguintes problemas em análise sísmica:

- a.- Modelagem da estrutura
- b.- Condições de apoio
- c.- Determinação do terremoto artificial
- d.- Obtenção de resultados
- e.- Combinações de ações
- f.- Dimensionamento dos elementos

Os terremotos artificiais são obtidos por meio de estudos acadêmicos realizados na Escola Politécnica da UFRJ pelos professores S. H. C. Santos e S. Souza Lima. Os dimensionamentos das cascas são efetuados de forma moderna com base em procedimentos automáticos preparados pelo prof. M. Schulz. O mais importante dos procedimentos de dimensionamento é que a armadura das cascas é obtida com esforços concomitantes e com os sinais corretos dos esforços axiais. Isto não ocorre nas análises dinâmicas efetuadas pelo procedimento de análise espectral.

### **Palavras-chave**

Centrais nucleares, Análise dinâmica, Concreto armado, Sismos, Análise Estrutural.



## Introdução

A análise dinâmica no Brasil na engenharia civil, empregada principalmente em projetos de centrais nucleares, é efetuada com um nível de dificuldade elevada. O Brasil sempre se orientou em usar energia de origem hidroelétrica. Esta energia nos últimos anos sofreu uma crise séria com uma estiagem prolongada, o que obrigou o país a usar centrais termoelétricas, construídas nas últimas décadas com uma previsão tecnicamente correta. Com isto estamos conseguindo vencer a crise hídrica mantendo a oferta de energia, embora em condições econômicas bem mais desvantajosas. A geração de energia elétrica com base na energia de fissão do urânio U235 é uma solução viável para o Brasil, pois a energia nuclear, a longo prazo, não é tão poluidora como a das termoelétricas a base de combustíveis fósseis, o que induz a um aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Este trabalho relata as técnicas de projeto utilizadas em análises dinâmicas de edificações nucleares brasileiras usando análises no histórico do tempo. Estas técnicas conseguem ser implementadas com auxílio de 4 tecnologias modernas e atuais: os novos desenvolvimentos tecnológicos na área dinâmica, a disponibilidade de programas poderosos de análise, o uso de computadores de grande capacidade de processamento e finalmente programas capazes de processar as inúmeras combinações e dimensionar as cascas conforme exigências normativas. As análises dinâmicas em edificações nucleares são necessárias para avaliar várias ações: sismo, explosões, tornados, vento turbulento, acidentes postulados, ruptura de tubulações, impactos de veículos durante tornados, etc.

Além disso, verifica-se que a análise dinâmica efetuada pelo método modal com base em espectro de resposta, muito utilizada no Brasil, está se mostrando totalmente inadequada e obsoleta. A grande desvantagem deste procedimento é que os resultados obtidos de esforços não são concomitantes e nem providos de sinal algébrico, o que torna o dimensionamento de peças de concreto armado de certa forma difícil de ser solucionado de forma direta. A praxe neste caso é obter indiretamente carregamentos estáticos equivalentes, que por sua vez fornecem sinais algébricos adequados para as solicitações finais para o dimensionamento.

É claro que os procedimentos apresentados aqui podem ser utilizados em edificações civis usuais em que a análise dinâmica sísmica se mostra necessária por várias razões, especialmente nas regiões brasileiras do Oeste Amazônico e do Nordeste, onde a intensidade sísmica é maior.

Será mostrado como os modelos de análise são criados, como o acelerograma do sismo é obtido com base no espectro de resposta normativo, como a análise é efetuada, como os resultados dos esforços são obtidos e finalmente como é efetuado o dimensionamento das paredes e lajes da estrutura de concreto armado.

