

SIMULAÇÃO DA QUEDA LIVRE DE UMA EMBALAGEM DE TRANSPORTE DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS DE REATORES DE PESQUISA¹

Carlos Alexandre de Jesus Miranda²,
Miguel Mattar Neto³,
Gerson Fainer⁴

Resumo

A qualificação estrutural de embalagens para transporte de elementos combustíveis irradiados de reatores nucleares de pesquisa deve ser realizada por meio de vários testes. A embalagem deverá manter sua integridade estrutural, preservando a função de contenção, blindagem e condição subcrítica do material irradiado nela contido. Os órgãos licenciadores recomendam a qualificação por testes, em vez de simulações numéricas, porém, elas são importantes, por exemplo, para se determinar a posição mais crítica para os testes de queda livre. A AIEA é patrocinadora de um projeto envolvendo nações da América do Sul, para desenvolver e qualificar uma embalagem para transporte de elementos combustíveis irradiados de reatores de pesquisa. A primeira fase envolve projeto, construção, testes e simulação numérica de um modelo em escala (1:2) para estabelecer parâmetros, em especial para os testes de queda livre. A embalagem tem dois amortecedores de impacto constituídos de um compósito de madeira encerrado em cascas de aço. Este trabalho destaca a caracterização das propriedades mecânicas e dos modelos dos materiais na simulação numérica da queda livre de 9m de uma embalagem. Discute o propósito de se desenvolver metodologia de cálculo para auxiliar os testes de campo, para se aplicar em futuros projetos de protótipos. Na simulação foram consideradas as características do carregamento de impacto e as não linearidades físicas associadas às propriedades mecânicas dos materiais e as geométricas associadas às deformações das partes da embalagem e aos contatos mecânicos entre elas.

Palavras-chave: Teste de queda livre; Simulação numérica; Contato.

DROP TEST SIMULATION OF A CASK FOR TRANSPORTATION OF SPENT FUEL ELEMENTS OF NUCLEAR RESEARCH REACTORS

Abstract

The qualification of casks for transportation or storage of spent fuel elements involves the evaluation of some conditions that simulate possible accidents. The cask should maintain its safety functions through its structural and functional integrity (in any condition, there should be the containment of the radioactive products inside it, the integrity of its biological shielding and assurance against criticality). The main conditions the cask should satisfy, mainly by test, to be qualified are: a 9m drop test against a rigid surface, a penetration test, 30min of fire under 800 °C and 200m immersion during one hour. The first condition is the most critical one. The regulatory bodies stress the qualification "by test" instead of "by analysis". However, numerical simulations are important to determine, for instance, the most critical position for the free fall tests. There is a multi-country project, sponsored by the IAEA, with the participation of South American countries with research reactors, to develop and qualify a shipping cask for their spent fuel elements. It involves, in its first phase, the project, construction, test and numerical simulation of a 1:2 model to establish parameters for the tests. There are two impact limiters contained by steel shells, which are planned to be filled with a reconstituted wood. This work describes the cask project in details, the main hypothesis and some results obtained with the 9m drop test numerical simulation. Its purpose is to develop a modeling and results evaluation methodology to help the field tests. In the simulations all non-linearities, mostly associated with the contacts among the cask several parts, the mechanical properties of the materials and the geometric changes, were considered.

Key words: Drop test; Numerical simulation; Contact.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² CNEN-IPEN/SP– Centro de Engenharia Nuclear Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 - São Paulo, SP, Brasil, cmiranda@ipen.br

³ CNEN-IPEN/SP– Centro de Engenharia Nuclear Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 - São Paulo, SP, Brasil, mmattar@ipen.br

⁴ CNEN-IPEN/SP– Centro de Engenharia Nuclear Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 - São Paulo, SP, Brasil, gfainer@ipen.br

