



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

ANÁLISES TÉRMICA TRANSIENTE E DE QUEDA LIVRE DE 9M DE UM MODELO EM ESCALA 1:2 DE UMA EMBALAGEM PARA TRANSPORTE E ARMAZENAGEM DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES QUEIMADOS

Carlos A. J. Miranda, cmiranda@ipen.br¹
Miguel Mattar Neto, mmattar@ipen.br¹
Gerson Fainer, gfainer@ipen.br¹

¹Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, Cid. Universitária, USP – Butantã, São Paulo, SP/Brasil

Resumo: São apresentadas as simulações numéricas de duas das condições acidentais postuladas mais severas e mandatórias que devem ser realizados em uma embalagem de duplo propósito (transporte e armazenagem) de elementos combustíveis queimados de reatores nucleares de pesquisa: 30min sob fogo/calor de 800 °C, e queda livre de 9m sobre uma superfície rígida. Os testes foram realizados usando um modelo, escala 1:2, como permitido por norma, e estão descritos em trabalhos publicados recentemente, assim como os requisitos básicos que a embalagem (casco) deve atender, associados com a sua integridade estrutural e funcional. Simulações numéricas são utilizadas para determinar as posições mais críticas no teste de queda livre e prever a máxima temperatura no interior da embalagem na condição de fogo. O modelo analisado e o testado tem um cilindro de parede dupla com chumbo, blindagem biológica das radiações, e estruturas internas para acomodar os elementos combustíveis, além de tampas de fechamento aparafusadas (uma delas com chumbo). Há, também, dois absorvedores de choque, conectados por barras cilíndricas, preenchidos com compósito de madeira para reduzir a desaceleração durante a queda. A análise térmica é realizada sem os amortecedores, como foi o teste, o que é permitido por norma por ser considerado conservador. Há fortes não-linearidades envolvidas, vários contatos e interfaces, propriedades que variam com a temperatura e mudança de fase do chumbo (utilizando o método da entalpia) durante a simulação térmica. A análise de queda cobre cerca de ~20ms e a análise térmica cobre os 30min no forno a 800 °C e mais 2h do período de resfriamento. Como os resultados das análises térmica e de queda comparam bem com os experimentais conclui-se que a modelagem desenvolvida, as hipóteses e a avaliação dos resultados podem ser aplicados para prever o comportamento e resultados da futura campanha de testes com o protótipo (escala 1:1).

Palavras-chave: Embalagem, Análise Térmica, Não-Linearidade, Impacto, Método dos Elementos Finitos.

1. INTRODUÇÃO

Para a qualificação de embalagens para o armazenamento e/ou transporte de elementos combustíveis irradiados é necessário atender a uma série de requisitos severos que implicam alta complexidade das análises e das soluções. Um destes requisitos, dentre outros, é de queda livre da embalagem sobre uma superfície rígida: de 1m para o caso de embalagens de armazenamento e de 9m para o caso de transporte. A embalagem, cujo projeto pode prever o uso de amortecedores de impacto, não pode sofrer dano que implique vazamento do seu conteúdo que, também, deve ser mantido em uma geometria tal que garanta a sua não-criticalidade, IAEA (2005) e CNEN (1988), na condição pós-acidente. No presente caso se prevê o desenvolvimento de uma embalagem de duplo-propósito: transporte e armazenamento, portanto o requisito mais severo (9m) deve ser atendido. Outro requisito a ser atendido, que também faz parte das condições acidentais postuladas que a embalagem deve suportar mantendo a sua integridade física e funcional, é resistir a 30min sob fogo/calor de 800 °C.

A qualificação de uma embalagem é feita, sempre, de forma experimental e os testes preconizados devem ser realizados em seqüência, sempre com a mesma embalagem que, ao final dos testes, é controlada para verificar se atendeu aos requisitos (estanqueidade, criticalidade, etc.), ASME 2007, IAEA (2005), CNEN (1988). As análises numéricas visam dar informações que orientem os testes (custosos) de modo a reduzi-los ao mínimo indispensável.

É permitida a inclusão de absorvedores de choque, que são componentes 'de sacrifício', externos à embalagem propriamente dita, utilizados para reduzir a desaceleração durante a queda. Por conservadorismo, durante o teste térmico, após a queda de 9m, decidiu-se retirar tais componentes.

Os resultados dos testes já realizados, usando um modelo em escala 1:2, como permitido por norma, bem como resultados parciais das simulações já foram descritos em trabalhos anteriores publicados recentemente. Neste caso, em

particular, as simulações numéricas são utilizadas, em geral, para determinar as posições mais críticas no teste de queda livre e prever a máxima temperatura no interior da embalagem na condição de fogo. Neste trabalho descrevem-se, brevemente, o projeto do modelo ensaiado, em escala 1:2, alguns dos requisitos básicos que a embalagem deve atender, em particular, aqueles associados com a sua integridade estrutural e funcional. E, também, o modelo desenvolvido para simular a queda e o teste a 800 °C, suas principais hipóteses, propriedades adotadas, não linearidades, etc. Na análise térmica e nas análises de queda foi utilizado o programa ANSYS LS-DYNA (2007). O módulo/programa LS-DYNA foi incorporado ao ANSYS que atua como um pré- e um pós-processador do LS-DYNA que utiliza o método explícito de integração das equações de equilíbrio, que é mais adequado para o tipo de fenômeno que se deseja simular (impacto).