## Preparação dos modelos de análise

Antes de mais nada é preciso padronizar as unidades empregadas nos projetos nucleares. O sistema de unidades precisa ser compatível e moderno. Os programas de análise modernos não fazem conversões de unidades. Um sistema técnico de unidades com base no quilograma-força deve ser evitado, pois este sistema tem uma unidade de massa de uso pouco prático e intuitivo (unidade designada por utm). Assim, é aconselhável utilizar um subsistema de



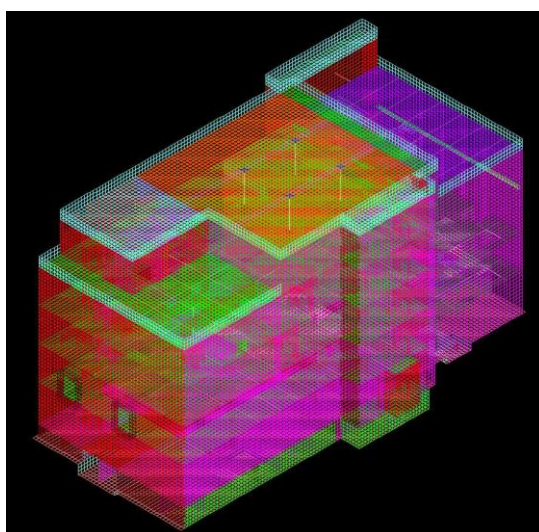
IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS  
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

unidades baseado no moderno sistema SI de unidades formado pelo seguinte subconjunto de unidades-base: massa Mg (ou t), comprimento m, tempo s, força kN e variação de temperatura K. As unidades derivadas são: área  $m^2$ , volume  $m^3$ , pressão kPa, peso específico  $kN/m^3$ , massa específica  $Mg/m^3$ , carga linear  $kN/m$ , carga por área  $kN/m^2$ , etc.

As edificações nucleares são estruturas industriais complexas de concreto armado (CA) formadas essencialmente por lajes, paredes e poucas vigas e pilares. As paredes e as lajes são bastante perfuradas por tubulações. Estas perfurações precisam ser consideradas no modelo da estrutura, pois elas influenciam a distribuição dos esforços nas lajes e paredes. A experiência em projetos executados mostra que o melhor procedimento para a geometria do modelo é criar os elementos de casca e as perfurações dentro de uma malha de elementos finitos com tamanho imutável de  $50cm \times 50cm$  para toda a estrutura. Esta sistemática facilita bastante a criação do modelo. Esta forma de modelagem da estrutura por meio dos elementos de casca permite determinar a massa da estrutura e a sua distribuição com uma precisão excelente.

Os apoios da estrutura no solo ou rocha podem ser avaliados por conceitos de espaço semi-infinito representando o solo. Ver por exemplo expressões de molas concentradas fornecidas em RICHART et al. 1970. Entretanto molas discretas precisam ser introduzidas ao longo da superfície da fundação nas 3 direções, se a fundação for direta, com base nas molas determinadas de forma concentrada. No caso de solo estratificados a rigidez de molas é obtida por meio de modelos de sólidos tridimensionais utilizando as características físicas de cada camada de solo, no caso de fundações diretas. O mesmo modelo utilizado para a análise dinâmica pode ser utilizado para a análise estática, o que facilita sobretudo o dimensionamento da estrutura.

Abaixo é mostrado um modelo de elementos finitos de um edifício nuclear de configuração usual.



**Figura 1- Exemplo de um modelo de uma edificação nuclear**



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS  
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

## As ações dinâmicas e como considerá-las

As ações dinâmicas em centrais nucleares são constituídas usualmente por: ações de sismos, de explosões postuladas de TNT, de tornado, de acidentes internos postulados, de vento turbulento, de impacto de veículos durante tornados, etc. A definição destas ações por meio das funções de carregamento no histórico do tempo é obtida por meio de artigos técnicos das mais variadas origens. As funções no tempo das cargas ou acelerogramas impostos são necessárias para a análise das estruturas. Pode-se citar a publicação seguinte, no caso de explosões de TNT (DEPARTMENT OF DEFENSE-USA, 2008). Existem várias outras, por exemplo, para impacto de veículos durante um tornado, para vento turbulento, para impacto de veículos, etc. Neste artigo será detalhado como as funções de carregamento no tempo são determinadas somente para as ações de terremotos.