1 INTRODUÇÃO

O projeto de embalagens para transporte de elementos combustíveis irradiados de reatores nucleares de pesquisa requer qualificação estrutural, que envolve a simulação de acidentes postulados numa seqüência pré-determinada. A embalagem deverá manter suas funções de segurança, preservando sua integridade estrutural e funcional. Isto significa que, a função de contenção de radiação, a integridade da blindagem biológica e a segurança da subcriticalidade dos materiais irradiados, serão preservadas, quando a embalagem for submetida aos testes: 1) queda livre de 9m, 2) teste de penetração, 3) temperatura de 800°C durante 30 minutos e 4) pressão de 200m de imersão em água por uma hora. Os órgãos licenciadores recomendam, em geral, a qualificação por testes, em vez de simulação numérica. Porém, as simulações numéricas são importantes, por exemplo, para se determinar a posição mais crítica para os testes de queda livre, além de propiciar economia de recursos financeiros, reduzindo os custos de testes de vários protótipos, sem perda do grau de segurança requerido para o projeto.

Este trabalho é parte de um projeto, patrocinado pela AIEA, entre nações da América do Sul com reatores de pesquisa, para desenvolver o projeto e a qualificação de uma embalagem para transporte de elementos combustíveis irradiados, que poderá ser adaptado também para o armazenamento. A primeira fase envolve projeto, construção, testes e simulação numérica de um modelo em escala (1:2) para estabelecer parâmetros, em especial para os testes de queda livre. Na segunda fase, com os modelos de simulação numérica calibrados com os dados experimentais, o protótipo será analisado numericamente.

Além da descrição do projeto da embalagem, este trabalho vai discutir algumas hipóteses de cálculo adotadas, o modelo estrutural e os resultados obtidos para a simulação do teste de queda livre de 9m durante 20ms após o primeiro impacto enfatizando a caracterização das propriedades mecânicas e dos modelos dos materiais empregados na simulação numérica da queda livre. Na simulação foram consideradas as características do carregamento de impacto e as não linearidades físicas associadas às propriedades mecânicas dos materiais e as geométricas associadas às deformações das partes da embalagem e aos contatos mecânicos entre elas. Como referência, uma aceleração de aproximadamente 250 g's foi estabelecida para o desenvolvimento do projeto dos amortecedores de impacto da embalagem. Considerando um modelo em escala 1:2, as acelerações obtidas na simulação numérica no interior do modelo da embalagem têm boa concordância os valores esperados para o protótipo.

2 BASES PARA LICENCIAMENTO DE EMBALAGEM

O relatório de análise de segurança para embalagens,^[1] é um documento preparado de acordo com padrões dos órgãos licenciadores (por exemplo, o da USNRC *Regulatory Guide 7.9*, rev.1^[2]). O relatório deve conter informações gerais sobre o projeto da embalagem, tais como: descrição geral, desenhos das partes da embalagem, lista de materiais com as propriedades mecânicas, descrição da barreira de contenção e blindagem biológica, condições de operação normal e de acidente, dispositivos de manuseio, programa de garantia da qualidade, procedimentos de transporte e programa de manutenção.

O documento deve conter, também, os cálculos estruturais, térmicos e de neutrônica, que demonstrem que as funções de segurança e a integridade da embalagem são preservadas em condições de operação normal e de acidente. Outros aspectos, tais como: testes de carga, testes de vazamento, inspeções visuais, verificação da integridade do casco e da blindagem biológica e critérios de aceitação, deverão ser descritos no relatório.

3 TESTES POSTULADOS

Uma embalagem para ser qualificada deve atender às seguintes condições de testes prescritas: 1) queda livre de 9m sobre uma superfície rígida (mais crítica, do ponto de vista estrutural), 2) teste de penetração – queda livre de 1m sobre um punção, 3) teste térmico – temperatura de 800 °C durante 30min e 4) imersão a 200m durante uma hora.