A análise de queda cobre cerca de ~20ms pós impacto e a análise térmica cobre os 30min no forno a 800 °C e mais 2h do período de resfriamento. Foram investigadas/analísadas, várias posições de queda: desde a embalagem na sua posição normal ('vertical') e em várias inclinações até a posição em que a mesma está na 'horizontal'. Os resultados são apresentados em termos de curvas de desaceleração na embalagem, deformadas pós-queda, e curvas de variação da temperatura em determinados pontos no interior. Como os resultados das análises térmicas e de queda comparam bem com os experimentais, a modelagem desenvolvida, as suas hipóteses, bem como a metodologia de avaliação dos resultados podem ser aplicados para prever o comportamento e resultados da futura campanha de testes com o protótipo (escala 1:1) otimizando a futura campanha de testes.

2. PRINCIPAIS REQUISITOS DE UMA EMBALAGEM DE TRANSPORTE

Os requisitos impostos a que uma embalagem de transporte de elementos combustíveis irradiados deve atender visam a proteção das pessoas, propriedades e meio-ambiente, aos efeitos da radiação. Isto é obtido pela contenção do material radioativo em quaisquer circunstâncias, pelo controle da radioatividade no exterior e prevenindo a criticidade do seu conteúdo bem como eventuais danos causados por fogo/calor excessivo.

A embalagem sob análise, devido ao seu conteúdo, é classificada como Tipo B, IAEA (2005), e deve atender a requisitos severos seja em condições normais de operação e transporte como no caso de acidente durante o transporte quando a mesma deve resistir, entre outros:

- . um incêndio que produza uma temperatura de 800 °C durante 30 min.,
- . uma queda de 9m de altura sobre uma superfície rígida (para induzir o máximo dano),
- . uma punção produzida pela queda da embalagem de 1m de altura perpendicularmente uma barra.

Há toda uma caracterização da superfície rígida e da barra que não serão abordadas neste trabalho.

2.1. Análise de Queda

Análise de queda de 9m. A embalagem tem diversas partes estruturais, conectadas entre si por solda, flanges com parafusos e/ou simples contato entre superfícies que, no seu conjunto, visam conter os produtos e formar uma barreira à radiação. Isto em condições normais e nas condições acidentais postuladas já descritas brevemente.

Dada a natureza do carregamento (impacto após queda livre de 9m) as simulações numéricas utilizam modelos de elementos finitos com a solução do sistema de equações resultante pelo método explícito e, também, devem ser considerados as fortes não linearidades, que são de três tipos: aquelas devidas ao comportamento do material, as de natureza geométrica (flambagem) e aquelas devidas aos contatos entre as partes da embalagem e entre a embalagem e a superfície rígida postulada. No caso dos contatos devem ser incluídos os efeitos de atrito.

2.2. Análise Térmica

As superfícies em contatos representam resistências à condução do calor entre as diversas partes além dos gaps existentes entre tais superfícies que induzem troca de calor por irradiação térmica. Isto no interior da embalagem. Externamente, o forno onde o ensaio térmico foi realizado é do tipo indutivo e, assim, o aquecimento a 800 °C por 30 minutos foi por irradiação. Este fenômeno é altamente não-linear e impede, por exemplo, o uso de simetrias no modelo numérico. Outra não-linearidade está associada à eventual mudança de fase do chumbo quando foi adotado o método da entalpia, disponível no ANSYS.

Mesmo assim, na análise térmica foram adotadas algumas simplificações como: modelar apenas ¼ da embalagem, definir a troca de calor por irradiação e por convecção só entre algumas superfícies internas e simular o aquecimento por meio de um coeficiente de troca de calor por convecção aplicado às paredes externas, considerando a temperatura 'bulk' de 800 °C. Na fase de resfriamento foi definido, também, um coeficiente de troca de calor por convecção apropriado aplicado às paredes externas e considerando a temperatura de 'bulk' de 20 °C.

A adoção destas hipóteses de modelagem e análise visa avaliar a sensibilidade dos resultados (temperatura máxima e distribuição de temperatura num ponto, ao longo do tempo), aos parâmetros da análise.

Assim no caso da análise térmica os resultados obtidos não são diretamente comparáveis com os resultados do ensaio térmico realizado.

3. DESCRIÇÃO DO MODELO 1:2 DA EMBALAGEM

O modelo em escala 1:2 da embalagem, ou 'casco' de transporte e armazenagem, apresentado esquematicamente na

Fig. (1), é composto de diversas partes como: a) um cilindro de parede dupla preenchido com chumbo, com dois flanges, um interno e o outro externo, na parte superior; b) uma tampa ‘primária’ interna de fechamento com parede dupla e preenchida com chumbo, aparafusada no flange interno e com um O-ring de vedação; c) uma tampa ‘secundária’ externa também aparafusada no flange externo; d) estruturas internas para acomodar os elementos combustíveis. O chumbo serve, primordialmente, como barreira biológica, retendo a radiação interna, mas também serve como barreira térmica, já que ajuda a retardar a chegada do calor ao interior do casco no evento de fogo/incêndio.

Há uma estrutura interna, ‘cesto’, pousada no cilindro interno sobre três apoios, formada por chapas encaixadas e soldadas formando 21 células, um para cada elemento combustível a ser armazenado e/ou transportado. Este componente pode ser visualizado na Fig. (2).

Há, também, os amortecedores de choque, um na parte superior e outro na parte inferior, onde a embalagem se encaixa, feitos com placas coladas de um compósito de madeira (OSB – *Oriented Strand Board*), revestidos por uma chapa de aço soldado e conectados entre si por quatro barras cilíndricas que não aparecem na Fig. (1) mas estão visíveis na Fig. (4). As vantagens e desvantagens deste material como amortecedor, comparadas com outros materiais já foram discutida em outro trabalho, Miranda et al (2006b). A Fig. (3) mostra o amortecedor inferior parcialmente montado, onde se vê o ‘enchimento’ de OSB e parte do revestimento de aço com 1mm de espessura.

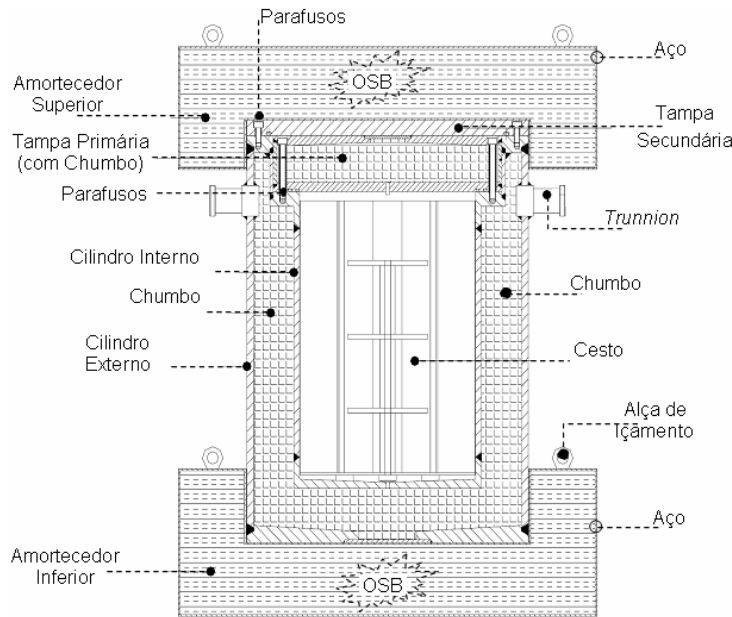


Figura 1. Esquema do modelo em escala 1:2 da embalagem sob análise.

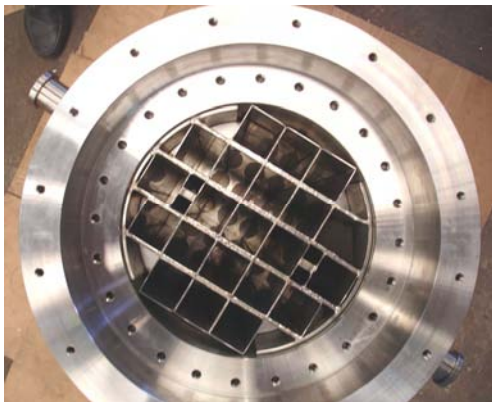


Figura 2. Vista do cesto no cilindro interno



Figura 3. Montagem parcial do amortecedor inferior.

O projeto básico destes amortecedores, espessura mínima e (des)aceleração média estimada, baseado no balanço de energia cinética e potencial, pode ser visto em Miranda, et al (2006a) quando também se faz uma discussão sobre como considera a curva tensão-deformação do material OSB. O cilindro externo tem cerca de 50cm de diâmetro e 60cm de altura. Com os amortecedores montados a embalagem tem cerca de 90cm de diâmetro e 1,0m de altura total. Particularidades como alojamento do anel de vedação, sensores de vazamento, *trunnions* e olhais para içamento não são detalhados/descritos e nem foram modelados (em ambas as análises).

4. DESCRIÇÃO DOS MODELOS DAS ANÁLISES

4.1. Análise de Queda

Na análise de queda livre de 9m sobre uma superfície rígida havia interesse, num primeiro momento, de se conhecer o comportamento global da embalagem verificando a capacidade real dos amortecedores limitarem o nível de desaceleração durante o evento do impacto. Assim as estruturas internas que compõem o cesto foram discretizadas de forma bastante simplificada por uma massa com propriedades fictícias. O modelo, que pode ser visualizado na Fig. (4), foi desenvolvido com elementos sólidos e elementos de casca (na superfície média da mesma). Neste último caso, para controle de eventual contato, o programa considera metade da espessura da casca para cada lado da superfície discretizada. Os contatos são definidos entre todas as superfícies que podem ter deslocamento relativo.

Os contatos em geral foram definidos com sendo do tipo ASTS (*Automatic Surface-to-Surface Contact*). O contato tipo TIED foi definido: (a) entre as partes que compõem os amortecedores de impacto (já que as placas de OSB são coladas entre si); (b) entre as superfícies das extremidades das barras e as respectivas superfícies superior e inferior dos amortecedores. Idem para as superfícies que formam as conexões entre placas aparafusadas e respectivo flange (sendo que os parafusos, os furos de alojamento e passagem dos mesmos, bem como os rebaixos para o alojamento das porcas não foram discretizados). Este contato simula a continuidade de deslocamentos entre as superfícies.

4.2. Análise Térmica

O modelo para a análise térmica, simulando o teste de aquecimento a 800 °C e posterior resfriamento, que pode ser visualizado na Fig. (5), é diferente do modelo de análise de queda por que se deseja conhecer a distribuição de temperaturas no interior da embalagem, além da temperatura máxima e como as temperaturas evoluem com o tempo em um dado ponto do interior. Por esta razão, as estruturas internas foram discretizadas: o cesto e os elementos combustíveis 'dummy' utilizados no teste. Uma das alterações feitas foi a discretização de todas as partes com elementos sólidos, SOLID90 da biblioteca do ANSYS, e o uso de apenas ¼ da geometria pelas razões já mencionadas.

