



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Simulações numéricas de testes de queda livre de modelo em escala 1:2 de
embalagem de transporte de elemento combustível irradiado de reator nuclear
de pesquisa**

DANIEL SILVA DE MELLO CARVALHO

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

Orientador:

Prof. Dr. Miguel Mattar Neto

São Paulo

2023

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Simulações numéricas de testes de queda livre de modelo em escala 1:2 de
embalagem de transporte de elemento combustível irradiado de reator nuclear
de pesquisa**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

DANIEL SILVA DE MELLO CARVALHO

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

Orientador:

Prof. Dr. Miguel Mattar Neto

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

SILVA DE MELLO CARVALHO, D. **Simulações numéricas de testes de queda livre de modelo em escala 1:2 de embalagem de transporte de elemento combustível irradiado de reator nuclear de pesquisa**. 2023. 100 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Silva de Mello Carvalho, Daniel
Simulações numéricas de testes de queda livre de modelo em
escala 1:2 de embalagem de transporte de elemento combustível
irradiado de reator nuclear de pesquisa / Daniel Silva de
Mello Carvalho; orientador Miguel Mattar Neto. -- São Paulo,
2023.
100 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2023.

1. Absorção de impacto. 2. Dinâmica não-linear de
estruturas. 3. Método dos elementos finitos. I. Mattar Neto,
Miguel, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Daniel Silva de Mello Carvalho

Título: Simulações numéricas de testes de queda livre de modelo em escala 1:2 de embalagem de transporte de elemento combustível irradiado de reator nuclear de pesquisa.

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Mattar Neto.

Data: 02/01/2023

Banca Examinadora

Prof. Dr. Larissa Driemeier

Instituição: Universidade de São Paulo Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Renato Pavanello

Instituição: Universidade Estadual de Campinas Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Miguel Mattar Neto

Instituição: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Julgamento: Aprovado

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo suporte e paixão.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Miguel Mattar Neto, pela oportunidade, orientação e confiança, depositadas em tempos tão duros e à tão poucos.

Aos meus colegas de trabalho, Carlos Alexandre de Jesus Miranda, Gerson Fainer e Altair Antônio Faloppa, minha gratidão por todo suporte.

Aos meus amigos e parceiros de estudo, Javier Gonzáles Mantecón e Carolina Della Ricco Figueiredo, que foram parte essencial nas conquistas diárias ao longo do desenvolvimento deste trabalho e na formação deste autor.

Aos meus amigos, Gabriel Prohaska Bighetti e Gilmar Fernandes dos Santos, por todo apoio e entusiasmo.

À minha parceira, Júlia Beatriz de Anjos, por toda compreensão, força e incentivo.

Aos meus supervisores da TRESKA, André Ricardo Beim e Kira Fukushima Beim, pela paciência, cuidado e inspiração.

Ao IPEN e a Universidade de São Paulo, pela disponibilidade da infraestrutura e organização para realização das disciplinas e dos trabalhos.

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.”

- Cora Coralina, Exaltação de Aninha, 1997.

ABSTRACT

SILVA DE MELLO CARVALHO, D. **Numerical simulations of drop tests of 1:2 scale model of research nuclear reactor spent fuel element transport packaging**. 2023. 100 f. Thesis (Master degree in Nuclear Technology) – Nuclear and Energy Research Institute – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

An essential part of the development and operation of the nuclear industry, whether energy production or research, takes place through the transport of fuel elements. Both national and international institutions have standards and engineering instructions that regulate nuclear fuel transport packaging projects. In this way, it is specifically described what accidental conditions the project must withstand and, therefore, a set of tests that must be performed considering these situations. One of the most important tests is the nine-meter free fall test on a rigid surface, where the packaging must not structurally compromise its components, that is, it must guarantee radiation shielding and prevent leakage of radioactive material. Computational advances and the evolution of analysis tools allowed saving time and resources, and this work presents the bases of numerical simulations for drop testing of packaging. Through different analyses, the main control parameters of known phenomena were discussed, such as plastic deformation, contact properties and energy absorption in a qualitative way. Then, a 1:2 scale model case study of the transport packaging concept was constructed using modeling and calculation tools such as ANSYS LS-DYNA. The results of the analyzes adequately confirmed the expected phenomena for the test and allowed comparing different configurations when dealing with the use of orthotropic materials. The case study satisfactorily reproduced the behavior of the 9 m drop tests described.

Key-words: *Impact absorption; Finite element method; Nonlinear dynamics of structures; Friction contacts.*

RESUMO

SILVA DE MELLO CARVALHO, D. **Simulações numéricas de testes de queda livre de modelo escala 1:2 de embalagem de transporte de elemento combustível irradiado de reator nuclear de pesquisa.** 2023. 100 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Parte essencial do desenvolvimento e operação da indústria nuclear, seja produção de energia seja de pesquisa, ocorre através do transporte de elementos combustíveis. Tanto órgãos nacionais como internacionais, detém normas e instruções de engenharia que regulamentam projetos de embalagens de transporte de combustível nuclear. Dessa forma, é descrito especificamente a que condições acidentais o projeto deve suportar e, portanto, um conjunto de testes deve ser aplicado contemplando essas situações. Um dos testes mais importantes é o teste de queda livre de nove metros sobre superfície rígida, onde após o impacto a embalagem mantenha a integridade estrutural e funcional de seus componentes, ou seja, deve garantir a blindagem à radiação e evitar vazamento de material radioativo. O avanço computacional e a evolução de ferramentas de análises permitiram economizar tempo e recursos, e este trabalho apresenta as bases de simulações numéricas para testes de queda livre das embalagens. Através de análises distintas foram discutidos os principais parâmetros de controle dos fenômenos conhecidos, como a deformação plástica, as propriedades dos contatos e a absorção de energia de forma qualitativa. Em seguida, um caso de estudo de modelo em escala 1:2 do conceito de embalagem de transporte foi constituído através de ferramentas de modelagem e cálculo como o ANSYS LS-DYNA. Os resultados das análises confirmaram os fenômenos esperados para o ensaio adequadamente e permitiram comparar configurações diferentes quando se tratar do uso de materiais ortotrópicos. O caso de estudo reproduziu satisfatoriamente o comportamento dos testes de queda livre de 9 m descritos.

Palavras chave: *Absorção de impacto; Método dos elementos finitos; Dinâmica não-linear de estruturas; Contatos de atrito.*

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTO	15
1.2	OBJETIVO	16
1.3	ORGANIZAÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	FUNDAMENTOS	18
2.1.1	<i>Simulações numéricas</i>	18
2.1.2	<i>Método das diferenças centrais</i>	24
2.1.3	<i>Definições gerais de contato</i>	25
2.2	TRABALHOS RELEVANTES	28
2.2.1	<i>Os benchmarks de 1998 e a revisão de 2004</i>	28
2.2.2	<i>Discussões sobre madeira e a absorção de impacto</i>	28
2.2.3	<i>O desenvolvimento regional</i>	36
3	METODOLOGIA DE ANÁLISE	37
3.1	BENCHMARK 1 - QUEDA LIVRE RADIAL DE CILINDROS CONCÊNTRICOS	38
3.1.1	<i>Modelos numéricos</i>	39
3.1.2	<i>Contatos</i>	40
3.1.3	<i>Resultados e comentários</i>	41
3.2	BENCHMARK 2 - CUBO EM QUEDA LIVRE DE QUINA	45
3.2.1	<i>Modelos numéricos</i>	47
3.2.2	<i>Contatos</i>	47
3.2.3	<i>Resultados e comentários</i>	48
3.3	BENCHMARK 3 - COMPRESSÃO DE CILINDRO DE MADEIRA ENCAPSULADO	52
3.3.1	<i>Análise com contenção em elementos de casca</i>	54
3.3.2	<i>Análise com contenção em elementos sólidos</i>	57
3.3.3	<i>Análise axissimétrica</i>	60
4	CASO DE ESTUDO	66
4.1	OSB – ORIENTED STRAND BOARD – ESTIMATIVA ANALÍTICA	68
4.2	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	70
4.2.1	<i>Vertical</i>	72
4.2.2	<i>Horizontal</i>	81
4.2.3	<i>Inclinado a 47°</i>	90
5	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Análise por elementos finitos.....	20
Figura 2.2 – Espectro de modelagem	21
Figura 2.3 – Ciclo da solução	23
Figura 2.4 – Estruturas de sólidos celulares	29
Figura 2.5 – Comparação entre sólidos com poros isolados e sólidos celulares.....	30
Figura 2.6 – Seção transversal do tronco de uma árvore	30
Figura 2.7 – Macroestrutura	31
Figura 2.8 – Representação da microestrutura (esquerda), Exemplos de <i>Hardwood</i> (centro) e <i>Softwood</i> (direita)	32
Figura 2.9 - Representação da ultraestrutura	33
Figura 2.10 – Representação esquemática da composição da madeira.....	33
Figura 2.11 – Progressão de modelagem.....	34
Figura 2.12 – Comportamento das fibras para diferentes contenções laterais	35
Figura 2.13 – Tensão x deformação para compressão em diferentes direções	35
Figura 2.14 – Mecanismo de falha -Fibras não deformadas (esquerda); <i>Softwood</i> deformada (centro); <i>Hardwood</i> deformada (direita)	36
Figura 3.1 - Dimensões da geometria.....	38
Figura 3.2 – Modelos - 3D com dois planos de simetria (esquerda) e 2D Plane Strain (direita).....	39
Figura 3.3- Contagem de elementos – lado a lado, autor (esquerda) e [10] (direita).....	40
Figura 3.4 - Contatos do modelo 3D	40
Figura 3.5 - Contatos do modelo 2D	41
Figura 3.6 – Planos de interesse	42
Figura 3.7 – Comparação da deformação plástica no tempo ($Z=6m$).....	42
Figura 3.8 – Comparação da deformação plástica entre diferentes modelagens	43
Figura 3.9 – Deslocamentos no tempo dos pontos de interesse.....	44
Figura 3.10 – Deslocamentos no tempo dos pontos de interesse – comparação entre 2D e 3D	45
Figura 3.11 - Dimensões do modelo geométrico.....	46
Figura 3.12 - Avaliação dos diferentes tamanhos de elementos	47
Figura 3.13 – Contatos <i>Bonded</i> das placas rígidas (três primeiros) e de atrito no cubo com o corpo rígido (direita)	48
Figura 3.14 – Comparação do efeito da discretização no comportamento do contato.....	49
Figura 3.15 – Mapa de tensões por tamanho de elemento.....	50
Figura 3.16 – Comparação dos resultados com o meio modelo	50
Figura 3.17 – Deformação plástica no plano de simetria	51
Figura 3.18 – Composição do ensaio.....	53
Figura 3.19 – Discretização do modelo – caso controle	54
Figura 3.20 – Força de impacto no tempo - contatos.....	54
Figura 3.21 – Deslocamentos máximos – caso controle.....	55

Figura 3.22 – Deslocamento da massa de impacto – caso controle.....	55
Figura 3.23 – Velocidade vertical da massa de impacto – caso controle.....	56
Figura 3.24 – Força de impacto no tempo – caso controle.....	56
Figura 3.25 – Comparação da força de impacto - v-E – caso controle.....	57
Figura 3.26 - Discretização do modelo – caso contenção em elementos sólidos.....	57
Figura 3.27 – Deslocamentos máximos – caso contenção em elementos sólidos.....	58
Figura 3.28 – Deslocamento e velocidade da massa de impacto - caso contenção em elementos sólidos.....	58
Figura 3.29 – Comparação da força de impacto - v-E – caso contenção em elementos sólidos.....	59
Figura 3.30 – Força de impacto no tempo – caso contenção em elementos sólidos.....	59
Figura 3.31 – Modelo sem fibras e discretização geral em 0,5 mm e contenção em 0,25 mm.....	60
Figura 3.32 – Deslocamentos - caso sem fibras.....	61
Figura 3.33 – Comparação da força de impacto - v-E – caso sem Fibras.....	61
Figura 3.34 – Modelo com fibras horizontais - discretização geral em 0,16 mm.....	62
Figura 3.35 – Comparação da força de impacto - v-E – caso com fibras horizontais.....	62
Figura 3.36 – Linhas de deformação – axissimétrico com fibras horizontais.....	63
Figura 3.37 – Força de impacto no tempo – caso com fibras horizontais.....	63
Figura 3.38 – Modelo com fibras horizontais - discretização geral em 0,16 mm.....	64
Figura 3.39 – Linhas de deformação – axissimétrico com fibras verticais.....	64
Figura 3.40 – Comparação da força de impacto - v-E – caso com fibras verticais.....	65
Figura 3.41 - Força de impacto no tempo – caso com fibras verticais.....	65
Figura 4.1 - Projeto da embalagem.....	66
Figura 4.2 – Análises numéricas: Vertical (esquerda); Horizontal (centro); Inclinado 47° (direita);.....	67
Figura 4.3 – Aproximações das curvas.....	68
Figura 4.4 – Componentes do modelo analisado.....	71
Figura 4.5 – Modelo e malha de elementos finitos aplicada.....	72
Figura 4.6 – Deformação plástica do volume total.....	73
Figura 4.7 – Deformação plástica do volume útil.....	73
Figura 4.8 – Tensão equivalente de Von-Mises da proteção de chumbo.....	74
Figura 4.9 – Deslocamento em Y da proteção de chumbo.....	74
Figura 4.10 – Posição vertical do corpo central.....	75
Figura 4.11 – Velocidade vertical do corpo central.....	75
Figura 4.12 – Aceleração vertical do corpo central filtrada - 380 Hz (em vermelho).....	76
Figura 4.13 – Posição vertical do corpo central para todas as aproximações.....	76
Figura 4.14 – Velocidade vertical do corpo central para todas as aproximações.....	77
Figura 4.15 – Aceleração vertical do corpo central para todas as aproximações.....	77
Figura 4.16 – Tensões máximas na contenção para o material Linear.....	78
Figura 4.17 – Tensões máximas na contenção para o material Exponencial.....	79
Figura 4.18 – Tensões máximas na contenção para o material Perpendicular.....	79
Figura 4.19 – Tensões máximas na contenção para o material Paralelo.....	80
Figura 4.20 – Tensões máximas na contenção para o material 45°.....	80

Figura 4.21 – Modelo e malha de elementos finitos aplicada.....	81
Figura 4.22 – Deformação plástica do volume total.....	82
Figura 4.23 – Deformação plástica do volume útil aproximado.....	82
Figura 4.24 – Tensão equivalente de Von-Mises da proteção de chumbo	83
Figura 4.25 – Deslocamento em Y da proteção de chumbo	83
Figura 4.26 – Posição vertical do corpo central.....	84
Figura 4.27 – Velocidade vertical do corpo central.....	84
Figura 4.28 – Aceleração vertical do corpo central filtrada - 180 Hz (em vermelho)	85
Figura 4.29 – Posição vertical do corpo central para todas as aproximações	85
Figura 4.30 – Velocidade vertical do corpo central para todas as aproximações	86
Figura 4.31 – Aceleração vertical do corpo central para todas as aproximações	86
Figura 4.32 – Tensões máximas na contenção para o material Linear	87
Figura 4.33 – Tensões máximas na contenção para o material Exponencial.....	88
Figura 4.34 – Tensões máximas na contenção para o material Perpendicular.....	88
Figura 4.35 – Tensões máximas na contenção para o material Paralelo.....	89
Figura 4.36 – Tensões máximas na contenção para o material 45°	89
Figura 4.37 – Modelo e malha de elementos finitos aplicada ao caso Inclinado.....	90
Figura 4.38 – Deformação plástica do volume total.....	91
Figura 4.39 – Deformação plástica do volume total – vista inferior.....	91
Figura 4.40 – Tensão equivalente de Von-Mises da proteção de chumbo	92
Figura 4.41 – Deslocamento em Y da proteção de chumbo	92
Figura 4.42 – Posição vertical do corpo central.....	93
Figura 4.43 – Velocidade vertical do corpo central.....	93
Figura 4.44 – Aceleração vertical do corpo central filtrada - 180 Hz (em vermelho)	94
Figura 4.45 – Posição vertical do corpo central para todas as aproximações	94
Figura 4.46 – Velocidade vertical do corpo central para todas as aproximações	95
Figura 4.47 – Aceleração vertical do corpo central para todas as aproximações	95
Figura 4.48 – Tensões máximas na contenção para o material Linear	96
Figura 4.49 – Tensões máximas na contenção para o material Exponencial.....	97
Figura 4.50 – Tensões máximas na contenção para o material Perpendicular.....	97
Figura 4.51 – Tensões máximas na contenção para o material Paralelo.....	98
Figura 4.52 – Tensões máximas na contenção para o material 45°	98

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O transporte de substâncias radioativas é, de várias formas, necessário no contexto da utilização dos reatores nucleares e do ciclo do combustível nuclear muito importantes na geração de energia elétrica, nas aplicações nucleares com radioisótopos ou em reatores de pesquisa. Destacam-se as embalagens de transporte de elementos combustíveis irradiados pela presença de inventário de radionuclídeos com alta atividade.

A Agência Internacional de Energia Atômica descreve em [1], que no processo de licenciamento da embalagem de transporte de combustíveis irradiados devem ser realizados testes acompanhados e aprovados pela autoridade reguladora com o objetivo de validar a embalagem quanto aos aspectos de contenção do conteúdo radioativo, à subcriticalidade, à blindagem e ao controle da energia térmica residual sob condições normais e acidentais de transporte. O desafio é representado pela qualificação da integridade estrutural da embalagem sob as condições acidentais de transporte.

Assim, de forma a garantir a integridade funcional da embalagem, o teste de queda livre de nove metros de altura sobre superfície rígida normalizado pela CNEN em [2] e em linha com o [1] é um dos maiores desafios a ser vencido no projeto e qualificação.

Com o avanço nos códigos de simulações numéricas estruturais baseados no método dos elementos finitos, sobretudo com a incorporação de recursos de modelagem de não linearidades físicas (modelos de materiais) e geométricas (modelos de impactos e contatos) na Dinâmica Estrutural, podemos hoje desenvolver modelos numéricos bem detalhados que permitem avaliações refinadas e precisas de testes de queda livre de nove metros sobre superfície rígida de embalagens de transporte de elementos combustíveis irradiados. Este trabalho visa detalhar algumas das principais técnicas, e seus fundamentos, para tratar numericamente o modelo em escala 1:2 de uma embalagem nesses testes de queda livre.

Portanto, estudos mais detalhados dos fenômenos presentes no teste de queda livre de 9 m através de modelos de elementos finitos produzem uma aceleração no processo de projeto e qualificação. Ao mesmo tempo em que permitem maior acessibilidade ao desenvolvimento estratégico de melhores condições do setor nuclear.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como principal objetivo estudar o comportamento dinâmico estrutural de modelos em escala 1:2 de embalagens de transporte de elementos combustíveis em situações de queda livre de 9 metros sobre superfície rígida através do método dos elementos finitos, dando sequência a trabalhos já realizados como indicado em [3].

Como objetivos secundários serão abordados os aspectos necessários a:

1. Modelagem de não linearidades físicas (não linearidades dos materiais) e geométricas (não linearidades de contato). Ou seja, são apresentados indicadores e parâmetros de controle recomendados para análises numéricas com características semelhantes;
2. Análise estrutural dinâmica não linear com métodos explícitos. A utilização de métodos explícitos é parte relevante desse estudo pois trazem consigo robustez matemática e recursos variados de otimização;
3. Integração numérica das equações de movimento e definição de intervalos de tempo das análises estruturais dinâmicas. São estabelecidos comparativos analíticos na forma de complementação prática dos fenômenos;
4. Simulações numéricas de testes de queda livre de 9 metros sobre superfície rígida de um modelo escala 1:2 de embalagem de transporte de elementos combustíveis irradiados de reatores nucleares de pesquisa com amortecedores de impacto;
5. Avaliação de materiais como o OSB (Oriented Strand Board, *madeira*) para utilização nos amortecedores de impacto. Ao longo da reprodução de estudos fenomenológicos da física de simulações numéricas de queda livre são discutidas opções de projeto quando observadas as características de um material ortotrópico;

1.3 ORGANIZAÇÃO

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

CAPÍTULO 1: Introdução

CAPÍTULO 2: Apresentação dos fundamentos das análises e trabalhos realizados - Apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre a evolução do método dos elementos finitos e o método de cálculo aplicado, método das diferenças centrais. Explica-se de forma breve como é a metodologia de análise dinâmica não linear e como a ferramenta disponível, o ANSYS LS-DYNA, resolve este tipo de problema.

CAPÍTULO 3: Estudo de referência – Apresentação de um conjunto de análises reconhecidas por contemplar os principais fenômenos encontrados nos testes de quedas livres. Discussão de como controlá-los considerando não-linearidades de contatos e de materiais.

CAPÍTULO 4: Caso de estudo – Apresenta-se a aplicação dos métodos ao caso de estudo.

CAPÍTULO 5: Discussões e conclusões – Discussões e conclusões do trabalho realizado com comentários finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAMENTOS

Como descrito em [4], os problemas de engenharia são tratados por meio de modelos matemáticos de situações físicas. Estes modelos matemáticos, em geral, são equações diferenciais com um conjunto de condições iniciais e de contorno. As equações diferenciais são derivadas pela aplicação das leis e princípios fundamentais da natureza a um sistema, ou volume de controle. Essas equações governantes representam equilíbrio de massa, força ou energia. Quando possível, a solução exata dessas equações processa o comportamento detalhado de um sistema sob um determinado conjunto de condições.

Em [4], é possível dividir em dois conjuntos de parâmetros as influências nas formas que um sistema se comporta. Primeiro, os parâmetros que fornecem informações sobre o comportamento natural de um determinado sistema, são eles: propriedades como módulo de elasticidade; condutividade térmica; e viscosidade. E, em paralelo, os parâmetros que produzem distúrbios em um sistema, como forças externas, momentos, diferença de temperatura através de um meio e diferença de pressão no fluxo de fluido. Esses de perturbação sempre aparecerão em matrizes de carga.

Devido à natureza complexa dos fenômenos de muitos casos, as equações diferenciais governantes apresentam substancial dificuldade de gerarem soluções exatas ou mesmo de computar todas as condições de contorno iniciais ou de domínio. Dessa forma, recorreremos a aproximações numéricas que ao contrário das soluções analíticas, que mostram o comportamento exato de um sistema em qualquer ponto, as soluções numéricas aproximam as soluções exatas apenas em pontos discretos, chamados nós e o primeiro passo de qualquer procedimento numérico é a discretização esse processo divide o meio de interesse em um número de pequenas sub-regiões e respectivos nós.

2.1.1 Simulações numéricas

Existem duas classes comuns de métodos numéricos: (1) métodos de diferenças finitas e (2) métodos de elementos finitos. Com métodos de diferenças finitas, a equação das diferenças é escrita para cada nó e os termos derivativos são substituídos por equações diferenciais, em que são consideradas as diferenças entre nós. Essa abordagem resulta em um conjunto de

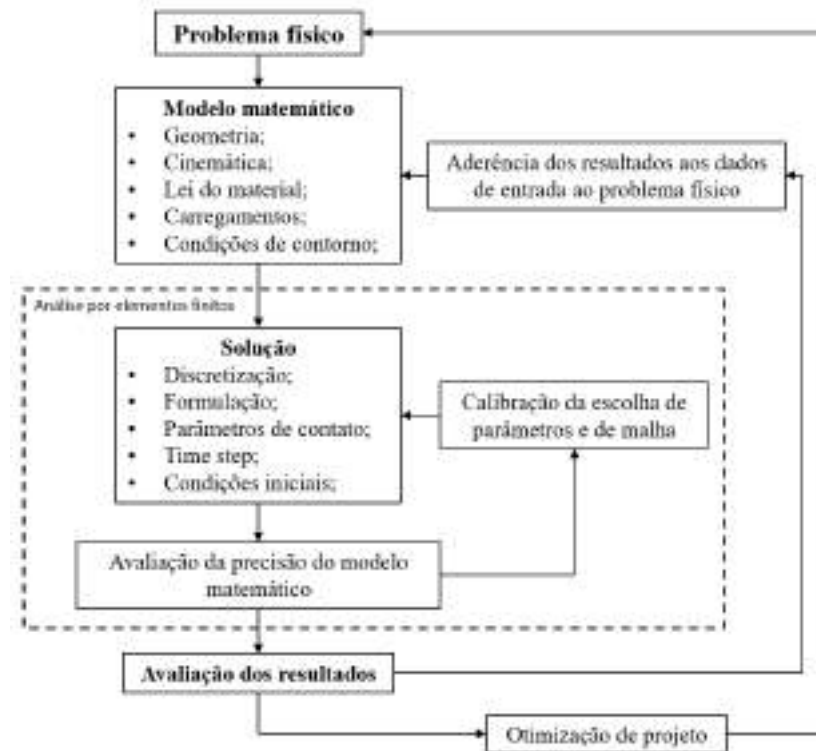
equações lineares simultâneas. Embora os métodos de diferenças finitas sejam fáceis de entender e empregar em problemas simples, eles se tornam difíceis de aplicar a problemas com geometrias complexas ou condições de contorno complexas. Essa situação também é verdadeira para problemas com propriedades de materiais não isotrópicos. Por outro lado, o método dos elementos finitos usa funções de integração em vez de equações diferenciais para criar um sistema de equações algébricas. Além disso, supõe-se que uma função contínua aproximada represente a solução para cada elemento. A solução completa é gerada conectando as soluções individuais, permitindo a continuidade elemento a elemento.

Segundo [5], o aparato matemático usado para descrever o meio contínuo evoluiu para atingir hoje um alto nível de complexidade com múltiplas formulações. O tempo e os custos do ciclo computacional também são reduzidos continuamente por melhorias sustentáveis em ferramentas de projeto e análise auxiliadas por computador. De maneira semelhante, os recursos de modelagem de elementos finitos evoluíram com a tecnologia, avançando com crescimento exponencial dos detalhes do modelo ao longo das últimas décadas. A formulação explícita do método dos elementos finitos é usada para análise de acidentes, tendo um caráter dinâmico transiente não linear.

A compreensão dos processos por trás de uma análise da modelagem por elementos finitos começa no básico da discretização do meio contínuo. A análise de impacto requer uma formulação de análise dinâmica, que contemple os movimentos do corpo e um tipo explícito dinâmico transiente não linear de análise de elementos finitos. Ou seja, a dependência não linear descreve a relação entre as condições aplicadas e os efeitos resultantes (por exemplo, superfícies em contato mudam no tempo ou com grandes deformações), portanto, é necessária uma análise não linear neste caso, uma vez que grandes quantidades de deformação plástica ocorrem na maioria dos cenários de colisão.

O processo de análise por elementos finitos em condições dinâmicas pode ser descrito como na Figura 2.1.

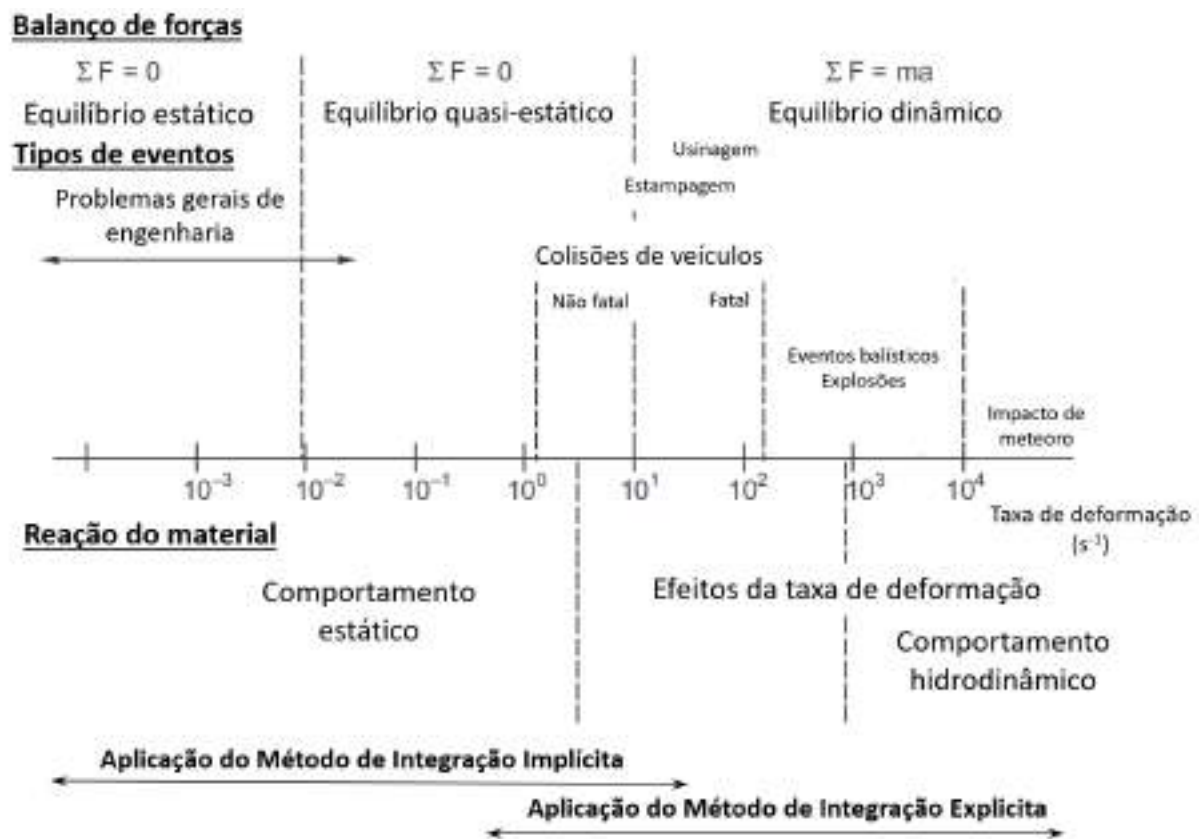
Figura 2.1 – Análise por elementos finitos



Fonte: BATHE, K. J. *Finite Element procedures* [6], modificado

De [7], o caráter transiente (com integração do tempo) da análise é devido às deformações do movimento e do corpo que são dependentes do tempo. Em situações de impacto, o intervalo de tempo é curto. A formulação explícita da análise de elementos finitos é uma abordagem matemática específica, usada principalmente para cenários de alta velocidade onde muito se acontece em uma janela de tempo pequena. A Figura 2.2 apresenta a relação de fenômenos variados e a respectiva taxa de deformação.

Figura 2.2 – Espectro de modelagem



Fonte: RAO, NARAYANAMURTHY e SIMHA, *Applied Impact Mechanics* [7], modificado

De todas as características e escolhas de modelagem de um problema de colisão destaca-se a previsão dos fenômenos não lineares envolvidos no problema físico. Essas não linearidades ocorrem frequentemente combinadas, são elas as mais comuns: plasticidade; grandes deslocamentos; e os efeitos derivados do contato de atrito entre os corpos. Estas quais podem ser agrupadas em três categorias:

- Não linearidade geométrica, em que se entende a ocorrência de grandes deslocamentos;
- Contato não linear de atrito, este permite múltiplas formas de interações entre corpos;
- Não linearidade de material devido a plasticidade, associada a significativa energia de impacto;

Essas não linearidades representam objetivamente mudanças na rigidez do modelo matemático no decorrer da análise e devem ser consideradas quando pertinente ao caso físico.

De [8], a solução de problemas dinâmicos de sistemas lineares é dada pela equação do movimento:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (2.1)$$

Onde: [M] = matriz de massa; [C] = matriz de amortecimento; [K] matriz de rigidez; $\{\ddot{u}\}$ vetor aceleração; $\{\dot{u}\}$ vetor velocidade; $\{u\}$ vetor deslocamento; $\{F(t)\}$ vetor de forças aplicadas; as matrizes [M], [C] e [K] são escritas em $m \times m$, onde m é o número de graus de liberdades dos nós de cada elemento.

A equação de equilíbrio torna-se não linear quando a matriz de rigidez [K] é dependente do deslocamento $\{u\}$ variando no tempo, ou de suas derivadas.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K(x(t))]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (2.2)$$

Conforme [8], matematicamente temos um sistema de equações lineares e, em princípio, a solução para tais equações podem ser obtida através de procedimentos padrões de solução de equações diferenciais. No entanto, em modelos de geometrias complexas em que há grande variação no tamanho dos elementos, temos as matrizes $m \times m$ muito grandes que inviabilizam esse tipo de abordagem. Para tanto, outros procedimentos para solução de equações são considerados, como métodos de integração direta no tempo, no caso do ANSYS LS-DYNA temos o método de diferenças centrais.

A análise dinâmica explícita não linear é uma metodologia de análise robusta e eficiente usada para modelar eventos dinâmicos de curta duração e com alta energia, como colisões e impactos, explosões, testes de queda, balística e conformação de metais. E assim, tem sido usada para determinar a resposta dinâmica de estruturas devido à propagação de ondas de tensão, impacto ou mudanças rápidas das cargas dependentes do tempo.

Figura 2.3 – Ciclo da solução



Fonte: *ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide* [9], modificado

É definido o estado inicial uma vez que o modelo seja discretizado adequadamente e com as propriedades de material atribuídas, cargas, restrições e condições iniciais. Este estado inicial, quando integrado no tempo, produzirá movimento nos nós que ocasionará a deformação nos elementos da malha. Essa deformação resulta em uma mudança no volume (portanto, densidade) do material em cada elemento. A mudança de volume por tempo descreve uma taxa de deformação que é usada para derivar as taxas de deformação do material usando as várias formulações dos elementos. As leis constitutivas incorporam as taxas de deformação do material e derivam as tensões do material resultantes que são transformadas de volta em forças nodais usando, novamente, as formulações dos elementos. As forças nodais externas são calculadas a partir de condições de contorno, cargas e contato, e divididas pela massa nodal para produzir acelerações nodais. Estas são integradas explicitamente a tempo de produzir novas velocidades nodais, e então novamente integradas explicitamente a tempo de produzir novas posições nodais. Este procedimento é reproduzido a cada ciclo até que o tempo definido pelo usuário seja alcançado.

2.1.2 Método das diferenças centrais

Em [8], podemos observar o procedimento para a integração, as equações semi-discretas de movimento no tempo n são:

$$[M]a^n = [P]^n - [F]^n + [H]^n, \quad (2.3)$$

Onde: $[M]$ é a matriz de massa diagonal, $[P]^n$ é responsável pelas cargas de forças externas e inerciais, $[F]^n$ é o vetor de divergência de tensão partindo do estado de repouso e $[H]^n$ é a resistência à formação de *Hourglass* dos elementos.

Para avançar no tempo t^{n+1} , usamos a integração no tempo de diferenças centrais:

$$a^n = [M]^{-1}([P]^n - [F]^n + [H]^n), \quad (2.4)$$

$$v^{n+\frac{1}{2}} = v^{n-\frac{1}{2}} + a^n \Delta t^n, \quad (2.5)$$

$$u^{n+1} = u^n + v^{n+\frac{1}{2}} \Delta t^{n+\frac{1}{2}}, \quad (2.6)$$

Onde,

$$\Delta t^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\Delta t^n + \Delta t^{n+1}}{2} \quad (2.7)$$

Sendo u e v os vetores globais de deslocamento e velocidade nodais, respectivamente. A posição é atualizada adicionando os incrementos de deslocamento à geometria inicial, de forma que:

$$x^{n+1} = x^0 + u^{n+1} \quad (2.8)$$

Contudo, é importante destacar que na composição da integração no tempo é determinado um *timestep* crítico para estabilizar a solução, que depende diretamente da frequência máxima do sistema. Este *timestep* crítico pode ser amortecido e é considerado inicialmente como resultado do tempo definido pelo usuário.