Veja na Figura 1 abaixo, a representação esquemática dos testes:

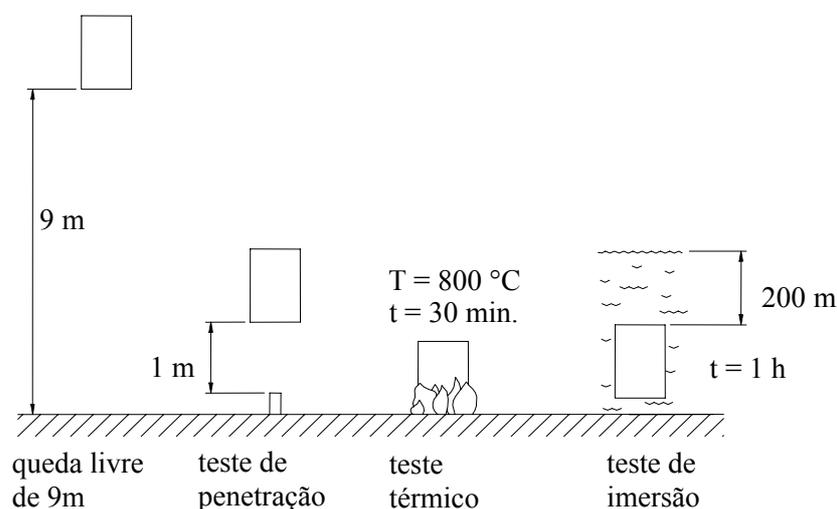


Figura 1. Testes postulados para a qualificação da embalagem

Este trabalho vai tratar somente da análise estrutural da embalagem, considerando a queda livre de 9m. Os aspectos térmicos, de blindagem de radiação e cálculos de criticidade não serão discutidos aqui.

4 DESCRIÇÃO DA EMBALAGEM – MODELO E PROTÓTIPO

A embalagem foi projetada para acomodar elementos combustíveis irradiados de reatores de pesquisa do tipo MTR (21 elementos) ou do tipo TRIGA (78 elementos). Ele deverá ter uma massa de no máximo de 10 ton, sendo classificada como embalagem físsil do Tipo B.

A embalagem (algumas vezes chamada de 'protótipo') assim como o seu modelo em escala 1:2 é um cilindro de aço inoxidável com tampos planos, o inferior soldado e o superior fixado com conexões rosqueadas, e estruturas internas para apoiar os elementos combustíveis. Existe uma blindagem de chumbo, limitada por dois cilindros: interno e externo. Os elementos combustíveis irradiados serão alojados em

um cesto interno que deverá resistir a uma aceleração máxima de aproximadamente 125 g's. Deste modo, devido à relação de escala entre modelo e protótipo, a aceleração máxima esperada é aproximadamente 250 g's. Como nesse trabalho trata-se apenas da avaliação do modelo em escala 1:2 fica estabelecido, a partir de agora, que 'embalagem' significa esse modelo em escala 1:2. Para reduzir o nível de aceleração nas partes internas da embalagem devido ao impacto sobre uma superfície rígida, existem dois absorvedores de impacto, um no topo da embalagem e outro na base dela. Eles são preenchidos com compósito de madeira (OSB – *Oriented Strand Board*), ambos envoltos por chapas de aço. Existem quatro barras de aço de seção circular que conectam os amortecedores de impacto e mantêm o conjunto todo unido. As conexões rosqueadas ainda não fazem parte do modelo nessa etapa do desenvolvimento das simulações numéricas.

5 GEOMETRIA DA EMBALAGEM

O modelo da embalagem, que será testado e analisado numericamente, tem a escala 1:2 (isto é, as dimensões do modelo têm a metade das dimensões do protótipo). Essas dimensões principais são mostradas esquematicamente na Figura 2, ao lado do modelo $\frac{1}{4}$ de elementos finitos (modelo 90°). Cada cor significa um material e/ou orientação diferente (O mesmo material tem comportamento diferente em partes estruturais diversas). A região central foi simulada como material idealizado com propriedades fictícias para representar o material dentro do cesto. Este modelo representa bem a simulação de queda livre da embalagem na posição vertical. Para a simulação de queda livre da embalagem em posições inclinadas, um modelo $\frac{1}{2}$ de elementos finitos (180°) deverá ser utilizado, o qual poderá ser gerado a partir deste modelo $\frac{1}{4}$ apresentado.