Além do que já foi mencionado, o cesto também tem placas enrijecedoras nas laterais e duas placas circulares, em posições opostas, envolvendo-o por cerca de 150° de cada lado. Há, também, uma placa circular inferior, onde os elementos combustíveis se apóiam, e esta, por sua vez, se apóia através de três calços, no cilindro inferior.

Como foi discretizado ¼ do modelo, a simulação considera a existência de quatro destes calços. Isto é conservador para se obter as temperaturas nos pontos internos porque representa mais uma 'via direta' de transferência de calor (condução) do cilindro para o cesto (além dos efeitos de convecção e de irradiação térmica).

Os elementos combustíveis 'dummy' utilizados nos ensaios, tanto de queda quanto térmico, têm geometria semelhante aos reais e são formados por placas de alumínio paralelas e foram discretizados como uma massa contínua com propriedades equivalentes. O material tem uma densidade equivalente. No plano das placas, as propriedades são aquelas do alumínio enquanto que na direção perpendicular às placas são definidas propriedades térmicas equivalentes – em particular, a condutividade térmica.

Os detalhes da discretização do cesto podem ser vistos na Fig. (6), onde as massas equivalentes que representam os elementos combustíveis 'dummy' foram retiradas para melhor visualização.

Contatos Térmicos. Superfícies em contato oferecem uma resistência à transferência de calor bem maior do que a resistência do material contínuo. A queda de temperatura na interface é a chamada Resistência Térmica de Contato que depende de diversos fatores tais como a pressão de contato (pré-tensão) agindo entre elas e a rugosidade. Quanto maior a pressão menor a resistência ao fluxo de calor e quanto maior a rugosidade das superfícies maior a resistência (Fletcher, 1988).

Também conservadora é a hipótese/consideração de gap nulo entre os elementos 'dummy' e as superfícies do cesto, como visualizado na Fig. (5), portanto supostas em contato. Outros pares de superfícies com alguma folga nominal entre si não tiveram nenhum contato térmico definido mas, apenas, radiação e/ou convecção entre si.

Apesar de terem sido definidos elementos apropriados para simular os contatos térmicos (TARGE170 e CONTA174) as propriedades destes elementos foram definidas de tal forma e valor que se considera continuidade total entre as superfícies (opção 'always bonded'). Isto é válido em um primeiro momento, já que se trata de uma hipótese conservadora por aumentar o fluxo de calor entre as superfícies, aquecendo mais rápido o interior da embalagem.

Irradiação térmica é o processo de transferência de calor quando não há um meio material para transportar a energia de uma superfície à outra. A energia flui no vácuo por meio de ondas eletromagnéticas principalmente no espectro infravermelho. Todo corpo com temperatura acima do zero absoluto (0 °K ou ~-273 °C) emite energia em forma de ondas eletromagnéticas. Dois corpos próximos (supondo superfícies paralelas) trocam energia por irradiação. O fluxo de energia é tão grande quanto maior for a diferença de temperatura entre os corpos irradiantes. Um resumo da teoria e a formulação adotada pelo programa podem ser vistos em no manual teórico do ANSYS (2007). Dentre os métodos disponíveis para considerar este processo de transferência de calor foi adotado o 'Radiation Matrix Method'. Apenas em dois pares de superfícies internas foi definida a irradiação (próximas uma da outra mas não em contato): (a) entre o fundo do cilindro interna e a base circular do cesto e (b) entre a parede do cilindro interno e a superfície externa da placa circular do cesto.

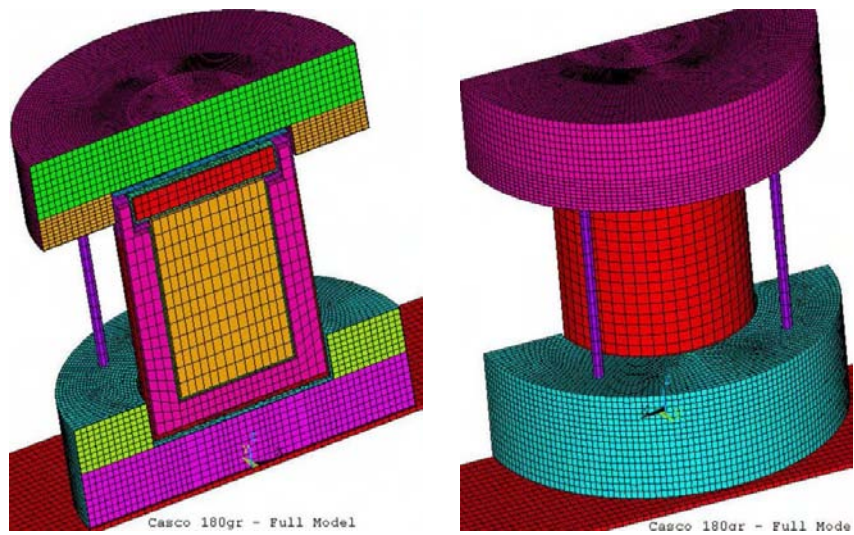


Figura 4. Modelo da embalagem – Análise de Queda.