Os efeitos de sismos são definidos pelas normas geralmente por meio de espectros de resposta. Para a aplicação de um acelerograma na fundação de uma edificação é necessário criar um terremoto artificial que tenha, para um oscilador padrão, uma resposta similar ao espectro de resposta definido pelo critério de projeto. Foram adotados nas análises efetuadas, sismos artificiais desenvolvidos na Escola Politécnica da UFRJ por TELES, SANTOS & SOUZA LIMA, 2010 com auxílio do programa Progsis4. Utiliza-se usualmente o espectro de resposta do Regulatory Guide 1.60 da USNRC, 1914, com fator de amortecimento de 0.07 para estruturas de CA. A duração do sismo é de 15s e o intervalo de tempo é de 0.01s. A intensidade usual mínima é de 0.1g. Ou seja, são definidos 1500 pontos no acelerograma. Veja abaixo o acelerograma obtido pelo programa Progsis4 e a resposta para o oscilador padrão, em função do período próprio. A aceleração máxima do sismo está normalizada para o valor de 1g.

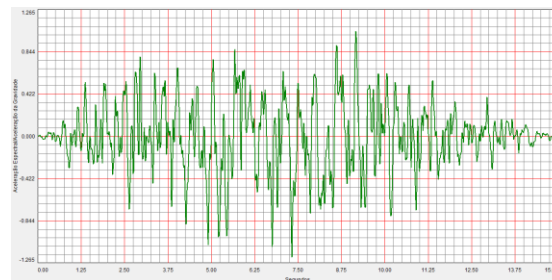


Figura 2 - Acelerograma obtido pelo programa Progsis4

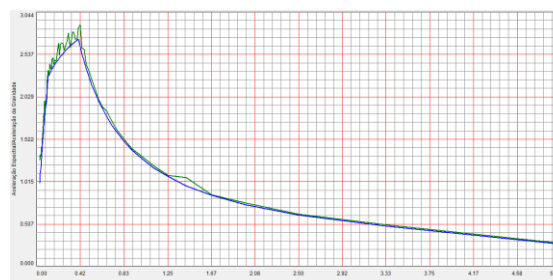


Figura 3 - Comparação do espectro de resposta normativo e o obtido com o sismo artificial gerado pelo programa Progsis4



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS  
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

A geração dos terremotos artificiais deve ser feita de forma aleatória independentemente para os terremotos nas direções x e y (horizontais) e na direção z (vertical).

### **A análise dinâmica e os resultados obtidos**

A análise dinâmica de uma edificação exige naturalmente programas de grande capacidade processados em computadores modernos com micro-processadores muito rápidos. Nos exemplos aqui apresentados foi utilizado o programa SAP2000 que está na sua versão 18. O programa é capaz de processar um modelo razoavelmente grande no histórico de tempo, arquivando os dados do processamento para os 1500 instantes de tempo processados. Para cada um destes intervalos de tempo é possível obter os esforços de casca e de barras de todos os elementos da estrutura. O volume de informações é realmente grande e para cada instante de tempo os esforços de casca para cada elemento são fornecidos ( $n_{11}$ ,  $n_{22}$ ,  $n_{12}$ ,  $m_{11}$ ,  $m_{22}$ ,  $m_{12}$ ,  $v_{13}$ ,  $v_{23}$ ) assim como os esforços nas barras ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ). É importante comentar que as massas do peso próprio da estrutura já são levadas em conta automaticamente, mas as massas adicionais decorrentes dos equipamentos e parte das sobrecargas (que são permanentes) devem ser adicionadas às massas do modelo para a análise dinâmica.