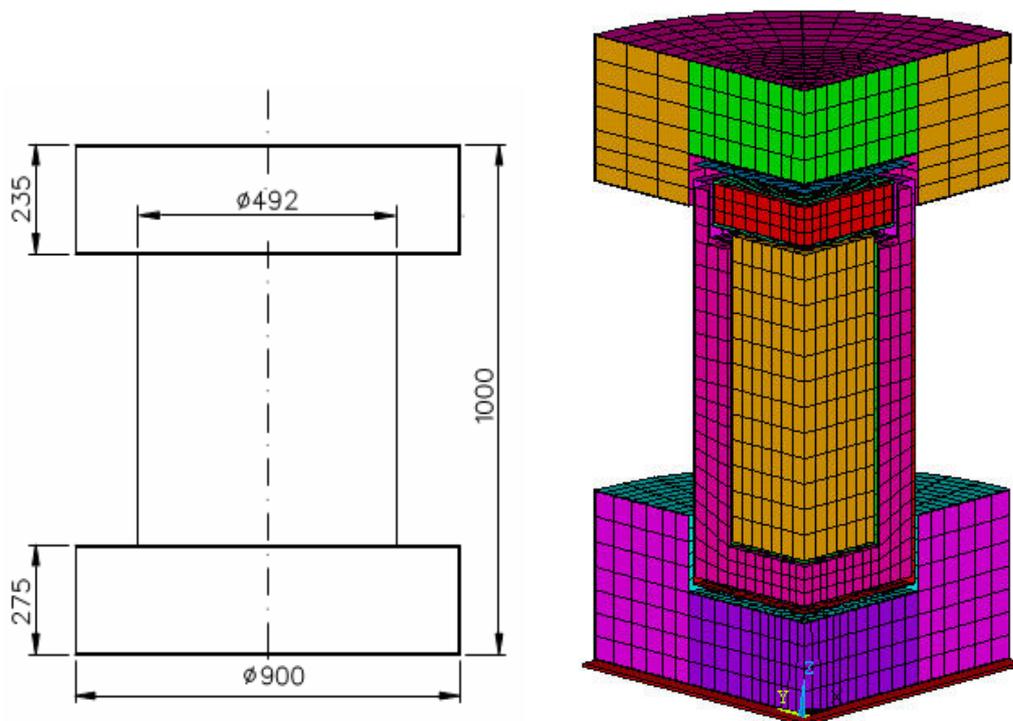


Figura 2. Dimensões principais do modelo em escala 1:2 e modelo $\frac{1}{4}$ de elementos finitos.

6 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DA EMBALAGEM

Cuidados especiais devem ser tomados na definição das propriedades mecânicas e nos modelos dos materiais que serão utilizados nas simulações numéricas da queda livre de 9m. Devem ser empregados valores e modelos adequados para se obter respostas estruturais nas simulações numéricas aderentes aos resultados obtidos nos testes.

É importante ressaltar que devem ser inicialmente estabelecidas propriedades mecânicas e as curvas tensão-deformação dos diversos materiais da embalagem de modo a conduzir o projeto mecânico e estrutural da mesma e dos seus amortecedores de impacto. Em seguida, essas características dos materiais são utilizadas nas simulações numéricas pré-teste e devem confirmar a adequação do projeto (dos amortecedores de impacto e do nível de aceleração nos elementos combustíveis, principalmente) e as posições de queda livre mais críticas. Finalmente, após os testes, é feita uma avaliação das características dos materiais utilizadas nas simulações numéricas por meio da comparação das respostas estruturais obtidas com os resultados dos testes. Dessa avaliação, as características dos materiais são confirmadas ou calibradas para emprego em outras simulações necessárias para a qualificação do modelo ou do protótipo.