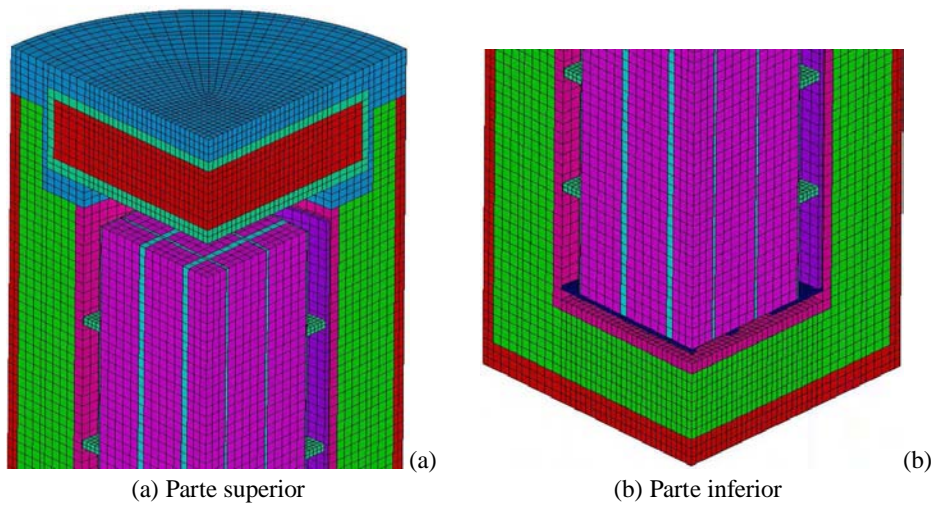


Figura 5. Modelo da embalagem: Conjunto – Análise térmica.

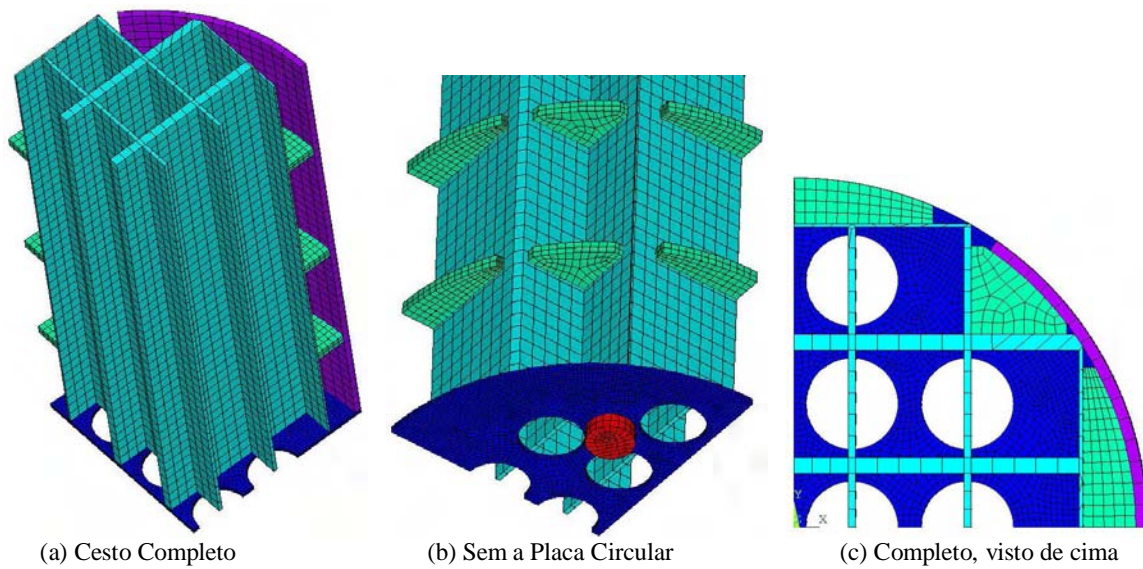


Figura 6. Modelo da embalagem: Detalhes do cesto – Análise térmica.

Com o método adotado, em uma primeira etapa, em um primeiro passo o elemento SHELS7 é utilizado (com espessura unitária, densidade nula e emissividade constante (0.5) nas duas superfícies que formam o par irradiante, identificado no programa por um mesmo número de 'real constant'. Com o uso da rotina AUX12, definindo o tipo de geometria (3D), a constante de Stefan-Boltzmann ($5.67e-8 \text{ W/m}^2\text{K}^4$) e o off-set de temperatura, 273 °C (já que estamos trabalhando com °C no modelo inteiro), o ANSYS cria a matriz de radiação, como um superelemento, para cada par de superfícies. No 2º passo os elementos SHELS7 são deletados e os superelementos já criados são utilizados.

Isso, por si só, tornaria a análise não-linear e impede o uso formal de simetrias. Daí os resultados obtidos não serem diretamente aplicáveis ao modelo ensaiado em escala 1:2 do casco. Outras não-linearidades presentes são a mudança de fase do chumbo e as propriedades variando com a temperatura.

Convecção térmica É o processo de transferência de calor entre uma superfície e um fluido em movimento (líquido ou gasoso) e depende da temperatura média da massa fluida (T_{bulk}) e da sua diferença para a temperatura da superfície, além das propriedades do fluido e sua velocidade (que faz com que a convecção seja 'natural' ou 'forçada'). As dimensões absolutas e relativas envolvidas bem como a geometria da superfície também influenciam este processo.

Incropera e DeWitt (2002) é um exemplo de referência que fornece a formulação teórica deste tipo de troca de calor (convecção) bem como condutividade e radiação e diversas correlações para se obter o coeficiente de troca de calor por convecção para diversas situações/geometrias. Apenas naqueles pares de superfícies internas, próximas uma da outra mas sem contato físico entre si, e 'paralelas', foi considerado que poderia haver troca de calor por convecção natural.