Também em [9], temos além da estabilidade da solução, o controle do tamanho do *timestep* a partir da condição de Courant-Friedrichs-Lewy que implica na limitação do *timestep* para que o mesmo seja inferior ao tempo em que a onda de choque, ou onda de tensão, leva para percorrer o menor comprimento característico dos elementos do modelo.

$$\Delta t \leq f \times \left[\frac{h}{c} \right] \quad (2.9)$$

Sendo: Δt o incremento no tempo, *timestep*; f o fator de estabilidade; h a dimensão característica do elemento; e c a velocidade do som no material do elemento.

Para o cálculo de h são consideradas as características dos elementos, ou seja, se são elementos sólidos ou de cascas, se tetraedros ou hexaédricos, ou mesmo elementos de viga. Essa mesma avaliação é feita para os contatos de penalidade, contudo nestes há outras considerações que também impactam no *timestep* e por consequência o tempo total da análise.

Há também o parâmetro em que, quando habilitado, adiciona localmente massa nos menores elementos do modelo numérico a fim de aumentar o *timestep*. Este é chamado de *Automatic Mass-Scaling*.

2.1.3 Definições gerais de contato

De [8], os algoritmos de contatos são divididos em três diferentes métodos e cada qual com suas características, são eles: de restrição cinemática, de penalidade e de distribuição de parâmetro. O primeiro impõe restrições nas equações globais através de uma transformação das componentes dos deslocamentos nodais dos nós das interfaces de contato que elimina o grau de liberdade normal aos nós. Contudo, este método por vezes depende de uma discretização mais refinada ou mesmo da quantidade de pontos de quadratura de gauss para não apresentar distorções locais de contato. O segundo, e mais usado, o contato por método de penalidade, consiste na inclusão de mola normais as interfaces de contato aos nós e as superfícies. Essa mola elástica é de toda forma uma rigidez entre os nós e os elementos que devem entrar em contato, ou seja, transferir momento e gerar atrito ao mesmo que controla a penetração. Idealmente não se espera penetração entre os corpos, contudo se a rigidez tender ao infinito é esperado que apareçam instabilidades numéricas. Dessa forma, a formulação do contato de penalidade permite que a rigidez do contato se aproxime da ordem de magnitude da rigidez dos elementos das interfaces normais, ou seja, há a um tendencia de não se prejudicar o *timestep*.

No entanto, se a pressão de contato for muito elevada é esperada alguma penetração e, portanto, se é recomendado fazer uma avaliação quantitativa dos resultados locais e se necessário ajustar os parâmetros. Adicionalmente, o método de penalidade pode ser aplicado em três formulações: padrão, baixa restrição e de segmento. O contato de formulação de penalidade de baixa restrição é especialmente concebido para melhor ponderar as instabilidades de contato e rigidez entre materiais de propriedades dissimilares, por exemplo aço e espumas.

O terceiro algoritmo de contato é, objetivamente, o contato que permite apenas deslizamento entre os corpos ou superfícies de contato. Este distribui metade da massa dos elementos escravos da interface na superfície master, além de impedir a penetração informa aos vetores velocidade e aceleração dos nós escravos para que percorram a superfície master.

Neste trabalho, as análises se deram através de contatos variados e serão apontados caso a caso.

As formulações de contato dizem respeito ao tratamento do fenômeno e a formas de controlá-los, porém não menos importante, é preciso caracterizar os corpos de contato para se atribuir adequadamente as propriedades da interface. Estas características são: contato de superfície simples; contato de superfícies para superfícies; e contato de corpos lineares com corpos lineares (segmentos ou elementos de viga). Esses, e outros, conforme [8], estabelecem procedimentos específicos de detecção de superfícies, de nós ou de segmentos.

Entre os mais usados, e também aplicado aqui, está o contato automático de superfície para superfície que além da definição ampla quanto aos corpos em contato, atribui automaticamente às interfaces de contato quais superfícies serão consideradas master e quais serão escravas. Este é altamente recomendado para casos em que há múltiplas superfícies em contato e ao longo da configuração do modelo não há clareza para determinação de quais corpos entraram em contato e de quê direção.

Os contatos de atrito são baseados na formulação de Coulomb e utilizam o equivalente a uma mola elastoplástica. O atrito é configurado fornecendo valores diferentes de zero para os coeficientes de atrito estático e dinâmico, ou então apenas um coeficiente de atrito constante.

Por se tratar de um contato recorrente aplicado a situações de impacto, a descrição detalhada do algoritmo de contato por atrito, pode ser consultada em [8]. Contudo, de forma objetiva, está descrita a seguir.

A força de escoamento das superfícies se dá através do coeficiente de atrito atuante multiplicado pela força normal entre os dois corpos. Porém deve ser incorporado ao código a dependência no tempo dessa força normal. É importante destacar a influência dos coeficientes

de atrito estático e dinâmico, uma vez que a força resultante deve modelar a resistência aos incrementos de deslocamento dos nós da interface de contato, assim como a velocidade relativa entre os mesmos. Essa velocidade relativa está diretamente relacionada ao *timestep*, uma vez que resulta dos incrementos de deslocamentos. A cada *timestep*, ou loop de cálculo, a força resultante é testada a fim de verificar o quanto as superfícies vão escorregar entre si, considerando a variação de atrito estático para o dinâmico. Juntamente da velocidade relativa, um decaimento da relação de atrito também é considerado.

Conforme [8], é possível que como resultado do atrito apareçam tensões de cisalhamento na interface muito alta, excedendo os limites do material, aplica-se outro limite para o valor da força tangencial:

$$f^{n+1} = \min (f_{\text{Coulomb}}^{n+1}, \kappa A_{\text{master}}), \quad (2.10)$$

onde A_{master} é a área do segmento *master* e κ é o coeficiente de viscosidade. Como mais de um nó pode, em alguns casos, contribuir para a tensão de cisalhamento de um segmento, é importante avaliar se a tensão excedeu o limite κ .

2.2 TRABALHOS RELEVANTES

2.2.1 Os benchmarks de 1998 e a revisão de 2004

Em 1998, a ausência de instruções normalizadas de cálculo para o projeto de dispositivos de transporte de elementos combustíveis motivou os autores de [10] a propor um estudo envolvendo diversos outros grupos de especialistas e os diversos códigos disponíveis na época. Esse estudo vieram a se tornarem instruções e permitem a capacitação através da reprodução e controle dos fenômenos envolvidos neste tipo de cálculo ao mesmo tempo que normaliza critérios de avaliação em análises numéricas. Em 2004 [11], os resultados de [10] foram revisados em um trabalho publicado em simpósio e em que se aproveitou a divulgação para complementar os dados discutidos. As análises desses trabalhos foram reproduzidas no Capítulo 3 na forma de metodologia de análise, com a ampliação das alternativas atualizadas da plataforma de cálculo ANSYS LS-DYNA.

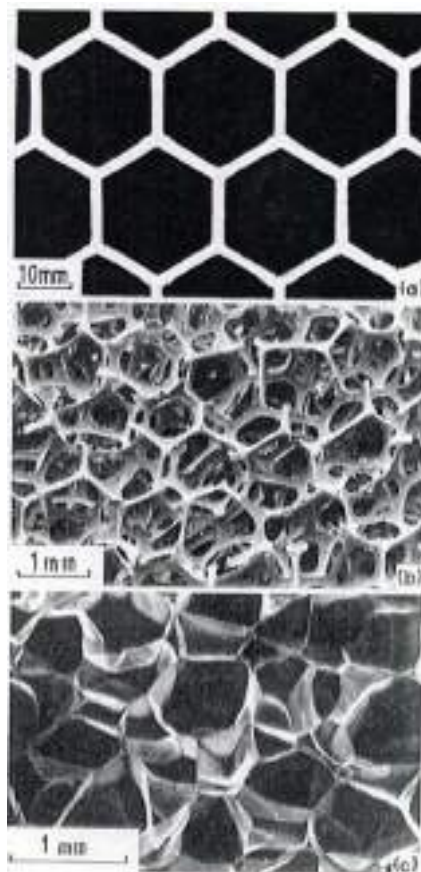
2.2.2 Discussões sobre madeira e a absorção de impacto

Os materiais frequentemente usados para amortecedores de transporte de substâncias radioativas incluem várias espumas, *Honeycombs* de alumínio e aglomerados de madeira. Misturas coladas (aglomerado, MDF) e estruturas de aço ou chapa são usadas com menos frequência, segundo [12]. Os materiais mais usados fazem parte do grupo de corpos sólidos celulares, que como apresentado mais adiante se aproximam a compósitos.

De [12], os materiais amortecedores são geralmente selecionados em termos de custos, desempenho, disponibilidade e resistência ao fogo. Porém, a familiaridade com o material desempenha um papel importante pois certos materiais são preferidos em vários países, dependendo do conceito fundamental de embalagem e estratégia de transporte. Por exemplo, fabricantes de embalagens alemães, franceses e japoneses geralmente usam amortecedores de madeira; o Reino Unido e os EUA usam sobretudo *honeycombs* de alumínio, estruturas de aço ou estruturas de chapa metálica e espumas de poliuretano. No entanto, necessário ponderar que apenas estimativas da capacidade de desempenho de uma peça de absorção de choque baseada apenas nos materiais utilizados seria inexata, no sentido de que os conceitos de amortecedores, combinados com os conceitos de projeto de engenharia de segurança das embalagens, é o que se traduzirá na segurança de contenção do elemento combustível.

De [13], para iniciar o tratamento da madeira, precisamos primeiro definir o que são sólidos celulares. Este é composto de uma rede interconectada de suportes ou placas sólidas que formam as bordas e faces das células. Podem ser encontrados em três estruturas típicas, conforme demonstrado na Figura 2.4. O mais simples, Figura 2.4(a), é formada por uma matriz de polígonos bidimensionais que se agrupa para preencher uma área plana com materiais celulares hexagonais como ‘favos de mel’, ou *honeycombs*. Mais comumente, as células são poliedros que se agrupam em três dimensões para preencher o espaço; chamamos esses materiais celulares tridimensionais de espumas. Se o sólido do qual a espuma é feita estiver contido apenas nas bordas das células (para que as células se conectem através de faces abertas), diz-se que a espuma é de célula aberta, Figura 2.4(b), ou poros abertos. Se as faces também são sólidas, de modo que cada célula é selada de seus vizinhos, é dito que é de célula fechada, Figura 2.4(c); e, é claro, algumas espumas estão parcialmente abertas e parcialmente fechadas.

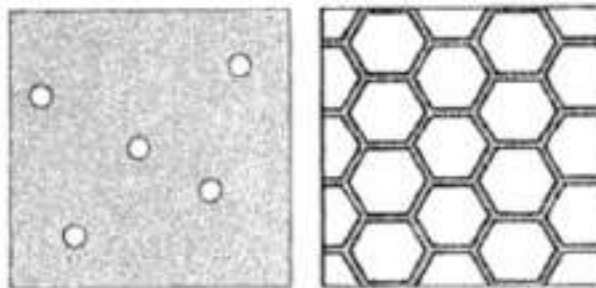
Figura 2.4 – Estruturas de sólidos celulares



Fonte: GIBSON, L.J. e ASHBY, M.F. - *Cellular Solids* [13]

Em [13], é considerado que a característica mais importante do sólido celular é sua densidade relativa, ou seja, a densidade do material celular dividido pela do sólido a partir do qual as paredes celulares são feitas. Espumas especiais de densidade ultrabaixa podem ser produzidas com uma densidade relativa tão baixa quanto 0,001. As espumas poliméricas usadas para amortecimento, empacotamento e isolamento têm densidades relativas que geralmente estão entre 0,05 e 0,2; a cortiça é de cerca de 0,14; e madeira de gimnospermas, como pinheiros e abetos, que estão entre 0,15 e 0,4. À medida que a densidade relativa aumenta, as paredes celulares engrossam e o espaço poroso diminui; acima de 0,3, há uma transição de uma estrutura celular para uma que é melhor considerada como um sólido contendo poros isolados, conforme ilustrado pela Figura 2.5.

Figura 2.5 – Comparação entre sólidos com poros isolados e sólidos celulares



Fonte: GIBSON, L.J. e ASHBY, M.F. - *Cellular Solids* [13]

A estrutura da madeira pode ser subdividida em macro, visível a olho nu ou na lupa, micro, visível no microscópio, e ultraestrutura, visível no microscópio eletrônico. A Figura 2.6 apresenta a estrutura macroscópica da madeira por meio de um perfil através do tronco.

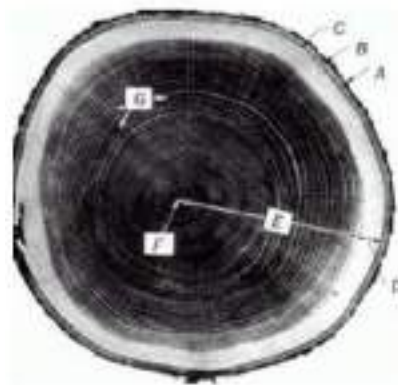
Figura 2.6 – Seção transversal do tronco de uma árvore



Fonte: NAIRN, John A., *Numerical Modeling of Wood or Other Anisotropic, Heterogeneous and Irregular Materials* [14]

Na Figura 2.7, podemos identificar sua macroestrutura se olharmos para o perfil através de um tronco, indo de fora para dentro, podemos ver as seguintes áreas: (A) casca exterior cuja espessura varia muito, dependendo do tipo e idade da árvore e (B) casca interna que cuida do transporte da nutrição das folhas para as áreas de crescimento da árvore. O câmbio (C) é uma camada muito fina que constitui a transição entre a casca e o alburno. Este é o lugar onde a maior parte do crescimento lateral ocorre. O perfil de madeira do tronco pode ser subdividido em alburno (D), responsável pelo transporte nutricional das raízes até as folhas, e cerne (E), cujas células não cuidam mais das tarefas do alburno. A relação entre o alburno e o cerne varia muito, dependendo do tipo, velocidade de crescimento e idade da árvore. Com exceção das árvores muito jovens, a participação do alburno é de 10% a 60% do raio. O alburno e o cerne de novo podem ser subdivididos em estruturas periódicas, os anéis anuais. Anéis anuais resultam de diferentes condições de crescimento no início e no final da estação de crescimento dentro de um ano. Por exemplo, em espécies de florestas tropicais, geralmente não é possível encontrar anéis de crescimento devido ao crescimento durante todo o ano. A área interna e brilhante de um anel anual é chamada de madeira precoce (*Earlywood*) e geralmente tem cavidades maiores e espessura da parede celular pequena quando comparada à madeira mais escura que é encontrada no final de uma estação de crescimento (*Latewood*). A transição entre madeira precoce e tardia é normalmente relativamente abrupta, mas depende da espécie da madeira e das condições de crescimento. Apresentação clara da transição do *Earlywood* (F) para a *Latewood* (S). Raias de madeira (G) são usadas para o transporte e depósito de nutrientes; no plano horizontal, eles apontam radialmente para fora e conectam várias camadas de medula até a casca. [24]

Figura 2.7 – Macroestrutura

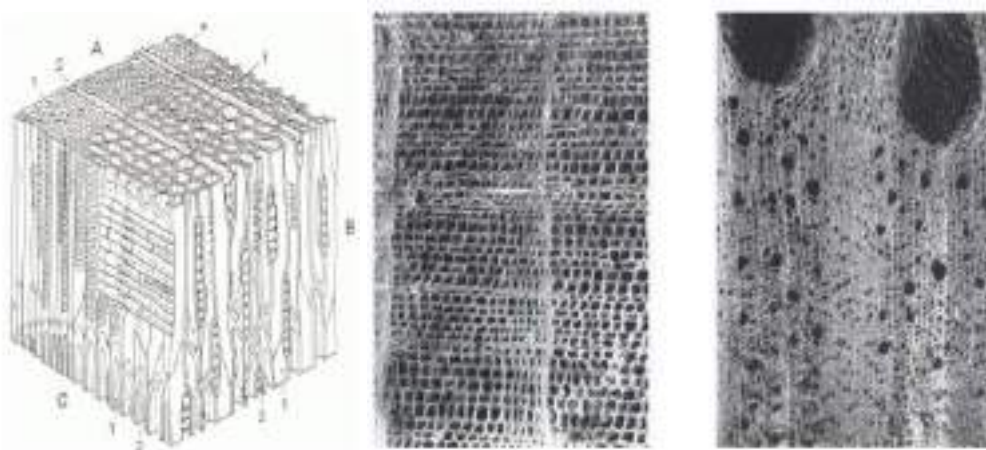


Fonte: NEUMANN, Martin, *Investigation of the Behavior of Shock-Absorbing Structural Parts of Transport Casks Holding Radioactive Substances in Terms of Design Testing and Risk Analysis* [12]

A madeira é um material celular no nível microscópico. Os prismas muitas vezes de formato hexagonal têm principalmente cavidades vazias ou parcialmente preenchidas com metil celulose ou resíduos de resina. A relação entre a espessura da parede da madeira e a espessura da parede da célula está entre 0,05 (para *Ochroma lapopus*) e 0,80 (para *Guaiacum Officinale*). As células mais longas, que nas extremidades são pontudas, são chamadas de traqueoides.

A estrutura de madeira dura e macia pode ser diferenciada no nível microestrutural. No caso da madeira macia, falamos de traqueoides e raios de madeira; no caso das madeiras duras, distinguimos entre fibras, vasos e raios de madeira.

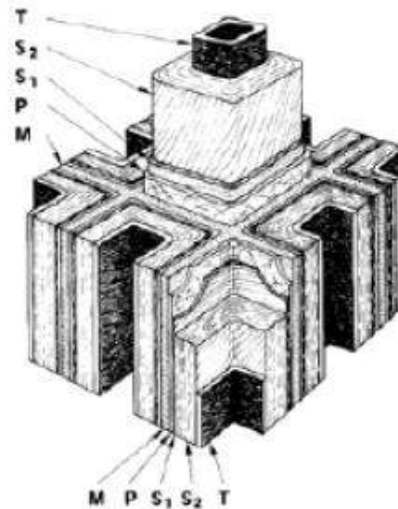
Figura 2.8 – Representação da microestrutura (esquerda), Exemplos de *Hardwood* (centro) e *Softwood* (direita)



Fonte: NEUMANN, Martin, *Investigation of the Behavior of Shock-Absorbing Structural Parts of Transport Casks Holding Radioactive Substances in Terms of Design Testing and Risk Analysis* [12]

Conforme apresentado na Figura 2.9, em sua ultraestrutura a madeira pode ser interpretada como um compósito reforçado com fibra. Os principais componentes são celulose, hemicelulose e lignina. Com um peso de cerca de 40-45%, a celulose ($C_6H_{10}O_5$)_n constitui a substância básica para a representação da fibra. Com uma estrutura cristalina, a molécula de celulose forma arranjos amorfos (microfibrilas) que formam as fibras reais nas várias camadas das paredes celulares da madeira. A hemicelulose, que junto com a lignina pode ser considerada a matriz, assim como a celulose, é composta de carboidratos. Em contraste com o nível de polimerização da celulose (cerca de 8.000-10.000 unidades), o nível de polimerização da hemicelulose é definitivamente menor (<200 unidades). A lignina consiste em uma molécula complexa, tridimensional, com grupos fenila e, em contraste com a celulose, não é cristalina.

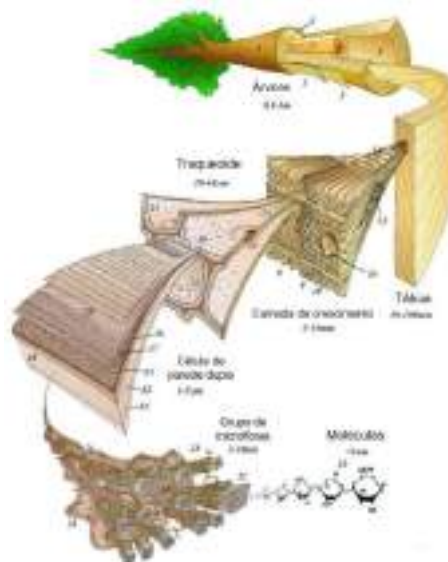
Figura 2.9 - Representação da ultraestrutura



Fonte: NEUMANN, Martin, *Investigation of the Behavior of Shock-Absorbing Structural Parts of Transport Casks Holding Radioactive Substances in Terms of Design Testing and Risk Analysis* [12]

Os componentes e, sobretudo, as formas de interpretação das diferentes estruturas da madeira demonstram a complexidade de se estabelecer um modelo matemático através de equações constitutivas realista. No entanto, esforços foram feitos em ao menos mapear as principais características para que quando necessário, sejam feitas as escolhas mais adequadas de modelagem.

Figura 2.10 – Representação esquemática da composição da madeira

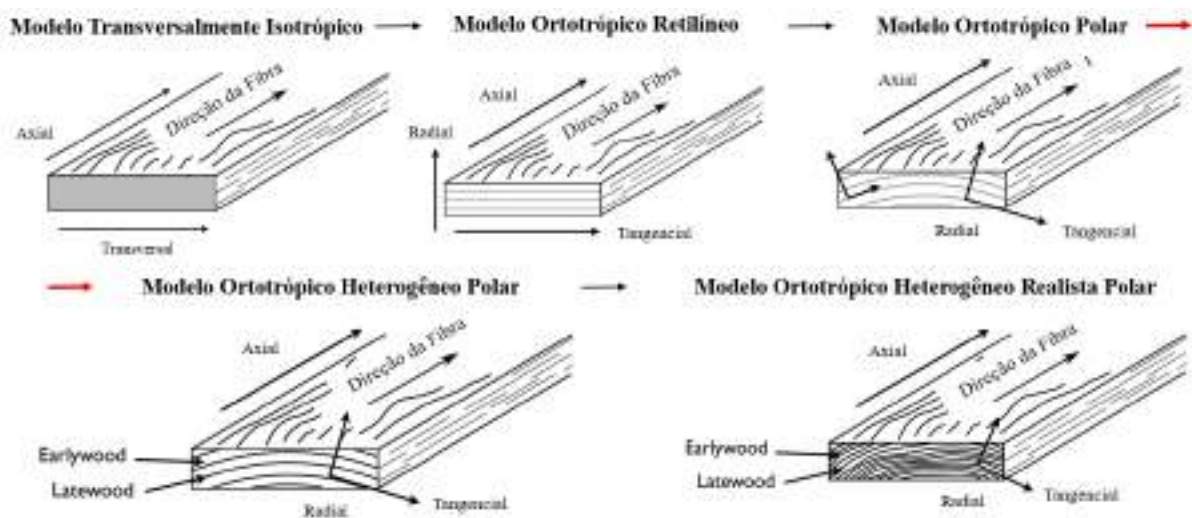


Fonte: NAIRN, John A., *Numerical Modeling of Wood or Other Anisotropic, Heterogeneous and Irregular Materials* [14]

A progressão na complexidade do modelo é dependente diretamente do fenômeno que se espera representar. Contudo quando se trata da discretização necessária para representá-lo, por vezes, mesmo com a capacidade do hardware atual ainda se encontram limitações.

A Figura 2.11 resume a progressão, em que se separa por: propriedade do material (elasticidade, viscoelasticidade, plasticidade, umidade, temperatura), anisotropia (longitudinal, radial e tangencial), estrutura (ortotrópico polar, direção dos grãos, densidade, estrutura celular, nós) e heterogeneidade (*Earlywood*, *Latewood*, fibras, células dos raios, cerne, nós).

Figura 2.11 – Progressão de modelagem

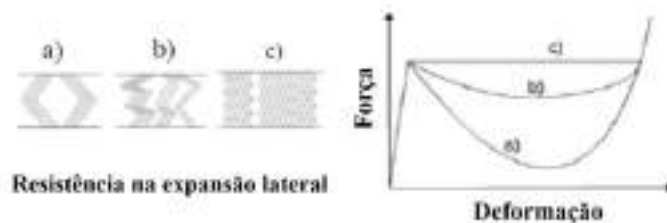


Fonte: NAIRN, John A., *Numerical Modeling of Wood or Other Anisotropic, Heterogeneous and Irregular Materials* [14], modificado

Diferentemente de outras aplicações cujo o uso da madeira se faz até o momento de sua ruptura, para o caso do desenvolvimento de absorvedores de choque é possível identificar um potencial considerável de absorção mesmo após múltiplas fraturas. Neste sentido, se faz necessário estudar o processo desde o rompimento da microestrutura até a macro, reação das fibras e por consequência, selecionar o modelo mais adequado de material para modelagem numérica. O software de modelagem numérica aplicado aqui é o ANSYS LS-DYNA e como descrito em [8] possui uma biblioteca ampla de opções de materiais. Sobretudo, opções para madeira a depender do fenômeno de interesse e as simplificações escolhidas, dentre os exemplos estudados por [12] destacam-se MAT075 e o MAT143. Este último, é específico para madeira e até a data da publicação do estudo não havia sido documentado adequadamente para que fosse devidamente apresentado pelo autor.

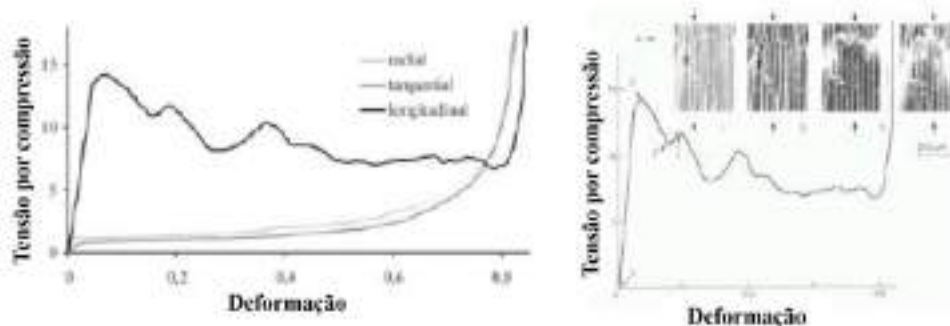
Ao mesmo tempo, em [12], foi identificado que um dos principais fatores da absorção de energia após a fratura é a contenção da expansão lateral do volume em compressão que impõem um comportamento de rotação local das fibras e assim não se observa mais a mudança de orientação da mesma de axial para radial/tangencial, melhorando sua resistência a compressão axial, como demonstrado na Figura 2.12. Ou seja, é entendido que as fibras da madeira em compressão axial quando contidas lateralmente oferecem maior potencial de absorção de energia do que quando livres. Dessa forma, é possível inferir que as características de cada espécie e região (clima e ciclos de crescimento) de formação da madeira pode oferecer propriedades de absorção de energia distintas.

Figura 2.12 – Comportamento das fibras para diferentes contenções laterais



Fonte: NEUMANN, Martin, *Investigation of the Behavior of Shock-Absorbing Structural Parts of Transport Casks Holding Radioactive Substances in Terms of Design Testing and Risk Analysis* [12], apud [15], modificado

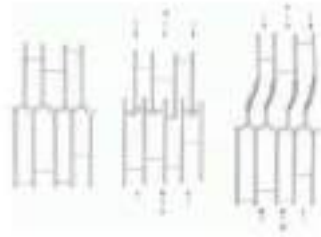
Figura 2.13 – Tensão x deformação para compressão em diferentes direções



Fonte: NEUMANN, Martin, *Investigation of the Behavior of Shock-Absorbing Structural Parts of Transport Casks Holding Radioactive Substances in Terms of Design Testing and Risk Analysis* [12], apud [15], modificado

A Figura 2.13 apresenta o desempenho diferencial do ponto de vista da tensão por deformação entre direções de compressões diferentes. Da mesma forma, a Figura 2.14 apresenta uma comparação esquemática dos mecanismos de falha entre as duas principais microestruturas da madeira, *Softwood* e *Hardwood*.

Figura 2.14 – Mecanismo de falha -Fibras não deformadas (esquerda); *Softwood* deformada (centro); *Hardwood* deformada (direita)



Fonte: NEUMANN, Martin, *Investigation of the Behavior of Shock-Absorbing Structural Parts of Transport Casks Holding Radioactive Substances in Terms of Design Testing and Risk Analysis* [12], apud [15]

Objetivamente, segundo [12] e [15], os fatores que influem os maiores desafios são: a posição da fibra – as curvas de axial para transversal (radial/tangencial) podem variar substancialmente, por um fator de até 10, a depender da espécie; a densidade – variação da densidade, densificação; a temperatura – acredita-se geralmente que a causa é representada pelas forças de atração intermolecular (pontes de hidrogênio), que são enfraquecidas pela frequência das oscilações atômicas ou moleculares causadas pela temperatura. A magnitude da influência é adicionalmente uma função da forma da amostra com a qual as características são determinadas (-20°C a 60°C – 40%; -20°C a 150°C – 55% do Módulo de Elasticidade); a umidade – a madeira deve ser entendida como uma substância parcialmente porosa, higroscópica (absorve umidade do ar) e capilar. A proporção de cavidades na média é de 50 a 60% do volume. A madeira pode adquirir e armazenar água por meio de processos de absorção e transporte capilar;

2.2.3 O desenvolvimento regional

Com o suporte da Agência Internacional de Energia Atômica desde 2001 para a América Latina, projetos de armazenagem e transporte de combustível nuclear irradiado vêm sendo desenvolvidos, e trabalhos como [3], [16], [17], [18], [19], [20] e [21] foram publicados. Com destaque para [16] que agrupou e detalhou o arcabouço bibliográfico para o desenvolvimento dos trabalhos seguintes. De forma que, no passar da última década, o avanço computacional e estratégicos investimentos permitiram novos estudos numéricos e campanhas de testes. Portanto, no capítulo 4 deste trabalho, é apresentada uma metodologia atualizada para desenvolvimento de um modelo numérico detalhado.

3 METODOLOGIA DE ANÁLISE

O desenvolvimento de códigos para cálculos estruturais mais robustos acompanhou a evolução computacional das últimas duas décadas. O que permitiu melhores resultados em modelos matemáticos complexos, em contrapartida, exigem domínio e compreensão da física do problema por parte do usuário. Nesse processo, o ANSYS LS-DYNA que é o resultado da integração do código LS-DYNA desenvolvido pela Livermore Software Technology Corporation, com a interface do ANSYS Workbench permite um amplo e ágil desenvolvimento de novas abordagens.

Neste capítulo será apresentado um mapa de simulações numéricas utilizando o ANSYS LS-DYNA para reproduzir, inicialmente, os resultados de [10] e então a suas aplicações para a qualificação de embalagens de transporte de elementos combustíveis irradiados.

Conforme previsto em [10], o aprimoramento computacional permitiu a otimização do processo de modelagem observando a economia de recursos e, portanto, beneficiou aqueles que propõem novos projetos. O estudo a seguir descreve alternativas para capturar os principais fenômenos encontrados. Cada caso de benchmark representa um conjunto de físicas que precisam ser consideradas e controladas para então se aplicar ao modelo numérico mais representativo de embalagem.

Este capítulo é dividido em Benchmark 1, 2 e 3 e, respectivamente, em tradução livre de [10], Queda Livre de Cilindros Concêntricos, Cubo em Queda Livre de Quina e Compressão Axial de Cilindro de Madeira Encapsulado.

3.1 BENCHMARK 1 - QUEDA LIVRE RADIAL DE CILINDROS CONCÊNTRICOS

Como em reatores nucleares e, por consequência, embalagens de transporte e armazenamento, a geometria deste caso é cilíndrica, de aço e envolvendo um cilindro interno concêntrico de Chumbo. Neste caso, a condição de impacto ocorre pela lateral em uma superfície plana rígida após uma queda de nove metros da embalagem cilíndrica de uma embalagem de transporte de elemento combustível. Foram realizados aqui, estudos com a modelagem nas condições 2D e 3D estabelecendo assim uma comparação do custo computacional e tempo de configuração da análise.

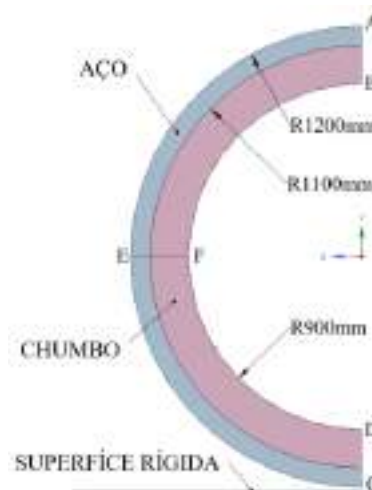
A Tabela 3.1 apresenta as propriedades dos materiais utilizados na simulação numérica, assim como a Figura 3.1 apresenta as dimensões da geometria estudada.

Tabela 3.1 - Propriedades dos Materiais

Material	E [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	σ_y [N/m ³]	σ_{encru} [N/m ³]	ν	Comportamento
Aço	2.10E+11	7850	2.00E+08	1.00E+09	0.30	Bilinear elasto-plástico
Chumbo	1.70E+10	11340	1.90E+06	7.90E+08	0.45	

Fonte: OAPIL, GNB, *Evaluation of Codes for Analyzing the Drop Test Performance of Radioactive Material Transport Containers*, [10]

Figura 3.1 - Dimensões da geometria



Fonte: Autor

3.1.1 Modelos numéricos

O caso descrito no Benchmark 1 permite que sejam estudadas formas diferentes de modelagem do problema. As análises realizadas foram: 3D com dois planos de simetria e 2D *Plane Strain*; conforme Figura 3.2.

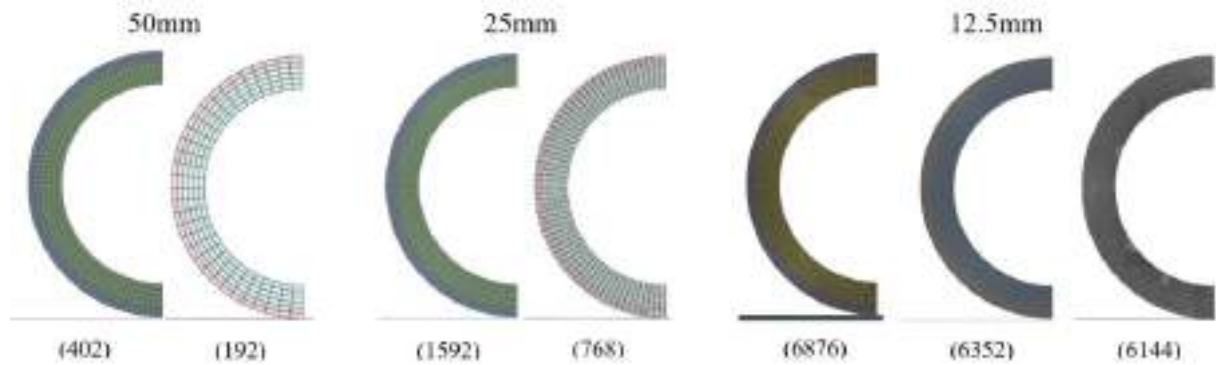
Figura 3.2 – Modelos - 3D com dois planos de simetria (esquerda) e 2D Plane Strain (direita)



Fonte: Autor

Em [10], foi realizada uma modelagem 3D de apenas uma fileira de elementos, com duas restrições em planos normais a Z ($U_z=0$), um de cada lado da fileira de elementos. Neste trabalho, são exploradas outras duas formas sendo uma delas mais detalhada e custosa computacionalmente e, outra mais direta e econômica. O estudo de convergência da malha foi realizado no próprio estudo e assim foram respeitados os mesmos parâmetros que definiam a progressão de 6, 12 e 24 elementos na espessura total, chumbo e aço, conforme Figura 3.3. Os pontos de interesse para monitoramento foram os A, B, C, D, E e F, conforme Figura 3.1. Para o segundo modelo, no ambiente 2D, ou seja, com apenas elementos de casca no plano XY, optou-se por analisar o último e mais refinado dos casos (24 elementos na espessura). São de interesse os deslocamentos verticais dos nós dos pontos A, B, C e D, e os deslocamentos horizontais dos nós dos pontos E e F.

