



V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA  
V NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING  
25 a 28 de agosto de 2008 – Salvador – Bahia - Brasil  
August 25 – 28, 2008 - Salvador – Bahia – Brazil

## AValiação DO PROJETO DE AMORTECEDORES DE IMPACTO PARA EMBALAGENS DE TRANSPORTE DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS IRRADIADOS DE REATORES NUCLEARES DE PESQUISA

Miguel Mattar Neto, [mmattar@ipen.br](mailto:mmattar@ipen.br)<sup>1</sup>  
Carlos Alexandre de Jesus Miranda, [cmiranda@ipen.br](mailto:cmiranda@ipen.br)<sup>1</sup>  
Gerson Fainer, [gfainer@ipen.br](mailto:gfainer@ipen.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPEN-CNEN/SP – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária, CEP 05508-000, São Paulo, SP, BRASIL

**Resumo:** Os requisitos de qualificação de embalagens de transporte de elementos combustíveis irradiados de reatores nucleares de pesquisa são bastante severos. Entre os carregamentos hipotéticos que simulam condições acidentais de transporte inclui-se a queda da embalagem de uma altura de nove metros sobre uma superfície rígida. Para que se garanta que os níveis de desaceleração resultantes nos elementos combustíveis irradiados que serão transportados sejam suficientemente baixos e que a integridade estrutural e funcional da contenção desses elementos seja mantida é permitida a utilização de amortecedores de impacto. Esses componentes estruturais são peças de sacrifício que devem absorver a energia cinética da queda por meio de sua deformação acentuada. Nesse trabalho apresenta-se a avaliação estrutural dos amortecedores de impacto construídos com compósitos de madeira tipo OSB (Oriented Strand Board) para uma embalagem de transporte de elementos combustíveis irradiados de reatores nucleares de pesquisa. Com base nas características da embalagem e dos amortecedores de impacto, incluída a caracterização das propriedades mecânicas do OSB, são apresentadas e aplicadas as formulações analíticas para a avaliação estrutural considerando as possibilidades de queda nas direções frontal, lateral e inclinada da embalagem.

**Palavras-chave:** embalagem de transporte, amortecedor de impacto, reator nuclear de pesquisa, elemento combustível, OSB

### 1. INTRODUÇÃO

O transporte de materiais radioativos no Brasil é regulamentado pela norma CNEN-NE-5.01 [1988], de responsabilidade da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Os principais objetivos desta norma, com relação ao já mencionado transporte de materiais radioativos, estão relacionados ao estabelecimento de requisitos de radioproteção e segurança para garantir um nível adequado de controle da eventual exposição de pessoas, bens e meio ambiente à radiação ionizante. Esses requisitos são aplicáveis a: (i) especificações sobre materiais radioativos para transporte; (ii) seleção do tipo de embalado; (iii) especificação dos requisitos de projeto e de ensaios de aceitação de embalados; (iv) disposições pertinentes ao transporte propriamente dito; e (v) responsabilidades e requisitos administrativos. Assim, essa norma se aplica ao projeto, fabricação, ensaios e manutenção de embalagens que são utilizadas no transporte de elementos combustíveis irradiados de reatores nucleares de pesquisa.

Pelas características do embalado, isto é, dos elementos combustíveis irradiados de reatores nucleares de pesquisa, as embalagens nesse caso são classificadas como Tipo B. Os requisitos de qualificação desse tipo de embalagem são bastante severos incluindo condições normais e acidentais de transporte.

Para as condições normais de transporte devem ser feitos testes de qualificação onde as embalagens devem ser submetidas aos seguintes ensaios, na ordem indicada: (i) ensaio de jato de água (simulação de uma chuva com uma precipitação de aproximadamente 5 cm por hora, durante, no mínimo, 1 hora); (ii) ensaio de queda livre (queda de 1,2 m sobre uma superfície rígida de modo a sofrer o máximo de dano com relação aos aspectos de segurança a serem ensaiados); (iii) ensaio de empilhamento (carga de compressão da ordem de 5 vezes a massa do embalado); e (iv) ensaio de penetração (uma barra de aço com uma massa de 6 kg e com uma extremidade hemisférica com 3,2 cm de diâmetro é deixada cair, com o seu eixo verticalmente orientado, no centro da parte mais frágil da amostra, de uma altura de 1 m).

Para ser qualificada sob as condições acidentais de transporte, a embalagem deve ser submetida a testes na seguinte ordem, como indicado na Figura 1: (i) ensaio de queda livre (queda de 9 m sobre uma superfície rígida de modo a sofrer o máximo de dano com relação aos aspectos de segurança a serem ensaiados); (ii) ensaio de punção (queda de 1 m

sobre uma barra de aço rigidamente fixada perpendicularmente de modo a sofrer o máximo de dano); (iii) teste térmico (30 minutos sob fogo com temperatura de 800 °C); e (iv) teste de imersão a 15 m durante uma hora.

As embalagens devem preservar a capacidade de blindagem biológica e contenção para serem aprovadas após o desenvolvimento dos testes, sendo permitidos aumentos limitados no nível de radiação superficial e, também, o surgimento de uma taxa limitada de vazamento do conteúdo.