Para manipular os dados processados do SAP2000 é necessário ter conhecimento de como o programa pode obter o conjunto de esforços necessários ao dimensionamento. Existem duas condições específicas: obter os dados para um elemento específico para o seu dimensionamento e obter os dados de toda a edificação para um dimensionamento geral de todos os elementos.

Antes de mais nada é preciso esclarecer que os esforços de casca e de barras precisam ser obtidos sempre em conjunto e válidos para uma situação em que todos os esforços da estrutura estão em equilíbrio estrutural. Não se pode utilizar valores máximos, por exemplo, de forças normais com os valores máximos de momentos fletores, pois normalmente eles não são concomitantes.

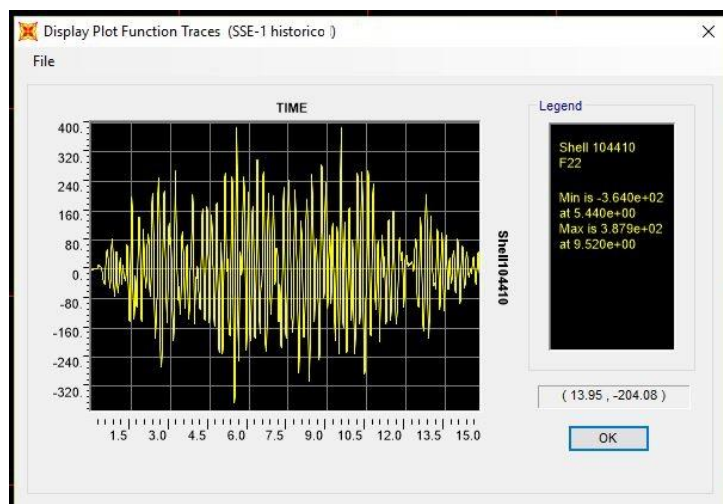
Evidencia-se que a análise dinâmica neste caso pode ser não linear, o que tem uma importância capital em casos de análise de momentos de segunda ordem ou trechos de fundação incapazes de absorver tensões de tração.

É importante notar que não há necessidade de processar nenhum espectro de resposta do piso correspondente (no sentido horizontal ou vertical), pois os resultados já levam em conta os efeitos locais dinâmicos no elemento, obtidos de uma forma em que o elemento participa localmente da resposta dinâmica da estrutura.

No caso de dimensionamento de um elemento específico a obtenção de dados para o dimensionamento de um elemento pode ser feita da seguinte forma: obtém-se com o programa SAP2000 a história no tempo do esforço decisivo para o dimensionamento, determina-se o instante  $t$  deste máximo com o traçado de sua história e com o instante  $t$  obtém-se o conjunto de esforços do elemento de casca ou de barra. Este conjunto de esforços é utilizado para o dimensionamento. A história do esforço do elemento precisa ser efetuada para a combinação dos esforços estáticos (de uma combinação com uma soma específica de solicitações) somados com o conjunto de esforços durante o sismo. Abaixo é mostrada a variação dos esforços verticais de uma parede vertical. Neste exemplo somente a ação sísmica foi considerada.



Verifica-se pela figura abaixo que os esforços máximos são obtidos para os instantes  $t=5.44s$  e  $t=9.52s$ .



**Figura 4 - Histórico no tempo de um esforço vertical F22 (kN/m) de uma parede externa da edificação**

Já para o dimensionamento de todas as paredes e lajes da edificação é necessário proceder de forma diferente. É necessário obter um carregamento estático que consiga representar a contento os efeitos do sismo. Para obter estes carregamentos estáticos carrega-se o modelo com acelerações variáveis ao longo da altura que devem atuar sobre as massas de peso próprio e sobre as das cargas permanentes de equipamentos. Estas solicitações podem ser feitas em intervalos de alturas para cada piso da edificação, a fim de incluir as massas das paredes próximas às lajes. Com as cargas assim determinadas o carregamento estático é processado e comparado com os esforços máximos obtidos com os 1500 instantes de tempo. Se por acaso os esforços máximos do terremoto não conseguirem ser simulados com o carregamento estático, deve-se incrementar o carregamento estático com um fator adicional multiplicativo (maior que 1) para que os máximos sejam atingidos de uma forma abrangente. A partir deste instante o carregamento estático representando os efeitos do sismo pode ser utilizado para o dimensionamento.