Para a obtenção das características dos materiais (suas propriedades mecânicas e seu comportamento em curvas carga x deslocamento ou tensão x deformação) são conduzidos ensaios em corpos de prova seguindo normas de teste aplicáveis. Os resultados obtidos são avaliados frente a características dos carregamentos de impacto (grandes acelerações e curta duração) e a valores obtidos na literatura e são, então, estabelecidas as características mecânicas dos materiais que serão inicialmente empregadas nas simulações numéricas.

Outro ponto importante é a escolha dos modelos de materiais entre os existentes no programa de computador disponível para as análises (no caso, o ANSYS-LSDYNA). Os modelos de materiais são escolhidos procurando, entre os mais simples, aqueles que consigam reproduzir a queda livre da embalagem visando facilidade de avaliação dos resultados e redução dos custos computacionais pois as simulações numéricas apresentam algum grau de complexidade (com não linearidade físicas e geométricas e com impacto).

Considerando o que foi acima exposto, as propriedades mecânicas dos materiais das partes da embalagem utilizadas inicialmente são mostradas na Tabela 1, onde alguns valores foram obtidos de testes de corpos de prova e outros são médias extraídas de várias referências. Como primeira aproximação, todos os materiais, com exceção do OSB e da superfície rígida, foram modelados como materiais elasto-plásticos bilineares (*Bilinear Isotropic Material*, BISO no ANSYS-LSDYNA). Para a superfície rígida foi utilizado o modelo RIGID do ANSYS-LSDYNA considerando mesmas propriedades mecânicas do aço.

Tabela 1. Propriedades principais adotadas para os materiais.

	Material / Componente					unidades
	Aço	Chumbo	Fictício	Barra	Superfície rígida	
Módulo de elasticidade	200 e9	14 e9	2 e9	200 e9	200 e9	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.30	0.42	0.0	0.30	0.30	---
Densidade	7500	11500	600	7500	7500	Kg/m ³
Tensão de escoamento	310 e6	14 e6	0.0	310 e6	-----	N/m ²
Módulo tangente	7.6 e8	1.0 e7	0.0	7.6 e8	-----	N/m ²

O material OSB dos absorvedores de impacto é um compósito laminado. Ele foi testado em duas direções diferentes, perpendicular ao sentido de laminação e paralelo ao sentido de laminação. Os resultados, em termos de curvas de tensão x deformação, são mostrados na Figura 3. Na Figura 3.b é mostrado (em vermelho) a aproximação feita para estabelecer a espessura mínima dos amortecedores de impacto, mostradas na sessão 7.