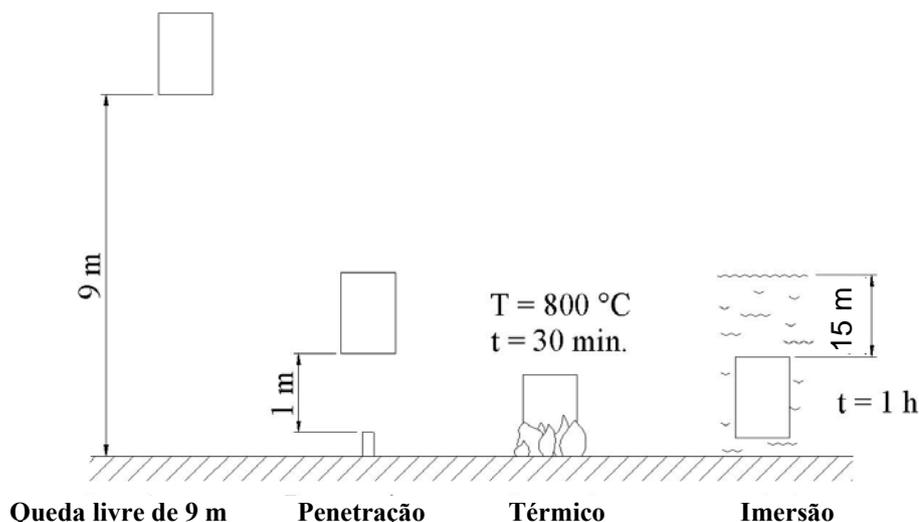


Figura 1: Testes para a qualificação de embalagens sob condições acidentais de transporte

Na condição de teste de queda livre de 9 m, para que se garanta que os níveis de desaceleração resultantes nos elementos combustíveis irradiados que serão transportados sejam suficientemente baixos e que a integridade estrutural e funcional da contenção desses elementos seja mantida é permitida a utilização de amortecedores de impacto. Esses componentes estruturais são peças de sacrifício que devem absorver a energia cinética da queda por meio de sua deformação acentuada. Podem, também, atuar como barreira térmica entre o fogo e a embalagem no teste térmico.

Vários materiais de enchimento têm sido utilizados em amortecedores de impacto de embalagens de transporte de materiais radioativos tais como madeira natural de diferentes tipos, aglomerados e compósitos de madeira, concreto leve, espumas metálicas, espumas poliméricas e colméias metálicas (*honeycombs*).

Nesse trabalho apresenta-se a avaliação estrutural dos amortecedores de impacto construídos com compósitos de madeira tipo OSB (*Oriented Strand Board*) para uma embalagem de transporte de elementos combustíveis irradiados de reatores nucleares de pesquisa. Com base nas características da embalagem e dos amortecedores de impacto, incluída a caracterização das propriedades mecânicas do OSB, são apresentadas e aplicadas formulações analíticas para a avaliação estrutural considerando as possibilidades de queda nas direções frontal, lateral e inclinada da embalagem.

Conclusões e comentários são apresentados com base nos resultados obtidos.

É importante mencionar que o que aqui será apresentado é parte dos trabalhos de desenvolvimento que estão sendo conduzidos em projetos regionais latino-americanos para o estudo de opções de armazenamento e transporte de elementos combustíveis irradiados de reatores de pesquisa apoiados pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) desde 2001.

## 2. DESCRIÇÃO DA EMBALAGEM DE TRANSPORTE DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS IRRADIADOS DE REATORES NUCLEARES DE PESQUISA

A embalagem de transporte de elementos combustíveis irradiados de reatores nucleares de pesquisa é um casco com paredes múltiplas em aço, chumbo e aço, sendo que o chumbo tem função de blindagem biológica e o aço tem função estrutural, de contenção e, também, de blindagem biológica. A massa da embalagem é cerca de 10.000 kg e as dimensões, altura e diâmetro, da ordem de 1 m, sem os amortecedores de impacto. Ela alojará em sua cesta interna 21 elementos combustíveis tipo MTR (*Materials Test Reactors*). As Figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, o arranjo da embalagem e as dimensões principais com a distribuição dos elementos MTR em seu interior.

Os amortecedores de impacto são formados por uma casca fina de aço que envolve o material de enchimento que, no presente caso, é o OSB.

## 3. DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DOS AMORTECEDORES DE IMPACTO

Como comentado acima, as normas aplicáveis ao projeto e qualificação de embalagens de transporte de materiais radioativos, incluindo o caso de elementos combustíveis irradiados de reatores de pesquisa, exigem que seja demonstrada a adequação das mesmas quanto a aspectos de integridade estrutural e funcional considerando as condições normais e acidentais de transporte. Assim, se destaca a condição acidental que é a queda livre da embalagem

de 9 m sobre uma superfície rígida de modo a sofrer o máximo de dano.