Figura 3.3- Contagem de elementos – lado a lado, autor (esquerda) e [10] (direita)



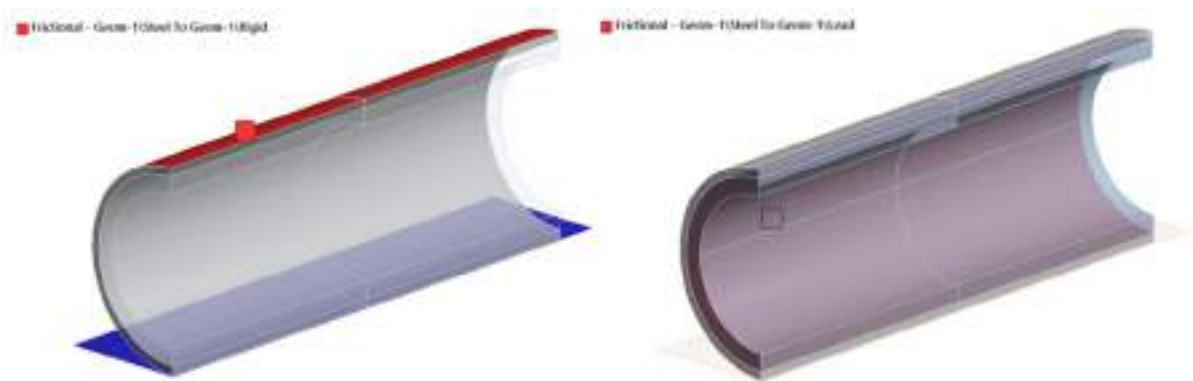
Fonte: Autor e [10]

3.1.2 Contatos

Neste caso são necessários apenas dois contatos e estes foram definidos com coeficiente de atrito de 0,2, sendo Chumbo-Aço e Aço-Superfície Rígida. Para se configurar a deformação equivalente de testes de queda livre de dispositivos de transporte de elementos combustíveis, determinou-se a velocidade final, ou velocidade de impacto, em 30m/s, conforme [10]. Considerando essa velocidade, estimou-se o período de observação do comportamento da estrutura de 70ms a partir do contato inicial do cilindro de Aço na Superfície Plana.

Os contatos para o Benchmark 1 no caso da análise 3D não exigiu configurações especiais de contatos, ou seja, é *default* considerar apenas o atrito e um amortecimento viscoso de 10% do amortecimento crítico.

Figura 3.4 - Contatos do modelo 3D



Fonte: Autor

Figura 3.5 - Contatos do modelo 2D



Fonte: Autor.

3.1.3 Resultados e comentários

Como no estudo de [10] os três tamanhos de elementos foram considerados, 6, 12 e 24 elementos entre diâmetro interno e externo para o estudo em 3D, tendo o primeiro apresentado resultados insuficientes para descrever o comportamento da estrutura, já os modelos com maior discretização expressaram melhor acuidade.

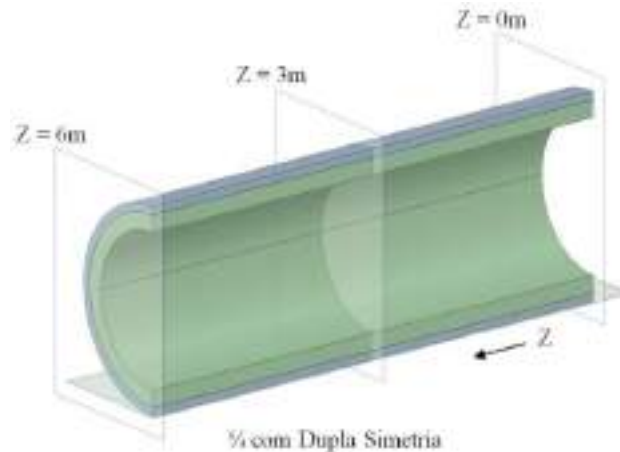
Tabela 3.2 – Comparação de custo computacional entre modelagens

Modelo	Nº elementos	Tempo (s)
6 elem.	52.248	65
12 elem.	385.981	703
24 elem.	3.052.860	10.647
2D	6876	53

Fonte: Autor

Foi realizado também um estudo a partir de uma restrição normal ($U_z=0$) ao plano da seção de interesse na extremidade do tubo para se verificar o efeito de borda. Foram definidos três planos de interesse para comparação de resultados, conforme Figura 3.6.

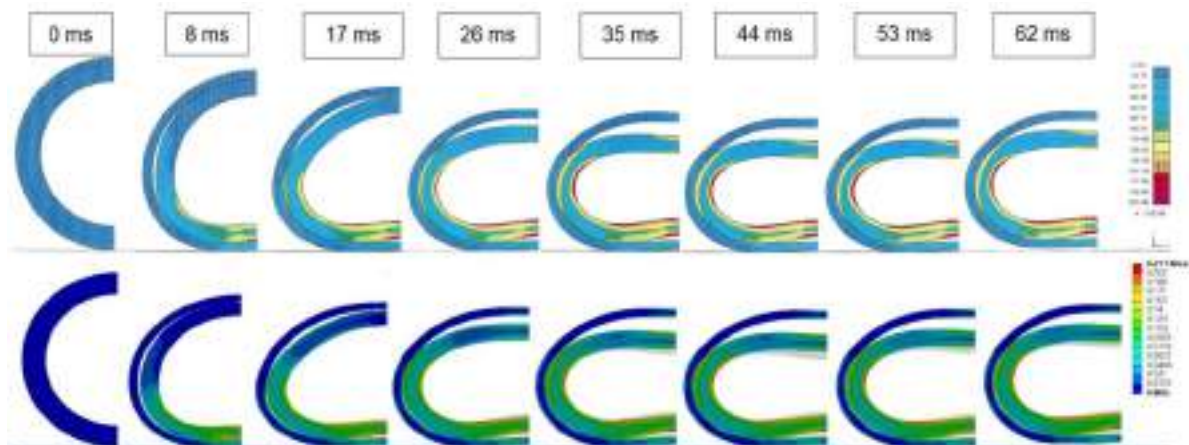
Figura 3.6 – Planos de interesse



Fonte: Autor

As condições das diferentes análises foram as mesmas, com destaque para a necessidade de se dedicar mais memória conforme o aumento do número de elementos através de um *Keyword Input* para informar ao *Solver* que utilizasse mais memória do que o *default*. Foi permitido que se havendo a necessidade, poderia adicionar pequenos incrementos de massa quando em alguma situação de instabilidade no elemento, ou seja, *Automatic Mass Scaling* foi habilitado, porém nenhuma massa foi adicionada. As configurações de controle de *Hourglass* foram selecionadas como *Standard LS-DYNA* o que, mesmo não especificado em [10], assume-se como o disponível na época.

A Figura 3.7 apresenta os resultados de deformação plástica acumulada no tempo do modelo 3D do plano $Z=6m$ e os compara a [10].

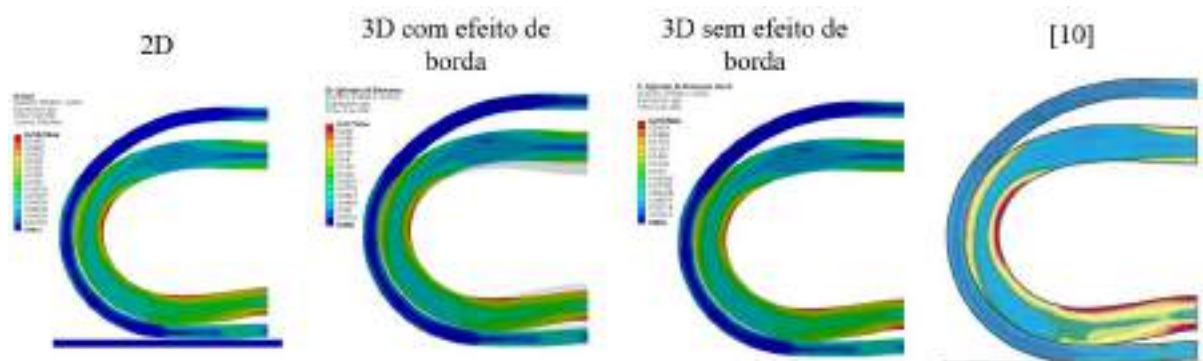
Figura 3.7 – Comparação da deformação plástica no tempo ($Z=6m$)

Fonte: [10] (acima) e Autor (abaixo)

Foi possível reproduzir adequadamente [10] com os resultados encontrados com o modelo 3D de extremidade livre.

Na Figura 3.8, a seguir, são apresentados os resultados obtidos de deformação plástica no modelo 3D com e sem efeito de borda ($U_z=0$) no plano $Z=0\text{m}$ e o resultado do modelo 2D de estado plano de deformação. Entende-se o instante 53ms como o momento imediatamente anterior ao início do retorno vertical dos cilindros da superfície rígida, ou seja, início do retorno elástico (também chamado de *bounce*).

Figura 3.8 – Comparação da deformação plástica entre diferentes modelagens

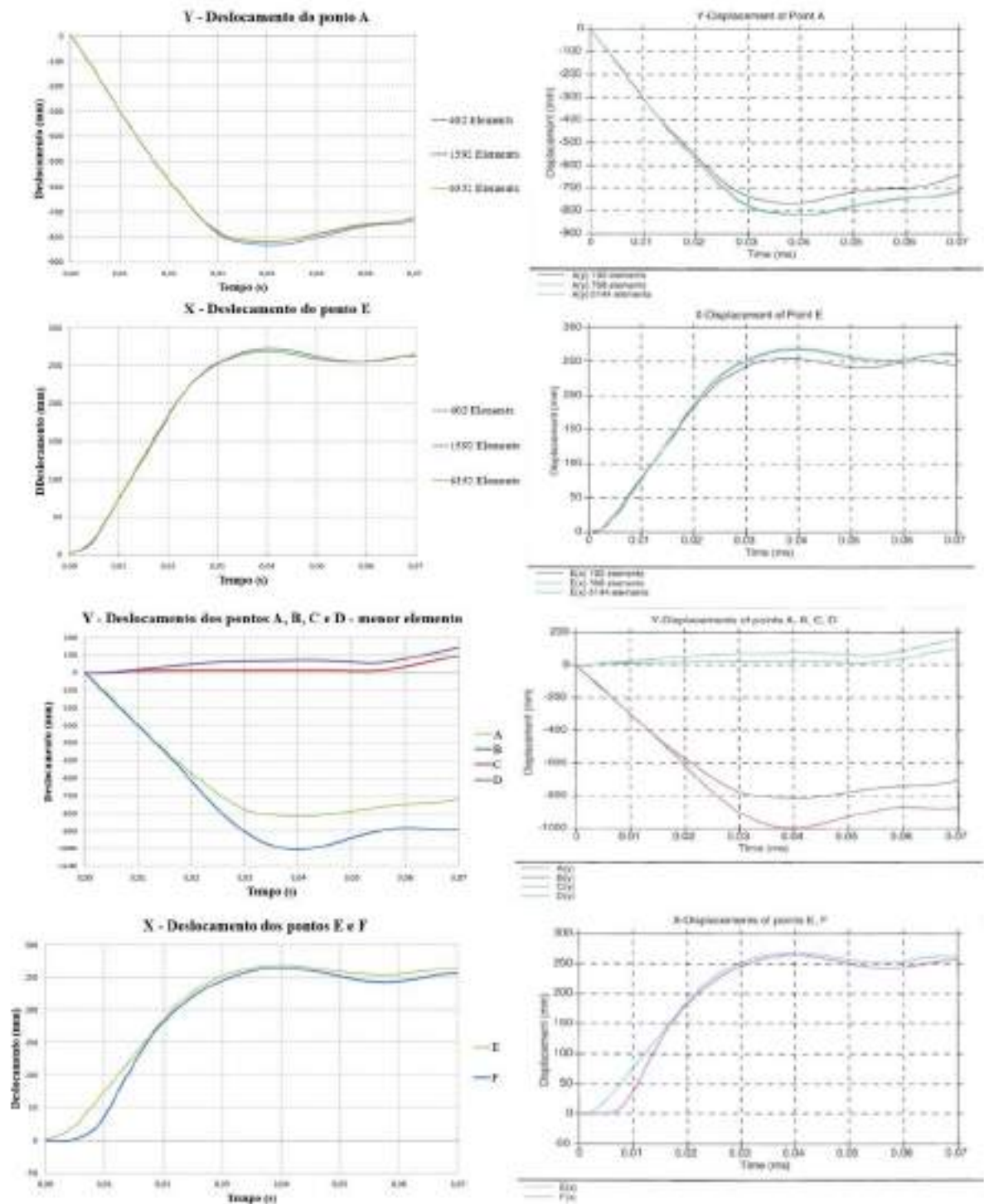


Fonte: Autor e [10]

É possível observar que as três diferentes análises apresentaram o mesmo resultado, e por consequência, podemos concluir que não há necessidade de se realizar a modelagem em 3D para se representar esse caso. Ao mesmo tempo, podemos destacar o efeito de borda em que ocorre um deslocamento diferencial entre os planos $Z=6\text{m}$ e $Z=0\text{m}$.

A Figura 3.9 apresenta a comparação dos pontos A, B, C, D, E e F para os casos 3D sem efeitos de borda lado a lado aos resultados do estudo [10], além da influência do tamanho dos elementos aplicados.

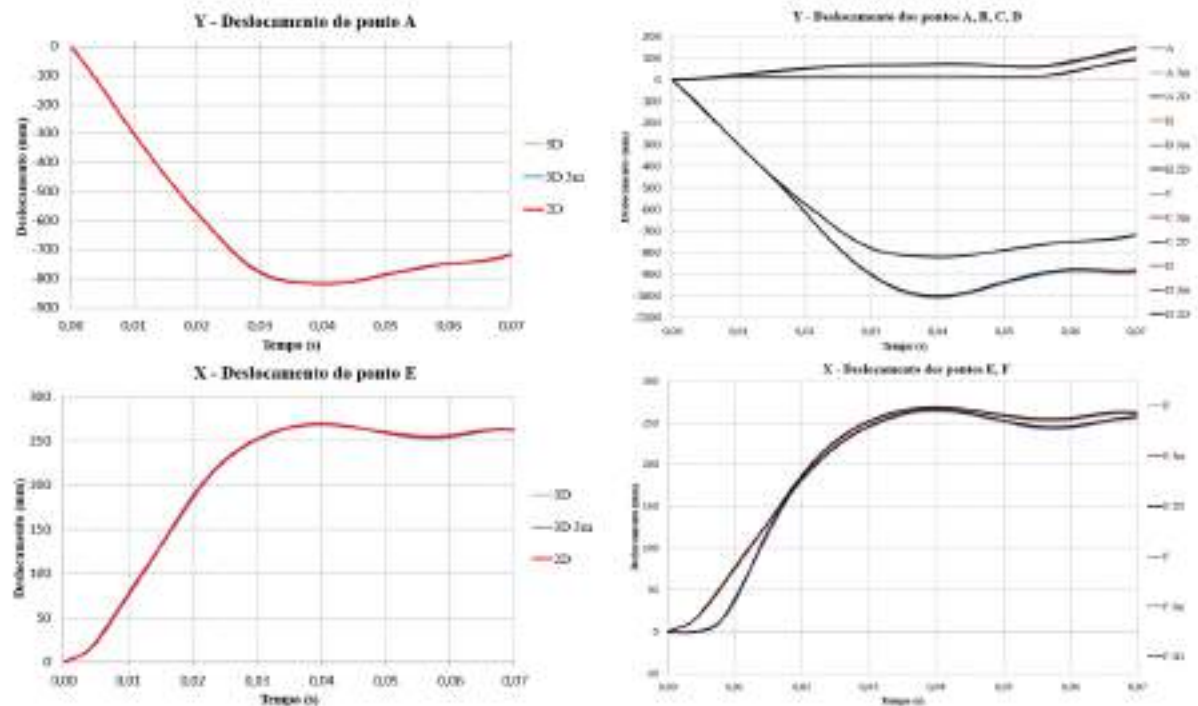
Figura 3.9 – Deslocamentos no tempo dos pontos de interesse



Fonte: Autor (esquerda) e [10] (direita).

Assim como para o caso 3D, mesmos pontos de interesse para o caso 2D de estado plano de deformações são comparados aos resultados da Figura 3.9 e apresentados na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Deslocamentos no tempo dos pontos de interesse – comparação entre 2D e 3D



Fonte: Autor

Os resultados são idênticos e confirmam de forma objetiva a não necessidade de se modelar em 3D o caso.

3.2 BENCHMARK 2 - CUBO EM QUEDA LIVRE DE QUINA

Este caso tem como objetivo descrever o controle de situações onde apenas alguns nós precisam interagir com superfícies rígidas sobre grandes esforços. Ou seja, há a tendência da formação de singularidades ao mesmo tempo que se exige grande controle dos contatos não lineares para evitar instabilidades numéricas. Dessa forma, tem-se o modelo geométrico de um cubo caindo sobre uma de suas quinas com sua diagonal principal (vértice A, centro geométrico e vértice B) normal ao plano de impacto, uma superfície plana rígida. Para impor a compressão do cubo e, portanto, sua conformação, são modeladas três placas rígidas de densidades idealizadas fixadas nas superfícies superiores. Essa compressão é característica em componentes de sacrifício para absorção de impacto em embalagens.

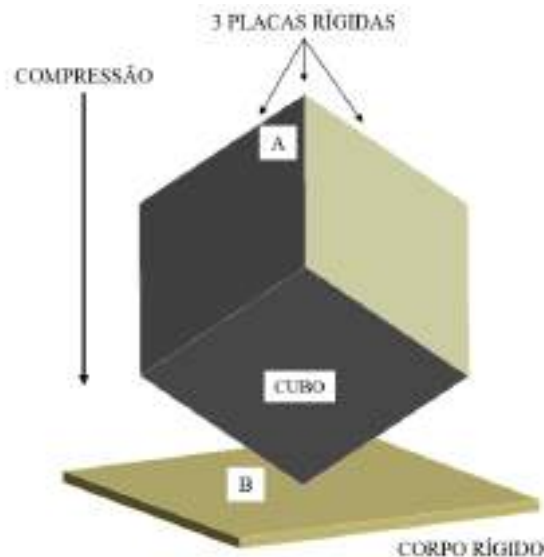
O cubo de aço possui arestas de um metro de comprimento e as placas posicionadas nas superfícies superiores possuem o mesmo tamanho de aresta. A Tabela 3.3 apresenta os detalhes dos materiais e a Figura 3.11 apresenta a geometria estudada, ambos conforme [10].

Tabela 3.3 - Propriedades dos materiais

Geometria	E [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	σ_y [N/m ³]	σ_{encru} [N/m ³]	ν	Comportamento
CUBO	2.10E+11	7850	2.00E+08	1.00E+09	0.30	Bilinear Elasto Plástico
PLACAS		1,666E+06				Rígido

Fonte: OAPIL, GNB, *Evaluation of Codes for Analyzing the Drop Test Performance of Radioactive Material Transport Containers*, [10]

Figura 3.11 - Dimensões do modelo geométrico



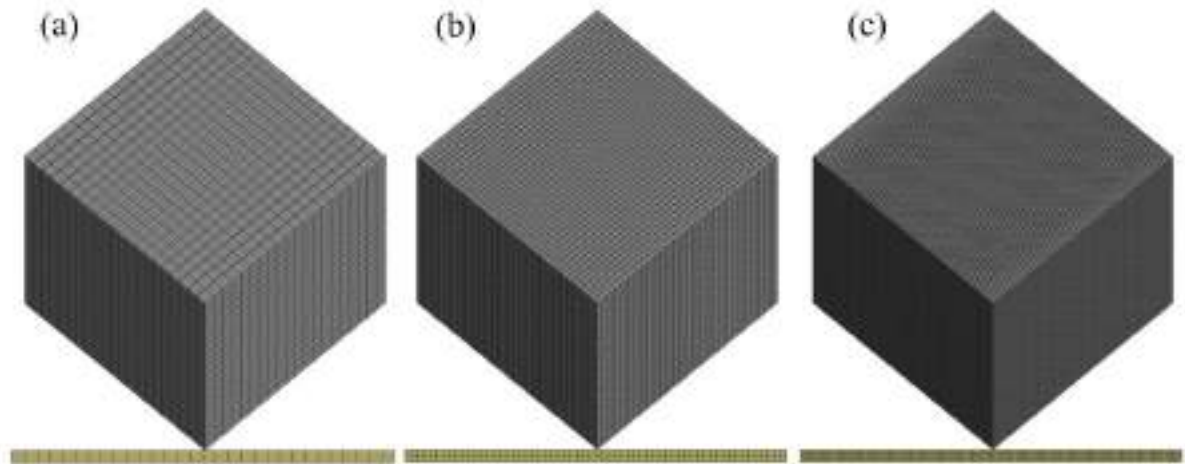
Fonte: Autor

Os contatos das placas rígidas com o cubo foram definidos como *bonded*, ou colados, de forma que fiquem completamente conectadas às superfícies superiores do cubo. Já o contato do cubo com a superfície superior do corpo rígido foi definido com coeficiente de atrito de 0,2, conforme Figura 3.13. Para configurar o movimento de queda livre de 9m de altura, determinou-se a velocidade final, ou velocidade de impacto, em 13.3m/s. Considerando essa velocidade, estimou-se o período de observação do comportamento da estrutura de 30ms a partir do contato inicial do cubo com o corpo rígido. Para a análise dos resultados no tempo os deslocamentos verticais nos nós dos pontos A e B são considerados de interesse.

3.2.1 Modelos numéricos

Foi avaliada a influência do tamanho dos elementos no comportamento da estrutura foram definidos três tamanhos distintos: 50 mm (a); 25 mm (b); 12.5 mm (c), Figura 3.12.

Figura 3.12 - Avaliação dos diferentes tamanhos de elementos



Fonte: Autor

3.2.2 Contatos

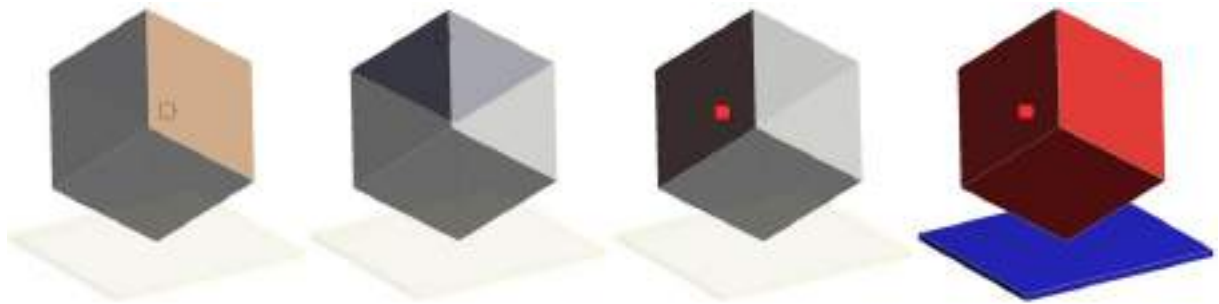
Neste caso foi dada uma atenção especial para o devido controle da interação do nó do ponto B pois este é inicialmente o ponto de maior pressão, logo foi necessário adequar alguns parâmetros.

A hipótese para o ponto B é a de não ocorrerem deslocamentos, ou seja, da posição inicial em $t = 0$ s para a posição final em $t = 30$ s não ocorram variações em Y. A partir dessa consideração usou-se do modelo menos refinado, elementos de 50 mm, para calibrar o contato de forma a adequar a interação entre o cubo e o corpo rígido de maneira mais ágil. Os parâmetros ajustados foram: o amortecimento viscoso, o *offset* de elementos sólidos, o fator de penalidade de baixa restrição e a profundidade de detecção. Cada um desses foi acertado por incrementos até encontrar o comportamento de [10].

A rigidez e o amortecimento foram calibrados de forma a reduzir a penetração e atingir a estabilidade esperada em [10]. A rigidez progrediu por incrementos de 0,5 e o amortecimento por incrementos de 5 unidades.

Diante das penetrações para as configurações *default*, e depois no processo calibração, o valor de 1(um) mm para o *offset* apresentou a melhor estabilidade, o mesmo se aplica para o fator de penalidade de baixa restrição em 0,15.

Figura 3.13 – Contatos *Bonded* das placas rígidas (três primeiros) e de atrito no cubo com o corpo rígido (direita)

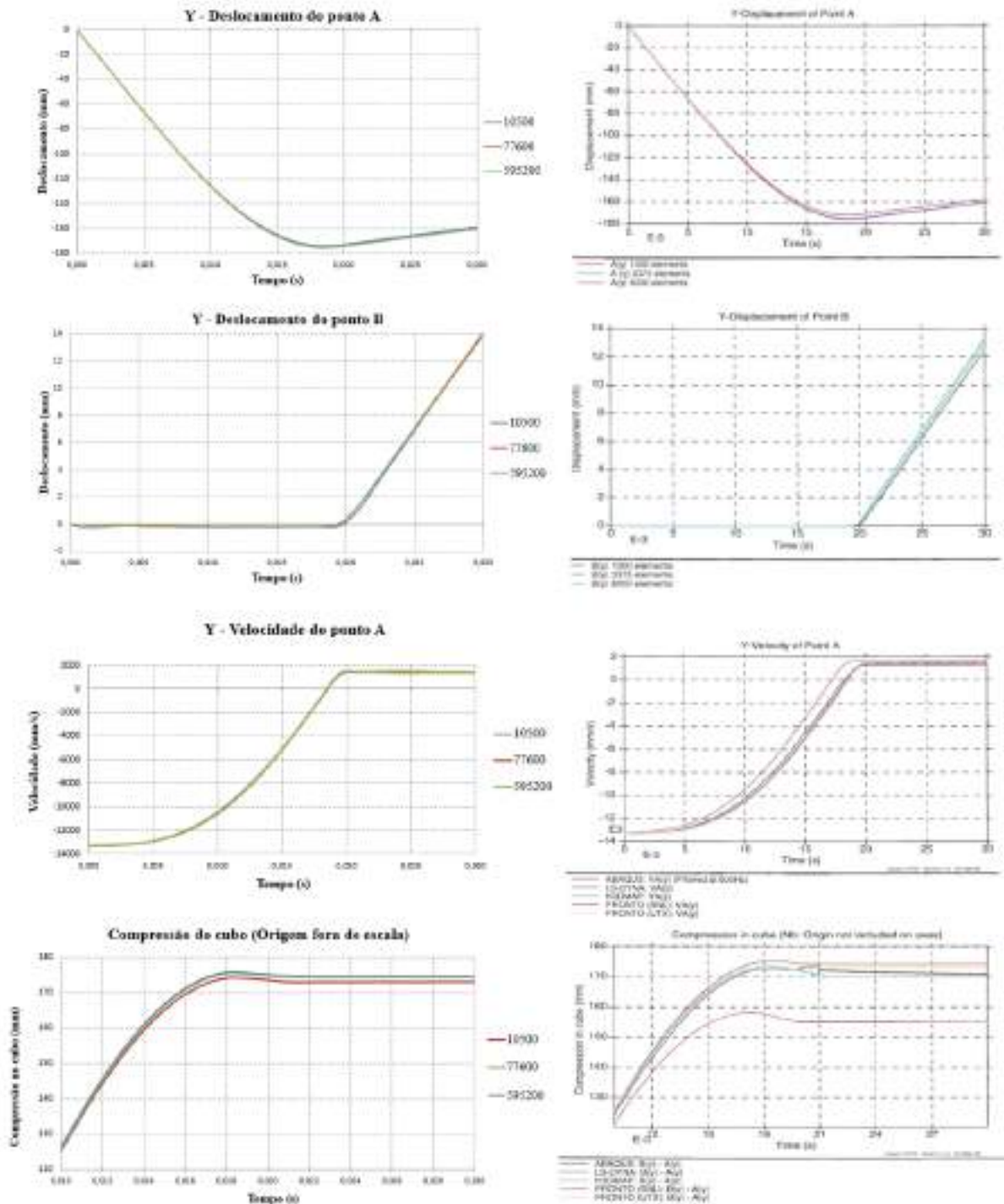


Fonte: Autor

3.2.3 Resultados e comentários

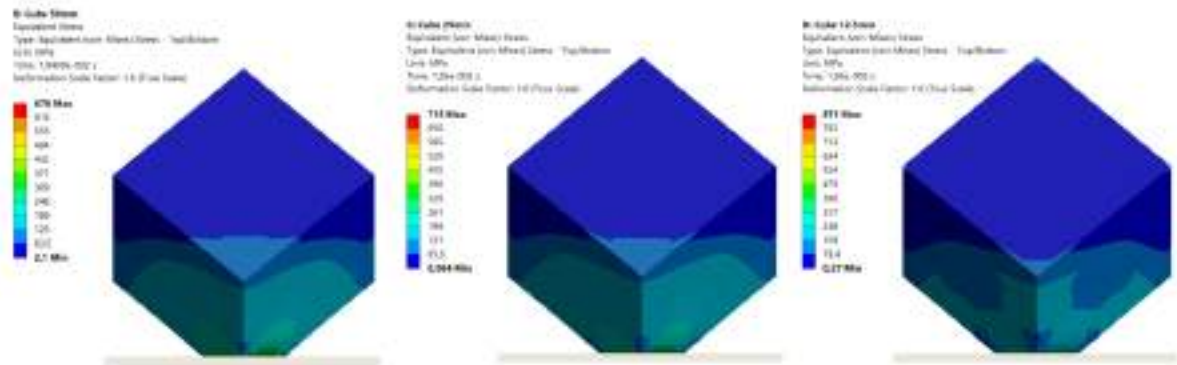
Um dos primeiros parâmetros a se estimar foi o *Time Step Safety Factor*, sendo o *default* 0,9, porém devido ao tamanho dos elementos e a velocidade do impacto, valores menores foram estudados de maneira a não penalizar demais o tempo computacional. Da mesma forma que no Benchmark 1, foi habilitado o *Automatic Mass Scaling* para auxiliar na estabilidade, porém nenhuma massa local foi adicionada. Foram mantidos também, como formulação de *Hourglass*, o *Standard LS-DYNA* devida a inexistência de informações quanto a este no estudo original, existem outras opções que podem influenciar a formação de *Hourglass*, porém, proporcionalmente, após avaliação a energia de *Hourglass* foi considerada mínima e assim dentro do limite de 10% dado como boa prática [8] e não exigindo a alteração da formulação de controle.

Figura 3.14 – Comparação do efeito da discretização no comportamento do contato



Fonte: Autor (esquerda) e [10] (direita)

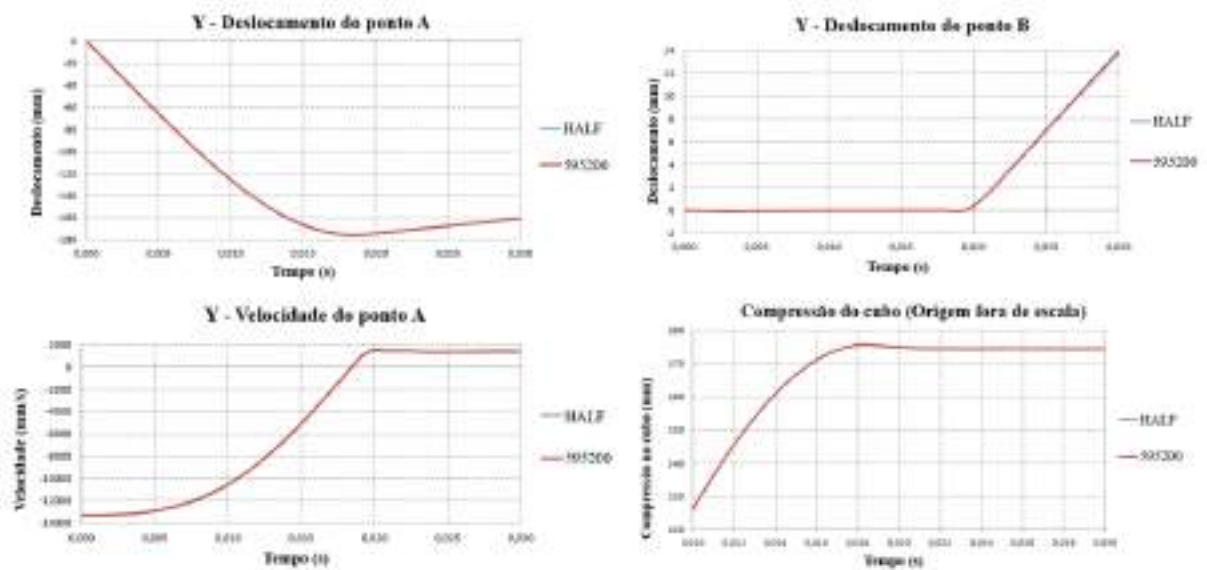
Figura 3.15 – Mapa de tensões por tamanho de elemento



Fonte: Autor

Além dessas, foi desenvolvido um modelo numérico usando um plano de simetria que permita verificar a redução no tempo de uso computacional e neste foi aplicado o menor tamanho de elemento.

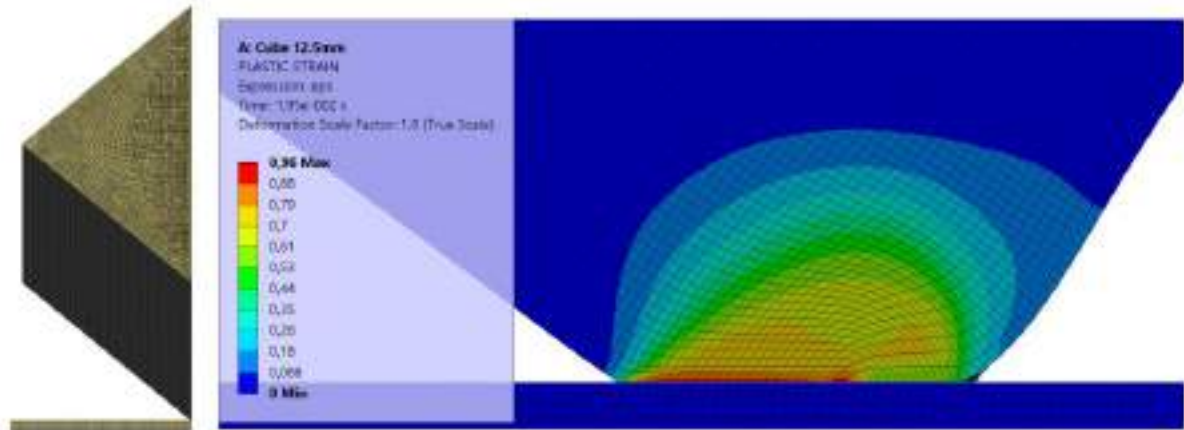
Figura 3.16 – Comparação dos resultados com o meio modelo



Fonte: Autor

O modelo matemático com a aplicação do plano de simetria não demonstrou vantagem significativa no custo computacional. Isso foi atribuído ao cálculo do *timestep*, que se faz pela dimensão característica do menor elemento, e que seguiu inalterado. O tamanho do *timestep* pode ser mais relevante do que a quantidade de elementos do modelo.