Conforme já mencionado, a fase de aquecimento dentro do forno – 30min - foi simulada, nesta 1ª etapa dos estudos e modelagem, por meio de um coeficiente de convecção forçada (H_f) aplicado às superfícies externas da embalagem com $T_{bulk} = 800 \text{ °C}$. Na fase de resfriamento, simulada por 2h, este coeficiente H_f foi recalculado para considerar $T_{bulk} = 20 \text{ °C}$ (a temperatura ambiente do ar).

4.3. Propriedades dos Materiais

Alguma das propriedades mecânicas dos materiais utilizados (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, densidade) estão explicitadas na Tab. 1.

As curvas tensão-deformação do OSB e do aço já foram apresentadas e discutidas em trabalhos anteriores já mencionados. Os resultados de ensaios com o OSB na condição encapsulado e não-encapsulado são apresentados em Mourão (2007).

Em Miranda et al (2008) são discutidas as propriedades deste material nestas duas condições, testes numéricos foram feitos em modelo simplificado assim como são apresentadas sugestões sobre como considerá-lo na análise, a fim de não produzir instabilidades numéricas devidas a suas grandes deformações.

As principais propriedades específicas da análise térmica são apresentadas na Tab. 1. As propriedades do chumbo, e em particular a curva entalpia x temperatura, apresentada na Fig. (6), foram obtidas da literatura (NEA, 2007).

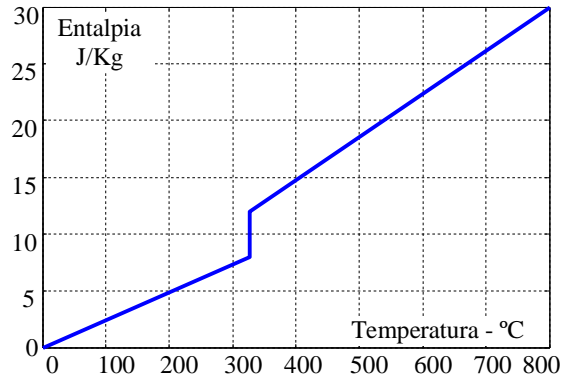


Figura 6. Entalpia específica x temperatura – Chumbo (NEA, 2007)

Tabela 1. Principais propriedades mecânicas e térmicas.

	aço (inox)	chumbo	alumínio	unidade
módulo de elasticidade	200e9	14e9	70e9	N/m ²
coeficiente de Poisson	0,30	0,42	0,34	---
densidade	7500	11500	2700	Kg/m ³
condutividade térmica	20,0	30,0	230	W/m.°C
calor específico	500	150	1000	J/Kg.°C
emissividade (superf. internas)	0,5	---	0,5	---

5. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

5.1. Análise de Queda

Para analisar as diversas possíveis posições de queda de 9m o modelo deve ser adequadamente girado (mantendo a base rígida imóvel). As simulações, bem como os ensaios, foram realizadas para três principais posições de queda, conforme ilustrado na Fig. (7): Horizontal, Inclínada (Ensaio a 42,9º e Simulação a 67,5º) e Vertical. Neste trabalho

serão apresentados os resultados para apenas algumas destas posições.

As deformadas do amortecedor após as simulações da queda Horizontal e da queda Inclinada a $67,5^\circ$ podem ser vistas, respectivamente, na Fig. (8.a) e Fig. (8.b).

A deformação dos amortecedores, após a sua desmontagem pós-ensaio de queda de 9m na posição Horizontal, é visualizada na Fig. (9). O amortecedor deformado após a queda Inclinada ($42,9^\circ$), e ainda conectado à embalagem, é apresentado na Fig. (10).



Figura 7. Posições de queda de 9m: (a) Horizontal; (b) Inclinada ($42,9^\circ$) e (c) Vertical.

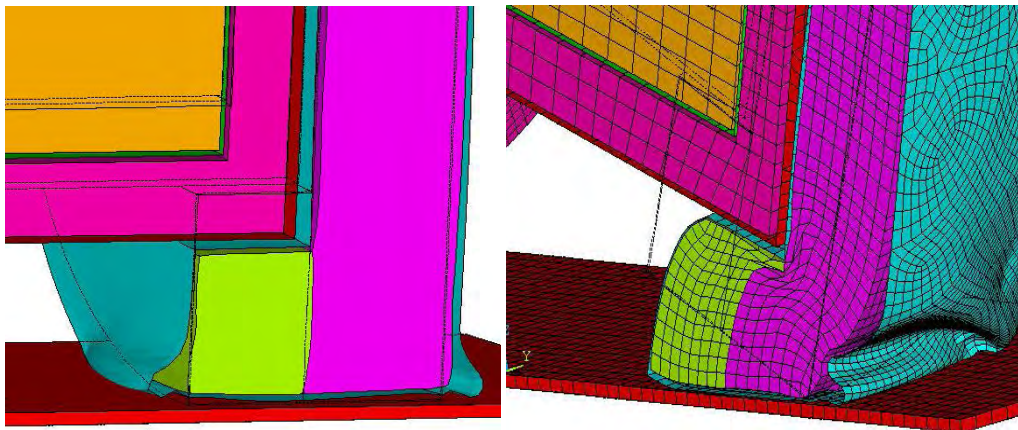


Figura 8. Deformadas (Simulação Numérica) pós-queda de 9m: (a) Horizontal, (b) Inclinada ($67,5^\circ$).

5.2. Análise Térmica

Devido às não-linearidades envolvidas e as duas situações básicas (aquecimento e resfriamento) a análise foi realizada definindo-se 60 *load steps*. A opção de modelar apenas $\frac{1}{4}$ da geometria e de simular o ambiente do forno (radiação térmica) por uma convecção forçada visou reduzir a duração das análises nesta fase preliminar dos estudos.