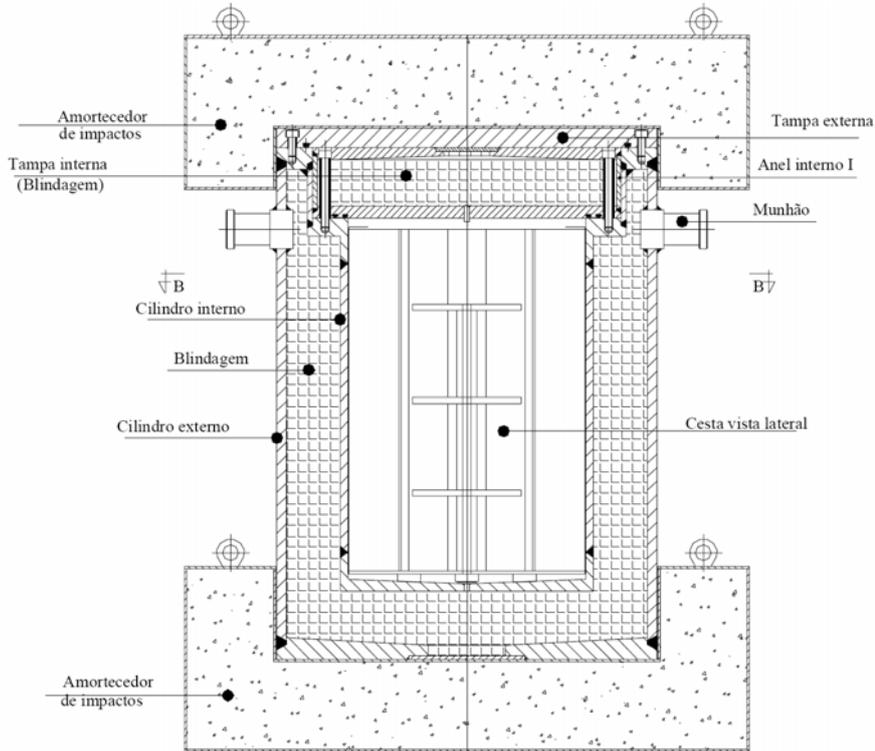


Figura 2. Vista lateral da embalagem

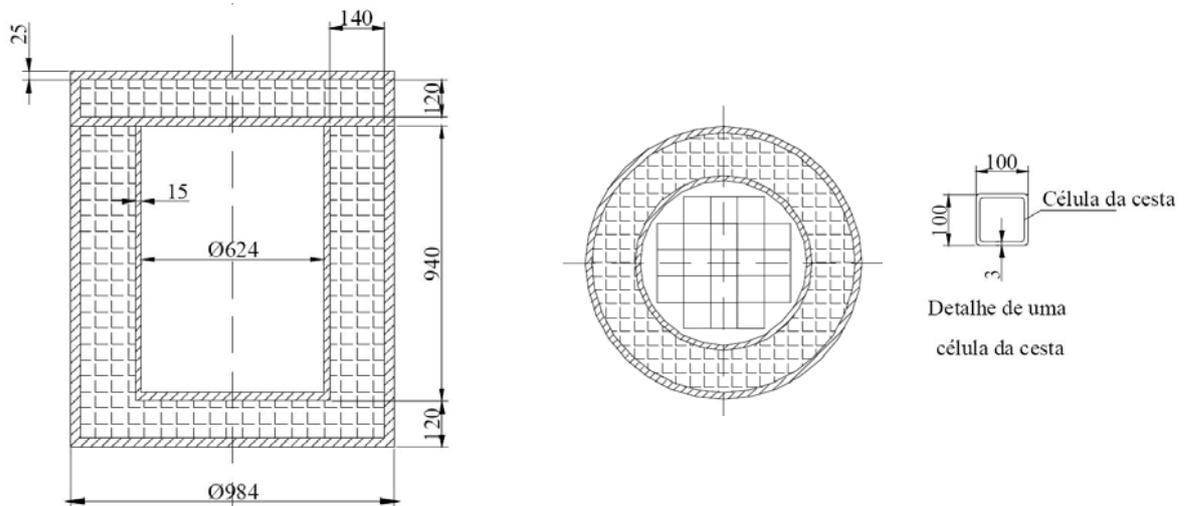


Figura 3. Dimensões principais da embalagem

Nessa condição acidental deve ser dada atenção a dois aspectos: (i) a determinação dos carregamentos que ocorrem no impacto, e (ii) a resistência e a estabilidade dos elementos estruturais da embalagem que devem resistir a esses carregamentos.

As tensões causadas por esses carregamentos nos elementos estruturais da embalagem devem atender aos limites prescritos nos códigos aplicáveis de projeto estrutural tais como o chamado código ASME [2007] (ASME – *The American Society of Mechanical Engineers*). Além disso, deve ser demonstrada a estabilidade das cascas da embalagem e dos seus internos (incluído o cesto de acomodação dos elementos combustíveis) para resistir à flambagem.

Desse modo, para que os níveis de carregamentos decorrentes dos impactos possam ser resistidos pelos elementos estruturais da embalagem e, também, pelo que estará contido nela, podem ser utilizados os amortecedores de impacto. Esses componentes de sacrifício sofrem deformações acentuadas para absorver a energia cinética no impacto, provendo o isolamento térmico da embalagem, podendo ser consumidos pelo fogo durante o teste térmico.

A escolha dos materiais dos amortecedores de impacto deve considerar esses aspectos mencionados (absorção da energia cinética, isolamento térmico e resistência ao fogo) protegendo a embalagem e o seu conteúdo.

### 3.1. O Material Escolhido para os Amortecedores de Impacto e sua Caracterização

O material escolhido para os amortecedores de impacto foi um compósito de madeira chamado OSB (*Oriented Strand Board*). Esse material é fabricado na forma de placas por meio da colagem sob pressão e temperatura de pedaços de madeira (flocos, aparas, etc.). As dimensões comerciais das placas variam de 6 a 40 mm de espessura por 2.800 a 5.000 mm de largura e comprimento.

A direção normal às superfícies coladas é definida como a direção perpendicular do material enquanto a direção das superfícies coladas é definida como a direção paralela do material.