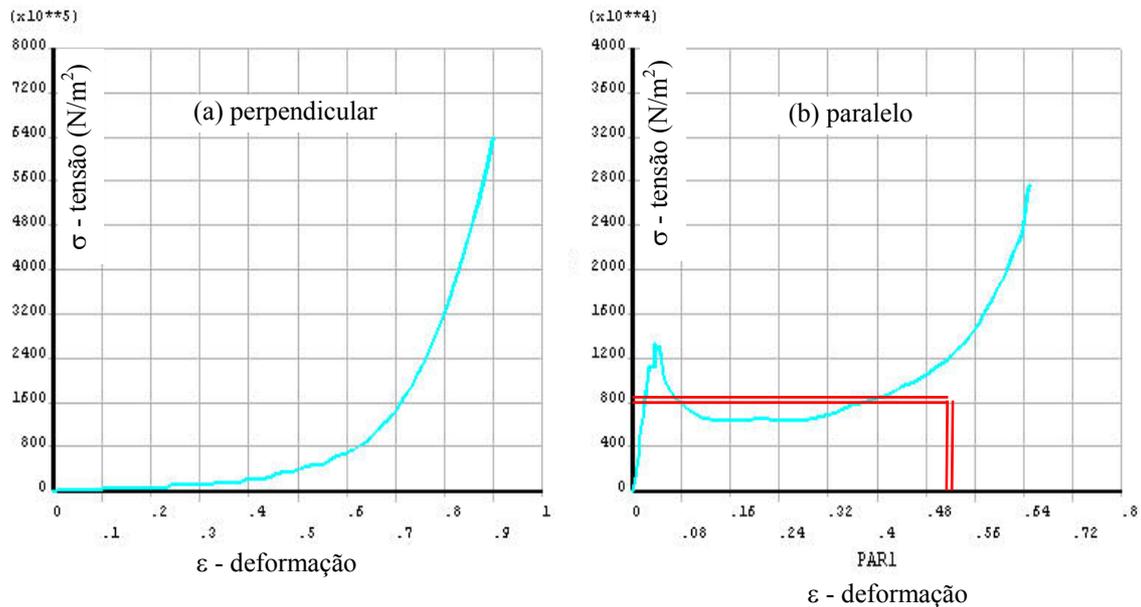


Figura 3. Material OSB – curvas tensão x deformação.

7 PROJETO DOS AMORTECEDORES DA EMBALAGEM

Com base nas propriedades mecânicas do material do amortecedor de impacto é mostrada, a seguir, uma estimativa da espessura mínima do amortecedor de impacto do modelo em escala 1:2 considerando a queda livre de 9 m. De acordo com a Figura 2, o diâmetro do cilindro externo é $D = 492$ mm. Da Figura 3.b o patamar de tensão é considerado como um valor aproximadamente constante, $\sigma_{plat} = 8$ MPa até o nível de deformação $\varepsilon_{plat} = 0.5$ (50%). A massa do modelo é considerada como $M = 1250$ kg (1/8 da massa do protótipo).

Com os valores acima definidos, e de acordo com Henry et al.,^[4] a aceleração média estimada no modelo (acc) é dada pela equação (1):

$$acc = \frac{\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right) \sigma_{pla}}{M} \approx 1216 \text{ m/s}^2 (\approx 124 \text{ g}) \quad (1)$$

A espessura mínima do amortecedor de impacto (t_{imp}) é dada pela equação 2 [4]:

$$t_{impab} = \frac{\frac{1}{2}(M \cdot V^2)}{\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right) (\sigma_{plat} \cdot \varepsilon_{plat})} \approx 145 \text{ mm} \quad (2)$$

Na equação (2) acima, $V = \sqrt{(2 \cdot g \cdot h)} = 13.3$ m/s é a velocidade no momento que a embalagem atinge a superfície rígida após a queda livre de $h = 9$ m. Os amortecedores de impacto da embalagem têm uma espessura mínima de aproximadamente 160 mm que é um valor suficiente para se obter a aceleração desejada.

8 MODELO ESTRUTURAL, HIPÓTESES E CARREGAMENTOS

A simulação da queda livre de 9m foi realizada com o programa ANSYS LS-DYNA que emprega um método de integração explícito e vários tipos de contato mecânico. Todos os contatos foram definidos entre dois COMPONENTS. Por exemplo, três deles são: a superfície rígida, a casca que envolve o amortecedor inferior e o próprio amortecedor. Portanto, para estes componentes os contatos definidos são (1) entre a superfície rígida e a casca, e (2) entre a casca e o amortecedor inferior. Todos os contatos são definidos como ASTS – *Automatic Surface-To-Surface Contact*. Não foram definidas folgas iniciais. Os elementos de casca foram definidos pela sua superfície média, e o programa leva em consideração a espessura para definir os contatos, de modo que as folgas mostradas na Figura 2, são apenas fictícias.

Para simular o amortecedor (OSB), um modelo de material HONEYCOMB foi selecionado por permitir modelar material ortotrópico.

O modelo foi posicionado a alguns milímetros acima da superfície rígida, com o objetivo de se realizar uma simulação computacional mais rápida. Isto significa que a velocidade inicial é dada pela aceleração da gravidade atuando durante os 9m de queda livre. Portanto, as cargas definidas são: a velocidade inicial (aproximadamente 13.3 m/s) e a aceleração da gravidade (9.81 m/s^2) atuando durante toda a análise (cerca de 20 ms).