Os resultados, em termos da distribuição de temperaturas ao fim de período de aquecimento (30min), são apresentados na Fig. (11) sendo visualizados: o conjunto completo (Fig. (11.a) – vista interna), só o cesto (Fig. (11.b) – vista ‘externa’ com a placa circular lateral e o cesto sem a placa circular lateral (Fig. 11.c – vista de baixo), sem os elementos combustíveis ‘dummy’.

6. ANÁLISES E CONCLUSÕES

Inicialmente deve-se mencionar que o padrão de deformação dos amortecedores, obtido nas simulações numéricas, Fig. (8), é bastante compatível com o padrão observado nos ensaios, Fig. (9) e (10).

A comparação dos níveis de aceleração no cesto ficou impossibilitada porque o acelerômetro despreendeu-se durante os ensaios. De qualquer forma esta comparação estaria prejudicada uma vez que os internos não foram modelados nas análises de queda (só nas análises térmicas).



Figura 9. Deformadas (Experimental) pós-queda de 9m - Posição Horizontal.



Figura 10. Deformadas (Experimental) pós-queda de 9m - Posição Inclinada (47,5°).

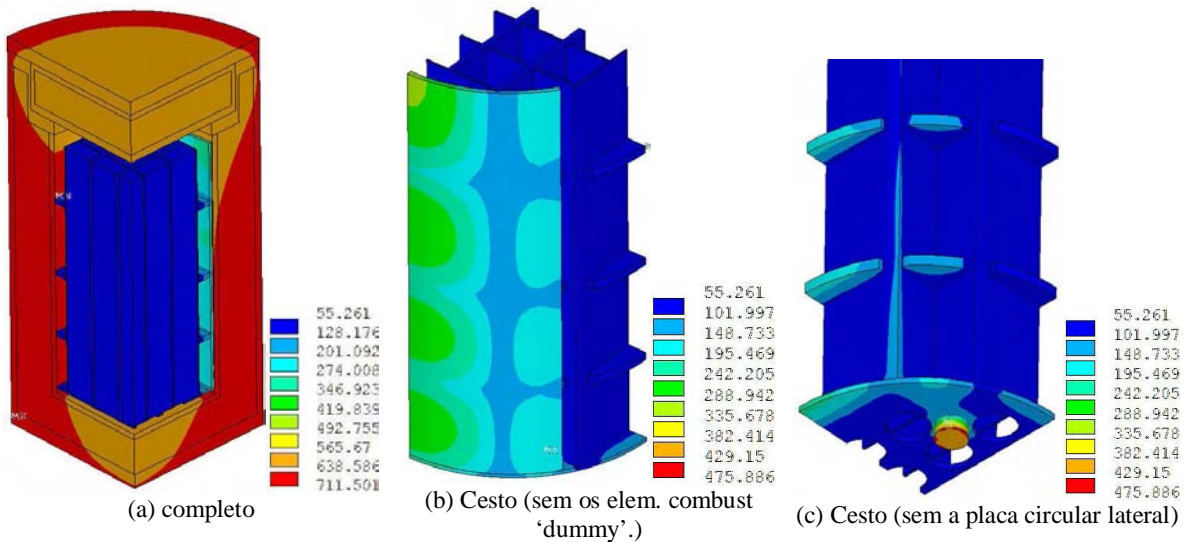


Figura 11. Distribuição de temperaturas ao fim de período de aquecimento (30min).

Os níveis de aceleração observados nos acelerômetros posicionados no cilindro externo são compatíveis com os obtidos nas simulações (resultados não apresentados). As análises não mostraram as falhas nas soldas (provavelmente por falha na execução das mesmas), Fig. (9) e (10) e/ou um melhor do material nesta região.

O uso de modelo em escala obriga o uso de correções dos resultados mecânicos (deformações, velocidades, acelerações, etc., experimentais e/ou numéricos) para extrapolá-los para o futuro protótipo (escala 1:1). Maiores

detalhes destas correções são apresentados em Miranda et al (2006a). Os parâmetros térmicos não são escaláveis da mesma forma que os mecânicos, assim os resultados térmicos experimentais servirão para 'calibrar' o respectivo modelo numérico (refinamento, hipóteses, materiais, etc.).

Para o ensaio térmico o cilindro foi instrumentado com etiquetas termo-sensíveis para várias temperaturas para se identificar o nível (aproximado) de temperatura máximo atingido em diversos pontos do seu interior e seis termopares (na superfície do cilindro interno e das tampas. Conforme esperado nos pontos instrumentados do cilindro interno foram observadas temperaturas acima da temperatura de fusão do chumbo (Mourão, 2008).

Os resultados das análises térmicas devem ser considerados preliminares e, por isto, não são comparáveis aos resultados experimentais pelos motivos já expostos. Entretanto, a distribuição de temperaturas encontrada nas simulações é compatível com o esperado para este tipo de fenômeno e modelo termo-estrutural.