As propriedades mecânicas desse material, principalmente sua resposta a carregamentos dinâmicos de impacto, não são encontradas na literatura. Assim, uma série de testes foi realizada para determinar as propriedades de interesse para a utilização pretendida [Mourão, 2007].

#### 3.1.1. Testes de Impacto

Para avaliar o efeito da contenção lateral na resposta dinâmica do OSB, foram construídos e testados corpos de prova encapsulados e não encapsulados. Esses corpos de prova, construídos também com camadas coladas de OSB, são cilindros de 60 mm de diâmetro e 30 mm de altura. Os corpos de prova foram testados nas direções perpendicular, paralela e a um ângulo de 45 graus. Os corpos de prova encapsulados têm uma casca de aço de 0,5 mm que os envolve.

As curvas tensões-deformações obtidas dos ensaios são mostradas na Figura 4 (todas as curvas foram filtradas a 500 Hz com filtros passa-baixa) [Mourão, 2007].

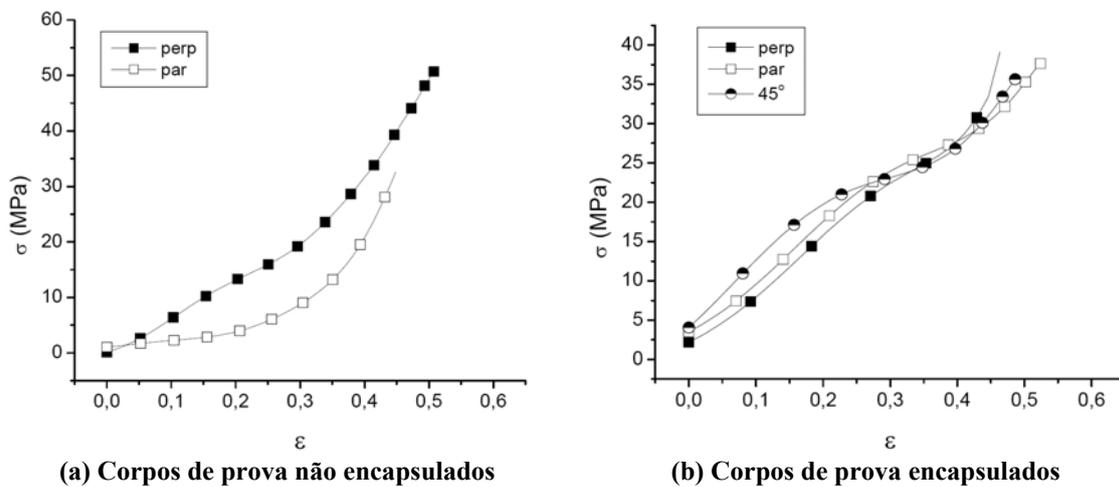


Figura 4. Curvas tensões-deformações obtidas nos testes de impacto do OSB

A análise dos resultados apresentados na Figura 4.a mostra que a resposta dos corpos de prova não encapsulados indica um comportamento anisotrópico do material. Por outro lado, o OSB se comporta como um material quase isotrópico quando encapsulado, Figura 4.b. Esse comportamento pode ser confirmado, também, na Tabela 1 que mostra a energia de deformação específica absorvida  $U$  à deformação de 0,45. A diferença entre os valores de  $U$  das direções paralela e perpendicular na situação sem encapsulamento é da ordem de 47% (7,0 para 3,7 MJ/m<sup>3</sup>), enquanto que essa diferença para as três direções na situação com encapsulamento é menor que 10%.

Tabela 1. Energia de deformação específica  $U$  @  $\epsilon = 0.45$

Caso		$U$ (MJ/m <sup>3</sup> )
Não encapsulado	Perpendicular	7,0
	Paralela	3,7
Encapsulado	Perpendicular	7,5
	Paralela	8,2
	45 graus	8,4

### 3.2. Formulações para o Dimensionamento dos Amortecedores de Impacto

O comportamento estrutural dos materiais dos amortecedores de impacto geralmente pode ser avaliado (em uma primeira aproximação) admitindo que eles sofram um esmagamento uniforme. Admite-se que os materiais têm uma massa que pode ser considerada desprezível e que são insensíveis, na faixa de trabalho, à taxa de deformação. Materiais celulares tais como colméias de metais (*honeycombs*), madeiras e espumas de poliuretano exibem tais características e nesses casos, de materiais leves, as forças de inércia e o comportamento dinâmico podem ser desprezados. Uma análise

nominalmente estática pode ser empregada para avaliar os amortecedores de impacto e fazer o seu dimensionamento.

A energia cinética da embalagem no início de um ciclo de impacto é dada por

$$E_c = \frac{1}{2} M V_1^2 \quad (1)$$

onde  $E_c$  é a energia cinética a embalagem antes do impacto,  $M$  é a massa da embalagem e  $V_1$  é a velocidade da embalagem imediatamente antes do impacto.

A velocidade da embalagem antes do início do impacto é obtida a partir da altura de queda  $H$ , com a conversão da energia potencial em energia cinética. Assim,

$$V_1 = (2 g H)^{1/2} \quad (2)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Durante o ciclo de impacto, com o esmagamento do amortecedor de impacto, a embalagem se move para baixo de uma altura  $h$ , até que pare ( $V_2 = 0$ ). Assim, a energia cinética no final do ciclo de impacto é

$$\frac{1}{2} M V_2^2 = \frac{1}{2} M V_1^2 + M g h - V_{ef} \int \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (3)$$

onde  $V_{ef}$  é o volume efetivo do amortecedor que absorve o impacto no esmagamento uniforme do mesmo, e  $\sigma$  e  $\epsilon$  são, respectivamente, a tensão e a deformação do material do amortecedor.