Para a simulação da queda livre de 9m da embalagem na posição vertical, foi definida dupla simetria nos planos $X=0$ e $Y=0$ (modelo de 90°) enquanto que na queda livre de 9 m da embalagem em posições inclinadas, simetria em $X=0$ é empregada (modelo de 180°). Este modelo (180°) poderia ser utilizado também, na simulação da queda livre de 9m da embalagem na posição vertical, embora, o modelo de dupla simetria seja suficiente para captar o comportamento da estrutura, neste caso.

9 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na simulação da queda livre de 9m da embalagem na posição vertical, para o deslocamento e aceleração verticais do ponto localizado no centro da massa de material fictício, que representa o material transportado e os cestos, são mostrados na Figura 4, para os 10ms primeiros da simulação.

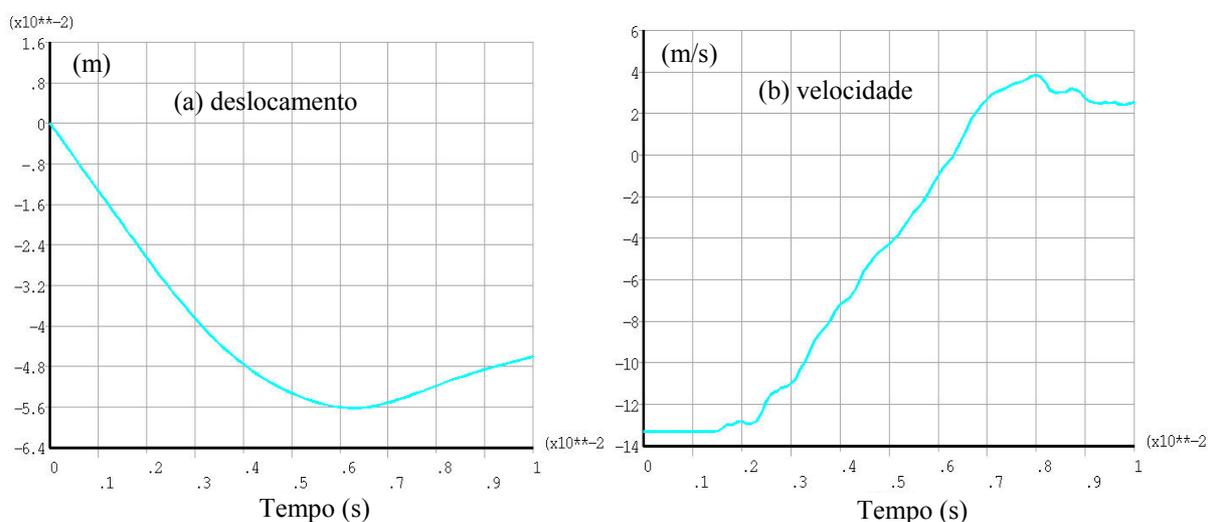


Figura 4. Resultados: Deslocamento e velocidade no ponto central da massa de material fictício

Pode-se observar que as curvas de resposta no tempo de deslocamento e velocidade, não apresentam grandes oscilações. No entanto, a curva de resposta no tempo da aceleração apresenta fortes oscilações, conforme mostrada na Figura 5(a). Este ruído/oscilação não fornece informação relevante para a simulação e um filtro deve ser aplicado aos resultados, como o filtro tipo Butterworth^[5] que necessita da análise prévia das frequências naturais do modelo. Após a aplicação deste filtro, espera-se um resultado como indicado na Figura 5(b), isto é, uma aceleração máxima da ordem de 350 g's.

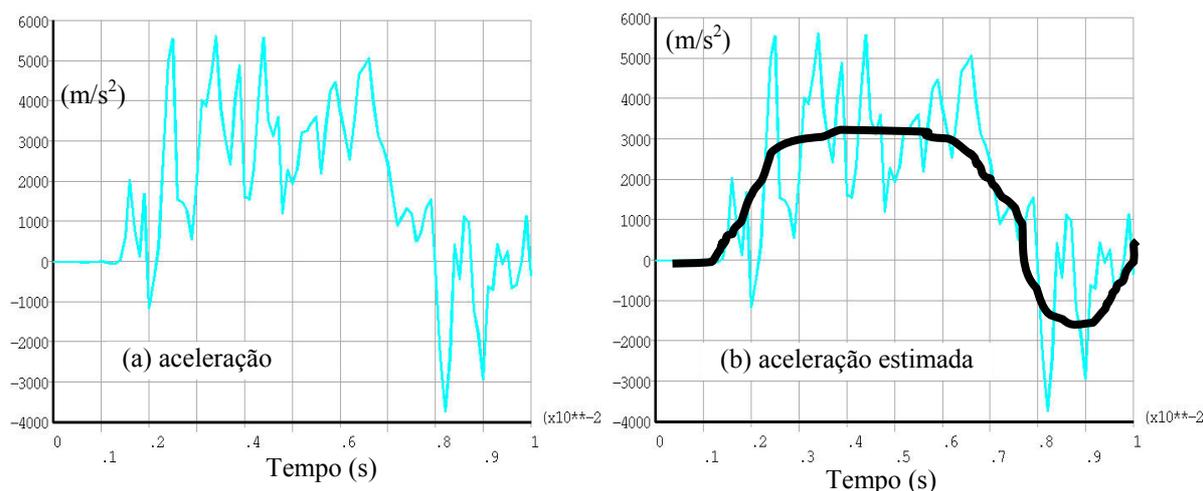


Figura 5. Aceleração no ponto central da massa de material fictício.

10 CONCLUSÕES

Este trabalho é a primeira abordagem para o desenvolvimento de um modelo numérico da embalagem de transporte de elementos combustíveis irradiados de reatores nucleares de pesquisa da América do Sul. Ele foi realizado com dados preliminares de materiais.

Foram apresentados o modelo e os resultados obtidos com a simulação da queda livre de 9m da embalagem na posição vertical para discussão. Outras análises estão planejadas considerando a queda livre de 9m com a embalagem inclinada, utilizando um modelo de elementos finitos de 180°.

Os resultados preliminares indicam uma aceleração de aproximadamente 350 g's no modelo em escala, o que significa cerca de 175 g's no protótipo. Mesmo com este valor acima do valor esperado, como mencionado antes (cerca de 125 g's) os autores consideram que os modelos de materiais utilizados estão bastante adequados aos propósitos das simulações numéricas do teste de queda livre de 9m. Será possível obter uma concordância em termos de nível de aceleração por meio de uma calibração e refinamento onde serão modificados alguns parâmetros, tais como: a malha de elementos finitos e valores das propriedades mecânicas de materiais. Com o modelo de elementos finitos calibrado com os dados experimentais, a qualificação estrutural do protótipo (queda livre de 9m e queda livre de 1m sobre um punção) poderá ser desenvolvida numericamente, baseada nos resultados obtidos em simulações e nas correspondentes análises de tensões das partes críticas e componentes, para consolidar o projeto do protótipo ou modificá-lo, caso necessário.

REFERÊNCIAS

- 1 The Safety Analysis Report for the Packaging – SARP.
- 2 USNRC Regulatory Guide 7.9, rev.1.
- 3 L. L. Silva, R. P. Mourão, C. C. Lopes, Dimensionamento estrutural de protótipo de casco de duplo propósito (Structural dimensioning of a dual purpose prototype cask), *2005 International Nuclear Atlantic Conference – INAC*, Santos, Brazil, 2005. ISBN: 85-99141-01-5.
- 4 F. P. Henry, R. A. Johnson, P. Smith, T. Hile, A comparison of requirements and test methodologies for a variety of impact absorbing materials, *PATRAN International Symposium*, Chicago, IL, USA, 2001.
- 5 Mike Yaksh, Andy Langston, Ls-DYNA helps ensure public safety with analysis of spent fuel transport cask. (in: <http://www.aetechnology.com/ls-dyna-transport-cask.htm>, 06/06/2005)