Figura 3.17 – Deformação plástica no plano de simetria



Fonte: Autor

Tabela 3.4 – Comparação entre modelos - tempo computacional por quantidade de elementos

Modelo	Nº Elementos	Tempo [s]
50mm	10.500	23
25mm	77.600	283
12.5mm	595.200	4090
com simetria	298.967	3895

Fonte: Autor

A partir dos resultados, é possível concluir que o caso foi reproduzido de [10] com precisão e a metodologia de calibração dos contatos se mostrou objetiva.

3.3 BENCHMARK 3 - COMPRESSÃO DE CILINDRO DE MADEIRA ENCAPSULADO

O Benchmark 3 foi idealizado para representar a combinação de um cilindro de madeira encapsulado por uma chapa de aço, resistindo a uma compressão axial resultado de um impacto de queda livre de nove metros. O objetivo é avaliar a conformação conjunta dos dois diferentes materiais e o desempenho da interação entre eles.

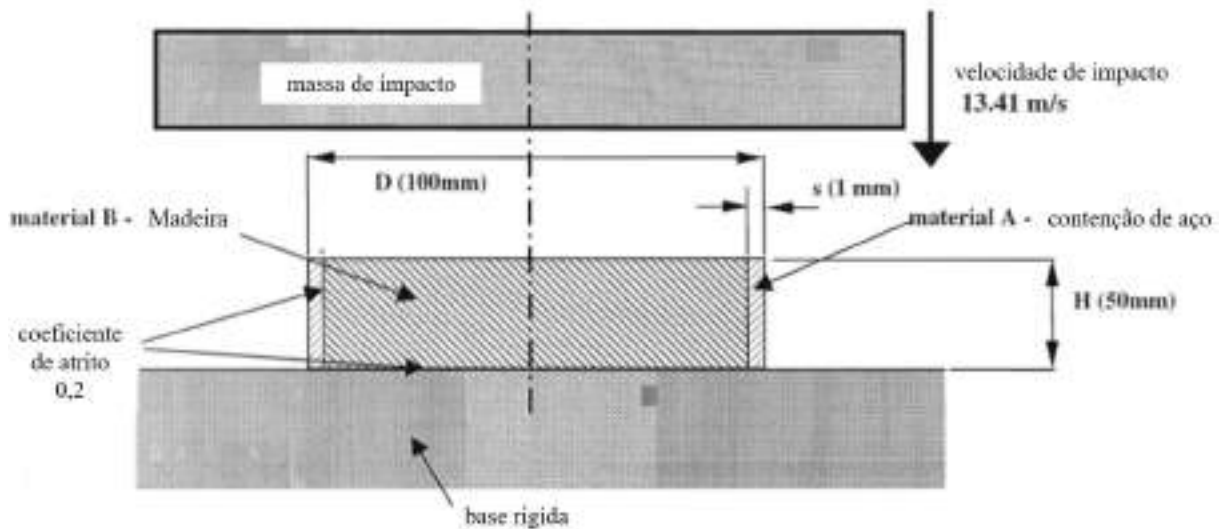
Tabela 3.5 – Informações dos materiais e detalhes geométricos

Massa de impacto			Material A – Contenção de Aço		
- Comportamento do material	Rígido		- Densidade	ρ	7850 kg/m ³
- Diâmetro	D	150 mm	- Módulo de Elasticidade	E	210 000 N/mm ²
- Massa	M	100 kg	- Poisson	ν	0,3
- Velocidade de impacto	v	13.41 m/s	- Tensão de Escoamento	σ_y	200 N/mm ²
			- Módulo de encruamento	σ_{encru}	1000 N/mm ²
Corpo de ensaio de impacto			Material B – Cilindro de Madeira		
- Altura	H	50 mm	- Comportamento do material	Perfeitamente plástico	
- Diâmetro	D	100 mm	- Densidade	ρ	500 kg/m ³
- Espessura da contenção	s	1 mm	- Tensão de Escoamento	σ_y	17 N/mm ²
			- Módulo de encruamento	σ_{encru}	0 N/mm ²

Fonte: OAPIL, GNB, *Evaluation of Codes for Analyzing the Drop Test Performance of Radioactive Material* [10]

Neste estudo, todos os contatos foram definidos com coeficiente de atrito em 0,2, sendo eles o contato da madeira com a chapa de aço, o contato da madeira com a massa de impacto e o contato da madeira com a base rígida. Da mesma forma, foram aplicados contatos de atrito da chapa de aço com a massa de impacto e a base rígida. A velocidade de impacto informada é de 13,41 m/s. A partir dessa velocidade foi estimado um período de observação do comportamento da colisão de 5 ms, a contar do contato entre a madeira e a massa de impacto. Os resultados de interesse para análise foram definidos como sendo o deslocamento vertical da massa de impacto, a força de impacto variando no tempo entre corpo de ensaio e a massa de impacto e a compressão máxima da madeira.

Figura 3.18 – Composição do ensaio



Fonte: OAPIL, GNB, *Evaluation of Codes for Analyzing the Drop Test Performance of Radioactive Material* [10]

O caso do Benchmark 3 apresenta a oportunidade de ampliar o estudo proposto de forma que foi dividido três análises diferentes: a primeira, a representação completa do caso, no ambiente 3D com dois planos de simetria com a contenção de aço modelada em elementos de casca; a segunda de mesmas características que a primeira, mas com a contenção em elementos sólidos; e por fim, a terceira no ambiente 2D axissimétrico que se deu de duas formas, uma como reprodução dos dois casos anteriores (meio contínuo) e outra com o detalhamento das fibras da madeira, este em duas condições, com fibras paralelas e perpendiculares ao impacto.

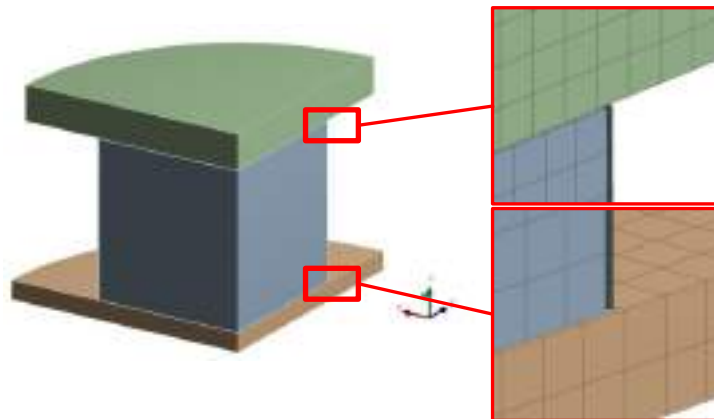
Contudo, não foram definidos valores de poisson e de módulo de elasticidade para a madeira, ambos recomendados para caracterizar o material no ANSYS LS-DYNA. Logo, através de análises parametrizadas foi levantado um estudo de mapeamento da influência destas propriedades nas análises deste benchmark, observando a devida representação de um comportamento perfeitamente plástico idealizado para a madeira.

Uma vez reproduzido o comportamento da força de impacto no tempo, foi avaliada a variação dessa força para as diferentes combinações de ν -E, respectivamente Poisson, com os valores 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45 e Módulo de elasticidade, progressivamente de 8 GPa a 16 GPa.

3.3.1 Análise com contenção em elementos de casca

O caso do modelo sólido com a contenção de aço em elementos de casca foi considerado como a análise de controle por melhor representar o estudo de [10]. Após estudos de otimização de discretização, onde ficou definido um tamanho de elemento de 3 mm, foram dadas atenções especiais aos contatos envolvidos.

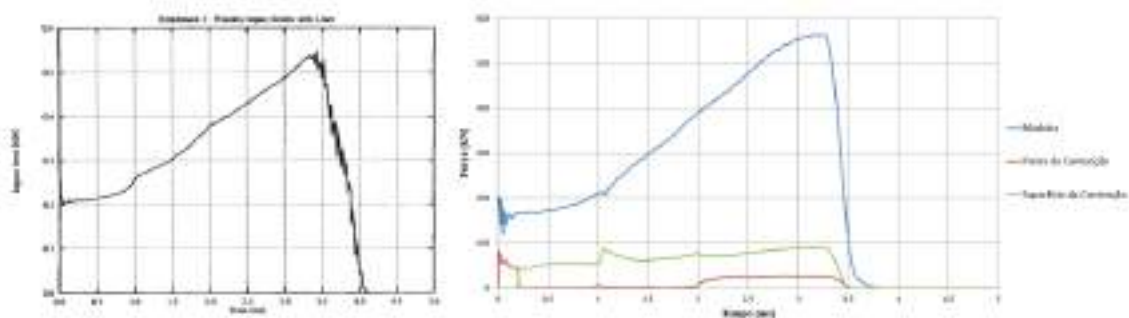
Figura 3.19 – Discretização do modelo – caso controle



Fonte: Autor

Os contatos, todos de coeficiente de atrito 0,2, foram configurados com um *offset* próximo a 0,2 mm na geometria e o amortecimento (*VDC*) de 10, não foi necessário especificar valores de rigidez. Assim como também foram mantidos os valores *default* de fator de penalidade de baixa restrição (0,1) e a profundidade de detecção (1). Após essas considerações, para o estudo da força no tempo, os contatos apresentaram o desempenho da Figura 3.20 (direita).

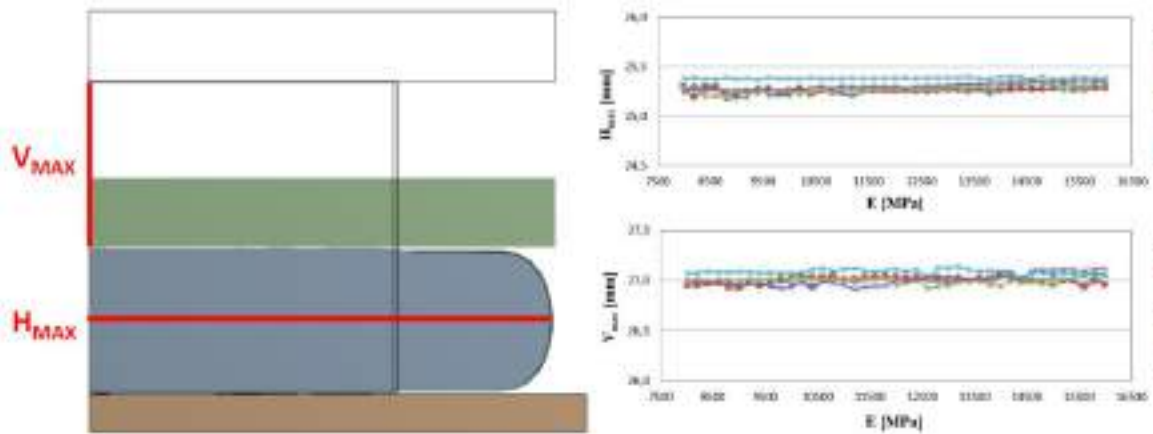
Figura 3.20 – Força de impacto no tempo - contatos



Fonte: [10] (esquerda) e Autor (direita)

Os deslocamentos máximos encontrados não demonstraram variação significativa para as variações ν -E, conforme Figura 3.21.

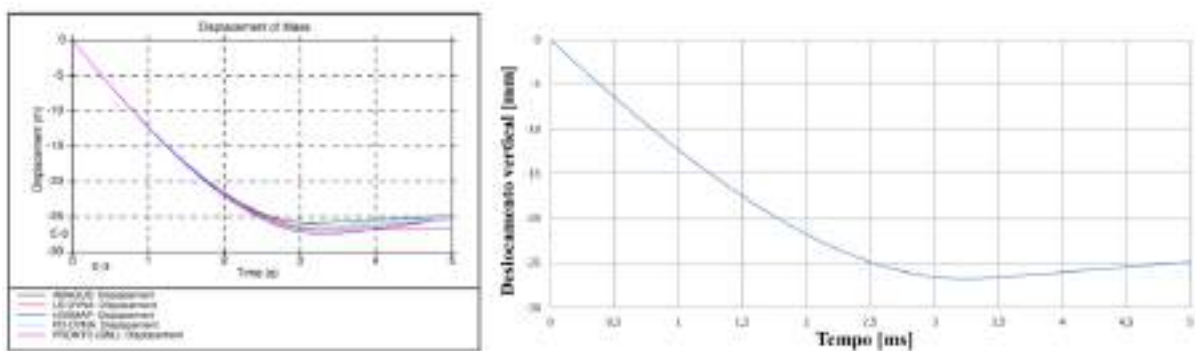
Figura 3.21 – Deslocamentos máximos – caso controle



Fonte: Autor

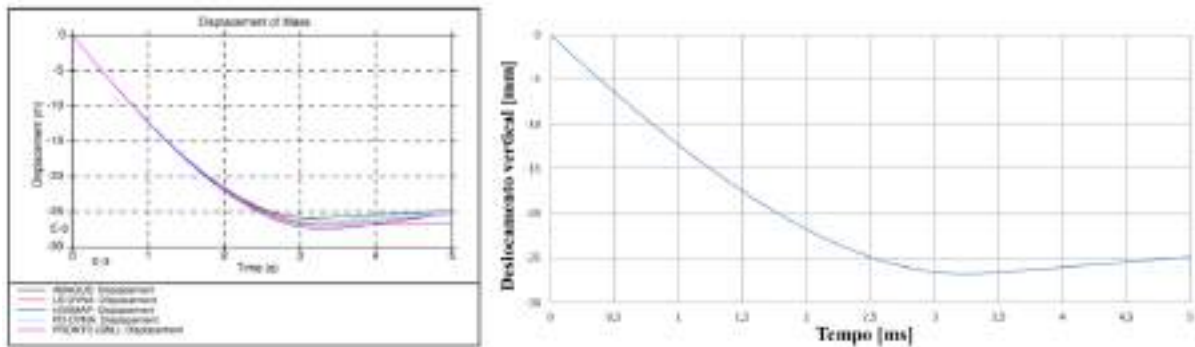
Em [11], foram apresentados mais resultados dos estudos de [10] e foi possível extrair melhores informações do modelo para verificação do caso. Ou seja, foram avaliados o deslocamento vertical, Figura 3.22, e a velocidade vertical, Figura 3.23, ambos da massa de impacto.

Figura 3.22 – Deslocamento da massa de impacto – caso controle



Fonte: [11] (esquerda) e Autor (direita)

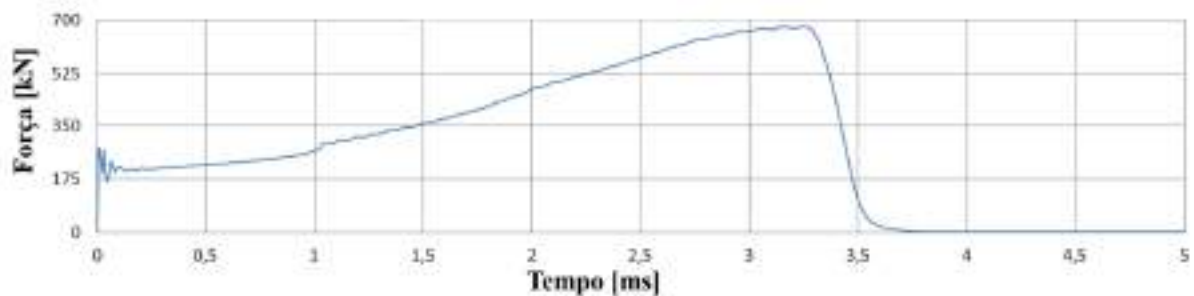
Figura 3.23 – Velocidade vertical da massa de impacto – caso controle



Fonte: [11] (esquerda) e Autor (direita)

No gráfico de força de impacto no tempo, Figura 3.20, foram apresentadas as forças exercidas nos contatos, porém é possível também extrair a força atuante no corpo rígido através de sua aceleração no tempo. Através do *Result Tracker*, ferramenta de extração de resultados específicos com seleção nodal, podemos avaliar o comportamento da aceleração atuante na massa de impacto. Ao corrigir o valor da massa de impacto, devido ao uso de dois planos de simetria, podemos expressar a força de reação no tempo, apresentado na Figura 3.24.

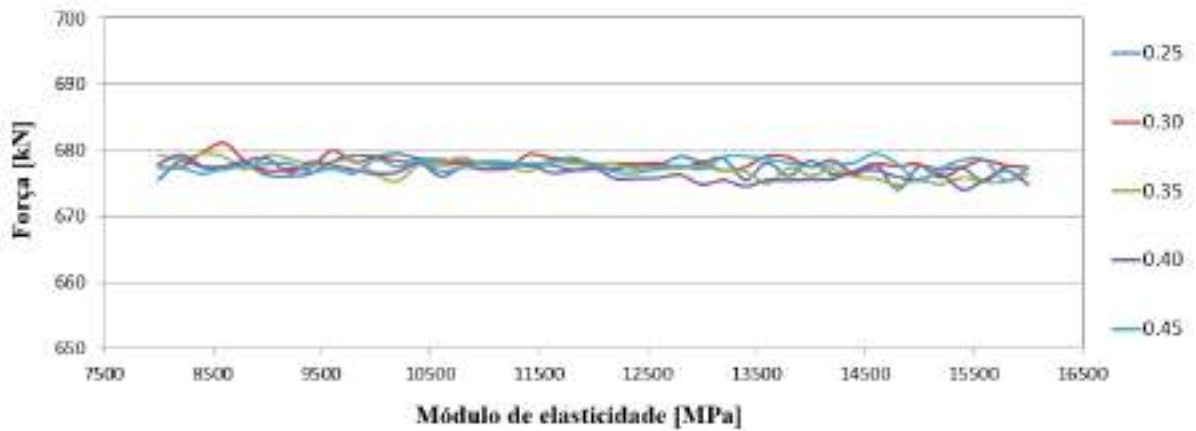
Figura 3.24 – Força de impacto no tempo – caso controle



Fonte: Autor

Através dessa opção é possível identificar com melhor grau de correlação o fenômeno apresentado, sem os possíveis desvios no comportamento dos contatos. Dessa forma, observando as combinações de v-E definidas anteriormente, na Figura 3.25, é possível identificar uma variação inferior a 1% entre as análises.

Figura 3.25 – Comparação da força de impacto - v-E – caso controle



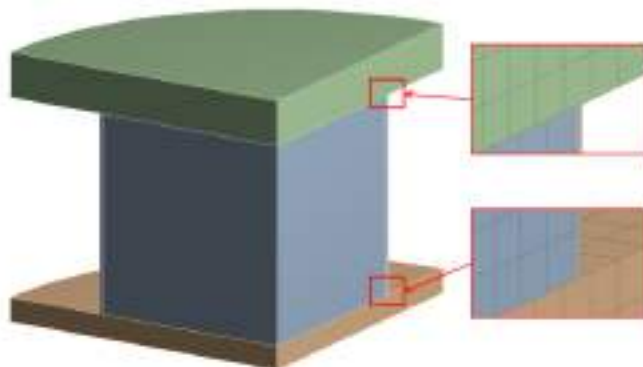
Fonte: Autor

É possível afirmar que há uma ligeira tendência na redução da força máxima conforme se aumenta o módulo de elasticidade. Contudo, valores fora dessa faixa são característicos de apenas poucas espécies e condições específicas de crescimento de madeiras e, mesmo nestes, não apresentariam variação significativa no resultado.

3.3.2 Análise com contenção em elementos sólidos

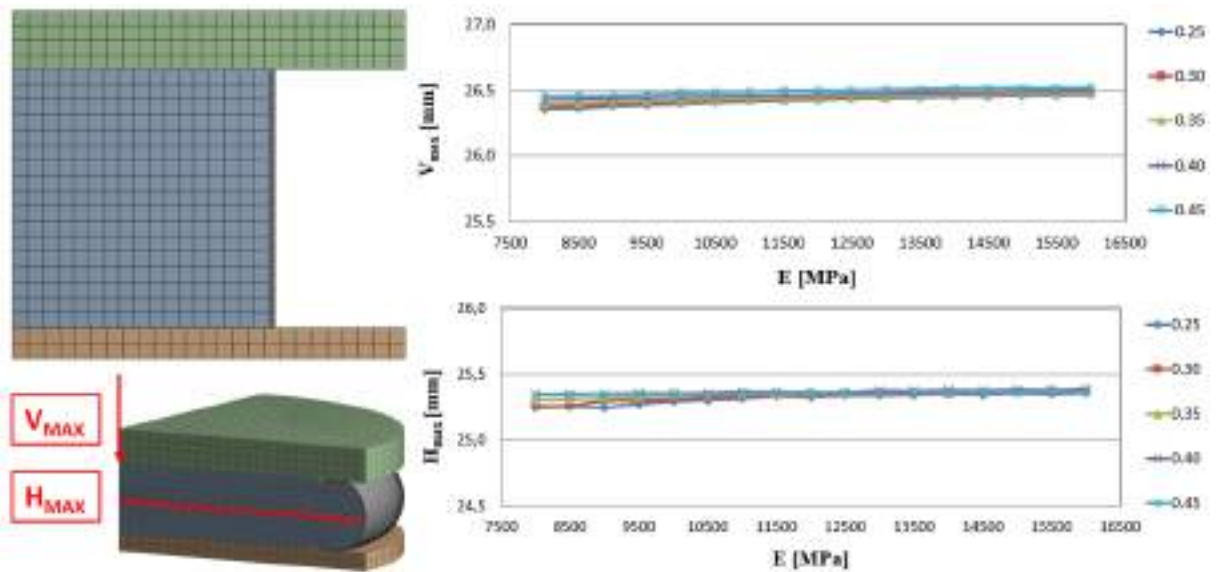
Ao modelar a contenção metálica com elementos sólidos podemos identificar, do ponto de vista da análise, o custo computacional ao mesmo tempo que destacar as diferenças nos resultados. Conforme os outros casos, foram avaliados os deslocamentos máximos nas duas direções, as velocidades e as forças no tempo comparativamente.

Figura 3.26 - Discretização do modelo – caso contenção em elementos sólidos



Fonte: Autor

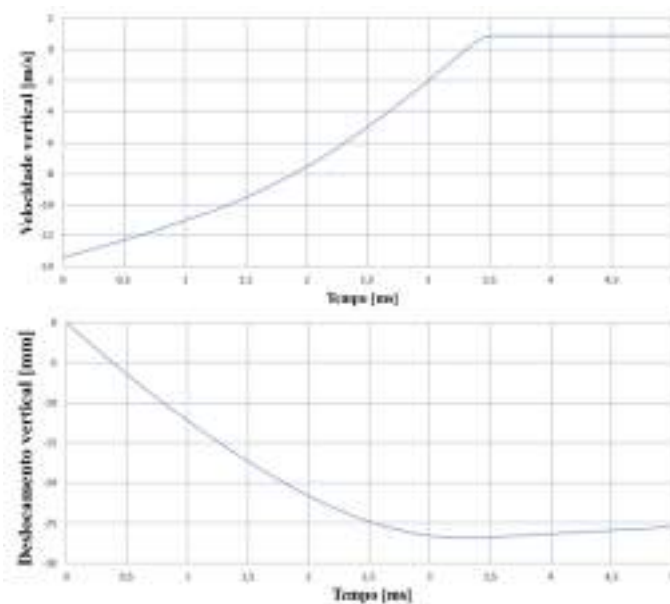
Figura 3.27 – Deslocamentos máximos – caso contenção em elementos sólidos



Fonte: Autor

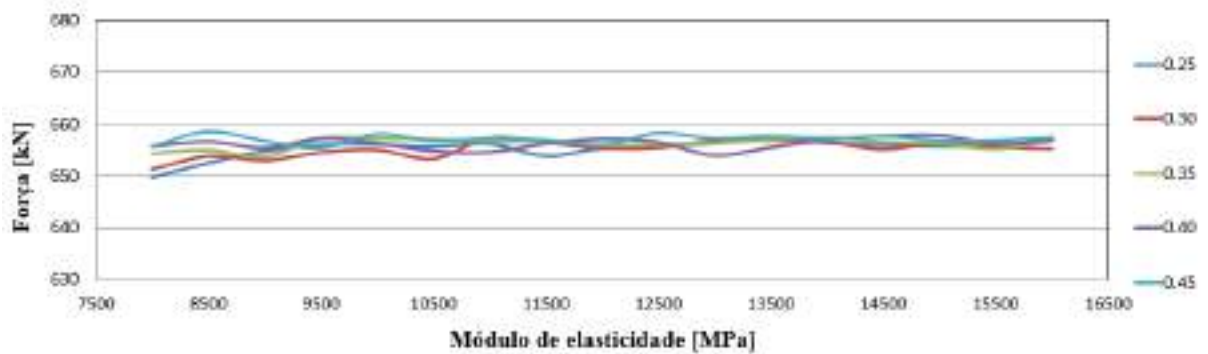
Esse caso apresentou resultados de deslocamento de mesma magnitude e mais estáveis quando comparados ao caso controle.

Figura 3.28 – Deslocamento e velocidade da massa de impacto - caso contenção em elementos sólidos



Fonte: Autor

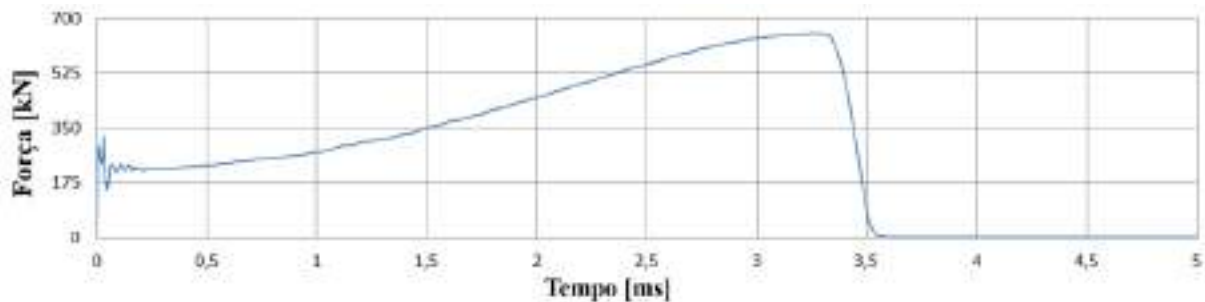
Figura 3.29 – Comparação da força de impacto - ν -E – caso contenção em elementos sólidos



Fonte: Autor

Apesar de não haver variação significativa, é possível afirmar que há menos ruído nos resultados que o caso controle, além da força máxima de magnitude 3% menor.

Figura 3.30 – Força de impacto no tempo – caso contenção em elementos sólidos



Fonte: Autor

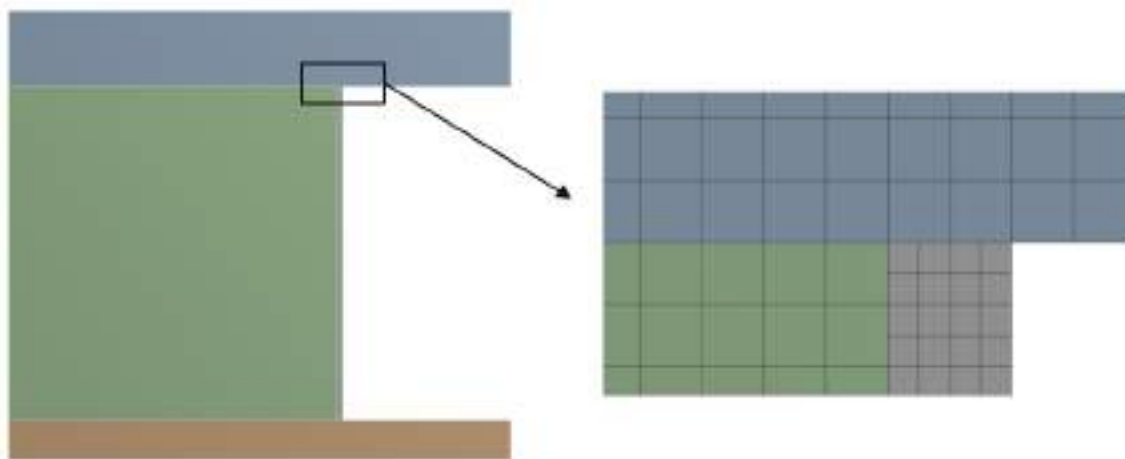
Assim como no outro caso, o impacto ocorreu entre 3 e 3,5 ms e com aproximadamente a mesma magnitude. Comparativamente, é possível afirmar que há menos ruído quando a contenção metálica é modelada com elementos sólido, porém é esperado que o tempo de análise seja significativamente maior.

3.3.3 Análise axissimétrica

Em [10] é comentado que esse benchmark permite que a análise seja também realizada através de um modelo axissimétrico. Uma vez que os fenômenos principais do caso já foram apresentados nas seções anteriores, neste caso são estudadas três formas diferentes de modelar a madeira: meio contínuo; fibras de 1 mm paralelas ao carregamento e fibras de 1 mm perpendiculares. Para garantir conformidade com o benchmark, alguns dos mesmos pontos de interesse foram extraídos. Contudo, o principal objetivo foi quantificar, se existente, a diferença entre a compressão com e sem fibras, como também descrito em [12]. No caso sem fibras, os contatos seguiram as definições das análises anteriores. Nos casos em que as fibras foram modeladas, o coeficiente de atrito entre elas foi considerado em 0,5. O estudo de comparação das combinações de valores de poisson e de módulo de elasticidade foi mantido para verificar se há alguma influência. Logo, são propostas tentativas utilizando um material isotrópico descontínuo que permitisse o efeito de compressão em fibras, e em duas orientações, perpendicular e paralelo ao sentido da compressão.

3.3.3.1 Caso sem fibras

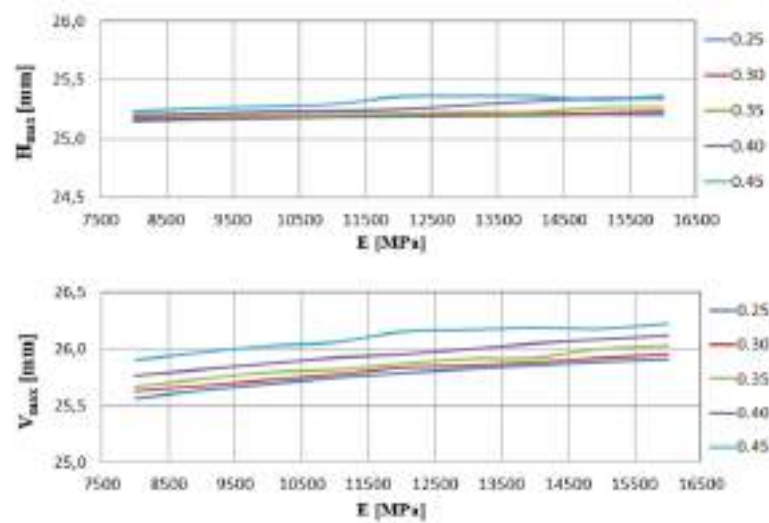
Figura 3.31 – Modelo sem fibras e discretização geral em 0,5 mm e contenção em 0,25 mm



Fonte: Autor

Os resultados para o caso de meio contínuo estão em conformidade com os resultados encontrados nas análises da seção 3.3.1 e 3.3.2. Ou seja, os deslocamentos verticais apresentaram a mesma estabilidade e a mesma magnitude de aproximadamente 25,25 mm. Já os deslocamentos verticais apresentaram alguma dependência do valor de poisson, assim como mantiveram a tendencia de maior deslocamento conforme se aumenta o módulo de elasticidades. Porém, foi mantida a escala de deslocamentos em aproximadamente 26 mm, conforme Figura 3.32.

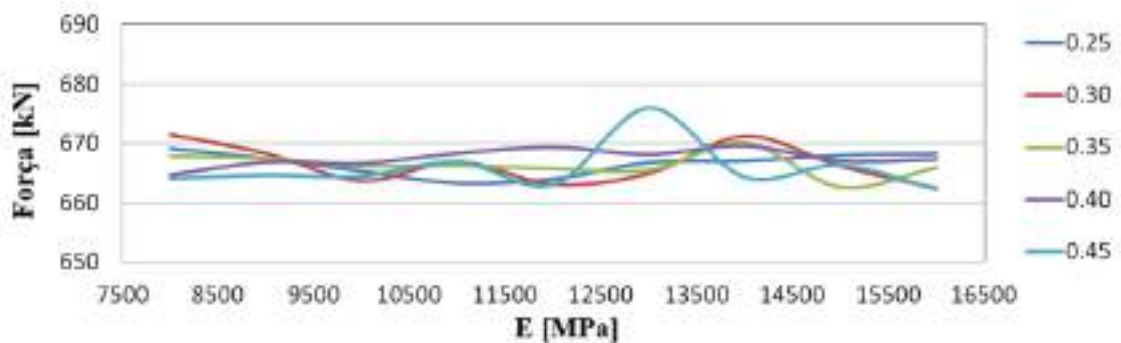
Figura 3.32 – Deslocamentos - caso sem fibras



Fonte: Autor

A força média é de aproximadamente 665 kN, conforme Figura 3.33.

Figura 3.33 – Comparação da força de impacto - v-E – caso sem Fibras

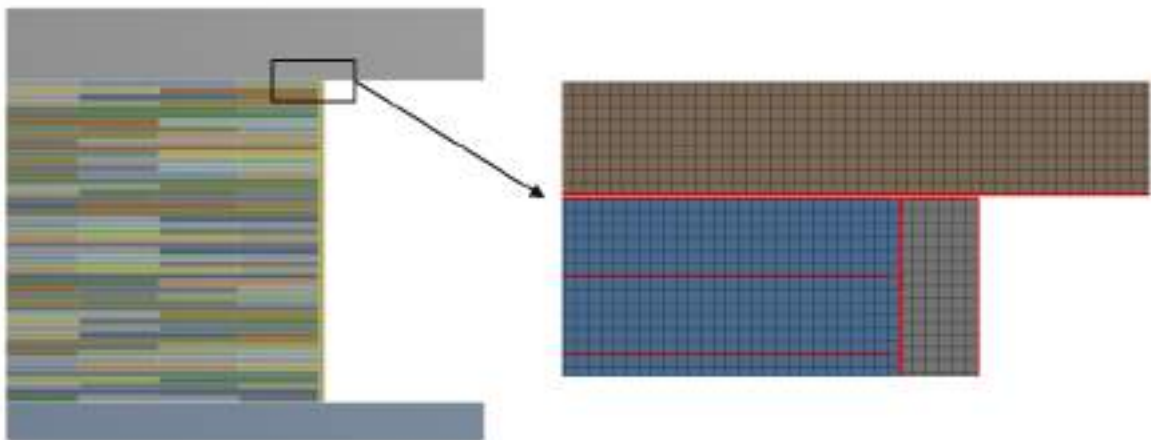


Fonte: Autor

3.3.3.2 Caso com fibras horizontais

O caso com fibras horizontais é característico de quando na montagem do absorvedor de impacto utilizasse a madeira ou compostos de madeira com as fibras perpendicular ao choque. Portanto, conforme os resultados pode ser relevante para as definições de projeto. Logo, a principal característica a ser extraída dos resultados é o perfil curva de força e, portanto, a aceleração.

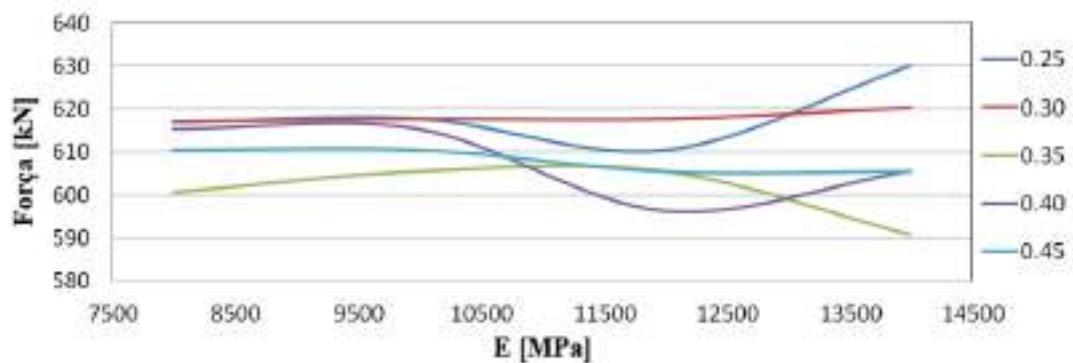
Figura 3.34 – Modelo com fibras horizontais - discretização geral em 0,16 mm



Fonte: Autor

A Figura 3.34 apresenta a discretização aplicada com a disposição dos elementos em cada componente.

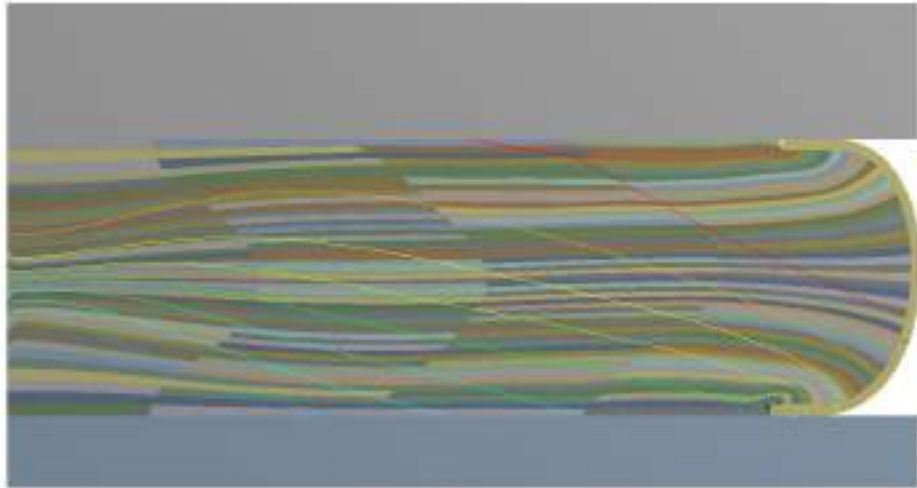
Figura 3.35 – Comparação da força de impacto - v-E – caso com fibras horizontais



Fonte: Autor

Há a possibilidade de estudar de que forma as fibras interagem e, portanto, entender o mecanismo de deformação. A Figura 3.36 apresenta as linhas de mesma deformação ao longo das fibras horizontais após conformação. É importante destacar o alongamento lateral das fibras que manteve no geral as características do caso controle, porém, segundo a Figura 3.35 não atingiu a mesma faixa de força, com uma força média de aproximadamente 610 kN.

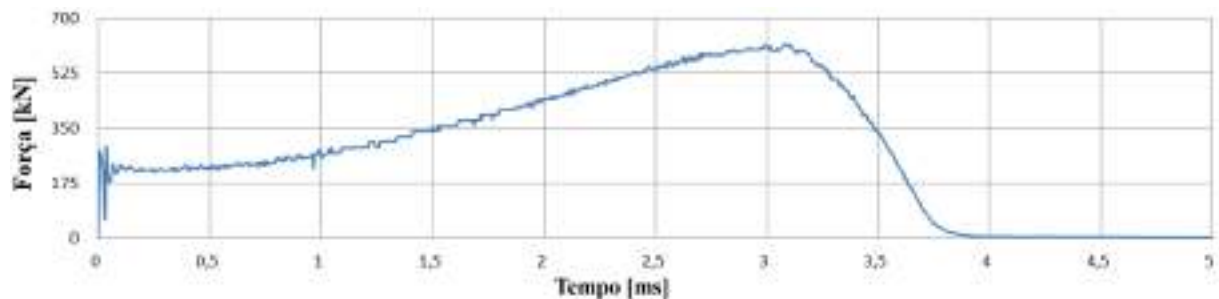
Figura 3.36 – Linhas de deformação – axissimétrico com fibras horizontais



Fonte: Autor

Fixando o módulo de elasticidade em 12 GPa e o poisson em 0,3 foi extraída a força no tempo, segundo Figura 3.37. A desaceleração neste foi atenuada quando comparada ao caso controle pois ocorre em aproximadamente 0,7 ms enquanto que no outro temos 0,3 ms. Os resultados estão coerentes pois quanto maior a desaceleração, maior é a força aplicada.

Figura 3.37 – Força de impacto no tempo – caso com fibras horizontais

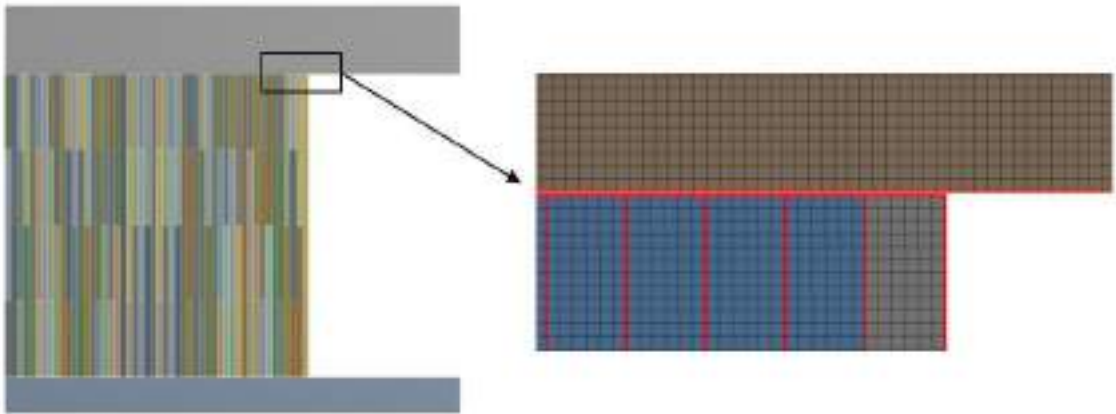


Fonte: Autor

3.3.3.3 *Caso com fibras verticais*

O caso com fibras verticais apresentou o comportamento de compressão longitudinal das fibras de madeira, o que demonstra ser uma boa opção para aproximar a modelagem, se recursos computacionais estiverem disponíveis.

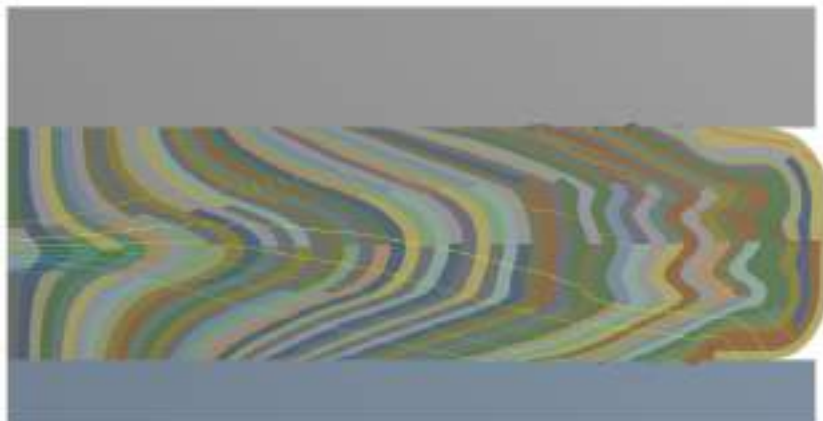
Figura 3.38 – Modelo com fibras horizontais - discretização geral em 0,16 mm



Fonte: Autor

A Figura 3.39 apresenta as linhas de deformação no instante de compressão máxima. É importante destacar a quebra dessas linhas, enquanto que no caso anterior elas eram majoritariamente contínuas, aqui há uma quebra nas regiões de maior deformação. Esse fenômeno é justamente o deslizamento entre fibras. Em paralelo, vemos que há incidência de torções locais, já apontado por [12], devido à contenção lateral e que contribui no aumento de resistência da composição.

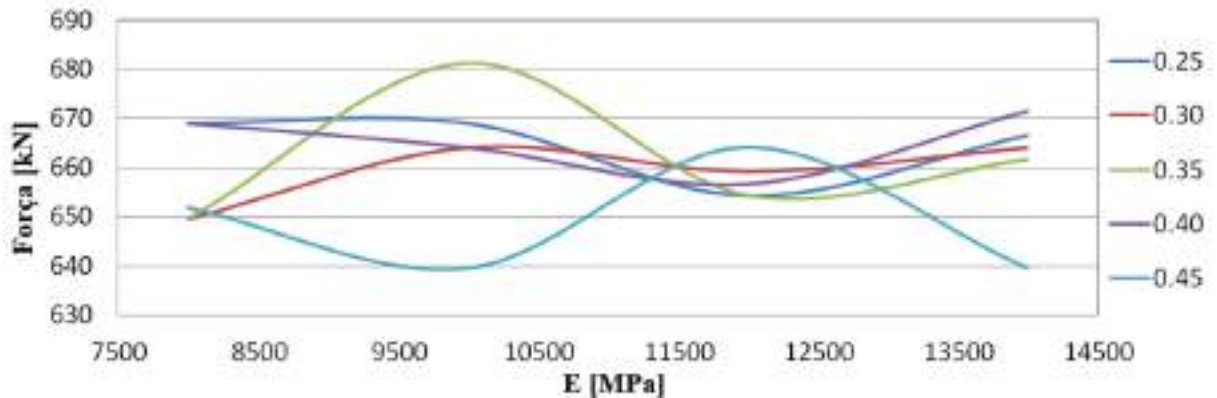
Figura 3.39 – Linhas de deformação – axissimétrico com fibras verticais



Fonte: Autor

Conseguimos nesse momento notar comparativamente a diferença no processo de deformação das fibras e quando observamos o desenvolvimento da força no tempo de ambos os casos podemos inferir a influência da torção das fibras no potencial de absorção de energia. A força média é de aproximadamente 660 kN.

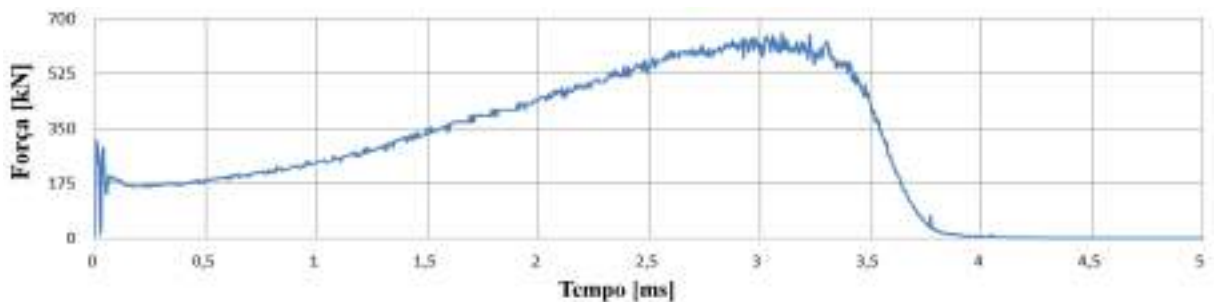
Figura 3.40 – Comparação da força de impacto - v-E – caso com fibras verticais



Fonte: Autor

A desaceleração para o caso de fibras verticais é mais acentuada e por mais tempo que quando comparada ao caso com fibras horizontais. Há também mais ruído do sinal no tempo, Figura 3.41, e isso se deve às diferentes torções das fibras conforme se aproximam da contenção metálica em que, apesar dela, deforma mais livremente do que no centro.

Figura 3.41 - Força de impacto no tempo – caso com fibras verticais



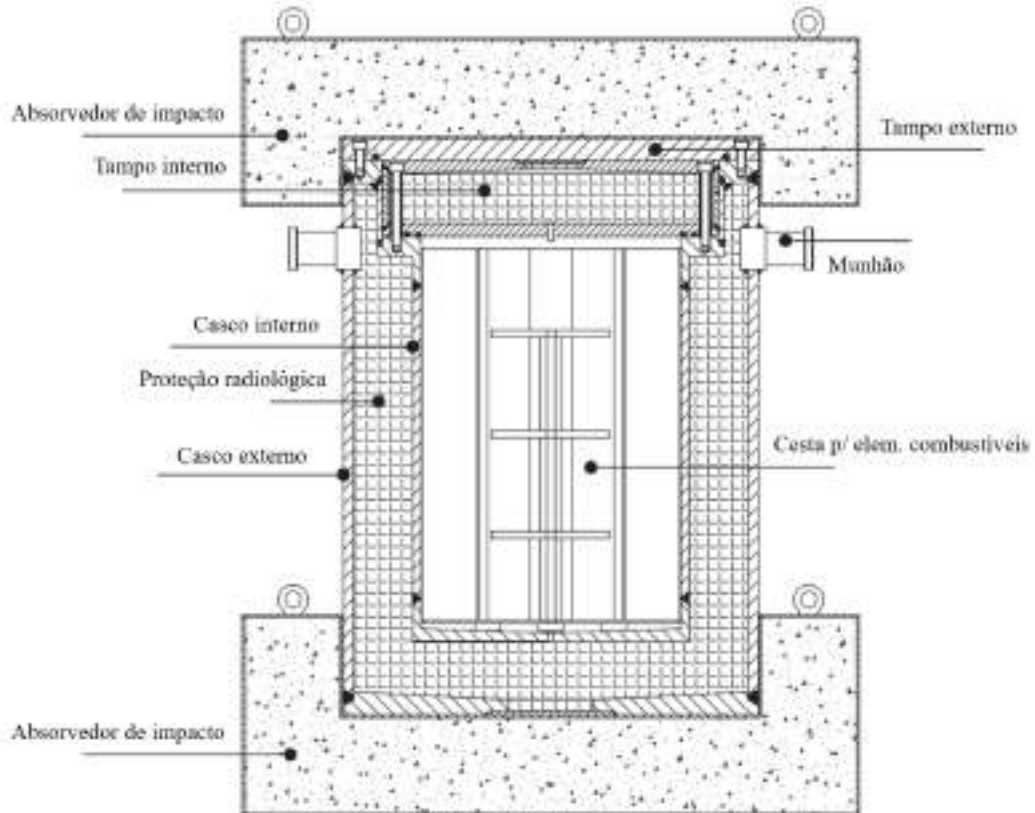
Fonte: Autor

A diferença no desempenho da madeira, ou semelhantes, é significativa entre os casos em que se considera a orientação das fibras. Uma vez que a curva de força no tempo se expressou muito semelhante entre os casos, podemos concluir a partir da força máxima um ganho de aproximadamente 10% em termos de resistência a compressão no uso de fibras verticais.

4 CASO DE ESTUDO

A partir dos trabalhos mencionados na sessão 2.2, é proposta uma revisão da modelagem numérica com ferramentas atualizadas. A geometria construída é apresentada na Figura 4.1, e foram consideradas três condições de queda de 9 m para a análise numérica.

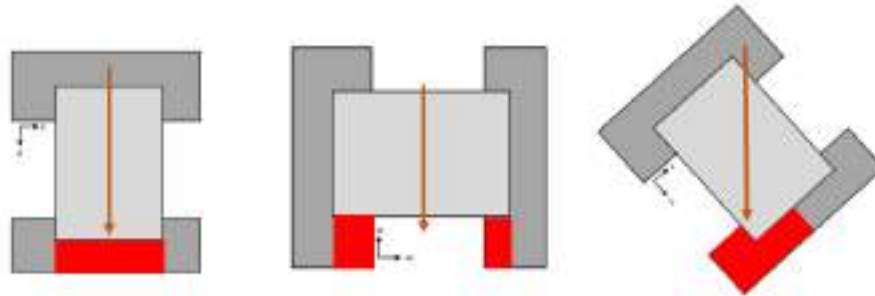
Figura 4.1 - Projeto da embalagem



Fonte: MATTAR NETO, M, et al, Options for interim storage of IEA-R1 research reactor spent fuels [18], modificado

Os testes representados pelas análises numéricas são: a queda vertical com o tampo externo para baixo, a queda horizontal e queda de quina a 47° . Em cada caso, temos os respectivos volumes úteis de absorção de impacto e as respostas de máxima aceleração e deslocamentos dos componentes devem ser avaliados, conforme Figura 4.2.

Figura 4.2 – Análises numéricas: Vertical (esquerda); Horizontal (centro); Inclinado 47° (direita);



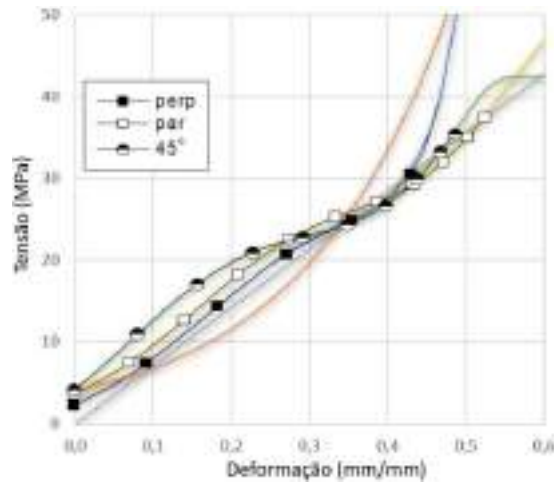
Fonte: Autor

A discussão sobre a capacidade do material na absorção de energia em [19] foi reproduzida aqui na forma de um estudo amplo do mapeamento realizado em OSB (*Oriented Strand Board*), formada a partir de lascas de madeira prensadas combinadas com aglomerantes. Foram aproveitadas as informações dos ensaios de corpos de prova para enriquecer o modelo de material com as curvas características conforme orientação da fibra. Os trabalhos [23], [24], [25], [26], [27] e [28] contribuíram na expansão do estudo das possibilidades de modelagem para o OSB. Um dos modelos mais comuns para representação de sólidos celulares é o BILKHU-DUBOIS de [22] que não foi aplicado aqui devido a representação direta das curvas tensão-deformação em 3 direções de [17]. Em [23], o modelo elastoplástico de [22] é aplicado para representar ensaios de compressão de espumas rígidas que em alguns casos pode apresentar comportamento semelhante à madeira, a depende da configuração das condições de contorno. Como realizados no Capítulo 3, em [24] são comparadas as taxas de deformações de algumas espécies de madeira e apresentadas estimativas de módulos de elasticidades. Em [25], é discutida a sensibilidade de corpos celulares ao efeito taxa de deformação e é mencionado que a curva tensão-deformação também deve ser orientada ao caso de impacto. Um aspecto importante da madeira é a dependência da densidade relativa, ou seja, a relação de vazios presentes da formação celular e, em [26], é comparada de forma qualitativa à outras estruturas como ossos ou espumas. Apesar de também não aplicado, foi verificada a possibilidade de se usar o modelo de material de [27], sendo esse o MAT_WOOD, de *type* 143. Este, por ser específico de madeira, traz consigo configurações diretas para espécies de madeira e é transversalmente isotrópico. Porém, para o uso adequado, seriam necessárias propriedades bem detalhadas e nas três direções, ou seja, um material bem conhecido.

4.1 OSB – ORIENTED STRAND BOARD – ESTIMATIVA ANALÍTICA

Para o OSB foram modeladas as curvas dos ensaios e propostas aproximações distintas para a curva tensão x deformação, conforme Figura 4.3.

Figura 4.3 – Aproximações das curvas elastoplásticas aplicadas



Fonte: MATTAR NETO, M, et al, *Analysis and design of spent fuel transport cask impact limiters* [16], modificado

Das curvas, temos as equações que descrevem os respectivos comportamentos adequadamente representados até a deformação de 0,45 mm/mm. Através de ferramentas de integração podemos montar as equações de balanço energético para cada caso a partir da expressão, onde:

$$\frac{1}{2}mV_f^2 = \frac{1}{2}mV_i^2 + mgh - AL \int \sigma(\varepsilon)d\varepsilon \quad (4.1)$$

Onde: m é a massa total; Vf é a velocidade final; Vi é a velocidade inicial; g é a gravidade; h é altura final; A é a área de impacto; L é a altura útil do corpo de absorção; $\sigma(\varepsilon)$ é a tensão para uma dada deformação;

- Aproximação Linear:

$$\sigma_{lin} = 71,33\varepsilon \quad \text{portanto,} \quad \int \sigma_{lin} d\varepsilon = 35,665\varepsilon^2$$

Logo, o balanço energético:

$$-806,5889\varepsilon^2 + 1,4711\varepsilon + 88,445 = 0 \quad (4.2)$$

- Aproximação Exponencial:

$$\sigma_{exp} = 4,0455e^{5,2879\varepsilon} \quad \text{portanto,} \quad \int \sigma_{exp} d\varepsilon = 0,7650e^{5,2879\varepsilon}$$

Logo, o balanço energético:

$$-17,3021e^{5,2879\varepsilon} + 1,4711\varepsilon + 88,445 = 0 \quad (4.3)$$

- Aproximação Polinomial para as fibras perpendiculares ao impacto:

$$\sigma_{per} = 51314\varepsilon^6 - 55916\varepsilon^5 + 23219\varepsilon^4 - 5016\varepsilon^3 + 654\varepsilon^2 + 24,145\varepsilon + 2,2618$$

Portanto,

$$\int \sigma_{per} d\varepsilon = 7330,6\varepsilon^7 - 9319,3\varepsilon^6 + 4643,8\varepsilon^5 - 1254\varepsilon^4 + 218\varepsilon^3 + 12,0725\varepsilon^2 + 2,2618\varepsilon$$

Logo, o balanço energético:

$$\begin{aligned} & -165790\varepsilon^7 + 210760\varepsilon^6 - 105020\varepsilon^5 + 28360\varepsilon^4... \\ & -4930,2\varepsilon^3 - 273,03\varepsilon^2 - 49,681\varepsilon + 88,445 = 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

- Aproximação Polinomial para as fibras paralelas ao impacto:

$$\sigma_{par} = -19051\varepsilon^6 + 31152\varepsilon^5 - 17425\varepsilon^4 + 3740,3\varepsilon^3 - 207,86\varepsilon^2 + 58,478\varepsilon + 3,427$$

Portanto,

$$\int \sigma_{par} d\varepsilon = -2721,6\varepsilon^7 + 5192\varepsilon^6 - 3485\varepsilon^5 + 935,08\varepsilon^4 - 69,287\varepsilon^3 + 29,239\varepsilon^2 + 3,427\varepsilon$$

Logo, o balanço energético:

$$\begin{aligned} & 61550\varepsilon^7 - 117420\varepsilon^6 + 78816\varepsilon^5 - 21147\varepsilon^4... \\ & +1567\varepsilon^3 - 661,2605\varepsilon^2 - 76,0397\varepsilon + 88,445 = 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

- Aproximação Polinomial para as fibras a 45° ao impacto:

$$\sigma_{45} = -20536\varepsilon^6 + 26662\varepsilon^5 - 10522\varepsilon^4 + 1097,6\varepsilon^3 + 0,7349\varepsilon^2 + 82,662\varepsilon + 4,039$$

Portanto,

$$\int \sigma_{45} d\varepsilon = -2933,7\varepsilon^7 + 4443,7\varepsilon^6 - 2104,4\varepsilon^5 + 274,4\varepsilon^4 + 0,245\varepsilon^3 + 41,331\varepsilon^2 + 4,039\varepsilon$$

Logo, o balanço energético:

$$66348\varepsilon^7 - 100500\varepsilon^6 + 47592\varepsilon^5 - 6205,7\varepsilon^4 \dots - 5,54\varepsilon^3 - 934,7295\varepsilon^2 - 89,8715\varepsilon + 88,445 = 0 \quad (4.6)$$

Com as equações de balanço energético podemos determinar a deformação característica, ou esperada, assim como, também estimar a energia específica para cada caso, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Solução das equações de balanço energético

Material	Solução do balanço energético [mm/mm]	Energia Específica (0 – 0,45) [MJ/m³]
Linear	0,3321	7,22
Exponencial	0,3095	7,49
Perpendicular	0,3150	7,60
Paralelo	0,2935	8,13
45°	0,2685	8,57

Fonte: Autor

O cálculo realizado para energia específica quantifica o potencial de absorção do material e serve como parâmetro para o que se espera dos resultados das simulações numéricas.

4.2 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Os principais resultados estão concentrados nos gráficos de aceleração, velocidade e deslocamento vertical por tempo coletados no corpo representativo do suporte preenchido com elementos combustíveis. No entanto, também se destacou a deformação no volume de absorção útil de cada caso.

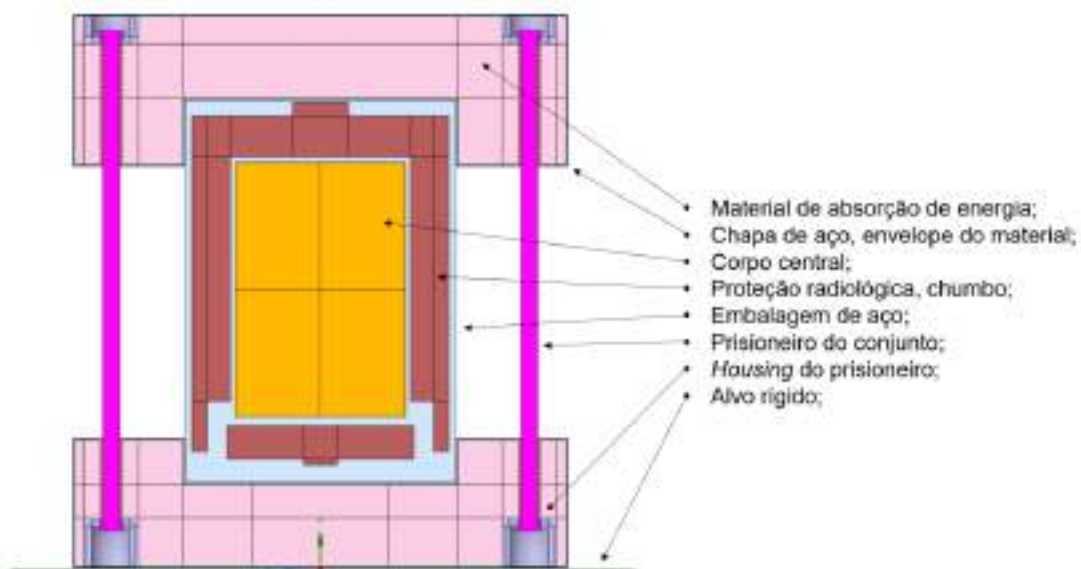
Tabela 4.2 – Propriedades elásticas aplicadas ao OSB

Densidade [kg/m ³]	600
Módulo de elasticidade [MPa]	1350
Poisson	0,2735
Módulo volumétrico [MPa]	993,75
Módulo de cisalhamento [MPa]	530

Fonte: Autor

As propriedades do OSB foram determinadas a partir de testes em laboratório [20], porém, como já apresentado no Capítulo 2, para se garantir propriedades médias há necessidade de significativo controle das amostras. Dessa forma, os valores aqui representados podem apresentar variações.

Figura 4.4 – Componentes do modelo analisado



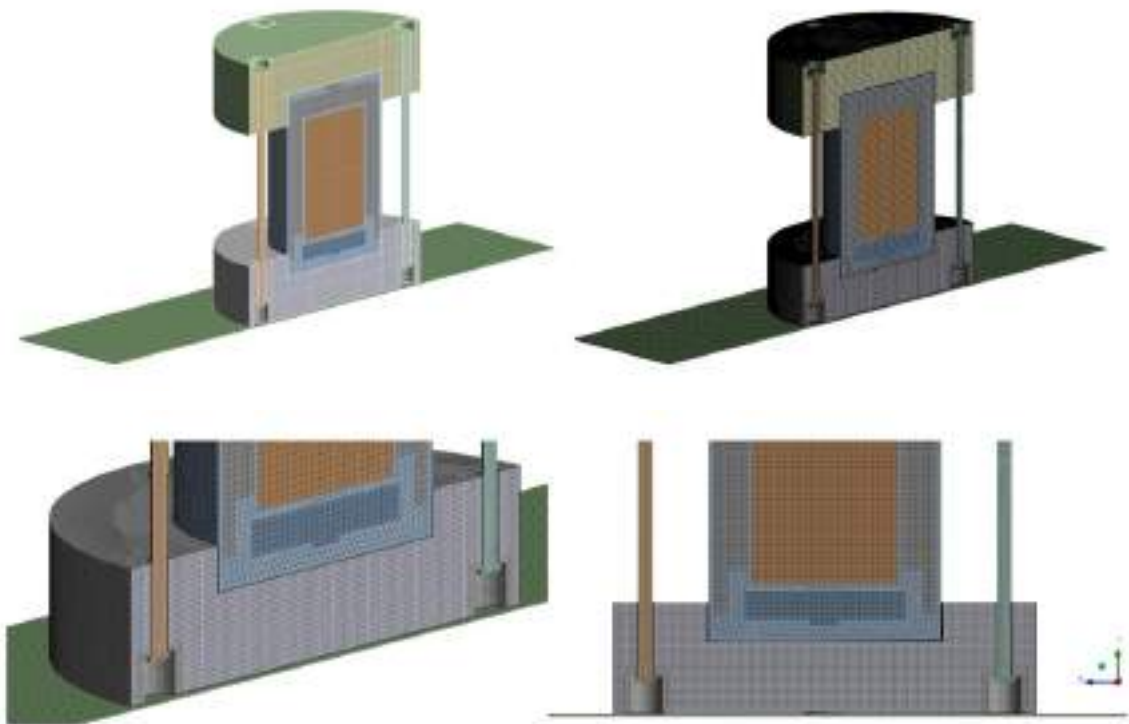
Fonte: Autor

O corpo central foi definido de maneira genérica para que de forma representativa considere a massa aproximada das estruturas secundárias de fixação e os diferentes tipos de elementos combustíveis. Foi considerado com densidade média de 600 kg/m³, módulo de elasticidade de 200 GPa e poisson de 0,3.

4.2.1 Vertical

O caso vertical é considerado um caso ideal, uma vez que muito dificilmente em uma situação acidental o impacto se daria igualmente distribuído na superfície externa do absorvedor. É importante destacar a diferença nos absorvedores superior e inferior, em que os volumes ocupados pelo *housing* do prisioneiro são diferentes, sendo aqui o maior volume o de impacto.

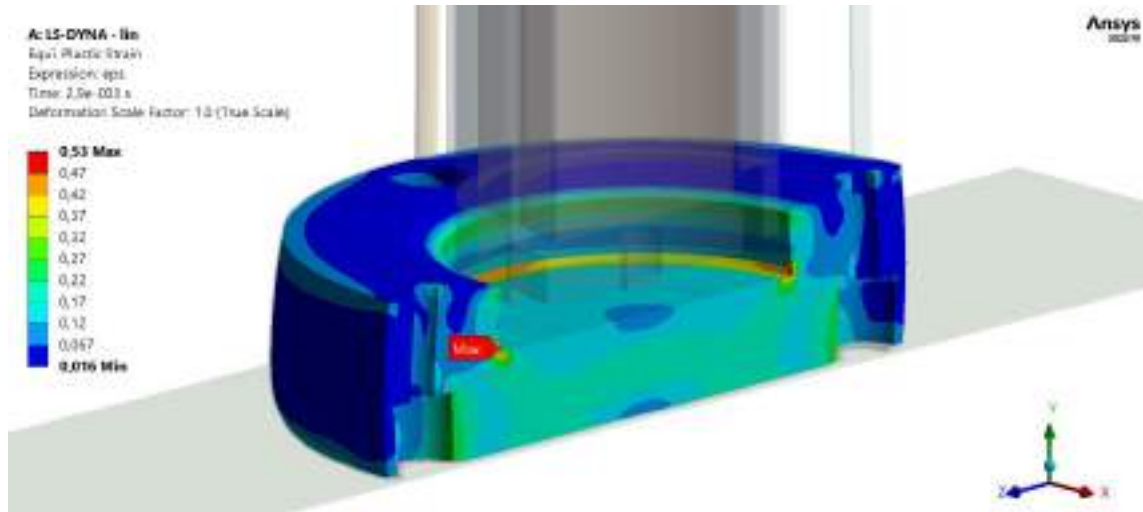
Figura 4.5 – Modelo e malha de elementos finitos aplicada



Fonte: Autor

A malha de elementos finitos contém aproximadamente 400 000 elementos e 370 000 nós de elementos lineares em que predominam elementos hex8, elementos sólidos de 8 nós. Os resultados de deformação plástica, tensões, deslocamentos e acelerações a seguir pertencem ao material de aproximação Linear, todos retirados de seus instantes de máximos.

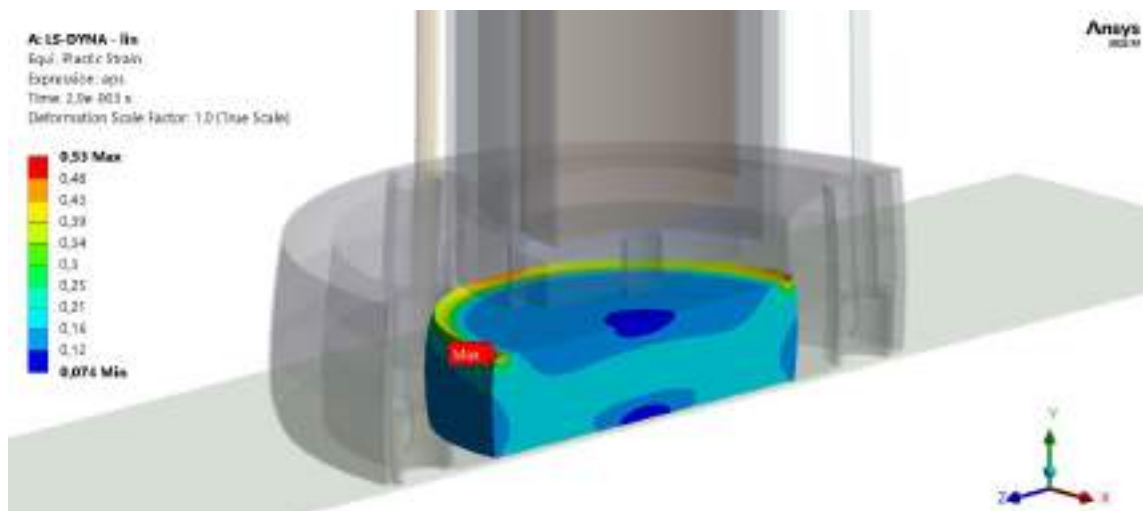
Figura 4.6 – Deformação plástica do volume total



Fonte: Autor

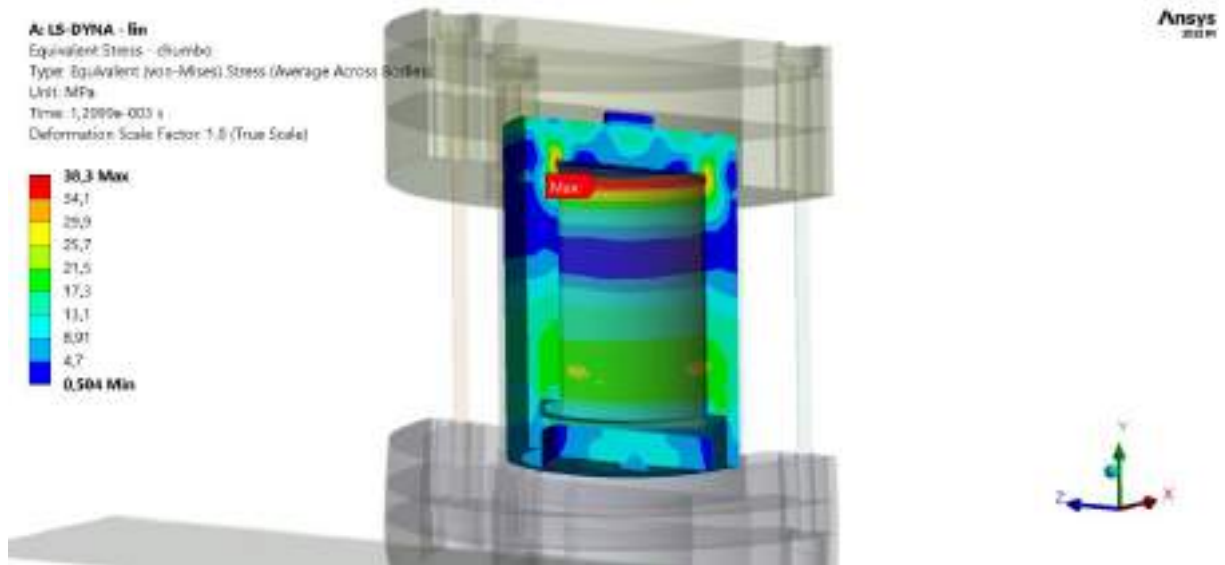
Conforme Figura 4.7, temos uma deformação plástica maior na região que acomoda primeiro os corpos superiores. As regiões de máximo estão na mesma posição angular que os prisioneiros e o *housing*, o que indica influência característica do projeto diretamente nos resultados. É possível afirmar que a deformação geral do volume útil está entre 0,25 e 0,3 mm/mm. Se considerarmos 0,27 mm/mm e compararmos com a solução analítica, temos uma diferença de aproximadamente 18%.

Figura 4.7 – Deformação plástica do volume útil



Fonte: Autor

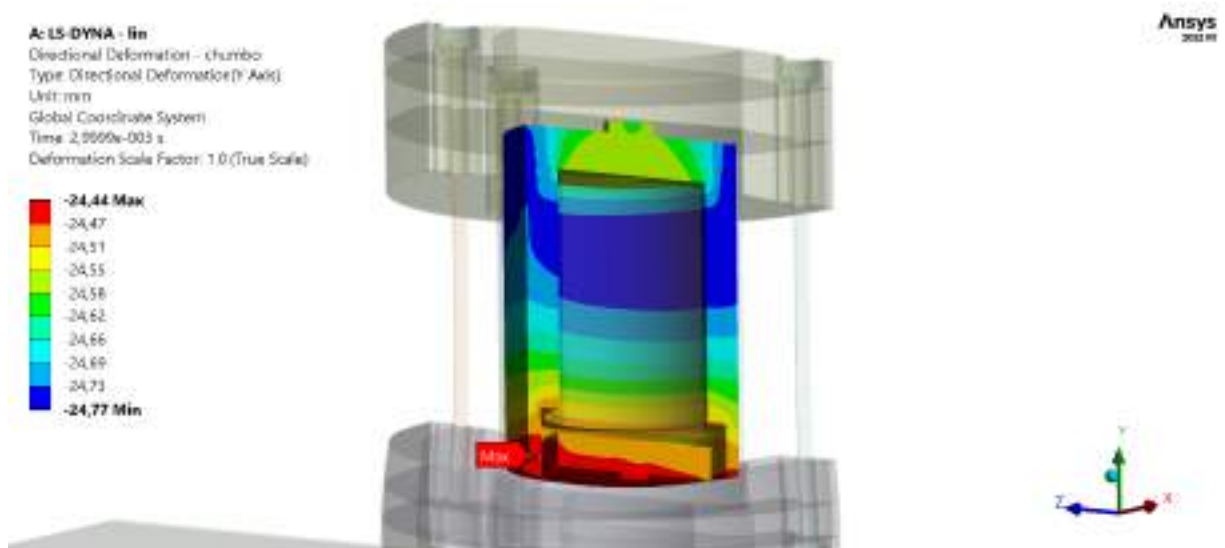
Figura 4.8 – Tensão equivalente de Von-Mises da proteção de chumbo



Fonte: Autor

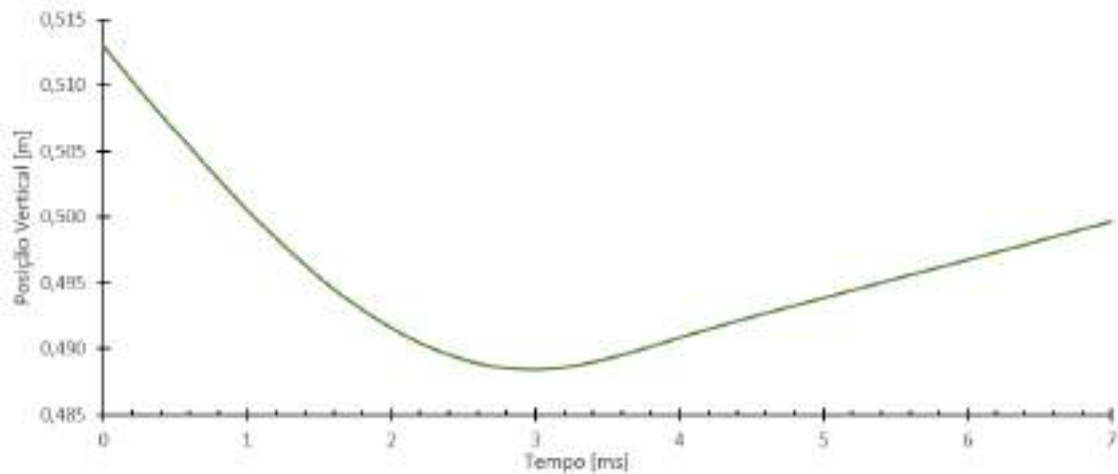
A proteção radiológica, como parte essencial do projeto, deve ser avaliada, logo temos a tensão máxima de 38 MPa, Figura 4.8, e um deslocamento diferencial, também chamado de *slump*, de 0,33 mm, Figura 4.9. Estes resultados estão acima do regime elástico do esperado para chumbo puro. Logo para se estimar a deformação plástica seria necessário precisar as propriedades do material aplicado.

Figura 4.9 – Deslocamento em Y da proteção de chumbo



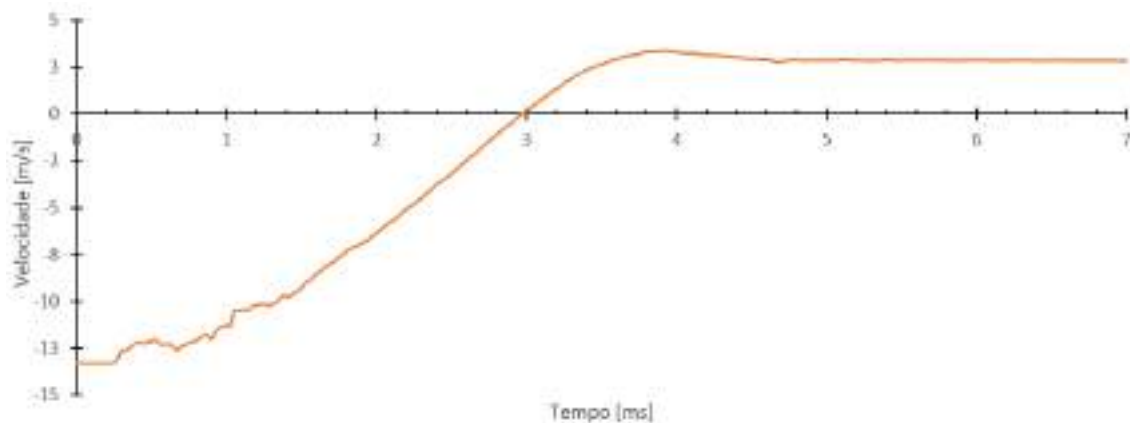
Fonte: Autor

Figura 4.10 – Posição vertical do corpo central



Fonte Autor

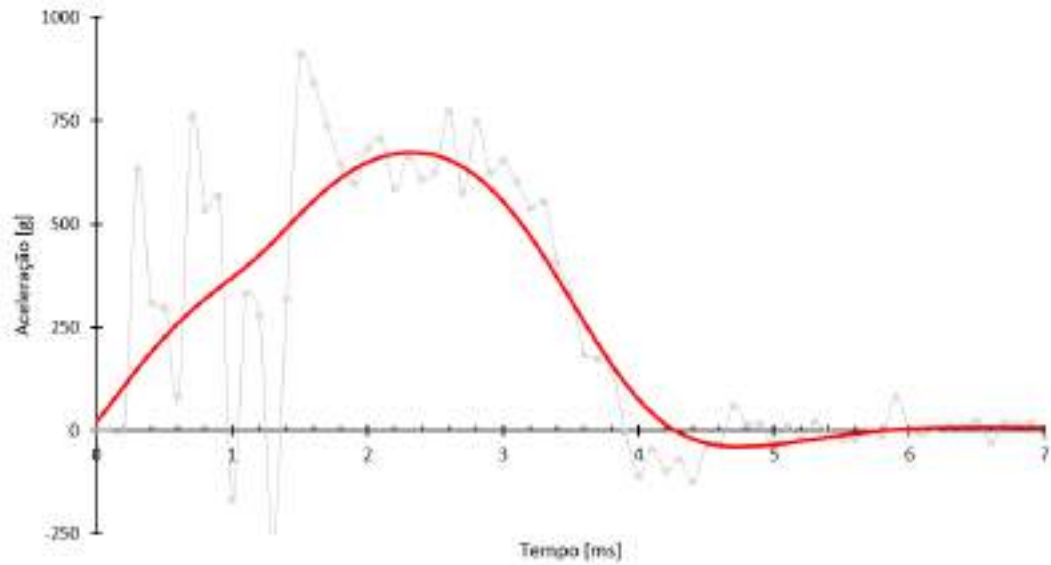
Figura 4.11 – Velocidade vertical do corpo central



Fonte Autor

É possível afirmar que o comportamento geral na variação da posição vertical, Figura 4.10, está em acordo com os benchmarks realizados, assim como o comportamento da velocidade vertical, Figura 4.11. Destacam-se para este caso o instante de compressão máxima, ocorrido entre 2,9 ms e 3 ms, e o instante 4 ms em que temos a velocidade máxima de retorno em aproximadamente 3,4 m/s. Para essa escala de tempo, os efeitos da gravidade não são aparentes, apesar de presentes. A velocidade média nos próximos 15 ms é de 2,9 m/s.

Figura 4.12 – Aceleração vertical do corpo central filtrada - 380 Hz (em vermelho)

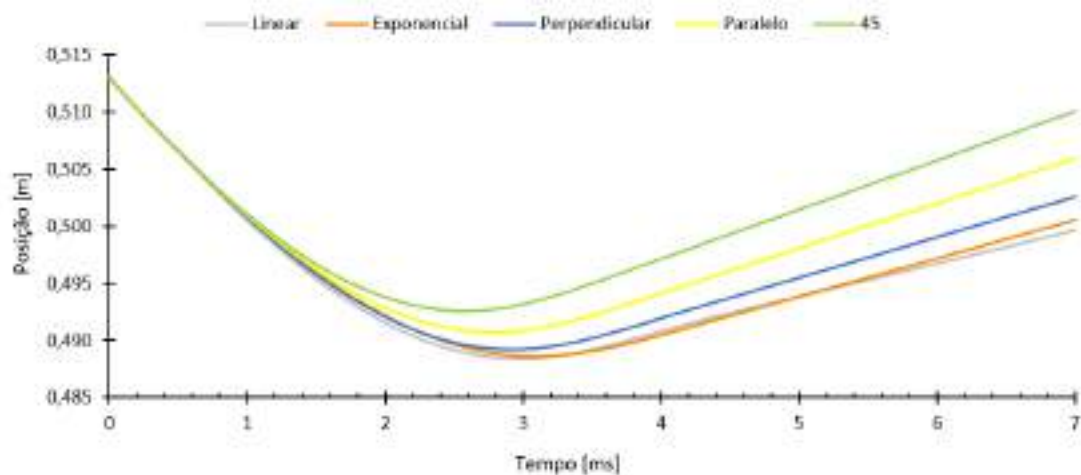


Fonte Autor.

O resultado das acelerações encontradas foi filtrado através do filtro *Butterworth* com frequência de corte de 380 Hz. Essa frequência foi escolhida por representar os principais fenômenos, após testes de várias outras frequências. As acelerações são expressas em unidades da gravidade(g). A desaceleração máxima ocorre no instante 2,3 ms e em magnitude de 672g, Figura 4.12.

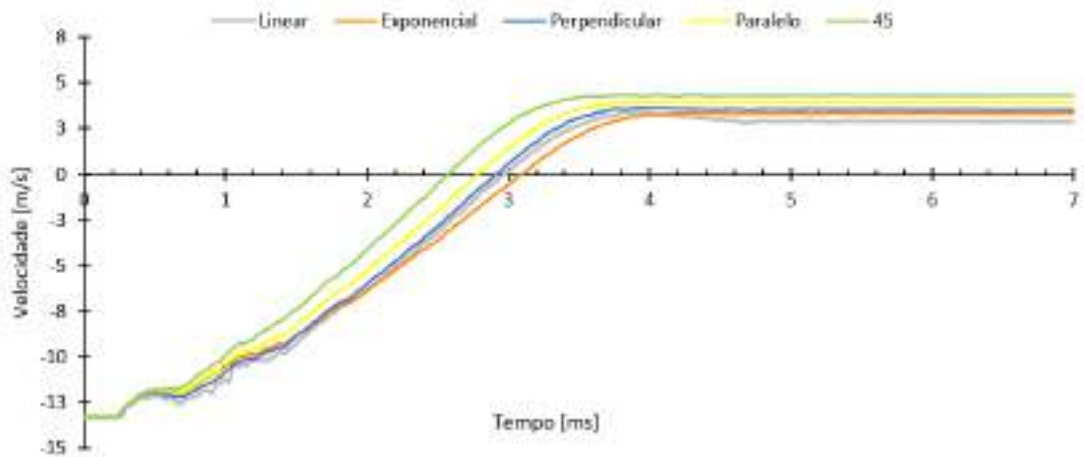
Dessa forma, as figuras a seguir expressam os resultados comparados para as outras aproximações.

Figura 4.13 – Posição vertical do corpo central para todas as aproximações



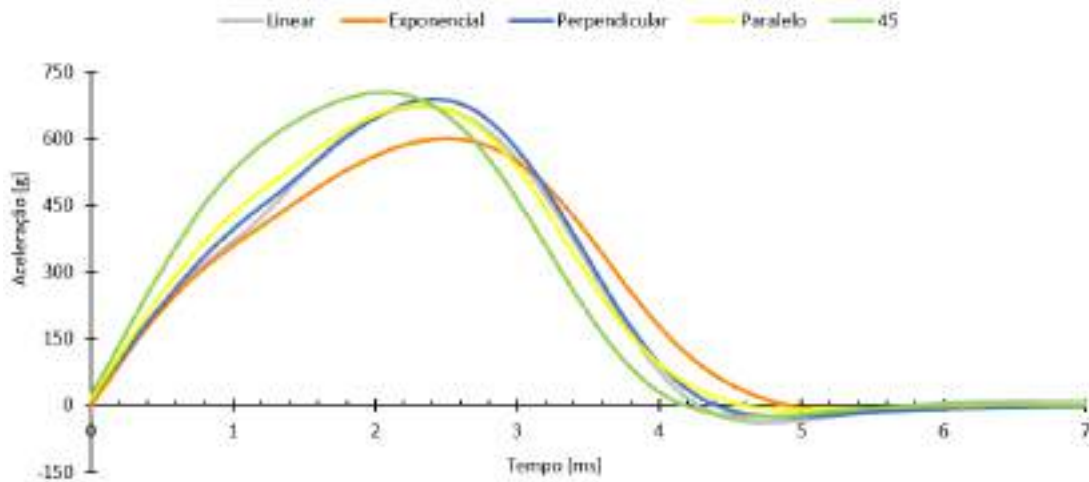
Fonte Autor

Figura 4.14 – Velocidade vertical do corpo central para todas as aproximações



Fonte Autor

Figura 4.15 – Aceleração vertical do corpo central para todas as aproximações



Fonte Autor

Tabela 4.3 – Resumo dos resultados de aceleração e velocidade

Material	ΔS [mm]	Velocidade média de retorno [m/s]	Aceleração máxima desenvolvida [g]	$\Delta t_{\text{impacto}}$ [ms]
Linear	25,54	2,89	672	4,2
Exponencial	24,37	3,29	600	4,8
Perpendicular	23,83	3,47	688	4,4
Paralelo	22,33	3,87	675	4,6
45°	20,46	4,22	703	4,1

Fonte: Autor

Observando os resultados de posição, Figura 4.13, comparativamente o material que representa as fibras do OSB a 45° do vetor do impacto apresentou o menor deslocamento e a maior velocidade de retorno, ambos em um intervalo de tempo menor que todos os outros.

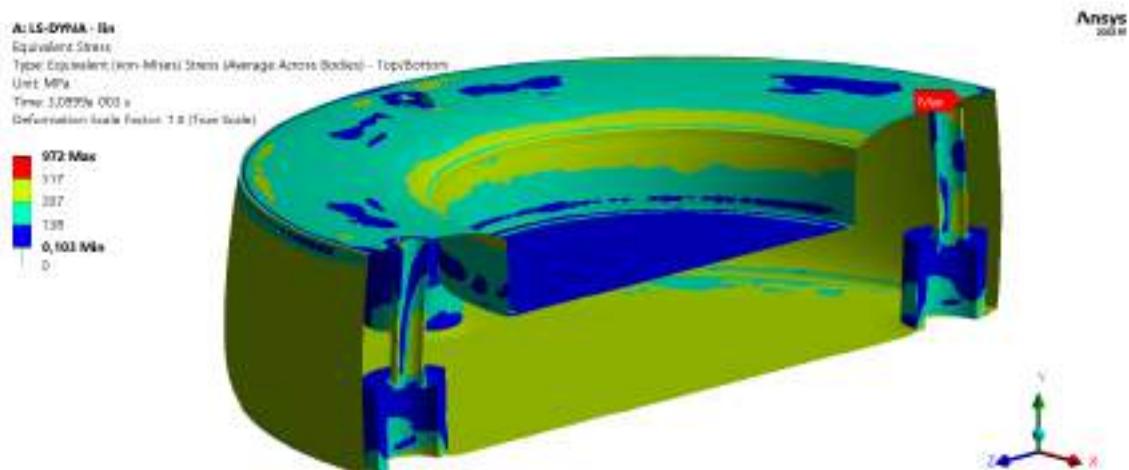
O material Linear apresentou o maior deslocamento vertical e a menor velocidade de retorno. Apesar das diferenças, principalmente quando comparado ao material 45°, a aceleração máxima não apresentou variação significativa, Figura 4.15.

O material de aproximação Exponencial apresentou o menor valor de desaceleração no maior intervalo de tempo de duração do impacto, com menor velocidade de retorno, Tabela 4.3.

Não se observou diferença significativa entre os materiais de aproximação Perpendicular e Paralela. Esse fenômeno se justifica pela característica do impacto, em que se registra a componente resistivas em aço, como o *housing* dos prisioneiros, que atenuam as diferenças entre os casos.

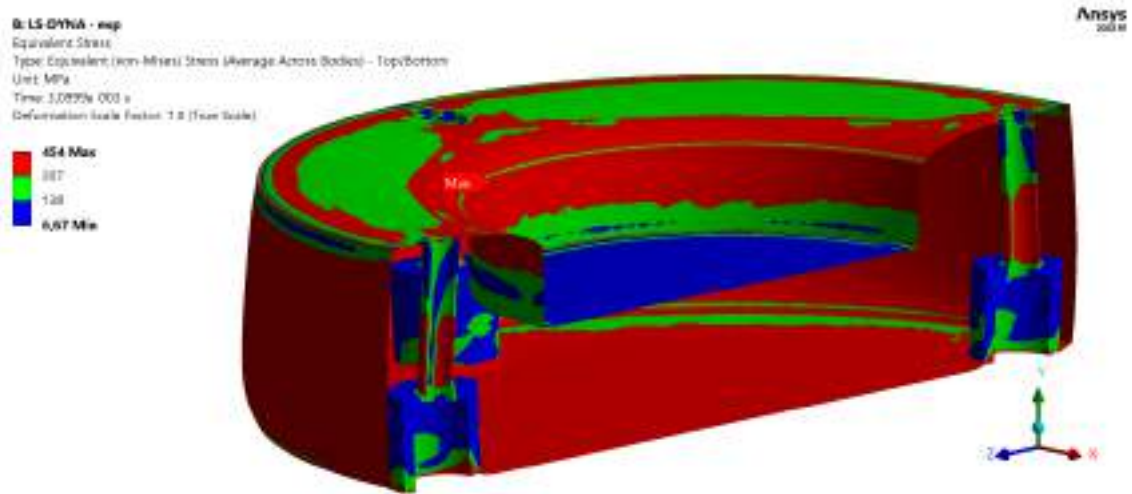
É importante destacar o envelopamento por chapa de aço do material de absorção de energia. Como apresentado no Capítulo 3, a contenção contribui ao sistema e dessa forma, as tensões desenvolvidas no componente no instante do primeiro máximo são apresentadas a seguir. Os resultados de tensões estão filtrados pelas tensões admissíveis primárias e secundárias para aço inox médio. A tensão de escoamento e de ruptura adotadas são de, respectivamente, 207 MPa e 517 MPa.

Figura 4.16 – Tensões máximas na contenção para o material Linear



Fonte Autor

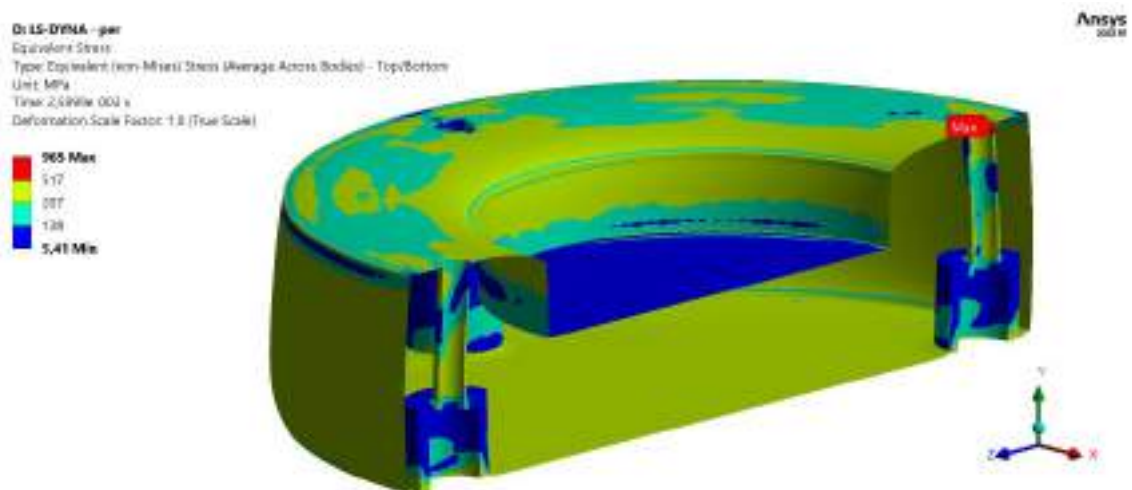
Figura 4.17 – Tensões máximas na contenção para o material Exponencial



Fonte Autor

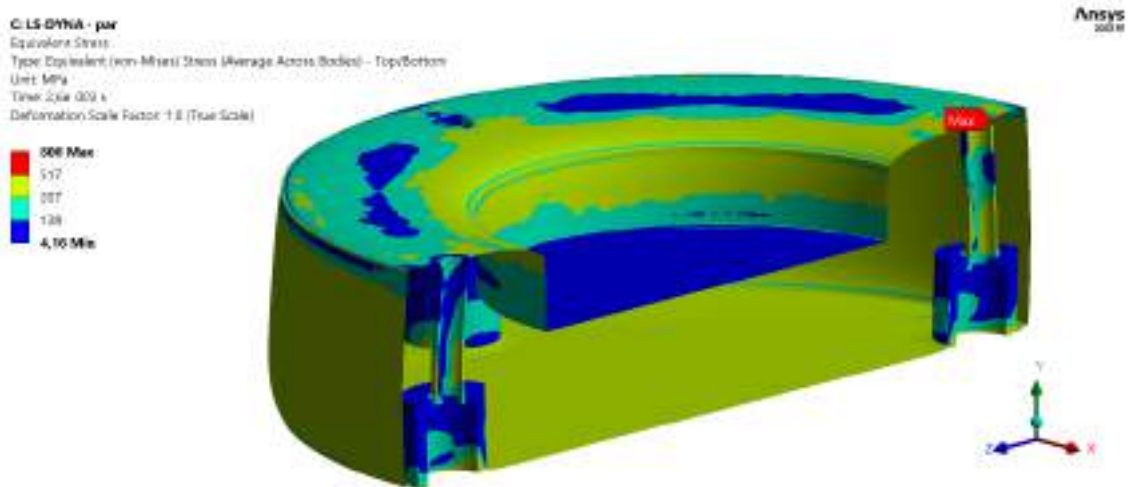
Como apresentado na Figura 4.17, apesar das grandes regiões de plastificação, não se observou tensões superiores a tensão de ruptura. Esse resultado é entendido como coerente frente ao melhor desempenho, Tabela 4.3, da aceleração, da velocidade de retorno e do intervalo de tempo.

Figura 4.18 – Tensões máximas na contenção para o material Perpendicular



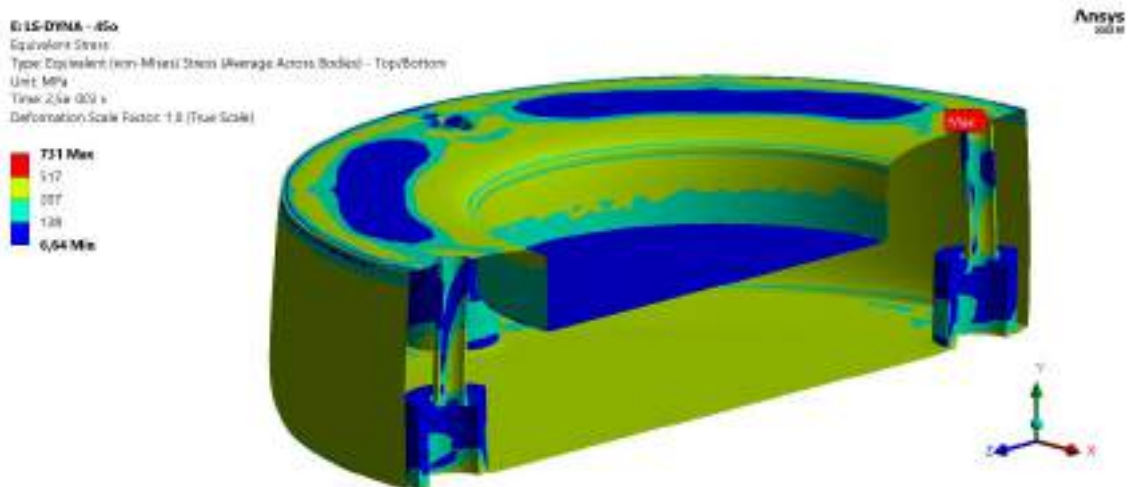
Fonte Autor

Figura 4.19 – Tensões máximas na contenção para o material Paralelo



Fonte Autor

Figura 4.20 – Tensões máximas na contenção para o material 45°



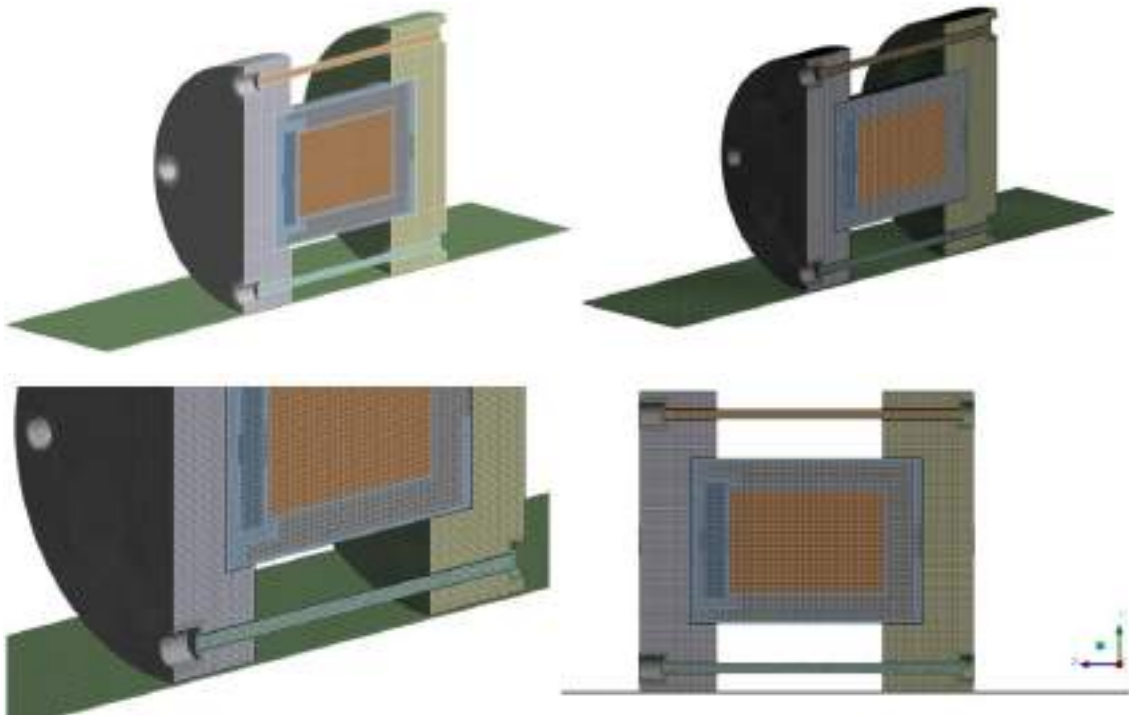
Fonte Autor

As tensões máximas encontradas são significativamente superiores às tensões admissíveis médias para um aço inox médio. É esperado que as soldas das chapas de aço rompam em múltiplos pontos. Esse rompimento deve influenciar na contenção do material de absorção e, portanto, prevê-se para cada caso uma redução nas acelerações máximas encontradas e uma velocidade média de retorno inferior.

4.2.2 Horizontal

O caso Horizontal permite observar ambos absorvedores atuando, o que contribui na avaliação do desempenho de cada um deles frente a diferença de projeto.

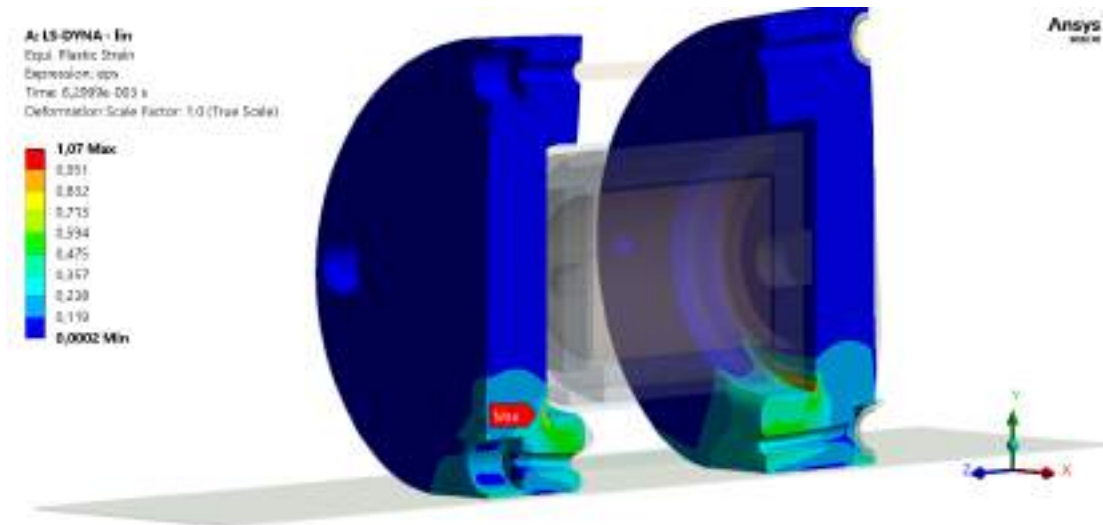
Figura 4.21 – Modelo e malha de elementos finitos aplicada



Fonte Autor

A malha de elementos finitos contém aproximadamente 540 000 elementos e 520 000 nós de elementos lineares em que predominam elementos hex8, elementos sólidos de 8 nós, Figura 4.21. O modelo do caso Horizontal exigiu melhor discretização em ambos absorvedores e por isso o número de nós e elementos é maior do que nos outros dois casos. Os resultados a seguir pertencem ao material de aproximação Linear, assim como apresentado no caso Vertical.

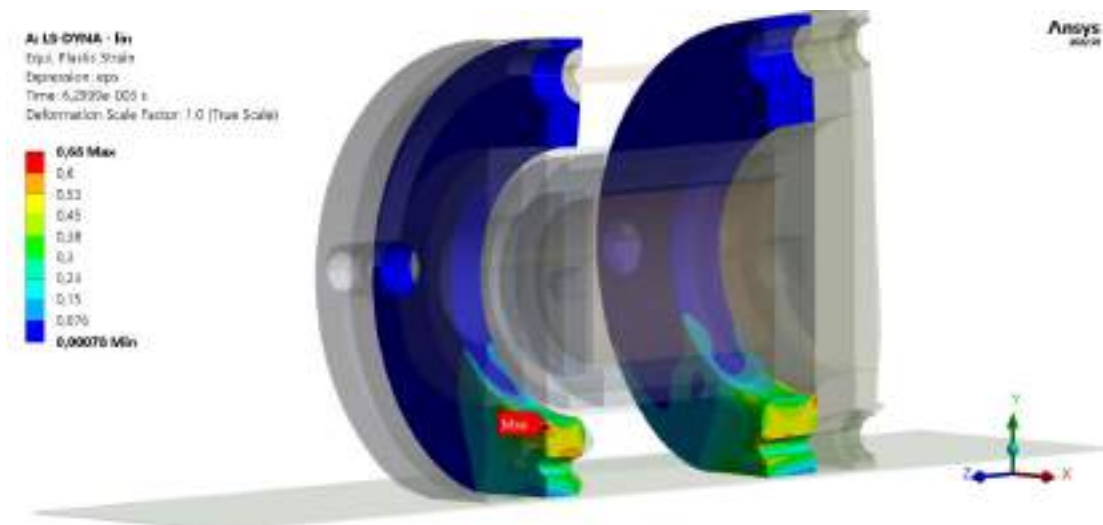
Figura 4.22 – Deformação plástica do volume total



Fonte: Autor

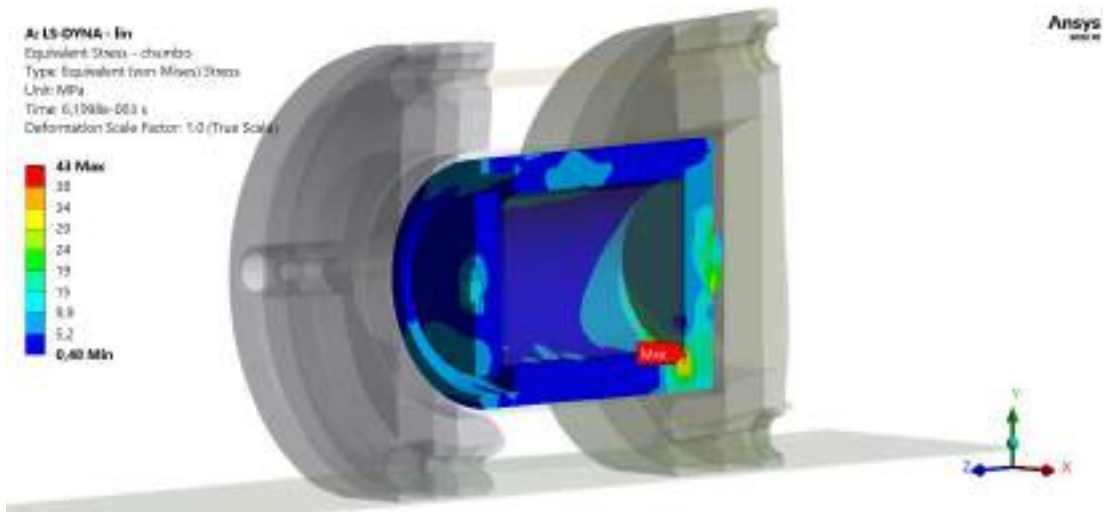
A Figura 4.22 apresenta o comportamento geral no instante de máximo e é possível verificar o deslocamento em Z dos absorvedores, gerando uma inclinação ao centro da embalagem. Esse fenômeno se dá pela expansão longitudinal (Z) do volume em compressão (Y) que encontra resistência na região superior junto ao prisioneiro. A deformação geral do volume útil está entre 0,45 e 0,53 mm/mm e, se considerarmos 0,5 mm/mm e compararmos com a solução analítica, temos uma diferença de aproximadamente 34%. Contudo, há aqui a necessidade de se reescreverem as equações para a compatibilização do volume considerado.

Figura 4.23 – Deformação plástica do volume útil aproximado



Fonte: Autor

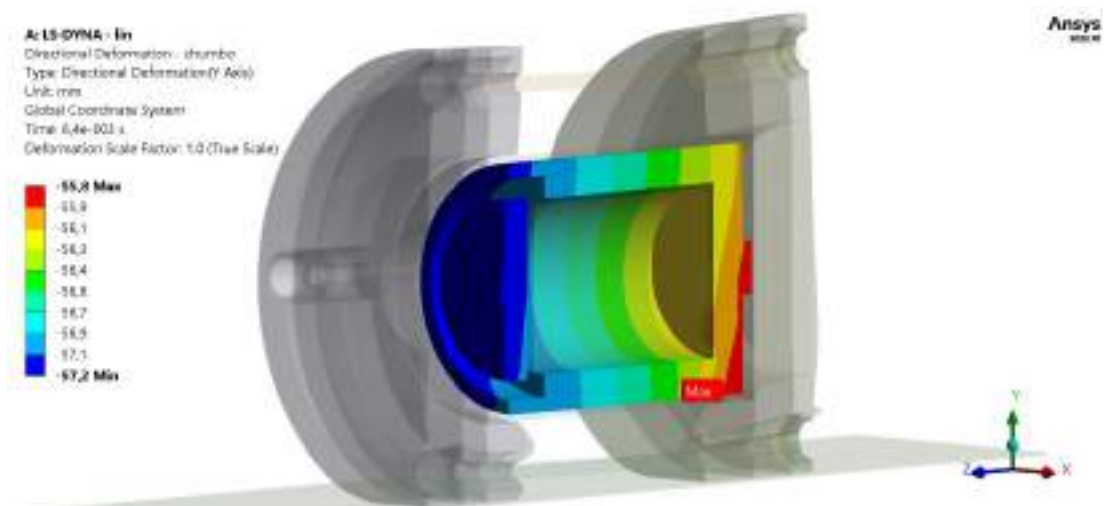
Figura 4.24 – Tensão equivalente de Von-Mises da proteção de chumbo



Fonte: Autor

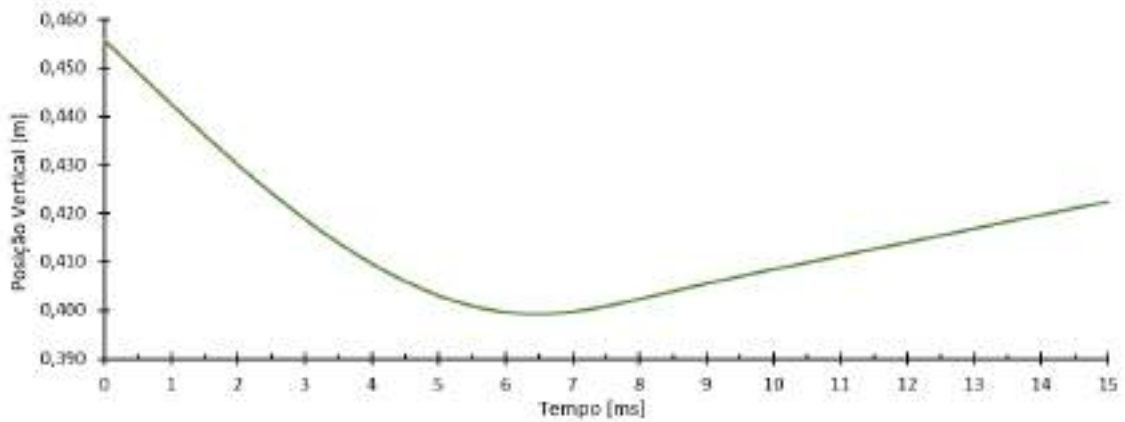
Para proteção radiológica, temos a tensão máxima de 43 MPa, Figura 4.24, e um deslocamento diferencial de 1,4 mm, Figura 4.25. Estes resultados de tensão estão acima do limite de escoamento médio para o chumbo puro, porém aqui está representado com um material linear e, portanto, não foram observadas deformações plásticas.

Figura 4.25 – Deslocamento em Y da proteção de chumbo



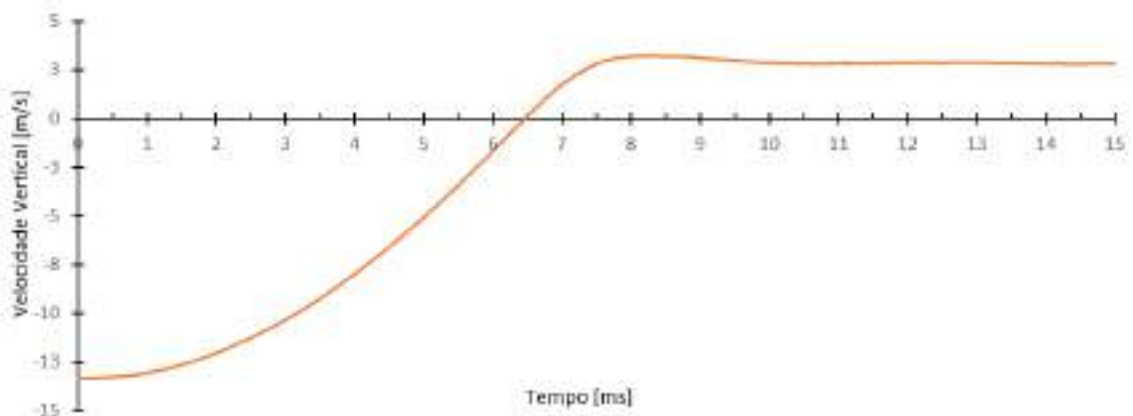
Fonte: Autor

Figura 4.26 – Posição vertical do corpo central



Fonte Autor

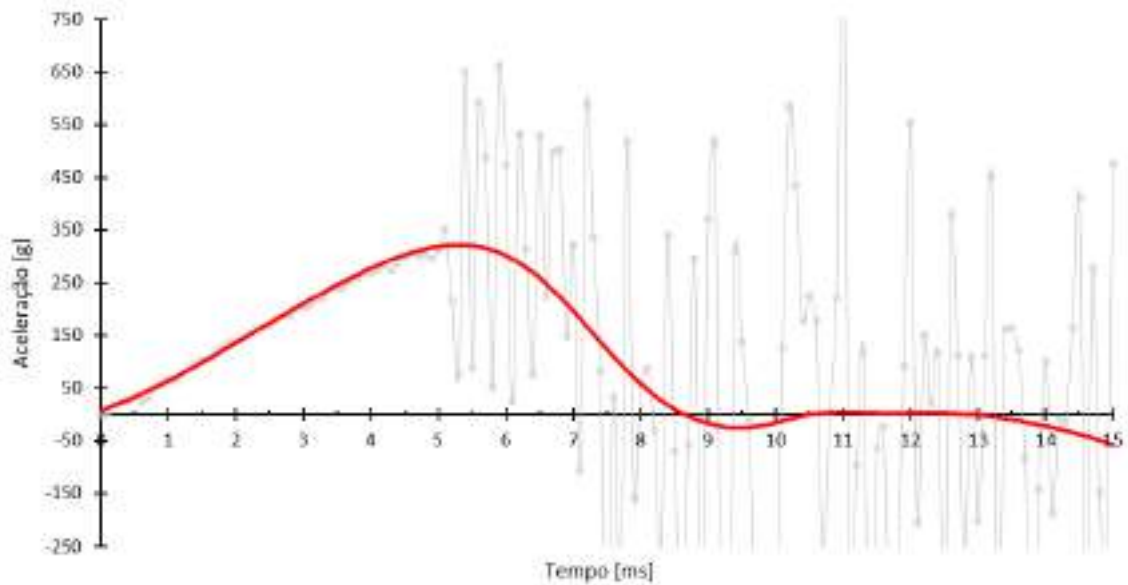
Figura 4.27 – Velocidade vertical do corpo central



Fonte Autor

Assim como o caso anterior, o comportamento geral na variação da posição vertical está em acordo com os benchmarks realizados, assim como o comportamento da velocidade vertical, Figura 4.26 e 4.27. Neste caso o instante de compressão máxima ocorre entre 6 ms e 6,2 ms, e no instante de 8 ms temos a velocidade máxima de retorno em aproximadamente 3,2 m/s. A velocidade média nos próximos 10 ms é de 2,8 m/s.

Figura 4.28 – Aceleração vertical do corpo central filtrada - 180 Hz (em vermelho)

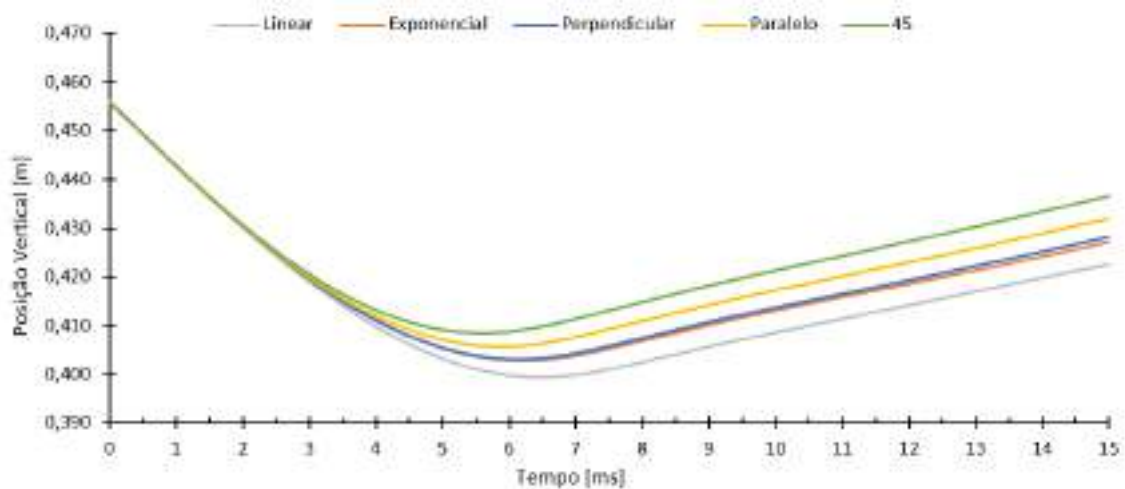


Fonte Autor

O resultado das acelerações encontradas, após o filtro *Butterworth* com frequência de corte de 180 Hz, apresentou uma desaceleração máxima de 322g no instante 5,2 ms, conforme Figura 4.28. O comportamento mais estável dos dados sem filtro até os 5 ms se deve a característica desse caso em que nesse intervalo a material absorvedor atua livre, juntamente com sua contenção, sem influência do *housing* de aço dos prisioneiros.

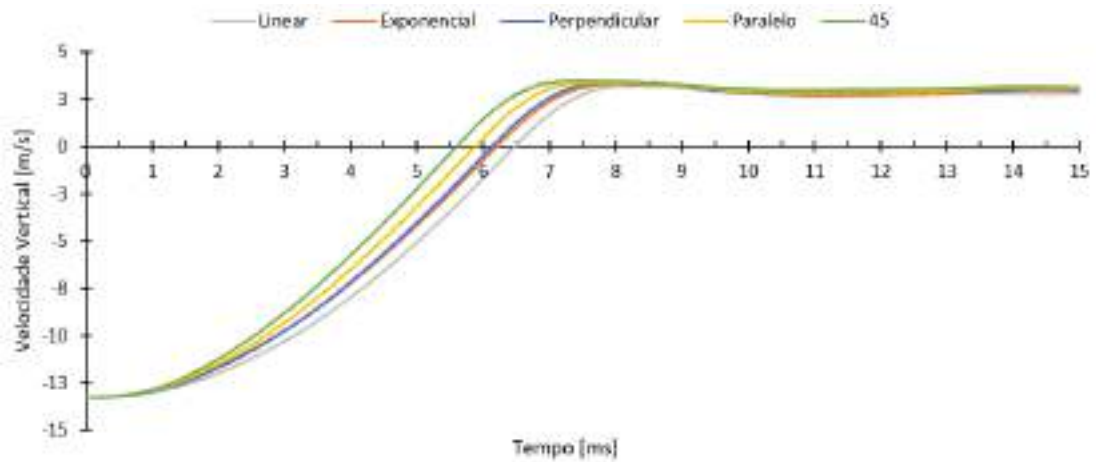
As figuras a seguir apresentam os resultados lado a lado dos outros materiais.

Figura 4.29 – Posição vertical do corpo central para todas as aproximações



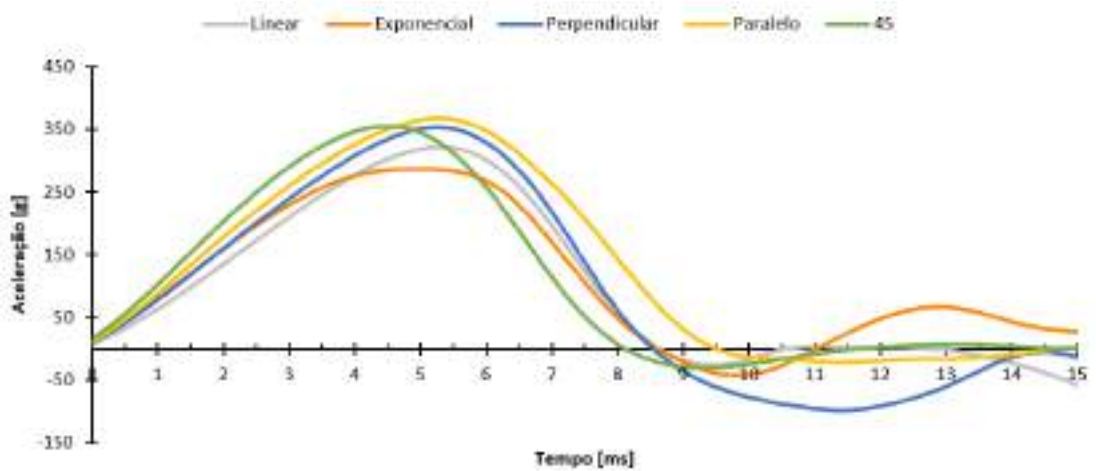
Fonte Autor

Figura 4.30 – Velocidade vertical do corpo central para todas as aproximações



Fonte Autor

Figura 4.31 – Aceleração vertical do corpo central para todas as aproximações



Fonte Autor

Tabela 4.4 – Resumo dos resultados de aceleração e velocidade

Material	ΔS [mm]	Velocidade média de retorno [m/s]	Aceleração máxima desenvolvida [g]	$\Delta t_{\text{impacto}}$ [ms]
Linear	56,70	2,83	322	8,5
Exponencial	53,23	2,85	287	8,5
Perpendicular	53,89	2,93	354	8,5
Paralelo	55,50	2,97	369	9,5
45°	58,30	3,08	355	8,1

Fonte: Autor

Assim como no caso Vertical, o material que representa as fibras do OSB a 45° do vetor do impacto apresentou o menor deslocamento e a maior velocidade de retorno, ambos em um intervalo de tempo menor que todos os outros materiais, conforme Tabela 4.4.

O material Linear apresentou o maior deslocamento vertical e a menor velocidade de retorno. No entanto, a desaceleração máxima se manteve próxima em magnitude aos outros.

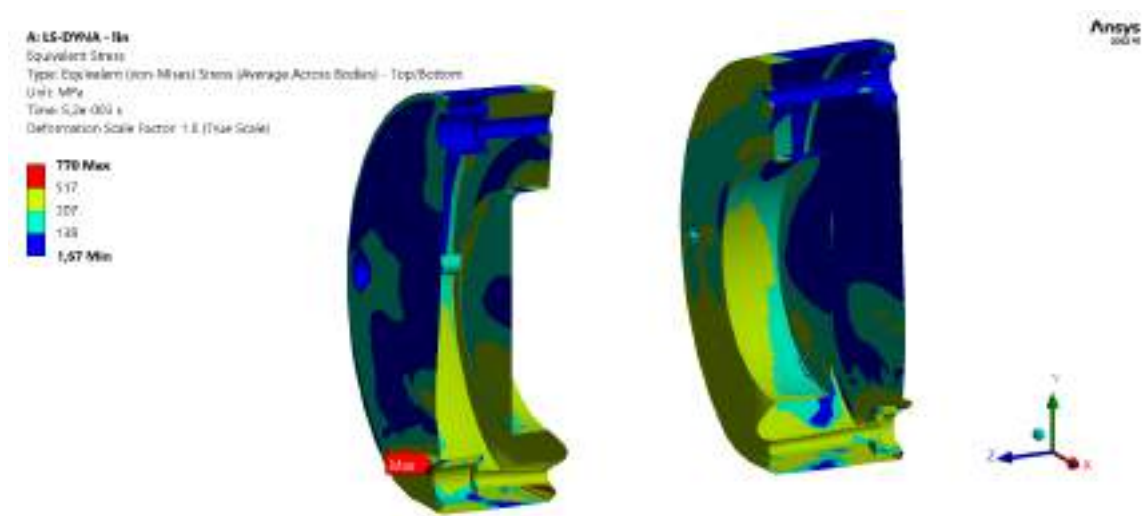
O material de aproximação Exponencial apresentou o menor valor de desaceleração no maior intervalo de tempo de duração do impacto.

Neste caso, foi possível observar diferenças significativas entre os materiais de aproximação Perpendicular e Paralela no que diz respeito ao tempo de duração do impacto. Esse fenômeno se justifica pelo impacto ocorrer em grande parte no material absorvedor, realçando as diferenças nos materiais aplicados. diferentemente do caso Vertical em que parte do impacto se dá em componentes metálicos.

É possível afirmar que a diferença no nível de desaceleração entre o caso Vertical e o Horizontal é em grande parte responsabilidade do impacto ocorrer mais diretamente no material absorvedor.

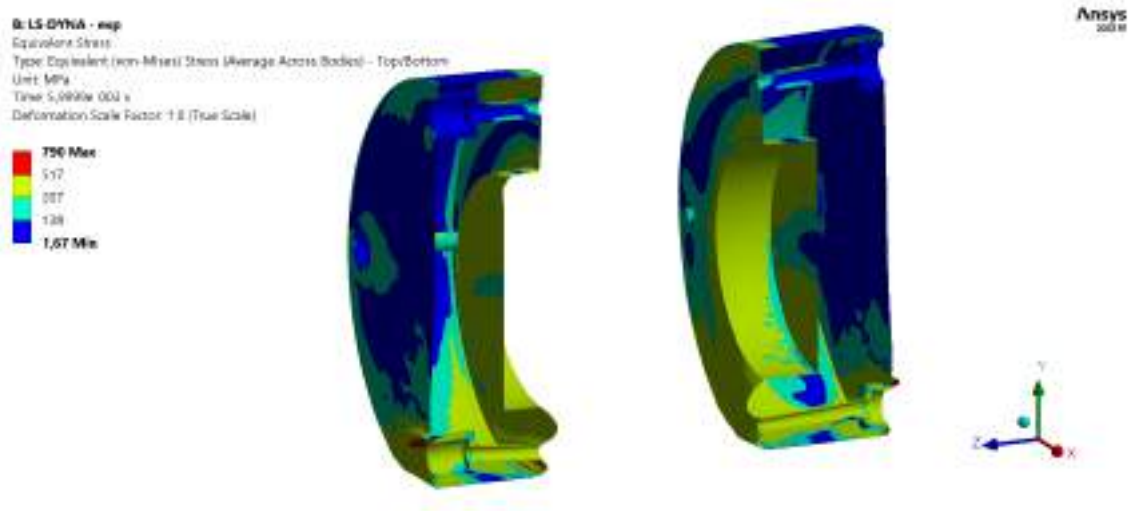
Da mesma forma que o caso Vertical, os resultados de tensões máximas para o envelopamento por chapa de aço do material de absorção de energia são apresentados a seguir para os instantes de máximos em cada caso.

Figura 4.32 – Tensões máximas na contenção para o material Linear



Fonte Autor

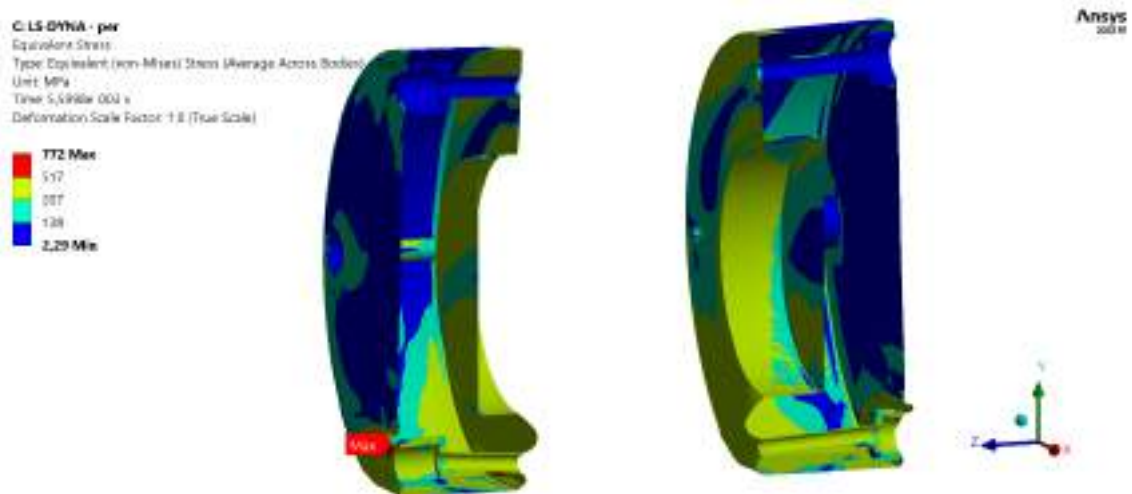
Figura 4.33 – Tensões máximas na contenção para o material Exponencial



Fonte Autor

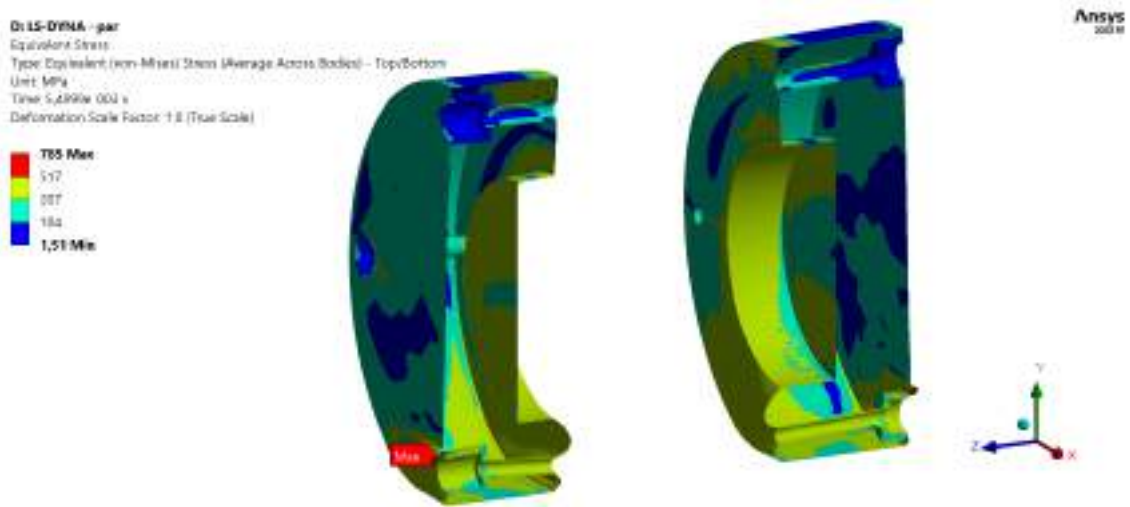
Podemos verificar, a exemplo da Figura 4.33, o deslocamento da região do *housing* do prisioneiro, que há significativa plastificação.

Figura 4.34 – Tensões máximas na contenção para o material Perpendicular



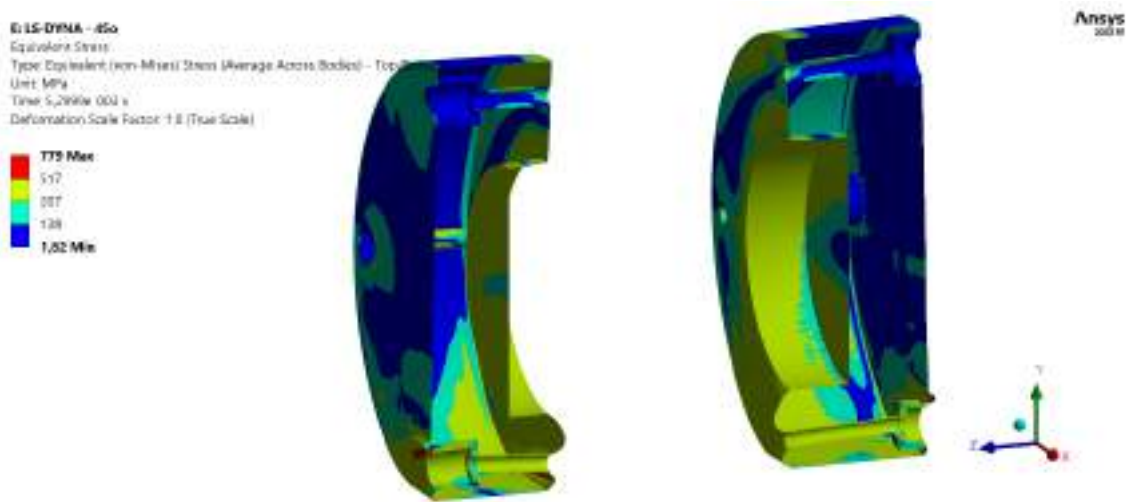
Fonte Autor

Figura 4.35 – Tensões máximas na contenção para o material Paralelo



Fonte Autor

Figura 4.36 – Tensões máximas na contenção para o material 45°



Fonte Autor

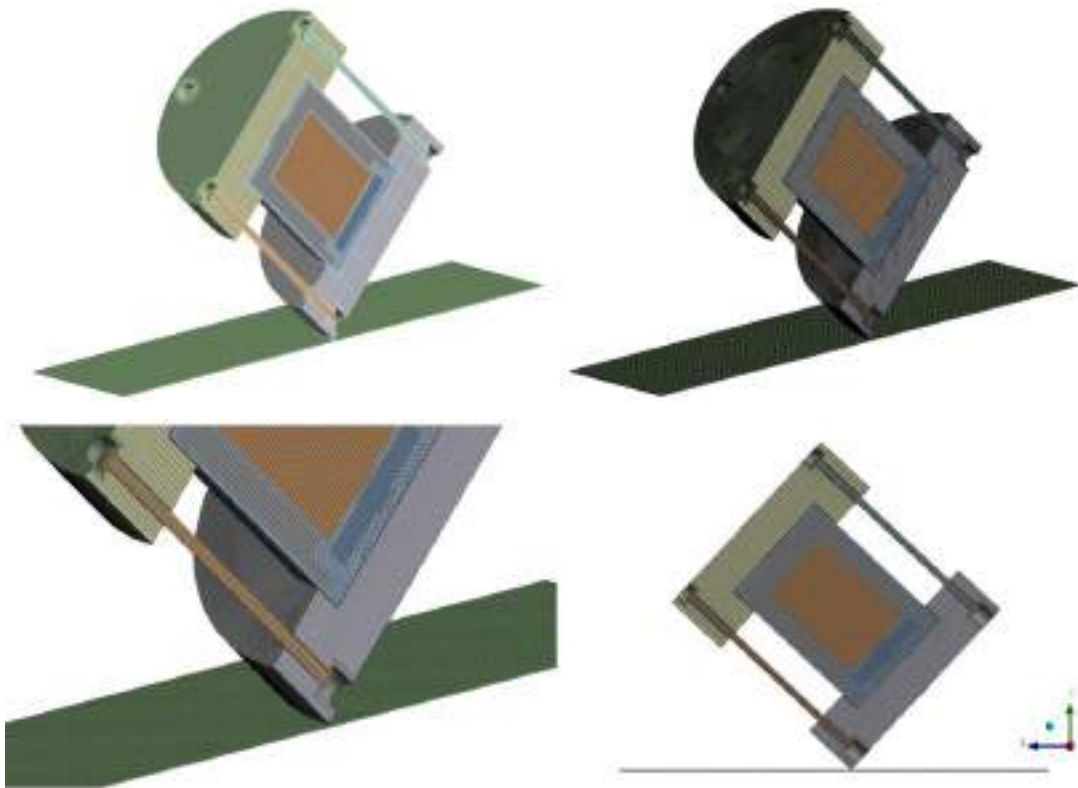
As tensões máximas encontradas são superiores às tensões admissíveis médias e ao limite de escoamento médio para aços.

Neste caso foi possível observar também a influência da diferença entre as dimensões do absorvedor superior e do inferior. O absorvedor superior é menor que o inferior e, portanto, nesse caso em que os dois trabalham ocorre um deslocamento vertical diferencial entre os dois, exercendo também esforços nos prisioneiros, este então também contribuindo na dissipação de energia.

4.2.3 Inclinado a 47°

É característico do caso Inclinado a determinação ou escolha do ângulo de estudo, ou seja, a depender do ângulo haverá maior ou menor influência do *housing* do prisioneiro e do volume útil aproximado. Para este trabalho o ângulo de queda foi fixado em 47° por ser nessa posição que quase temos um total alinhamento entre o centro geométrico do corpo central e o primeiro contato com a superfície rígida.

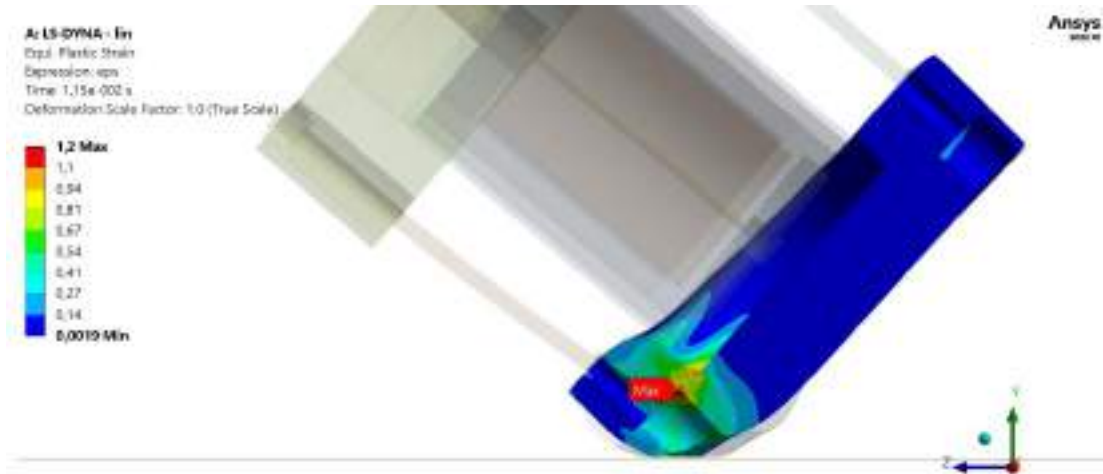
Figura 4.37 – Modelo e malha de elementos finitos aplicada ao caso Inclinado



Fonte Autor

A malha de elementos finitos contém aproximadamente 400 000 elementos e 370 000 nós de elementos lineares em que predominam elementos hex8, elementos sólidos de 8 nós. Os resultados a seguir pertencem ao material de aproximação Linear, como apresentado nos casos anteriores.

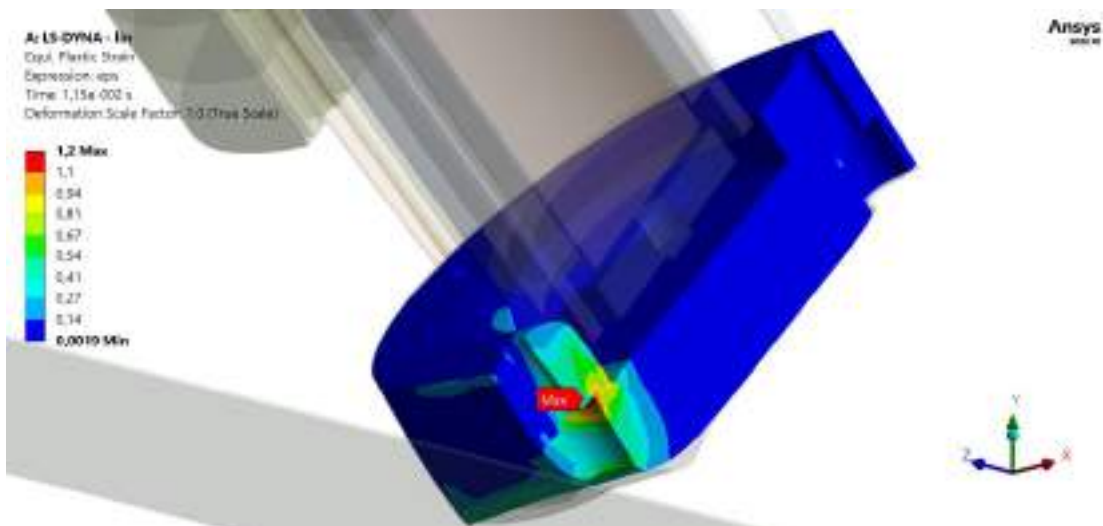
Figura 4.38 – Deformação plástica do volume total



Fonte: Autor

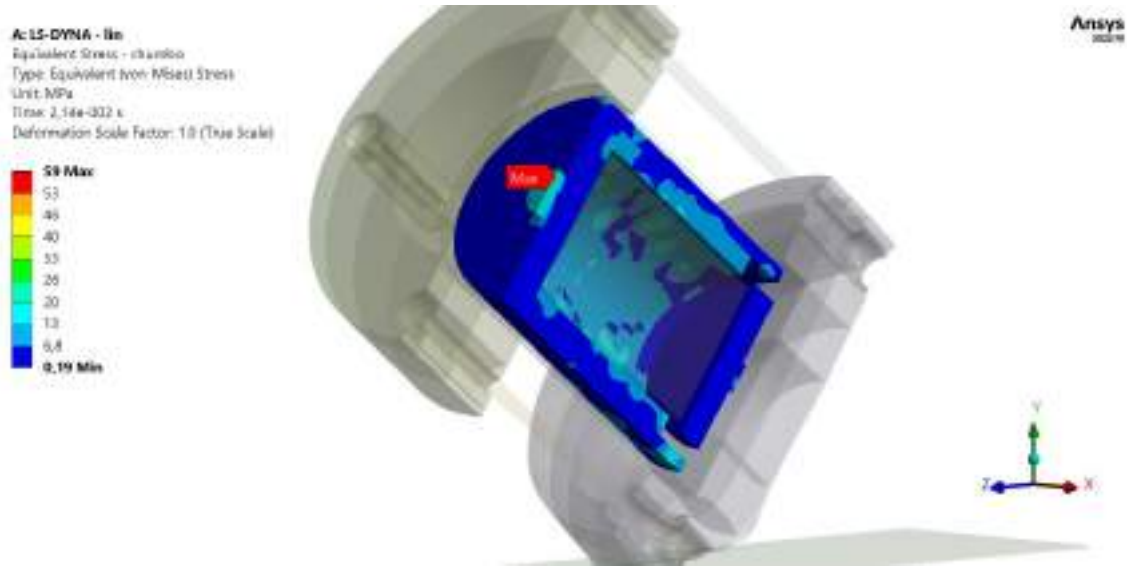
Devido a excentricidade deste caso, temos uma deformação plástica mais alta. A deformação geral do volume útil está entre 0,67 e 0,81 mm/mm e ao considerarmos 0,74 mm/mm e compararmos com a solução analítica, temos uma diferença de aproximadamente 124%. Mais uma vez, se destaca a importância de prever o volume útil adequadamente para melhor aderir aos resultados.

Figura 4.39 – Deformação plástica do volume total – vista inferior



Fonte: Autor

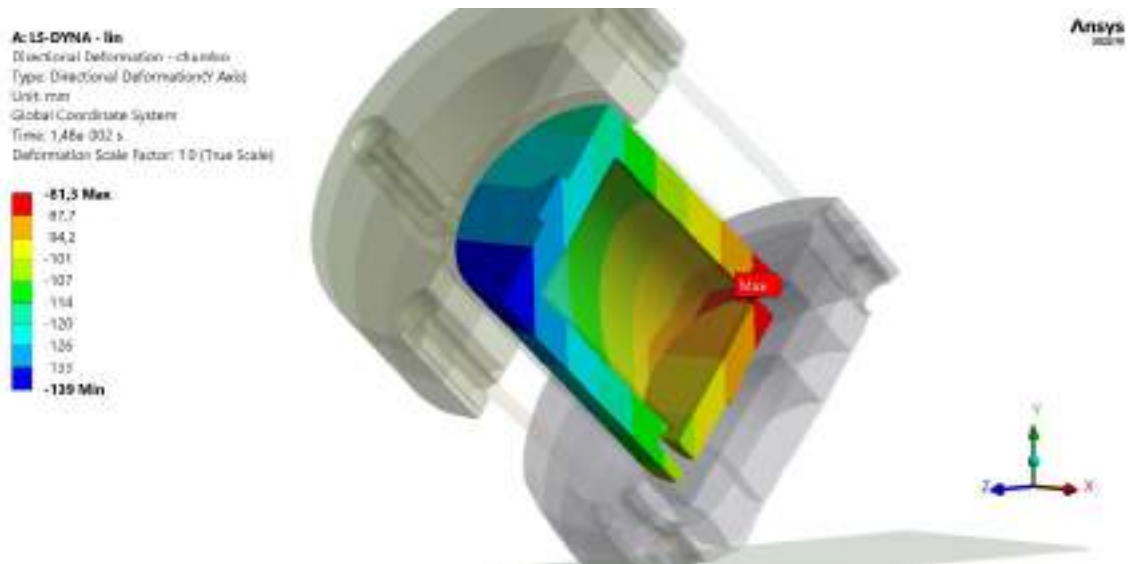
Figura 4.40 – Tensão equivalente de Von-Mises da proteção de chumbo



Fonte: Autor

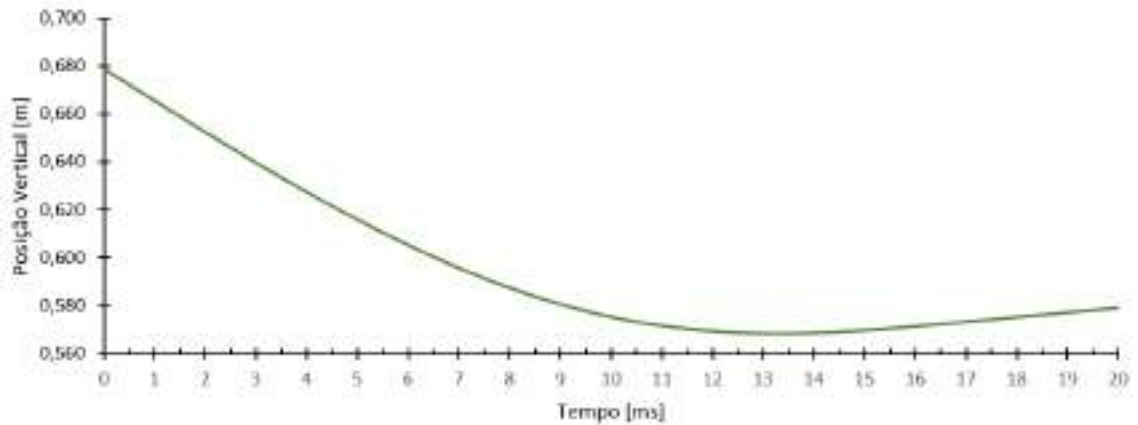
Com a tensão máxima de 59 MPa, Figura 4.40, e um deslocamento diferencial de 57,7 mm, Figura 4.41, podemos afirmar que pelo comportamento observado e no intervalo de tempo de análise temos um movimento rotacional se iniciando.

Figura 4.41 – Deslocamento em Y da proteção de chumbo



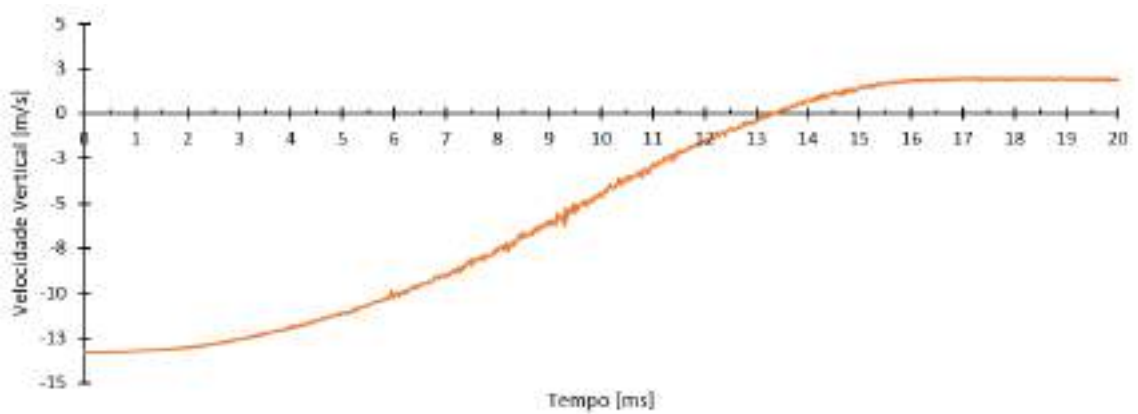
Fonte: Autor

Figura 4.42 – Posição vertical do corpo central



Fonte Autor

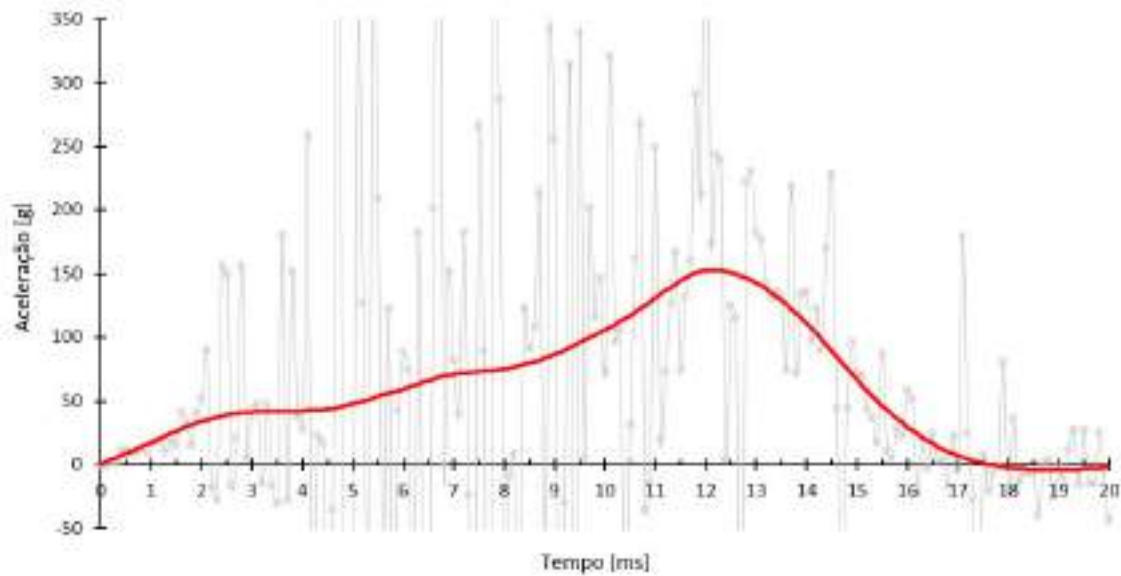
Figura 4.43 – Velocidade vertical do corpo central



Fonte Autor

Assim como os casos anteriores, o comportamento geral na variação da posição vertical e velocidade vertical estão em acordo com os benchmarks realizados no Capítulo 3. Destacam-se para este caso o instante de compressão máxima, ocorrido entre 13 ms e 14 ms, e o instante 17 ms em que temos a velocidade máxima de retorno em aproximadamente 2 m/s. A velocidade média nos próximos 5 ms é de 1,9 m/s.

Figura 4.44 – Aceleração vertical do corpo central filtrada - 180 Hz (em vermelho)

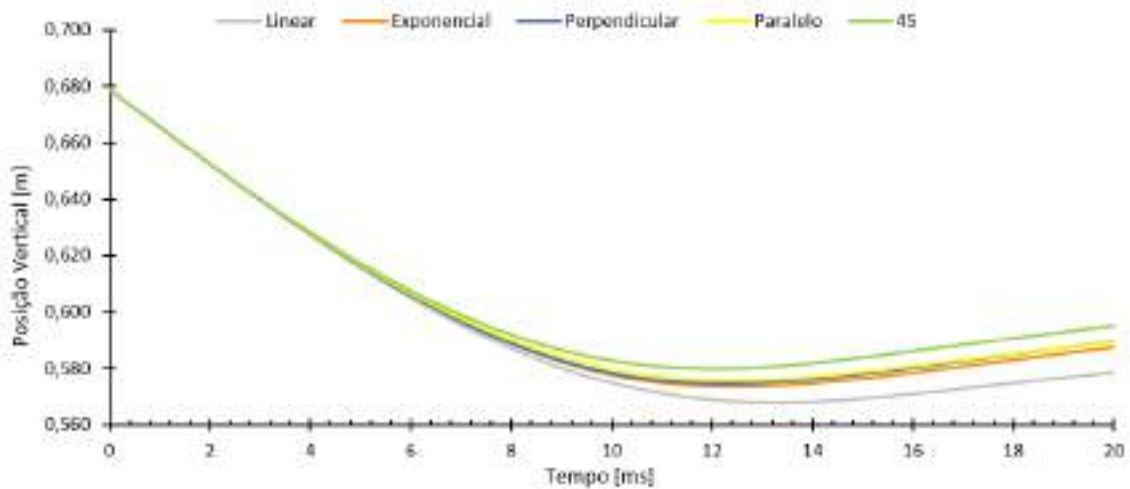


Fonte Autor

O resultado das acelerações encontradas foi filtrado através do filtro *Butterworth* com frequência de corte de 180 Hz. A desaceleração máxima ocorre no instante 12 ms e em magnitude de 153g.

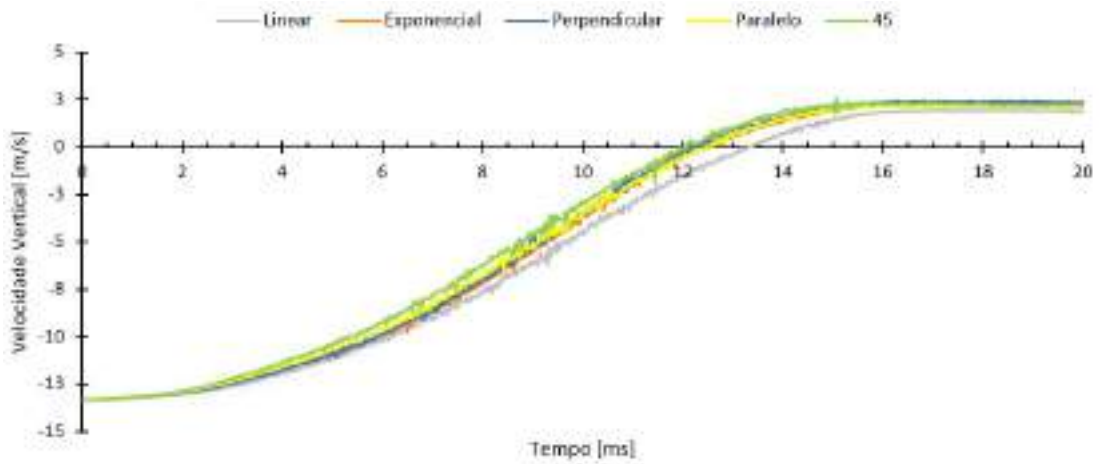
As figuras a seguir expressam os resultados comparados para as outras curvas de materiais.

Figura 4.45 – Posição vertical do corpo central para todas as aproximações



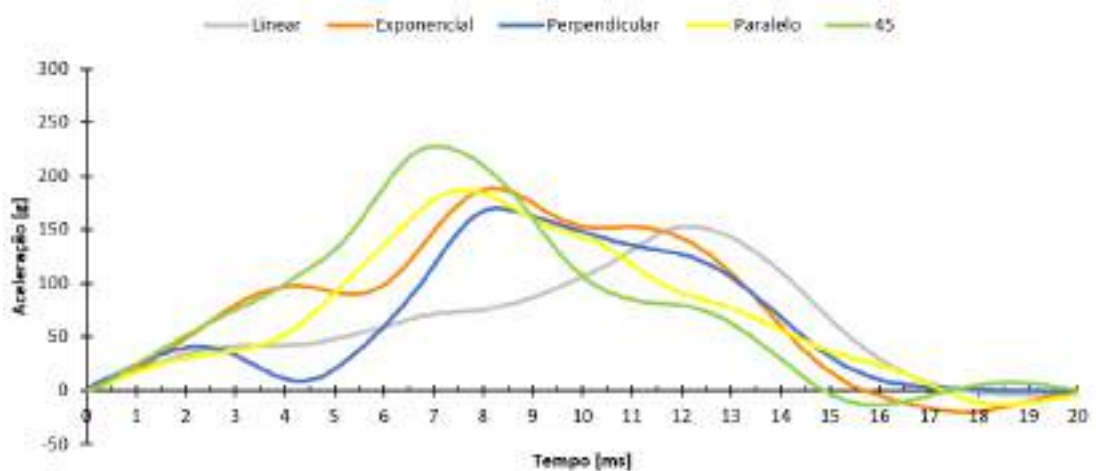
Fonte Autor

Figura 4.46 – Velocidade vertical do corpo central para todas as aproximações



Fonte Autor

Figura 4.47 – Aceleração vertical do corpo central para todas as aproximações



Fonte Autor

Tabela 4.5 – Resumo dos resultados de aceleração e velocidade

Material	ΔS [mm]	Velocidade média de retorno [m/s]	Aceleração máxima desenvolvida [g]	$\Delta t_{\text{impacto}}$ [ms]
Linear	110,7	1,89	153	17,5
Exponencial	105,1	2,21	189	15,5
Perpendicular	104,1	2,34	171	18,0
Paralelo	103,0	2,12	187	17,3
45°	99,0	2,24	227	14,8

Fonte Autor

O material 45° apresentou o menor deslocamento e a maior velocidade de retorno, ambos em um intervalo de tempo menor que todos os outros materiais.

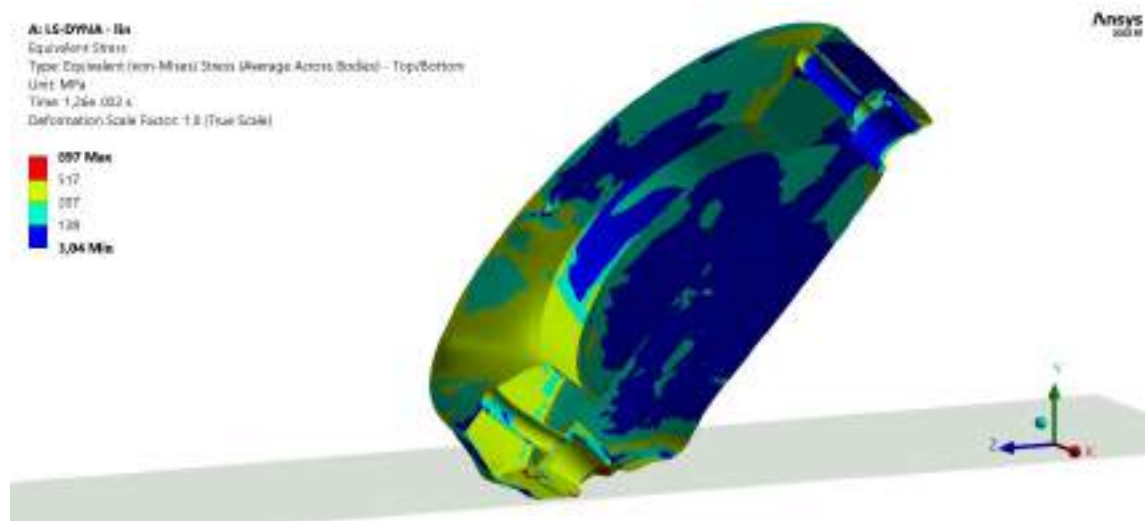
O material Linear apresentou o maior deslocamento vertical e a menor velocidade de retorno. No entanto, a desaceleração máxima foi significativamente inferior, apesar de ocorrer após o instante 12ms, diferentemente dos outros materiais.

A exceção feita ao material de aproximação linear, todos os outros materiais apresentaram o mesmo perfil de desaceleração no tempo, mesmo que em magnitudes e períodos ligeiramente diferentes.

Neste caso, diferentemente do caso Horizontal e análogo ao caso Vertical, os componentes metálicos se fazem presentes nos resultados atenuando as diferenças entre os cinco materiais.

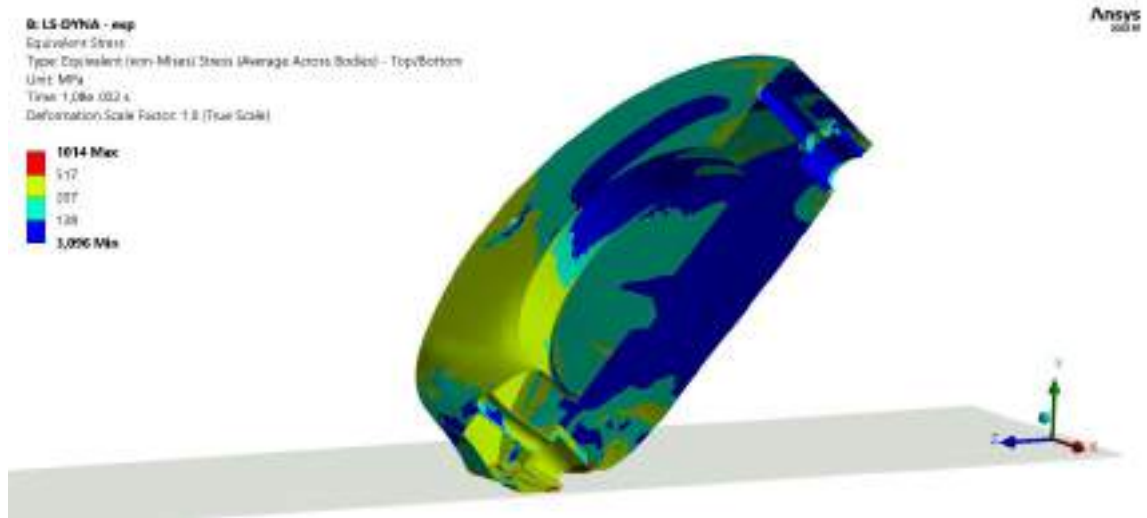
Da mesma forma aos outros casos, os resultados de tensões máximas são apresentados a seguir para os instantes de máximos em cada caso.

Figura 4.48 – Tensões máximas na contenção para o material Linear



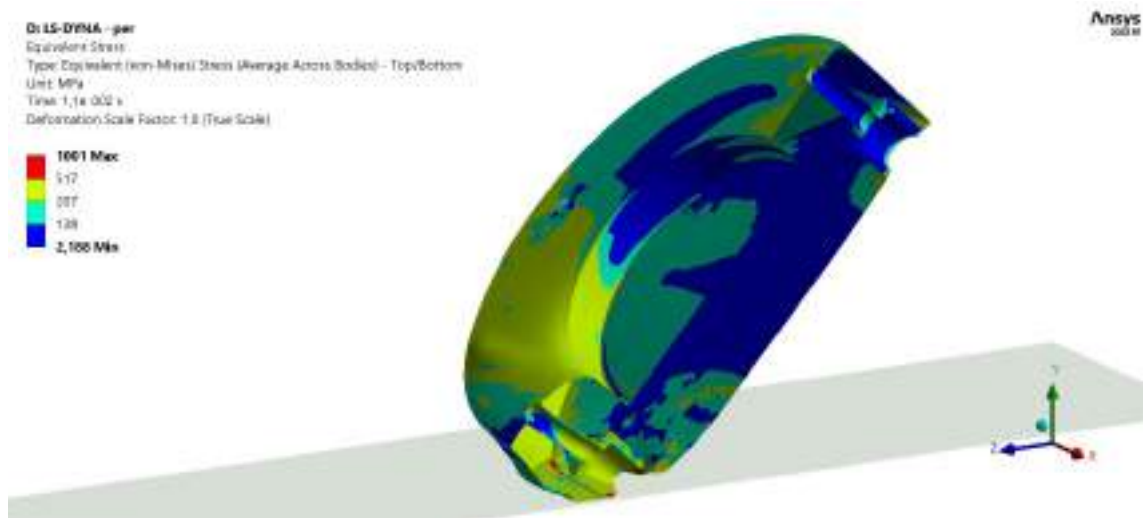
Fonte Autor

Figura 4.49 – Tensões máximas na contenção para o material Exponencial



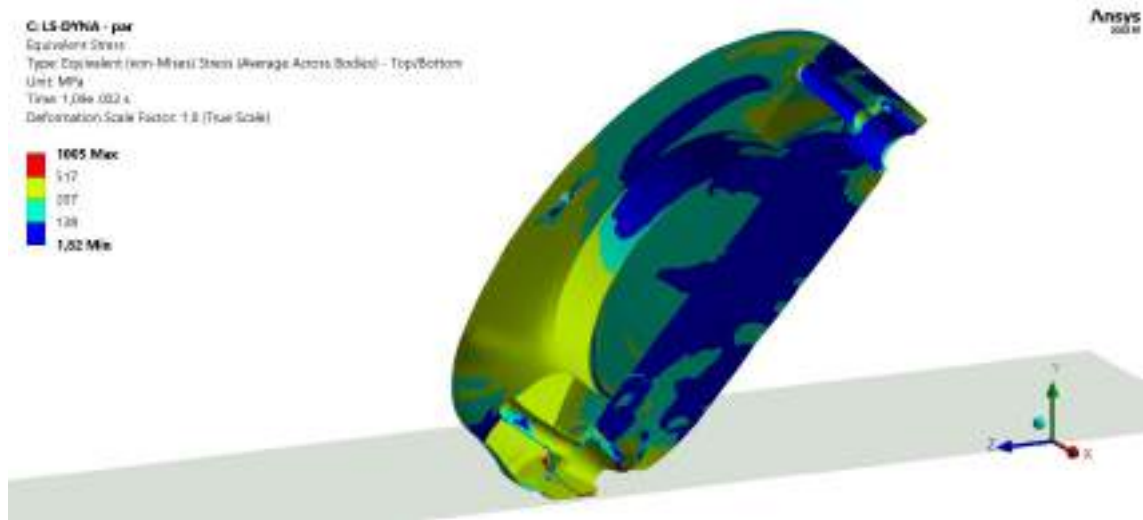
Fonte Autor

Figura 4.50 – Tensões máximas na contenção para o material Perpendicular



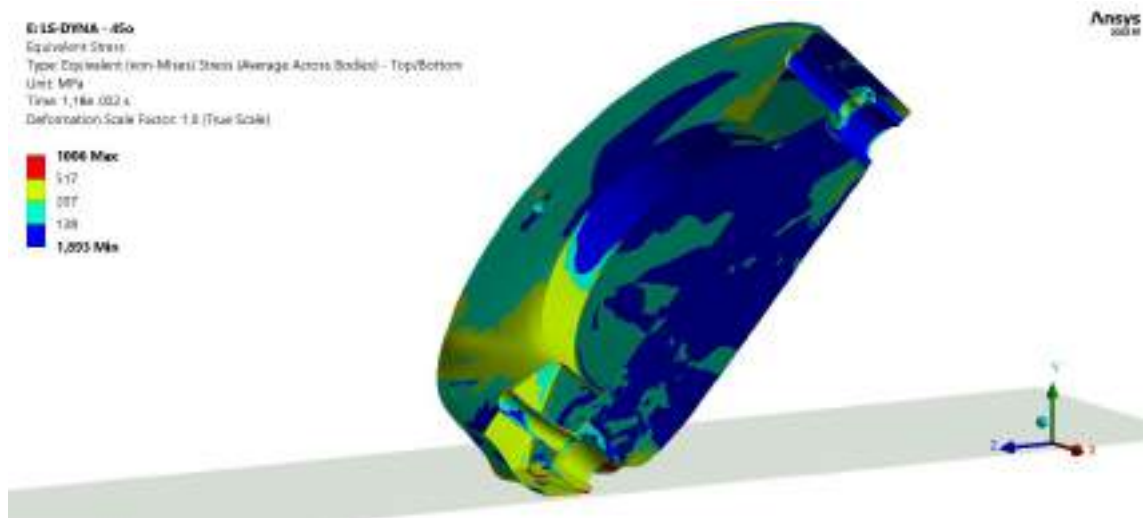
Fonte Autor

Figura 4.51 – Tensões máximas na contenção para o material Paralelo



Fonte Autor

Figura 4.52 – Tensões máximas na contenção para o material 45°



Fonte Autor

As tensões máximas encontradas são superiores às tensões admissíveis médias e ao limite de escoamento médio para aços. Neste caso, o rompimento das soldas não deve necessariamente influenciar na contenção do material de absorção, uma vez que ocorrem grandes deformações plásticas locais em todos os componentes do absorvedor, ou seja, as estruturas da região de impacto falharam abruptamente. O prisioneiro e o *housing* se destacam por influenciar na absorção de energia ao deformar plasticamente.

5 CONCLUSÃO

Ao se discutir modelagem numérica, não há consideração mais precisa do que relacionar, quaisquer que seja o caso, a economia no desenvolvimento de um projeto com otimização ou melhorias de conceito. Isso fica transparente quando que nos últimos 20 anos o desenvolvimento computacional permitiu modelos mais complexos e mais precisos, e como esperado, ensaios e rotinas se propuseram a organizar e a instruir novos projetos. A indústria nuclear acompanhou esses avanços e como importante passo foi proposto [10].

Os objetivos de [10] eram sobretudo contribuir com a escolha de melhores métodos e estratégias no desenvolvimento de embalagens, sem perder relevar a qualificação de novos quadros. Neste trabalho, foi possível reproduzir em sua plenitude todos os benchmarks propostos e, conforme os objetivos, estudar estratégias diferentes de modelagem numérica para casos de absorção de impacto. Como descrito, foram aproveitados alguns casos para se estudar fenômenos de compressão em madeira ou semelhantes, de forma a quantificar e enriquecer os cuidados em considerar esse tipo de material como componente de sacrifício. Adicionalmente, a compressão longitudinal das fibras compõe, juntamente com a compressão lateral, opções objetivas de projeto podendo ser consideradas combinadas.

O OSB, ou madeira, é considerado um material adequado para compor um absorvedor de impacto, porém requer um maior detalhamento de suas propriedades para se aprimorar a modelagem numérica. Em paralelo, temos o encapsulamento, que é revestir o absorvedor com chapas de aço, promovendo uma espécie de contenção aos grandes deslocamentos iniciais da madeira. Ainda com esse revestimento, apesar da semelhança dos fenômenos, temos no mesmo caso de queda diferentes intervalos de tempo, velocidades máximas e desacelerações máximas para cada material. Apesar do esforço e expectativa quando se realizou [20], ou seja, o uso de contenção lateral contribui no desempenho do OSB como material de sacrifício e tende a homogeneizar as curvas, contudo as pequenas diferenças ainda podem aparecer a depender do tipo de queda.

A magnitude das desacelerações encontradas representa o principal desafio do projeto, uma vez que o objetivo é que não se exceda o valor de 200g. A metodologia apresentada neste trabalho expõe os principais fatores que contribuem com esse resultado e provoca o conceito do projeto indicando a possibilidade de aperfeiçoamentos.

REFERÊNCIAS

- [1]. [1]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Methodology for a Safety Case of a Dual Purpose Cask for Storage and Transport of Spent Fuel*. Vienna: IAEA, 2020. (IAEA-TECDOC-1938)
- [2]. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Requisitos de projeto e de ensaios para certificação de materiais radioativos, embalagens e volumes*. Rio de Janeiro: CNEN, 2021. (CNEN-NN-5.01)
- [3]. MATTAR NETO, M, et al, *Numerical and Experimental Structural Assessment of A Half Scale Model Of A Nuclear Spent Fuel Elements Transportation Package Under 9 M Drop Tests*, ASME Pressure Vessels and Piping Division, July, 2008.
- [4]. MOAVENI, Saeed. *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS*, 2007.
- [5]. SÎRBU, A.D.M. e FARKAS, L. - *Programming the transient explicit finite element analysis with MATLAB*, U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 75, Iss. 2, 2013
- [6]. BATHE, K. J. - *Finite Element procedures*. New Jersey, Prentice Hall, 1996.
- [7]. RAO, C.L., NARAYANAMURTHY, V. e SIMBA, K.R.Y. – *Applied Impact Mechanics*, 2016
- [8]. LSTC - Livermore Software Technology Corporation, *LS-DYNA Theory Manual, Version R10*, 2019
- [9]. ANSYS® *Explicit Dynamics Analysis Guide*, Release 2022 R1, ANSYS, Inc
- [10]. Ove Arup and Partners International (OAPIL), Gesellschaft für Nuklear-Behälter mbH (GNB), *Evaluation of Codes for Analyzing the Drop Test Performance of Radioactive Material Transport Containers*, European Commission DG 17, United Kingdom, Germany, March 1998, Report Ref 53276/02
- [11]. CHI-FUNG TSO, Arup, UK e R. HÜGGENBERG, Gesellschaft für Nuklear-Behälter mbH, Germany, *Evaluation of Finite Element Codes for Demonstrating The Performance of Radioactive Material Packages in Hypothetical Accident Drop Scenarios*, September 2004.
- [12]. NEUMANN, Martin, *Investigation of the Behavior of Shock-Absorbing Structural Parts of Transport Casks Holding Radioactive Substances in Terms of Design Testing and Risk Analysis*, BAM-Dissertation Series, Volume 45, 2009.
- [13]. GIBSON, L.J. e ASHBY, M.F. – *Cellular Solids – Structures and properties*, Cambridge University Press 1999.
- [14]. NAIRN, John A., Numerical Modeling of Wood or Other Anisotropic, Heterogeneous and Irregular Materials, 4th MPM Workshop, 2008.

- [15]. GIBSON, L.J. e ASHBY, M.F. – *Cellular Solids*, Cambridge University Press 1997.
- [16]. MOURÃO, R. P.; *Amortecedores de impacto em embalagens para transporte de materiais radioativos: uma metodologia para sua avaliação*. 2002. 122f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br> > Acesso em: 27 jul. 2022.
- [17]. MATTAR NETO, M, et al, *Analysis and design of spent fuel transport cask impact limiters*, Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, 2011.
- [18]. MATTAR NETO, M, et al, *Options for interim storage of IEA-R1 research reactor spent fuels*, Progress in Nuclear Energy, 2008.
- [19]. MATTAR NETO, M, et al, *Improvements on the numerical structural assessment of a half scale model of a nuclear spent fuel elements transportation package under 9m drop tests*, Mechanics of Solids in Brazil, 2011.
- [20]. MATTAR NETO, M, et al, *Analytical and Numerical Evaluation of the Impact Limiters Design of a Research Reactors spent fuel Transportation package Half Scale Model under 9 M drop tests*, COBEM, November, 2009.
- [21]. MATTAR NETO, M.; MOURÃO, R. P.; *The Use of Castor Oil Polyurethane Foam In Impact Limiters For Radioactive Materials Packages*, RAMTRANS, Vol. 14, 2003.
- [22]. NUSHOLTZ, G.; BILKHU, S.; FOUNAS, M.; DUBOIS, P.: *A simple elastoplastic model for foam materials*, STAP Conference, Albuquerque, 1996.
- [23]. BARTL, F, et al, *Material behavior of a cellular composite undergoing large deformations*, International Journal of Impact Engineering, November, 2008.
- [24]. BRAGOV, A. M.; LOMUNOV, A. K.; *Dynamic properties of Some Wood Species*, Journal de Physique IV (Proceedings), August, 1997.
- [25]. DING, Yuanyuan, et al, *Dynamic crushing of cellular materials: A unique dynamic stress-strain state curve*, 2016.
- [26]. ERJAVEC, Mateja; *Mechanical properties of Cellular Materials*, University of Ljubljana in Faculty of Mathematics and Physics, March, 2011.
- [27]. Federal Highway Administration, US. Department of Transportation, *MANUAL FOR LS-DYNA - Wood Material Model 143*, publication no. FHWA-HRT-04-097, August, 2007.
- [28]. LAWRENCE KATZ, J.; et al, *On the anisotropic elastic properties of woods*, 2007.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.