Cada ensaio de queda deveria ser precedido por pré-aperto nos parafusos e uma verificação de estanqueidade no cilindro/embalagem antes da montagem dos amortecedores. O teste de estanqueidade deveria ser repetido após cada queda, e após a desmontagem dos amortecedores. Para um novo ensaio/queda estes deveriam ser substituídos por um novo conjunto assim como os parafusos e o respectivo pré-aperto (admitindo-se, após verificação visual, que o alojamento dos mesmos estivesse intacto). Por excesso de otimismo este teste crucial só foi realizado antes do 1º ensaio, juntamente com o pré-aperto nos parafusos, e após a última queda de 9m (foram quatro quedas quando foram utilizados dois conjuntos de amortecedores). Este fato, e mais uma falha no pré-aperto dos parafusos, apenas detectada na análise pós-ensaios, fez com que houvesse vazamento. Assim o projeto não pode ser qualificado e uma nova 'rodada' de ensaios está sendo prevista para Junho/10 com pequenas adaptações no projeto quando se prevê a sua qualificação. Novas análises numéricas estão em curso tendo em vista a 'calibragem' dos modelos térmico e estrutural a partir dos resultados experimentais.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte de projetos de pesquisa e desenvolvimento multinacional, de âmbito latino-americano, patrocinado pela AIEA - Agência Internacional de Energia Atômica, RLA/4/020 e RLA/3/008, a quem os autores agradecem como também ao coordenador dos referidos projetos e sua equipe do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN, de Belo Horizonte, onde os ensaios de queda e térmico foram realizados.

8. REFERÊNCIAS

- ANSYS LS-DYNA 2007. ANSYS Mechanical and LS-DYNA 11.0 Release, Canonsburg, ANSYS Inc., PA, USA.
- ANSYS 2007. ANSYS Structural Analysis Guide & Theory Reference Manual, v11.0.
- ASME, 2007, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 3, Containment Systems for Storage and Transport Packagings of Spent Nuclear Fuel and High Level Radioactive Material and Waste", The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- CNEN, 1988. Transporte de Materiais Radioativos, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, RJ (CNEN-NE-5.01).
- IAEA, 2005. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2005 Edition, Safety Requirements No. TS-R-1, Vienna, Austria.
- Fletcher, L. S., "Recent Developments in Contact Conductance Heat Transfer". Journal of Heat Transfer, November 1988.
- Frank P. Incropera, David P. DeWitt, 2002. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th ed., John Wiley Sons, Inc., 2002.
- Miranda, Carlos A. J., Mattar Neto, Miguel, Fainer, Gerson, 2006a, A 9m Drop Test Simulation of a Dual Purpose Cask for Nuclear Research Reactors Spent Fuel Elements, *III European Conference on Computational Mechanics, Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, Lisbon, Portugal, 5-8 June 2006*.
- Miranda, Carlos A. J., Mattar Neto, Miguel, Fainer, Gerson, 2006b, Simulação da queda livre de uma embalagem de transporte de elementos combustíveis de reatores de pesquisa, *61º Congresso da ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 24 a 27 de Julho de 2006, Rio de Janeiro, RJ*.
- Miranda, Carlos A. J., Mattar Neto, Miguel, Fainer, Gerson, 2008, Avaliação do Projeto de Amortecedores de Impacto para Embalagens de Transporte de Elementos Combustíveis Irrradiados de Reatores Nucleares de Pesquisa, *V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 25 a 28 de agosto de 2008 - Salvador - Bahia, Brasil*.
- Mourão, Rogério P., 2008, Project RLA/4/020 - Engineering of Casks for the Transport of Spent Fuel from Research Reactors. Test for design validation of a research reactor spent fuel transport cask. CDTN - Belo Horizonte, Brazil, 02 - 13 June, 2008. (Relatório apresentado à AIEA descritivo dos ensaios realizados e resultados obtidos).
- NEA, 2007 - Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-Hydraulics and Technologies. NEA - Nuclear Energy Agency, 2007 Edition. <http://www.nea.fr/html/science/reports/2007/nea6195-handbook.html>.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no trabalho.

THERMAL TRANSIENT AND DROP TEST ANALYSES OF A SCALE MODEL OF A CASK FOR NUCLEAR SPENT FUEL ELEMENTS

Carlos A. J. Miranda, cmiranda@ipen.br¹
Miguel Mattar Neto, mmattar@ipen.br¹
Gerson Fainer, gfainer@ipen.br¹

¹Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP
Av. prof. Lineu Prestes, 2242, Cid. Universitária, USP – Butantã, São Paulo, SP/Brasil

Abstract: *This work shows the numerical simulation of two mandatory tests that should be performed on a dual-purpose cask (transportation and storage) of spent fuel elements from nuclear research reactors: the transient thermal test, thirty minutes under a 800 °C fire, and the 9m free drop test onto a rigid surface. These are the two most severe hypothetical accident conditions. These tests were already conducted using a 1:2 scale mode, as allowed by regulations, and were described in recent works presented elsewhere as well as the basic requirements the cask should attend associated with its structural and functional integrity. The numerical analyses are used to determine the most critical position for the free drop test as well to predict the maximum temperature values inside the cask in the fire condition. The scale model as the cask has a double wall stainless steel cylinder with lead as biological shielding, and internal structures for the fuel elements and bolted closure lids. There are, also, two impact limiters connected to each other by bars and filled with a reconstituted wood to reduce the deceleration during the 9m impact. The thermal analysis is performed without dampers, which is allowed and is considered conservative. There are strong material non-linearities involved, several contacts and material interfaces, properties varying with the temperature and the lead phase change (considered using the enthalpy method) during the thermal simulation. The drop analysis covers only ~20ms while the thermal analysis covers the 30 min heating condition at 800 °C and a cooling period for about 2 hours. As the thermal and mechanical results compare well with the available experimental ones it can be concluded that the modeling procedures, their hypothesis and results evaluation methodology can be applied to predict the results in the future scale model test campaign and the future prototype (1:1 scale) field tests.*

Keywords: *Transportation package, Thermal analysis, Nonlinearity, Impact, Finite Element Method.*