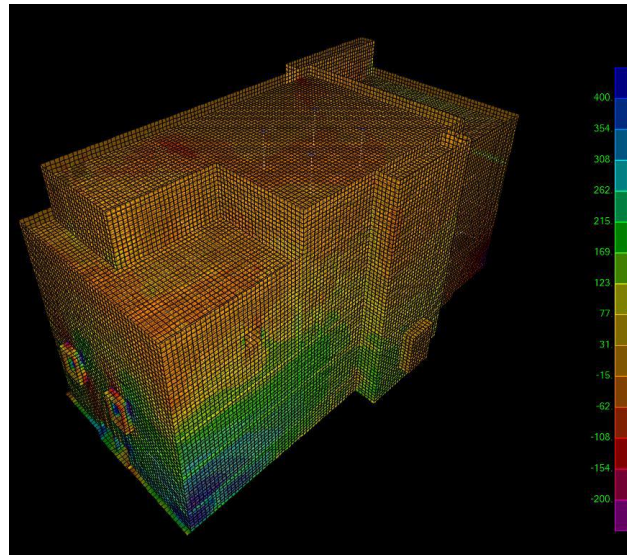
Existem aqui também dois procedimentos similares. Ou obtêm-se carregamentos horizontais estáticos, nas direções x e y somente, que possam simular as forças máximas atuantes por exemplo nas paredes da edificação, incluindo os efeitos do sismo vertical. Basta que por meio de coeficientes adequados o carregamento estático consiga obter os esforços máximos determinados pela análise com as 3 componentes do terremoto, incluindo também o efeito do terremoto vertical. Neste caso a comparação é para os esforços máximos obtidos de forma conjunta, processados pela análise no regime de histórico no tempo.

Ou de forma mais tradicional em que se obtêm carregamentos estáticos nas 3 direções (x e y horizontais e z vertical) que simulam os efeitos do terremoto nas 3 direções. Neste último caso a combinação, por ser linear, é considerada muito a favor da segurança pois os máximos dos 3 terremotos são combinados linearmente, apesar deles não atuarem concomitantemente.

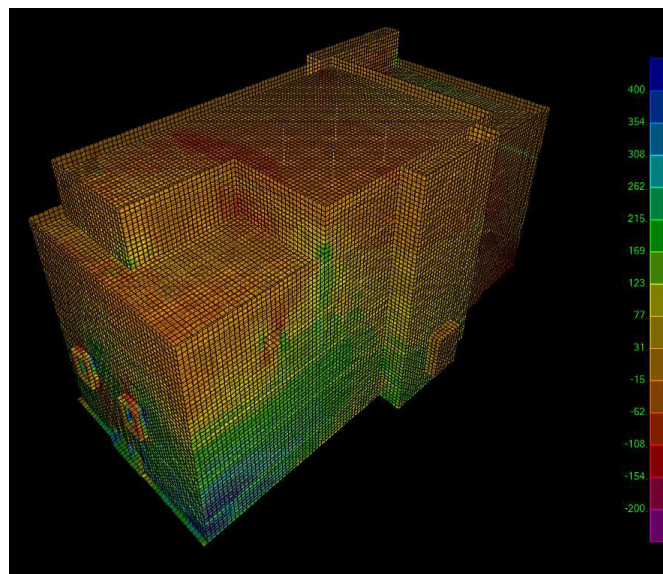


IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS  
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

A combinação linear precisa ser feita, para que os sinais dos esforços concomitantes sejam mantidos, a fim de que o dimensionamento seja efetuado de forma correta. As figuras abaixo mostram as forças axiais verticais de paredes para o terremoto artificial na direção x e para a simulação obtida. É de se notar que o programa SAP2000 consegue determinar esforços máximos numa dada direção para todos os instantes de tempo processados.



**Figura 5 - Esforços axiais [kN/m] verticais para paredes externas obtidos para um determinado tempo  $t$  para as maiores solicitações na direção x**



**Figura 6 - Esforços axiais [kN/m] verticais obtidos pelo carregamento estático equivalente para as maiores solicitações na direção x.**



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS  
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

É essencial que as solicitações obtidas com os carregamentos estáticos equivalentes sejam fornecidas de forma consistente para cada conjunto de solicitações em equilíbrio. Não é cabível utilizar solicitações envoltórias em direções diferentes (por exemplo  $n_{11}$ ,  $n_{12}$ ,  $n_{22}$ , etc.) para um mesmo elemento em situações diferentes de estágios de forças. Isto significa que não se pode obter envoltórias isoladas de componentes de esforços de casca para situações diferentes de forças em equilíbrio, como já evidenciado. O dimensionamento neste caso estaria inadequado.

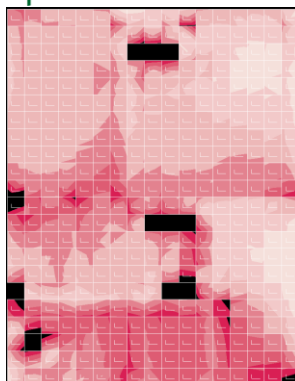
### **Dimensionamento das cascas**

O dimensionamento das cascas é feito com todas as componentes obtidas na análise ( $n_{11}$ ,  $n_{12}$ ,  $n_{22}$ ,  $m_{11}$ ,  $m_{12}$ ,  $m_{22}$ ). O programa SAP2000 consegue efetuar este dimensionamento segundo regras com base em normas americanas. Mas o dimensionamento só é efetuado para uma determinada combinação de esforços. O projeto de centrais nucleares exige dezenas senão centenas de combinações para o devido dimensionamento de elementos estruturais.

Desde o projeto da Central Nuclear de Angra, Unidade 2 onde pela primeira vez foram utilizados modelos de análise complexos preparados na Promon Engenharia na especialidade civil estrutural, para a central do tipo desenvolvido pela KWU, foi sempre necessário dimensionar a armadura para uma determinada seção de um elemento da seguinte forma. O dimensionamento foi feito individualmente para os esforços de todas as combinações prescritas no projeto para aquela seção em estudo. Em seguida, com todos os dimensionamentos feitos, a maior armadura foi determinada como uma envoltória de todas as armaduras calculadas, para conseguir obter a armadura a ser detalhada para a seção investigada. Na época este programa utilizado no projeto citado era designado por Locdex (ver DIAZ 1978).

Para os projetos atuais foi utilizado um programa sofisticado preparado por SCHULZ, inicialmente destinado a projetos de barragens, para o dimensionamento espacial de cascas de CA, designado por Delcar, em que o dimensionamento é efetuado para todas as combinações prescritas e a armadura crítica é fornecida. O dimensionamento das cascas é baseado nos conceitos da sua tese de doutorado na Coppe-UFRJ (SCHULZ 1988). O dimensionamento segue em princípio a norma europeia EN 1992-2 de pontes. As regras de dimensionamento de cascas foram inicialmente propostas por BAUMANN 1972. A armadura calculada é obtida para uma face (nos seus dois sentidos) e para a outra face (os seus dois sentidos). Para cada elemento a armadura determinada é uma armadura envoltória. A figura abaixo mostra como os resultados da armadura são apresentados pelo programa Delcar numa das 4 direções.





**Figura 7 – Armadura horizontal de uma parede, determinada pelo programa Delcar. As armaduras são indicadas por cores.**

Evidencia-se que, para cada elemento da parede, a maior armadura foi determinada para todas as combinações prescritas no projeto. Sem um programa como o Delcar isto não seria possível.

Desta forma o dimensionamento de todos os elementos de casca do modelo é efetuado de forma automática. O esforço computacional é bem significativo em todas as suas etapas. Mas o importante é que ainda é viável tecnicamente.

## Conclusões

O projeto de estruturas de centrais nucleares exige análises rigorosas e dimensionamento sofisticado em vista das centenas de ações estáticas e dinâmicas. Foi mostrado que é possível, em projetos de estruturas de concreto armado, modelar a estrutura de forma integral por meio de elementos de casca e de barras e efetuar as análises dinâmicas por meio de integração direta no regime de histórico no tempo. No caso de análises sísmicas é necessário obter terremotos artificiais que atendam às exigências normativas com referência aos espectros de resposta. Este mesmo modelo pode ser utilizado para as solicitações estáticas.

A modelagem das edificações nucleares exige a utilização principalmente de elementos de casca, cujo dimensionamento moderno é feito por meio de regras definidas geralmente em normas europeias.

No caso da análise sísmica é necessário criar terremotos artificiais que conseguem apresentar uma resposta dinâmica compatível com os espectros de resposta normativos. Estes terremotos foram conseguidos por meio do programa Progsis4 de Teles, L.D.V. Souza Lima, S. e de Santos, S.H.C.

Foi mostrado que mesmo com o volume de dados processados é possível obter dimensionamentos viáveis e efetivos desde que procedimentos especiais sejam desenvolvidos especificamente para estes dimensionamentos de elementos. O programa Delcar desenvolvido por Schulz, M. se mostrou indispensável para o dimensionamento dos elementos para as inúmeras combinações de carregamentos.



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS  
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Com este conjunto de sistemas computacionais é viável a análise e o dimensionamento para todos os elementos de um modelo da edificação para todas as combinações estáticas e dinâmicas processadas.

## Referências

- ABNT- NBR 6123- Forças devidas ao vento em edificações, Rio de Janeiro, 1988.
- AFNOR – Norme Européenne NF-EN 1992-2; Calcul des structures em béton, Partie 2: Ponts em béton- Calcul et dispositions constructives, 1992.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. ASCE 4-98 – Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, 1998.
- BAUMANN, T. Tragwirkung orthogonaler Bewehrungsnetze beliebiger Richtung in Flächentragwerken aus Stahlbeton. DAFSB, Heft 217, W. Ernst, Berlin, 1972.
- BECHTEL POWER CORP. Topical Report- BC-TOP-9A-Design of structures for missile impact, San Francisco, 1974.
- CEB – Bulletin d'Information n° 141- CEB/FIP Manual on Bending and Compression, Appendix 2- Plane elements with reinforcement direction deviating from the direction of principal stresses, Paris, 1982.
- COMPUTER AND STRUCTURES – SAP2000- Version 18- User's manual, 2016.
- DEPARTMENT OF DEFENSE- USA UFC-3-340-02-2008 - Unified Facilities Criteria -Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, 2008.
- DIAZ, B.E. O programa Locdex1 para Combinações de Solicitações e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado, II Simpósio sobre Sistemas Computacionais para Engenharia Civil, São Paulo, 1978.
- RICHART, F.E.; HALL, J.R.; WOODS, R.D. Vibrations of Soils and Foundations. Prentice-Hall, 1970.
- SCHULZ, M. – Programa Delcar para dimensionamento de cascas de concreto armado, 2010.
- SCHULZ, M. – Verificação Geral de Peças de Concreto Armado baseada no Modelo da Chapa fissurada. Tese de Doutorado, Coppe-UFRJ, 1988.
- TELES, L.D.V; SANTOS, S.H.C & SOUZA LIMA, S. &– Programa para geração de terremotos artificiais- Progsis4. Escola Politécnica-UFRJ, 2010.
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION- Regulatory Guide 1.60- Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 2014.