

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE CARGAS IMPULSIVAS COM ÊNFASE EM EXPLOSÕES: ESTRATÉGIAS
DE ANÁLISES UTILIZANDO MÉTODOS NUMÉRICOS

por

André Schaan Casagrande

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Abril de 2006.

ESTUDO DE CARGAS IMPULSIVAS COM ÊNFASE EM EXPLOSÕES: ESTRATÉGIAS
DE ANÁLISES UTILIZANDO MÉTODOS NUMÉRICOS

por

André Schaan Casagrande

Engenheiro Mecânico / Engenheiro de Segurança do Trabalho

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Alberto Tamagna

Prof. Ph.D. César Antônio Leal

Prof. Ph.D. Jorge Daniel Riera

Prof. Dr. Roberto Domingo Rios

Prof. Dr. Flavio José Lorini
Coordenador do PROMEC

As tarefas desenvolvidas até este ponto do trabalho resultaram nas seguintes publicações e congressos:

a) Casagrande, A. S., Rios, R. D., 2004. “Análise do Comportamento de Estruturas Laminadas Submetidas à Ação de Cargas de Explosões”, XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, Mendoza, Argentina.

b) Casagrande, A. S., Santiago, G. F., Iturrioz, I., 2004. “Simulação Numérica do Efeito da Explosão de um Gás Inflamável Sobre a Estrutura de um Vaso de Pressão”, XXV CILAMCE - Iberian Latin American Congress on Computational Methods, Recife, Brasil.

c) Casagrande, A. S., Iturrioz, I., 2006. “Propagação de Vibrações em Solo: Comparação de Resultados Numéricos e Experimentais”, XXXII Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, Campinas, Brasil.

Dedico este trabalho à minha Noiva Tatiana,
aos meus Pais Cláudio Fernando e Maria Luiza,
e aos meus irmãos Guilherme (*in Memoriam*),
Daniela e Luciana.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar toda a minha admiração e agradecimento ao professor Ignacio Iturrioz, que foi mais do que um professor, me ajudou a navegar no mar do desconhecido descobrindo novos horizontes, foi realmente um grande amigo.

Agradeço ao apoio incondicional dado pela minha Noiva Tatiana, que teve muita paciência e me ajudou muito, acabando até por entender de explosões e modelos numéricos.

Quero agradecer ainda aos Meus Pais, que são o início de tudo para mim, que são a base da minha personalidade e que sempre me incentivaram e ajudaram.

Às minhas irmãs Daniela e Luciana e ao meu cunhado Alexandre, que participaram e sofreram juntos todos os momentos bons e difíceis destes anos.

À minha futura nova Família Paulo Roberto, Mirian, Junior e Carol, e aos meus tios e tias, padrinhos e madrinhas, primos e primas também pela ajuda e apoio, mesmo a distância.

Aos meus grandes amigos Álvaro, Lúcio, Perrone, Leonardo, Pedro, Conrado e outros com suas respectivas esposas e namoradas pela parceria e amizade verdadeira.

Aos colegas Rubén, Zé, Carla e Fede que me ajudaram muito em todas as fases dessa dissertação, dando importantes contribuições e aportando seus conhecimentos.

Aos professores e colegas do GMap que também ajudaram de alguma forma na minha formação.

Por fim, gostaria de agradecer à UFRGS, ao PROMEC e ao CNPq por todo apoio financeiro e científico, e pela infraestrutura fundamentais para o desenvolvimento dessa dissertação.

RESUMO

A avaliação da solicitação produzida por explosões, assim como da resposta de estruturas, são temas de muito interesse na engenharia atualmente, tanto pela quantidade crescente de acidentes relacionados com explosões quanto pelas ações terroristas muitas vezes vinculadas a estes tipos de ações.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo *explorar técnicas de análise tanto na modelagem da excitação quanto na resposta de estruturas consideradas como alvos*. Para isto, são utilizadas metodologias de diferentes tipos: implementações baseadas em sistema de elementos finitos comerciais como Ansys [2000] e LS-Dyna [2003] e técnicas simplificativas que permitem realizar uma avaliação preliminar.

As aplicações consideradas são indicadas a seguir:

- Análise da Resposta de Estruturas Laminares Submetidas à Ação de Cargas Explosivas: determina-se a pressão produzida por explosivos sólidos a certa distância do epicentro, através de métodos simplificados, determinando a resposta esperada em placas retangulares;
- Efeito da Pressão Interna em Vasos de Pressão (Extintores de Incêndio): comparando resultados numéricos e experimentais verifica-se a influência da pressão interna nas propriedades dinâmicas do sistema;
- Estudo de Um Vaso Esférico de GLP Sob Ação de Uma Carga Explosiva: aplica-se a ação de uma onda explosiva produzida por um gás inflamável pesado sobre uma estrutura de vaso de pressão esférico com fluido e gás em seu interior, determinando sua resposta, avaliando também a influência de diferentes quantidades de líquido e pressão interna na resposta da estrutura;
- Modelamento de uma Camada de Solo / Propagação das Ondas: verifica-se o comportamento da propagação de ondas em um meio elástico, comparando valores encontrados em testes experimentais. Analisa-se numericamente o efeito da inserção de uma valeta na atenuação de tais ondas;
- Simulação Numérica Completa de uma Explosão: modela-se um semi-espaco submetido à ação de um explosivo sólido sobre sua superfície, avaliando os campos de pressão gerados.

Ao final de cada aplicação são apresentadas conclusões parciais obtidas e as possibilidades de trabalhos futuros vislumbrados. Finalmente, conclui-se que as técnicas empregadas para as simulações são extremamente eficientes, considerando conhecidos todos os parâmetros envolvidos em cada modelo. Neste ponto é fundamental o trabalho do engenheiro, utilizando-se de seus conhecimentos técnicos para transformação do evento real em um modelo numérico, considerando e selecionando as simplificações necessárias.

ABSTRACT

The evaluation of the load produced by explosions, and the response of structures are topics of high interest in engineering nowadays. This due to an increasing amount of accidents related with accidental explosions and from terrorist attacks many entailed times with this type of actions.

In this context, the present work aims at *exploring analytical techniques for the modeling of the excitement and the corresponding response of structures*. In order to do this, methodologies of different types are used: implementations based on system of commercial finite elements analysis as Ansys [2000] and LS-Dyna [2003] and, simplified techniques that allow to carry through a preliminary evaluation.

The considered applications are indicated as follows:

- Analysis of the Response of Laminar Structures Submitted to the Action of Explosive Charges: the pressure produced by solid explosives at a certain distance of the epicenter are determined, with the use of elementary methods to corresponding response of rectangular plates is estimated;
- Effect of the Internal Pressure in Pressure Vessels (Fire Extinguishers): comparison of numerical and experimental results, to investigate the influence of the internal pressure in the dynamic properties of the system;
- Study of a Spherical Vessel of LPG under the Action of an Explosive Load: the action of an explosive wave produced by a flammable gas is applied on the structure of a spherical pressure vessel with liquid and gas inside, followed by the study of its structural response. Also the influence of different amounts of liquid and internal pressure in the response of the structure is studied;
- Modeling of a Soil Layer / Propagation of pressure Waves: the behavior of propagation of waves in an elastic medium is verified, and compared to values found in experimental tests. The effect of an presence of a ditch in the attenuation of the mentioned waves is numerically analyzed;
- Complete Numerical Simulation of an Explosion: a semi-space submitted to the action of a solid explosive on its surface is modeled, evaluating the zone of pressure generated.

At the end of each application the partial conclusions obtained are presented and the possibilities for future research to be developed are discussed. Finally, it is concluded that the techniques used for the simulations are extremely efficient, considering known all the parameters involved in each model. Here it is important to mention that the work of the engineer is

fundamental, using his technical knowledge to transform the real event into a numerical model, considering and selecting the necessary simplifications.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	4
1.1. Breve Histórico de Acidentes com Explosões	4
1.2. Conceitos Básicos de Explosões	7
1.3. Função Pressão-Tempo de uma Explosão.....	11
1.3.1. Explosivos Sólidos	14
1.3.2. Explosivos Gasosos.....	15
1.4. Efeito da Explosão nos Seres Humanos.....	18
2. REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE	19
2.1. Modos de Representação da Onda de Choque	19
2.1.1. Método Simplificado.....	19
2.1.2. Outros Métodos de Estimativa da Onda de Choque	21
2.1.3. Método do TNT Equivalente.....	24
2.1.4. Método do Shock Wave – TNO.....	26
2.1.5. Método Multienergia – TNO	27
2.1.6. Programas Computacionais.....	29
2.2. Consideração da Fase Negativa	31
2.3. Reflexão das Ondas de Choque.....	32
2.4. Interação das Ondas de Choque com Corpos.....	33
2.5. Painéis de Vidro	34
2.6. Modelagem Numérica.....	36
2.6.1. Equações de Estado - <i>EOS</i>	36
2.6.2. Formulação Lagrangeana-Euleriana	37
2.6.6. Hourglass.....	38
2.7. Simulação Numérica – Resposta de Estruturas.....	40
2.7.1. Resposta Local ou Global	40
2.7.2. Tipo de Modelo Numérico	40
2.7.3. Carga Atuando ou Vibrações Livres	41
2.7.4. Amortecimento: Quando Considerá-lo?.....	42
2.8. Efeito Sloshing	42
3. PROBLEMAS ABORDADOS NESTE ESTUDO	44
3.1. Análise do Comportamento de Estruturas Laminares Submetidas à Ação de Cargas Explosivas.....	44
3.1.1. Determinação dos Valores de Pressão no Tempo – Planilha Eletrônica	45
3.1.2. Estrutura, Materiais, Condições de Contorno e Carregamento.....	48
3.1.3. Análises e Resultados.....	49
3.1.4. Conclusões Parciais.....	50
3.2. Efeito da Pressão interna em Vasos de Pressão (Extintores de Incêndio).....	52
3.2.1. Descrição da Geometria Utilizada	52
3.2.2. Modelo Numérico / Condições de Contorno.....	54
3.2.3. Análises Numéricas / Resultados Obtidos	54
3.2.4. Medições Realizadas / Resultados Experimentais	55
3.2.5. Conclusões Parciais.....	58
3.3. Modelagem de Vaso Esférico de GLP Sob Ação de uma Explosão.....	59
3.3.1. Descrição do Cenário	59
3.3.2. Determinação da Função de Carga.....	60
3.3.3. Descrição do Modelo Físico da Estrutura	61
3.3.4. Descrição dos Modelos Numéricos.....	62
3.3.5. Resultados de Modos e Freqüências	66

3.3.6.	Estudo da Esfera Considerando Sistema Linear	68
3.3.7.	Análise Explícita considerando sistema não linear físico e geométrico	70
3.3.8.	Conclusões Parciais.....	74
3.4.	Modelagem de uma Camada de Solo / Propagação das Ondas.....	76
3.4.1.	Descrição do cenário:	76
3.4.2.	Descrição do Modelo Numérico / Condições de Contorno	77
3.4.3.	Aplicação da Carga	79
3.4.4.	Medições Experimentais	82
3.4.5.	Calibração e Comparação dos Modelos	83
3.4.6.	Efeito de uma Valeta na Propagação de Ondas Produzidas pela Passagem de um Caminhão.....	85
3.4.7.	Variação da Amplitude dos Deslocamentos ao longo da Profundidade do Solo	87
3.4.8.	Conclusões Parciais.....	89
3.5.	Simulação Numérica Completa de uma Explosão	91
3.5.1.	Definição de Geometria / Materiais	91
3.5.2.	Método utilizado / Considerações e Aproximações Numéricas	92
3.5.3.	Resultados Obtidos.....	93
3.5.4.	Conclusões Parciais.....	99
4.	CONCLUSÕES	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
	APÊNDICE I – Diferentes Equações de PROBIT	109
	APÊNDICE II - Ábacos apresentados por Baker <i>et al.</i> [1983].....	110
	APÊNDICE III - Valores obtidos para aplicação de pressões em esfera de GLP	113
	APÊNDICE IV - Coeficientes Cd.....	115
	APÊNDICE V - Vasos e Esferas de Armazenamento: Alguns Valores Limites	116
	APÊNDICE VI -Velocidade de Partícula	117
	APÊNDICE VII -Vibrações	118
	VII.1. Revisão de Alguns Conceitos.....	118
	VII.1.1. Equação do Movimento	119
	VII.1.2. Propriedades Dinâmicas de um Sistema	120
	VII.1.5. Importância da Freqüência de Excitação	124
	VII.2. Modelagem Numérica	126
	VII.2.1. Método dos Elementos Finitos – <i>MEF</i>	126
	VII.2.2. Análise Estrutural Estática.....	128
	VII.2.3. Análise Modal	128
	VII.2.4. Análise Dinâmica de um Sistema Submetido à Vibrações Forçadas.....	129
	VII.2.5. Não Linearidades	135
	APÊNDICE VIII - Propagação de Ondas em um Meio Elástico.....	136
	VIII.1. Classificação e Características Básicas - Velocidades	136
	VIII.2. Ondas no Solo – Diminuição com a Profundidade ou com a Adição de Valetas.....	139
	APÊNDICE IX -Consideração da Pressão Dinâmica Devida ao Vento	141

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS UTILIZADOS

F – Força

Fr – Frequência

L – Comprimento

M – Massa

N – Número de moles

K – Temperatura

T – Tempo

V – Volume

W – Trabalho

A – Área [**L**²]

a – Velocidade do som no ar [**L** / **T**]

A_e – Área Frontal Efetiva [**L**²]

AIChE – American Institute of Chemical Engineer

Autodyn2D – Programa Comercial de dinâmica não linear utilizando esquema explícito de integração

b – Parâmetro utilizado para representar a forma de decaimento da onda de choque

BLEVE – Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (Explosão por Expansão do Vapor de Líquido Fervente)

C_{cr} – Coeficiente de Amortecimento Crítico

CCPS – Center for Chemical Process Safety

C_d – Coeficiente de Arrasto

CONWEP – Programa Comercial para análise da explosões

[C] – Matriz de Amortecimento

D – Dimensões

E – Energia do Explosivo [**W**] / Módulo de Elasticidade [**F** / **L**²]

E_c – Calor de combustão do gás inflamável [**W** / **L**³]

EOS – Equatio of State (Equações de Estado)

E_Q – Energia total resultante da queima da mistura inflamável na nuvem [**W**]

f – Força aplicada [**F**]

f_r – Frequência Natural [**Fr**]

G – Módulo de corte [**F** / **L**²]

GDL – Grau(s) de Liberdade

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

h – Altura [**L**]

HE – High Explosive – Alto Explosivo

H_l – Altura da barreira [**L**]

HOB – Altura da explosão [**L**]

H_t – Altura da estrutura alvo [**L**]

H_z – Frequência [**Fr**]

I, i_s⁺ – Impulso por Unidade de Área da fase positiva

IAEA – International Atomic Energy Agency

i_s⁻ – Impulso por Unidade de Área da fase negativa

K – Rigidez da Mola

[K] – Matriz de Rigidez

LE – Low explosive – Baixo Explosivo

LIE – Limite Inferior de Explosividade

LSE – Limite Superior de Explosividade

L_0 – Comprimento Característico [\mathbf{L}]
 M – Massa [\mathbf{M}] / Massa de Hidrocarboneto / Massa Molecular do Gás [\mathbf{M} / \mathbf{N}]
 $[M]$ – Matriz de Massa
 n – Número de Moles Necessários para Reação Estequiométrica com Oxigênio
 MEF – Método dos Elementos Finitos
 $NGDL$ – “n” graus de liberdade
 p_{atm} – Pressão Atmosférica ao Nível do Mar [$\mathbf{F} / \mathbf{L}^2$]
 PC – Personal computer
 $P_{interna}$ – Pressão no interior do vaso [$\mathbf{F} / \mathbf{L}^2$]
 PPV – Peak particle velocity – Velocidade Pico de Partícula [\mathbf{L} / \mathbf{T}]
 P_{SO}, P_O, ps, p_O – Pico de sobrepressão
 q_o – Pressão Dinâmica [$\mathbf{F} / \mathbf{L}^2$]
 R – Distância da explosão [\mathbf{L}] / Constante Universal dos Gases [$\mathbf{V} / \mathbf{N} \cdot \mathbf{K}$]
 \bar{R} – Distância Escalada de Sachs
 RDX – Cyclonite – Explosivo Sólido
 r_{seg} – Distância Segura [\mathbf{L}]
 T – Temperatura da Mistura [\mathbf{K}]
 t – Tempo [\mathbf{T}]
 t_A – Tempo de chegada [\mathbf{T}]
 t_d, t_o, t_o^+ – Duração da onda [\mathbf{T}]
 TNO – Prinz Mauritz Laboratory – instituição de pesquisa do governo Holandês
 TNT – Trinitro Tolueno – Explosivo Sólido
 T_r – Período Natural [\mathbf{T}]
 u_f – Velocidade de Propagação da chama [\mathbf{L} / \mathbf{T}]
 $UVCE$ – Unconfined Vapor Cloud Explosion
 $\{U_0\}_i$ – Autovetor associado ao autovalor
 VCE – Vapor Cloud Explosion
 v_P – Velocidade de ondas Primárias [\mathbf{L} / \mathbf{T}]
 v_R – Velocidade de ondas de Rayleigh [\mathbf{L} / \mathbf{T}]
 v_S – Velocidade de ondas Secundárias [\mathbf{L} / \mathbf{T}]
 V_0 – Volume Ocupado pela Mistura Estequiométrica gás-ar [\mathbf{L}^3]
 W_{TNT} – Massa equivalente em TNT [\mathbf{M}]
 x – Distância do ponto ao centro da explosão [\mathbf{L}]
 Y – Parâmetro resultante da equação de PROBIT
 Z – Distância em escala
 Z_H – Distância em escala modificada
 β – Grau de obstrução da área de passagem da frente da chama
 ΔP_{ef} – Sobrepressão efetiva [$\mathbf{F} / \mathbf{L}^2$]
 δ_B – Deslocamento do ponto B
 γ – Relação entre velocidade da onda de Rayleigh e da onda de Corte
 λ_i – Autovalores
 λ_R – Comprimento de Ondas de Rayleigh
 ξ – Relação de Amortecimento
 η – Eficiência empírica para explosão pelo Método do TNT Equivalente
 ν – Coeficiente de Poisson
 ω – Frequência Circular Natural [rad/ \mathbf{T}]
 ρ – Densidade Mássica [$\mathbf{M} / \mathbf{L}^3$]
 Φ – Matriz formada pelos autovetores do problema / variável a ser encontrada
 θ – constante de decaimento [\mathbf{T}].

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Indústria de sapatos instalada em Brockton - Massachusetts antes da explosão de uma caldeira, em 1905 [Cook, 2005].	4
Figura 1.2: Resultado da explosão em Indústria de Massachusetts [Cook, 2005].	5
Figura 1.3: Fotos aéreas (a) e (b) do Prédio Federal Murrah na cidade de Oklahoma após a explosão terrorista em 1995 [K-9 Search & Detection, 2004].	5
Figura 1.4: Desenvolvimento da onda de choque gerada por uma explosão [Kinney & Graham, 1985].	7
Figura 1.5: Função pressão-distância para tempos sucessivos de uma explosão em função da distância [Kinney & Graham, 1985].	8
Figura 1.6: Caso genérico ilustrativo das fases de uma explosão e seus efeitos sobre estruturas alvos [Kinney & Graham, 1985].	8
Figura 1.7: Comportamento da pressão no tempo para uma onda explosiva genérica do ponto de vista de um observador ou alvo [Autoridad Regulatoria Nuclear, 1998].	9
Figura 1.8: Curvas para diferentes explosões sentidas por um alvo qualquer, diferentes impulsos positivos [Kinney & Graham, 1985].	10
Figura 1.9: Exemplo de comportamento de uma detonação do ponto de vista de um alvo [Santiago, 2003].	13
Figura 1.10: Exemplos de comportamentos de deflagrações do ponto de vista de um alvo [Santiago, 2003].	13
Figura 2.1: Aproximações para a função de pressão de uma explosão [Smith & Hetherington, 1994].	20
Figura 2.2: Relação entre distância em escala de Sachs e sobrepressão em escala de Sachs para diferentes intensidades de explosão [AIChE/CCPS, 2000].	28
Figura 2.3: Relação entre distância escalada de Sachs e duração da fase positiva escalada de Sachs para diferentes forças de explosões [AIChE/CCPS, 2000].	29
Figura 2.4: Interface gráfica do programa Autodyn [Protetive Design Center, 2005] (a); Comparação de resultados de pressões entre programa AUTODYN2D e teste experimental [Chapman <i>et al.</i> , 1995b] (b).	30
Figura 2.5: Interface gráfica do programa CONWEP [Protetive Design Center, 2005].	30
Figura 2.6: Parâmetros da onda de choque para a fase negativa para uma carga esférica de TNT em ar livre ao nível do mar segundo Krauthammer e Altenberg [2000].	31
Figura 2.7: Magnitudes dos picos de pressão positiva e negativa em função da distância escalar [Krauthammer e Altenberg, 2000].	32
Figura 2.8: Curva de pressão vs. tempo mostrando segundo pico de pressão [Liang, Wang e Chen, 2002].	33
Figura 2.9: Três casos de interação de ondas de choque com estruturas [Smith e Hetherington, 1994].	34
Figura 2.10: Ilustração de uma geometria normal e a apresentação dos chamados hourglass [Ansys Inc., 2000].	39
Figura 2.11: Elemento cúbico com forma reduzida de integração mostrando alguns possíveis modos de deformação [LS-Dyna, 2003].	40
Figura 2.12: Geometria e condições de contorno (a); Tipo de solitação (b); Curvas (I) e (II) feitas no ABAQUS utilizam elemento B23 (Bernoulli-Euler com matriz de massa consistente), (III) e (IV) elemento B21 (Timoshenko com elementos de massa concentrados nos nós) e curva (V) modelada no ADINA com uso de elemento de viga de Timoshenko sem amortecimento (c) [Symonds <i>et al.</i> , 1986].	41
Figura 2.13: Esquema básico ilustrativo das zonas consideradas para vasos cilíndricos com líquidos no interior [Cho <i>et al.</i> , 2001].	43
Figura 3.1: Apresentação da planilha gerada para calcular os parâmetros das explosões.	46

Figura 3.2: Interface do Explo2003 para consideração da pressão total.....	46
Figura 3.3: Geometria e suas condições de contorno a ser analisada na comparação de resultados.	48
Figura 3.4: Forma da função de pressão-tempo aplicada em Autoridad Regulatoria Nuclear [1998].....	49
Figura 3.5: Comparativo das curvas de deflexão (Ponto A) no tempo entre calculado por elementos finitos e definido pela referência para o centro da placa [Autoridad Regulatoria Nuclear, 1998].	50
Figura 3.6: Extintor de incêndio automotivo utilizado para a realização dos ensaios e modelos: Suspensão pela válvula (a). Extintor em corte longitudinal (b).	53
Figura 3.7: Modelo numérico inteiro com tampo toroidal (a); Exemplo do tampo hemisférico (b); Exemplo do tampo achatado (c).	54
Figura 3.8: Ilustração dos primeiros modos do extintor para o modelo com tampo toroidal.	55
Figura 3.9: Extintor a ser ensaiado (com os microacelerômetros colados por meio de fitas adesivas) e martelo utilizado na solicitação aplicada.	56
Figura 3.10: Apresentação do algoritmo montado no programa HPVee 4 utilizado para o tratamento dos dados.	57
Figura 3.11: Layout do problema: Onda de sobrepressão gerada por uma nuvem gasosa congestionada numa região horto florestal que atinge um vaso de pressão esférico de <i>GLP</i>	60
Figura 3.12: Fotografia de uma Esfera (a), desenho simplificado da Esfera de armazenamento de <i>GLP</i> (b), com suas colunas de apoio e tirantes de enrijecimento.	61
Figura 3.13: Esquema explicativo dos tipos de condições de contorno aplicadas na base das colunas.	62
Figura 3.14: Esfera de <i>GLP</i> modelada em elementos finitos (a); detalhamento da ligação coluna- esfera (b).	63
Figura 3.15: Esquema simplificado das massas e suas respectivas alturas aplicadas.	64
Figura 3.16: Esquema da divisão da esfera em seções transversais à direção de propagação da pressão (a); Anel da esfera a qual é aplicada uma pressão definida variável no tempo (b). ...	65
Figura 3.17: Comportamento da força total aplicada na estrutura para 50m e 100m de distância entre o horto e a esfera.	66
Figura 3.18: Modos de vibração para o recipiente com 75% de líquido: segundo modo (a), terceiro modo (b), e quarto modo (c).	68
Figura 3.19: Deslocamentos da esfera na direção <i>x</i> em função do tempo, 50m ($\alpha=365$).	69
Figura 3.20: Deslocamentos da esfera na direção <i>x</i> em função do tempo, 100m ($\alpha=365$).	69
Figura 3.21: Lei constitutiva utilizada para os elementos da estrutura analisada.	70
Figura 3.22: Deslocamentos horizontais da esfera na direção <i>x</i> em função do tempo – carga aplicada a 100m: esfera vazia (a), esfera cheia (b).	71
Figura 3.23: Deslocamentos horizontais da esfera na direção <i>x</i> em função do tempo – carga aplicada a 50m: esfera vazia (a), esfera cheia (b).	71
Figura 3.24: Resposta do deslocamento <i>delta x</i> no domínio da Freqüência para as diferentes análises feitas: horto a 100m (a), horto a 50m (b).	72
Figura 3.25: Modelo do LS-Dyna [2003] com ilustração dos deslocamentos no momento do rompimento do tirante de enrijecimento (esfera vazia a 100m do horto).	72
Figura 3.26: Deslocamentos ao longo do tempo obtidos com a esfera cheia a 100m de distância do horto florestal (análise explícita; $\beta=500$).	73
Figura 3.27: Deslocamentos ao longo do tempo obtidos com a esfera vazia a 50m de distância do horto florestal (análise explícita; $\beta=500$).	73
Figura 3.28: Planta simplificada do sítio com localização do modelo e dos pontos analisados. ...	77
Figura 3.29: Representação do modelo numérico com dimensões, sistema de coordenadas e condições de contorno aplicadas (a), elemento prismático com dimensões utilizadas (b). ...	78

Figura 3.30: Esquema ilustrativo para determinação das cargas aplicadas para cada ponto localizado ao longo da linha de simetria, visualização geral (a), função carga-tempo sobre o ponto localizado a 16m sobre o trajeto do caminhão (b).....	80
Figura 3.31: Localização dos pontos numerados analisado, e sistema de coordenadas (a), distâncias de ponto a ponto.....	82
Figura 3.32 Acelerações verticais [m/s^2] tomadas no ponto P1 indicado no detalhe para o caso de uma carga de impacto (60kg em queda livre) aplicada no ponto P3.....	83
Figura 3.33: Acelerações verticais [m/s^2] tomadas no ponto P2 indicado no detalhe para o caso de uma carga de impacto (60kg em queda livre) aplicada no ponto P3.....	83
Figura 3.34: Deslocamento vertical tomado nos pontos P1 e P2 indicados no detalhe para uma excitação impulsiva aplicada no ponto P3 (Caso a_1). Indicação de momentos teóricos de chegada dos três tipos de ondas analisados.	84
Figura 3.35: Apresentação do modelo numérico com inserção de valeta (a); Geometria da valeta caso b_{II} (b); Geometria da valeta caso b_{III} (c).....	85
Figura 3.36: Acelerações normalizadas pelo pico máximo encontrado para caso b_I no ponto P2 relacionando casos b_{II} b_{III}	86
Figura 3.37: Acelerações normalizadas pelo pico máximo encontrado para caso b_I no ponto P6 relacionando casos b_{II} b_{III}	86
Figura 3.38: Esquema ilustrativo dos pontos escolhidos para comparação.....	88
Figura 3.39: Verificação dos pontos coletados no modelo numérico sobre a curva fornecida por Das [1982].	88
Figura 3.40: $\frac{1}{4}$ do volume de controle do problema a ser analisado apresentando as dimensões gerais e o sistema de coordenadas utilizado (a); Elementos cúbicos (8 nós) utilizados com dimensões (b); $\frac{1}{4}$ da geometria de explosivo sólido utilizado com dimensões (c); Resumo das condições de contorno aplicadas para cada face do volume de controle (d).	92
Figura 3.41: Propagação da onda de sobrepressão ao longo da geometria: para 249.23ms (a); para 695.92ms (b); para 898.82ms (c).....	93
Figura 3.42: Localização dos pontos escolhidos dentro da geometria com suas respectivas distâncias ao explosivo.	94
Figura 3.43: Comparativo de pressões geradas para ponto A entre análises numéricas e Métodos analíticos.....	95
Figura 3.44: Comparativo de pressões geradas para ponto B entre análises numéricas e Métodos analíticos.....	96
Figura 3.45: Comparativo de pressões geradas para ponto C entre análises numéricas e Métodos analíticos.....	96
Figura 3.46: Comparativo de pressões geradas para ponto D entre análises numéricas e Métodos analíticos.....	97
Figura 3.47: Comparativo de pressões geradas para ponto E entre análises numéricas e Métodos analíticos.....	97
Figura 3.48: Comparativo de pressões geradas para ponto F entre análises numéricas e Métodos analíticos.....	98
Figura 3.49: Sobrepressões normalizadas em relação ao método simplificado.....	99
Figura II. 1: Parâmetros de Explosões para TNT.....	110
Figura II. 2: Parâmetros Adicionais de Explosões para TNT.....	111
Figura II. 3: Parâmetros de Explosões Refletidas Normalizados para TNT.....	112
Figura IV. 1: Coeficientes de Arrasto apresentados por Kinney e Graham [1985].	115
Figura VII. 1: Diagrama de blocos excitação, sistema, resposta (a); Exemplo de sistema estrutural (b).	118
Figura VII. 2: Representação simplificada de um modelo massa mola sem amortecimento.....	120
Figura VII. 3: Exemplo de deslocamento de uma massa em função do tempo em vibração livre.	123

Figura VII. 4: Comparativo entre os três estados de amortecimentos: Subcrítico, Crítico e Supercrítico.....	124
Figura VII. 5: Esquema de um sistema de um grau de liberdade excitado por uma força $F(t)$ (a); variação no tempo da excitação $F(t)$ e da resposta $\delta(t)$ do sistema para $T_n < T_e$ (b) e (c); variação no tempo da excitação $F(t)$ e da resposta $\delta(t)$ do sistema para $T_n > T_e$ (d) e (e).	125
Figura VII. 6: Esquema que ilustra a forma de proceder na integração numérica.....	132
Figura VII. 7: Comparação de custo operacional entre análise implícita e explícita [Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 1995].....	134
Figura VIII. 1: Esquema ilustrativo de ondas primárias (a), secundárias (b), de superfície (c) [Dowding, 1985].	136
Figura VIII. 2: Esquema ilustrativo de propagação de ondas em meio elástico [Persson <i>et al.</i> , 1993].....	138
Figura VIII. 3: Exemplo gráfico de modificações das vibrações ao longo da distância e do tempo.	138
Figura VIII. 4: Sistema de coordenadas e direções de deslocamentos para pontos “a”, “b” e “c” (a); Curva de variação da amplitude de vibração horizontal e vertical para ondas de Rayleigh em função da profundidade (b) [Das, 1982].	139
Figura VIII. 5: Representação de fonte emissora de vibrações, dimensões para a valeta em vista frontal (a); em planta para visualização do comprimento “L” da valeta (b) [Das, 1982].	140

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Lista das principais explosões ocorridas em atentados e acidentes industriais.....	6
Tabela 1.2: Exemplos de limites de explosividade [Hanssen, 2003].....	11
Tabela 1.3: Relação de alguns explosivos com suas equivalências em TNT [Smith & Hetherington, 1994].....	15
Tabela 1.4: Relação de alguns danos causados diretamente aos seres humanos devido às explosões [Autoridad Regulatoria Nuclear, 1998].	18
Tabela 2.1: Lista de constantes e parâmetros utilizados para obtenção dos valores indicados na equação acima [AIChE/CCPS, 2000 – Lees, 1996].	25
Tabela 2.2: Definição de valores mencionados nas equações anteriores.	27
Tabela 2.3: Coeficientes utilizados para a equação JWL [LS-Dyna, 2003]	36
Tabela 3.1: Propriedades mecânicas do material estudado (vidro).....	48
Tabela 3.2: Frequências naturais e modos encontrados numericamente através de análise modal para três geometrias distintas.....	55
Tabela 3.3: Frequências encontradas para extintor a partir de solicitação impulsiva.....	57
Tabela 3.4: Parâmetros básicos utilizados para a obtenção da função de pressão sobre a esfera a 50m e 100m.	61
Tabela 3.5: Valores utilizados para simulação numérica.....	64
Tabela 3.6: Valores de pressões aplicadas em função do tempo, para explosão à 100m.	65
Tabela 3.7: Modos de vibração e frequências naturais do vaso de pressão analisado para diferentes níveis de preenchimento de fluido (GLP).....	67
Tabela 3.8: Resultados de tempos e deslocamentos comparativos entre os dois tipos de análises realizadas, Implícita e Explícita.	74
Tabela 3.9: Propriedades do solo.	78
Tabela 3.10: Tipos e detalhes dos carregamentos aplicados para os modelos numéricos.	81
Tabela 3.11: Definição das propriedades dos materiais utilizados.	93
Tabela I.1: Tabela de transformação de PROBIT em porcentagem [Leal,2003].....	109
Tabela III. 1: Pressões levantadas pelo Método Multienergia para uma esfera de GLP a 50m da borda de um hortoflorestal.....	113
Tabela III. 2: Pressões levantadas pelo Método Multienergia para uma esfera de GLP a 100m da borda de um hortoflorestal.....	114
Tabela VII. 1: Exemplo para seções comuns de relação entre “ ω ” e “ m ” para uma viga simplesmente engastada.	122
Tabela VII. 2: Tipo de problemas nas diferentes áreas da Engenharia Sánchez [2001].	127
Tabela VIII. 1: Valores calculados para as expressões acima apresentadas.	137

INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, tem-se cada vez mais em pauta o assunto “explosão”, nas mais diversas áreas de interesse. No caso da Engenharia, em múltiplas áreas (mecânica, civil, química, minas, etc.), os objetivos são quase sempre os mesmos: “Estudar e conhecer o fenômeno da explosão para poder avaliar riscos e danos e desenvolver formas de proteção ao ser humano e a todos os bens que ele possa usufruir em seu meio ambiente.”

O presente trabalho iniciou com a intenção de desenvolver modelos numéricos para aplicações reais, porém, com vistas à segurança, principalmente fomentado pela crescente onda de acidentes e atentados envolvendo danos às pessoas e estruturas.

Como exemplos mais marcantes das conseqüências de explosões, pelo grande número de perdas de vidas, estão os atentados terroristas freqüentes no Oriente Médio, com carros-bomba que explodem no meio das ruas e causam danos a dezenas ou centenas de metros de distância. Um caso de ataque terrorista que marcou a história é o acontecido no dia 11 de março de 2004 às estações ferroviárias de Madri, que tirou a vida de mais de 200 pessoas e feriu outras 1000. O ano de 2005 também já foi marcado por um atentado chocante, que matou pelo menos 56 pessoas no metrô de Londres.

Apesar da tendência atual de aumento desses tipos de ataques, não são somente explosões intencionais que causam terror e destruição. Grandes quantidades de acidentes nas indústrias provocam explosões que tiram vidas, muitos deles não divulgados com a intenção de preservar as empresas, o que dificulta o aprendizado com estes tipos de eventos. Um exemplo recente de explosão industrial em uma caldeira aconteceu em uma Planta Industrial de Refino de Petróleo na Argélia, em janeiro de 2004, que causou a morte de 23 trabalhadores e feriu mais de 73 pessoas, segundo informações coletadas em jornais on-line.

Mesmo não considerando ações terroristas dessas proporções aqui no Brasil, é clara a necessidade do conhecimento mais aprofundado sobre o assunto. Sendo assim, as explosões podem ser classificadas basicamente em função da sua origem em quatro grupos distintos:

- Explosões de gases e vapores, inflamáveis ou não;
- Explosões de explosivos sólidos;
- Explosões nucleares;
- Explosões de poeiras;
- Combinações das anteriores.

Alguns destes grupos são mais explorados nas pesquisas atuais, principalmente devido aos interesses econômicos envolvidos.

Por serem assuntos dos quais não se conhecem todas as variáveis e/ou a interação entre elas, os acidentes causados por explosões têm sido alvo de sucessivos estudos ao longo das últimas décadas, onde modelos e programas de testes foram elaborados para tentar prever o comportamento da queima de misturas gasosas em locais próximos a áreas de risco. Já para explosivos sólidos, existe bibliografia específica, onde parâmetros e modelos simplificados são amplamente utilizados e aceitos, além de códigos computacionais, principalmente porque seu comportamento juntamente com suas variáveis é um pouco mais conhecido e regular.

Apesar dos efeitos da explosão, sua interação com estruturas próximas nem sempre tem merecido a devida atenção, ou simplesmente suas publicações são mais restritas por motivos de segurança, principalmente.

Junto a isto, tem-se o efeito da propagação no solo das vibrações causadas por um evento impulsivo, sendo fatos que ocorrem simultaneamente.

OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo geral explorar técnicas de análise disponíveis em softwares comerciais de múltiplos propósitos (Ansys, LS-Dyna, etc.) de situações onde se apresentam ações impulsivas ou explosões, desde o evento em si até o efeito sobre uma estrutura ou alvo fazendo aplicação para cinco casos práticos.

E os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a influência da pressão interna na resposta dinâmica de um recipiente de pressão;
- Estudar o comportamento de painéis de vidro submetidos a carregamentos dinâmicos, usando-se a pressão produzida por explosivos sólidos a uma determinada distância, através de métodos simplificados;
- Determinar a ação de uma onda explosiva produzida por um gás inflamável pesado sobre uma estrutura modificada pela presença de obstáculos;
- Determinar a resposta de uma ação explosiva de um vaso de pressão esférico, com fluido e gás em seu interior, avaliando a influência de diferentes quantidades de líquido e pressão interna sobre a resposta da estrutura;
- Verificar o comportamento da propagação de ondas em um meio elástico;

- Modelar a resposta de um semi-espaço submetido à ação de um explosivo sólido sobre sua superfície, mostrando as possibilidades do Método dos Elementos Finitos com esquemas de integração explícita.

Os modelos estruturais empregados foram discretizados espacialmente utilizando o método dos elementos finitos e a equação de equilíbrio resolvida usando-se esquemas implícitos e explícitos de integração direta no tempo. As implementações foram realizadas em Softwares comerciais de elementos finitos Ansys [2000] e LS-Dyna [2003].

ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado da seguinte forma, após a presente introdução, onde constam os objetivos, tem-se o Cap. 1 com um breve histórico e com os fundamentos teóricos necessários para desenvolver este trabalho.

Segue-se então, no Capítulo 2, uma revisão do estado da arte sobre explosões, propagação de ondas e métodos numéricos utilizados nas análises. Posteriormente, no Capítulo 3, são apresentadas algumas aplicações realizadas:

Inicialmente tem-se a análise do comportamento de estruturas laminares submetidas à ação de cargas explosivas. Como segunda aplicação estuda-se o efeito da pressão interna no modelamento numérico de vasos de pressão (Extintores de Incêndio). Na seqüência, a terceira aplicação é referente ao modelamento de vaso esférico de GLP sob ação de uma explosão.

Direcionando o modelamento mais para a resposta de estruturas, especificamente o solo, tem-se o estudo de propagação de ondas em corpos elásticos.

Na última aplicação, apresenta-se uma simulação numérica completa de uma explosão.

Para concluir, no Capítulo 4, são apresentadas as conclusões obtidas na realização desta dissertação, assim como sugestões para dar continuidade à mesma.

No final, após as referências, há nove apêndices com tabelas e gráficos e equações referenciados no texto e alguns conceitos adicionais.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. BREVE HISTÓRICO DE ACIDENTES COM EXPLOSÕES

As explosões caracterizadas pela violência dos seus efeitos têm aumentado ao longo dos anos, tanto em quantidade como em intensidade. Nos primeiros 50 anos do século XX (1900 a 1949) registraram-se 21 explosões e nos 40 anos seguintes (1950 a 1989), muito mais do que 100. De forma geral, entre 1910 e 1996 tem-se mais do que 500 registros de explosões em todo o mundo, com as mais variadas causas, e que deixaram um saldo aproximado de 15.900 mortes.

Não só grandes ataques terroristas como aconteceu ao Prédio Federal Murrah em Oklahoma no ano de 1995 (Figura 1.3) têm aumentado, mas também, explosões domésticas e industriais vêm se tornando mais numerosas, como em uma Petroquímica na Argélia em 2004. Em relação às explosões acidentais, um dos primeiros casos registrados de acidente com caldeira aconteceu em 1905, em uma indústria de sapatos em Brockton (Massachusetts, EUA), o qual causou enorme impacto na sociedade. Resultando em 58 vítimas fatais e 117 feridos, acabou sendo pivô de diversos estudos, inclusive com a criação e divulgação de códigos para projetos e manutenção de vasos e caldeiras como ASME (American Society of Mechanical Engineers), tendo sua primeira edição publicada em 1915. As Figuras 1.1 e 1.2 ilustram como era o prédio da fábrica de sapatos existente antes da explosão da caldeira e o que sobrou da instalação após o acidente, respectivamente.

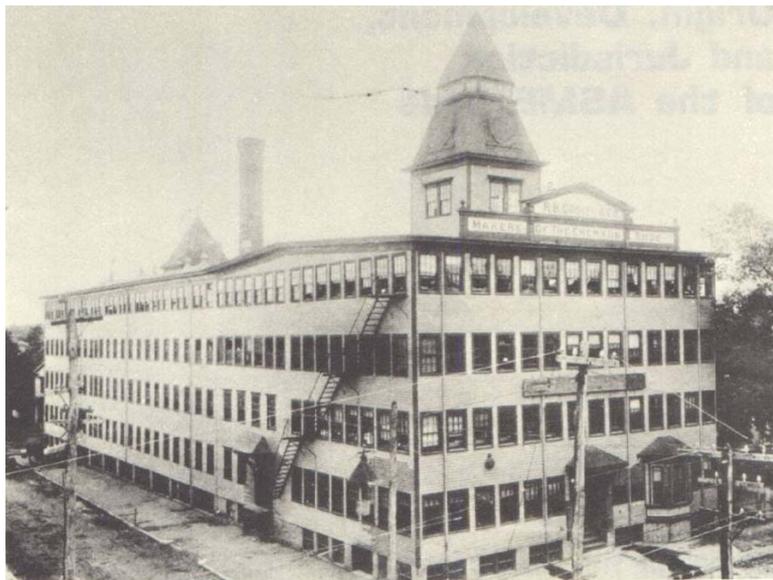


Figura 1.1: Indústria de sapatos instalada em Brockton - Massachusetts antes da explosão de uma caldeira, em 1905 [Cook, 2005].



Figura 1.2: Resultado da explosão em Indústria de Massachusetts [Cook, 2005].

Observando a Figura 1.2, verifica-se a destruição total do prédio e da vizinhança, sobrando apenas a chaminé ao fundo, mostrando a gravidade e força de uma explosão destas proporções. Este acidente, entre outros tantos, mostra a importância da segurança neste tipo de equipamento pressurizado.

Somente no Brasil, existem milhares de indústrias utilizando caldeiras e vasos de pressão, e ainda por vezes armazenam líquidos inflamáveis, o que agravam suas conseqüências quando explodem. A partir do conhecimento de alguns acidentes domésticos e industriais e de algumas visitas à instalações variadas, pode-se dizer que muitas destas são verdadeiras bombas-relógio, devido às suas condições de manutenção, conservação e operação.



Figura 1.3: Fotos aéreas (a) e (b) do Prédio Federal Murrah na cidade de Oklahoma após a explosão terrorista em 1995 [K-9 Search & Detection, 2004].

As conseqüências destas explosões são assustadoras e impressionantes, principalmente quando envolvem muitas vítimas como nos casos citados. O atentado de Oklahoma em 1995 (Figura 1.3) chocou a opinião mundial principalmente pelas cenas mostradas dos feridos e mortos, onde dos 168 oficialmente listados (civis), mais de 20 eram crianças e recém nascidos.

Compilando dados coletados sobre estes eventos tem-se a Tabela 1.1, a qual contém os principais eventos de explosões registrados no século XX e início do XXI, citando ano, local, tipo de explosão, número de mortes e feridos e em alguns casos, quantas pessoas evacuadas. Nota-se pelas datas que vem aumentando principalmente o número de casos em atentados terroristas, como afirmado anteriormente.

Tabela 1.1: Lista das principais explosões ocorridas em atentados e acidentes industriais.

Ano	Local	Tipo de explosão	Mortes	Feridos	Outros
2004	Skikda (Argélia)	Refinaria de petróleo e gás natural	23	74	
2003	Alcântara (Brasil)	Acidente em Base Militar	21		
2003	Madri (Espanha)	Atentado à estações de trem	192	1400	
1998	Araras (Brasil)	Caminhão tanque de gasolina e diesel	54		
1998	Nairóbi (Quênia)	Atentado à Embaixada Americana	100	1000	
1998	Peking (China)	Explosão	40	100	
1997	Quito (Equador)	Explosão de munições em loja	3	187	
1996	Colombo (Sri Lanka)	Atentado à Banco Central	200	1400	
1996	Kabuhl (Afeganistão)	Explosão de munições em loja	60	>125	
1996	Shaoyang (Cina)	Explosão em armazem de explosivo	125	400	
1995	Oklahoma (EUA)	Atentado à Prédio Federal	168	7000	
1995	Boqueiro (Brasil)	Explosão de munições em loja	100		
1994	Buenos Aires (Argentina)	Atentado à Sociedade Israelita	98		
1994	Venezuela	Explosão em tubulação	50	10	
1994	Guangix (China)	Explosão de Armazem de explosivo	73	99	
1992	Guadalajara (Mexico)	Explosão	>206	>1500	500 evacuadas
1991	Pyongyang (Coreia)	Explosão de dinamite	>120		
1991	Bangkok (Tailândia)	Explosão de gás	>63		
1991	Ethiopia, Addis Ababa	Explosão de munições	100	200	
1991	Guadalajara (México)	Duto de gasolina	300		
1988	Mexico, Mexico City	Explosão de gás	62	87	
1988	UK, North Sea	Explosão de gasolina em plataforma	167	-	-
1984	San Juanico (México)	Bleve (GLP)	650	..	
1984	Mexico, St. J. Ixhuatepec	Explosão de tanque de GLP	>500	..	>200000 evac.
1984	Brazil, Cubatao	Explosão de tubulação de gasolina	89	17	2 500 evacuadas
1982	Nile River (Egito)	Explosão no transporte de GLP	317	500	-
1982	Tacoa (Venezuela)	Explosão de tq. óleo combustível	>153	-	40 000 evacuadas
1980	Ortuella (Espanha)	Explosão de propano	51	353	-
1980	Deh-Bros Org (Irã)	Explosão de dinamite	80	222	..
1978	San Carlos (Espanha)	Caminhão tanque de propeno (VCE)	216	..	
1978	Xilatopec (Mexico)	Explosão de gás em rodovia	100	150	-
1977	Iri (Coreia do Sul)	Explosão de dinamite em trem	57	190	-
1976	Seveso (Itália)	TCDD			600 evacuadas
1976	San Carlo de Larapita (Espanha)	Caminhão tanque de propano	211	30	
1975	Nova York (EUA)	Atentado em aeroporto	11	104	
1974	Flixborough (Inglaterra)	Ciclohexano	28	..	US\$412 milhões
1973	Czechoslovakia	Explosão de gás	47	24	-
1973	Djakarta (Indonésia)	Fogo e explosão	52	53	
1972	Rio de Janeiro (Brasil)	Bleve (GLP)	37	2	
1972	Staten Island (EUA)	Explosão de gás	40	800	..
1970	Osaka (Japão)	Explosão no metrô	79	81	
1948	Ludwingshafen (Alemanha)	Planta química	207	3000	
1947	Texas (EUA)	Navio de Nitr. de Amônio	552		
1921	Coppan (Alemanha)	Mistura química	430		
1917	Hallfax (Nova Escócia)	Navio de munições	1800		
1911	Oppau (Alemanha)	Nitrato de Amônio	561	117	
1905	Massachusetts (EUA)	Caldeira em fábrica de sapatos	58		

1.2. CONCEITOS BÁSICOS DE EXPLOSÕES

Uma explosão consiste na produção e liberação violenta de gases comprimidos, provenientes, principalmente, de reações químicas. A energia produzida nestes processos propaga-se rapidamente através do meio (ar ou água) provocando variações da pressão as quais formam a conhecida onda explosiva.

Quando um explosivo é detonado no ar, a energia é liberada em torno do material explosivo forçando o volume a se expandir, causando o “shock up” que forma a onda de choque [Chapman *et al.*, 1995b]. Em geral, esta região de pressão alterada, iniciada normalmente em forma hemisférica (Figura 1.4(a)), desloca-se radialmente do centro da explosão (epicentro) com uma velocidade que supera a do som e assume a forma apresentada na Figura 1.4(c), na medida que se afasta deste ponto central. Esta frente de onda com velocidade supersônica é conhecida como onda de choque.

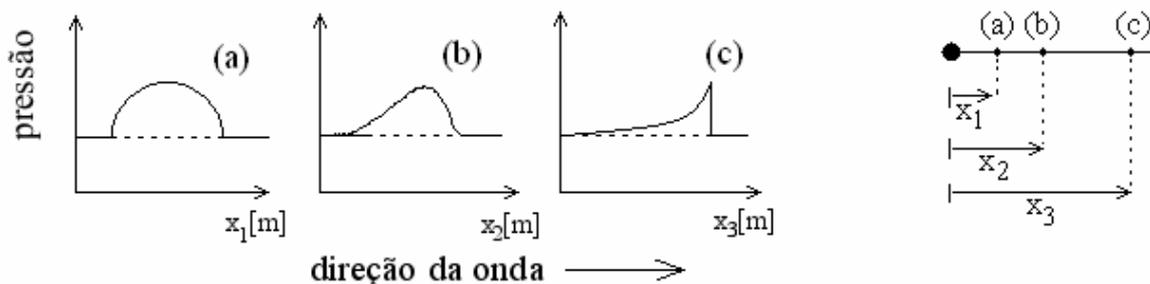


Figura 1.4: Desenvolvimento da onda de choque gerada por uma explosão [Kinney & Graham, 1985].

Atrás da onda de choque, o movimento das partículas de ar provoca uma pressão dinâmica, formada pelos ventos gerados na explosão. No caso de grandes eventos (como exemplo explosões nucleares), o vento pode ser de fundamental importância na resposta das estruturas, porém não é fator predominante para os casos menos severos, em geral com explosivos químicos [Autoridad Regulatoria Nuclear, 1998]. As equações que justificam esta questão são apresentadas por Smith & Hetherington [1994] e serão desenvolvidas em outra seção.

A onda de choque possui uma forma que vai modificando em função da distância tomada ao epicentro e, ela assume o comportamento apresentado na Figura 1.5, onde a certa distância ao epicentro (curva 4 da Figura 1.5) passa a apresentar inclusive sucção pressão negativa depois do pico de sobrepressão [Kinney & Graham, 1985].

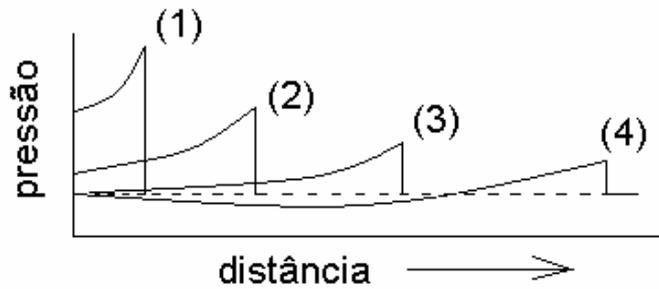


Figura 1.5: Função pressão-distância para tempos sucessivos de uma explosão em função da distância [Kinney & Graham, 1985].

A partir disto, define-se uma forma típica de passagem sobre um alvo, como ilustrado na Figura 1.6. Esta figura divide o evento em quatro fases distintas.

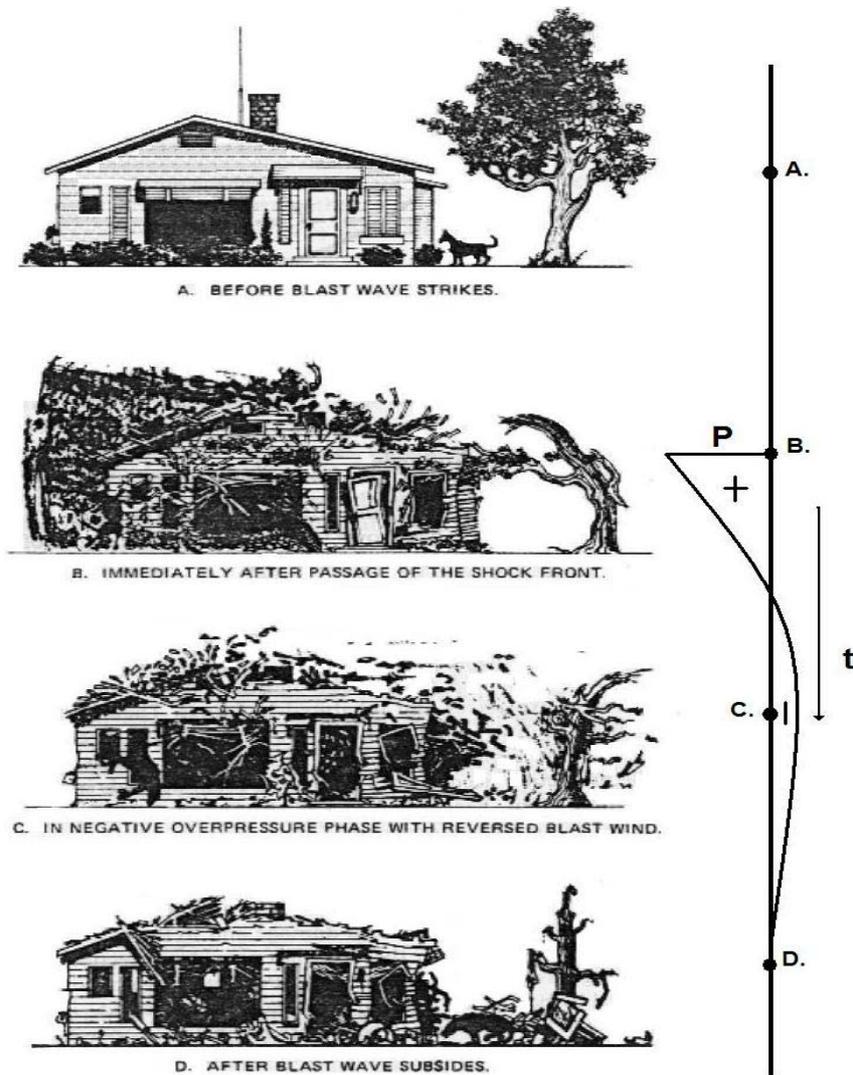


Figura 1.6: Caso genérico ilustrativo das fases de uma explosão e seus efeitos sobre estruturas alvos [Kinney & Graham, 1985].

Inicialmente, uma situação normal (A.) sucedida pela detonação do explosivo, acontece o chamado pico de sobrepressão, mostrado na fase (B.), significando um aumento súbito de

pressão acima da pressão atmosférica e que irá determinar a forma da onda de choque. Segue um decréscimo em forma similar à logarítmica até uma fase de pressão “negativa”, fase (C.). Por fim, a tendência natural é a estabilização, atingindo novamente a pressão atmosférica (D.).

Este efeito de pressão “negativa” (sucção), na verdade, é a diminuição da pressão abaixo da atmosférica, ocorrendo devido à contração dos fluidos que expandiram na explosão para proporcionar o equilíbrio do sistema.

A incidência da onda de choque sobre corpos gera reflexões que também devem ser consideradas, modificando a forma como a pressão é aplicada a diferentes pontos de tal corpo. Uma breve revisão sobre o tema também será mostrada em outro capítulo.

Definida a forma genérica da onda de choque, caracteriza-se a mesma através de três parâmetros independentes [Kinney & Graham, 1985]: Pico de sobrepressão [P_{so} , P_0]; Duração da onda [t_d , t_o ou t_0^+] e Impulso por unidade de área [I/A].

As formas de obtenção destes valores serão descritas mais adiante. A Figura 1.7 ilustra com mais detalhes a nomenclatura e as fases existentes na onda de choque generalizada.

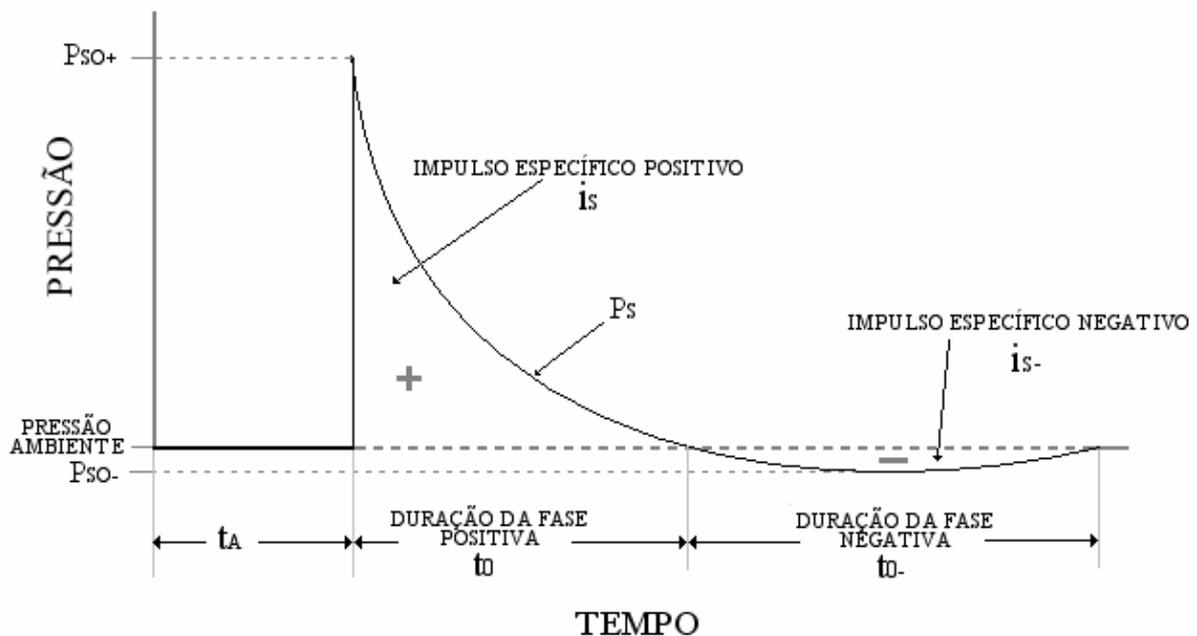


Figura 1.7: Comportamento da pressão no tempo para uma onda explosiva genérica do ponto de vista de um observador ou alvo [Autoridade Regulatória Nuclear, 1998].

Onde o t_A é o *tempo de chegada* da onda de choque e, a partir daí, segue a forma da onda de choque já citada. Esse tempo vai depender basicamente: da distância (do ponto ao epicentro), da turbulência do ambiente e da velocidade de propagação da onda.

A integração da pressão (força/unidade de área) no tempo resulta no impulso por unidade de área [I/A] (Figura 1.7), tanto para a fase positiva quanto para a negativa [Kinney & Graham, 1985]. Em outras palavras, a forma como é mostrada a taxa de decaimento da curva, implica na força aplicada em uma estrutura alvo. A Figura 1.8 exemplifica duas curvas de explosões distintas *a* e *b*, com mesmo pico de sobrepressão, tempo de chegada e duração da onda. Observe-se a curva *b* com um impulso positivo maior, significando que a sua integral é maior quando comparada à curva *a*, e dessa forma, a resposta da estrutura para ambos os casos será diferente.

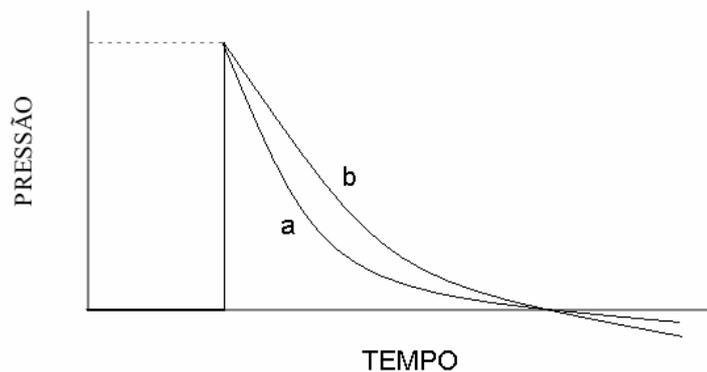


Figura 1.8: Curvas para diferentes explosões sentidas por um alvo qualquer, diferentes impulsos positivos [Kinney & Graham, 1985].

Cabe salientar que qualquer modificação ambiental (relevo ou altitude) ou no tipo de explosivo utilizado pode ocasionar mudanças significativas na forma como se apresentará a onda de pressão e suas conseqüências na estrutura. Isto porque os parâmetros citados para caracterização da onda são generalizados para qualquer tipo de explosão.

Outros conceitos importantes são necessários para o melhor entendimento dos assuntos e serão apresentados na seqüência:

- **Combustão:** Termo utilizado para descrever a reação de oxidação de um material, tanto para aquelas que requerem oxigênio externo quanto para aquelas onde ele é parte integral da molécula. Por serem processos complexos de oxidação, não será aqui apresentado um detalhamento maior de reagentes e produtos das explosões, porém, alguns produtos resultam da queima do combustível, principalmente dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), vapor d'água, nitrogênio (N_2), e outros ;
- **Deflagração:** Reação química de um material, normalmente um gás [IAEA, 2005], com velocidade de propagação no meio abaixo da do som (340 m/s), acontecendo no sentido oposto ao da decomposição do material;
- **Detonação:** Reação química de propagação de uma substância produzindo onda de choque de alta intensidade. Com estímulo suficiente, muitos explosivos podem ser detonados. A velocidade da reação está entre 1500 m/s e 9000 m/s e é apreciavelmente maior que a propagação na

deflagração, conforme a Figura 1.9. É importante mencionar que na detonação a reação ocorre pela passagem da onda de choque no meio;

- Limites inferior e superior de Inflamabilidade (LII-LSI)/ Explosividade (LIE-LSE): Faixa de concentração dos gases e vapores dentro da qual a queima/explosão dos combustíveis consegue propagar-se espontaneamente uma vez iniciado o processo de combustão. Alguns valores são apresentados na Tabela 1.2 para limites de explosividade.

Tabela 1.2: Exemplos de limites de explosividade [Hanssen, 2003].

Concentração (% em volume)		0(%)..... LIE (%)..... LSE(%)..... 100(%)		
		MISTURA POBRE nao ocorre propagação da combustão	MISTURA IDEAL Pode ocorrer propagação da combustão	MISTURA RICA nao ocorre propagação da combustão
		LIE (%)	LSE (%)	
PRODUTOS	Acetileno	2,5	80	
	Amônia	16	25	
	Benzeno	1,3	79	
	Butano	1,9	8,5	
	Etanol	3,3	19	
	GLP	1,9	10	
	Metano	5,3	14	
	Propano	2,1	9,5	

- Ponto de Fulgor (Flashpoint): Menor temperatura na qual um líquido libera vapor em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável com o ar, que se incendiará pelo contato com uma fonte externa de calor, no entanto, sem manter a combustão, devido à insuficiência de vapor liberado nesta temperatura [Hanssen, 2003].
- Ponto de Combustão (Firepoint): Menor temperatura na qual uma substância libera vapores em quantidade suficiente para formar uma mistura com o ar que, ao contato com uma fonte externa de calor entra em combustão e continua a queimar, sendo ligeiramente superior ao ponto de fulgor [Hanssen, 2003];
- Velocidade de Partícula (PPV): Grandeza de medição da vibração do solo, que descreve a amplitude máxima de velocidade de uma partícula através de um vetor.

Estes conceitos acima apresentados serão utilizados nos capítulos seguintes, podendo em alguns casos ser quantificados.

1.3. FUNÇÃO PRESSÃO-TEMPO DE UMA EXPLOSÃO

A variação da pressão ao longo do tempo, em uma posição definida referente ao epicentro de uma explosão, mostra um conjunto de informações essenciais na caracterização da

mesma, minimizando e, por vezes, dispensando a definição de outros parâmetros. Diversos são os métodos numéricos utilizados atualmente para se obter esta função (Figura 1.7), cada um com seu nível de complexidade. Somados a estes há os experimentais, que podem usar relações de escala ou não.

Por existirem diversas variáveis envolvidas na concepção de um evento explosivo, seja acidente industrial ou ataque terrorista, constatam-se algumas características fundamentais dos parâmetros da explosão, sendo elas:

- Tipo de explosivo: Diversas combinações e mistura de elementos químicos (sólidos, líquidos e gases) são capazes de gerar explosão, porém é importante saber que, por característica das reações, as queimas nas combinações entre sólidos e/ou líquidos normalmente acontecem mais rapidamente;
- Quantidade: Quanto maior o volume, seja qual for o combustível, e considerando as mesmas condições de explosividade e velocidade de queima, por exemplo, maior a quantidade de energia liberada, e assim, maior o efeito;
- Riqueza da mistura: Por serem reações químicas, existe uma quantidade exata de elementos constituintes para definir o balanceamento correto da equação, chamada de equilíbrio estequiométrico. Se não for alcançado este valor para a reação em questão, chamar-se-á uma mistura desbalanceada, “rica” ou “pobre” conforme for o caso e, conseqüentemente, menor será a velocidade obtida para a queima;
- Energia de ativação / ignição: É a energia mínima necessária para provocar a reação. As características dos reagentes, sólidos líquidos ou gasosos, exigirão uma fonte de ignição de maior ou menor intensidade para que o processo seja iniciado ou que o mesmo ocorra;
- Local da explosão: Se houver um confinamento ou obstrução no meio da mistura, no caso de gases ou poeiras, o processo poderá ser acelerado devido à turbulência que irá causar. Se não houver, entende-se atualmente que não haverá explosão. O local também influi muito no que diz respeito às barreiras, reflexão da onda gerada e efeitos nas estruturas próximas, etc.

Assim, estes parâmetros irão definir o comportamento da reação, a qual às vezes não chega a se transformar em uma explosão efetivamente, tornando-se apenas uma queima acelerada (deflagração). Quando as velocidades de queima envolvidas são suficientemente altas para criar a onda de choque, considera-se então uma explosão.

Na deflagração, a reação se propaga fundamentalmente por transmissão de calor das porções da mistura onde já ocorreu a reação de combustão para aquelas ainda não reagidas. Pode-se ter a formação de onda de choque como a mostrada na Figura 1.10(a), que via de regra, viaja com a velocidade do som.

Quando a propagação da reação ocorre pela passagem da onda de choque na parte da mistura ainda não reagida, tem-se uma detonação, onde a propagação da onda de choque pode ser supersônica.

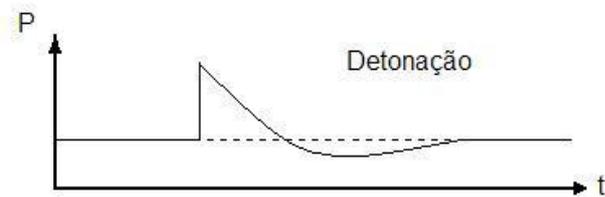


Figura 1.9: Exemplo de comportamento de uma detonação do ponto de vista de um alvo [Santiago, 2003].

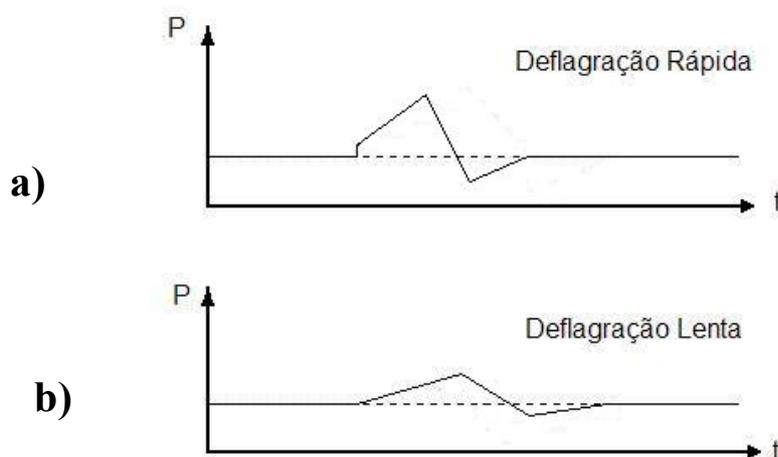


Figura 1.10: Exemplos de comportamentos de deflagrações do ponto de vista de um alvo [Santiago, 2003].

Na observação das Figuras 1.9 e 1.10, verifica-se que o pico de sobrepressão é atingido quase instantaneamente, sendo um fator de amplificação dos danos sobre estruturas. Nos casos de deflagração (Figura 1.10), principalmente lenta, a fase negativa sempre ocorre e apresenta uma menor escala em relação à positiva. Como definido por IAEA [2005], para alguns casos a análise de estruturas submetidas a deflagrações deve considerar a carga devido ao calor, o qual é responsável por grande parte da energia dissipada.

Nos casos onde a causa da explosão é um fator físico apenas, como a explosão de um vaso de pressão ou caldeira, por exemplo, estes pontos cruciais listados anteriormente (tipo de explosivo, quantidade, etc.) podem ser diferentes, não sendo exatamente o objetivo deste estudo. Nestes casos não se considera exatamente uma reação e sim um rompimento de uma estrutura com a liberação abrupta de energia contida.

1.3.1. EXPLOSIVOS SÓLIDOS

Os explosivos sólidos podem ser divididos em alto-explosivos (*HE*) e baixo-explosivos (*LE*), onde a principal diferença está nas velocidades de queima, quando deflagrados ou detonados. Nos *LE* as velocidades de queima são sempre menores do que a velocidade do som, o que não acontece aos *HE*, onde excedem a velocidade do som [Kinney & Graham, 1985].

Uma classificação muito utilizada destes materiais (*HE* e *LE*) é baseada na sensibilidade, ou seja, na facilidade com que se consegue detoná-los [Smith & Hetherington, 1994]. Os explosivos primários são aqueles que podem ser facilmente detonados pela simples ignição de uma faísca, chama ou impacto. Já os secundários, como exemplo *TNT* e *RDX*, não são tão simples de serem detonados, no entanto são considerados mais potentes.

Em termos de energia liberada na detonação, é comum admitir que é dependente apenas da massa de explosivo utilizado (*W*).

Devido à grande diferença de densidade dos explosivos sólidos em relação às misturas gasosas, para cargas semelhantes o volume se torna muito menor. Isso permite a consideração de carga concentrada nestas situações, gerando então uma onda de pressão esférica no ar. Com isso, o volume atingido pelos efeitos da explosão no tempo vai depender da distância ao cubo (R^3) até o epicentro.

A partir desses argumentos, determina-se uma *distância em escala* (*Z*) a qual representa uma *Lei de escala* para explosão de sólidos [Hopkinson-Cranz, 1926 *apud* Baker *et al.*, 1983]:

$$Z = \frac{R}{W^{0,333}} \quad (1)$$

onde, para qualquer variação nos parâmetros de distância e quantidade de explosivo, desde que mantidos o explosivo e a mesma *distância em escala*, produzirá efeito semelhante de sobrepressão sobre algum alvo ou estrutura [Baker *et al.*, 1983]. Reforça-se aqui a simplificação da propagação esférica do ar considerada.

Como esta lei de escala e outras considerações estão bem definidas, apresenta-se uma regra geral para a definição da distância mínima segura, utilizando os mesmos fundamentos [Kinney & Graham, 1985]:

$$r_{seg} = 120 \cdot W^{1/3} \quad (2)$$

onde r_{seg} é uma distância radial [m] do local do centro da explosão, mínima para garantir a segurança de pessoas e estruturas. Serve como rápida indicação para casos experimentais sem a necessidade de cálculos mais aprofundados. Estes se fazem obrigatórios quando avaliados os efeitos sobre estruturas, como neste trabalho, ou sobre as pessoas, apresentado no Apêndice I.

Com a lei de escala definida passa-se a utilizar o *TNT* como referência para explosivos devido a sua boa reprodutibilidade em ensaios de explosão e, principalmente, ao seu material puro quimicamente [Kinney & Graham, 1985]. Com isto, os estudos e publicações passaram a se referir sempre como “massas equivalentes” a um “padrão”, o *TNT*, utilizando-se então W_{TNT} [kg] como símbolo e unidade respectivamente. A Tabela 1.3 contém alguns desses outros explosivos com suas equivalências de massas. Outros parâmetros de caracterização de explosões também podem utilizar equivalências relacionadas ao *TNT*, um exemplo é o “impulso equivalente”.

Tabela 1.3: Relação de alguns explosivos com suas equivalências em *TNT* [Smith & Hetherington, 1994].

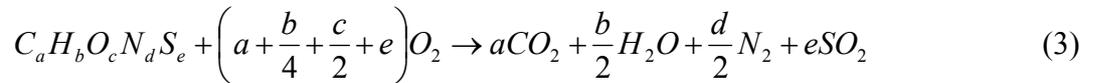
Nome do Explosivo	Energia Específica Mássica Q_x (kJ / kg)	TNT Equivalente (Q_x / Q_{TNT})
Amatol 80/20 (80% nitrato de Amônio, 20%)	2650	0,586
RDX (Cyclonite)	5360	1,185
Nitroglicerina (Líquida)	6700	1,481
PETN	5800	1,282
Pentolite 50/50 (50% PETN, 50% TNT)	5110	1,129
Tetryl	4520	1,000
Dinamite de Nitroglicerina 60%	2710	0,600

Utilizando os dados apresentados na Tabela 1.3 pode-se dizer que os efeitos gerados na explosão de 1kg de PETN a 100m do epicentro é igual aos causados por 1kg de Dinamite de Nitroglicerina 60% a 77,64m de distância do epicentro, pois suas distâncias em escala (Z) tem mesmo valor ($92,052m/kg^{0,333}$) e as massas de explosivo são as mesmas.

1.3.2. EXPLOSIVOS GASOSOS

Assim como em outros casos, alguns conceitos específicos da queima de gases são fundamentais para o entendimento e o prosseguimento do assunto a ser tratado neste capítulo. A primeira questão abordada é a reação química de oxidação. Existe para cada situação uma proporção entre os reagentes, para que a equação fique equilibrada, ou seja, uma vez completada a reação não sobram reagentes. Este equilíbrio é chamado de “estequiométrico” e, quanto mais próximo dele, menos tempo será necessário para o consumo total dos reagentes, em resumo, mais rápida a reação.

Em Smith & Hetherington [1994], tem-se que para um combustível genérico, contendo carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre, a equação estequiométrica pode ser representada conforme a equação (3).



Por questões naturais, o que acontece geralmente é um desequilíbrio destes reagentes. Muitas vezes, gases inflamáveis se misturam em distintas proporções, gerando misturas inflamáveis não homogêneas e com diferentes concentrações num mesmo volume. Por se tratar de um tema muito específico, procura-se aqui apenas apresentar subsídios para o conhecimento destas questões, as quais podem ser mais aprofundadas em AIChE/CCPS [2000]. Outro tópico não abordado aqui é a toxicidade de um gás, de uma mistura ou dos gases provenientes de uma explosão, pois o enfoque é apenas sobre os efeitos mecânicos gerados por explosões.

Quando ocorre um vazamento de um gás inflamável, onde haja mistura com o ar e sua ignição, acontecerá explosão apenas em situações onde essa mistura (gás + ar) possua condições favoráveis para a queima e esteja entre os limites *LIE* e *LSE*. Caso contrário, dependendo do caso, apenas uma breve deflagração ocorrerá. Sendo o foco deste trabalho “explosões”, consideram-se apenas situações em que estas são possíveis. A Tabela 1.2 contém alguns valores para os limites comentados.

Além da mistura, outros fatores são necessários para a caracterização do evento de uma explosão gasosa, dentre eles o conhecimento do ambiente onde esta mistura ou nuvem possa sofrer ignição. Dependendo da turbulência gerada na queima, o efeito de explosão será maior ou menor. Também entram neste ponto as condições atmosféricas, as quais podem aumentar ou diminuir as possibilidades de uma explosão de gás. Não menos importante é o vento, sendo sua presença responsável pela dispersão de uma nuvem de gás, podendo amenizar significativamente os efeitos de um acidente. Ainda pode-se listar a densidade do gás inflamável, a qual possui uma grande variação (desde os mais leves aos mais pesados que o ar). Cada uma das características citadas acima serão temas abordados separadamente nos capítulos seguintes.

Quando se trata da queima de gases e conseqüentes explosões, não se pode deixar de citar os tipos de eventos mais conhecidos relacionados ao assunto. A *BLEVE* (“Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion” ou Explosão por Expansão do Vapor de Líquido Fervente) é um fenômeno que ocorre quando se tem um gás ou vapor liquefeito por pressurização, mantido numa temperatura acima de seu ponto de ebulição e ocorre a despressurização súbita por ruptura do recipiente. Tem-se então uma explosão com formação da onda de choque gerada pela

expansão do líquido (expansão por mudança de fase). Este é um típico evento que pode ocorrer em instalações petroquímicas e usinas termelétricas, por exemplo, onde haja esferas contendo *GLP* ou caldeiras, proporcionando no caso de fluidos inflamáveis a criação da chamada “Bola de Fogo”, a qual costuma ser ainda mais danosa do que a própria explosão, sendo seus efeitos devidos principalmente à radiação térmica.

Na seqüência, cita-se a *VCE* (“Vapour Cloud Explosion” ou Explosão de Nuvem de Vapor), tipo de explosão responsável por tragédias históricas como a de Flixborough em 1974 na Inglaterra. Segundo AIChE/CCPS [2000], a *VCE* necessita de quatro situações para acontecer:

- O gás deve ser inflamável;
- Uma nuvem de tamanho suficiente deve se formar antes da ignição, sendo que estudos citam quantidades em torno de 1 *ton* de gás, porém há exemplos com valores menores do que 100 *kg*;
- Uma quantidade suficientemente grande do gás deverá estar dentro dos limites de inflamabilidade;
- Haver confinamento suficiente ou condições apropriadas para uma queima turbulenta de uma porção da nuvem de vapor. Uma *VCE* ocorre tipicamente em regiões congestionadas e a turbulência gerada nesta região define a severidade da explosão [Clutter & Whitney, 2001].

Tang e Baker [1998] citam maior duração para *VCE* em comparação à *HE* ou *LE* na fase positiva da sobrepressão. Além disto, realizam gráficos relacionando diferentes métodos de cálculos para sobrepressão e impulso incidentes, em função da distância, tratados em outros capítulos deste trabalho. Esses comparativos mostram em quais faixas de distâncias os métodos se aproximam mais de experimentos de explosões gasosas.

A *UVCE* (“Unconfined Vapour Cloud Explosion” ou Explosão de Nuvem de Vapor não Confinada) é um termo antes freqüentemente encontrado na literatura mas que tende a desaparecer, porque hoje se acredita que em nuvens totalmente não confinadas e sem obstáculos, a explosão não ocorre.

Com estes conceitos definidos, parte-se para uma breve comparação entre diferentes tipos de explosões. Segundo Schneider [1998], entre gases confinados e os explosivos sólidos, a aplicação da pressão é realizada em um intervalo maior no primeiro caso, ocasionando normalmente maiores esforços.

Diversos são os métodos existentes para estimar a pressão gerada em uma explosão, tanto de gases quanto de explosivos sólidos e, conseqüentemente, seus efeitos. Para isto, uma seção específica abordará o assunto.

1.4. EFEITO DA EXPLOSÃO NOS SERES HUMANOS

Quando acontece uma explosão e a conseqüente propagação da onda de pressão ou de choque, muitos danos podem ser causados, seja em estruturas, solos, alvos em geral, seja em seres humanos. Segundo Baker *et al.* [1983], são duas as formas básicas que acabam atingindo pessoas resultantes de explosões, os efeitos diretos e os indiretos.

Os efeitos diretos, ou primários, estão relacionados com as mudanças de pressão geradas pela detonação da carga. Alguns fatores específicos ainda poderiam ser detalhados para um levantamento mais criterioso destes danos, tais como idade, condições físicas, entre outros. Porém, importa neste estudo um resultado médio destes danos, o qual pode ser observado na Tabela 1.4. No Apêndice I estão algumas equações propostas por AIChE/CCPS [2000] para analisar probabilisticamente os diferentes danos aos seres humanos devido aos efeitos diretos.

Baker *et al.* [1983] definem que os efeitos indiretos se subdividem em secundários, terciários e diversos, onde os secundários envolvem lançamentos e projéteis oriundos da própria explosão ou da passagem da onda de pressão sobre algum material.

Tabela 1.4: Relação de alguns danos causados diretamente aos seres humanos devido às explosões [Autoridad Regulatoria Nuclear, 1998].

Efeito	Pico de Sobrepressão Efetiva (kPa)
Início de Danos aos Pulmões	80 (55-100)
Danos severos aos Pulmões	170 (165-200)
Início de Danos aos Tímpanos	35
Ruptura de Tímpanos (50%)	100-230 (depende da idade)
Morte (início)	275 (200-340)
Morte (50%) - (100%)	(340-500) - (520-780)

Os efeitos terciários estão diretamente ligados à aceleração ou desaceleração que o corpo humano pode atingir, quando submetido a uma onda de pressão ou quando desacelerado bruscamente ao impactar com alguma barreira.

Os efeitos diversos, ou miscelâneos, envolvem as radiações térmicas e as nuvens de areia, sendo considerados insignificantes em explosões convencionais. Neste trabalho estes efeitos sobre os seres humanos serão desconsiderados, importando apenas cálculos referentes à parte estrutural.

2. REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE

2.1. MODOS DE REPRESENTAÇÃO DA ONDA DE CHOQUE

Como já foi citado no Capítulo 2, diversos são os métodos utilizados atualmente para estimar a função pressão-tempo, geradas a partir de uma explosão (principalmente explosões no ar) a uma determinada distância do epicentro da mesma. Alguns destes, citados a seguir, levam em conta o efeito da turbulência de gases, local da explosão, riqueza da mistura, entre outros fatores. Outros fazem considerações simplificativas que reduzem sensivelmente o tempo para obtenção da resposta. Com o uso cada vez mais abrangente de técnicas computacionais, os métodos numéricos também devem ser citados, os quais apresentam excelentes resultados em tempos cada vez menores, sendo um dos objetivos desta dissertação mostrar as possibilidades do *MEF* com esquema de integração explícita. Na continuação, realiza-se uma revisão dos principais métodos disponíveis atualmente para determinar a distribuição espacial e temporal da pressão produzida por uma explosão.

2.1.1. MÉTODO SIMPLIFICADO

Para a obtenção das pressões geradas a partir de uma detonação de um explosivo sólido, um dos mais simples métodos utilizados e, possivelmente, um dos mais difundidos, é o Método Simplificado. Este faz uso dos ábacos e gráficos apresentados por Baker *et al.* [1983] e, em alguns casos, aplica a linearização da função de decaimento.

Tais gráficos fornecem os parâmetros indicados na Figura 1.7 em função da *distância em escala* (Z) definida pela equação (1). Esta, por sua vez, é dependente do fator de escala ($W^{1/3}$) e da distância (R) entre o epicentro e o ponto estudado. No apêndice II são apresentados os gráficos confeccionados por Baker *et al.* [1983]. Apesar de ser um método desenvolvido nos anos 70, ainda é utilizado e apresenta bons resultados, servindo como referência para desenvolver e testar métodos mais sofisticados, conforme seção 3.5.

A sua aplicação é bastante simples, o que, sem dúvida, é uma das suas maiores vantagens, pois, uma vez calculada a distância em escala, basta fazer a leitura gráfica direta da variável de interesse. É importante ressaltar que alguns destes parâmetros citados (P_{so} e P_r) são obtidos diretamente nos ábacos nas unidades finais, porém os outros (i_s , t_a , t_s , i_r) estão divididos pelo fator de escala, mostrando a dependência em relação à massa de explosivo. Na leitura destes basta uma multiplicação pelo fator de escala para se obter a unidade respectiva.

A apresentação das curvas em forma logarítmica com a presença de mais de uma escala predispõe a erros de leitura, sendo uma desvantagem em razão do tempo dispendido nesta fase. Outro detalhe importante é o fato de ser a explosão considerada como pontual, o que para explosivos sólidos em geral não leva a erros significativos, mas para nuvens de gases, principalmente, para locais mais próximos do centro da explosão, aumenta bastante os erros.

Quando se tratar de uma explosão em que se deseja considerar a porção refletida da onda de pressão, utiliza-se também a Figura II.3 do apêndice II, referente à reflexão. Neste caso, outros parâmetros de entrada devem ser considerados, tais como dimensões básicas do corpo sobre o qual a onda de choque ultrapassará. Neste caso então se considera a velocidade da onda de choque para determinar o tempo que a mesma leva para ultrapassar tal obstáculo, utilizando-se também este tempo para encontrar a função de pressão. Nos casos aplicados (seção 3.1) apresenta-se um exemplo de aplicação deste efeito sobre corpos.

A Figura II.2 contém outras variáveis possíveis de serem consideradas na utilização dos ditos ábacos, sendo de fundamental importância os valores de pressão dinâmica (q_0), os quais são somados aos valores de P_s na construção da função pressão-tempo. Um importante destaque deve ser dado ao fato de que tal pressão dinâmica ganha maior importância numérica quanto maior for o P_s , principalmente a partir de 200 kPa ($Z < 1,8$), onde os valores chegam a ficar da mesma ordem $P_s \approx q_0$.

Uma simplificação conservativa muito comumente utilizada neste método é a linearização da função de pressão, sendo apenas uma das formas de representar o decaimento da pressão no tempo. Significando que, uma vez encontrados os valores de tempo e pressão, pode-se traçar uma reta formando um triângulo (reta I da Figura 2.1). Esta será a aproximação do comportamento exponencial da pressão para a situação em questão. Smith & Hetherington [1994] comentam que tal reta traçada pode também ser colocada de forma que o tempo T_s fique menor (reta II da mesma figura), tornando o impulso com o valor mais próximo do real.

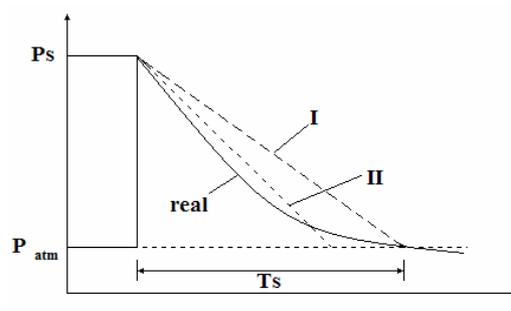


Figura 2.1: Aproximações para a função de pressão de uma explosão [Smith & Hetherington, 1994].

Na realidade, a forma como a pressão se comporta ao longo do tempo depende das constantes θ (para explosões submersas) ou b (para explosões no ar) apresentadas nas equações (12) e (22) respectivamente, sendo que ambas constantes são dependentes da distância (R) e da massa de explosivo (W). O método aqui apresentado fornece, também através dos ábacos, a constante b , de forma que se pode traçar a curva de pressão e integrá-la, possibilitando ainda uma comparação entre os impulsos gerados para os casos com e sem a linearização de dita função. Um exemplo disto está mostrado na primeira aplicação do método apresentada no Cap. 3.

Outra informação fundamental é quanto às detonações em materiais sólidos. Estas são caracterizadas por um aumento pontual de pressão, o qual expande do centro do explosivo como uma onda, e por isso, valores de impulsos negativos são muito menos freqüentes nestes casos, diferindo de explosões de nuvens de gás [IAEA, 2005]. Como o método simplificado está baseado na equivalência em massa de explosivo de *TNT*, as pressões apresentadas seguem um comportamento mais parecido com tal. Segundo IAEA [2005], normalmente a representação da fase positiva da curva de pressão apenas incluindo os efeitos de reflexão é suficiente para avaliações de engenharia. Apesar disto, apresenta-se em uma outra seção deste trabalho um ábaco referente aos parâmetros da fase negativa de pressão da curva.

2.1.2. OUTROS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA ONDA DE CHOQUE

Nesta pesquisa realizada, outras formas de representar a pressão no tempo de uma explosão são apresentadas. Na maioria, as equações que fornecem os parâmetros têm como variável de entrada a distância em escala, como no caso anterior.

Para explosões químicas e nucleares Kinney & Graham [1985] fornecem equações para determinação destes parâmetros, sendo para as químicas em ambientes abertos as seguintes:

$$P_{S0} = P_a \cdot \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1,35} \right)^2}} \quad (4)$$

$$t_a = \frac{1}{a_x} \int_{r_c}^r \left[\frac{1}{1 + \frac{6P_{S0}}{7P_a}} \right]^{1/2} dr \quad (5)$$

$$t_s = W^{1/3} \cdot \frac{980[1 + (Z/0,54)^{10}]}{[1 + (Z/0,02)^2] \cdot [1 + (Z/0,74)^6] \cdot \sqrt{1 + (Z/6,9)^2}} \quad (6)$$

$$\frac{I}{A} = \frac{0,067 \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,23}\right)^4}}{Z^2 \cdot \sqrt[3]{1 + \left(\frac{Z}{0,55}\right)^3}} \quad (7)$$

E para explosões nucleares, equações semelhantes são apresentadas, também para ambientes abertos, sendo que t_a possui a mesma equação e não é fornecida a equação para impulso:

$$P_{s0} = P_a \cdot 3,2E6 \cdot Z^{-3} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{87}\right)^2} \left[1 + \frac{Z}{800}\right] \quad (8)$$

$$t_s = W^{1/3} \cdot \frac{180[1 + (Z/100)^3]}{\sqrt{1 + (Z/40)} \cdot \sqrt[5]{1 + (Z/285)^5} \cdot \sqrt[5]{1 + (Z/50000)}} \quad (9)$$

Em caso de explosões submersas em águas, Ramajeyathilagam *et al.* [2000] propõem as seguintes equações para representar o fenômeno:

$$P_{s0} = \frac{52,16E6}{Z^{1/3}} \quad (10)$$

$$\theta = 92,5 \cdot W^{1/3} \cdot Z^{0,22} \quad (11)$$

$$P(t) = P_{s0} e^{-(t-t_a)/\theta}, 0 \leq t \leq \theta \quad (12)$$

Onde θ é uma constante de decaimento [μs].

As equações (10) a (12) fornecem a variação da pressão da onda de choque no tempo diretamente, permitindo definir matematicamente as outras variáveis como impulso por unidade de área, tempo da fase positiva, e pico de sobrepressão.

Smith & Hetherington [1994] citam também equações propostas por Henrych [1979] para estimar o pico de sobrepressão, baseadas em soluções numéricas e experimentos:

$$P_{so} = \frac{14,072}{Z} + \frac{5,540}{Z^2} - \frac{0,357}{Z^3} + \frac{0,00625}{Z^4} \text{ bar} \Rightarrow (0,05 \leq Z \leq 0,3) \quad (13)$$

$$P_{so} = \frac{6,194}{Z} - \frac{0,326}{Z^2} + \frac{2,132}{Z^3} \text{ bar} \Rightarrow (0, \leq Z \leq 1) \quad (14)$$

$$P_{so} = \frac{0,662}{Z} + \frac{4,05}{Z^2} + \frac{3,288}{Z^3} \text{ bar} \Rightarrow (1 \leq Z \leq 10) \quad (15)$$

Para as variáveis *impulso*, *tempo* e *pressão máxima* da fase negativa, Smith & Hetherington [1994] apresentam as equações propostas por Brode [1955] que seguem abaixo.

$$\Delta p_{\min} = -\frac{0,35}{Z} (Z > 1,6) \quad (16)$$

$$T^- = 1,25W^{1/3} \quad (17)$$

$$\bar{i}^- \approx i_s \left[1 - \frac{1}{2Z} \right] \quad (18)$$

Onde:

Δp_{\min} = pico de pressão na fase negativa da onda de pressão;

T^- = tempo total da fase negativa da onda de pressão;

\bar{i}^- = impulso da fase negativa da onda de pressão.

Com relação às equações apresentadas anteriormente é importante ressaltar o fato de serem consideradas explosões à altitudes baixas, ao nível do mar. Caso a intenção seja estimar os valores a elevadas altitudes, onde as condições ambientais são diferentes, podem-se utilizar as seguintes relações [Smith & Hetherington, 1994]:

$$\bar{P} = \frac{P_{so}}{P_a} \quad (19)$$

$$\bar{i} = \frac{i_s \cdot a_0}{E^{1/3} \cdot P_a^{2/3}} \quad (20)$$

$$\bar{R} = \frac{R \cdot P_a^{1/3}}{E^{1/3}} \quad (21)$$

Onde:

E = energia do explosivo [J];

\bar{R} = distância escalada de Sachs;

R = distância da explosão analisada [m].

A partir dos parâmetros levantados por diferentes formas apresentadas, tem-se então a equação da pressão em função do tempo, que é:

$$P(t) = P_{so} \left[1 - \frac{t}{T_s} \right] \exp \left\{ -\frac{bt}{T_s} \right\} \quad (22)$$

onde b é o parâmetro de forma da onda dependente da distância em escala e T_s é o tempo da fase positiva da onda [Smith & Hetherington, 1994].

Alguns programas computacionais oferecem a facilidade de simulação de situações diversas para explosões, com os mais variados explosivos sólidos, cada uma com suas restrições e simplificações. São programas de uso restrito por razões de segurança principalmente. Geralmente, consideram explosões pontuais, porém maiores esclarecimentos sobre a utilização destes códigos serão vistos na seção 2.1.6.

2.1.3. MÉTODO DO TNT EQUIVALENTE

O *Método do TNT Equivalente* está baseado na consideração de equivalência entre um material inflamável e o *TNT*, o qual já possui diversas representações gráficas e analíticas para o levantamento dos parâmetros, como visto anteriormente. A massa de *TNT* é definida por

$$W_{TNT} = \frac{\eta M E_c}{E_{TNT}} \quad (23)$$

Onde:

η = eficiência de explosão empírica;
 M = massa de hidrocarboneto [kg];
 E_c = calor de combustão do gás inflamável [kJ/kg];
 E_{TNT} = calor de combustão do TNT [4437-4765 kJ/kg].

Então, sabendo-se a massa de gás inflamável que entrou em combustão e a energia de combustão e estimando-se um valor de η , calcula-se a massa equivalente de *TNT*. Tal eficiência deve estar entre 1 e 10%, segundo Lees [1996]. Já AICHE/CCPS [2000], cita seu valor como dependente do método de determinação da contribuição da massa de combustível. Explica ainda que modelos baseados na quantidade total da massa de gás possuem baixas eficiências, aumentando seus valores para modelos baseados nas massas de nuvens de gás separadamente. Afirma que o maior problema deste método é exatamente a definição desta eficiência.

Uma vez encontrada a *massa equivalente de TNT* (W_{TNT}), utiliza-se a equação (1) para definir a distância em escala (Z). Este será um dos parâmetros necessários para a equação (24).

A partir daí, Lees [1996] *apud* AICHE/CCPS [2000] propõe-se um equacionamento para obtenção da sobrepressão, impulso por unidade de área, tempo de chegada e duração da fase positiva, chamados de Φ e apresentados na Tabela 2.1 como segue.

$$\log_{10} \Phi = \sum_{i=0}^n c_i (a + b \cdot \log_{10} Z)^i \quad (24)$$

Sendo:

Φ = variável que se pretende encontrar (P_s ; i_s ; t_d ; t_a);
 a ; b ; c = constantes encontradas na Tabela 2.1;
 i = subíndice utilizado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Lista de constantes e parâmetros utilizados para obtenção dos valores indicados na equação acima [AIChE/CCPS, 2000 – Lees, 1996].

Constant	Range	Function Φ			
		P_0 (kPa)	i_s (Pa.s)	t_d (ms)	t_a (ms)
	1	0,0674 $\leq Z \leq$ 40	0,0674 $\leq Z \leq$ 0,955	0,178 $\leq Z \leq$ 1,01	$\leq Z \leq$
	2	-	0,955 $\leq Z \leq$ 40	1,01 $\leq Z \leq$ 2,78	-
	3	-	-	2,78 $\leq Z \leq$ 40	-
a	1	-0,214362789151	2,06761908721	1,92946154068	-0,202425716178
	2	-	-1,94708846747	-2,12492525216	-
	3	-	-	-3,53626218091	-
b	1	1,35034249993	3,0760329666	5,25099193925	1,37784223635
	2	-	2,40697745406	9,296288611	-
	3	-	-	3,46349745571	-
c₀	1	2,78076916577	2,52455620925	-0,614227603559	-0,0591634288046
	2	-	1,67281645863	0,315409245784	-
	3	-	-	0,686906642409	-
c₁	1	-1,6958988741	-0,502992763686	0,130143717675	1,35706496258
	2	-	-0,384519026965	-0,0297944268976	-
	3	-	-	0,0933035304009	-
c₂	1	-0,154159376846	0,171335645235	0,134872511954	0,052492798645
	2	-	-0,0260816706301	0,030632955288	-
	3	-	-	-0,0005849420883	-
c₃	1	0,514060730593	0,0450176963051	0,0391574276906	-0,196563954086
	2	-	0,0059579875382	0,0183405574086	-
	3	-	-	-0,00226884995013	-
c₄	1	0,0988554365274	-0,0118964626402	-0,004759336647	-0,0601770052288
	2	-	0,014544526107	-0,0173964666211	-
	3	-	-	-0,00295908591505	-
c₅	1	-0,293912623038	-	-0,00428144598008	0,0696360270891
	2	-	-0,006632893347	-0,00106321963633	-
	3	-	-	0,00148029868929	-
c₆	1	-0,0268112345019	-	-	0,0215297490092
	2	-	-0,00284189327204	0,00562060030977	-
	3	-	-	-	-
c₇	1	0,109097496421	-	-	-0,0161658930785
	2	-	0,0013644816227	0,000161821750	-
	3	-	-	-	-
c₈	1	0,00162846756311	-	-	-0,00232531970294
	2	-	-	-0,00068601889440	-
	3	-	-	-	-
c₉	1	-0,021463103024	-	-	0,00147752067524
	2	-	-	-	-
	3	-	-	-	-
c₁₀	1	0,0001456723382	-	-	-
	2	-	-	-	-
	3	-	-	-	-
c₁₁	1	0,00167847752266	-	-	-
	2	-	-	-	-
	3	-	-	-	-

É importante salientar o comentário de Leal [2004]: “*Um problema encontrado neste método de cálculo é a geração de resultados de sobrepressão muito altos para pontos próximos ao centro da explosão. Isto é verdadeiro para explosivos sólidos, mas não diretamente aplicável à explosão de nuvem de gás. Para esse tipo de explosão, a sobrepressão não pode exceder o valor observado em um vaso fechado*”.

Observa-se que a Eq.(64) juntamente com a Tabela 2.1 podem ser utilizadas diretamente em modelos de explosivos sólidos e para efeitos de comparação com o método simplificado e, se faz uso desta metodologia na seção 3.5 onde mostram-se os resultados para seis aplicações.

2.1.4. MÉTODO DO SHOCK WAVE – TNO

“Seguindo a evolução dos métodos preditivos, surgiu o Método do Shock Wave – TNO sendo um método apropriado para explosões de gases [Wiekema, 1979 *apud* Santiago, 2003]. Este considera que a nuvem de vapor será simulada como sendo hemisférica e homogênea, com mistura estequiométrica e com sua ignição ocorrendo em seu centro”. Uma grande vantagem em relação ao método anteriormente citado é a reprodução mais fiel do comportamento da explosão a pequenas distâncias do centro da nuvem.

O procedimento de cálculo está apresentado em quatro etapas segundo TNO [1997]. A primeira delas é o equacionamento de um comprimento característico (L_0), conforme abaixo:

$$L_0 = [V_0 \cdot E_{VC} / P_{atm}]^{1/3} \quad (25)$$

Onde:

- L_0 = comprimento característico [m];
- V_0 = volume ocupado pela mistura estequiométrica gás-ar [m^3];
- E_{VC} = energia específica da combustão [J/m^3]; (3,5E6 valor médio para hidrocarbonetos)
- P_{atm} = 101.325 [N/m^2] – Pressão atmosférica ao nível do mar.

Sendo que volume de mistura estequiométrica é calculado considerando o ar contendo 20% de Oxigênio, apresentando-se assim o segundo passo do cálculo.

$$V_0 = \frac{(1 + 5 \cdot n) \cdot m \cdot R \cdot T}{M \cdot P_a} \quad (26)$$

Sendo:

- m = massa de gás entre LIE e LSE [kg];
- R = constante dos gases [J/kmol.K];
- T = temperatura da mistura [K];
- M = massa molecular do gás [kg/kmol];
- n = número de moles necessários para reação estequiométrica com O_2 .

Na terceira etapa, estimam-se os níveis de sobrepressão considerando diferentes tipos de gases, no que diz respeito às suas reatividades: baixa, média e alta, respectivamente.

$$P_0 / P_a = \phi(L_0 / x) \quad (27)$$

Onde:

- P_0 = Pico de sobrepressão na onda de choque [N/m^2];
- ϕ = níveis de reatividade (0,02-baixa, 0,06-média, 0,15-alta), apresentado na Tabela 2.2;
- x = distância do ponto tomado até o centro da explosão [m];

Uma vez encontrado o pico de sobrepressão, é calculado o tempo de duração da fase positiva, formando a quarta e última etapa deste Método.

$$t_d = \frac{L_0}{a} \left[0,456 \left(\frac{a}{u_f} - 1 \right) + \frac{3 \cdot \phi}{7} \ln \left(\frac{1 + \frac{7}{3\phi} \cdot \frac{x}{L_0}}{1 + \frac{1,064}{\phi}} \right) \right] \quad (28)$$

Sendo:

a = velocidade do som no ar [m/s];

u_f = velocidade de propagação da chama [m/s].

As variáveis citadas nas equações (27) e (28), com exemplos de gases, estão exemplificadas na Tabela 2.2, conforme o grau de reatividade.

Tabela 2.2: Definição de valores mencionados nas equações anteriores.

Reatividade	u_f [m/s]	ϕ	Exemplos de gases
Baixa (A)	40	0,02	Metano, monóxido de carbono, etc.
Média (B)	80	0,06	Etano, propano, butano, etc.
Alta (C)	160	0,15	Hidrogênio, acetileno, óxido de eteno, etc.

2.1.5. MÉTODO MULTIENERGIA – TNO

Este método é utilizado para avaliar a distribuição no tempo e espaço da pressão produzida por uma explosão gasosa sobre um alvo. Propõe uma série de expressões que permitem determinar a função de sobrepressão com a “premissa de que apenas as parcelas com certo grau mínimo de confinamento ou localizadas em partes da nuvem particularmente obstruídas, ao invés de toda a porção inflamável da nuvem (seção 2.1.4), realmente contribuem para a geração de sobrepressão efetiva” [Santiago, 2003].

Desta forma, pode-se caracterizar a explosão diferenciando locais ou regiões com características isoladas, sem considerar todo o volume de gás com as mesmas características. Para isto, um detalhamento do local de concentração dos gases deve ser avaliado, o que já diferencia este método do apresentado anteriormente. Seguem-se alguns passos necessários para a aplicação deste método:

- 1 – Identificar locais de concentração de gases dentro das áreas congestionadas, considerando que normalmente gases pesados se movem e se concentram em áreas baixas;
- 2 – Estimar a energia da carga ar-combustível equivalente, sendo importante considerar cada nuvem separadamente. Os volumes de cada parcela devem ser somados para cada região, mas devem estar subtraídos dos obstáculos (máquinas, construções, tubulações, etc.). No caso de uma relação estequiométrica entre o ar (20% O₂ e 80% N₂) e um hidrocarboneto (tratado como um gás perfeito), tem-se:

$$E_Q = E_{VC} \cdot \frac{(1 + 5 \cdot n_0) \cdot R \cdot T_0}{m_{\text{gás}} \cdot M \cdot P_0} \quad (29)$$

sendo:

n_0 = relação entre número de moles de gás e nº moles de oxigênio para queima estequiométrica;

M = massa molar do gás;

R = constante universal dos gases;

T_0 e P_0 = temperatura e pressão ambientes;

E_{VC} = Energia específica da combustão [Harris, 1983 *apud* AIChE/CCPS, 2000].

E_Q = Energia total resultante da queima da mistura inflamável na nuvem.

3 – Determinar um valor de intensidade da explosão entre 1 e 10, para cada volume considerado, ou seja, se ela está mais próxima de uma detonação ou de uma deflagração. Sendo que 10 representa uma explosão com intensidade máxima e direciona normalmente a análise para uma visão conservativa. Valores comumente utilizados são da ordem de 7, porém os analistas de riscos definem seus critérios e seus valores [AIChE/CCPS, 2000].

4 – Definir a distância em escala de “Sachs” (\bar{R}) (*apud* AIChE/CCPS, [2000]), utilizando a equação (21), e com este valor encontrar o pico de sobrepressão em escala de “Sachs” (*apud* AIChE/CCPS, [2000]), utilizando a Figura 2.2.

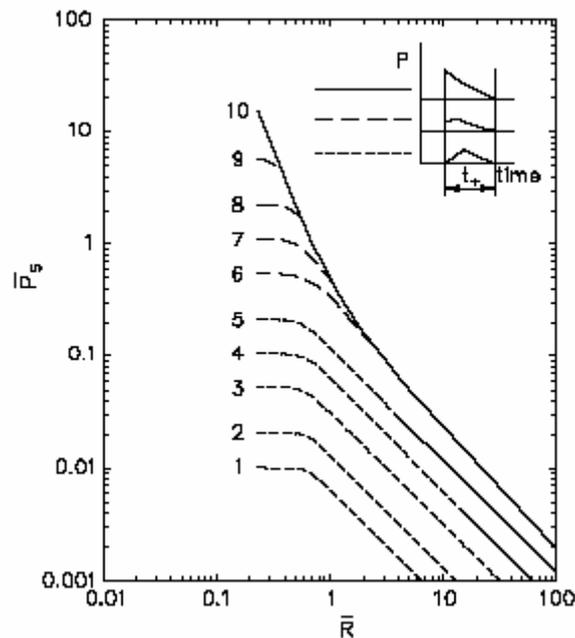


Figura 2.2: Relação entre distância em escala de Sachs e sobrepressão em escala de Sachs para diferentes intensidades de explosão [AIChE/CCPS, 2000].

Para esta etapa, colocar em tabela se diferentes volumes e forças forem considerados. Multiplicar os valores de sobrepressão escalada pela pressão ambiente, resultando nos picos de sobrepressão.

$$P_s = \bar{P}_s \cdot P_0 \quad (30)$$

Neste momento, podem-se somar os efeitos de sobrepressão das diferentes massas de gás, consideradas se as distâncias do centro destes volumes forem semelhantes, fazendo com que seus efeitos se sobreponham.

5 – Encontrar também a partir de \bar{R} o tempo em escala da fase positiva de “Sachs” (*apud* AIChE/CCPS, [2000]), através da Figura 2.3. Uma vez definido este tempo em escala, calcula-se o tempo de duração da fase positiva de pressão conforme equação abaixo:

$$t_+ = \frac{\bar{t}_+ \cdot \left(\frac{E_Q}{P_0} \right)^{1/3}}{c_0} \quad (31)$$

sendo:

c_0 = velocidade do som [m/s];

t_+ = tempo de duração da fase positiva [s].

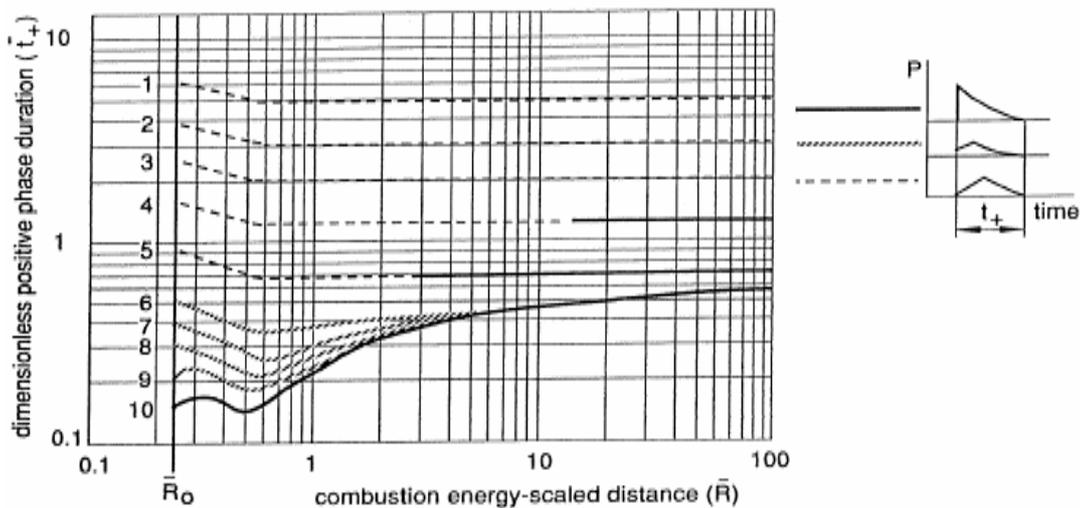


Figura 2.3: Relação entre distância escalada de Sachs e duração da fase positiva escalada de Sachs para diferentes forças de explosões [AIChE/CCPS, 2000].

Este método é explicado com detalhe em Santiago [2003], onde o mesmo realiza cálculos para um vaso de pressão esférico frente à ação de uma nuvem explosiva de um gás pesado.

O maior problema da aplicação deste método é que, novamente, o analista/engenheiro deve definir a severidade da explosão [AIChE/CCPS, 2000] (ver passo 3 apresentado). O fato de serem apresentadas 10 curvas diferentes permite que esta escolha seja um pouco mais detalhista e criteriosa do que o método do Shock Wave – TNO.

2.1.6. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Nesta dissertação utiliza-se, em algumas análises, um programa cuja solução emprega o método de elementos finitos com um esquema explícito de integração, o LS-Dyna [2003]. Este possui disponíveis equações de estado que avaliam a variação da pressão no espaço e no tempo durante a simulação e serão comentadas na seção 2.2. Outros softwares comerciais específicos

para análises de estruturas submetidas a explosões se encontram disponíveis no mercado, entre eles:

- *AUTODYN2D* – programa de análise explícita especificamente criado para problemas de dinâmica não linear, incluindo propagação de onda explosiva proveniente de altos explosivos, podendo rodar em uma grande variedade de hardwares. Pode-se utilizar AUTOREAGAS que é complementar ao AUTODYN2D e que serve para análise de explosões de gases e vapores confinados ou congestionados e seus subseqüentes efeitos [Chapman *et al.*, 1995b]. A Figura 2.4 ilustra a comparação entre os resultados obtidos com este código e experimentos. Ambrosini *et al.* [2002, 2003a e 2003b] fazem uso deste código apresentando ótimos resultados.

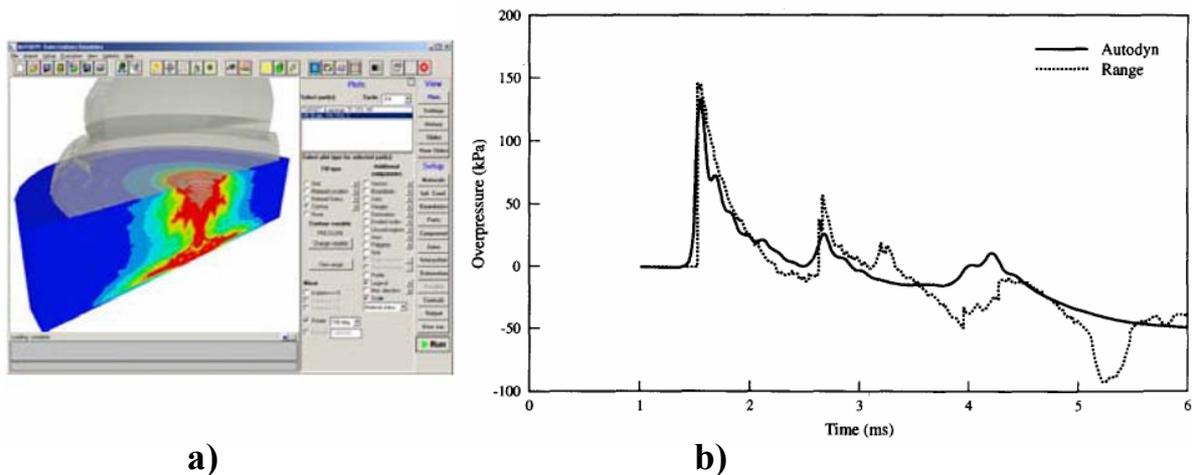


Figura 2.4: Interface gráfica do programa Autodyn [Protetive Design Center, 2005] (a); Comparação de resultados de pressões entre programa AUTODYN2D e teste experimental [Chapman *et al.*, 1995b] (b).

- *CONWEP* – Programa que facilita a utilização de expressões convencionais baseados nas curvas TM 5-855-1 (Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects) do Exército Norte Americano. Inclui rotinas de explosões, penetrações de fragmentos e projéteis, crateras e ondas de choque no chão. Ferramenta simples e projetada para uso de pessoas sem necessidade de formação em Engenharia. Ilustra-se na Figura 2.5 a interface capturada na internet.

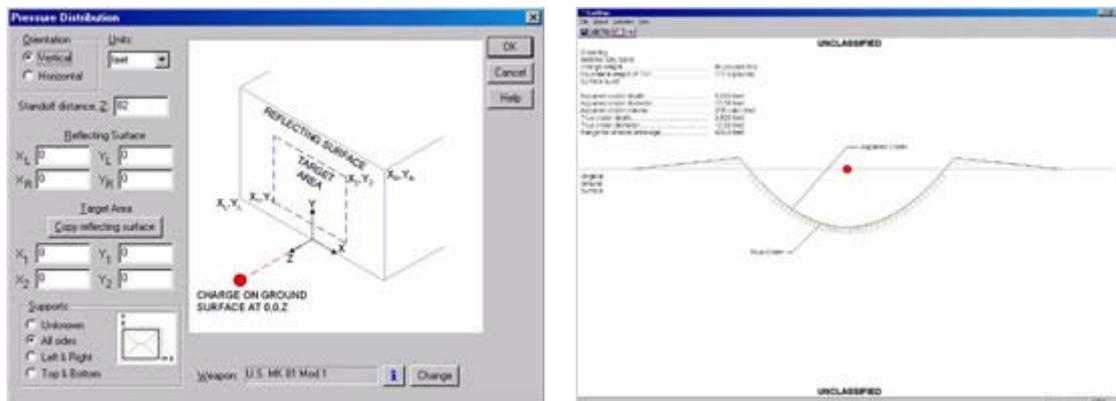


Figura 2.5: Interface gráfica do programa CONWEP [Protetive Design Center, 2005]

- *Air3d* – programa de simulação de explosão em 3 dimensões [Rose e Smith, 2002]: que utiliza células cúbicas em malha cartesiana regular escrito em Fortran 90. Modela a influência da geometria urbana na onda de choque e associa aos danos sobre estruturas.

Outros programas podem realizar alguns destes tipos de modelagens, entre eles: Abaqus, BlastX, BEEM, HAZL, os quais estão descritos no site do Protective Design Center [2005]. Reforça-se a idéia de que num modelamento numérico sempre há hipóteses simplificativas que aproximam o modelo à realidade e introduzem erros aos resultados, e este fato não deve ser menosprezado pela pessoa que estiver construindo o modelo numérico.

2.2. CONSIDERAÇÃO DA FASE NEGATIVA

Um aspecto comum na caracterização da onda de sobrepressão é o aparecimento de uma fase negativa, como já citado na seção 1.2. Para o levantamento de parâmetros relacionados a esta fase, Krauthammer e Altenberg [2000] citam um ábaco onde se podem colher diretamente os valores de tempo, impulso, e pressão envolvidos. De uma forma semelhante à apresentada na seção 2.1.1, basta determinar a distância em escala e utilizá-la como parâmetro de entrada na Figura 2.6. Alguns valores de variáveis devem ser multiplicados pela raiz cúbica da massa equivalente de TNT, da mesma forma definida como pelo Método Simplificado (Capítulo 2.1.1). Observa-se que este ábaco foi definido em unidades Inglesas.

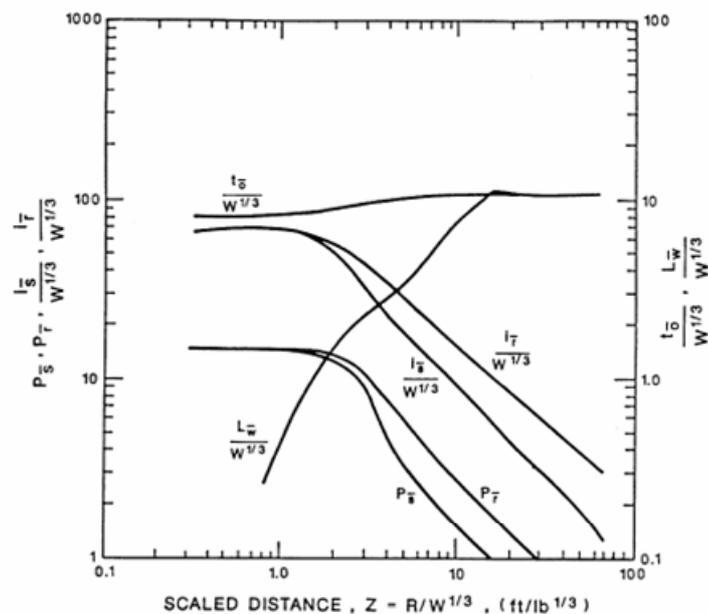


Figura 2.6: Parâmetros da onda de choque para a fase negativa para uma carga esférica de TNT em ar livre ao nível do mar segundo Krauthammer e Altenberg [2000].

Uma consideração comum para dimensionamentos de estruturas é o uso apenas da fase positiva da sobrepressão para representar toda a solicitação. Porém, essa consideração não é verdadeira para todos os valores de distância escalar (Z), onde valores maiores que 20 apresentam picos de pressão similares, tanto positivos quanto negativos, especialmente quando $Z > 50$ [Krauthammer & Altenberg, 2000]. Os mesmos autores apresentam em seu estudo um gráfico que quantifica os picos (positivos e negativos) de pressão refletida para diferentes distâncias escalares, conforme Figura 2.7.

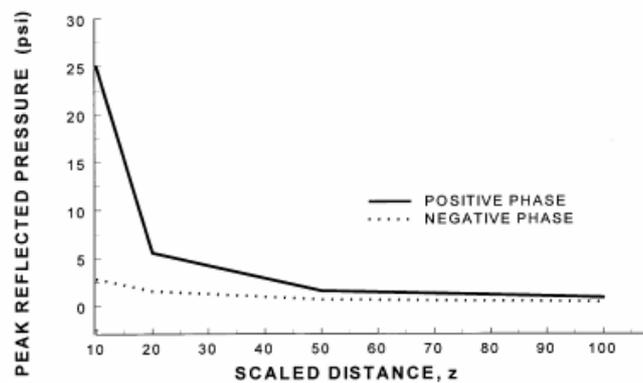


Figura 2.7: Magnitudes dos picos de pressão positiva e negativa em função da distância escalar [Krauthammer e Altenberg, 2000].

Uma visualização rápida e simples desta figura mostra a importância da fase negativa comparada à positiva, principalmente, para maiores distâncias escalares.

2.3. REFLEXÃO DAS ONDAS DE CHOQUE

Uma característica comum encontrada em eventos explosivos é a reflexão da onda de pressão que ocorre quando o deslocamento de ar encontra algum obstáculo oferecendo resistência à sua propagação. Neste sentido, o solo acaba sendo uma destas estruturas reflexivas, principalmente quando o centro da explosão possui altura diferente de zero, porém não muito elevada.

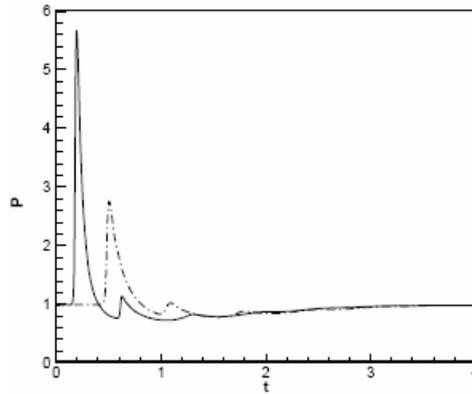


Figura 2.8: Curva de pressão vs. tempo mostrando segundo pico de pressão [Liang, Wang e Chen, 2002].

A maneira como se apresenta esta reflexão no solo é caracterizada por outros pequenos picos de sobrepressão, como pode ser visto na Figura 2.8.

Liang *et al.* [2002] apresentam em uma seqüência de figuras uma comparação dos contornos de pressão para uma explosão. Apesar de considerar os efeitos viscosos do fluido de propagação, eles observam um comportamento semelhante entre os três casos de diferentes viscosidades.

Assim como a onda reflete no solo, reflete nos alvos (estruturas) por onde a onda passa, fator este que depende do ângulo formado entre a onda e a superfície. “*Esta reflexão acaba por aumentar a sobrepressão efetiva assim como a carga resultante sobre a estrutura*” [Santiago, 2003].

Em sua dissertação, Santiago [2003] apresenta algumas considerações sobre a reflexão das ondas, ilustrando equações e gráficos que relacionam coeficientes de reflexão, sobrepressão e o coeficiente b de decaimento da onda de choque.

A Autoridad Regulatoria Nuclear [1998] apresenta algumas equações e uma metodologia simplificada para estimar o comportamento da pressão sobre um objeto a ser ultrapassado pela onda de choque. Neste caso é considerada uma geometria simplificada e um exemplo de aplicação está apresentado na seção 3.1 deste trabalho.

2.4. INTERAÇÃO DAS ONDAS DE CHOQUE COM CORPOS

O primeiro efeito da propagação de uma onda de choque sobre uma superfície é a reflexão, principalmente sobre o solo. Porém, outros efeitos acontecem quando a onda de pressão avança e ultrapassa algum alvo.

Sendo assim, Smith e Hetherington [1994] definem três situações onde há a interação da onda de choque com a estrutura:

- Explosão de grande escala (nuclear) interagindo com estruturas de grande porte (Figura 2.9(a)): Acontecem normalmente forças translacionais na direção de propagação, e ortogonais a esta, devido aos vórtices originados na passagem da onda de pressão, principalmente com ventos transientes;
- Explosão de grande escala (nuclear) interagindo com estruturas de pequeno porte (Figura 2.9(b)): Acontece uma onda de pressão semelhante em toda a estrutura atingida. A força translacional atua em distância suficiente para mover a estrutura alvo, sendo que parte substancial dos danos é decorrente deste movimento;
- Explosões menores interagindo com estruturas maiores (Figura 2.9(c)): Aparecem danos localizados nas estruturas que devem ser analisados separadamente.

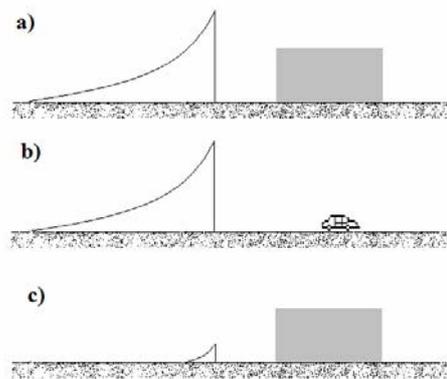


Figura 2.9: Três casos de interação de ondas de choque com estruturas [Smith e Hetherington, 1994]

Zaslavskii *et al.* [2001] apresentam equações permitindo determinar a força aplicada aos corpos (cilíndricos ou esféricos) que estejam submetidos à onda de choque, conferindo resultados muito satisfatórios quando comparados aos experimentais.

2.5. PAINÉIS DE VIDRO

Por serem os vidros, normalmente, as primeiras partes das estruturas a apresentarem falhas, suas respostas frente às solicitações impulsivas são muito importantes. Os efeitos e danos gerados pelo rompimento dos mesmos para as pessoas podem ser fatais, dependendo da intensidade da pressão incidente.

Segundo Krauthammer e Altenberg [2000], o modelo para prever o comportamento de painéis de vidro deve considerar que as falhas dependem da interação entre o tensor de tensões da superfície e a existência de falhas. Como estas são comuns nos painéis de vidros, devido à

fabricação e condições de serviço, existem fatores concentradores de tensões que devem ser considerados nas análises. Neste mesmo estudo, os autores fornecem alguns parâmetros utilizados para ruptura do vidro e as condições de cargas exercidas sobre os painéis de vidro. Ainda fixam dois valores de cargas e fazem variações das distâncias.

Uma relação interessante também apresentada é o pico de deslocamento dos painéis em função de uma relação entre tempo de carga e período fundamental da placa de vidro. E este estudo mostra que, em alguns casos, o deslocamento máximo é observado no sentido oposto à propagação da onda, reforçando a idéia de não menosprezar a fase negativa em casos específicos.

Outros estudos sobre o comportamento dos vidros mediante carregamentos dinâmicos são apresentados por Abeyaratne e Knowles [2000].

2.6. MODELAGEM NUMÉRICA

Nesta seção são apresentados elementos e características que serão utilizados durante a modelagem numérica dos problemas resolvidos no Capítulo 3.

2.6.1. EQUAÇÕES DE ESTADO - EOS

Basicamente, pode-se dizer que as Equações de Estado (EOS) definem as pressões geradas pela liberação de energia química de um explosivo [Hibbitt *et al.* 1995]. De uma forma mais geral, definem-se as EOS como equações constitutivas descrevendo relações entre diferentes propriedades (pressão, temperatura, volume, energia interna) de materiais hidrodinâmicos.

Uma das mais simples EOS utilizadas em aplicações diversas é a dos gases ideais. Esta relaciona através de uma constante do gás (R) um comportamento geral do mesmo.

$$PV = nRT \quad (32)$$

Sendo:

- P = pressão do gás [Pa];
- V = Volume do gás [m^3];
- n = número de moles de gás;
- R = Constante Universal dos gases [J/mol.K];
- T = Temperatura [K].

No caso de situações que envolvem explosões, as relações não são tão simples. A mais conhecida equação de estado utilizada para este tipo de situação é chamada de *JWL*, nome dado em homenagem aos seus criadores Jones-Wilkens-Lee. Possui como fundamentação matemática a queima programada e pode ser escrita em termos da energia inicial por unidade de massa do explosivo como sendo:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega}{V} E \quad (33)$$

onde $V = \rho_0 / \rho$ e ρ_0 , ω , R_1 , R_2 , E , A e B são coeficientes dependentes do tipo de explosivo utilizado. Para o caso do TNT, LS-Dyna, [2003] apresenta uma tabela com os seguintes valores:

Tabela 2.3: Coeficientes utilizados para a equação JWL [LS-Dyna, 2003]

$\rho_0 = 1631$ [g/cc]	$\omega = 0,3027$ [s/unidade]	$R_1 = 40,713$ [s/unidade]	$R_2 = 9,6754$ [s/unidade]	$E = 0,06656$ [Mbar]	$A = 4,9007$ [Mbar]	$B = 0,0490$ [Mbar]
---------------------------	----------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------	------------------------	------------------------

Outra observação a se fazer na modelagem numérica é que esta *EOS* será indicada apenas para os elementos representando o explosivo. Outras *EOS* podem e serão utilizadas para simular o ar e as estruturas. Estas podem ser: Linear Polinomial ou Gruneisen, ambas estão descritas em LS-Dyna [2003].

2.6.2. FORMULAÇÃO LAGRANGEANA-EULERIANA

Outra característica a ser considerada na modelagem de carregamentos impulsivos, especificamente explosivos, é o tipo de formulação utilizada. A formulação *ALE* (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) é comumente utilizada para resolver problemas de grandes deformações. Para entender a vantagem deste tipo de formulação, uma breve descrição será a seguir realizada dos dois tipos básicos de formulações: a Lagrangeana e a Euleriana.

2.6.3. LAGRANGEANA

Pode-se dizer que num sistema puramente Lagrangeano, a malha de elementos finitos se deforma com o material modelado, não havendo fluxo de material entre os elementos.

A aproximação Lagrangeana é utilizada em situações de deformações moderadas, onde não há problemas de distorção desta malha e nem de embaraço dos elementos. Nos casos de grandes deformações, é necessário utilizar metodologias onde a malha possa se adaptar melhor ao domínio deformado, porém estes são mais custosos computacionalmente e ainda estão em fase de desenvolvimento para estruturas tridimensionais [LS-Dyna, 2003].

Uma vantagem a ser citada é que a superfície livre do material é automaticamente capturada pela malha. Por outro lado, encontram-se problemas em situações físicas envolvendo grandes deformações de superfícies:

- somente um material pode ser modelado para cada elemento;
- novas superfícies não podem ser criadas.

2.6.4. EULERIANA

Na formulação Euleriana, o material flui através da malha que é estacionária e está presa a um sistema de referência espacial (*SRE*). Pelo fato de ser fixo no espaço, os elementos finitos também estão fixos e o contorno do corpo deformado nem sempre coincide com um lado do elemento. Isto torna complicado levar em conta as condições de contorno materiais, mas por outro lado, a distorção da malha é inexistente [Aymone, 2000].

Por isto, novas superfícies são automaticamente criadas na evolução dos cálculos. