



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

**AMORTECEDORES DE IMPACTO EM EMBALAGENS PARA
TRANSPORTE DE MATERIAIS RADIOATIVOS: UMA
METODOLOGIA PARA SUA AVALIAÇÃO**

ROGÉRIO PIMENTA MOURÃO

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau
de Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Reatores.**

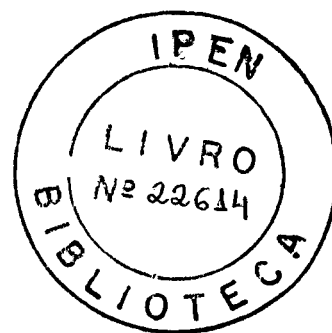
**Orientador:
Prof. Dr. Miguel Mattar Neto**

**São Paulo
2002**

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

**AMORTECEDORES DE IMPACTO EM EMBALAGENS PARA
TRANSPORTE DE MATERIAIS RADIOATIVOS: UMA METODOLOGIA
PARA SUA AVALIAÇÃO**

ROGÉRIO PIMENTA MOURÃO



**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau
de Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Reatores.**

**Orientador:
Prof. Dr. Miguel Mattar Neto**

**São Paulo
2002**

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Dr. Miguel Mattar Neto, pelas diretrizes seguras e incansável incentivo.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), pelo apoio material, laboratorial e pela cessão de tempo laboral para confecção desta tese.

A todos os colegas do CDTN que colaboraram na execução deste trabalho, especialmente ao Adair e Temóteo, do Serviço de Tecnologia de Rejeitos, ao Denis, Emerson, Nirlando, Santiago, Tanius e Vlamir, do Serviço de Ensaios e Metrologia e à Lenira, da Biblioteca.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, através do Prof. Dr. Marco Túlio Corrêa Faria, pela cessão do sistema para análise de sinais dinâmicos.

Às empresas Poly-urethane, pelos serviços de injeção de espuma e Smarttech, pela cessão do código ANSYS-LS/DYNA.

A Adriana, esposa, revisora e firme estimuladora desta tese. A Henrique e Laura, meus queridos filhos, a meus pais e irmãos e à ala "paulista" da família, pelo grande incentivo, especialmente na fase final do trabalho.

AMORTECEDORES DE IMPACTO EM EMBALAGENS PARA TRANSPORTE DE MATERIAIS RADIOATIVOS: UMA METODOLOGIA PARA SUA AVALIAÇÃO

ROGÉRIO PIMENTA MOURÃO

RESUMO

Neste trabalho é proposta uma metodologia para avaliação do uso de materiais celulares em amortecedores de impacto de embalagens para transporte de materiais radioativos. As etapas que constituem esta metodologia são a escolha do material celular, sua caracterização estrutural por meio de ensaios mecânicos, estabelecimento de caso exemplo na área nuclear, determinação preliminar, com a utilização de métodos simplificados, da densidade ótima do material celular empregado no caso exemplo, análise experimental do caso exemplo e simulação numérica do mesmo através do método de elementos finitos. Dentre os diversos materiais mais empregados como absorvedores de impacto em embalagens, escolheu-se a espuma de poliuretano, especificamente a espuma produzida a partir do óleo da mamona (*Ricinus communis*), oriunda de fonte renovável e não poluente. O estudo de caso realizado consistiu no ensaio de queda-livre de 9 metros de altura de um protótipo de embalagem para rejeitos radioativos incorporados em matriz de cimento, sendo este um dos ensaios mais rigorosos prescritos pelas normas nacionais e internacionais de transporte para este tipo de embalagem. Para comparação, foram testados protótipos com espumas de densidade prevista como ideal e espumas com densidades inferior e superior a esta. Os resultados obtidos comprovam a validade da metodologia, tendo a previsão da densidade ótima pelo método simplificado sido confirmada nos ensaios de queda-livre e na simulação numérica.

IMPACT LIMITERS FOR RADIOACTIVE MATERIALS TRANSPORT PACKAGINGS: A METHODOLOGY FOR ASSESSMENT

Rogério Pimenta Mourão

ABSTRACT

This work aims at establishing a methodology for design assessment of a cellular material-filled impact limiter to be used as part of a radioactive material transport packaging. This methodology comprises the selection of the cellular material, its structural characterization by mechanical tests, the development of a case study in the nuclear field, preliminary determination of the best cellular material density for the case study, performance of the case and its numerical simulation using the finite element method. Among the several materials used as shock absorbers in packagings, the polyurethane foam was chosen, particularly the foam obtained from the castor oil plant (*Ricinus communis*), a non-polluting and renewable source. The case study carried out was the 9 m drop test of a package prototype containing radioactive wastes incorporated in a cement matrix, considered one of the most severe tests prescribed by the Brazilian and international transport standards. Prototypes with foam density pre-determined as ideal as well as prototypes using lighter and heavier foams were tested for comparison. The results obtained validate the methodology in that expectations regarding the ideal foam density were confirmed by the drop tests and the numerical simulation.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Posicionamento do Tema.....	14
1.2 Objetivo da pesquisa.....	15
1.3 Etapas do trabalho	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Base normativa para projeto de embalagens na área nuclear	17
2.2 Principais materiais usados em amortecedores de impacto	21
2.3 Materiais celulares: caracterização e comportamento mecânico	25
2.4 Estudos teórico-experimentais para obtenção de propriedades de materiais celulares	29
2.5 Programas experimentais para caracterização de materiais celulares	43
3 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE ESPUMAS POLIMÉRICAS	50
3.1 Escolha do material celular	50
3.1.1 Características básicas dos polímeros e das espumas poliméricas ..	51
3.1.2 Espuma de poliuretano à base do óleo de mamona	54
3.2 Caracterização experimental do material escolhido.....	56
3.2.1 Ensaio de compressão uniaxial.....	57
3.2.2 Ensaio hidrostático	59
3.2.3 Ensaio de impacto.....	61
3.2.4 Ensaios adicionais.....	63
3.3 Metodologia simplificada para determinação da densidade ótima da espuma	64
3.3.1 Métodos simplificados existentes.....	65
3.3.2 Método simplificado escolhido	72
3.4 Estudo de caso: queda-livre de embalagem	73
3.5 Simulação numérica do ensaio de queda-livre.....	78
3.5.1 Código computacional utilizado.....	78
3.5.2 Descrição do modelo.....	78
3.5.3 Verificação do modelo de espuma	85
4 RESULTADOS OBTIDOS	86
4.1 Caracterização experimental.....	86

4.1.1	Ensaio de compressão uniaxial.....	86
4.1.2	Ensaio hidrostáticos	90
4.1.3	Ensaio de impacto	91
4.1.4	Comparação entre respostas dinâmica e estática	93
4.2	Metodologia simplificada	95
4.3	Ensaio de queda-livre.....	97
4.4	Simulação numérica.....	102
4.4.1	Ensaio de compressão uniaxial.....	102
4.4.2	Ensaio de queda-livre.....	104
5	DISCUSSÃO	109
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	113
6.1	Quanto ao material escolhido.....	113
6.2	Quanto à caracterização estrutural do material.....	114
6.3	Quanto ao método simplificado para escolha preliminar da densidade da espuma	115
6.4	Quanto ao ensaio de queda-livre	115
6.5	Quanto à simulação numérica.....	116
6.6	Quanto à facilidade de implementação da metodologia.....	117

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ensaios para embalagens Tipo B	20
Figura 2. Embalagem TN-MTR (Michels, 1998)	23
Figura 3. Embalagem para transporte e armazenamento de elementos combustíveis irradiados esféricos grafite/urânio (Mourão, 1987) ..	23
Figura 4. Embalagem TRUPACT-II (EUA, 2002)	24
Figura 5. Exemplos de materiais celulares (natural e feito pelo homem)	25
Figura 6. Espumas poliméricas de estrutura tridimensional (Gibson e Ashby, op. cit.)	27
Figura 7. Curva tensão-deformação para um material polimérico (fase de carregamento)	28
Figura 8. Modelo da célula unitária (Gibson e Ashby, 1988)	32
Figura 9. Contribuição do ar para a resposta da espuma (Neilsen, 1987)	37
Figura 10. Curvas $F \times u$ para modelo de Neilsen (1995), ensaio de tração ..	40
Figura 11. Análogo mecânico para espumas (Sinha, op. cit.)	42
Figura 12. Curva tensão-deformação gerada pelo modelo de análogo mecânico (Sinha, op. cit.)	42
Figura 13. Variação de E_s de um polímero com a temperatura (Gibson e Ashby, 1988).	53
Figura 14. Microestrutura da espuma usada, massa específica 165 kg/m^3 (imagens obtida no Laboratório de Metrologia do CDTN)	55
Figura 15. Variação do diâmetro médio das células, $\bar{\phi}$, com a densidade (imagens obtidas no Laboratório de Metrologia do CDTN)	56
Figura 16. Câmara de pressão usada no ensaio hidrostático	61
Figura 17. Montagem da câmara na máquina universal	61
Figura 18. Instalação para ensaio de impacto	62
Figura 19. Detalhe do carrinho de impacto	62
Figura 20. Corpos de prova para os ensaios realizados	63
Figura 21. Curvas tensão-deformação típicas para espumas de diferentes densidades	65
Figura 22. Curva típica do fator Janssen para espumas rígidas	67
Figura 23. Curvas de absorção de energia de impacto segundo Rusch (1971).	70

Figura 24. Construção dos diagramas de absorção de energia segundo Maiti (1984).	72
Figura 25. Protótipo usado nos ensaios de queda-livre	74
Figura 26. Dimensões principais do amortecedor	75
Figura 27. Instalação de ensaio de queda-livre	76
Figura 28. Analisador de sinais dinâmicos	77
Figura 29. Acelerômetro fixado no protótipo	77
Figura 30. Modelo de elementos finitos para o estudo de caso	80
Figura 31. Modelo de elementos finitos para simulação do ensaio de compressão uniaxial	85
Figura 32. Curvas obtidas no ensaio de compressão uniaxial	86
Figura 33. Variação de parâmetros com a densidade	88
Figura 34. Influência da taxa de deformação na resposta da espuma – massa específica 41 kg/m ³	88
Figura 35. Idem, para massa específica de 253 kg/m ³	88
Figura 36. Variação da energia absorvida com a massa específica	89
Figura 37. Variação da tensão de platô com a massa específica	89
Figura 38. Variação de σ_{pl} com a massa específica para uma espuma petroquímica (Maji et al., 1995)	90
Figura 39. Curvas pressão-deformação volumétrica	91
Figura 40. Resultados dos ensaios de impacto	92
Figura 41. Curvas de aceleração, velocidade e deflexão (espuma com massa específica igual a 165 kg/m ³)	93
Figura 42. Comparação entre a tensão de platô nos ensaios de impacto e estático	94
Figura 43. Comparação entre a energia absorvida nos ensaios de impacto e estático	94
Figura 44. Comparação entre σ_{pl} nos ensaios estático e dinâmico, para espuma petroquímica (Maji et al, 1995)	95
Figura 45. Curvas J para diversas densidades	96
Figura 46. Interpolação dos J 's mínimos	96
Figura 47. Curvas individuais de aceleração	98
Figura 48. Comparação entre acelerações das diversas densidades	99
Figura 49. Embalagem com espuma de massa específica 41 kg/m ³ após impacto	100
Figura 50. Amortecedor com espuma de 101 kg/m ³	100

Figura 51. Amortecedor com espuma de 117 kg/m^3	100
Figura 52. Amortecedor com espuma de 225 kg/m^3	100
Figura 53. Comparação entre curvas tensão-deformação no ensaio de compressão uniaxial: ensaio e simulação numérica.....	103
Figura 54. Configuração de máxima deformação	103
Figura 55. Análise de sensibilidade ao fator de amortecimento.....	104
Figura 56. Acelerações no impacto – simulação numérica.....	105
Figura 57. Acelerações durante o impacto, para espuma de massa específica 41 (ensaio) e 60 kg/m^3 (simulação).	106
Figura 58. Acelerações durante o impacto, para espuma de massa específica 101 (ensaio) e 104 kg/m^3 (simulação).	106
Figura 59. Acelerações durante o impacto, para espuma de massa específica 117 (ensaio) e 104 kg/m^3 (simulação).	107
Figura 60. Acelerações durante o impacto, para espuma de massa específica 225 (ensaio) e 200 kg/m^3 (simulação).	107

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 Embalagens utilizando material celular.....	22
Tabela 2. Propriedades relevantes para projeto com materiais celulares (Hepburn, 1997)	43
Tabela 3. Corpos de prova para ensaio de compressão uniaxial	58
Tabela 4. Corpos de prova para ensaio hidrostático	60
Tabela 5 Parâmetros do ensaio de impacto	63
Tabela 6. Principais parâmetros do modelo.....	81
Tabela 7. Deflexões residuais dos amortecedores	99
Tabela 8. Picos máximos de aceleração nos ensaios de queda-livre.....	99
Tabela 9. Resultados comparativos entre ensaio de compressão uniaxial e simulação numérica.....	103
Tabela 10. Desacelerações máximas.....	108
Tabela 11. Fragilidade de alguns produtos freqüentemente transportados (DOW, 2002)	111

LISTA DE SÍMBOLOS

- a . Difusividade térmica
 A . Superfície de um corpo em queda, protegido por amortecedor
 a_i . Aceleração de impacto máxima para uma espuma ideal
 a_r . Aceleração de impacto máxima em uma espuma real
 C . Fator de amortecimento (apud Gordon)
 C_p . Calor específico volumétrico
 E^* . Módulo de elasticidade da espuma
 E_a , E_b e E_c . Módulos de elasticidade de "mola" (modelo de análogo mecânico)
 E_h . Energia potencial
 E_s . Módulo de elasticidade do polímero sólido
 e_{vol} . Deformação volumétrica nominal (modelo Neilsen)
 f . Função não linear da deformação (modelo de Sherwood)
 g . Aceleração gravitacional
 G . Função para efeitos de densidade (modelo de Sherwood)
 G_{IC} . Taxa crítica de liberação de energia
 h . altura de queda de um corpo ou protótipo
 H . Função para efeitos de temperatura (modelo de Sherwood)
 i . Tensor identidade
 J . Fator de Janssen
 K . Eficiência de absorção de energia (apud Rusch)
 K_{IC} . Tenacidade à fratura
 K^{pol} . Módulo de expansão volumétrica do polímero sólido
 m . Massa
 M . Função para efeitos de taxa de deformação (modelo de Sherwood)
 n . Função linear da deformação (modelo de Sherwood)
 p . Pressão do fluido contido nas células de uma espuma polimérica
 p_{pl} . Pressão de platô
 t . Espessura do amortecedor
 T . Temperatura
 T_0 . Temperatura de referência (modelo de Sherwood)
 T_g . Temperatura de transição vítrea
 u . Deslocamento
 U . Energia específica absorvida pelo amortecedor
 v . Velocidade de impacto
 V . Volume útil do amortecedor
- α . Coeficiente de expansão térmica
 β . Parâmetro de encruamento (modelo de plastificação)
 ε . Deformação
 ε_t , ε_{z1} e ε_{max} . Deformações de transição entre fases (modelo de análogo mecânico)
 ε_v . Deformação volumétrica
 ε_{vol} . Deformação volumétrica nominal (modelo Neilsen)
 $\dot{\varepsilon}_0$. Taxa de deformação de referência (modelo de Sherwood)

- ϕ . Fração de material sólido em uma espuma polimérica
- $\bar{\phi}$. Diâmetro médio das células de uma espuma polimérica
- η . Coeficiente de amortecimento
- λ . Condutividade térmica
- μ . Massa específica
- μ^* . Massa específica da espuma
- μ_s . Massa específica do polímero sólido
- μ_0 . Massa específica de referência (modelo de Sherwood)
- ν_s . Coeficiente de Poisson do polímero sólido
- ρ^* . Densidade da espuma
- σ_c . Tensão de compressão
- σ_{max} . Tensão máxima desejável
- σ_y . Limite de escoamento/fratura
- σ^{ar} . contribuição volumétrica do ar (modelo de Neilsen)
- σ^{esp} . Tensão na espuma (modelo de Neilsen)
- σ^{esq} . Tensão na parte sólida da espuma (modelo de Neilsen)
- σ_{pico} . Tensão de pico
- σ_{pl} . Tensão de platô
- $\sigma_t, \sigma_{zl}, \sigma_{max}$. Tensões de transição entre fases (modelo de análogo mecânico)
- ψ . Função adimensional de deformação (método de Rusch). Função que define frente de plastificação (modelo de Neilsen)

LISTA DE SIGLAS

AIEA. Agência Internacional de Energia Atômica
CDTN. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CNEN. Comissão Nacional de Energia Nuclear
EPFS. Elliptic Paraboloid Failure Surface
MEF. Método dos Elementos Finitos
PET. Polietileno Terafitalato
PVC. Cloreto de Polivinila

1 INTRODUÇÃO

1.1 Posicionamento do Tema

Uma das etapas mais críticas da gerência de rejeitos radioativos é o transporte deste material das instalações onde são gerados para os locais de tratamento e armazenamento temporário e daí para o repositório final. Isto porque, sendo uma das poucas atividades da indústria nuclear realizada fora das áreas controladas, o transporte apresenta um grande potencial de impacto ambiental em caso de acidentes de trajeto. Algumas embalagens, licenciadas para o transporte de quantidades ilimitadas de materiais radioativos, são projetadas para resistir a acidentes de trajeto severos, como quedas de grande altura, incêndios, submersão em água e impacto contra objetos pontiagudos. Para obter embalagens confiáveis, a indústria nuclear e a comunidade científico-tecnológica mundial têm investido grande esforço de pesquisa e desenvolvimento, tanto no projeto de sistemas de transporte quanto na incorporação a estes dos novos materiais que vêm surgindo a cada ano.

Nesta linha, uma das áreas pesquisadas é o uso de amortecedores de impacto com alma de material celular. Trata-se de componentes de sacrifício que, adicionados externamente às embalagens, absorvem grande quantidade de energia em eventos de queda e impactos contra objetos e, no caso de incêndios, atuam como barreira térmica entre o fogo e a embalagem¹ a ser protegida. Várias concepções de amortecedores têm sido propostas pelos pesquisadores, além de diferentes materiais de enchimento, como madeira natural ou aglomerada, concreto leve e espumas metálicas e poliméricas; estes materiais são conhecidos coletivamente como *materiais celulares*.

Uma configuração muito promissora é aquela constituída por um amortecedor com casca metálica externa fina e alma de espuma de poliuretano.

¹ De acordo com a terminologia consagrada pela comunidade envolvida no transporte de materiais radioativos, **embalagem** refere-se ao conjunto de componentes necessários para encerrar completamente o conteúdo radioativo e **embalado** ao volume apresentado para transporte, incluindo embalagem e conteúdo radioativo. Neste trabalho, contudo, adota-se, para efeitos de maior clareza, o termo embalagem em ambas as situações.

As vantagens apresentadas por este arranjo são: facilidade de confecção, baixa densidade, propriedades mecânicas aproximadamente constantes em todas as direções (isto é, baixa anisotropia), disponibilidade de matéria prima, baixo custo e boa proteção térmica.

No Brasil, foi desenvolvida uma espuma de poliuretano utilizando matéria-prima extraída do óleo de mamona, em substituição aos produtos da indústria petroquímica, apresentando as vantagens de ser um produto acessível localmente e ser oriundo de fonte renovável e não poluente. Contudo, não se tem notícia de nenhum estudo sobre as propriedades físicas ou mecânicas deste material, fundamentais para sua utilização como elemento estrutural.

1.2 Objetivo da pesquisa

O trabalho de tese aqui proposto visa estabelecer uma metodologia para caracterização estrutural de um amortecedor de impacto de espuma polimérica, incluindo caracterização do material, modelamento constitutivo, análise experimental e implementação numérica. Um estudo de caso na área nuclear é apresentado: o projeto, para situações de impacto, de um amortecedor de espuma rígida de poliuretano obtida a partir do óleo de mamona para proteção de uma embalagem de armazenamento e transporte de materiais radioativos.

1.3 Etapas do trabalho

Esta tese apresenta, no Capítulo 2, um levantamento bibliográfico para delimitação do assunto, determinação de sua fundamentação teórica e originalidade e familiarização com trabalhos similares. São revistos principalmente os estudos que tratam dos materiais mais comumente usados em amortecedores de impacto, de programas experimentais para obtenção de propriedades e do desenvolvimento de relações constitutivas para espumas poliméricas rígidas.

O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento da metodologia propriamente dita, cujas partes principais são: definição da base normativa aplicável; levantamento dos materiais existentes no mercado brasileiro e escolha do mais adequado de acordo com os objetivos desta pesquisa; determinação de suas propriedades mecânicas, por meio de ensaios laboratoriais; desenvolvimento de metodologias simplificadas para determinação inicial das dimensões dos amortecedores, desenvolvimento de metodologias de análise experimental para validação dos métodos analíticos e de metodologias de análise

estrutural, baseadas no método de elementos finitos (MEF). A descrição completa do material escolhido, incluindo sua microestrutura, dos equipamentos utilizados nos experimentos, do método simplificado empregado e da simulação numérica é feita nesse capítulo.

No Capítulo 4 é feita a apresentação dos resultados obtidos. São analisados os resultados dos ensaios realizados para caracterização da espuma de poliuretano (compressão uniaxial, compressão hidrostática e impacto), sendo feita uma comparação com resultados de espumas obtidas da indústria petroquímica. Também são discutidos os dados obtidos pela aplicação da metodologia simplificada², no caso, o *Método do Fator de Janssen*, que levaram à escolha da densidade mais apropriada para o caso estudado. Finalmente, discutem-se os resultados da simulação numérica realizada através do método dos elementos finitos, sendo feita uma comparação com os resultados dos ensaios reais.

No Capítulo 5 são feitas considerações a respeito dos resultados apresentados anteriormente, mostrando-se a aplicabilidade dos mesmos e suas limitações. No Capítulo 6, finalmente, apresentam-se as conclusões extraídas do estudo e as recomendações, feitas com base nas discussões anteriores, para futuros desenvolvimentos dentro do tema pesquisado.

² Uma descrição mais detalhada do que são metodologias simplificadas será feita mais adiante, na seção 4.2. Elas são utilizadas neste trabalho para determinação inicial da densidade de espuma mais adequada no estudo de caso realizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O projeto de embalagens para transporte de materiais radioativos em vias públicas deve obedecer a critérios determinados em normas. Para melhor entendimento destes requisitos – que têm grande impacto no escopo do trabalho aqui proposto – apresenta-se neste capítulo uma revisão da normalização nacional pertinente, com especial ênfase no que esta dispõe sobre as condições de acidentes postulados para estas embalagens. Outro tema contemplado nesta revisão da literatura é o conjunto de materiais de uso já consagrado como enchimento de amortecedores de impacto; o objetivo deste mapeamento é estreitar o universo de materiais candidatos apenas aos mais promissores, de maneira a se poder avaliar com mais profundidade os aspectos positivos e as desvantagens do uso de cada um. É feita uma descrição detalhada da estrutura dos materiais celulares, onde é explicitado o relacionamento entre os aspectos microscópicos de sua estrutura e suas propriedades macroscópicas.

Uma vez apresentados os materiais mais referenciados, a revisão da literatura apresenta uma investigação sobre os desenvolvimentos teóricos e experimentais já realizados para determinação das propriedades destes materiais. O objetivo é a identificação dos modelos constitutivos propostos pelos pesquisadores da área e, mais ainda, quais entre eles estão validados por meio de experimentos práticos e quais estão, além disto, implementados em códigos computacionais de análise estrutural. Na investigação dos programas experimentais, interessou-se tanto por aqueles que focalizam um material específico, como pelos que fazem comparações de mérito entre diversos materiais, segundo critérios previamente estabelecidos, como peso ou volume mínimos ou custo.

2.1 Base normativa para projeto de embalagens na área nuclear

A regulamentação brasileira para o transporte de materiais radioativos (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 1988), baseada na regulamentação da Agência Internacional de Energia Atômica (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA, 1996), classifica as embalagens em

cinco categorias, cada uma apropriada ao transporte de tipos e quantidades particulares de material.

Segundo essa regulamentação, são as seguintes as categorias, com exemplos de materiais que podem transportar:

- Exceptiva – artigos contendo material radioativo natural ou empobrecido ou outros materiais, desde que em pequena atividade;
- Industrial (I, II , III) – materiais com baixa atividade específica ou objetos contaminados superficialmente;
- Tipo A – materiais radioativos diversos, com atividade limitada;
- Tipo B – materiais radioativos diversos com atividade ilimitada, desde que não transportados por via aérea;
- Tipo C – categoria idealizada para o transporte aéreo de materiais com atividades muito grandes.

A norma especifica, para cada categoria, os critérios de projeto pertinentes, os quais incluem ensaios mecânicos, térmicos e de estanqueidade. São estabelecidos também, para todas as categorias, requisitos de segurança relativos às operações de amarração das embalagens no meio de transporte (caminhão ou veículo utilitário, navio ou barco e aeronave); de içamento e movimentação das mesmas (como olhais); de acabamento superficial; de compatibilidade entre materiais – tanto entre materiais constituintes da embalagem quanto entre estes e o material radioativo transportado; e, finalmente, requisitos sobre mecanismos de fechamento e vedação.

As três primeiras categorias englobam embalagens relativamente simples, uma vez que, além dos critérios gerais acima, têm de obedecer no máximo a ensaios que simulam pequenos incidentes de manuseio, como chuva, impactos leves contra objetos pontiagudos, pequenas quedas ou empilhamento inadequado. As categorias Exceptiva e Industrial I são até mesmo isentas de verificação quanto a estes incidentes, por conterem materiais radioativos em quantidades muito limitadas ou em concentração muito baixa.

As embalagens do Tipo C, por outro lado, são extremamente robustas e devem resistir a acidentes aéreos severos, que envolvem impactos a altas velocidades e incêndios de longa duração e alta potência térmica. Trata-se de uma categoria muito especializada, basicamente destinada ao transporte aéreo

de grandes fontes radioativas industriais (para irradiadores de alimentos, por exemplo) ou médicas (para equipamentos de teleterapia) ou de rejeitos de reprocessamento do combustível irradiado.

Em vista do exposto, focalizou-se neste trabalho o estudo de mecanismos de proteção para embalagens Tipo B, para as quais existe uma grande demanda potencial futura, principalmente quando entrar em operação o repositório nacional de rejeitos radioativos, a partir do que se espera uma movimentação crescente de embalagens por vias públicas. A regulamentação para seleção de locais candidatos a abrigar esta instalação, sua construção, licenciamento, administração e operação foi recentemente aprovada pelo Congresso Nacional (BRASIL, 2001).

Além dos requisitos de segurança gerais, as embalagens Tipo B devem ser aprovadas na seguinte seqüência de ensaios (vide esquematização na Figura 1, feita a partir de COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 1988):

- Ensaio de queda-livre I: o protótipo é liberado de uma altura de 9 m sobre um alvo rígido, na posição que lhe cause o maior dano possível;
- Ensaio de queda-livre II: trata-se na realidade de um ensaio de penetração, no qual o protótipo é liberado de uma altura de 1 m sobre uma barra cilíndrica vertical, a qual deve atingir sua região considerada mais vulnerável;
- Ensaio de queda-livre III: o protótipo é posicionado sobre uma plataforma rígida, na posição considerada mais vulnerável, e sofre o impacto de uma massa de 500 kg em queda-livre de uma altura de 9 m. A massa consiste de uma placa metálica quadrada, com 1 m de lado e 64 mm de espessura;
- Ensaio térmico: o protótipo deve ser envolvido completamente num fogo resultante da combustão de um combustível hidrocarbonado, com temperatura de chama de 800 °C, coeficiente de emissividade mínimo de 0,9, por 30 minutos. São permitidos métodos alternativos (por exemplo, realização do ensaio em fornos industriais), desde que as características térmicas sejam equivalentes;
- Ensaio de imersão: o protótipo deve ser imerso a uma profundidade de água de 15 m, por um período de 8 horas. São permitidos métodos equivalentes, como a realização do ensaio em uma câmara de pressão.

Os ensaios de queda-livre I e queda-livre III são mutuamente exclusivos, sendo o último previsto apenas para embalagens com massa inferior a 500 kg e massa específica inferior a 1.000 kg/m^3 .

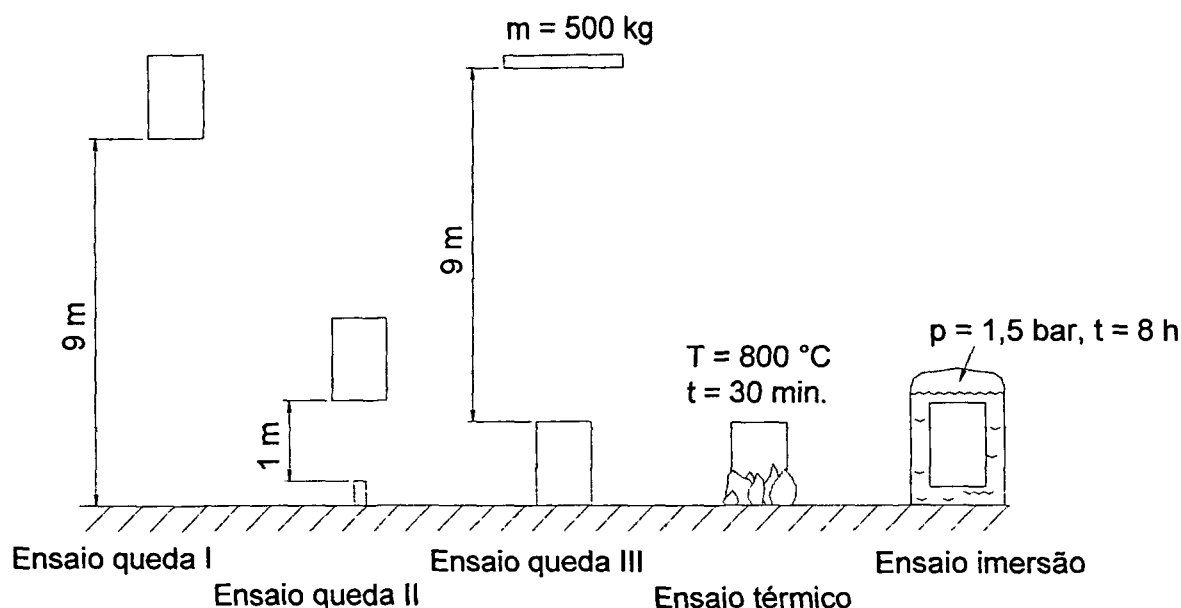


Figura 1. Ensaios para embalagens Tipo B

Para serem aprovadas na campanha de ensaios, as embalagens devem preservar sua capacidade de blindagem e contenção e sua proteção térmica, sendo permitidos aumentos limitados do nível de radiação superficial e o surgimento de uma taxa de vazamento do conteúdo também limitada.

A norma (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, op. cit.) permite que a demonstração da conformidade com os critérios de projeto pertinentes seja feita pela realização de ensaios com protótipos em escala real ou, de forma alternativa ou complementar, pelos seguintes métodos:

- “referências a demonstrações anteriores satisfatórias, realizadas de maneira suficientemente similar”;
- “os ensaios podem ser realizados com modelos em escalas apropriadas, incorporando as características significativas do item a ser ensaiado, quando a experiência tecnológica existente demonstrar que os resultados de tais ensaios são adequados aos propósitos do projeto”;
- “a demonstração de conformidade pode ser realizada mediante cálculos ou argumentação lógica, quando os procedimentos de

cálculo e os parâmetros empregados são confiáveis e conduzem a resultados conservativos (sic)".

Portanto, é prevista em norma uma metodologia de avaliação incluindo a efetiva realização de ensaios físicos (em escala natural ou reduzida) e simulação numérica desses ensaios.

2.2 Principais materiais usados em amortecedores de impacto

Os amortecedores, grosso modo, podem ser classificados em amortecedores ocos e amortecedores com alma. Os primeiros são formados por uma estrutura metálica esbelta, confeccionadas basicamente por tubos ou placas, de rigidez muito menor do que o restante da embalagem, de maneira a deformarem-se plasticamente em eventos de impacto, absorvendo e dissipando grande quantidade de energia, sem transmitir esforços danosos aos componentes que visam proteger. Na Itália, Aquaro e Forasassi (1983) estudaram o comportamento sob impacto de um amortecedor tipo casca para uma embalagem para transporte de elementos combustíveis irradiados com peso total de 64 t. Estudo semelhante foi conduzido no Japão por Sugita e Mochizuki (1983).

Já os amortecedores com alma, de uso muito mais difundido que os anteriores, são geralmente compostos de uma casca metálica externa e um enchimento de material celular. Na Tabela 1 e nas Figs. 2 a 4 são apresentados alguns exemplos de embalagens na área nuclear que utilizam amortecedores de impacto com alma de material celular.

Tabela 1 Embalagens utilizando material celular

Denominação comercial	Material transportado	Material celular empregado	País origem	Referência
TN-MTR	Elemento combustível (EC) reatores pesquisa	Madeira	França/EUA	Michels (1998)
SAB/G 500 I	Rejeitos radioativos alto nível	Madeira	Alemanha	Jais (1984)
MP187	EC irradiado	Espuma de poliuretano e colméia de alumínio	EUA	Sisley et al. (1995)
N-55	Material BAE, peças metálicas ativadas	Espuma poliuretano	EUA	Simchuk (1978)
BU-J	Material físsil	Concreto leve	Japão	Japão (2001)
0924W	Fontes industriais seladas (Cs137, Co60, Ir192)	Cortiça	Grã-Bretanha	Grã-Bretanha (2000)
F-113	Fontes seladas	Madeira	Canadá	Canadá (2001)
NNFD-10	Urânio metálico	Madeira aglomerada	EUA	EUA (2001)
TRUPACT-II	Transuranic waste	Colméia de alumínio e espuma de poliuretano	EUA	EUA (2002)

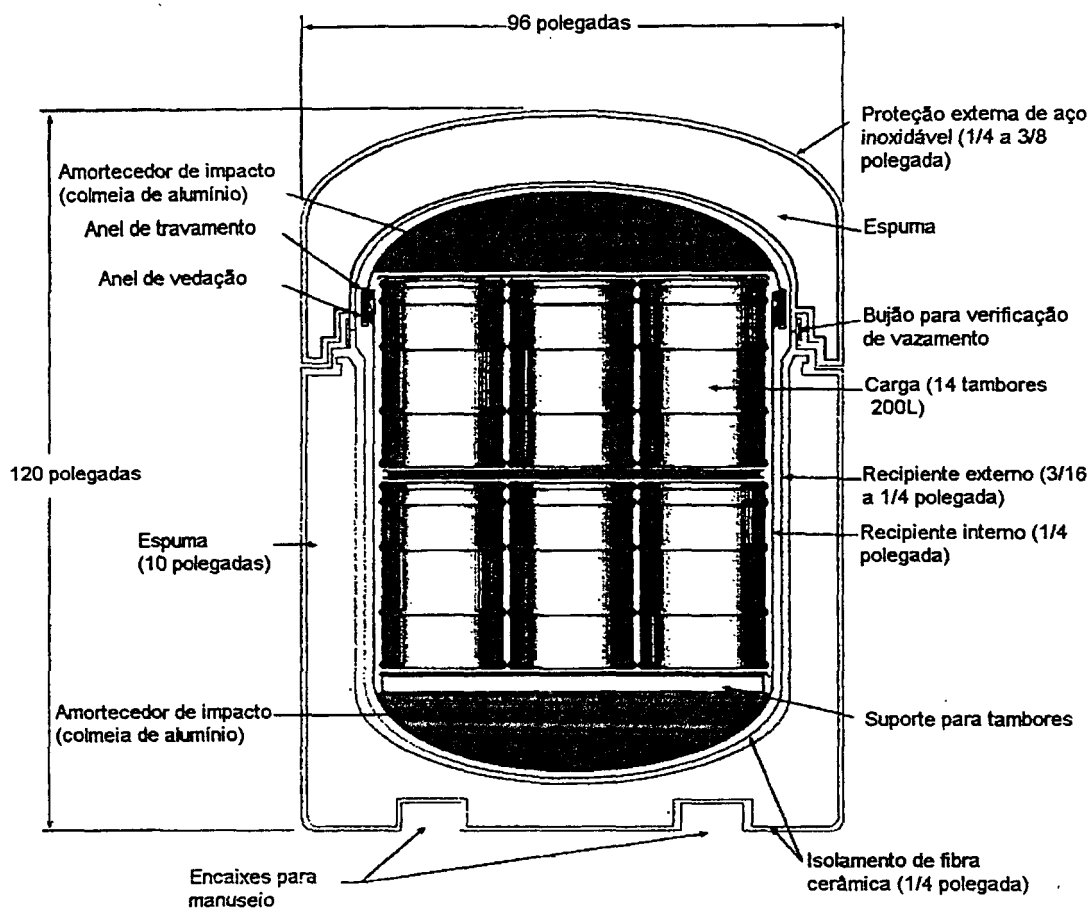
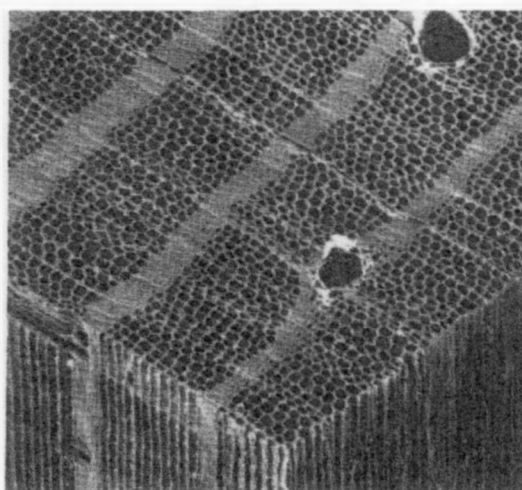


Figura 4. Embalagem TRUPACT-II (EUA, 2002)

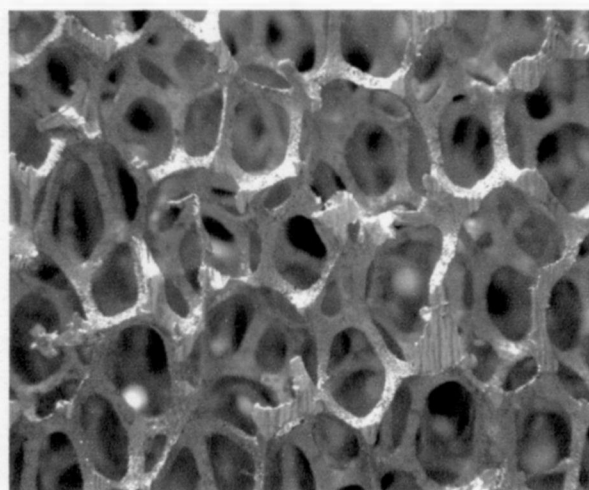
Sendo a amostragem acima bastante representativa do universo das embalagens com amortecedores, pode-se afirmar que os materiais celulares mais utilizados na área são a madeira (maciça e na forma de aglomerados ou compensados), espumas poliméricas, colméia de alumínio e concreto leve. Cada um deles apresenta atrativos e desvantagens específicos, sendo a escolha de um determinado material ditada por fatores como custo e disponibilidade, parâmetros de projeto da embalagem e tecnologia de fabricação disponível. Assim, por exemplo, o uso da madeira e da cortiça em embalagens Tipo B, que têm de resistir a acidentes envolvendo fogo, deve ser evitado ao máximo. Já no caso da colméia de alumínio, material leve, homogêneo e não inflamável (sendo inclusive bastante utilizado na indústria aeronáutica), as desvantagens são seu alto custo e o fato de não estar facilmente disponível no mercado brasileiro.

2.3 Materiais celulares: caracterização e comportamento mecânico

Como o próprio nome sugere, materiais celulares são formados por um arranjo espacial de arestas e membranas sólidas interconectadas, que encerram um fluido, geralmente o ar, em seus interstícios. A unidade básica desta estrutura é denominada *célula*, cujas dimensões variam de algumas centenas de micra até alguns milímetros. Essa disposição confere a este material características muito interessantes sob o ponto de vista estrutural, como baixo peso específico, eficiente isolamento térmico e alta capacidade de absorção e dissipação de energia durante eventos de impacto. Os materiais celulares são encontrados na natureza – alguns exemplos são esponjas, corais, madeira, cortiça e ossos – e são também produzidos artificialmente, quando encontram vasta aplicação em diversos campos da atividade humana. Diversos materiais sólidos podem servir de base para a fabricação de materiais celulares, como metais, vidros, cerâmicas e polímeros (Figura 5). Uma apresentação bastante detalhada e, ao mesmo tempo objetiva do que são materiais celulares, sua estrutura, propriedades e aplicações é encontrada em Gibson e Ashby (1988), nos capítulos 1 e 2. A descrição que se apresenta no restante desta seção baseia-se nesta referência.



(a) Madeira (pinho americano) (Hoadley, 1990, apud Schmidt, 2002)



(b) Espuma de alumínio (imagem obtida no Laboratório de Análise de Tensões do CDTN)

Figura 5. Exemplos de materiais celulares (natural e feito pelo homem)

Um parâmetro importante para caracterização dos materiais celulares é sua *densidade relativa*, ρ^*/ρ_s , definida como a massa específica do material celular

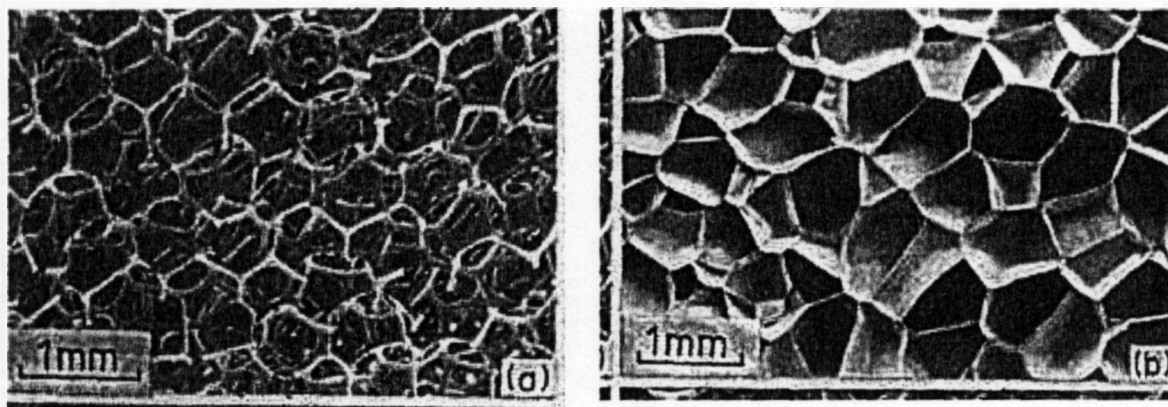
$(\mu^*)^3$ dividida pela massa específica do sólido base (μ_s); materiais de uso comercial apresentam densidade relativa máxima de 0.3. Já para definição das propriedades macroscópicas, o tamanho e a forma da célula são de grande importância. Quanto maior o tamanho médio da célula formadora da estrutura do material, menos denso e menos rígido este será. Como regra geral, pode-se dizer que, à medida que aumenta o tamanho médio das células, diminui a densidade de determinado material, o que ocasiona a diminuição de sua rigidez e capacidade de absorção de energia (Gibson e Ashby, op. cit.).

No que diz respeito à forma das células, quanto mais simétricas estas forem, maior isotropia será apresentada pelo material, ao passo que células alongadas ou achatadas darão origem a materiais com propriedades anisotrópicas, sendo que maiores rigidez e resistência são observadas na direção do alongamento das células. Caso típico é o da madeira, material essencialmente anisotrópico, como pode ser observado na Figura 5 (a).

A *topologia* da estrutura dos materiais celulares é também um fator de grande influência. A primeira grande diferenciação topológica que se pode fazer é entre as estruturas *bidimensionais*, nas quais retas paralelas constituem a geratriz das células, e as *tridimensionais*, onde as células possuem orientação espacial aleatória. A madeira é um exemplo de material celular bidimensional, ao passo que as espumas metálicas e poliméricas são estruturas tridimensionais. Outra distinção topológica importante é a diferenciação entre os materiais formados por células *fechadas* ou por células *abertas*. Nos primeiros, as células são providas de membranas em todas as faces, que isolam as células entre si, encerrando em seu interior o fluido que preenche toda a estrutura do material; no segundo tipo, as células são formadas apenas por arestas e o fluido pode circular livremente por todo o meio. A distinção entre os dois em nível de comportamento macroscópico se deve a que, durante um evento de impacto, o fluido encerrado nas células fechadas – geralmente o ar – é comprimido até que a célula sofra colapso plástico, absorvendo uma considerável parcela de energia por amortecimento pneumático. Já no material de células abertas, a quantidade de energia absorvida

³ Seguindo a notação consagrada na área, e salvo indicação contrária (principalmente no caso de notação diferente adotada por autores referenciados), neste trabalho se adota o sobrescrito (*) para as grandezas relativas ao material celular e o subscrito (s) para aquelas relativas ao material sólido base.

pelo fluido é muito menor, devendo-se quase que somente ao atrito desenvolvido pela migração deste fluido através do material, ao ser expelido à medida que o material é compactado. A Figura 6 mostra espumas poliméricas de células abertas e fechadas, conforme visto em microscópio eletrônico de varredura.



(a) Espuma de poliuretano, célula aberta

(b) Espuma de polietileno, célula fechada

Figura 6. Espumas poliméricas de estrutura tridimensional (Gibson e Ashby, op. cit.)

Finalmente, existe também a distinção topológica com relação à *conectividade*, ou seja, à forma como cada célula se liga às suas vizinhas. Geralmente, três faces se encontram por aresta e quatro arestas se encontram por vértice ainda que, conforme pode ser visto acima, estes números possam variar (Gibson e Ashby, op. cit.).

O comportamento mecânico dos materiais celulares durante um evento de impacto, de grande interesse para seu uso como elemento de proteção em embalagens, é resultante da estrutura acima descrita. A Figura 7 apresenta uma curva tensão-deformação típica de um carregamento compressivo dinâmico, na qual três fases bem distintas podem ser observadas (a fase de descarregamento, não representada, é importante apenas no caso de materiais flexíveis, que podem sofrer vários ciclos de carregamento sem apresentar deformações residuais significativas, como, por exemplo, aqueles usados em automóveis como enchimento para bancos ou encosto de cabeça). Inicialmente, há uma região de deformação elástica, dentro da qual as arestas das células do material sofrem flexão ou flambagem elástica, da qual se recuperam quando da retirada da

solicitação. Também nesta fase, a distensão experimentada pelas paredes, no caso de materiais de células fechadas, se situa no limite de elasticidade do polímero base. A inclinação média da curva nesta fase corresponde ao módulo de elasticidade da espuma E^* .

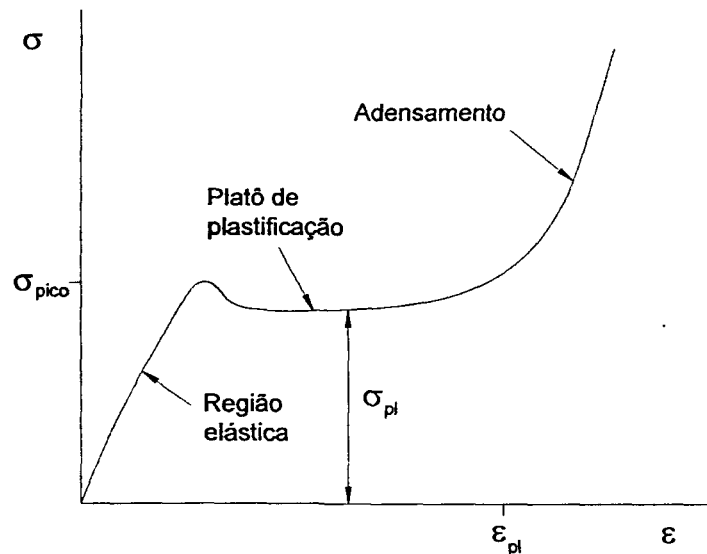


Figura 7. Curva tensão-deformação para um material polimérico (fase de carregamento)

Se a solicitação aumenta, as arestas e membranas começam a sofrer colapso plástico, as células começam a desaparecer enquanto elementos individualizados e o material se adensa rapidamente. Esta segunda fase é caracterizada por um longo platô na curva tensão-deformação, no qual o material se deforma de forma significativa, com pouco ou nenhum aumento do carregamento aplicado. O valor médio de tensão nesta fase é denominada *tensão de platô*, σ_{pl} . Alguns materiais poliméricos podem apresentar encruamento (aumento da resistência) na plastificação, caso em que sua curva tensão-deformação apresentará uma determinada inclinação com relação ao eixo horizontal; ainda assim, a tensão de platô é tomada como a tensão média neste trecho da curva.

Na terceira fase, a partir de determinada deformação (tipicamente 50% para as espumas poliméricas de uso consagrado), a tensão aumenta rapidamente sem que haja grande incremento de deformação. Quando grande parte das células já colapsou, os fragmentos do próprio material base começam a se

comprimir mutuamente, o que provoca rápido aumento da tensão. Esta etapa é denominada *adensamento* do material.

Um efeito freqüentemente observado nestas curvas é o surgimento de uma *tensão de pico*, σ_{pico} , ao final da fase elástica, ligeiramente maior do que a tensão de platô. Este pico de tensão surge por dois motivos: primeiro, porque, como grande parte das arestas das células sofre colapso por flambagem, há uma súbita diminuição da resistência que oferecem quando a falha ocorre; e segundo – no caso das espumas de células fechadas –, ao se romperem as membranas das células, a resistência que ofereciam desaparece imediatamente.

2.4 Estudos teórico-experimentais para obtenção de propriedades de materiais celulares

Um desafio que se colocou para os pesquisadores desde o início do estudo dos materiais celulares foi o estabelecimento de um modelo matemático consistente e robusto o suficiente para permitir, sem perda de generalidade, a descrição, com precisão aceitável, do comportamento deste elemento estrutural sob diferentes condições de carregamento. Esta dificuldade decorre principalmente de três fatores: i) da complexidade estrutural destes materiais, constituídos por um arranjo espacial de células interconectadas, com um fluido preenchendo os interstícios da estrutura; ii) do regime de trabalho habitual – grandes deformações associadas à plastificação; e iii) da variação de suas propriedades, notadamente o módulo de elasticidade, com a taxa de deformação.

Os estudos visando a caracterização estrutural dos materiais celulares tiveram grande impulso no final de década de 1960. Woolam (1968), em um trabalho pioneiro, conduziu um programa de ensaios de impacto em quatro tipos de espumas poliméricas de baixa densidade (os seguintes tipos de espuma foram estudadas: de polietileno, de estireno-acrilonitrila, de poliestireno e de poliuretano). Para comparação da eficiência de cada tipo de espuma para determinada aplicação, Woolam utilizou-se do método simplificado do fator de Janssen⁴.

Patel e Finnie (1970) se dedicaram ao desenvolvimento de um modelo constitutivo para espumas poliméricas baseado em *células unitárias* idealizadas,

⁴ Este método é descrito na seção 4.2

em forma de octaedro e dodecaedro, que permitisse prever o comportamento da espuma a partir das propriedades do polímero sólido base e das características geométricas desta célula. Em seu estudo, porém, não apresentaram uma comprovação experimental de seu modelo.

Melvin e Roberts (1971) levantaram as propriedades mecânicas de vários materiais celulares (entre eles cortiça e espumas de polietileno e poliuretano) por meio de ensaios de compressão estáticos e dinâmicos a diferentes velocidades de compressão. A conclusão geral de seu trabalho é que a maioria dos materiais testados não apresentou significativa dependência entre capacidade de absorção de energia e taxa de deformação.

Rusch (1969) conduziu um estudo visando estabelecer um modelo constitutivo para espumas flexíveis que conseguisse prever seu comportamento macroscópico a partir de alguns de seus parâmetros intrínsecos, como densidade, módulos de elasticidade do polímero base e da espuma, fração de material sólido, forma da célula e sua distribuição espacial segundo seu tamanho. Para isto, foi proposta uma relação constitutiva para estas espumas (eq. 1) que, além do módulo de elasticidade da espuma, E^* , incorporou uma função $\psi(\varepsilon)$ que leva em conta a influência dos parâmetros da estrutura geométrica da espuma acima citados. Esta função foi determinada experimentalmente, por meio de ensaios de compressão com amostras de espumas flexíveis de baixa densidade, variando-se densidade e tamanho de célula.

$$\sigma = E^* \varepsilon \psi(\varepsilon) \quad (1)$$

Rusch testou este modelo em três tipos de espumas de poliuretano: i) uma de células fechadas e de formato regular e repetido ao longo de sua estrutura; ii) uma de formato regular, porém de células abertas (na verdade, a mesma espuma anterior, tendo as paredes de suas células sido removidas por um processo térmico) e iii) uma espuma com células de forma e distribuição irregulares e pouca percentagem de células fechadas. Além dessas, foi ainda testada uma espuma produzida a partir de borracha natural, de células abertas. Estes diversos tipos de espuma possuíam módulos de elasticidade, densidades e tamanhos de célula variáveis. Para avaliação dos efeitos da temperatura e taxa

de deformação, os ensaios foram realizados sob três temperaturas diferentes (25, 60 e 100°C) e taxas de deformação variando de 0,001 a 0,2 s⁻¹.

As principais conclusões do trabalho de Rusch foram que a função $\psi(\epsilon)$ – e, conseqüentemente, a resposta das espumas estudadas – era altamente sensível a certos parâmetros relativos à estrutura geométrica da espuma (como grau de uniformidade na distribuição das células e grau de regularidade de sua estrutura) e fracamente dependente da densidade da espuma e do tamanho médio de suas células; e era insensível à temperatura e taxa de deformação, pelo menos dentro da faixas de variação pesquisadas.

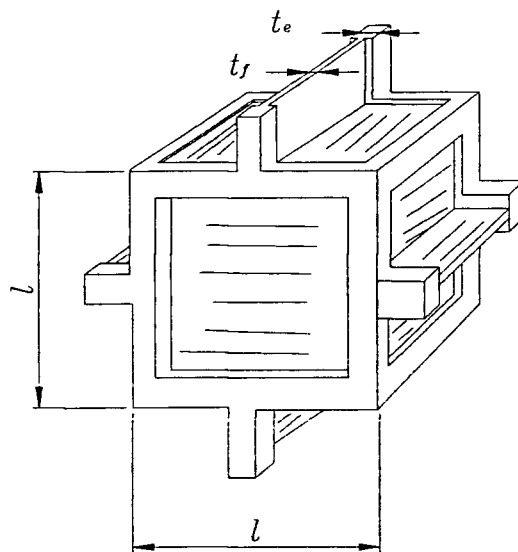
Em outro estudo, Rusch (1971) propôs um modelo para espumas rígidas, partindo da mesma relação constitutiva definida anteriormente (eq. 1). Esta formulação será posteriormente apresentada em detalhe (seção 3.3.1, p. 65).

Meinecke e Clark apresentaram em seu estudo (Meinecke e Clark, 1973) uma expressão matemática que permite a previsão do comportamento estático e dinâmico de espumas poliméricas a partir do comportamento dessas espumas à relaxação. Para validação do modelo desenvolvido, foram realizados ensaios dinâmicos unidimensionais com espumas de poliuretano, tendo sido reportada boa correlação entre os resultados experimentais e os valores previstos.

Nagy et al. (1974) também desenvolveram uma relação constitutiva para explicar o comportamento dinâmico de espumas poliméricas, incluindo a variação da resposta do material à taxa de deformação. Esse estudo também incluiu a validação do modelo por meio de ensaios de impacto unidimensionais e, mais ainda, diferenciando espumas de células abertas daquelas de células fechadas, procurou estudar a contribuição do ar presente na estrutura da espuma. Os resultados acerca dessa contribuição, contudo, não foram conclusivos.

Na década de 1980, Gibson e Ashby (1988) desenvolveram um amplo programa de pesquisas no qual foram estudados diversos materiais e estruturas celulares, como estruturas tipo colméias metálicas, espumas poliméricas, compósitos com alma de espuma, madeira, osso e cortiça. Para as espumas, foi adotado o modelo da célula unitária de Patel e Finnie (op. cit.), adotando-se, porém, um modelo simplificado de célula cúbica (Figura 8). Gibson e Ashby desenvolveram equações para descrição do comportamento de espumas de

células abertas e de células fechadas, nas quais foram incorporados ainda os efeitos de parâmetros não considerados anteriormente, como taxa de deformação, temperatura e carregamentos mais complexos, como carregamento multiaxial e material com acentuada anisotropia.



Legenda:

t_e - espessura da aresta

t_f - espessura da membrana

l - comprimento da aresta

Figura 8. Modelo da célula unitária (Gibson e Ashby, 1988)

Dentre os trabalhos da década de 1990, destaca-se o de Ramon et al. (1990), que, de maneira semelhante a Meinecke e Clark (op. cit.), obtiveram uma relação constitutiva fenomenológica para espumas poliméricas utilizando resultados de ensaios de relaxação, ao invés dos habituais ensaios de compressão uniaxiais. Estes ensaios foram realizados a posteriori, para validação da formulação obtida.

Triantafillou e Gibson (1990), limitando seu campo de estudo, chegaram a uma relação constitutiva para espumas isotrópicas metálicas e espumas poliméricas de células abertas com comportamento perfeitamente elasto-plástico, ou seja, que não apresentam encruamento na plastificação. Não foi feita, porém, uma validação experimental do modelo apresentado.

Theocaris (1992) estudou a fratura de espumas rígidas de poliuretano de células fechadas, utilizando o critério EPFS (*Elliptic Paraboloid Failure Surface* – Superfície de Falha tipo Parabolóide Elíptico). Foram analisadas espumas com massas específicas de 64, 96 e 192 kg/m³, submetidas a esforços de compressão

e de tração. A conclusão desse trabalho é que o critério EPFS, desenvolvido originalmente para materiais ortotrópicos sólidos e para compósitos, se aplica a materiais porosos.

Um trabalho bastante importante foi conduzido por Sherwood e Frost (1992), que, a partir dos estudos de Rush (1971), Meinecke e Clark (1973) e Nagy (1974), derivaram um modelo constitutivo para problemas uniaxiais que incorporou os efeitos de densidade, temperatura e taxa de deformação. O modelo proposto foi validado para espumas de poliuretano por meio de um programa de ensaios de impacto com espumas de diversas densidades, sob diferentes temperaturas e taxas de deformação. Este modelo foi implementado em um código computacional de elementos finitos para análise de impacto (ADINA, 1987).

A relação constitutiva proposta no trabalho de Sherwood e Frost tem a forma

$$\sigma_c = H(T) G(\rho) M(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) f(\varepsilon), \quad (2)$$

onde a função $H(T)$ considera os efeitos da temperatura sobre o comportamento da espuma, $G(\rho)$ a influência da densidade da espuma e $M(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$, uma função definida inicialmente por Nagy et al. (op. cit.) como

$$M(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = (\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)^{n(\varepsilon)} \quad (3)$$

introduz o efeito da taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$. A grandeza $\dot{\varepsilon}_0$ é uma taxa de deformação de referência e

$$n(\varepsilon) = b_1 + b_2 \varepsilon \quad (4)$$

é uma função linear da deformação, na qual b_1 e b_2 são constantes determinadas experimentalmente para cada material. As funções H , G e M são definidas iguais à unidade nas condições de referência T_0 , ρ_0 e $\dot{\varepsilon}_0$ (no estudo de Sherwood e Frost, $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $\rho_0 = 88$ e $\dot{\varepsilon}_0 = 4.233 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$).

A função de forma não linear $f(\varepsilon)$, também dependente do material, é definida como uma série polinomial em ε :

$$f(\varepsilon) = \sum_{n=1}^{10} A_n \varepsilon^n \quad (5)$$

Os coeficientes A_n – e, portanto, a função f – foram determinados por meio de ensaios de compressão realizados à temperatura T_0 , taxa de deformação $\dot{\varepsilon}_0$ e com corpos de prova de densidade ρ_0 . Como, por definição, as funções H , T e M se reduzem à unidade sob as condições de referência, tem-se que

$$\sigma_c = f(\varepsilon) \quad (6)$$

As funções $H(T)$ e $G(\rho)$ foram determinadas por meio de ensaios de compressão à taxa de deformação $\dot{\varepsilon}_0$, variando-se temperatura e densidade. Para as espumas testadas (espuma de poliuretano de denominação comercial Davisorb EM1080, com massas específicas de 80, 88 e 96 kg/m³), sob as temperaturas de ensaio de -20, 20 e 60 °C e adotando $\dot{\varepsilon}_0 = 4.233 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, Sherwood e Frost chegaram às seguintes relações empíricas:

- para a função de densidade,

$$G(\rho) = 0.03688\rho - 2.24 \text{ para } 80 \leq \rho < 88 \text{ e}$$

$$G(\rho) = 0.02500\rho - 1.20 \text{ para } 88 \leq \rho < 96;$$

- para a função de temperatura:

$$H(T) = 1.6500 - 0.03250T, \text{ para } -20 \leq T < 20 \text{ °C e}$$

$$H(T) = 1.1325 - 0.00663T, \text{ para } 20 \leq T < 60 \text{ °C.}$$

Finalmente, a função M foi determinada por meio de ensaios variando-se a velocidade de ensaio, ou seja, a taxa de deformação. Rearranjando-se a equação (2) na forma

$$M(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \frac{\sigma_c(\varepsilon)}{H(T)G(\rho)f(\varepsilon)}, \quad (7)$$

e considerando as condições de referência e a equação (6), M pode ser redefinida como

$$M(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \frac{\sigma_c}{[\sigma_c(\varepsilon)]_{\varepsilon_0}} \quad (8)$$

Sherwood e Frost construíram curvas M - ε para várias taxas de deformação. Para uma dada taxa de deformação, o expoente da função M pode ser obtido também se reescrevendo a eq. (3) na forma

$$n(\varepsilon) = \left[\frac{\ln M(\varepsilon, \dot{\varepsilon})}{\ln \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0} \right] \quad (9)$$

Para a espuma testada, a seguinte relação foi obtida empiricamente:

$$n(\varepsilon) = 0.1173 + 0.08533 \varepsilon \quad (10)$$

Para validação do modelo proposto, as curvas tensão-deformação fornecidas pelo modelo analítico foram comparadas com aquelas obtidas experimentalmente. O erro, avaliado pelo método dos mínimos quadrados, situou-se dentro do limite de 5%, com exceção dos casos onde $T = -20^\circ\text{C}$ e $\rho = 88$ e 96 , que apresentaram erros de 8% e 5.3%, respectivamente.

O modelo de Sherwood e Frost (1992) foi implementado numericamente no programa computacional ADINA (1987), com o qual várias simulações de impacto foram executadas. Estes resultados foram validados por meio de ensaios de impacto à taxa de deformação inicial de 13.4 s^{-1} , tendo-se verificado boa correspondência entre a energia de deformação absorvida, prevista nas simulações e dada pela área sob a curva tensão-deformação, e a energia cinética inicial do cabeçote de impacto durante os ensaios reais.

Outra contribuição foi dada por Neilsen et al. (1987), que formularam um modelo para a espuma de poliuretano de célula fechada de baixa densidade. Trata-se de um modelo desenvolvido empiricamente, através do estudo da resposta de espumas com massa específica variando de 34 a 85 kg/m^3 , submetidas a ensaios de compressão uniaxial, hidrostático e triaxial. O método utilizado pelos autores para obterem o estado triaxial de tensões consistiu em estabelecer-se inicialmente uma pressão hidrostática no interior do equipamento

utilizado e, em seguida, comprimir-se o corpo de prova apenas em uma das direções, por meio de um pistão hidráulico. De acordo com este modelo, o comportamento da espuma é o somatório da resposta dos dois elementos que a compõem: 1) sua estrutura sólida, também denominada esqueleto, constituída pelas arestas e membranas das células; 2) o ar encerrado nestas células. Por conveniência, os autores adotaram a hipótese simplificadora que o esqueleto ocupa o mesmo espaço que a espuma, o que implica as deformações do primeiro serem idênticas às da segunda. As seguintes simplificações adicionais são feitas também ao considerar-se a contribuição do ar: 1) ele atua em paralelo com a estrutura sólida; 2) ele é considerado um gás perfeito e, finalmente; 3) o processo de compressão é isotérmico, considerando que a massa de material sólido é muito maior do que a massa de ar.

Tomando-se em conta que a contribuição do ar é totalmente volumétrica, ou seja, a resistência do ar a esforços cisalhantes é nula, os autores propuseram a seguinte expressão para o campo de tensões da espuma, $\underline{\sigma}^{esp}$:

$$\underline{\sigma}^{esp} = \underline{\sigma}^{esq} + \sigma^{ar} \underline{i}, \quad (11)$$

onde $\underline{\sigma}^{esq}$ é o campo de tensões no esqueleto e $\sigma^{ar} \underline{i}$ representa a contribuição volumétrica do ar, sendo $\underline{i}$ o tensor identidade.

A expressão obtida para a contribuição do ar é

$$\sigma^{ar} = \frac{p_0^{ar} \varepsilon_{vol}}{\varepsilon_{vol} + 1 - \phi}, \quad (12)$$

onde

$p_0^{ar} \approx 0,1 \text{ MPa}$ é a pressão inicial do ar, equivalente à pressão atmosférica;

ε_{vol} é a deformação volumétrica nominal, ou seja, variação do volume da espuma com relação ao volume inicial; e

ϕ é a fração volumétrica de material sólido na espuma antes da deformação.

Na Figura 9 apresenta-se a curva da contribuição do ar para uma espuma com fração volumétrica $\phi = 0,09$. Observa-se que a pressão do ar no

interior da células tende ao infinito quando ε_{vol} se aproxima de $1-\phi$, ou seja, quando o volume da espuma se aproxima do volume do polímero base.

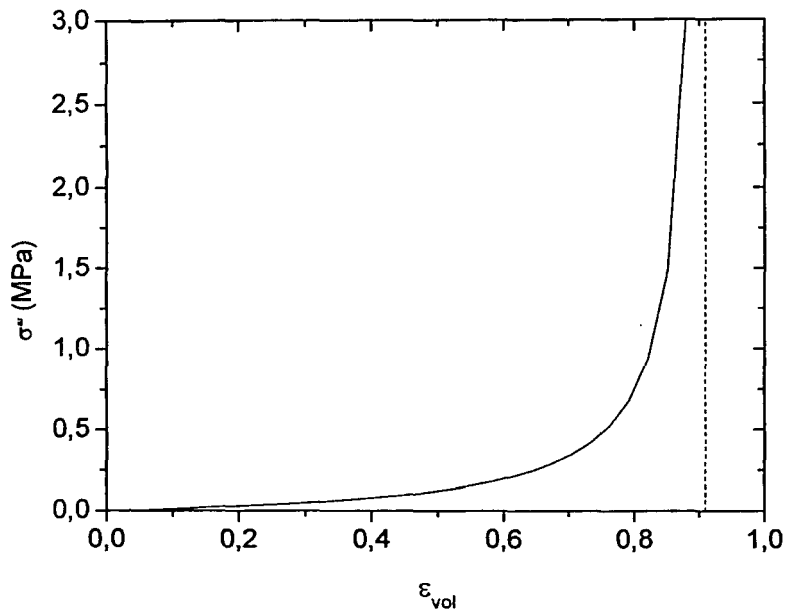


Figura 9. Contribuição do ar para a resposta da espuma (Neilsen, 1987)

A contribuição do esqueleto à resistência da espuma pode ser determinada subtraindo-se, da resposta da espuma, a contribuição do ar:

$$\underline{\sigma}^{esq} = \underline{\sigma}^{esp} - \sigma^{ar} \underline{j} \quad (13)$$

Este modelo está incorporado ao código computacional de elementos finitos LS-DYNA (LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, 1999), sob a denominação *closed cell foam model* (modelo para espuma de célula fechada).

Tendo como base o modelo anterior, Neilsen et al. (1995) apresentaram um novo modelo para espumas de poliuretano rígidas de células fechadas, mas não necessariamente de baixa densidade. Nesse modelo, a estrutura da espuma é composta de duas partes: 1) o esqueleto íntegro da espuma (antes do adensamento da espuma, ou seja, antes da fase em que as células desaparecem); 2) a combinação do ar existente na espuma com os fragmentos do polímero base que surgem na fase de adensamento, resultantes da destruição do esqueleto da espuma. O comportamento do esqueleto íntegro é que dita a resposta da espuma durante a deformação elástica inicial e ao longo do platô de plastificação, enquanto o contínuo representado pelo ar interno e

fragmentos de polímero é responsável pelo comportamento da espuma na fase final de deformação. Note-se que, no modelo anterior, não foi feita qualquer consideração de dano ao esqueleto e as contribuições das duas partes – esqueleto sólido e ar – foi tomada em todas as três fases de deformação da espuma.

O campo de tensões na espuma $\underline{\sigma}^{esp}$ é representado por

$$\underline{\sigma}^{esp} = \underline{\sigma}^{esq} + p\underline{i}, \quad (14)$$

onde $\underline{\sigma}^{esq}$ é o campo de tensões no esqueleto e $p\underline{i}$ representa a contribuição do contínuo, sendo p a pressão no contínuo e $\underline{i}$ o tensor identidade.

Para estudo do comportamento do esqueleto, Neilsen et al. propuseram uma combinação da teoria de plasticidade e teoria do dano do contínuo, sendo a deformação permanente das células descrita pela teoria de plasticidade e as variações de resposta durante o regime elástico ocasionadas pela ruptura das paredes das células seriam capturadas pela teoria do dano. As frentes de plastificação e dano foram descritas por meio de uma função ψ definida no espaço das tensões principais⁵, sendo ainda estabelecidas as equações de propagação da plastificação.

Tendo definido os seguintes parâmetros e grandezas:

$p_0^{ar} \approx 0,1 \text{ MPa}$, pressão do contínuo antes da deformação, equivalente à pressão atmosférica;

ϕ , fração volumétrica de material sólido antes da deformação;

K^{pol} , módulo de expansão volumétrico do poliuretano sólido $\left[K^{pol} = \frac{E_s}{3(1-2\nu_s)} \right]$,

onde E_s e ν_s são, respectivamente, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do polímero base;

e_{vol} , deformação volumétrica nominal, ou seja, variação do volume da espuma com relação ao volume inicial,

⁵ A função ψ aqui definida é distinta da função homônima definida por Rusch (1969), conforme descrita na eq. 1, p. 30.

Neilsen et al. obtiveram a seguinte expressão quadrática para a pressão no contínuo:

$$\phi p^2 + [p_0^{ar} \phi + K^{pol} (1 - \phi + e_{vol})] p + e_{vol} K^{pol} p_0^{ar} = 0, \quad (15)$$

sendo que apenas uma raiz p é fisicamente possível.

O modelo proposto por Neilsen et al. foi implementado em um código computacional de elementos finitos (Stone et al., 1993) e sua validação foi feita por comparação entre os resultados experimentais dos ensaios de compressão e tração uniaxiais e compressão hidrostática e os resultados da simulação numérica destes mesmos ensaios. Foram executadas simulações com malhas de elementos finitos com três níveis de refinamento, a saber, com 1, 50 e 200 elementos.

Com relação à compressão uniaxial, Neilsen et al. observaram que o modelo apresentou boa correlação com os resultados experimentais, ainda que o adensamento da espuma tenha se iniciado sob uma deformação menor do que observado no ensaio. No ensaio de tração, de maneira semelhante ao que acontece com materiais metálicos dúcteis, também a espuma testada sofreu estricção em uma seção transversal; este fenômeno foi adequadamente captado pelo modelo de 50 e 200 elementos (a malha de um elemento sofre apenas deformação volumétrica). As três malhas apresentaram boa correlação com o resultado experimental durante a fase de carregamento, conforme mostrado na Figura 10; após a ruptura do corpo de prova – claramente caracterizada pela brusca inflexão da curva e pela reta vertical após este ponto –, o comportamento previsto pelo modelo numérico apresentou grande dependência com o grau de refinamento da malha. A malha de um elemento mostrou-se muito deficiente na descrição da fase de plastificação, ao passo que a malha de 200 elementos apresentou boa resposta também nesta fase.

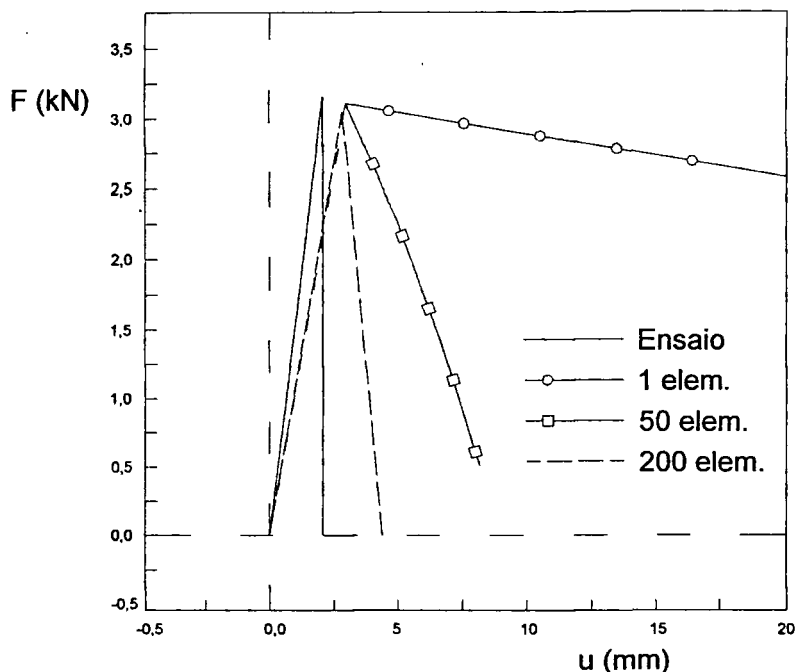


Figura 10. Curvas $F \times u$ para modelo de Neilsen (1995), ensaio de tração

Em relação à compressão hidrostática, Neilsen et al. reportaram uma boa correlação entre resultados experimentais e numéricos. Porém, devido a limitações de resistência da câmara de pressão utilizada nesses ensaios, os corpos de prova foram testados somente até a região do platô de plastificação e nenhuma comparação pôde ser feita na região de adensamento da espuma.

Além dos modelos propostos por Sherwood e Frost (1992) e Neilsen et al. (1987 e 1995), foram também implementados computacionalmente os modelos elasto-plástico adaptado e o modelo de espuma compactável (*crushable foam model*) (Wellman, 1985). O primeiro foi adaptado para espumas a partir de modelos para materiais metálicos dúcteis, e o segundo foi desenvolvido para espumas, solos, rochas e demais materiais porosos que apresentem deformação volumétrica quando submetidos à compressão.

Wellman (op. cit.) conduziu um estudo para validação destes modelos, no qual, em uma primeira etapa, resultados de simulações numéricas utilizando estes modelos foram comparadas com resultados de ensaios com corpos de prova de espuma de poliuretano confinados e não confinados. Numa segunda fase, foram comparados os resultados de análise numérica e de ensaios de impacto de embalagens com amortecedores de impacto. As principais conclusões de Wellman foram:

- O modelo de espuma compactável é o mais adequado no caso de espumas confinadas em envoltório metálico;
- Para que o modelo elasto-plástico descreva adequadamente o comportamento de espumas confinadas, o envoltório deve ser desconsiderado na análise;
- Uma boa aproximação foi obtida entre os resultados dos ensaios de queda-livre em escala reduzida e a simulação numérica. Os parâmetros de comparação foram o recalque do amortecedor e a desaceleração da embalagem.

Um outro modelo constitutivo para espumas foi proposto por Sinha et al. (Sinha et al, 1994, apud Carruthers,1997), no qual um análogo mecânico constituído de molas, placas com atrito e mecanismos de travamento simula a resposta da espuma (Figura 11). É feita uma aproximação linear por partes da curva tensão-deformação experimental, na qual os trechos correspondentes à fase elástica, ao platô de plastificação e à região de adensamento são simulados por retas, o mesmo sendo feito, no caso de espumas flexíveis, para a fase de descarregamento (para maior precisão, esta fase é aproximada por três retas) (Figura 12). Sendo o modelo construído de tal maneira que somente a *mola A* atue na fase elástica, a *mola B* seja ativada na fase da plastificação – sobrepondo seu efeito ao da mola A – e a *mola C* apenas na última fase do carregamento, somando-se às anteriores, e considerando-se ainda que as tensões e deformações nos pontos de transição entre as fases – σ_t , σ_{z1} , σ_{max} , ε_t , ε_{z1} e ε_{max} – sejam conhecidas experimentalmente, podem-se determinar as *constantes de mola* E_a , E_b e E_c que, na verdade, descrevem a resposta da espuma ao longo de sua trajetória de deformação.

O modelo foi testado por Sinha et al. (1994) para uma espuma de poliuretano de massa específica 117 kg/m^3 , tendo sido reportado um erro em termos de energia específica absorvida entre 9 e 10%. Mesmo não sendo um modelo muito preciso, apresenta uma vantagem importante sobre a maioria das demais formulações, qual seja, a sua capacidade de simular a fase de descarregamento da espuma. Esta particularidade não é relevante no caso das espumas rígidas, mas o é para as espumas flexíveis, para as quais muitas vezes se deseja conhecer o comportamento após vários ciclos completos de trabalho.

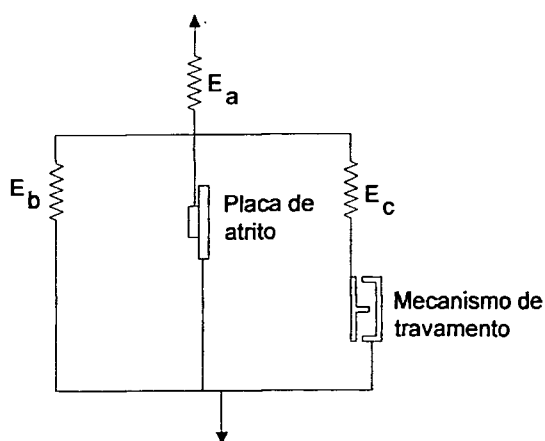


Figura 11. Análogo mecânico para espumas (Sinha, op. cit.).

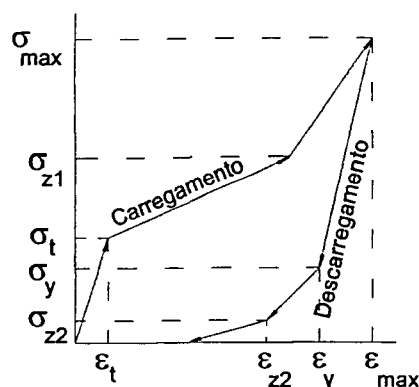


Figura 12. Curva tensão-deformação gerada pelo modelo de análogo mecânico (Sinha, op. cit.).

Finalmente, Chang et al. (1998) propuseram um modelo que permite estabelecer-se equações constitutivas aplicáveis a espumas usadas na indústria automobilística, principalmente como enchimento de pára-choques e de apoio para cabeça em bancos de veículos. Em virtude do regime de trabalho postulado – envolvendo impactos e grandes deformações –, o modelo foi desenvolvido de maneira a descrever adequadamente espumas com as seguintes características: alta compressibilidade, sensibilidade à taxa de deformação e baixo coeficiente de Poisson.

Os autores utilizaram um modelo proposto originalmente para descrever o comportamento visco-plástico de metais (Bodner, 1975, apud Chang et al, op. cit.) e o adaptaram para espumas. Esta abordagem foi utilizada porque foi observada uma similaridade marcante entre a forma das curvas tensão-deformação para metais, descritas por este modelo, e para espumas, descritas por modelos anteriores [por exemplo, Rush (1971), Sinha (1994) e Sherwood e Frost (1992)]. Como esta similitude foi observada somente até o final da região de platô de plastificação (Figura 7), foi acrescentado um termo não linear que considerasse o fenômeno do adensamento, que ocorre na última fase do processo de compressão dos materiais celulares. O modelo foi então implementado numericamente (o algoritmo desenvolvido não é explicitado por Chang et al.).

Para validar seu modelo, Chang et al. submeteram um tipo de espuma de poliuretano (usada em pára-choques) e outro de espuma de polipropileno

(usada em apoio para cabeça) a ensaios de compressão executados a diversas velocidades e compararam estes resultados com as soluções numéricas, encontrando boa correlação entre eles.

2.5 Programas experimentais para caracterização de materiais celulares

Paralelamente ao desafio de estabelecer modelos matemáticos que descrevessem com precisão o comportamento dos materiais celulares, outra grande linha de investigação absorveu – e continua absorvendo – os esforços dos pesquisadores da área. Trata-se da caracterização estrutural desses materiais por meio de programas de ensaios em laboratório que permitam a determinação inequívoca de todos os parâmetros que têm influência em sua resposta aos mais diversos tipos de solicitações a que sejam submetidos.

Hepburn (1997) considera que qualquer combinação entre as propriedades listadas na Tabela 2 pode ser relevante de acordo com a aplicação desejada:

Tabela 2. Propriedades relevantes para projeto com materiais celulares (Hepburn, 1997)

Propriedade	Unidade
Massa específica, μ	Mg/m ³
Módulo de elasticidade, E	GPa
Limite de escoamento/fratura, σ_y	MPa
Tenacidade à fratura, K_{IC}	MPa m ^{1/2}
Taxa crítica de liberação de energia, G_{IC}	J/m ²
Coeficiente de amortecimento, η	-
Condutividade térmica, λ	W/m K
Difusividade térmica, a	m ² /s
Calor específico volumétrico, C_p	J/m ³ K
Coeficiente de expansão térmica, α	1/K

Alguns estudos foram conduzidos com apenas um tipo de material, ao passo que outros procuraram fazer comparações do mérito entre vários materiais candidatos a uma aplicação específica. Outros visavam ainda a formação de banco de dados de materiais.

Na Alemanha, Wieser e Masslowski (1983) investigaram quatro tipos de madeira (balsa, abeto, pinho e carvalho), um aglomerado de fibras vegetais (denominação comercial, *Celotex*), uma espuma fenólica, a vermiculita e a argamassa expandida como materiais com potencial interesse para uso como enchimento de amortecedores de impacto. Foi estudada, para cada material, a correlação entre energia específica absorvida e deformação, por meio de ensaios de compressão estáticos e dinâmicos. A influência da restrição lateral introduzida pelo molde metálico externo do amortecedor foi avaliada por meio de ensaios triaxiais, nos quais corpos de prova foram encamisados em tubos metálicos rígidos.

Ainda na Alemanha, Diersch et al. (1994) realizaram estudos sobre o uso do abeto como amortecedor de impacto em embalagens para elementos combustíveis irradiados. Por meio de ensaios de impacto, com corpos de prova livres e encamisados e segundo diferentes orientações das fibras da madeira, foi determinado o comportamento desta espécie de madeira à compressão dinâmica. Os parâmetros levantados foram utilizados então em análises numéricas pelo método dos elementos finitos, sendo os resultados obtidos comparados com ensaios reais conduzidos para a embalagem estudada – embalagem MOSAIK II/15. As grandezas de controle nesta intercomparação foram a duração do impacto, a deformação final do amortecedor e o perfil de aceleração durante o impacto.

Outro programa de pesquisa enfocando a madeira como material para amortecedores foi desenvolvido por Cramer et al. (1996), nos Estados Unidos. Observando que até então não havia nenhum modelo constitutivo que descrevesse o comportamento da madeira após o regime elástico, ainda mais sob campos de tensão complexos, os autores realizaram uma extensa série de ensaios de esmagamento triaxial⁶ em corpos de prova de sequóia (do tipo *redwood*), com o objetivo de: i) construir curvas tensão-deformação para carregamentos triaxiais; ii) avaliar a capacidade dos modelos constitutivos existentes em descrever o comportamento da madeira, incluindo nesta avaliação

⁶ Neste caso, o estado triaxial de tensões foi obtido comprimindo-se os corpos de prova longitudinalmente por um pistão hidráulico, ao mesmo tempo em que sua expansão lateral era restringida por meio de placas espessas rigidamente conectadas à estrutura do equipamento de ensaio.

os critérios de falha propostos; iii) levantar informações visando posterior desenvolvimento de modelos constitutivos plásticos para madeiras; e iv) avaliar a influência da taxa de deformação sobre a capacidade de absorção de energia da madeira. Os corpos de prova foram testados em diferentes condições de temperatura, mas a umidade foi mantida constante em todos os ensaios. A influência da direção das fibras no comportamento da madeira também foi pesquisada, retirando-se corpos de prova em diferentes ângulos com relação ao sentido de crescimento da árvore.

As espumas poliméricas, especialmente a de poliuretano, também foram extensivamente estudadas. Maji et al. (1995) realizaram uma campanha de ensaios com espumas de poliuretano rígidas de células fechadas, na qual amostras de várias densidades foram submetidas a ensaios de compressão uniaxial, hidrostáticos e triaxial (o estado triaxial de tensões foi obtido conforme descrito na nota de rodapé 5, pg. 36). A taxa de deformação em cada tipo de ensaio foi variada, para se estudar seu efeito sobre a resposta do material.

Outro programa de ensaios para caracterização de espuma de poliuretano foi feito por Wenski et al. (1997), dentro do escopo do desenvolvimento de uma embalagem para armazenamento e futuro transporte de rejeitos nucleares militares contaminados com plutônio. Foram testados cinco tipos de espumas de poliuretano de três fornecedores diferentes, para levantamento das seguintes propriedades térmicas e mecânicas: 1) condutividade térmica a várias temperaturas; 2) calor específico a 60 °C; 3) curvas tensão-deformação, à temperatura ambiente e a 60 °C; 4) análise termogravimétrica (para determinação da temperatura de decomposição); 5) propriedades de intumescência; e 6) medida da formação de carvão.

Uma contribuição vinda de Israel foi dada por Ramon et al. (1994), que procuraram levantar os méritos e as limitações de dois tipos de ensaios de compressão dinâmicos para espumas poliméricas: o ensaio de queda-livre de peso e o ensaio de impacto programável. No primeiro, um peso é simplesmente liberado de uma altura determinada sobre o corpo de prova, ao passo que o segundo é realizado em um equipamento (*shock tester*) que permite um controle refinado do perfil de velocidades durante o impacto, feito por meio de controladores adequados. Na campanha de ensaios apresentada, foram testados três tipos de espumas de poliuretano, uma espuma de polietileno e uma de

poliestireno. A conclusão desse trabalho é que, dependendo das tensões geradas, um tipo de ensaio é mais preciso do que o outro.

Um outro estudo foi realizado por Goods et al. (1997) para a caracterização de uma espuma confeccionada a partir de uma formulação nova, denominada sistema CRETE (sigla não explicitada na referência consultada). Nesta espuma, um dos principais componentes anteriormente usados – diisocianato de tolueno –, produto suspeito de ser causador de câncer em seres humanos, foi substituído por outro não cancerígeno, sendo necessário portanto conhecerem-se as propriedades da nova espuma. A campanha de ensaios realizada consistiu nos ensaios de tração e compressão uniaxiais a baixa velocidade e ensaios de impacto com amostras de massa específica entre 170 e 420 kg/m³. Uma conclusão singular deste estudo é que a capacidade de absorção de energia dessa espuma durante o impacto cresce monotonicamente com a densidade até atingir um valor máximo para a massa específica de 350 kg/m³, a partir do qual este valor decresce com o aumento da densidade.

O fabricante de espumas de poliuretano GENERAL PLASTICS, dos Estados Unidos, conduziu um exaustivo programa de caracterização de sua linha de espumas rígidas recomendadas para aplicações em embalagens para transporte de materiais nucleares – LAST-A-FOAM FR-3700 (GENERAL PLASTICS, 1993), no qual foram realizados ensaios térmicos, de impacto e de compressão uniaxial. Os ensaios térmicos objetivaram avaliar a resistência dessa espuma ao fogo e, conseqüentemente, estimar-se o grau de proteção oferecido pela espuma. Segundo o fabricante, esta proteção provém tanto da própria formulação química da espuma, que agrega retardantes de fogo, quanto da maneira como se forma o carvão gerado durante sua queima. Ao degradar-se pela ação do fogo, o material sofre um processo de inchamento, que, no caso de amortecedores de impacto com casca externa metálica, dificulta a penetração de oxigênio para o interior do componente, favorecendo a extinção do fogo. Nos ensaios de impacto e de compressão uniaxial a baixa velocidade, para determinação das propriedades mecânicas das espumas, foram ensaiadas

espumas de massa específica entre 50 e 680 kg/m³, nas direções paralela e perpendicular ao crescimento da espuma⁷.

Zhang (1998) conduziu um programa experimental para caracterizar o comportamento dinâmico das espumas poliméricas usadas no interior de automóveis para absorção de energia e como material de simulação de tecidos moles em manequins para ensaios de impacto durante acidentes. Foram testadas as espumas de polipropileno, de poliestireno e de poliuretano, em duas densidades diferentes. Os ensaios realizados foram de tensão e compressão uniaxiais, cisalhamento simples e compressão hidrostática, em várias velocidades, caracterizando situações de solicitação estática e dinâmica.

Outro tipo de material celular pesquisado é a colméia de alumínio. Doman (1993) estudou o comportamento deste material por meio de ensaios de compressão estáticos e dinâmicos em corpos de prova de duas espessuras diferentes e por meio de ensaios de queda-livre de protótipos de embalagens em escala 1/4. O objetivo desse estudo foi o desenvolvimento de um modelo analítico para predição dos esforços desenvolvidos durante a queda de uma embalagem de 120 t destinado ao transporte de elementos combustíveis irradiados.

Entre os programas de desenvolvimento comparativos, destaca-se aquele conduzido por Hammond e Carley (1998), no qual foi compilada vasta informação sobre os seguintes materiais celulares: i) espumas (flexíveis, rígidas poliméricas ou metálicas e frágeis); ii) estruturas tipo colméia; iii) madeira; iv) estruturas de aço tubulares ou ocas.

Outro estudo comparativo abrangente foi conduzido por Duffey et al. (1992). Nesse trabalho de investigação, corpos de prova de colméia de alumínio, a espuma de poliuretano e a espuma de alumínio foram submetidas a ensaios mecânicos e térmicos e os resultados obtidos computados de maneira que a seleção fosse feita pelos critérios de volume mínimo e peso mínimo, restrições normalmente impostas às embalagens de transporte.

⁷ As espumas poliméricas expandem-se consideravelmente durante a reação química que ocorre durante sua confecção. Se esta expansão é restringida em duas direções – por exemplo, dentro de uma forma rígida –, estas são referidas como "perpendiculares" ao crescimento e a direção livre é denominada "paralela ao crescimento" da espuma. Esta terminologia, amplamente empregada na literatura da área, é empregada nesta tese.

As espumas metálicas, como a espuma de alumínio pesquisada no trabalho de Duffey et al. – e mostrada na Figura 5 (b), p. 25 – podem ser produzidas por diferentes métodos (Gibson, 1988). Um deles consiste na mistura, sob atmosfera inerte, do metal derretido com esferas de material orgânico (por exemplo, carvão) e, após o esfriamento e conseqüente solidificação do metal, o carvão é calcinado, resultando então em um material celular metálico de células abertas. O tamanho das esferas irá determinar o tamanho médio das células da espuma. Em outro método, infiltra-se o metal derretido através dos poros de um leito de esferas cerâmicas ou de carvão, o qual é lixiviado após o esfriamento do metal. Um terceiro método consiste em perfurar-se chapas metálicas segundo um arranjo denso de orifícios e, em seguida, dobram-se as chapas perfuradas sucessivamente, soldando-se os pontos de contato.

Os ensaios mecânicos realizados por Duffey et al. foram o ensaio compressão a baixa velocidade (taxa de deformação inicial: $\sim 3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) e ensaio de impacto (taxa de deformação inicial $30\text{--}40 \text{ s}^{-1}$). Os corpos de prova de espuma de poliuretano foram testados com e sem confinamento lateral. Para cada material, foram testados corpos de prova de baixa e alta densidade. Outra condição observada foi que a capacidade de absorção de energia foi computada somente até o início do adensamento do material, uma vez que não é interessante que os amortecedores trabalhem dentro desta faixa, por causa dos altos esforços transmitidos aos componentes protegidos.

As principais conclusões dos autores com relação aos ensaios mecânicos foram:

- para todos os materiais, tanto de baixa quanto de alta densidade, os corpos de prova absorveram mais energia durante o ensaio de impacto do que durante o ensaio de compressão estático. A espuma de poliuretano absorveu quase o dobro da energia, enquanto para a colméia de alumínio e a espuma de alumínio o aumento foi da ordem de 10%;
- pelo critério do peso mínimo, a colméia de alumínio é o material superior, ao passo que, no critério de volume mínimo, é observada grande superioridade da espuma de poliuretano de alta densidade;
- a espuma de alumínio é inferior nos dois critérios usados.

Os ensaios térmicos conduzidos levaram à conclusão, já esperada, de que a espuma de poliuretano oferece melhor proteção em caso de acidentes envolvendo fogo. Os outros dois materiais apresentaram desempenho bem inferior, ficando a espuma de alumínio um pouco mais bem situada neste quesito, quando comparada com a colméia de alumínio. A conclusão geral da pesquisa é que, sob o ponto de vista do desempenho global, a espuma de poliuretano – pelo menos a de alta densidade – apresenta desempenho superior como material de amortecimento de impactos.

Um terceiro estudo comparativo foi conduzido por Maji et al. (s.d.), desta vez envolvendo espuma de poliuretano e colméia de alumínio. Como no programa de Duffey (op. cit.), corpos de prova foram submetidos a ensaios de compressão a baixa velocidade e ensaios de impacto, estes últimos com taxas de deformação de 1 s^{-1} e 100 s^{-1} . Foram testados corpos de prova de diferentes densidades, com e sem confinamento lateral, tendo sido determinadas e comparadas as curvas tensão-deformação para cada caso.

Os resultados obtidos para a espuma mostraram uma marcada dependência da resposta dinâmica deste material à taxa de deformação. Assim, os valores de tensão de pico e tensão de platô foram maiores no ensaio de compressão dinâmico a 100 s^{-1} e menores no ensaio estático (as espumas de maior densidade não apresentaram tensão de pico mensurável em alguns ensaios). Devido a problemas durante a medição das deformações, não foi possível quantificar o efeito da taxa de deformação sobre a deformação máxima pré-adensamento. Este comportamento é explicado como sendo decorrente da resistência aerodinâmica do fluido no interior das células, que, ao ser comprimido rapidamente, contribui, por meio de um efeito de amortecimento, para a resistência à deformação do material celular.

A colméia de alumínio mostrou um comportamento de mais difícil explicação. Por um lado, a deformação pré-adensamento no ensaio a baixa velocidade foi em média maior do que nos ensaios dinâmicos; por outro, a tensão de platô medida durante o ensaio dinâmico de maior velocidade (100 s^{-1}) e aquela para o ensaio estático foram equivalentes, sendo ambas menores do que os valores observados durante o ensaio à taxa de deformação de 1 s^{-1} . Os autores sugeriram a necessidade de maiores estudos para explicação desse comportamento.

3 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE ESPUMAS POLIMÉRICAS

A abordagem numérico-experimental utilizada no presente trabalho de pesquisa exigiu a integração de diversas tarefas, apresentadas neste capítulo. A etapa inicial é a seleção, entre as diversas opções recolhidas da literatura, do material celular usado nesta tese. Segue-se a seqüência de ensaios laboratoriais para determinação das propriedades do material escolhido.

O terceiro passo é a escolha de um caso exemplo a ser utilizado para comprovação da abordagem metodológica escolhida. Na etapa seguinte, aplica-se um método simplificado para determinação preliminar da densidade do material celular adequada ao caso estudado. O caso é executado no passo seguinte, quando são analisados os efeitos da variação da densidade do material celular sobre os resultados obtidos. A abordagem metodológica é completada com a última etapa, que consiste na simulação numérica do caso exemplo através do método dos elementos finitos.

3.1 Escolha do material celular

A escolha do material celular pesquisado foi feita com base nas informações colhidas na pesquisa bibliográfica realizada e, contemplando sua efetiva utilização futura, nos aspectos de custo e disponibilidade no mercado interno, além do aspecto ambiental

Para aplicações como o estudo de caso aqui desenvolvido, os principais materiais referenciados na literatura foram a madeira (maciça e aglomerada), a espuma de poliuretano, as espumas metálicas, a colméia de alumínio, o concreto leve e a cortiça. Os dois materiais naturais, madeira e cortiça, apresentam uma característica intrínseca indesejável, qual seja, são materiais combustíveis que se degradam rapidamente em contato com o fogo. As espumas e colméias metálicas – confeccionadas principalmente de alumínio – não se degradam sob altas temperaturas mas, ao mesmo tempo, são isolantes térmicos deficientes, o que é uma desvantagem para proteção térmica de embalagens na área nuclear. Além disso, não são confeccionados no Brasil, sendo seu alto custo uma desvantagem frente a outras opções. O concreto leve, que pode ser obtido através da adição de algum agente expensor (por exemplo,

alumina) ou pela substituição de um de seus componentes por componentes mais leves, em geral um material celular (pérolas de poliestireno expandido ou argila expandida), não apresentou, de acordo com o levantamento efetuado, muita variação em sua capacidade de absorção de energia (COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 1985), o que torna sua utilização menos flexível em um processo de otimização estrutural.

À luz do exposto, a espuma de poliuretano foi escolhida como o material a ser pesquisado.

3.1.1 Características básicas dos polímeros e das espumas poliméricas

Conforme mencionado anteriormente (seção 2.3, p. 25), os materiais celulares – e, entre eles, as espumas poliméricas – são formados por células de algum material base conectadas entre si, de maneira a formar um corpo espacial coeso e com estabilidade estrutural. Suas propriedades de interesse enquanto material estrutural – como densidade, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, tensão de ruptura, energia específica absorvida, coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica, calor específico – dependem tanto das propriedades intrínsecas do material base quanto dos parâmetros e características de sua estrutura geométrica. Sobre estes últimos, já se discorreu de maneira geral na seção citada; nesta seção, apresentam-se informações mais detalhadas sobre o material celular escolhido – espuma de poliuretano à base de óleo de mamona – e, dentro do interesse da pesquisa aqui descrita, informações complementares sobre o material base que o constitui, o polímero.

Os polímeros são formados por cadeias moleculares longas (ou macromoléculas) e suas propriedades estão muito relacionadas com a própria constituição destas macromoléculas e com a forma como elas interagem entre si. As ligações existentes nos polímeros são denominadas *primárias*, responsáveis pela própria formação das cadeias poliméricas e *secundárias*, aquelas que promovem ligações entre essas cadeias e conferem aos polímeros uma certa estrutura cristalina. Dependendo da natureza e preponderância de suas ligações, polímeros podem existir nos seguintes estados: i) amorfo, caracterizado por um arranjo desordenado das macromoléculas; ii) parcialmente cristalino; e iii) cristalino. Muitos dos polímeros, naturais ou sintéticos, apresentam algum grau de cristalinidade, geralmente medido em porcentagem, observando-se que

praticamente não existem polímeros totalmente cristalinos. Quanto maior for a cristalinidade, maiores serão a densidade, a rigidez e as resistências mecânica, térmica e a solventes. As regiões não cristalinas do polímero contribuem para a elasticidade, a maciez e a flexibilidade. A cristalinidade e a orientação afetam, em certas direções, a rigidez e resistência à tração, que aumentam com o aumento daquelas propriedades, surgindo daí a anisotropia, não apenas nas propriedades mecânicas, como também na resistência a solventes, que penetram mais facilmente em regiões amorfas e ortogonalmente à direção da orientação das cadeias poliméricas (Hall, 1989, Hearle, 1982 e Gibson e Ashby, 1988).

De maneira semelhante aos metais, também os polímeros sofrem alterações em sua estrutura cristalina em função da temperatura. Em virtude da complexidade de suas cadeias moleculares e das ligações entre elas, os polímeros podem se apresentar em um número mais variado de estados físicos, quais sejam, sólido vítreo, sólido cristalino, estado de borracha ou líquido viscoso. Em um polímero em estado de líquido viscoso, por exemplo, as cadeias moleculares possuem grande mobilidade e podem deslizar umas entre as outras; quanto maior a temperatura, maior será a mobilidade entre as cadeias. Por outro lado, a uma temperatura suficientemente baixa, a molécula polimérica apresenta menos mobilidade mas pode se estabilizar em um estado caótico e desordenado, constituindo o estado vítreo. Se elas se ajustam de tal maneira que as atrações intermoleculares estabilizem as cadeias em uma rede regular, o polímero adquire uma estrutura cristalina.

Define-se, então, para os polímeros a *temperatura de transição vítrea* T_g como sendo aquela em torno da qual o material muda de comportamento, passando do estado sólido (para temperaturas abaixo de T_g) para o estado de borracha e líquido viscoso (Gibson e Ashby, 1988). A variação do módulo de elasticidade com a temperatura para um polímero amorfo de cadeia linear, desde o estado sólido vítreo até o estado de líquido viscoso é apresentada na Figura 13.

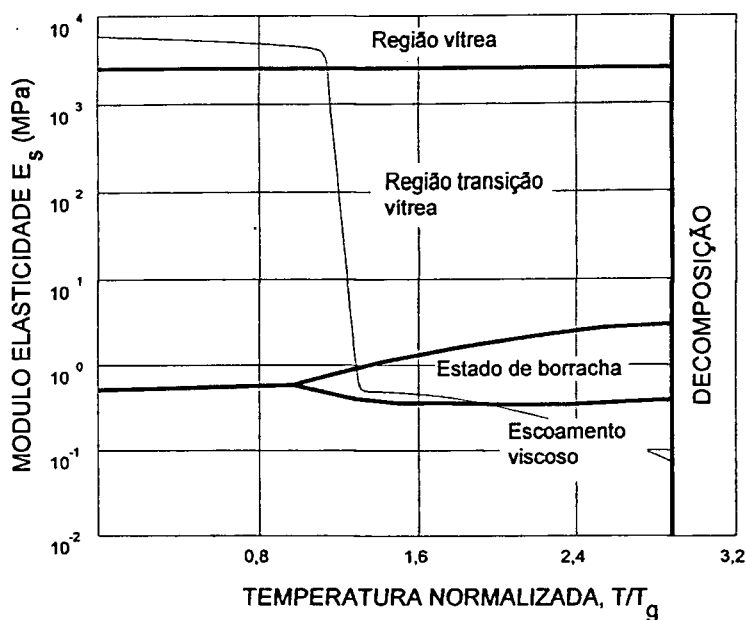


Figura 13. Variação de E_s de um polímero com a temperatura (Gibson e Asbhy, 1988).

Os polímeros podem ser divididos, segundo classificação já consagrada (Gibson e Ashby, 1988, Hall, 1989), em *termoplásticos*, *termorrígidos* e *elastômeros*. O conceito de termoplástico é aplicado a materiais que se tornam mais macios e escoam devido à aplicação de uma pressão ou sob aquecimento. Dessa forma, os materiais termoplásticos podem ser remodelados diversas vezes, embora a ocorrência de degradação química possa eventualmente limitar o número de ciclos de remodelagem. A vantagem óbvia é que uma peça que é quebrada ou rejeitada após o modelamento pode ser aquecida e remodelada. A desvantagem é que há uma temperatura limite de utilização do material, acima da qual ele não pode ser usado como elemento estrutural. A fluidez que os termoplásticos apresentam é devida à presença de ligações secundárias entre as cadeias poliméricas. Os representantes mais conhecidos desta categoria são o acrílico, polietileno, poliestireno, nylon, PVC e PET, este último muito utilizado atualmente para fabricação de vasilhames.

O conceito de termorrígido é aplicado a materiais que, uma vez aquecidos, reagem irreversivelmente e aplicações posteriores de calor e pressão não os fazem tornar-se mais macios ou escoar. Nesse caso, uma peça já moldada não poderá ser remodelada. A termorrigidez é decorrente da formação

de ligações cruzadas entre as cadeias das moléculas. Nesta categoria estão o epóxi, poliéster e poliuretano.

Existem, finalmente, os elastômeros, que diferenciam-se dos dois tipos anteriores por ter uma temperatura de transição vítrea inferior à temperatura ambiente. A borracha natural e borrachas sintéticas (butil, neoprene, silicone) pertencem a esta categoria. Os elastômeros têm comportamento elástico à temperatura ambiente mesmo quando submetidos a enormes deformações, mesmo da ordem de 500%.

3.1.2 Espuma de poliuretano à base do óleo de mamona

Dentre as formulações de espuma de poliuretano existentes comercialmente, foi escolhida a espuma obtida a partir do óleo de mamona, confeccionada a partir de fonte renovável e que, ao contrário da espuma proveniente da indústria petroquímica, não necessita da presença do gás CFC – clorofluorcarbono –, danoso à camada de ozônio na atmosfera, como agente de expansão (POLY-URETHANE, 2001). O material escolhido é confeccionado no Brasil, encontrando-se disponível a baixo custo e para pronta entrega, fatores importantes para sua seleção como material a ser estudado nesta pesquisa. Sendo oferecido em várias densidades, suas propriedades de interesse, como capacidade de absorção de energia, tensões de trabalho e módulo de elasticidade, apresentam amplo espectro de variação, conforme será apresentado no Capítulo 4.

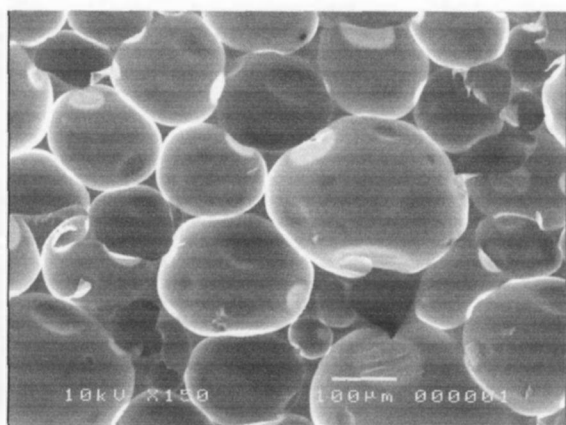
A espuma de poliuretano é obtida pela reação química controlada entre dois componentes, um contendo isocianato e o outro polioli. A mistura obtida da mistura dos componentes rapidamente adquire aparência cremosa e, absorvendo o ar atmosférico, sofre rápida expansão, podendo aumentar de volume em até 40 vezes. É necessário o emprego de um sistema de mistura eficiente, uma vez que o tempo de reação inicial é de apenas entre 20 e 30 segundos e toda a reação se completa em aproximadamente dois minutos. No caso do material estudado neste trabalho, a formulação do componente que contém o polioli pode ser variada de maneira a se obter espumas de densidades diferentes, sendo que a faixa de densidades oferecidas comercialmente varia entre 25 e 200 (o componente contendo o isocianato é idêntico em todos os casos). Essas densidades, contudo, podem variar bastante, caso a expansão livre da espuma seja restringida. Como

se verá adiante (seção 3.2.1, p. 57), foram obtidas para esta pesquisa espumas com massa específica de até 361 kg/m^3 .

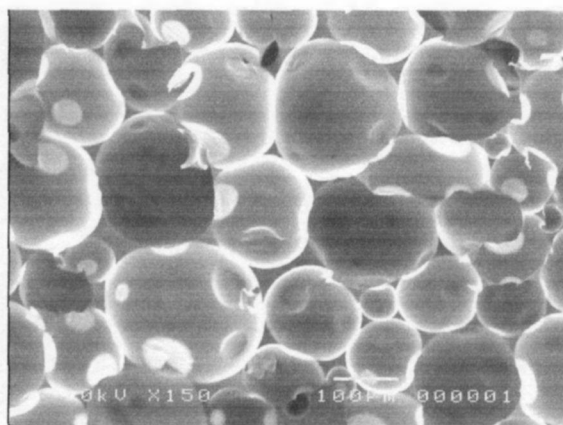
Independentemente do emprego da técnica de restrição da expansão, outros fatores podem afetar a densidade final do produto, devendo, portanto, ser mantidos sob controle durante o processo de confecção da espuma. A temperatura da mescla e do molde e a qualidade de mistura entre os dois componentes são os parâmetros mais críticos e devem merecer especial atenção, existindo no mercado equipamento especializado para aplicação de espuma de poliuretano com controle automático dos parâmetros de mistura.

A microestrutura da espuma estudada neste trabalho de pesquisa é mostrada nas Figs. 14 e 15. Observa-se, na Figura 14, que as células têm a forma esférica e conectam-se com várias de suas vizinhas. Para espuma mostrada, com massa específica de 165 kg/m^3 , o tamanho médio das células pode ser estimado em aproximadamente $150 \mu\text{m}$. Comparando-se as imagens das Figuras 14 (a) e (b), constata-se que, pelo menos para esta massa específica, o formato das células não varia com a direção de crescimento da espuma.

Na Figura 15 é feita uma comparação entre o tamanho das células de espumas de várias densidades. Conforme observado anteriormente, quanto maior a densidade da espuma, menor o tamanho médio de suas células.

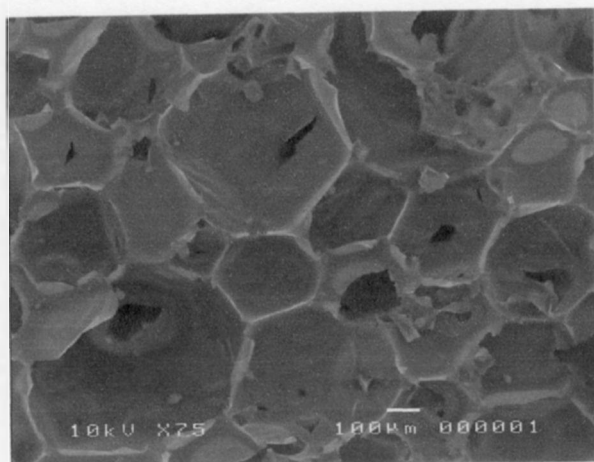


(a) Direção paralela

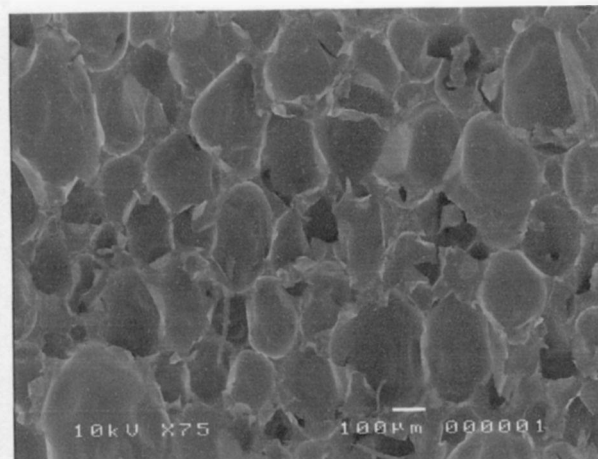


(b) Direção perpendicular

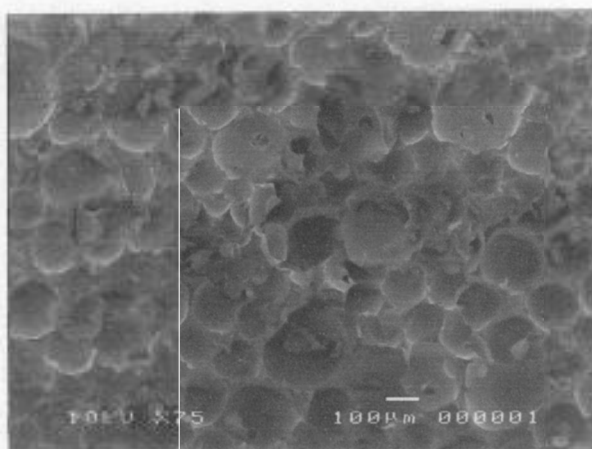
Figura 14. Microestrutura da espuma usada, massa específica 165 kg/m^3
(imagens obtida no Laboratório de Metrologia do CDTN)



(a) Massa específica 44 kg/m^3 ,
 $\bar{\phi} = 600 \mu\text{m}$



(b) Massa específica 110 kg/m^3 ,
 $\bar{\phi} = 250 \mu\text{m}$



(c) Massa específica 220 kg/m^3 , $\bar{\phi} = 210 \mu\text{m}$

Figura 15. Variação do diâmetro médio das células, $\bar{\phi}$, com a densidade (imagens obtidas no Laboratório de Metrologia do CDTN)

3.2 Caracterização experimental do material escolhido

Para os objetivos deste trabalho, a completa caracterização estrutural da espuma de poliuretano pôde ser obtida pela determinação de sua trajetória de deformação quando submetida a esforços compressivos uniaxiais de baixa e alta taxas de deformação e a carregamentos hidrostáticos. Os parâmetros importantes determinados foram o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, capacidade de absorção de energia, módulo de expansão volumétrica, tensão de pico, tensão de platô e deformação máxima de platô (antes do início do adensamento).

O programa experimental consistiu de ensaios de compressão uniaxial a baixa velocidade, compressão hidrostática e de impacto. Os dois primeiros foram realizados em máquina universal de tração e o último em instalação para ensaio de impacto vertical, ambas localizadas no laboratório de ensaios mecânicos do Serviço de Integridade Estrutural do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, em Belo Horizonte.

As amostras foram elaboradas como se segue. Foi preparada uma mistura adequada entre os dois componentes (contendo, respectivamente, o isocianato e o polioli), a qual foi vertida em uma forma de madeira com estrutura de reforço metálica, provida de sistema de fechamento rápido, de dimensões internas 210x135x180 mm. A quantidade de material usado variou em virtude da densidade desejada, lembrando-se que a restrição à livre expansão da espuma provoca o aumento da densidade do bloco.

Uma vez vertida na forma, a mistura sofreu rápida expansão na direção vertical, ocupando em poucos segundos todo o volume da forma. Conforme destacado anteriormente, esta direção foi denominada neste trabalho *paralela ao crescimento* da espuma, sendo as direções ortogonais denominadas *perpendiculares ao crescimento*.

3.2.1 Ensaio de compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado de acordo com a norma ASTM-D-1621, *Compressive strength of rigid cellular plastics* (ASTM, 1990a) (este ensaio é também padronizado pela norma brasileira ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983). Os corpos de prova eram blocos de seção transversal quadrada de 50 mm de lado e altura de 60 mm. A fim de estudar-se a variação das propriedades do material com a densidade, foram ensaiados corpos de prova com densidades que permitissem um tratamento estatístico adequado dos parâmetros obtidos, tornando significativas as interpolações e extrapolações feitas. Assim, foram ensaiadas espumas com as seguintes massas específicas: 41, 60, 87, 147, 253 e 326 kg/m³.

Desejou-se também conhecer a influência da taxa de deformação sobre a resposta dessa espuma. Para isso, foram realizados ensaios com três taxas de deformação, a saber, $\dot{\epsilon} = 1,4 \times 10^{-3}$, $5,6 \times 10^{-3}$ e $1,4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,

correspondentes às velocidades da máquina de ensaios de 5, 20 e 50 mm/min. Por fim, para avaliar-se o grau de anisotropia da espuma, foram testadas amostras retiradas nas direções paralela e perpendicular ao crescimento da espuma. Na Tabela 3 é apresentada a quantidade de corpos de prova submetidos a este ensaio, de acordo com a taxa de deformação e tipo de amostragem segundo a direção de crescimento da espuma.

Tabela 3. Corpos de prova para ensaio de compressão uniaxial

Massa específica (kg/m ³)	Taxa de deformação (s ⁻¹)	Quantidade corpos de prova	
		Direção paralela	Direção perpendicular
41	1,4x10 ⁻³	-	1
	5,6x10 ⁻³	1	1
	1,4x10 ⁻²	3	1
60	1,4x10 ⁻³	1	1
	5,6x10 ⁻³	-	2
	1,4x10 ⁻²	-	2
87	1,4x10 ⁻³	2	1
	1,4x10 ⁻²	3	3
147	1,4x10 ⁻³	-	2
	5,6x10 ⁻³	-	2
	1,4x10 ⁻²	2	-
253	1,4x10 ⁻³	1	1
	5,6x10 ⁻³	1	1
	1,4x10 ⁻²	1	1
326	1,4x10 ⁻³	2	-
	5,6x10 ⁻³	-	1
	1,4x10 ⁻²	-	3

Em todos os casos, evitou-se retirar amostras próximas às superfícies do bloco, uma vez que a espuma apresenta alterações nestas regiões, principalmente de densidade e forma de célula, que podem comprometer a qualidade dos resultados dos ensaios realizados (Menges e Knipschild, 1982).

As curvas dos ensaios de compressão uniaxial, obtidas como *Força x Deslocamento*, produzidas diretamente em papel, foram processadas

numericamente para se obter curvas *Tensão x Deformação* na forma de arquivos digitais. Este processamento envolveu a digitalização das curvas e sua inserção no programa gráfico AutoCAD (AUTODESK, 1999), sendo feita a superposição da curva do ensaio por uma curva suavizada (tipo *spline*), seguido de seu escalonamento para se obter a proporção exata entre tensão e deformação. Em seguida, foi feita a conversão dos pontos x-y da curva para a forma de tabela, que foi inserida no programa ORIGIN (MICROCAL, 1999), onde foram obtidos os parâmetros de interesse.

3.2.2 Ensaio hidrostático

Não se encontrou na literatura consultada nenhuma referência sobre normalização do ensaio de compressão hidrostático. Adotou-se neste trabalho o método seguido por Zhang (1998), no qual o corpo de prova é colocado em uma câmara de pressão preenchida com água, provida de um pistão com anel de vedação, a qual é colocada na base da máquina de tração universal e seu pistão acionado pelo cabeçote da máquina (Figs. 16 e 17). A deformação volumétrica do corpo de prova é computada através da medição do deslocamento do pistão, uma vez que a área transversal da câmara é conhecida, o que possibilita o cálculo do volume comprimido. Dado que a água é praticamente incompressível – e foi efetivamente realizado um ensaio comprobatório apenas com água no interior da câmara –, toda diminuição do volume interno da câmara se deve à deformação volumétrica do corpo de prova.

Os corpos de prova – idênticos aos usados nos ensaios anteriores – são previamente impermeabilizados, revestindo-os com bolsas de látex para evitar o contato com a água. Antes do fechamento das bolsas, o ar nelas contido é sugado com auxílio de uma bomba de vácuo, para diminuir o efeito pneumático durante a deformação. Foram ensaiadas espumas com massas específicas de 44, 56, 108, 143 e 261 kg/m³, não coincidentes com anteriores, mas igualmente representativas em termos estatísticos (espumas mais densas não foram ensaiadas devido a limitações da câmara usada). As taxas de deformação volumétrica aplicadas foram $1,8 \times 10^{-3}$, $4,5 \times 10^{-3}$ e $9,0 \times 10^{-3}$ s⁻¹, correspondentes às velocidades de cabeçote de 2, 5 e 10 mm/min. Alguns poucos ensaios foram realizados com a taxa de deformação volumétrica de $1,8 \times 10^{-2}$ s⁻¹ (20 mm/min), mas logo percebeu-se que os mecanismos de acionamento da máquina de tração

usada estavam sendo mecanicamente sobrecarregados e esta tentativa foi abandonada. As curvas do ensaio hidrostático foram, como no caso dos ensaios de compressão uniaxial, produzidas em papel, tendo sofrido o mesmo processamento descrito anteriormente. Na Tabela 4 são apresentados informações sobre esse ensaio.

Tabela 4. Corpos de prova para ensaio hidrostático

Massa específica (kg/m ³)	Taxa de deformação volumétrica (s ⁻¹)	Quantidade corpos de prova
44	$1,8 \times 10^{-3}$	1
	$4,5 \times 10^{-3}$	2
	$9,0 \times 10^{-3}$	2
56	$1,8 \times 10^{-3}$	1
	$4,5 \times 10^{-3}$	2
	$9,0 \times 10^{-3}$	2
108	$1,8 \times 10^{-3}$	1
	$4,5 \times 10^{-3}$	2
	$9,0 \times 10^{-3}$	2
143	$1,8 \times 10^{-3}$	2
	$4,5 \times 10^{-3}$	3
	$9,0 \times 10^{-3}$	2
	$1,8 \times 10^{-2}$	1
261	$1,8 \times 10^{-3}$	1
	$4,5 \times 10^{-3}$	2

(ASTM, 1990c e 1990d). Pode-se adicionalmente ensaiar os corpos de prova sob diferentes temperaturas, para pesquisar a influência desse parâmetro sobre as propriedades de interesse.

Contudo, no estudo de caso focado nesta pesquisa, no qual a espuma trabalhará à temperatura ambiente e sofrerá basicamente esforços de compressão, a caracterização oferecida pelos ensaios realizados mostrou-se suficiente e adequada.

3.3 Metodologia simplificada para determinação da densidade ótima da espuma

Em aplicações no campo da engenharia de embalagens, um dos objetivos a se alcançar é um bom equilíbrio entre a necessidade de se absorver e dissipar a energia cinética dos componentes protegidos e, ao mesmo tempo, manterem-se os esforços a eles transmitidos a valores abaixo de limites que lhes causem danos. Trata-se, indubitavelmente, de um problema complexo, pois freqüentemente estão envolvidos grandes deslocamentos, rotações e deformações e superfícies de contato variáveis.

A importância de escolher-se uma espuma polimérica de densidade adequada para determinada aplicação envolvendo impacto pode ser vista na Figura 21, onde curvas *tensão x deformação* para espumas de três densidades diferentes são apresentadas, sendo $\rho_1^* > \rho_2^* > \rho_3^*$. A quantidade de energia absorvida por unidade de volume corresponde à área U abaixo de cada curva até a deformação máxima – ε_1 , ε_2 ou ε_3 . No caso de uma embalagem em queda-livre, U equívale à energia potencial da embalagem dividida pelo volume útil da espuma, V , ou seja, $U = mgh/V$, onde m é a massa da embalagem, g a aceleração gravitacional e h altura de queda. Considerando-se $\sigma_{\max}$ a tensão máxima desejável na espuma – correspondente a um valor de tensão admissível na embalagem protegida – e observando-se que σ_1 e σ_3 são maiores que $\sigma_{\max}$, as espumas de densidades ρ_1^* e ρ_3^* não seriam consideradas aceitáveis. A primeira porque, por ter densidade acima da ideal, provoca tensões excessivas na embalagem antes de absorver toda a energia U , ainda que não sofra adensamento. E a última porque, tendo densidade insuficiente, sofrerá adensamento antes de absorver e dissipar toda a energia disponível e, da mesma

forma, irá transmitir esforços excessivos para a embalagem. A espuma mais adequada para esta aplicação é então aquela cuja tensão de platô seja igual a $\sigma_{\max}$ e que absorva a energia U antes do início do adensamento.

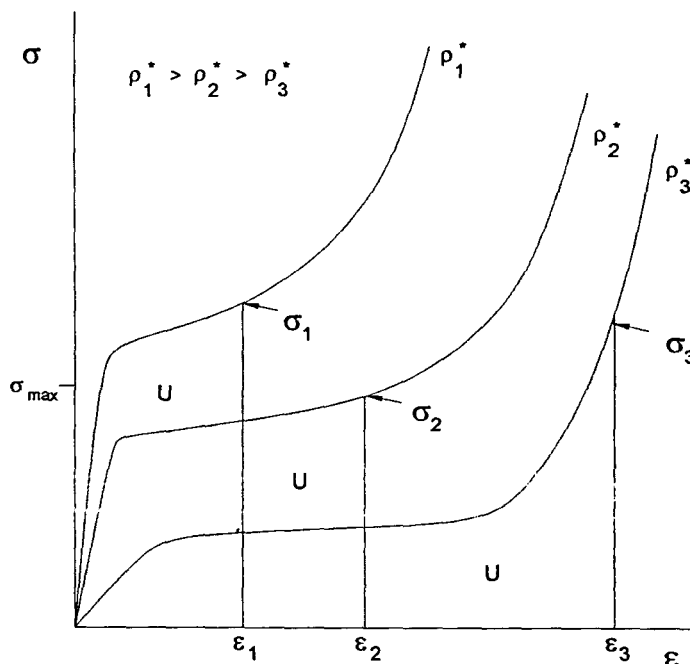


Figura 21. Curvas tensão-deformação típicas para espumas de diferentes densidades

A escolha da espuma mais adequada é, portanto, um processo iterativo. Alguns métodos simplificados para determinação da capacidade de absorção de energia em espuma foram então desenvolvidos como uma primeira aproximação para seleção da densidade ótima.

3.3.1 Métodos simplificados existentes

O método do fator de Janssen (ou fator J) (Woolam, 1968), procura estabelecer a eficiência da espuma com relação a uma espuma ideal, isto é, aquela que pode sofrer deformação em 100% de sua espessura sem fase elástica inicial, encruamento ou adensamento. A premissa do método é que a comparação entre as acelerações máximas desenvolvidas em impactos envolvendo a espuma ideal (a_i) e a real (a_r) é uma medida de quanto o comportamento desta se aproxima da situação ideal. O fator de Janssen é definido como

$$J = \frac{a_r}{a_i}. \quad (16)$$

A desaceleração a_r é determinada experimentalmente por meio de ensaios de impacto, enquanto a_i é calculada pelo balanço energético entre a energia cinética desenvolvida pelo corpo imediatamente antes do impacto e o trabalho realizado para comprimir a espuma, sem considerações de atrito e aumento de temperatura. Considerando-se que um corpo de massa m , protegido por uma espuma ideal de espessura t , sofra um impacto à velocidade v , o balanço de energia até o repouso completo do corpo é tal que

$$\frac{1}{2}mv^2 = ma_i t, \quad (17)$$

de onde se determina a aceleração ideal

$$a_i = \frac{v^2}{2t}. \quad (18)$$

O fator de Janssen é sempre maior do que a unidade, uma vez que a desaceleração máxima desenvolvida pela espuma real é sempre maior que aquela desenvolvida pela espuma ideal, devido à resistência do fluido no interior da espuma, à fase elástica inicial, ao adensamento, ao comportamento visco-elástico das espumas e ao fato de que a espuma real não é deformada em 100% de sua espessura.

Realizando-se ensaios de impacto com diferentes alturas de queda, é possível construir-se uma curva $J-U$ para cada espuma. Woolam observou que todas as espumas testadas apresentaram curva com a forma característica da letra U , sendo o ponto de mínimo a condição de maior eficiência daquela espuma para a aplicação desejada (Figura 22).

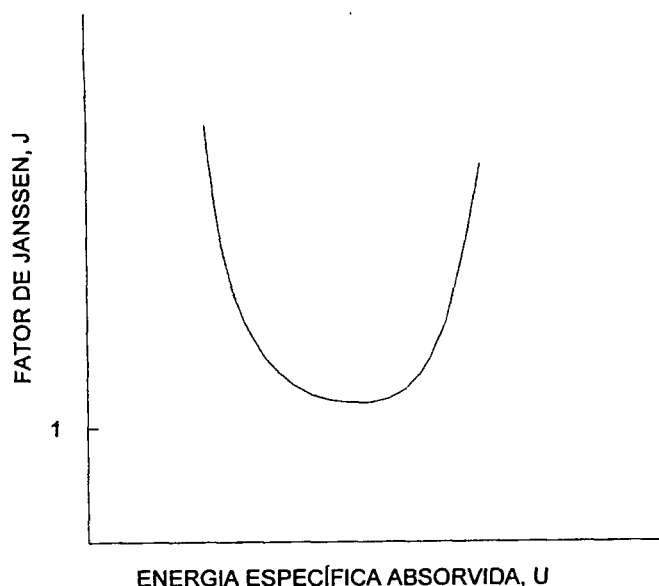


Figura 22. Curva típica do fator Janssen para espumas rígidas

O segundo método simplificado, do *fator de amortecimento* (ou *fator C*) (Gordon, 1974, apud Zhang, 1994), toma como premissa que a eficiência de uma espuma em absorver energia pode ser estimada pela relação entre a energia absorvida por unidade de volume U e a tensão de platô, σ_{pl} . Gordon denominou a relação entre tensão de platô e energia absorvida de *fator de amortecimento*,

$$C = \frac{\sigma_p}{U} \quad (19)$$

e construiu curvas $C-U$ para diversas energias de impacto. As curvas levantadas, à semelhança do método anterior, têm a forma da letra U e o ponto de mínimo correspondente à melhor aplicação para a espuma testada, devendo-se sempre ter em conta que a tensão de platô deve se situar dentro do limite aceitável (para aplicações envolvendo transporte de produtos, geralmente determinam-se os esforços máximos suportados por um item através do cálculo de sua *fragilidade*, como será visto no Capítulo 5. Zhang (1994), ao estudar este método, observou que, no caso de ensaios dinâmicos, os fatores C e J se equivalem, pois, considerando-se novamente um corpo de massa m em queda, com área

horizontal A, protegido por uma espuma de espessura h , que sofra um impacto à velocidade v , e apresente uma desaceleração máxima igual a a_r , tem-se

$$C = \frac{\sigma_p}{U} = \frac{m a_r / A}{m v^2 / 2 A h} = J. \quad (20)$$

Uma desvantagem destes métodos é que um gráfico tem de ser construído para cada tipo de espuma. Rusch (1971) generalizou este método ao propor a normalização de σ_{pl} e U pelo módulo de elasticidade da espuma E^* , o que tornou possível comparar graficamente o comportamento de espumas diferentes sob situações de impacto.

Rusch pressupôs que a resposta dinâmica de uma espuma poderia ser prevista utilizando-se curvas tensão-deformação obtidas em ensaios estáticos de compressão e que a tensão de compressão poderia ser expressa como o produto de uma função adimensional da deformação, $\psi(\epsilon)$, e de um fator ϵE^* , sendo ϵ a deformação e E^* o módulo de elasticidade da espuma, o qual, segundo o estudo, depende de E_s (módulo de elasticidade do polímero base) e de ϕ (fração volumétrica do polímero sólido na espuma). Assim, a tensão seria expressa por

$$\sigma = \epsilon E^* \psi(\epsilon). \quad (21)$$

A função ψ , por sua vez, foi expressa como um polinômio de ϵ cujas constantes m , n , r , s são determinadas empiricamente em cada caso para ajuste à curva σ - ϵ ,

$$\psi(\epsilon) = m \epsilon^{-n} + r \epsilon^{-s}. \quad (22)$$

Sendo definidos ainda K , *eficiência de absorção de energia*, como a relação entre as desacelerações máximas no impacto apresentadas por uma espuma ideal e uma real (ou seja, $K=1/J$) e I como a energia específica normalizada por E^* ,

$$I = \frac{U}{E^*}, \quad (23)$$

a relação K/I , depois de processamento matemático adequado, pode ser expressa como a tensão de platô normalizada por E^* ,

$$\frac{I}{K} = \frac{\sigma_p}{E^*} \quad (24)$$

Rusch construiu então curvas $(I/K)-I$ e as correspondentes curvas $K-I$, apresentadas na Figura 23. A escolha da espuma mais apropriada para determinada aplicação depende da capacidade de absorção de energia e da eficiência de absorção desejada (fatores a se levar em conta incluem volume do amortecedor e energia de impacto postulada). A espuma de densidade ρ_3^* , por exemplo, apresenta um grande pico de eficiência em torno de determinado valor de energia específica, porém este pico é estreito; a espuma de densidade ρ_2^* , por outro lado, nunca atinge a eficiência da primeira, mas possui um perfil de eficiência mais amplo, ou seja, tem maior eficiência média para um espectro mais amplo de energia específica.

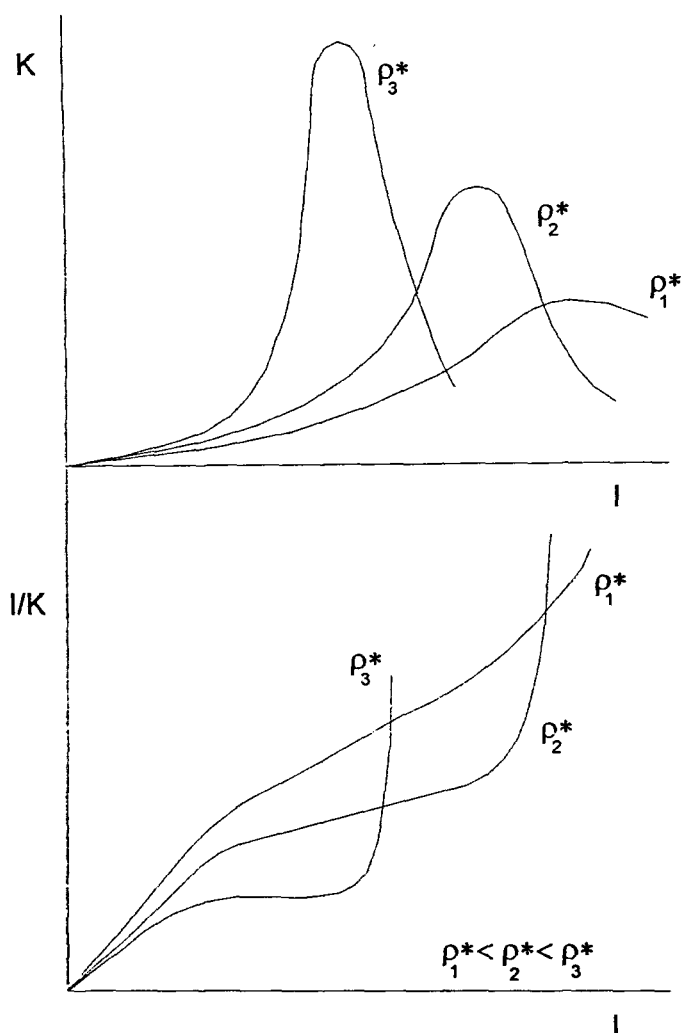


Figura 23. Curvas de absorção de energia de impacto segundo Rusch (1971).

Ainda que o método de Rusch possua maior generalidade que os anteriores, sua grande debilidade reside no fato de depender em sua formulação de fatores empíricos sem um embasamento físico mais consistente. Para superar esta deficiência, Maiti et al. (Maiti, 1984, apud Gibson, 1988) propuseram o *método dos diagramas de absorção de energia*.

A obtenção destes diagramas inicia-se pela construção de gráficos tensão-deformação para espumas de diversas densidades relativas (note-se que neste método utiliza-se μ^*/μ_s , isto é, a massa específica da espuma dividida pela do polímero sólido), testadas à mesma temperatura ou taxa de deformação [Figura 24 (a)]. A área sob cada curva, correspondente à energia absorvida por unidade de volume da espuma, é determinada e, diferentemente do método

anterior, normalizada pelo módulo de elasticidade do polímero sólido, E_s (e não por E^*). Ou seja, determina-se U/E_s . Um gráfico $U/E_s \times \sigma_p/E_s$ é então construído [Figura 24 (b)]. Uma vez que a energia e a tensão são normalizadas, podem ser traçadas curvas para diversas densidades e diferentes tipos de espumas no mesmo gráfico. Observa-se que as curvas deste gráfico apresentam inclinação inicial acentuada, correspondente às regiões de deformação elástica e ao platô de deformação com tensão praticamente constante; há então uma inflexão das curvas, ao se adentrar a região de adensamento da espuma. Uma vez que os pontos de inflexão destas curvas marcam o final de seus respectivos platôs de plastificação, eles determinam a região de uso mais eficiente de cada espuma. A envoltória desses pontos é aproximada por uma reta, mostrada na Figura 24 (b).

Repetindo-se esta seqüência para diversas taxas de deformação, obtém-se uma família de retas paralelas (mostradas no gráfico da Figura 24(c) como as retas mais finas), cujos pontos correspondentes à mesma densidade podem, por sua vez, ser conectados (as retas de conexão são as mais espessas, rotuladas com os respectivos valores de densidade).

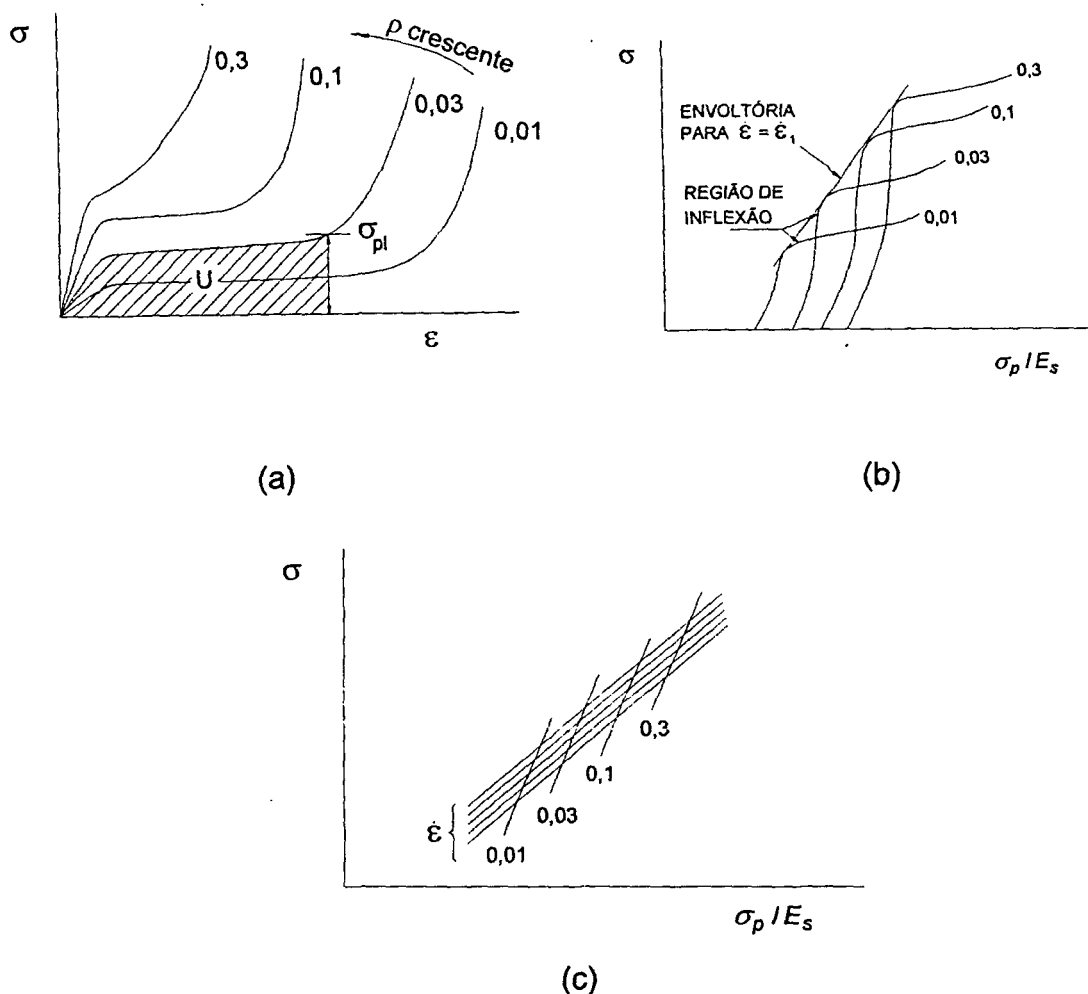


Figura 24. Construção dos diagramas de absorção de energia segundo Maiti (1984).

3.3.2 Método simplificado escolhido

Dentro da metodologia aplicada neste trabalho de pesquisa, o método do fator de Janssen foi escolhido para fornecer a primeira estimativa da densidade que resultasse em maior eficiência de absorção de energia por parte da espuma de poliuretano escolhida. Ainda que este método tenha seus aspectos desvantajosos, como ser específico para determinado caso – um diagrama tem de ser construído para cada tipo de espuma estudada e para cada altura de queda – e não fornecer informações quantitativas de energia específica absorvida pela espuma, a grande vantagem que possui – sua simplicidade – fez com que fosse eleito no presente estudo.

Contudo, uma vez que, conforme mostrado na eq. 20, o fator de Janssen pode, alternativamente, ser definido para ensaios de impacto como

$J = \sigma_p / U$, esta definição foi empregada neste trabalho, por seu maior significado físico.

3.4 Estudo de caso: queda-livre de embalagem

A etapa da metodologia descrita nesta seção consistiu de uma campanha de ensaios na qual protótipos de embalagem para rejeitos radioativos incorporados em matriz de cimento, em escala natural, foram liberados da altura prescrita de 9 m, chocando-se contra uma base rígida.

O protótipo testado é mostrado na Figura 25. A embalagem simulada consiste basicamente de dois componentes, o corpo principal e o amortecedor de impacto. O primeiro é formado por um tambor metálico comercial de 200 litros com todo seu espaço interno preenchido por um bloco maciço de concreto; esta é a configuração mais habitual para armazenamento, por exemplo, de lamas ou peças metálicas contaminadas, existindo atualmente centenas destas embalagens nas instalações de armazenamento intermediário das centrais nucleares e centros de pesquisa nuclear no país. Para aumentar a estabilidade do protótipo durante a queda, uma vez que a posição de queda escolhida foi a posição vertical em que a embalagem é normalmente armazenada ou transportada, aproximadamente 80 kg de esferas de ferro fundido de 25 e 50 mm de diâmetro, do tipo usado em moinhos industriais, foram colocados na parte inferior do bloco, abaixando assim seu centro de gravidade.

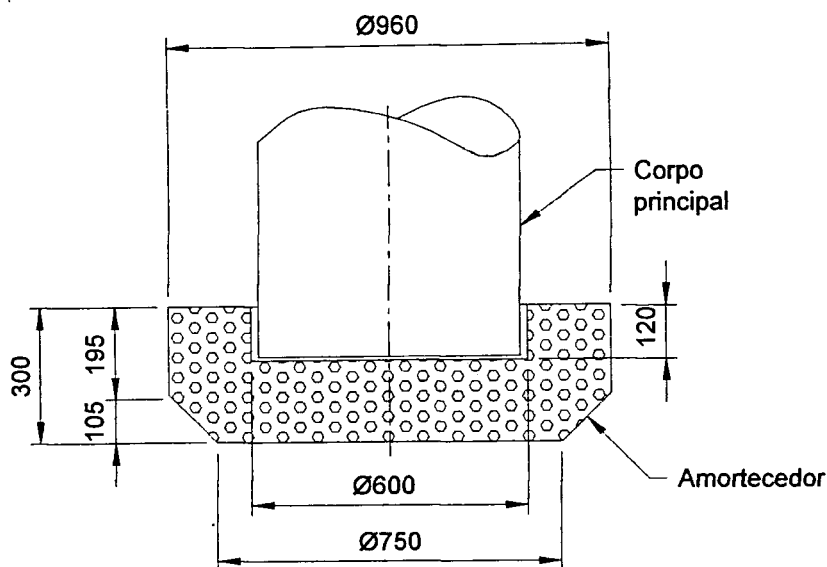


Figura 26. Dimensões principais do amortecedor

Uma vez que os ensaios eram destrutivos para os amortecedores, foram confeccionadas quatro unidades deste componente, todas similares, variando-se somente a densidade da espuma de enchimento. Foram utilizadas espumas oferecidas comercialmente, sendo um protótipo preenchido com espuma de massa específica nominal de 40 kg/m^3 , dois com espuma de 100 kg/m^3 e o último com espuma de 200 kg/m^3 . Por meio de amostragem realizada após os ensaios de queda-livre, verificou-se que as seguintes massas específicas efetivas foram obtidas:

- para a massa específica nominal de 40 kg/m^3 : 41 kg/m^3 ;
- para a massa específica nominal de 100 kg/m^3 (dois protótipos): 101 e 117 kg/m^3 ;
- para a massa específica nominal de 200 kg/m^3 : 225 kg/m^3 .

A instalação de ensaio utilizada é mostrada na Figura 27. Ela compõe-se de: i) base de concreto enterrada no solo, de seção transversal de 2,5 m de lado e 3,5 m de profundidade, tendo sua face superior coberta com uma placa metálica de 25,4 mm de espessura, a qual é fixada no concreto por meio de chumbadores; ii) sistema eletro-mecânico para liberação de carga e; iii) quadro de comando elétrico e cabeamento. O içamento do protótipo é feito por meio de guindaste móvel.

3.5 Simulação numérica do ensaio de queda-livre

O expressivo desenvolvimento nas duas últimas décadas do método de elementos finitos e de códigos computacionais baseados neste método levou ao uso cada vez mais intenso desta ferramenta numérica no projeto e avaliação de embalagens na área nuclear (Glass et al. [1984], Wellman [1985], Ribbans [1994], Richins [1996], Nichols [2001]). As vantagens que a simulação numérica proporciona aos projetistas da área explicam a popularização da ferramenta, uma vez que ensaios caros e demorados podem ser parcialmente substituídos, além de que uma gama maior de parâmetros de projeto pode ser verificada e apenas as configurações mais promissoras testadas fisicamente.

3.5.1 Código computacional utilizado

Nesta pesquisa, foram usados os códigos ANSYS (ANSYS, 1996) e LS-DYNA (LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, 1999). Este códigos operam de forma acoplada, sendo as etapas de pré-processamento – construção dos modelos geométrico e de elementos finitos – e de pós-processamento – leitura e tratamento dos resultados – realizadas em ambiente ANSYS e o processamento propriamente dito feito pelo código LS-DYNA; este acoplamento é feito automaticamente, não requerendo a interferência direta do usuário. O código LS-DYNA eficiente na solução de eventos dinâmicos de alta velocidade e curta duração e que trata com precisão os problemas de contato, que, como apresentado mais à frente, constituem um dos aspectos de não linearidade do problema aqui analisado. Para o processamento, foi usado o método explícito de integração no tempo.

3.5.2 Descrição do modelo

Conforme descrito anteriormente (seção 3.4, p. 73), o caso estudado apresenta simetrias geométrica e de carregamento. Desta forma, para economia de tempo de processamento, apenas um quadrante da embalagem foi modelado, conforme mostrado na Figura 30 (a), sendo aplicadas, nos planos de corte, as condições de simetria correspondentes (deslocamento nulo nas respectivas direções normais).

Para economia adicional no processamento do problema, o modelo é construído com a embalagem posicionada junto à plataforma de impacto, sendo a

altura de queda simulada através da imposição, à embalagem, de uma velocidade inicial vertical de 13,3 m/s, a qual teria no momento do contato com a plataforma se estivesse caindo da altura de 9 m⁸.

As partes que compõem o modelo são mostradas na Figura 30 (b) – (e) e seus principais parâmetros de modelagem apresentados na Tabela 6. No Apêndice são apresentadas informações detalhadas sobre o modelo construído.

⁸ Desprezando-se o atrito com o ar, a velocidade de queda é dada por $v = \sqrt{2gh}$, sendo g a aceleração gravitacional e h a altura de queda

Tabela 6. Principais parâmetros do modelo

Parte	Formulação material	Tipo de elemento	Quantidade de elementos/nós
Corpo principal	Corpo rígido	SOLID164	81/148
Espuma polimérica	Espuma compactável	SOLID164	1.215/327
Casca metálica	Plástico com encruamento	SHELL163	198/235
Base indeformável	Corpo rígido	SHELL163	1/4
TOTAL			1.495/714

Um desvio de método que deve ser relatado é a alteração durante a simulação numérica da massa específica da espuma mais leve, de 41 para 60 kg/m³. Esta não-conformidade foi introduzida porque o modelo adequado para espumas rígidas de baixa densidade (modelo para espuma de célula fechada, *closed cell foam model*⁶) resultou em deformações do amortecedor muito grandes (acima de 85 %), que levaram a inconsistências numéricas e à interrupção da execução do programa para este caso. Considera-se que a substituição efetuada mantém intacto o objetivo desta etapa da metodologia – qual seja, verificar se a simulação numérica é uma ferramenta eficaz em estudos de impacto envolvendo materiais poliméricos –, dado que, como se mostrará mais adiante (seção 4.2, p. 95), a densidade utilizada possui a mesma condição daquela substituída, ou seja, é inferior à densidade mais eficiente para o caso estudado.

Outro desvio de método, desta vez de pequena influência quantitativa, é a simulação das espumas de massas específicas de 101 e 117 kg/m³ pela de 104 kg/m³ e da espuma de 225 kg/m³ pela de 200 kg/m³. Isto porque, conforme indicado no Apêndice, a curva tensão-deformação para a espuma de massa específica nominal de 100 kg/m³ foi aproximada pela média aritmética das curvas para as espumas de 60 e 147 kg/m³ (resultando em 104 kg/m³) e a curva σ - ϵ para a espuma de 200 kg/m³ é resultado da média entre as curvas das espumas de 147 e 253 kg/m³.

No modelo desenvolvido, a base indeformável e o corpo principal foram definidos como corpos rígidos (*rigid body model*, modelo de corpo rígido). A primeira por razões óbvias e o corpo principal porque, ainda que não seja completamente indeformável, sua rigidez estrutural é várias ordens de grandeza maior do que a rigidez dos componentes do amortecedor (casca metálica e enchimento de espuma). A definição das partes rígidas de um modelo de elementos finitos através do uso da formulação de corpo rígido é muito vantajosa, reduzindo significativamente o tempo de processamento de uma análise explícita. Isto é conseguido porque todos os graus de liberdade dos nós de um corpo rígido são automaticamente acoplados a seu centro de gravidade. Os únicos parâmetros requeridos na definição de um corpo rígido são a densidade, o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, além da definição de quais graus de liberdade serão restringidos.

O modelo de espuma usado – *crushable foam model*, modelo de espuma compactável – é adequado à caracterização de materiais com estrutura bifásica (ou seja, materiais sólidos contendo vazios) que apresentem redução de volume sob pressão, exibindo, portanto, um comportamento similar àquele das espumas estudadas nesta pesquisa. Seu uso é restrito a espumas rígidas, para as quais a resposta a carregamentos cíclicos não é relevante¹⁰. As características importantes destes modelos são: sensibilidade à variação da taxa de deformação; coeficiente de Poisson considerado essencialmente nulo; e módulo de elasticidade considerado constante durante toda a deformação.

Os parâmetros de entrada requeridos neste modelo são massa específica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, a curva tensão-deformação volumétrica obtida no ensaio de compressão uniaxial ($p-\varepsilon_v$), a tensão de tração limite e o coeficiente de amortecimento, η . O valor escolhido para a tensão de tração limite não tem influência relevante nos resultados, considerando-se que as espumas trabalham basicamente submetidas à compressão; em geral,

⁹ Este modelo é adequado para espumas de poliuretano rígidas de baixa densidade, comumente empregadas como mitigadores de impacto em automóveis

¹⁰ Além dos modelos de espuma compactável e do modelo *closed cell foam*, os seguintes modelos para espumas flexíveis ou rígidas de baixa densidade estão implantados no LS-DYNA: i) *low density foam* – para espumas altamente compressíveis, usadas em componentes acolchoados, como assentos de poltrona; ii) *viscous foam* – para componentes flexíveis absorvedores de energia, como manequins para simulação de impacto na indústria automobilística.

basta atribuir um pequeno valor a esse parâmetro, suficiente apenas para evitar que a espuma se desintegre sob baixos valores de tração. Nichols (2001) obteve bons resultados considerando este parâmetro igual a 10% da tensão de platô σ_{pl} , procedimento também adotado neste trabalho.

O coeficiente de amortecimento η é usado para determinação da sensibilidade da espuma à taxa de deformação, sendo relevante apenas quando a espuma é submetida a altas taxas de deformação. A faixa de valores recomendada é de 0,05 a 0,50. Nichols (op. cit.) não conseguiu estabelecer, em seu estudo, um valor para este parâmetro que captasse adequadamente o efeito desejado. Para determinação do coeficiente mais adequado, foi feita uma análise de sensibilidade (ver seção 4.4.2, p. 104), após o que foi adotado o valor de 0,2.

Como será mostrado adiante (seção 4.1.1, p. 86), as espumas de baixa densidade apresentam sensibilidade marcante à taxa de deformação $\dot{\epsilon}$. À falta de especificação no código sobre qual deveria ser a taxa de deformação empregada na escolha da curva tensão-deformação usada como dado de entrada, e como, conforme mostrado anteriormente (seção 3.2.1, p. 57), foram ensaiados corpos de prova sob diferentes taxas de deformação, adotou-se neste trabalho a média de todas as curvas obtidas nos ensaios de compressão uniaxial, independente da taxa de deformação empregada.

Para simulação da casca metálica, foi adotado um modelo de plastificação com encruamento (*plastic kinematic model*, modelo de plastificação com contribuição cinemática). Este modelo permite levar-se em consideração a influência da taxa de deformação na resposta do material, sendo, portanto, adequado ao estudo de impactos. Os parâmetros requeridos para sua definição são massa específica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, tensão de plastificação, módulo de encruamento tangencial, um parâmetro de encruamento (β) e dois parâmetros que introduzem o efeito da taxa de deformação.

Dois tipos de elementos foram empregados no modelamento do problema. O corpo principal e a espuma foram modeladas através do elemento SOLID164, elemento sólido de oito nós com integração reduzida. Dependendo da geometria a ser modelada, alguns elementos podem apresentar-se degenerados em forma de pirâmides ou tetraedros, através do colapso de alguns de seus nós. No caso presente, isto ocorreu no modelamento da espuma.

A casca do amortecedor e a base indeformável foram modeladas através do elemento de casca SHELL163. Este elemento possui quatro nós, podendo assumir a forma triangular através do colapso de dois de seus nós. Dentre as formulações implementadas para elementos de casca, foi adotada a de Hughes-Liu, considerada eficiente para problemas em que ocorrem grandes deformações (LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, 1999).

Um aspecto fundamental para o adequado modelamento de um problema não linear é a correta definição do tipo de contato que ocorre entre as diversas superfícies ao longo do processo de deformação. O código utilizado oferece 24 possibilidades de contato (resultante de combinações entre três tipos e nove opções de contato), que permitem a simulação de várias formas de interação entre os componentes.

No presente caso, os três contatos seguintes foram estabelecidos: 1) superfície externa da espuma – superfície interna da casca metálica; contato vinculado, nó – superfície; 2) parte inferior da casca metálica – base indeformável; contato genérico, nó – superfície; 3) parte superior da casca metálica – corpo rígido; contato genérico, nó – superfície. As seis superfícies foram definidas com a menor quantidade possível de nós, a fim de otimizar o tempo de processamento computacional. A descrição detalhada dos contatos definidos é apresentada no Apêndice.

O carregamento considerado é aquele resultante da influência do peso próprio dos componentes da embalagem. Este carregamento é introduzido de duas formas: para o componente rígido (o corpo principal), diretamente através da aplicação de uma força vertical igual ao peso do componente, lembrando-se que se está simulando apenas 1/4 do protótipo; para o amortecedor (espuma e casca), pela definição de uma aceleração de corpo igual à aceleração gravitacional.

Os parâmetros de processamento estabelecidos são os seguintes:

- tempo de duração da análise: 30 ms;
- dados de saída registrados: aceleração vertical do nó central da seção superior do corpo principal.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Caracterização experimental

4.1.1 Ensaios de compressão uniaxial

Conforme apresentado anteriormente (seção 3.2.1, p. 57), foram realizados ensaios de compressão uniaxial a três diferentes taxas de deformação – $1,4 \times 10^{-3}$, $5,6 \times 10^{-3}$ e $1,4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, a fim de se estudar a influência deste parâmetro na resposta da espuma

O gráfico da Figura 32 (a) apresenta as curvas tensão-deformação dos ensaios de compressão uniaxial para as densidades testadas na direção perpendicular, à taxa de deformação $\dot{\epsilon} = 1,4 \times 10^{-3}$ (exceto a espuma de densidade $\rho^* = 326$, onde $\dot{\epsilon} = 5,6 \times 10^{-3}$). A Figura 32 (b) mostra apenas as curvas correspondentes às densidades mais baixas, para melhor visualização de sua forma.

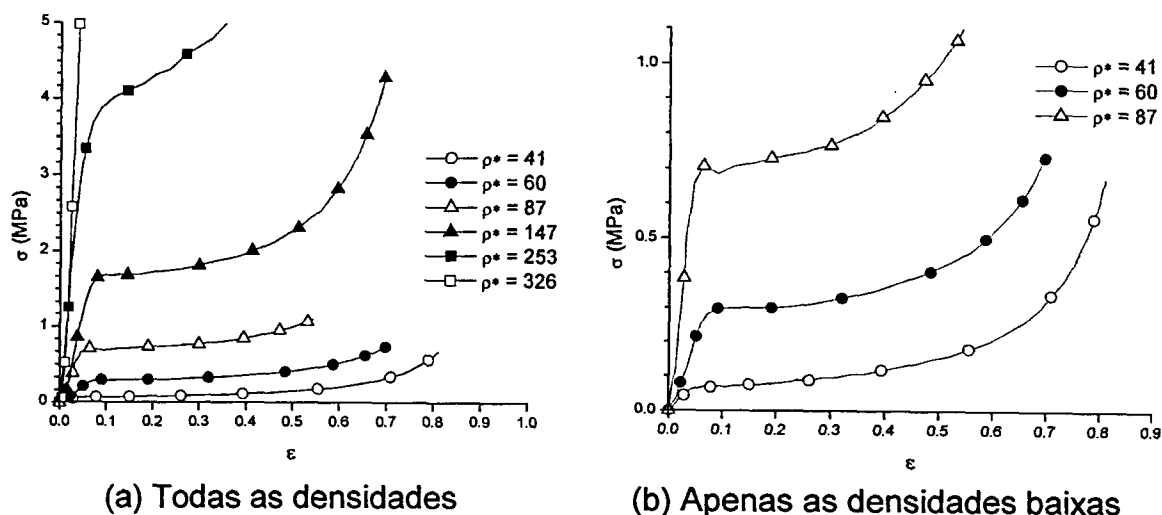
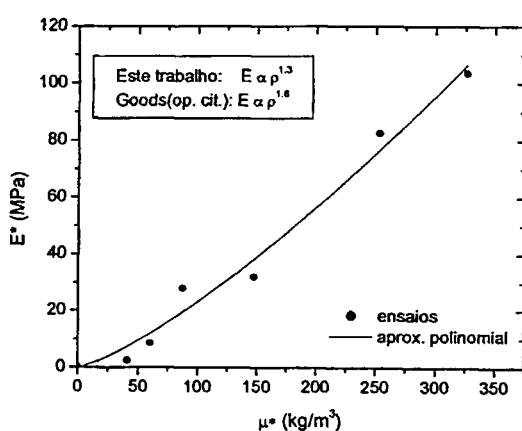


Figura 32. Curvas obtidas no ensaio de compressão uniaxial

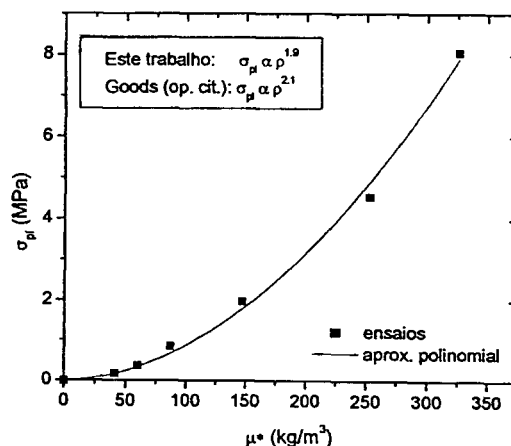
Constatou-se que a espuma de poliuretano obtida a partir do óleo de mamona apresenta comportamento similar àquele das espumas da indústria petroquímica, como pode ser verificado ao comparar-se as curvas acima com a Figura 7, p. 20. Com relação a parâmetros específicos, verificou-se que o módulo

de elasticidade E^* , a tensão de platô σ_{pl} e a energia absorvida U aumentam com a densidade da espuma (Figura 33). O módulo de elasticidade da espuma corresponde à inclinação média da região elástica da curva σ - ε , ao passo que a tensão de platô é tomada como o valor médio de tensão no platô de plastificação. A energia específica absorvida, como já mostrado anteriormente, é dada pela área sob a curva.

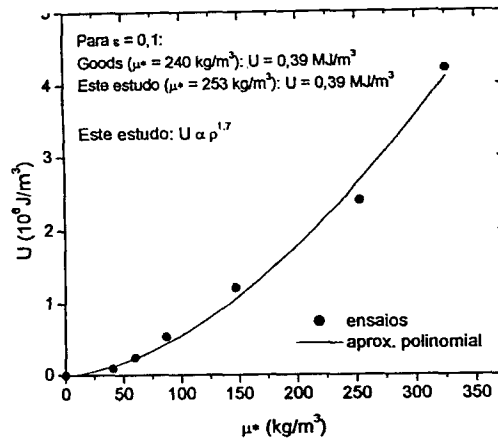
Para efeitos de comparação, os valores obtidos foram confrontados com aqueles obtidos por Goods et al. (1997) em seu estudo descrito anteriormente neste trabalho (seção 2.5, p. 46). Os gráficos (a) e (b) da Figura 33 apresentam, respectivamente, os valores de E^* e σ_{pl} obtidos experimentalmente e a melhor aproximação polinomial obtida. Na caixa de texto, são mostrados os valores de aproximação obtidos por Goods et al. e neste estudo. Quanto à energia absorvida [Figura 33 (c)], o valor obtido para a espuma de massa específica 253 kg/m^3 coincidiu com aquele apresentado por Goods et al. para a espuma por ele estudada, de massa específica 240 kg/m^3 : $0,39 \text{ J/cm}^3$ para a deformação $\varepsilon = 0,1$ (a curva apresentada na Figura 33 (c) não se refere aos valores de U correspondentes a $\varepsilon = 0,1$ e sim à energia específica absorvida até o final do platô de plastificação; para $\mu^* = 253 \text{ kg/m}^3$, este valor é $\varepsilon = 0,47$).



(a) Módulo de elasticidade



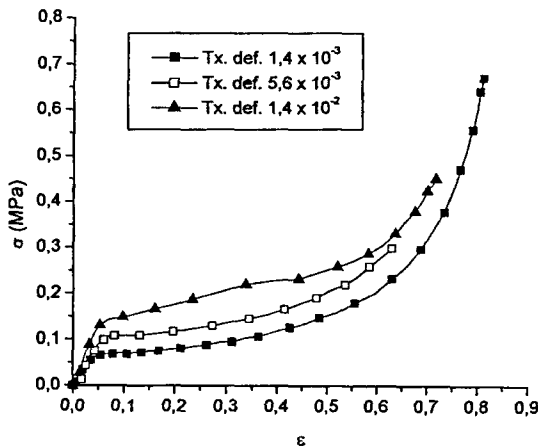
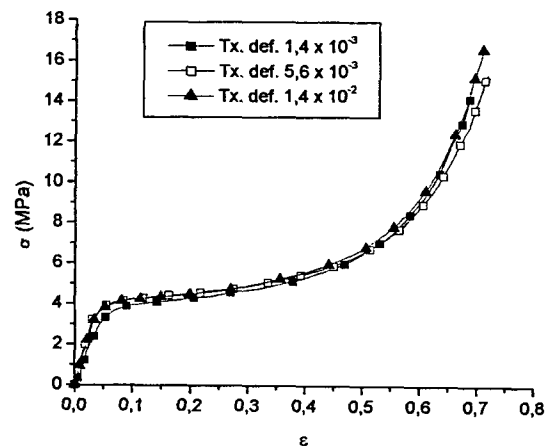
(b) Tensão de platô



(c) Energia absorvida

Figura 33. Variação de parâmetros com a densidade

A influência da taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$ na resposta da espuma é mostrada nas Figs. 34 e 35. Observa-se que a espuma de massa específica 41 kg/m^3 apresenta uma acentuada sensibilidade à variação de $\dot{\varepsilon}$, sendo tanto mais rígida quanto maior é a taxa de deformação. Já a espuma de massa específica 253 kg/m^3 mostra pouca sensibilidade a este parâmetro. Como se verá adiante (seção 4.1.4, p. 93), na faixa de densidade entre 200 e 260 existe uma inflexão na resposta da espuma à taxa de deformação.

Figura 34. Influência da taxa de deformação na resposta da espuma – massa específica 41 kg/m^3 Figura 35. Idem, para massa específica de 253 kg/m^3

As Figs. 36 e 37 apresentam o estudo feito para verificar-se o grau de isotropia da espuma. Observa-se que, para espumas de massa específica baixa e média (até $150\text{-}200 \text{ kg/m}^3$), a energia absorvida U e a tensão de platô σ_{pl} são

maiores na direção do crescimento da espuma; já as espumas mais densas apresentam maior rigidez e capacidade de absorção de energia na direção perpendicular ao crescimento. Para comparação com uma espuma obtida da indústria petroquímica – estudada por Maji et al. (1995), são apresentadas na Figura 38 as curvas $\sigma_{p\Gamma\rho^*}$ para as duas direções consideradas. Observa-se que esta espuma também apresenta certo grau de anisotropia, porém de maneira inversa: as tensões de platô em amostras ensaiadas na direção perpendicular são maiores do que em amostras comprimidas na direção paralela para espumas com massa específica até aproximadamente 200 kg/m^3 sendo, porém, menores acima deste valor.

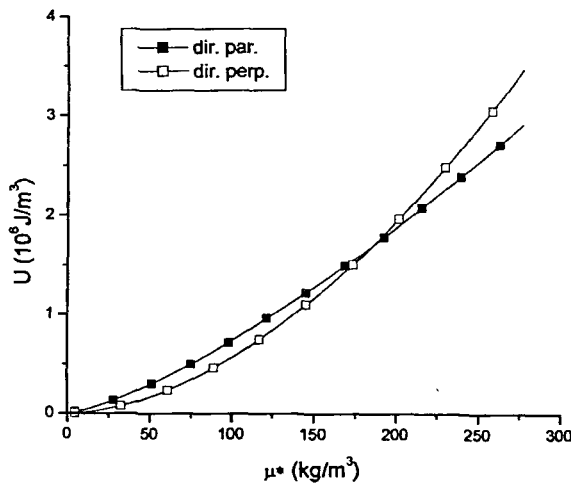


Figura 36. Variação da energia absorvida com a massa específica

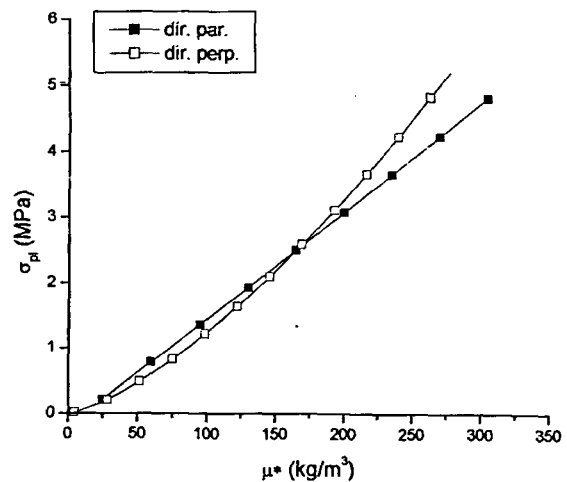


Figura 37. Variação da tensão de platô com a massa específica

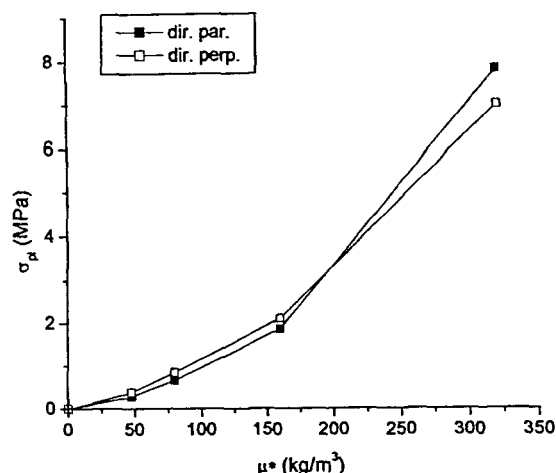


Figura 38. Variação de σ_{pl} com a massa específica para uma espuma petroquímica (Maji et al., 1995)

4.1.2 Ensaios hidrostáticos

O comportamento das espumas no ensaio hidrostático é similar ao comportamento durante o ensaio uniaxial. Como pode ser visto nas curvas apresentadas na Figura 39, para corpos de prova ensaiados à taxa de deformação $\dot{\epsilon} = 1,8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, a pressão de platô p_{pl} e a energia absorvida U aumentam com a densidade da espuma. A Figura 39 (a) apresenta todas as curvas obtidas e a Figura 39 (b) apenas as curvas referentes às densidades baixas, para melhor visualização de sua forma. Também de maneira análoga aos ensaios anteriores, verificou-se que o mecanismo de deformação volumétrica se dá em três fases bem caracterizadas: uma região elástica inicial, onde a deformação é linearmente proporcional à pressão; um platô de plastificação, onde ocorre grande parte da deformação plástica sem que haja grande aumento da pressão aplicada e uma região de adensamento, onde a maior parte das células da espuma já entrou em colapso e a resistência do material cresce rapidamente.

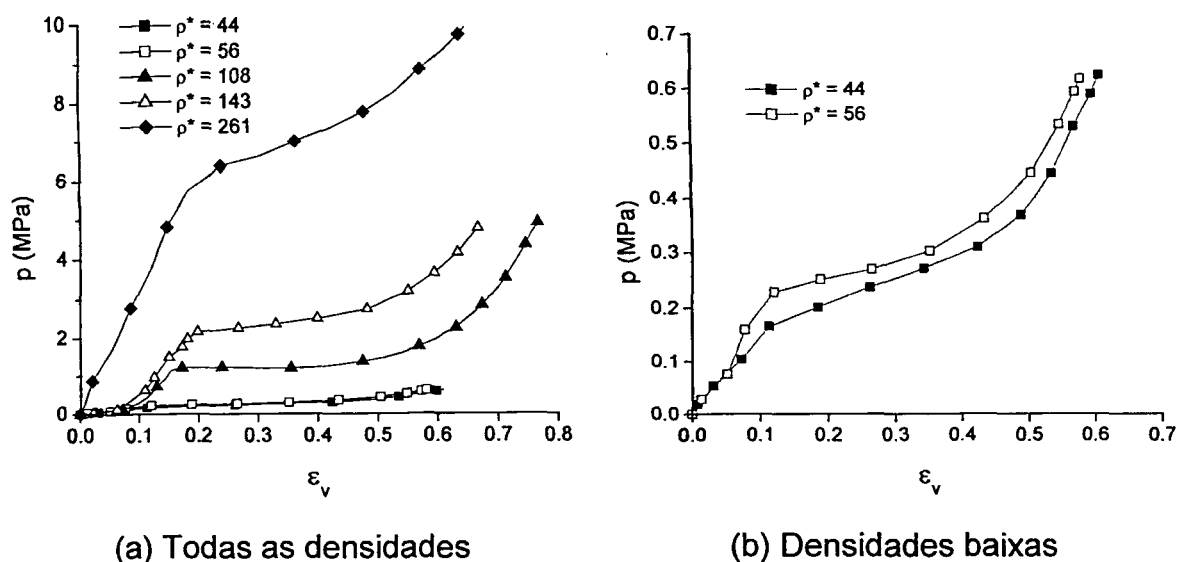


Figura 39. Curvas pressão-deformação volumétrica

4.1.3 Ensaios de impacto

A Figura 40 apresenta as curvas obtidas no ensaio de impacto. Foi feita uma média dos resultados obtidos nas direções paralela e perpendicular. A grande semelhança com os gráficos do ensaio de compressão uniaxial a baixa velocidade demonstra que, tanto em situações de esforços quase estáticos ou dinâmicos, o comportamento da espuma testada é ditado pelos mesmos mecanismos descritos no item 2.3 desta tese. Nota-se, contudo, que algumas curvas apresentam uma visível oscilação, o que, de certa forma, é esperado em eventos dinâmicos de curta duração.

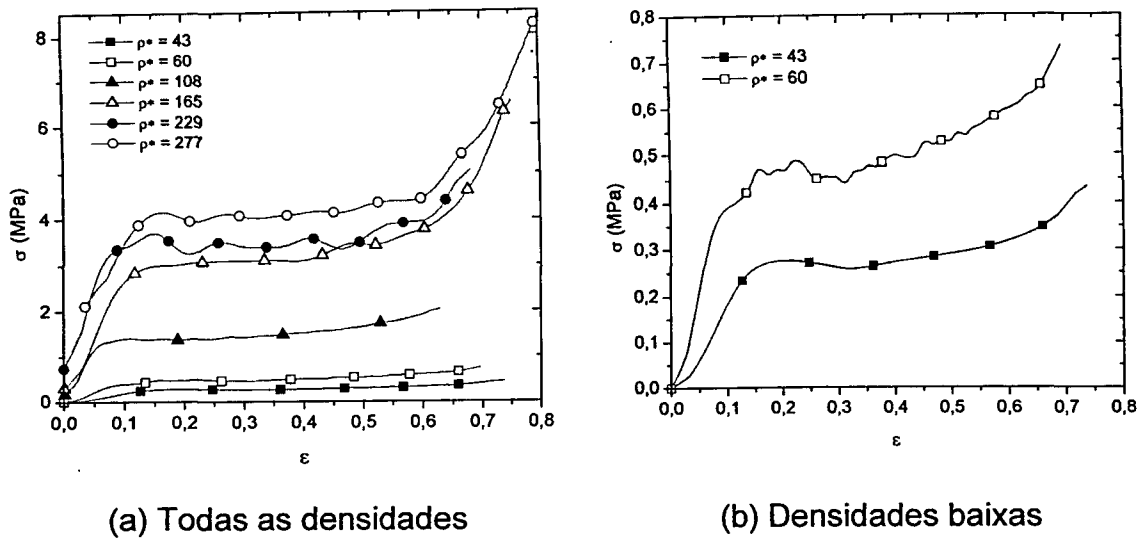


Figura 40. Resultados dos ensaios de impacto

As curvas acima são obtidas, na verdade, através da seguinte seqüência de passos. O sinal eletrônico gerado pela célula de carga e registrado no osciloscópio (ver seção 3.2.3, p. 61) é arquivado em formato eletrônico na forma de uma matriz *Força x Tempo*. Uma vez que a massa do carrinho de impacto vertical é conhecida (Tabela 5, p. 63), pode-se determinar o perfil de acelerações durante o impacto, dividindo-se os valores de força por esta massa, ou seja, pode-se construir gráficos $a \times t$. Através de integrações sucessivas, obtém-se a variação da velocidade do carrinho e da deflexão do corpo de prova durante o impacto (gráficos $v \times t$ e $u \times t$). Por outro lado, conhecendo-se a projeção vertical e a espessura do corpo de prova, determinam-se as tensões e deformações no mesmo, a partir dos dados de força e deflexão, respectivamente. Combinando-se os vetores σ e ϵ adequadamente, obtém-se as curvas da Figura 40.

A Figura 41 apresenta, como ilustração, as curvas $a \times t$, $v \times t$ e $u \times t$ para uma espuma de massa específica igual a 165 kg/m^3 , notando-se que os valores de aceleração são apresentados no eixo vertical esquerdo e os de velocidade à direita; para maior clareza, não é apresentado o eixo correspondente à deflexão. Note-se que, neste exemplo, existe uma defasagem de aproximadamente 1 ms entre os instantes de pico máximo de aceleração e de velocidade zero, indicando que, no caso apresentado, o colapso do corpo de

prova inicia-se – e, conseqüentemente, sua resistência começa a diminuir – antes da desaceleração total do peso.

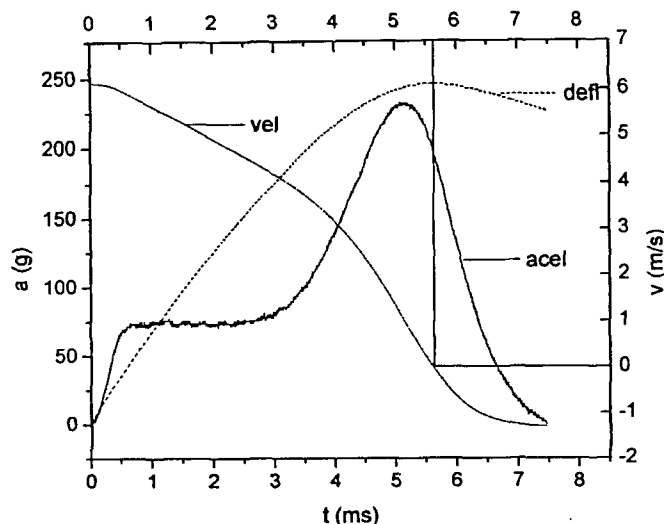
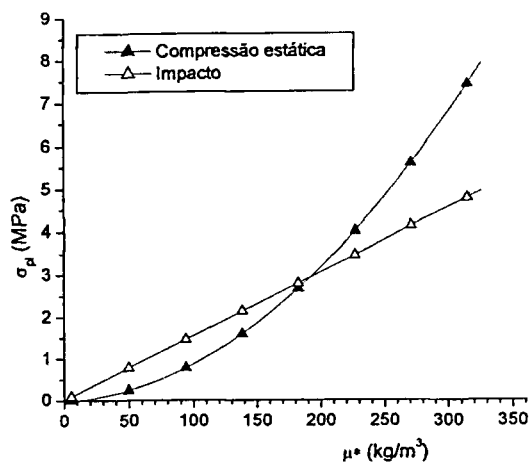


Figura 41. Curvas de aceleração, velocidade e deflexão (espuma com massa específica igual a 165 kg/m^3).

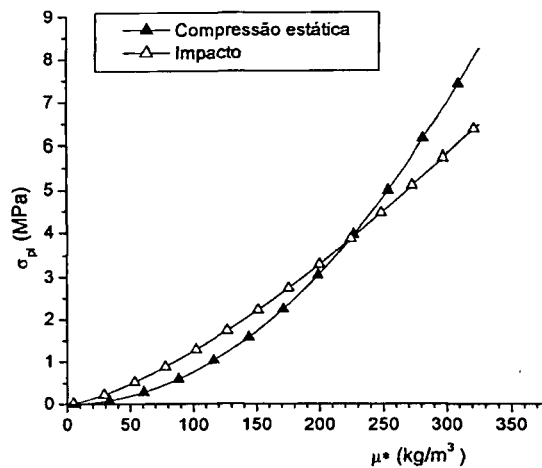
4.1.4 Comparação entre respostas dinâmica e estática

Foi feita uma comparação entre os resultados dos ensaios de compressão quase estático e de impacto (Figs. 42 e 43). Com relação à tensão de platô, observou-se que espumas com massa específica até aproximadamente 220 kg/m^3 apresentam σ_{pl} maior quando submetidas ao impacto, enquanto que, para valores superiores, σ_{pl} é maior em situações de esforços de baixa velocidade (a diferença é mais acentuada na chamada direção paralela da espuma). Já os valores de energia absorvida não apresentaram grande diferença entre os ensaios quase estáticos e dinâmicos na direção paralela (ainda que U para a situação de impacto seja ligeiramente superior até 230 kg/m^3 e ligeiramente inferior acima desse valor). Contudo, quando ensaiadas na direção perpendicular, todas as densidades apresentaram valores de U maiores no impacto.

Os resultados de σ_{pl} foram comparados com a espuma petroquímica citada anteriormente (seção 4.1.1, p. 86), estudada por Maji et al. (1995) (Figura 44). Diferentemente do observado para a espuma de óleo de mamona, a espuma petroquímica apresentou um claro e inequívoco encruamento cinemático.

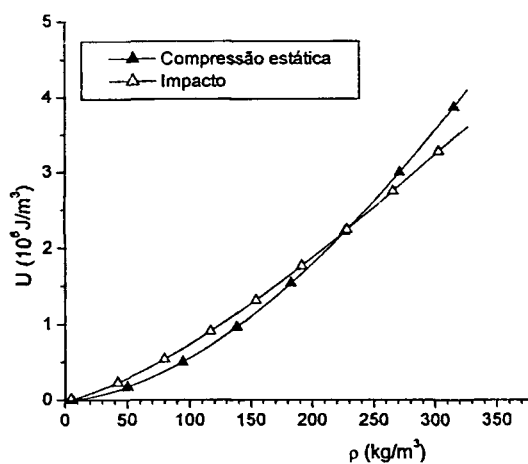


(a) direção paralela

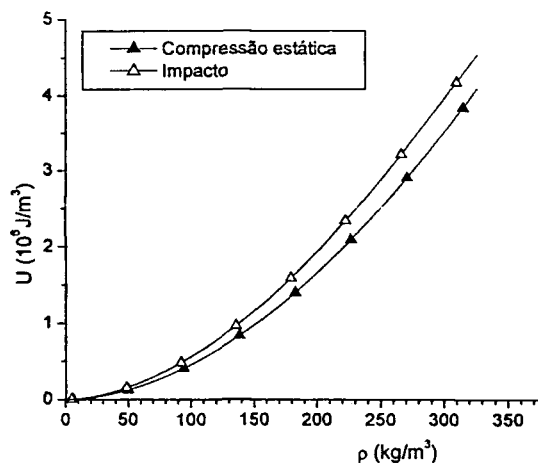


(b) direção perpendicular

Figura 42. Comparação entre a tensão de platô nos ensaios de impacto e estático

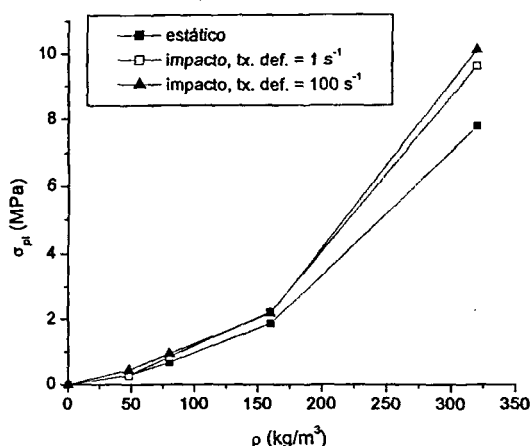


(a) direção paralela

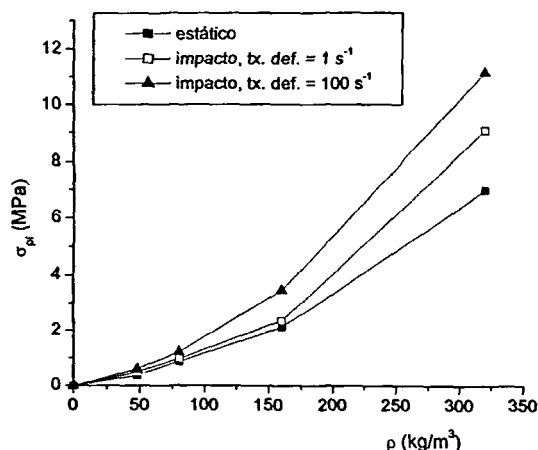


(b) direção perpendicular

Figura 43. Comparação entre a energia absorvida nos ensaios de impacto e estático



(a) direção paralela



(b) direção perpendicular

Figura 44. Comparação entre σ_{pl} nos ensaios estático e dinâmico, para espuma petroquímica (Maji et al, 1995)

4.2 Metodologia simplificada

Conforme dito anteriormente, o método do fator de Janssen foi empregado neste trabalho para determinação preliminar da densidade de espuma mais apropriada para o estudo de caso realizado, qual seja, queda-livre de uma embalagem sobre uma superfície rígida e indeformável.

Os dados de interesse para este problema são:

- Área de trabalho do amortecedor: $\frac{\pi}{4} \times 0,6^2 = 0,283 \text{ m}^2$ (corresponde à projeção vertical do tambor de 200 litros, com diâmetro de 600 mm)
- Espessura do amortecedor: 180 mm
- Volume útil do amortecedor: $V = 5,1 \times 10^{-2} \text{ m}^3$
- Energia potencial: $E_h = mgh = 500 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 \times 9 \text{ m} = 4,41 \times 10^{-2} \text{ MJ}$

A energia a ser absorvida por volume de espuma é, portanto,

$$U = \frac{E_h}{V} = \frac{4,41 \times 10^{-2} \text{ MJ}}{5,1 \times 10^{-2} \text{ m}^3} = 0,86 \text{ MJ/m}^3. \quad (25)$$

As curvas J são construídas a partir dos resultados dos ensaios dinâmicos. Uma vez construída a curva σ - ϵ para cada densidade ensaiada, conforme detalhado na seção 4.1.3, p. 91, tem-se, a cada momento, os valores de σ e U , sendo σ determinado diretamente no gráfico e U tomado como a área sob

a curva. Os valores de J correspondem à razão entre estes parâmetros, conforme mostrado na eq. 20, p. 68.

As curvas J para as espumas ensaiadas são apresentadas na Figura 45. Observa-se que os valores mínimos obtidos para o fator de Janssen situam-se em torno de 2, o que é uma medida de quanto a espuma testada se afasta de uma espuma ideal, que possui J igual a 1.

A Figura 46 apresenta a curva obtida por interpolação dos J 's mínimos, de onde se conclui que a massa específica ideal para o caso em questão é de 101 kg/m^3 .

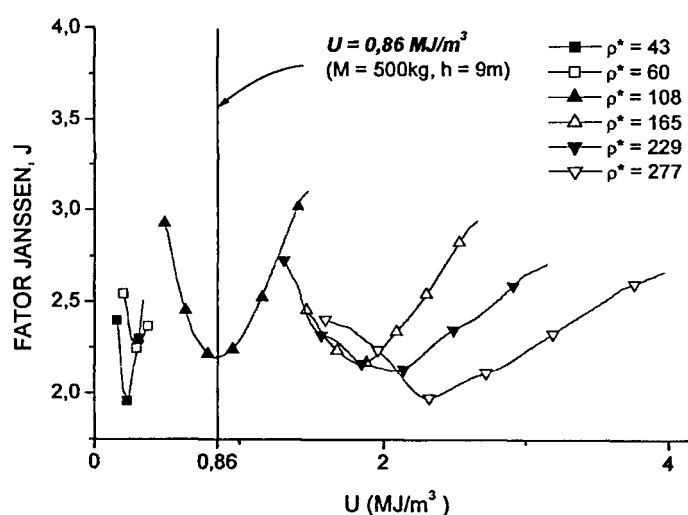


Figura 45. Curvas J para diversas densidades.

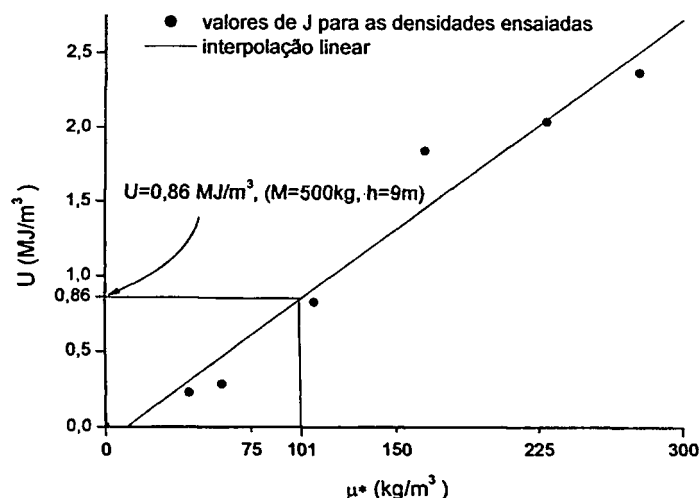


Figura 46. Interpolação dos J 's mínimos.

4.3 Ensaio de queda-livre

Os principais resultados obtidos nos ensaios de queda-livre realizados em protótipos de embalagens são apresentados nesta seção. Conforme relatado anteriormente (seção 3.4, p. 73), foram testados quatro amortecedores de impacto, preenchidos como espumas com massas específicas de 41, 101, 117 e 225 kg/m³. O corpo principal da embalagem – tambor metálico encerrando um bloco maciço de concreto – foi submetido a inspeção visual após cada ensaio, para avaliação de sua integridade física. Uma vez que se manteve íntegro nos três primeiros ensaios, o mesmo corpo principal foi usado em todos os ensaios, vindo a se danificar apenas na última queda, como se mostrará adiante. Os protótipos foram liberados da altura de 9 m sobre uma plataforma rígida, na posição vertical, tendo os esforços sido medidos através das acelerações registradas na extremidade superior de seu corpo principal. O tempo total de aquisição do sinal ajustado para um segundo, suficiente para se registrar o primeiro impacto do protótipo contra a plataforma e também um potencial choque secundário.

As curvas de acelerações individuais obtidas são apresentadas na Figura 47 e os gráficos comparativos entre espumas de diversas densidades na Figura 48. Em todos os gráficos, as acelerações são expressas em termos de múltiplos da aceleração gravitacional, g . Nas Figs. 49 a 52, são ilustrados alguns aspectos dos efeitos dos ensaios sobre as embalagens, notando-se que o dano sofrido pelo corpo principal do protótipo (tambor e conteúdo), conforme mostrado na Figura 49 (a), não afetou a campanha de ensaios, pois este era efetivamente o último ensaio previsto para ser realizado. Na Tabela 7, apresentam-se as deflexões residuais dos amortecedores, medidas após a retirada do corpo principal do protótipo; as deflexões máximas não foram computadas durante os ensaios.

A inferência mais importante da análise dos resultados é, indubitavelmente, que estes corroboram a conclusão da aplicação do método simplificado do fator de Janssen, qual seja, que a densidade mais adequada para o estudo de caso em questão é 101 kg/m³. Esta afirmativa pode ser feita ao se analisar o pico máximo de aceleração obtida em cada ensaio, conforme apresentado na Figura 48 e na Tabela 8.

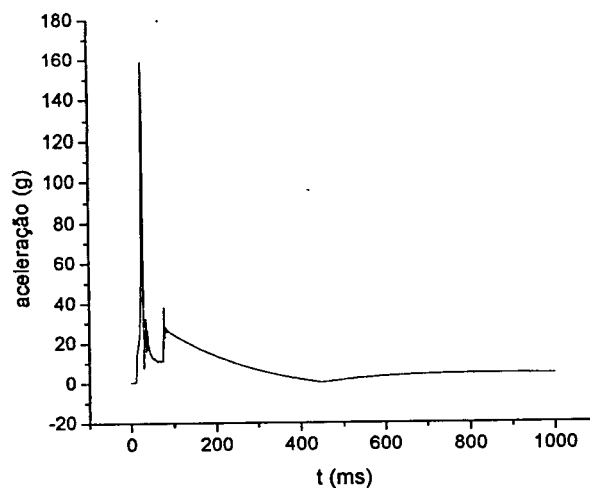
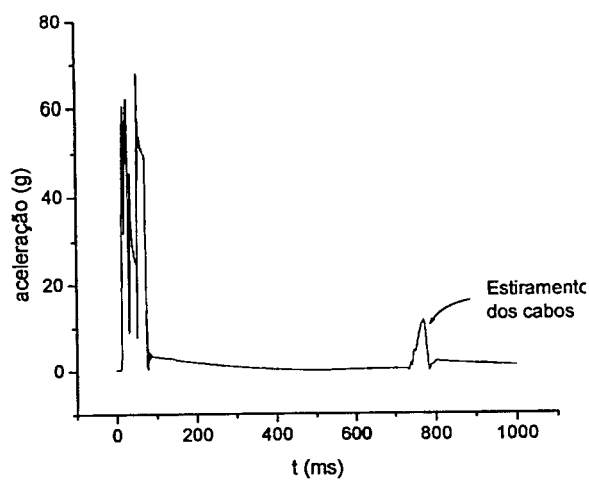
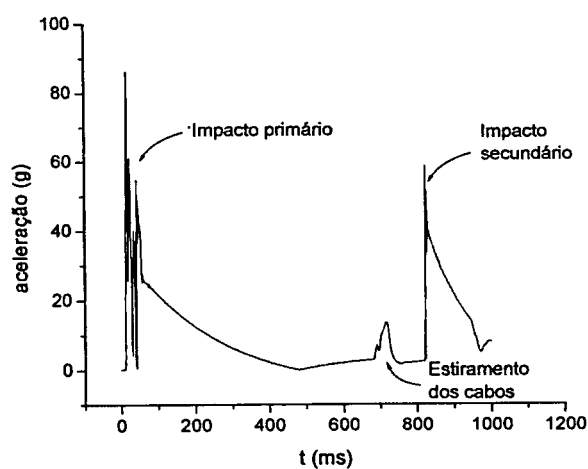
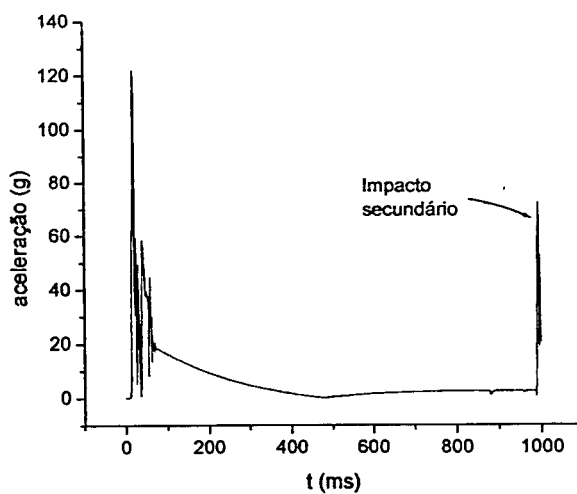
(a) Densidade 41 kg/m³(b) Densidade 101 kg/m³(c) Densidade 117 kg/m³(d) Densidade 225 kg/m³

Figura 47. Curvas individuais de aceleração

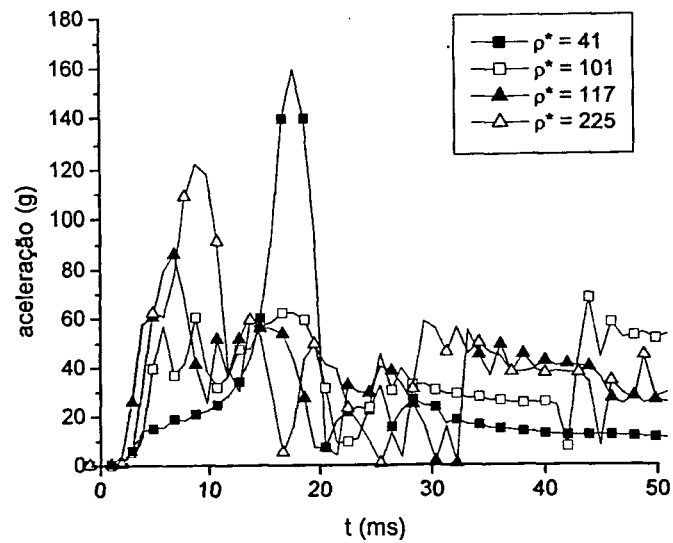


Figura 48. Comparação entre acelerações das diversas densidades

Tabela 7. Deflexões residuais dos amortecedores

Densidade da espuma	Deflexão residual (mm)
41	50
101	50
117	45
225	5

Tabela 8. Picos máximos de aceleração nos ensaios de queda-livre

Densidade da espuma	Aceleração máxima (g)
41	159
101	68
117	86
225	122

mas embalagens comerciais em geral) são capazes de resistir sem apresentar danos significativos é através da determinação da *fragilidade* de seus componentes mais sensíveis (Stupak, 1992 e DOW, 2002). Esta grandeza, que fornece uma medida de robustez de um produto ou equipamento, é expressa em termos de aceleração gravitacional, g , e corresponde à aceleração máxima suportada pelo componente sem que haja ocorrência de danos no mesmo. Uma apresentação detalhada deste método de cálculo é feita no Capítulo 5, *Discussão*.

Como foi destacado anteriormente (seção 2.1, p. 17), as embalagens focalizadas neste trabalho – Tipo B – devem preservar sua capacidade de blindagem e contenção e sua proteção térmica após submetidas à seqüência de ensaios prevista, constituída dos ensaios de queda-livre (ou esmagamento, para embalagens leves e pouco densas), penetração, imersão em água e ensaio térmico. Restringindo-se aos aspectos mecânicos – uma vez que a análise térmica e também, no caso de embalagens para material físsil, a análise de criticalidade, fogem ao escopo deste trabalho de tese, uma metodologia possível para o cálculo do amortecedor envolve a determinação prévia do nível de robustez dos componentes mais críticos do protótipo e, a partir destes valores e levando-se em conta as limitações dimensionais a serem atendidas, chega-se à densidade de espuma ótima. A experiência acumulada na área demonstrou que várias campanhas de ensaios e, quando aplicável, diversas simulações numéricas, devem ser conduzidas até que um novo conceito de embalagem seja aprovado e obtenha o licenciamento da autoridade regulatória nacional.

Os gráficos de aceleração da Figura 47 fornecem outras informações complementares de interesse. A curva do gráfico (c) apresenta três picos de aceleração bastante distintos: o primeiro, no valor de 86 g, ocorrido aos 17 ms, corresponde ao primeiro impacto do protótipo; o segundo, de 13 g, aos 700 ms, acontece quando o protótipo, após o impacto, inverte o sentido de seu movimento e desloca-se para cima; ocorre, porém, que, devido ao recalque ocorrido no amortecedor, os cabos que conectam corpo principal e amortecedor se afrouxam e, num primeiro momento, apenas o corpo principal do protótipo ascende, sofrendo então uma desaceleração (registrada no segundo pico) quando os cabos se estiram novamente e o amortecedor é puxado para cima. O terceiro pico, com magnitude máxima de 58 g e ocorrência aos 850 ms, corresponde ao segundo impacto do protótipo contra a plataforma.

Os demais gráficos não apresentam todos os picos acima descritos. A curva do ensaio com a espuma de 41 kg/m^3 [Figura 47 (a)] somente mostra o pico primário, pois o protótipo capotou após o impacto; existe, é verdade, um pequeno pico de 38 g aos 77 ms resultante do impacto devido ao capotamento, mas como sua direção principal foi perpendicular ao eixo do acelerômetro, ele não foi registrado em sua plena magnitude. A curva do ensaio com espuma de 101 kg/m^3 [(Figura 47 (b))] não apresenta registro do impacto secundário, pois este ocorreu fora do limite de tempo de registro (1 s). Finalmente, o gráfico do ensaio com espuma de 225 kg/m^3 [(Figura 47 (d))] apresenta somente os picos correspondentes aos impactos primário e secundário, uma vez que, como a deflexão do amortecedor foi desprezível neste ensaio, não ocorreu afrouxamento e posterior estiramento dos cabos de fixação do amortecedor.

4.4 Simulação numérica

4.4.1 Ensaio de compressão uniaxial

Na Figura 53 são apresentadas as curvas σ - ε obtidas no ensaio de compressão uniaxial e em sua simulação numérica (os parâmetros da simulação são descritos na seção 3.5.3, p. 85). Foi empregada a espuma de massa específica 60 kg/m^3 ; ensaiada à taxa de deformação de $1,4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. Este estudo comparativo foi realizado para se verificar a robustez do modelo de espuma escolhido para a simulação. Na Tabela 9 são mostrados os resultados obtidos. Na Figura 54 é apresentada a configuração de deformação máxima alcançada, podendo-se notar, na região esquerda do modelo, que a malha de elementos finitos começa a apresentar instabilidade.

4.4.2 Ensaio de queda-livre

Conforme apresentado anteriormente, um parâmetro bastante adequado para se avaliar a eficiência de um amortecedor é a desaceleração sofrida pela embalagem durante o evento. Seguindo esta linha, foi computado o perfil de acelerações do nó central da seção superior da embalagem, mesmo local onde foi fixado o acelerômetro no protótipo ensaiado no ensaio de queda-livre descrito na seção 3.4, p. 77.

Para maior confiabilidade nos resultados, foi feita inicialmente uma análise de sensibilidade do modelo ao coeficiente de amortecimento η , parâmetro que introduz a influência da taxa de deformação na resposta da espuma. Levando-se em consideração a faixa recomendada para este parâmetro, entre 0,05 e 0,50, três casos foram executados com a espuma de massa específica 104 kg/m^3 , adotando-se os valores de 0,05, 0,20 e 0,50.

Os perfis de aceleração obtidos nestas execuções são mostrados na Figura 55. Observa-se que, enquanto a adoção do fator η igual a 0,05 faz com que o pico de aceleração seja muito alto (119 g), o valor de 0,50 provoca um achatamento da curva que não é observado na realidade (comparar com a Figura 48). O valor intermediário $\eta = 0,2$ foi então adotado.

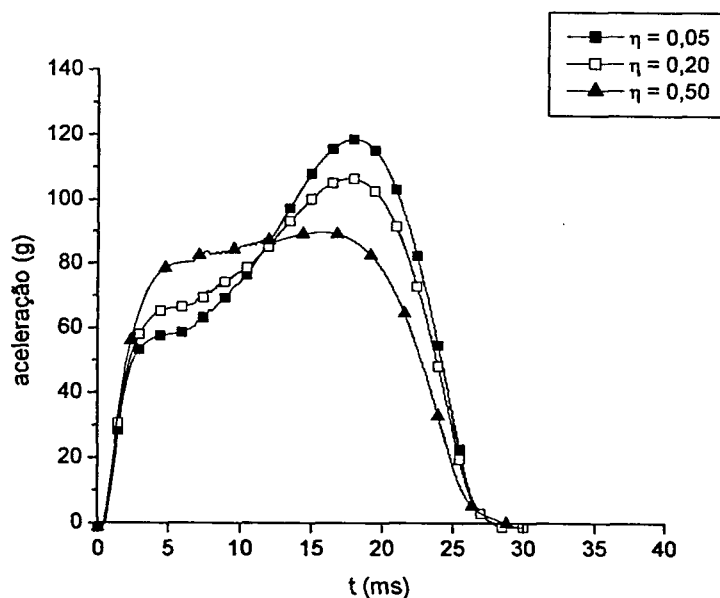


Figura 55. Análise de sensibilidade ao fator de amortecimento

A simulação dos ensaios de queda-livre foi então executada. Na Figura 56 são mostrados os perfis de aceleração para os três casos, observando-se que a espuma de massa específica de 104 kg/m^3 fornece o menor pico de desaceleração – 107 g, seguida da espuma de 200 kg/m^3 – 135 g, enquanto a espuma menos densa – 60 kg/m^3 – provoca as maiores desacelerações, que atingem um valor máximo de 151 g. Este resultado está em concordância com aquele previsto pelo método simplificado de Janssen, conforme apresentado no item 4.2, p. 95, segundo o qual a espuma com massa específica de 101 kg/m^3 é a mais eficiente para o estudo de caso aqui desenvolvido.

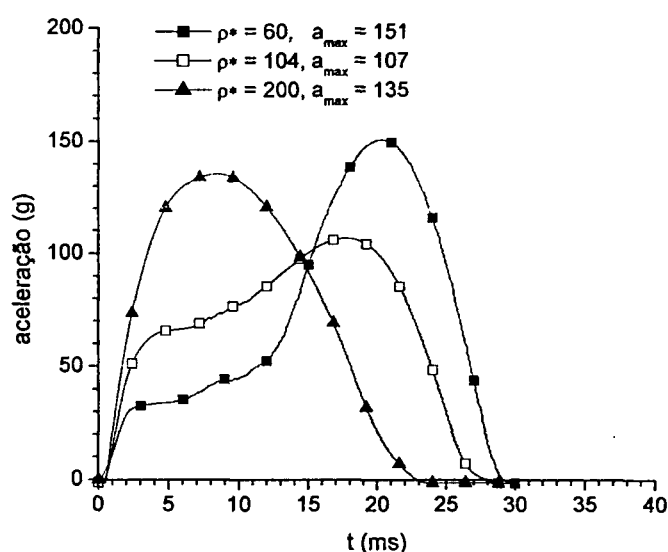


Figura 56. Acelerações no impacto – simulação numérica

Nas Figs. 57 a 60 são apresentadas, para cada densidade estudada, as curvas do ensaio de queda-livre e da simulação numérica; na Tabela 10, faz-se uma comparação entre os respectivos picos de aceleração.

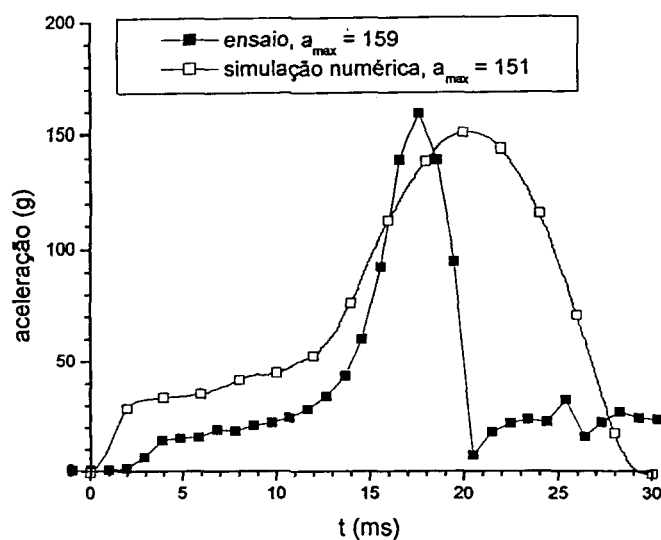


Figura 57. Acelerações durante o impacto, para espuma de massa específica 41 (ensaio) e 60 kg/m³ (simulação).

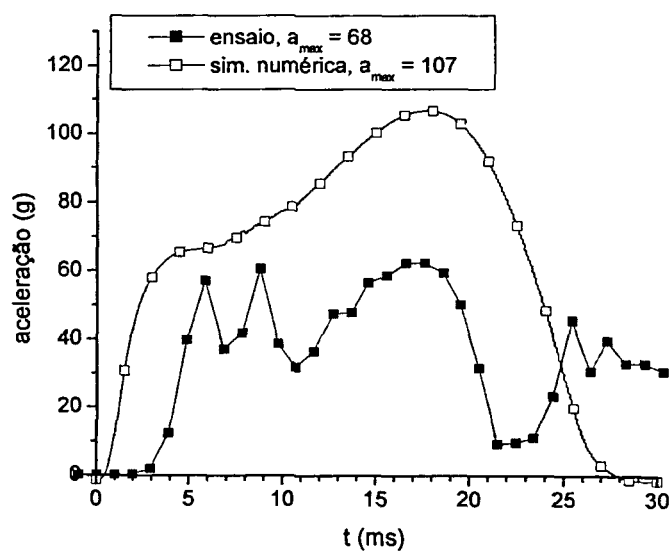


Figura 58. Acelerações durante o impacto, para espuma de massa específica 101 (ensaio) e 104 kg/m³ (simulação).

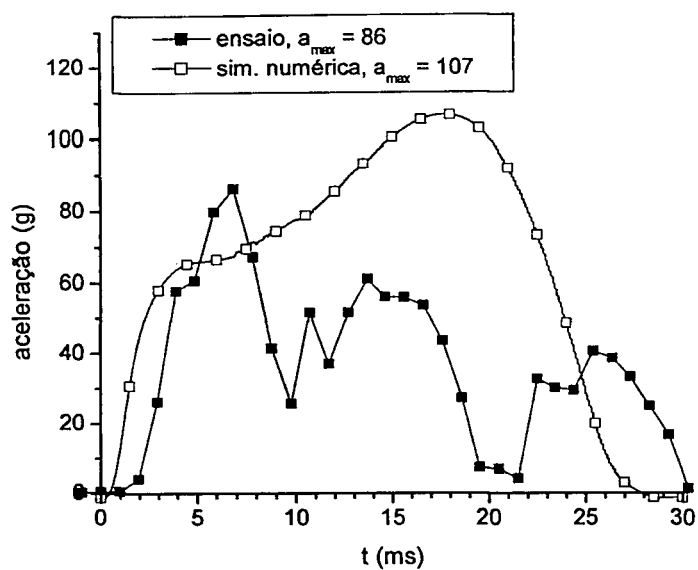


Figura 59. Acelerações durante o impacto, para espuma de massa específica 117 (ensaio) e 104 kg/m^3 (simulação).

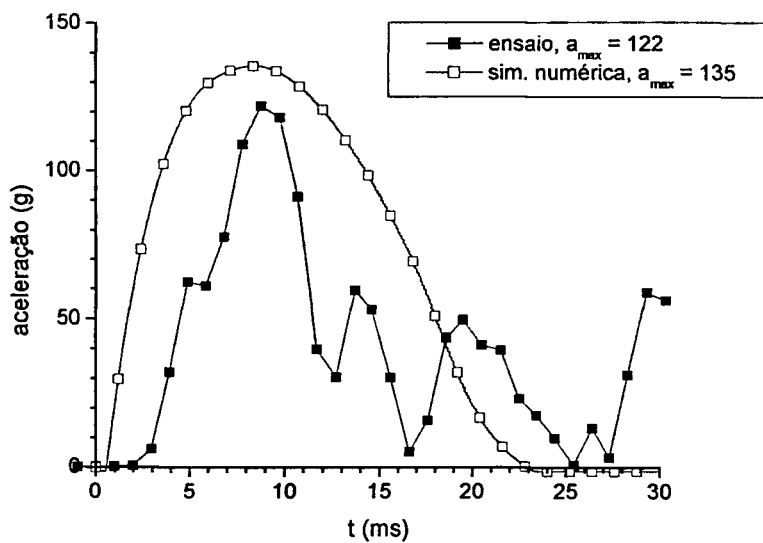


Figura 60. Acelerações durante o impacto, para espuma de massa específica 225 (ensaio) e 200 kg/m^3 (simulação).

Tabela 10. Desacelerações máximas

massa específica (respectivamente, no ensaio e na simulação) (kg/m ³)	acel _{max} simulação numérica (g)	acel _{max} ensaio de queda-livre (g)	diferença (%)
41 e 60	151	159	-5
101 e 104	107	68	57
117 e 104		86	24
225 e 200	135	122	11

5 DISCUSSÃO

Uma das constatações mais relevantes que se pode fazer à luz dos resultados dos experimentos descritos no capítulo anterior é que a espuma de poliuretano obtida a partir do óleo de mamona apresenta comportamento similar àquele das espumas da indústria petroquímica. Este fato, observado nos ensaios realizados para caracterização da espuma (compressão uniaxial, hidrostático e de impacto) é importante ao lembrar-se que este material ainda não havia sido pesquisado anteriormente sob o ponto de vista da engenharia estrutural, não havendo portanto, dados que legitimassem, para este material, o emprego de métodos para avaliação da capacidade de absorção de energia (por exemplo, o método do fator de Janssen) e dos modelos constitutivos originalmente desenvolvidos para as espumas petroquímicas.

Apesar da similaridade observada, foram verificados alguns aspectos divergentes no comportamento dos dois tipos de espuma durante a deformação. Quanto ao grau de isotropia apresentado, ainda que ambas apresentem variação de resistência nas direções paralela e perpendicular ao crescimento, foi observada uma inversão no comportamento da tensão de platô σ_{pl} nos dois casos. Para a espuma estudada no presente trabalho, σ_{pl} é maior na direção de crescimento da espuma do que na direção perpendicular ao crescimento apenas para espumas com massa específica de até 200 kg/m³. Para a espuma petroquímica usada como comparação – desenvolvida por uma empresa norte-americana (GENERAL PLASTICS, 1993) e estudada por Maji et al. (1995), σ_{pl} apresenta maiores valores para espumas até 200 kg/m³ quando estas são solicitadas paralelamente a sua direção de expansão livre e o oposto para valores mais altos.

Conforme mostrado na seção 3.3, pg. 64, e confirmado pelos ensaios de queda-livre realizados, a tensão de platô é um parâmetro de grande influência na efetiva proteção oferecida pelo amortecedor de impacto ao corpo principal da embalagem. Daí a importância de se conhecer com precisão a tensão de platô da espuma que se vai utilizar em determinada embalagem e também a variação deste parâmetro segundo a direção de aplicação do esforço. Para espumas com

massa específica próxima a 200 kg/m^3 , cujo grau de anisotropia é pequeno, o conhecimento da direção de aplicação do esforço é irrelevante. Para as demais, o projeto da embalagem deve levar em consideração tensões de platô mínima e máxima, correspondentes às direções de crescimento paralela ou perpendicular. Estes limites devem estar refletidos nos fatores de segurança a serem adotados durante o projeto.

Os resultados dos ensaios de queda-livre realizados com protótipos de embalagens fornecem informações importantes para estabelecimento de uma metodologia para o projeto de amortecedores de impacto, na qual os valores de aceleração obtidos são comparados com a fragilidade dos componentes da embalagem.

Conforme descrito anteriormente, fragilidade é a máxima aceleração (expressa em termos de aceleração gravitacional, g) a que determinado componente pode ser submetido sem sofrer danos. Sendo um parâmetro empírico, a fragilidade é determinada submetendo-se o componente a uma série de impactos (ou desacelerações) de severidade crescente, até determinar-se o nível de desaceleração mínimo que não lhe cause danos.

Muitas vezes, a fragilidade de um produto comercial é determinada pelo fabricante. Para um componente em desenvolvimento, sua fragilidade pode ser estimada por similaridade com outros produtos de mesmo tipo. A Tabela 11 apresenta, como ilustração, a fragilidade de alguns grupos de produtos comerciais mais freqüentemente transportados.

Tabela 11. Fragilidade de alguns produtos freqüentemente transportados (DOW, 2002)

Categoria segundo nível de robustez	Aceleração máxima permitida (g)	Exemplos de itens da categoria
Extremamente sensível	15 – 25	Altímetros de aeronaves, discos rígidos de computador
Muito sensível	25 – 40	Aparelhos médicos para diagnóstico, equipamentos de raios-X
Sensível	40 – 60	Monitores de computador, impressoras, máquinas de datilografia elétricas, caixas registradoras
Moderadamente sensível	60 – 85	Aparelhos de som, drivers de disquete
Moderadamente robusto	85 – 115	Aparelhos domésticos, móveis
Robusto	acima de 115	Serras de carpintaria, máquinas de costura, ferramentas mecânicas

Segundo a classificação acima, o corpo principal dos protótipos aqui testados é, por similaridade, um componente robusto. Contudo, é importante destacar que, ainda que as espumas de 41 e 225 kg/m³ tenham transmitido esforços suportados somente por itens com este nível de robustez, as espumas de 101 e 117 kg/m³ são adequadas também para a proteção de embalagens moderadamente sensíveis. Embalagens contendo recipientes de vidro ou plástico provavelmente pertencem a esta categoria, mas isto deve ser confirmado empiricamente.

Os resultados dos ensaios de queda-livre servem também para confirmar a adequação do método do fator de Janssen como ferramenta para escolha inicial da densidade de espuma que resultasse em maior eficiência de absorção de energia. As curvas *J* obtidas para as densidades submetidas aos ensaios de impacto – cujos fatores *J* mínimos foram interpolados na Figura 46, pg. 96 – indicaram a espuma de massa específica de 101 kg/m³ como a mais eficiente para o estudo de caso realizado; nos ensaios de queda-livre, realizado

com espumas de massas específicas iguais a 41, 101, 117 e 225 kg/m³, as acelerações máximas registradas foram, respectivamente, 159, 68, 86 e 122 g.

Os resultados obtidos na simulação numérica, tanto referentes à duração do impacto quanto ao pico de aceleração, permitiram comprovar a robustez do modelo de espuma implementado no código de elementos finitos utilizado. Ainda que no caso da embalagem com amortecedor preenchido com espuma de massa específica 101 kg/m³ tenha sido observada uma diferença significativa nos valores do pico de aceleração – 57 % – quando se compara com os resultados experimentais, a mesma tendência observada nos ensaios de queda-livre repetiu-se na simulação. Ou seja, a espuma com densidade próxima à ideal – conforme previsão do método do fator de Janssen – apresentou o menor valor de pico de aceleração (107 g), seguido da espuma mais densa (135 g), tendo a espuma de menor densidade resultado no maior valor de pico de aceleração, 151 g.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Descreveu-se neste trabalho o estudo realizado para o estabelecimento de uma metodologia para avaliação do uso de materiais celulares em amortecedores de impacto de embalagens para transporte de materiais radioativos. Esta pesquisa integrou as tarefas de escolha do material, incluindo estudo de sua microestrutura e determinação de suas propriedades físicas de interesse, realização de um ensaio de queda-livre de embalagem normalizado, uso de metodologia simplificada para escolha da densidade da espuma usada nos protótipos de embalagem e implementação computacional do ensaio realizado.

Três grandes áreas tecnológicas foram abrangidas neste estudo: análise de tensões, engenharia de materiais e engenharia nuclear.

A contribuição original nas duas primeiras áreas vincula-se sobremaneira ao material pesquisado. A espuma de poliuretano à base do óleo de mamona é um material pouco pesquisado em nível mundial sob o ponto de vista de suas características estruturais, em que pese ser cada vez mais empregado em produtos industriais (por exemplo, na indústria automobilística e de embalagens de transporte de produtos sensíveis).

Com base nos resultados obtidos e na discussão anterior, as seguintes conclusões e recomendações podem ser formuladas.

6.1 Quanto ao material escolhido

A espuma de poliuretano à base do óleo de mamona apresenta as mesmas características de comportamento da espuma obtida tradicionalmente da indústria petroquímica, ainda que alguns aspectos divergentes na resposta às solicitações existam. Devido a sua baixa anisotropia, facilidade de confecção, disponibilidade no mercado local, baixo custo e, acima de tudo, boa capacidade de absorção e dissipação de energia durante eventos de impacto, a espuma estudada é um material adequado para uso como enchimento de amortecedores de impacto para proteção de embalagens para transporte de materiais radioativos. Uma vantagem adicional que apresenta sobre a espuma petroquímica é de natureza ambiental, por ser sua matéria-prima obtida a partir de uma fonte

renovável – a mamona – e, além disto, não ser utilizado o gás CFC em seu processamento. A análise de sua microestrutura revela que suas células têm formato esférico, são fechadas e conectam-se a várias células vizinhas. O tamanho médio das células é de 600 μm para a espuma de massa específica 40 kg/m^3 , 160 μm para a espuma de massa específica 165 kg/m^3 e 120 μm para a espuma de massa específica 277 kg/m^3 . Em desenvolvimentos futuros, o processo de confecção da espuma deve ser aprimorado para se obter um material com maior qualidade e reprodutibilidade de propriedades. Algumas não-conformidades foram observadas nos enchimentos dos amortecedores, como pequenas trincas e dispersão de até 17% nos valores de massa específica (em um dos protótipos ensaiados, a espuma utilizada, com massa específica nominal de 100 kg/m^3 , apresentou um valor real de 117 kg/m^3). Outra linha de pesquisa possível, de grande interesse na proteção de embalagens de transporte de material radioativo, é a adição de retardantes de fogo durante a confecção da espuma; a influência da incorporação deste retardante nas propriedades macroscópicas da espuma e em sua microestrutura deve ser cuidadosamente avaliada.

6.2 Quanto à caracterização estrutural do material

As conclusões desta seção aplicam-se às espumas dentro do intervalo de densidade estudado, ou seja, com massa específica entre 41 e 326 kg/m^3 .

Quando submetida a esforços de compressão uniaxial quase estáticos, à compressão hidrostática ou a impactos compressivos suficientemente grandes, a espuma estudada deforma-se segundo três regimes sucessivos bem delimitados: elástico, plástico com encruamento e adensamento. O módulo de elasticidade, a tensão média durante o regime plástico (denominada tensão de platô, σ_{pl}) e a energia específica absorvida aumentam com a densidade da espuma. O material apresenta anisotropia, configurada pela variação de sua resistência segundo a direção de aplicação do esforço de compressão com relação à direção de maior expansão durante sua confecção (chamada direção paralela ao crescimento). Porém, espumas com massas específicas próximas a 200 kg/m^3 são praticamente isotrópicas. Finalmente, esse material apresenta sensibilidade à taxa de deformação, da seguinte maneira: quando o parâmetro de comparação é a tensão de platô, σ_{pl} , este se apresenta menor para baixas taxas

de deformação para espumas com massa específica até 200 kg/m^3 e maior para espumas mais densas, independentemente da direção de aplicação do carregamento; ao se comparar a energia específica absorvida, U , observa-se que, se o esforço é aplicado em direção coincidente com a direção paralela ao crescimento da espuma, U é menor na deformação a baixas taxas também até o valor de massa específica de 200 kg/m^3 ; porém, quando o esforço se dá na direção perpendicular, U é maior em situações de impacto para toda a faixa de densidade estudada. Em futuros trabalhos, deve-se procurar esclarecer esta aparente singularidade. Sugere-se também que o banco de dados sobre as propriedades deste material seja ampliado com a realização de outros ensaios, como tração ou cisalhamento, e também repetindo-se os ensaios já realizados sob diferentes temperaturas, a fim de estudar a influência desse parâmetro sobre as propriedades de interesse. Outra área potencial de pesquisa é o estudo da resistência dessa espuma à radiação, ressaltando-se, porém, que os níveis de radiação na superfície das embalagens é limitado por norma a valores relativamente baixos. A degradação de polímeros é mais importante – e mais pesquisada – quando se pretende empregar o polímero sólido como matriz para incorporação de rejeitos radioativos.

6.3 Quanto ao método simplificado para escolha preliminar da densidade da espuma

O método do fator de Janssen foi o esquema adotado para determinação preliminar da densidade mais adequada para a espuma a ser usada no estudo de caso desenvolvido. Sendo um método simples – que aponta o ponto de minimização da tensão de platô para dado valor de energia específica absorvida, para cada densidade – é uma ferramenta robusta, o que é comprovado pelo acerto da previsão de densidade feita com base neste método. Recomenda-se, para futuras pesquisas, que os outros métodos simplificados mencionados neste trabalho sejam também implementados.

6.4 Quanto ao ensaio de queda-livre

As conclusões desta seção são válidas para as condições do ensaio realizado, ou seja, queda de um objeto de 500 kg de massa, liberado em queda-livre de uma altura de 9 metros .

O estudo de caso de interesse na área nuclear consistiu na realização do ensaio de queda-livre normalizado, no qual o protótipo de embalagem é liberado da altura de 9 metros, na posição vertical, sobre uma plataforma rígida e de grande massa. Para ser aprovada, a embalagem não deve sofrer vazamentos ou apresentar significativo aumento de seu nível de radiação superficial. Esse tipo de avaliação, porém, não pertence ao escopo desta pesquisa, que se preocupou em avaliar o comportamento da espuma utilizada como enchimento do amortecedor de impacto; o parâmetro tomado como referência para isto foi a desaceleração sofrida pelo protótipo no momento do impacto. Os resultados obtidos confirmaram que, conforme previsto pelo método do fator de Janssen, a espuma com massa específica de 101 kg/m^3 é a mais eficiente na absorção de energia durante o impacto, tendo apresentado o menor pico de aceleração. Em desenvolvimentos futuros, deve-se submeter os protótipos a ensaios em outras posições de queda, como as posições inclinada ou horizontal. Neste último caso, um amortecedor superior deverá ser acrescentado ao protótipo.

6.5 Quanto à simulação numérica

O ensaio de queda-livre foi simulado numericamente em códigos computacionais de elementos finitos. A espuma de poliuretano estudada foi implementada por meio de um modelo de espuma compactável, adequado para caracterização de materiais bifásicos rígidos que apresentam redução de volume quando submetidos à compressão. Os resultados obtidos mostram que o método de elementos finitos é uma ferramenta de apoio válida no estudo do comportamento de espumas submetidas ao impacto. Esta avaliação foi feita comparando-se a duração do impacto e o nível máximo de desaceleração obtidos na simulação com os resultados registrados no ensaio de queda-livre, quando se observa que ambos descrevem resultados qualitativamente similares. Contudo, a tentativa de simulação da espuma de 41 kg/m^3 utilizando o modelo adequado – modelo para espuma de célula fechada (*closed cell foam model*) – resultou em deformações muito grandes que, por sua vez, originaram inconsistências numéricas e a interrupção da execução do programa. Em trabalhos futuros, devem ser dirigidos esforços para superação desta limitação, sugerindo-se inclusive a utilização de outros códigos computacionais de elementos finitos que tenham implementados modelos para espumas poliméricas.

6.6 Quanto à facilidade de implementação da metodologia

Nesta pesquisa se propôs o estabelecimento de uma metodologia para avaliação do uso de materiais celulares em amortecedores de impacto de embalagens para transporte de materiais radioativos. Conforme apresentado nas discussões e conclusões anteriores sobre cada um de seus passos, a metodologia mostrou-se consistente, permitindo que um material celular até então desconhecido sob o ponto de vista estrutural fosse adequadamente caracterizado e utilizado de forma eficiente na proteção contra impactos de uma embalagem de transporte na área nuclear.

É importante, contudo, que esta metodologia seja ainda versátil e de fácil implementação, de maneira a ser válida para diversos materiais celulares e diferentes tipos de embalagem. A esta conclusão também se chega ao se examinarem os passos a serem tomados ao implementá-la em um caso prático.

O primeiro parâmetro a ser determinado é a fragilidade dos componentes da embalagem (sistema de contenção, mecanismos de vedação e fechamento, etc), ou seja, a máxima desaceleração – expressa em acelerações gravitacionais, g – a que estes podem ser submetidos sem sofrerem danos. Existem duas maneiras de se determinar a fragilidade de um componente: i) por similaridade com outros componentes para os quais a fragilidade já está determinada; ii) através de ensaios de impacto de severidade crescente, até determinar-se o nível de desaceleração mínimo que não lhe cause danos.

O passo seguinte é construir-se as curvas do fator de Janssen J para todas as densidades de espumas estudadas, obtidas a partir de curvas tensão-deformação volumétrica de ensaios de impacto. É recomendável que se construa, por meio da interpolação dos pontos de J mínimos das curvas anteriores, uma curva de referência, no espaço $U-\rho$, cujos pontos determinam a aplicação de mais eficiência para qualquer densidade de espuma.

O próximo passo é estabelecer as dimensões do amortecedor e a densidade de espuma mais eficiente. Esses dois parâmetros são determinados de forma interativa. Faz-se uma primeira previsão dimensional do amortecedor – e normalmente se deseja minimizar seu volume e peso –, com o que se determina o volume útil de espuma, isto é, o volume da porção de espuma que efetivamente absorverá a energia durante o impacto (quase sempre o volume útil é tomado

como sendo o volume de espuma sob a projeção vertical do corpo da embalagem). Conhecendo-se este dado e a energia potencial da embalagem – função da massa da embalagem e da altura de queda –, determina-se a energia específica absorvida, U . Entrando-se no gráfico das curvas J (ou no gráfico da curva de referência supracitada), encontra-se a densidade mais eficiente.

É sempre desejável utilizar-se uma espuma de densidade disponível comercialmente; no caso da espuma estudada nesta pesquisa, oferecida por um fornecedor nacional, as espumas com massas específicas nominais de 40, 100 e 200 kg/m³ são as mais produzidas (espumas de densidades diferentes podem ser produzidas sob demanda, a um custo mais alto). Em um processo iterativo, podem-se refazer os passos anteriores, alterando-se as dimensões do amortecedor – dentro das restrições impostas, por exemplo, por tipo de veículo, dimensões de portas de acesso a galpões de armazenamento – para que a espuma de densidade comercialmente disponível mais próxima seja a mais eficiente para a aplicação em tela.

A etapa que se segue é a realização de ensaios de queda-livre com protótipos, em escala natural ou reduzida. A norma faculta o uso de cálculos (simulação numérica, por exemplo) para demonstração de conformidade com os requisitos de projeto, desde que estes sejam confiáveis e conduzam a resultados conservadores. Contudo, normalmente os resultados dos ensaios reais são considerados prioritariamente durante a avaliação de uma embalagem, sendo os cálculos tomados como informação subsidiária de apoio.

Cumprе destacar, finalmente, a importância da pesquisa na terceira área – engenharia nuclear –, configurada ao observar-se que não existe até o momento, em que pese o estágio maduro da indústria nuclear no Brasil, uma embalagem licenciada para o transporte de materiais radioativos com alta atividade que tenha sido desenvolvida no país. Conforme explicitado ao longo do corpo desta tese, estas embalagens, denominadas do Tipo B nas normas de transporte de materiais radioativos (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 1988, e AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA, 1996), devem satisfazer requisitos de projeto severos, que envolvem sua submissão a ensaios mecânicos e térmicos exigentes. O desenvolvimento no país de um componente desta natureza se configura como uma oportunidade para que as equipes do setor nuclear envolvidas nas áreas de desenvolvimento de

embalagens e de licenciamento se qualifiquem e interajam em um nível apropriado, muito premente, embora ainda não implementado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ADINA R&D INC. **ADINA – A finite element program for automatic dynamic incremental nonlinear analysis**. Watertown, MA, 1987 (ARD 87-1).
- 2 AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. **Regulations for the safe transport of radioactive materials**. Vienna: IAEA, 1996. (Safety standards series, ST-1)
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1621-73**: compressive strength of rigid cellular plastics. In: Annual book of ASTM standards. Philadelphia, 1993. v. 08.01.
- 4 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1596-78a**: shock-absorbing characteristics of package-cushioning materials. In: Annual book of ASTM standards. Philadelphia, 1990. v. 15.09.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-273-61(reapproved 1988)**: Shear test in flatwise plane of flat sandwich construction or sandwich core. In: Annual book of ASTM standards. Philadelphia, 1990. v. 15.03.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1623-78**: tensile and tensile adhesion properties of rigid cellular plastics. In: Annual book of ASTM standards. Philadelphia, 1990. v. 08.01.
- 7 ANSYS, INC. **Ansys user's manual**, version 5.3. Houston, 1996.
- 8 AQUARO, D.; FORASASSI, G. Analysis of the behaviour under impact loads of a shell-type shock absorber for LWR spent fuel transport packaging. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PACKAGING AND TRANSPORTATION OF RADIOACTIVE MATERIALS, 7, 1983, New Orleans. **Proceedings...** Knoxville: ORNL, 1983. p. 1584-1590.
- 9 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8082** : espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmica: resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.
- 10 AUTODESK, INC. **AutoCAD 2000** : user's manual. EUA, 1999.
- 11 BRASIL. Lei 10.308, de 20 de novembro de 2001. Dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 21 nov. 2001.
- 12 BODNER, S. R.; PARTOM, Y. Constitutive equations for elastic-viscoplastic strain-hardening materials. **Journal of Applied Mechanics**, v 42, n. 2 ,p. 385-389, June 1975.
- 13 CANADÁ. Canadian Nuclear Safety Commission. **Radioactive material type B(U) package design approval certificate no. CDN/1002/B(U)**. REV. 18, Canadá, 2001.

- 14 CARRUTHERS, J. J. Rigid polyurethane foam as an energy absorbing core for composite components manufactured by resin transfer moulding (RTM). 2. Prediction of properties and validation of constitutive models, *Cell. Polym.* v. 16, n. 1, p. 14-34, 1997.
- 15 CHANG, F. S.; SONG, Y.; LU, D. X.; DESILVA, C. N. Unified constitutive equations of foam materials. *Journal of Engineering Materials and Technology*, v. 120, p. 212-217, July 1998.
- 16 COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-NE-5.01: *transporte de materiais radioativos*. Rio de Janeiro: CNEN, 1988.
- 17 COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. *Survey of the existing literature in the field of shock-absorbing materials with a view to subsequent adaptation of plastic deformation codes*: phase 1. Bruxelas: Transnubel, 1985. (EUR 10107 EN)
- 18 CRAMER, S. M.; HERMANSON, J. C.; MCMURTRY, W. M. *Characterizing large strain crush response of redwood*. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1996. (SAND-96-2966).
- 19 DIERSCH, R.; WEISS, M.; DREIER, G. Investigation of the impact behaviour of wooden impact limiters. *Nuclear Engineering and Design*, Amsterdam, v. 150, p.341-348, 1994.
- 20 DOMAN, M. J. *Evaluation of a bi-directional aluminum honeycomb impact limiter design*. West Mifflin: Bettis Atomic Power Laboratory, 1993. (WAPD-T-3093).
- 21 DOW CHEMICAL COMPANY. Technology Center. Performance foams: package design guide. Disponível em: <<http://www.dow.com/perffoam/tech/design/step1.htm>>. Acesso em: maio de 2002.
- 22 DUFFEY, T. A.; GLASS, R. E.; McCONNELL, P. *Characterization of impact-limiting material*. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1992. (SAND-92-0773).
- 23 EUA. Department of Energy. Center for Environmental Management Information. *Transportation packaging quick facts*. Rev. 1999. Disponível em: <<http://www.em.doe.gov>>. Acesso em: maio de 2002.
- 24 EUA. Nuclear Regulatory Commission. *Certificate of compliance for radioactive material packages*. Package model NNFD-10. Washington, 2001.
- 25 GENERAL PLASTICS MANUFACTURING CO. *General plastics last-a-foam® FR-3700 for crash & fire protection of nuclear material shipping containers*. Tacoma, 1993.
- 26 GIBSON, L.; ASHBY, M. F. *Cellular solids*: structure and properties. Oxford: Pergamon, 1988.
- 27 GLASS, R. E.; FRILEY, J. R.; OBATA, H.; NAKAE, T.; ITOH, M.; RASMUSSEN, P. *Structural code benchmark: impact response resulting from the regulatory nine-meter drop*. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1984. (SAND-84-2042C).

- 28 GOODS, S. H.; NEUSCHWANGER, C. L.; HENDERSON, C.; SKALA, D. M. ***Mechanical properties and energy absorption characteristics of a polyurethane foam***. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1997. (SAND-87-8490).
- 29 GORDON, G. A. ***Testing and approval, impact strength and energy absorption***. PIRA, 1974.
- 30 GRÃ-BRETANHA. Department of the Environment, Transport and the Regions. ***Certificate of approval of package design for the carriage of radioactive materials***. Londres, 2000. Ref. GB/0924BP/B(U).
- 31 HALL, C. ***Polymer materials***; an introduction for technologists and scientists. 2. ed. New York: J.Wiley, 1989.
- 32 HAMMOND, C. R.; CARLEY, T. G. Appendix A: a survey of materials and procedures for design of impact limiters in radioactive material transport. In: L. B. Shappert (Ed.). ***The radioactive materials packaging handbook – design, operation and maintenance***. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1998. (ORNL/5003). 1 CD-ROM.
- 33 HEARLE, J. W. S. ***Polymers and their properties***. Chichester: Ellis Horwood, 1982.
- 34 HEPBURN, C. The engineering properties of polyurethane and other cellular polymer systems. ***Cell. Polym***, v. 16, n. 4. p 251-270, 1997.
- 35 HOADLEY, B. ***Identifying wood***. Newtown : Taunton, 1990.
- 36 JAIS, M. ***Instrumentierter Fallversuch mit Abfall-Transportbehälter Typ SAB/G 500 I mit Stoßdämpfer*** Teste de queda instrumentado em embalagem para rejeitos tipo SAB/G 500 I com amortecedor de impacto. Berlim: Bundesanstalt für Materialprüfung, 1984. (Versuchsbericht 2538)
- 37 JAPÃO. Ministry of Economy, Trade and Industry. ***Certificate of approval of package design for the transport of radioactive materials***. Identification mark J/79/AF-85.Rev. 1. Tóquio, 2001.
- 38 LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION. ***LS-DYNA version 950: user's manual***. Livermore, 1999.
- 39 MAITI, S. K., GIBSON, L. J., ASHBY, M. F. Deformation and energy absorption diagrams for cellular solids. ***Acta Metall.*** v. 32, n. 11, p. 1963-1975, 1984.
- 40 MAJI, A. K.; NEILSEN, M. K.; GLASS, R. E.; SATPATHI, D. ***Dynamic testing of impact limiter materials*** (polyurethane foams and aluminum honeycomb). SNLWERC, Albuquerque, [s.d.].
- 41 MAJI, A. K.; SCHREYER, H. L.; DONALD, S.; ZUO, Q.; SATPATHI, D. Mechanical properties of polyurethane-foam impact limiters. ***Journal of Engineering Mechanics***, v. 121, n. 4, p. 528-540, Apr. 1995.
- 42 MEINECKE, E. A.; CLARK, R. C., ***Mechanical properties of polymeric foams***. Westport: Technomic, 1973.
- 43 MELVIN, J. W.; ROBERTS, V. L. Compression of cellular plastics at high strain rates. ***Journal of Cellular Plastics***, p. 97-100, March/April 1971.

- 44 MENGES, G.; KNIPSCHILD, F. Stiffness and strength – rigid plastic foams. In: HILYARD, N. C. (Ed.). **Mechanics of cellular plastics**. New York, NY: McMillan, 1982. cap. 2A. p. 27-72.
- 45 MICHELS, L.; BRACEY, W. The TN-MTR packaging. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PACKAGING AND TRANSPORTATION OF RADIOACTIVE MATERIALS, 12. 1998, Paris. **Proceedings....**Paris: Société Francaise d'Energie Nucleaire, 1998. p. 397-402.
- 46 MICROCAL SOFTWARE INC. **Origin version 6.0: user's manual**. Northampton, 1999.
- 47 MOURÃO, R. P. **Miss  o do engenheiro Rog  rio Pimenta Mourão   República Federal da Alemanha**. Belo Horizonte: CDTN, 1987 (DETC-CN-002/87).
- 48 NAGY, A.; KO, W. L.; LINDHOLM, U. S. Mechanical behavior of foamed materials under dynamic compression. **Journal of Cellular Plastics**, p. 127-134, May/June 1974.
- 49 NATIONAL INSTRUMENTS, INC. **LABVIEW, version 5.1**:EUA, 1999.
- 50 NEILSEN, M. K.; MORGAN, H. S.; KRIEG, R. D. **A phenomenological constitutive model for low density polyurethane foams**. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1987. 83 p. (SAND-87-2927).
- 51 NEILSEN, M. K.; KRIEG, R. D.; SCHREYER, H. L. A constitutive theory for rigid polyurethane foam. **Polymer Engineering and Science**, v. 35, n. 5, p. 387-394, Mid-March 1995.
- 52 NICHOLS, J.; COHEN, M.; JOHNSON, R. Benchmarking of LS-DYNA for use with impact limiters. In: WASTE MANAGEMENT 2001, Tucson. **Proceedings...** WM Symposia, 2001.
- 53 PATEL, M. R., FINNIE, I. Structural features and mechanical properties of rigid cellular plastics. **Journal of Cellular Plastics**, v.5, n.4, p.909-932, Dec. 1970.
- 54 POLY-URETHANE INDÚSTRIA E COM  RCIO LTDA. **Informativo Poly-Urethane (not  cias e tecnologia)**. Belo Horizonte, ano 2, n. 1, 2001.
- 55 RAMON, O., MIZRAHI, S. MILTZ, J. Mechanical properties and behavior of open cell foams used as cushioning materials. **Polymer Engineering and Science**, v. 30, n. 129, p. 197-201, Feb. 1990.
- 56 RAMON, O., MIZRAHI, S. MILTZ, J. Merits and limitations of the drop and shock tests in evaluating the dynamic properties of plastic foams. **Polymer Engineering and Science**, v. 34, n. 18, p. 1406-1410, Sept. 1994.
- 57 RIBBANS, D. J.; BOAG, J. M.; SAUV  , R. G.; SMITH, S. M. Development of transportation packaging for Ontario Hydro's dry storage container (DSC). In: ANNUAL CONFERENCE OF THE CANADIAN NUCLEAR SOCIETY, 15, 1994, Montreal. **Proceedings...** Toronto: Canadian Nuclear Society. 20p.
- 58 RICHINS, W. D. **Impact and structural analysis of the INEL 55 gallon recycled shielded storage container**. Idaho Falls: Lockheed Idaho Technologies ,1996. 63 p.
- 59 RUSCH, K. C. Load-compression behavior of flexible foams. **Journal of Applied Polymer Science**, v.13, p.2297-2311, 1969.

- 60 RUSCH, K. C. Impact energy absorption by foamed polymers. *Journal of Cellular Plastics*, v.7, p.78-83, Mar./Apr., 1971.
- 61 SCHMIDT, R. **Wood-adhesive interactions**. Apresentação em PowerPoint. (Obtida pela Internet em 16 jul 2002).
- 62 SHERWOOD, J. A., FROST, C. C., Constitutive modeling and simulation of energy absorbing polyurethane foam under impact loading. *Polymer Engineering and Science*, v. 32, n. 16, p. 1138-1146, Aug. 1992.
- 63 SIMCHUK, J. D. The design and use of the Model N-55; an individual 55 gallon drum type B overpack. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PACKAGING AND TRANSPORTATION OF RADIOACTIVE MATERIALS, 5, 1978, Las Vegas. *Proceedings*.... Sandia National Laboratories: Albuquerque, 1978. p. 315-323.
- 64 SINHA, S. C.; MITCHELL, J. O.; LIM, G. G.; CHOU, C. C. **Constitutive modeling of energy absorbing foams**. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1994. (SAE papers, n. 940880).
- 65 SISLEY, S. E.; McINNES, I. D.; MILLER. Correlation of drop test results with analytical predictions. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, 1995, Las Vegas, . *Proceedings*... La Grange Park: American Nuclear Society, 1995. p.574-576.
- 66 STONE, C. M.; WELLMAN, G. W.; KRIEG, R.D. **A vectorized elastic-plastic power law hardening material model including Luders strain**. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1993.
- 67 STUPAK, P. R. **The effect of geometry and fracture on the energy absorption of polymeric foam**. 1992. 373 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – University of Massachusetts, Amherst, EUA.
- 68 SUGITA, Y.; MOCHIZUKI, S. The development of a toroidal shell-type shock absorber for an irradiated fuel shipping cask. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PACKAGING AND TRANSPORTATION OF RADIOACTIVE MATERIALS, 7, 1983, New Orleans. *Proceedings*... Oak Ridge: ORNL, 1983. 1576-1583.
- 69 THEOCARIS, P. S. Failure modes of closed-cell polyurethane foams. *International Journal of Fracture*, n. 56, p. 353-375, 1992.
- 70 TRIANTAFILLOU, T. C.; GIBSON, L. J. Constitutive modeling of elastic-plastic open-cell foams. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 116, n. 12, p. 2772-2778, Dec.1990.
- 71 WELLMAN, G. W. **Transportation system impact limiter design using rigid polyurethane foam**. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1985. 51 p. (SAND-84-2271).
- 72 WENSKI, E. G.; STINEBAUGH, R. E.; YORK II, A. R. **Properties of 30 lb/ft³ rigid polyurethane foams**. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1997. 8 p. (SAND-97-0120).
- 73 WIESER, B.; MASSLOWISKI. J.-P. Investigations on shock absorbers for Type B packagings. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PACKAGING AND

- TRANSPORTATION OF RADIOACTIVE MATERIALS. 7, 15-20 maio, 1983, New Orleans, LA, EUA. **Proceedings...** Oak Ridge: ORNL, 1983. p. 1569-1575
- 74 WOOLAM, W. E. A study of the dynamics of low energy cushioning materials using scale models. **Journal of Cellular Plastics**, v.4, p.79-83, Feb. 1968.
- 75 ZHANG, J. **Constitutive modeling and optimal design of polymeric foams for crashworthiness**. 1998. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – University of Michigan, Ann Arbor, EUA.
- 76 ZHANG, J. Mechanical selection of foams and honeycombs used for packaging and energy absorption, **Journal of Material Science**, 29, p. 157-163, 1994.

APÊNDICE – Modelo de elementos finitos para simulação numérica de queda de embalagem

1. MODELO GEOMÉTRICO

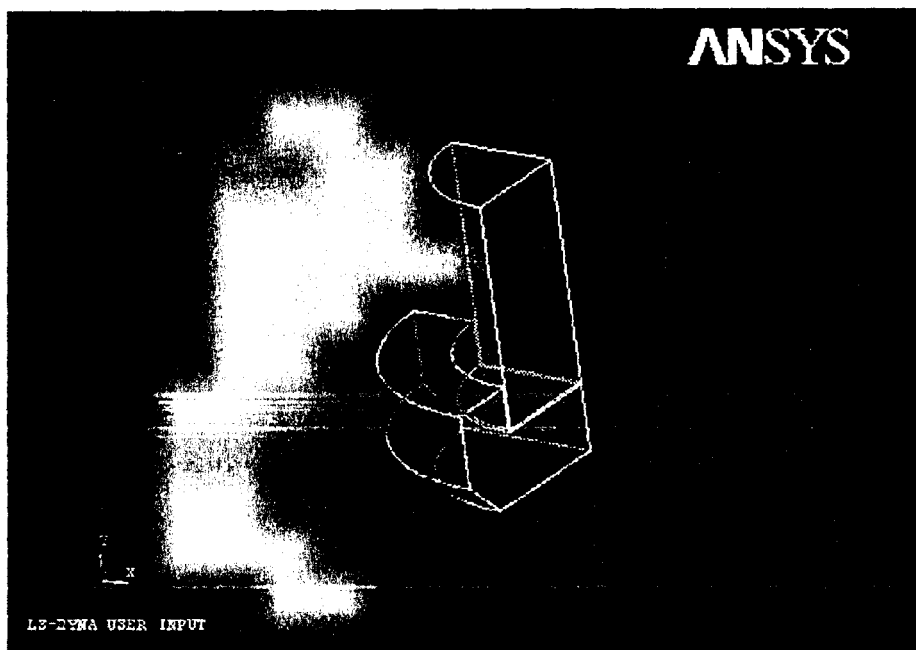


Figura 1- 1. Modelo geométrico para o estudo de caso realizado

Entidades geométricas definidas:

Keypoints:	30
Linhas:	44
Áreas:	19
Volumes:	2

2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

a) Quantidade de entidades definidas:

Nós:	714
Elementos:	1496
Tipos de elementos:	2
Constantes materiais:	2
Propriedades materiais:	3

b) Condições de contorno definidas em:

Nós: 200

Linhas: 28

Áreas: 4

c) Parâmetros materiais definidos:

Parte	Modelo	Parâmetro			Demais parâmetros
		E (Pa)	ν	ρ (kg/m ³)	
Base	Corpo rígido	$2,07 \times 10^{11}$	0,3	7.865	Todos graus de liberdade restringidos
Casca	Plástico cinemático	$2,07 \times 10^{11}$	0,3	7.865	$E_t = 7,63 \times 10^8$ Pa ⁽¹⁾ $\beta = 0$ $C = 40$; $P = 5$
Tambor	Corpo rígido	$2,84 \times 10^9$	0,0	2.300	Graus de liberdade u_x e u_z restringidos.
Espuma ⁽²⁾	Espuma compactável	$6,6 \times 10^6$	0,04	60	Curva σ - ϵ n° 1 $\sigma_{tr} = 3,2 \times 10^4$ Pa $\eta = 0,2$
		$2,2 \times 10^7$	0,09	104	Curva σ - ϵ n° 2 $\sigma_{tr} = 9,7 \times 10^5$ Pa $\eta = 0,2$
		$5,4 \times 10^7$	0,1	200	Curva σ - ϵ n° 3 $\sigma_{tr} = 3,1 \times 10^6$ Pa $\eta = 0,2$

⁽¹⁾ E_t : módulo tangencial; β : parâmetro de encruamento ($0 < \beta < 1$); C , P : parâmetros de Cowper-Symonds (introduzem efeitos da taxa de deformação);

⁽²⁾ São apresentados os parâmetros para simulação das três espumas estudadas.

d) Curvas tensão-deformação usadas como dado de entrada do modelo de espuma

i) Curva nº 1, espuma $\rho^* = 60 \text{ kg/m}^3$

σ	ε
0	0
8,11E+07	0,02436
2,34E+08	0,04872
3,26E+08	0,07308
3,27E+08	0,09744
3,27E+08	0,12179
3,29E+08	0,14615
3,30E+08	0,17051
3,32E+08	0,19487
3,36E+05	0,21923
3,40E+08	0,24359
3,45E+05	0,26795
3,53E+08	0,29231
3,61E+08	0,31667
3,70E+08	0,34103
3,80E+08	0,36538
3,90E+08	0,38974
4,03E+08	0,4141
4,17E+08	0,43846
4,32E+08	0,46282
4,48E+08	0,48718
4,68E+08	0,51154
4,90E+08	0,5359
5,19E+08	0,56026
5,48E+08	0,58462
5,87E+08	0,60897
6,31E+08	0,63333
6,89E+08	0,65769
8,41E+08	0,68205
1,27E+09	0,70641
2,17E+09	0,73077
3,73E+09	0,75513
6,13E+09	0,77949
9,57E+09	0,80385
1,42E+10	0,82821
2,04E+10	0,85256
2,81E+10	0,87692
3,76E+10	0,90128
4,91E+10	0,92564
6,28E+10	0,95

- ii) Curva nº 2, espuma $\rho^* = 104 \text{ kg/m}^3$ (obtida por média aritmética das curvas tensão-deformação para espumas com massas específica de 60 e 147 kg/m^3)

σ	ε
0	0
4,29E+07	0,01
1,44E+08	0,02
3,26E+08	0,03
4,81E+05	0,039
6,60E+08	0,049
7,67E+08	0,058
8,43E+08	0,068
8,99E+05	0,086
9,09E+08	0,113
9,11E+08	0,14
9,23E+05	0,174
9,42E+08	0,215
9,79E+08	0,262
1,03E+09	0,307
1,09E+09	0,351
1,17E+09	0,392
1,28E+09	0,425
1,41E+09	0,451
1,53E+09	0,47
1,70E+06	0,489
2,13E+09	0,528
2,42E+09	0,546
2,77E+09	0,565
3,22E+09	0,584
3,76E+09	0,602
4,44E+09	0,621
5,29E+09	0,639
6,33E+09	0,658
7,62E+09	0,677
9,22E+09	0,695
1,12E+07	0,714
1,37E+10	0,732
1,67E+10	0,751
2,05E+10	0,77
2,51E+10	0,788
3,09E+10	0,807
3,80E+10	0,826
4,69E+10	0,844
5,78E+10	0,863
7,14E+10	0,881
8,82E+10	0,9

- iii) Curva nº 3; espuma $\rho^* = 200 \text{ kg/m}^3$ (obtida por média aritmética das curvas tensão-deformação para espumas com massas específicas de 147 e 253 kg/m^3)

σ	ε
0	0
4,71E+08	0,01
9,36E+08	0,02
1,37E+09	0,03
1,82E+09	0,041
2,26E+09	0,051
2,54E+09	0,061
2,75E+06	0,071
2,85E+09	0,081
2,93E+09	0,091
2,96E+09	0,101
2,99E+09	0,111
3,01E+09	0,122
3,01E+09	0,132
3,03E+09	0,142
3,04E+09	0,152
3,07E+09	0,162
3,09E+09	0,172
3,12E+09	0,182
3,14E+09	0,192
3,15E+09	0,203
3,17E+09	0,213
3,21E+09	0,223
3,26E+09	0,233
3,30E+06	0,243
3,33E+09	0,253
3,36E+09	0,263
3,39E+09	0,273
3,43E+09	0,284
3,48E+09	0,294
3,53E+09	0,304
3,59E+09	0,314
3,66E+09	0,324
3,73E+09	0,334
3,81E+09	0,344
3,89E+09	0,354
3,97E+09	0,365
4,07E+09	0,375
4,18E+09	0,385
4,31E+09	0,395
4,46E+09	0,405
4,63E+09	0,415
4,80E+09	0,425
5,00E+09	0,435
5,24E+09	0,446
5,53E+09	0,456
5,86E+09	0,466
6,23E+09	0,476
6,66E+09	0,486
7,27E+09	0,496
7,92E+09	0,506

8,68E+09	0,516
9,70E+09	0,527
1,12E+10	0,537
1,37E+10	0,547
1,81E+10	0,557
2,53E+10	0,567
3,62E+10	0,577
5,16E+10	0,587
7,29E+10	0,597
1,01E+11	0,608
1,37E+11	0,618
1,82E+11	0,628
2,37E+08	0,638
2,97E+11	0,648
3,56E+08	0,658
4,15E+11	0,668
4,75E+11	0,678
5,34E+11	0,689
5,94E+11	0,699
6,53E+11	0,709
7,13E+11	0,719
7,72E+11	0,729
8,32E+11	0,739
8,91E+11	0,749
9,51E+11	0,759
1,01E+09	0,77
1,07E+09	0,78
1,13E+12	0,79
1,19E+12	0,8

e) Contatos definidos

Entidades em contato		Tipo de contato
Superfície de contato	Superfície alvo	
superfície externa da espuma	superfície interna da casca metálica	<i>Tied node to surface</i> (contato vinculado, nó – superfície)
parte inferior da casca metálica	base indeformável	<i>General node to surface</i> (contato genérico, nó – superfície)
parte superior da casca metálica	corpo rígido	<i>General node to surface</i> (contato genérico, nó – superfície))

Em qualquer uma das 24 possibilidades de contato definidas no código ANSYS/LS-DYNA, são definidas obrigatoriamente uma *superfície de contato* e uma *superfície alvo*, de acordo com os seguintes critérios:

- superfícies planas ou côncavas são definidas como alvo; superfícies convexas como de contato;

- superfícies com malha menos refinadas são definidas como alvo; superfícies com malha mais refinada como de contato.

No contato tipo nó – superfície (usado nas três definições de contato na simulação feita), os nós da superfície de contato penetram a superfície alvo, sendo esta a opção normalmente usada para contatos gerais entre duas superfícies. As duas outras opções são o contato de superfície única (*single surface contact*) e o contato superfície – superfície (*surface to surface contact*).

Duas opções de contato foram usadas na simulação numérica. No contato entre a superfície externa da espuma e a superfície interna da casca metálica, usou-se o contato *vinculado*, que, como a própria denominação sugere, vincula totalmente os nós das superfícies em contato. Esta opção foi escolhida neste caso porque observou-se, após a injeção e cura da espuma, uma total aderência entre esta e o molde metálico do amortecedor de impacto. Para os demais contatos, foi usada a opção de contato *genérico*, que utiliza os algoritmos de contato mais simples entre as opções existentes (e, portanto, rápidos), porém robustos.