O volume efetivo do amortecedor que absorve o impacto no seu esmagamento uniforme depende de como a queda ocorre. No caso de uma embalagem cilíndrica numa queda vertical, o volume efetivo é dado pela espessura disponível do amortecedor multiplicada pela área projetada da base da embalagem ( $A = \pi r_c^2$ , onde  $r_c$  é o raio externo da embalagem). No caso de uma queda lateral, o volume efetivo pode ser estimado pelo produto da espessura média disponível do amortecedor pela projeção da embalagem em sua largura e pelo diâmetro da embalagem. No caso de uma queda inclinada, o volume efetivo depende do ângulo de inclinação da queda e para sua estimativa é necessário fazer algumas hipóteses sobre como será configuração final após o esmagamento do amortecedor. A Figura 5 mostra como se considera o volume efetivo nas três configurações de queda enquanto que pela Figura 7 se visualiza melhor estas posições e dimensões.

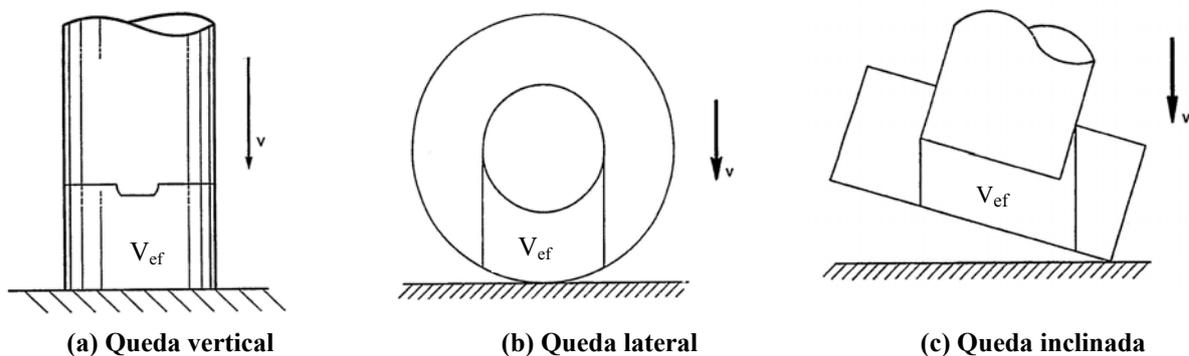


Figura 5. Volumes efetivos para as configurações de queda em três direções

A partir da eq.(3), tendo a altura de queda definida, a curva tensão-deformação do material do amortecedor, e admitindo  $V_2 = 0$ , pode-se, então, fazer o dimensionamento inicial do amortecedor por meio da definição das espessuras necessárias e das projeções da embalagem nos diferentes casos de queda.

Para o dimensionamento final do amortecedor, no entanto, é necessário estimar, também, o nível de desaceleração que resultará na embalagem e no seu conteúdo. Em geral, o nível de desaceleração esperado é uma informação utilizada no projeto dos amortecedores e é estimado com base na resistência do conteúdo sendo definido em múltiplos de  $g$  (aceleração da gravidade). Por exemplo, para o caso desse trabalho, o nível de desaceleração aceitável para os elementos combustíveis de reatores nucleares de pesquisa é da ordem de 200  $g$ .

É necessário, então, estimar, para uma dada configuração do amortecedor, o nível máximo de desaceleração resultante para uma dada altura de queda. Para isso, é importante observar a curva tensão-deformação do material do amortecedor e a deformação de esmagamento  $\epsilon_y$ . Após esse nível de deformação ocorre uma compactação do material e um rápido aumento de sua rigidez que resultará num aumento do nível de desaceleração. Assim, a faixa de deformações de trabalho deve ficar abaixo do valor de  $\epsilon_y$  no projeto adequado do amortecedor.

Admitindo uma deformação aproximadamente linear até o valor  $\epsilon_y$ , da eq. (3) resulta que:

$$\frac{1}{2} M V_2^2 = \frac{1}{2} M V_1^2 + M g (\epsilon_y) L - \frac{1}{2} V_{ef} (\sigma_y) (\epsilon_y) \quad (4)$$

onde  $L$  é a espessura do amortecedor,  $(\epsilon_y) L$  é a variação média do comprimento do amortecedor até o seu

esmagamento, e  $\sigma_y$  é a tensão correspondente a  $\epsilon_y$  na curva tensão-deformação do material. Notar que, no caso,  $h_1 = (\epsilon_y) L$  é altura final do amortecedor após o impacto e seu conseqüente esmagamento.

Sendo  $A$  é a área projetada da embalagem e  $V_{ef} = A L$ , da eq. (4) chega-se a

$$V_2^2 = V_1^2 + 2 g (\epsilon_y) L - A L (\sigma_y) (\epsilon_y) / M \quad (5)$$

Logo, a força resultante na embalagem  $F$  é dada por

$$F = A (\sigma_y) - M g \quad (6)$$

Utilizando a segunda lei de Newton, a aceleração na embalagem  $a$  é dada por

$$a = A (\sigma_y) / M - g \quad (7)$$

### 3.3. Dimensionamento dos Amortecedores de Impacto

A seguir serão estimadas as dimensões (espessuras) mínimas do amortecedor, para as duas hipóteses básicas de queda: Vertical, e Lateral.

#### 3.3.1. Queda na Direção Vertical

Na queda vertical a desaceleração na embalagem é atenuada por apenas um amortecedor de impacto. Uma primeira verificação é feita para uma queda livre de 9 m e com base nas informações sobre a embalagem dadas na seção 2, onde  $M = 10.000$  kg e o raio da embalagem  $r_e = 492$  mm. De acordo com Diersch et al [1994] as propriedades do OSB que devem ser utilizadas são as obtidas de corpos de prova encapsulados. Da Figura 4(b), observa-se que  $\epsilon_y \approx 0,6$  ( $\approx 60\%$ ).

Aplicando a eq.(5), com  $V_1 = (2 g H)^{1/2} = 13,3$  m/s,  $V_2 = 0$  m/s, a espessura mínima do amortecedor de impacto nessa direção de impacto deve ser  $L_{min} = 87$  mm.

Utilizando agora a eq.(7), considerando o nível de desaceleração aceitável de 200 g, chega-se que  $\sigma_y = 25,7$  N/mm<sup>2</sup>. A deformação que corresponde a essa tensão é  $\epsilon_y = 0,34$  (34%) e, admitindo esmagamento uniforme do amortecedor, se chegaria a uma espessura de  $L = 268$  mm  $> L_{min} = 87$  mm.

#### 3.3.2. Queda na Direção Lateral

Na queda lateral a desaceleração na embalagem é atenuada por dois amortecedores de impacto. De modo semelhante ao indicado acima para a queda vertical e admitindo uma largura projetada do amortecedor da ordem de metade do raio da embalagem chega-se que a espessura mínima do amortecedor de impacto nessa direção de impacto deve ser  $L_{min} = 137$  mm e que a espessura para que a desaceleração seja 200 g deve ser  $L = 169$  mm  $> L_{min} = 137$  mm.

#### 3.3.3. Dimensões Propostas para os Amortecedores de Impacto

Os cálculos mostrados acima são simplificados e admitem o esmagamento uniforme dos amortecedores. Assim, considerando uma margem de segurança as dimensões propostas para os amortecedores de impacto estão indicadas na Figura 6.

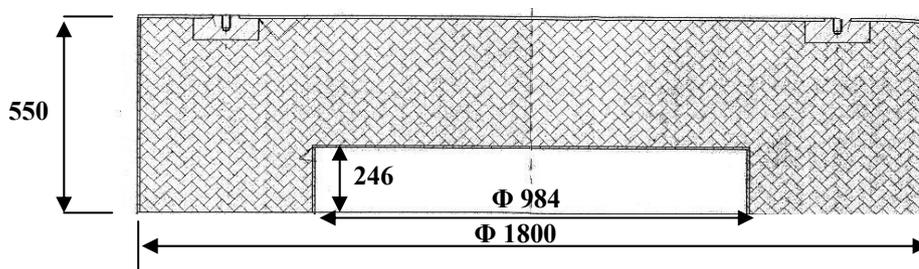


Figura 6. Dimensões propostas para o amortecedor de impacto (em mm)

#### 3.3.4. Avaliações do Amortecedor de Impacto Proposto

Com base nas as dimensões propostas para os amortecedores de impacto e nas formulações indicadas acima e em simplificações para estimar o volume efetivo e área projetada dos amortecedores de impacto (principalmente na queda inclinada) foram avaliados níveis de desaceleração esperados na embalagem e a deformação uniforme esperada e o conseqüente recalque dos amortecedores após o esmagamento provocado pelo impacto de queda livre da embalagem de 9 m. Esses resultados estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados das avaliações do amortecedor de impacto proposto

	Desaceleração (g)	Deformação Uniforme	Recalque (mm)
Queda Vertical	185	0,32	97
Queda Lateral	129	0,35	143
Queda Inclinada (45°)	220 (> 200)	0,51	191

#### 4. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E COMENTÁRIOS

O primeiro resultado que salta à vista é que na queda inclinada a 45° o nível de desaceleração calculado (220 g) é maior que o nível de desaceleração aceitável (200 g). O nível de desaceleração calculado para o caso de queda vertical (185 g) pode ser considerado alto pois há alguns tipos de elementos combustíveis de reatores de pesquisa para os quais o nível de desaceleração aceitável é da ordem de 100 a 150 g.

Assim, há dois caminhos que podem ser seguidos: (i) modificação do dimensionamento proposto com base nas formulações indicadas, (ii) refinamento da metodologia de avaliação por meio de simulações numéricas da queda livre utilizando o método dos elementos finitos.

No primeiro caso, as modificações são condicionadas por aspectos construtivos, por aspectos operacionais e por aspectos econômicos e nem sempre é possível realizá-las da maneira mais adequada. Desse modo, é bastante recomendável que sejam empregadas simulações numéricas da queda livre utilizando modelos de análise realísticos da embalagem dos amortecedores. Há muitas dificuldades para executar as simulações pois são necessários programas com capacidade de modelagem dos materiais com suas características particulares e não-linearidades, dos diversos contactos entre as partes (com e sem atrito) e das não linearidades geométricas decorrentes dos elevados níveis de deformação e deslocamentos. Mais ainda, esses programas devem ser numericamente eficientes para que as análises sejam possíveis e, dependendo do nível do impacto, isto é, da velocidade de impacto, devem permitir a solução explícita das equações de movimento.

São previstos experimentos de queda livre a serem realizados na embalagem com os amortecedores propostos com um modelo em escala 1:2. Assim, para simular os ensaios previstos com este modelo em escala foram desenvolvidos modelos de elementos finitos, como o mostrado na Figura 7, considerando todas as características dos materiais e suas não-linearidades e os contatos entre as partes para os eventos de queda livre de 9 m em três direções. Para as simulações numéricas com os modelos de elementos finitos foi empregado o programa ANSYS LS-DYNA [ANSYS Inc., 2007]. Inicialmente foi gerado  $\frac{1}{4}$  do modelo utilizado na queda vertical (aplicando-se simetrias nos planos  $X = 0$  e  $Y = 0$ ). Para as demais quedas o modelo foi duplicado e girado para cada ângulo de queda (aplicando-se simetria no plano  $Y = 0$ ). Os carregamentos são: a velocidade (13,3 m/s) no instante antes do impacto e a aceleração da gravidade.

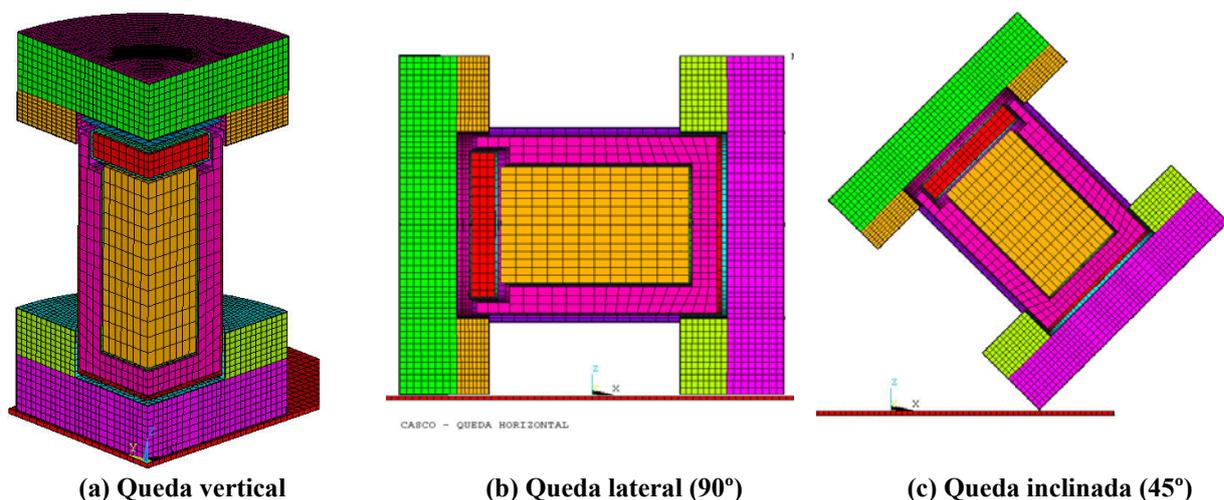


Figura 7. Modelo de elementos finitos e três das orientações de queda a serem analisadas

Alguns resultados típicos obtidos na queda vertical são mostrados na Figura 8: deslocamento ( $U_z$ ), velocidade ( $V_z$ ) e aceleração ( $A_z$ ) verticais no nó central da massa interna (material *dummy*). Estes resultados foram obtidos com propriedades fictícias (preliminares) para o material do amortecedor para testar o modelo numérico e, portanto, não são diretamente comparáveis com os resultados do dimensionamento dos amortecedores (seção anterior).

É importante mencionar que a norma CNEN [1988] recomenda fortemente que as embalagens sejam qualificadas por meio de testes. As campanhas de testes de queda livre de 9 m incluem, geralmente, os testes na direção vertical, na direção lateral e em pelo menos numa direção inclinada. As simulações numéricas ganham uma importância adicional por permitirem uma indicação prévia de qual seria a direção inclinada que causaria maior dano.

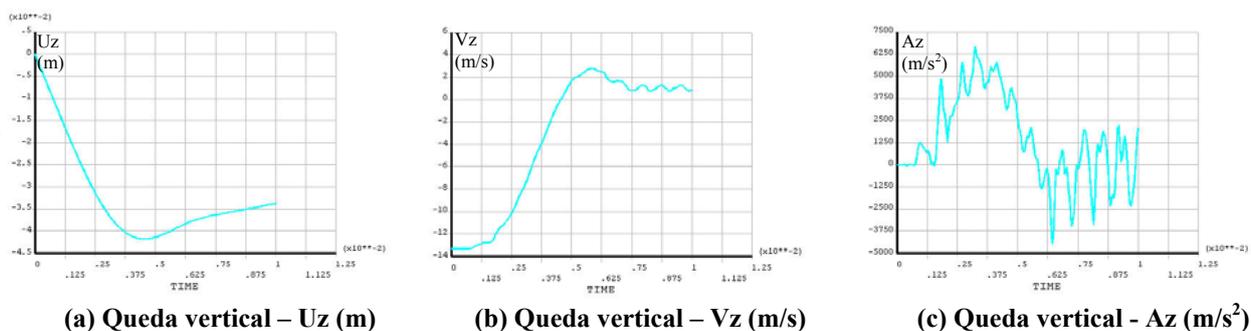


Figura 8. Resultados típicos a serem obtidos numericamente com modelos de Elementos Finitos

## 5. CONCLUSÕES

Foi inicialmente apresentado o cálculo das dimensões mínimas dos amortecedores de uma embalagem de transporte e armazenagem de elementos combustíveis irradiados de reatores de pesquisa através de uma formulação simplificada baseada em balanço de energia considerando hipóteses simplificadoras para as quedas vertical e lateral e uma aceleração média máxima de 200g's. A partir destas avaliações preliminares foram propostas as dimensões do amortecedor e foram feitas as avaliações de aceleração e recalque esperados para o amortecedor, assim projetado, nas quedas vertical, lateral e inclinada a 45°. No caso desta última (45°) se prevê uma aceleração maior do que o limite máximo. Ressalta-se que esta avaliação ainda é preliminar e que para o licenciamento da embalagem é mandatório que os ensaios tenham resultados admissíveis sendo as análises/simulações numéricas 'guias' para a escolha da inclinação de queda que produz o máximo dano.

Uma campanha de ensaios está prevista com um modelo em escala 1:2 do amortecedor projetado. Simulações numéricas deste modelo em escala estão em andamento para permitir a comparação dos resultados numéricos com os experimentais. Com a calibração do modelo numérico, após os ensaios, o mesmo poderá ser adotado para avaliar a resposta da embalagem, conforme projetada, na queda de 9m, e definir a posição (ângulo) mais desfavorável para a queda inclinada. Nas análises numéricas finais, as partes atualmente simuladas com propriedades fictícias já terão tais propriedades definidas, inclusive a modelagem da atual "massa interna".

Quanto aos resultados das simulações numéricas, deve-se observar que o nível de "ruído" da resposta obtida aumenta progressivamente à medida que passamos de deslocamentos para velocidades e acelerações. Neste último caso será necessário filtrar a resposta por um filtro simples do tipo Butterworth. Outros parâmetros como, por exemplo, a deformada final e/ou o nível de recalque, poderão ser adotados para comparação das simulações numéricas com os experimentos a serem realizados com um modelo em escala 1:2 dos amortecedores propostos.

Por fim, devido às correções de escala, os resultados numéricos, em termos de acelerações, deverão ser divididos por 2 para serem comparados com os resultados esperados na embalagem. Assim, por exemplo, a aceleração média máxima da Figura 8.c, cerca de 5000 m/s<sup>2</sup>, corresponde a cerca de 250 g's previstos na embalagem.

## 6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte de um projeto apoiado e financiado pela Agência Internacional de Energia Atômica, AIEA, envolvendo alguns países da América Latina que têm reatores de pesquisa, cujo objetivo é desenvolver e qualificar um casco de transporte para seus elementos combustíveis queimados que também poderá ser utilizado para armazenagem.

## 7. REFERÊNCIAS

- ANSYS Inc., 2007, ANSYS Mechanical and LS-DYNA 11.0 Release, Canonsburg, PA, USA.
- 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)
- Diersch, R., Weiss, M., Dreier, G., 1994, „Investigations of the Impact Behavior of Wooden Impact Limiters“, Nuclear Engineering and Design, V. 150, pp. 341-348.
- Mourão, R. P., 2007, "Characterization of Shock Absorbing Materials for Packages", Proceeding of the 2007 International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2007, CD-ROM, Santos, SP, Brazil, paper R13-1240, 7 p.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

## DESIGN ASSESSMENT OF IMPACT DAMPERS FOR TRANSPORTATION PACKAGES OF IRRADIATED FUEL ELEMENTS OF NUCLEAR RESEARCH REACTORS

Miguel Mattar Neto, mmattar@ipen.br<sup>1</sup>

Carlos Alexandre de Jesus Miranda, cmiranda@ipen.br<sup>1</sup>

Gerson Fainer, gfainer@ipen.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nuclear and Energy Research Institute, IPEN-CNEN/SP

Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária, CEP 05508-000, São Paulo, SP, BRAZIL

**Abstract:** *The requirements for qualification of packages for transportation of irradiated fuel elements are very severe. Among the conditions and loads which simulate the postulated accidental during transportation there is the package free drop from 9 m high on a rigid surface. To assure adequate low levels of deceleration on the fuel elements being transported in the package and also to guarantee the structural and functional integrity of the containment (to avoid liberation of the radioactive products inside it) the use of dampers is allowed. These are structural components that should absorb the kinetic energy by means of a great amount of deformation. Their destruction is allowed during this process. In this work the structural assessment of these components is presented supposing the use of a wood derived material named OSB (Oriented Strand Board). These dampers will be used in packages for transportation of irradiated fuel elements of nuclear research reactors. Based on package characteristics and specific regulatory demands, and considering the OSB mechanical properties obtained from specific tests, the analytical formulations are presented and an example of its application is done considering three possibilities: frontal, lateral and skewed drop. Some considerations are done related with numerical simulations performed on a 1:2 scale model, using an explicit program, that will be tested soon and comparisons are done among the numerical and analytical results. Although the qualification “by test” instead of “by analysis” is stressed by the regulatory body the numerical simulations are important to determine, for instance, the most critical position for the free drop test.*

**Keywords:** *transport packaging, impact damper, research nuclear reactor, fuel element, OSB*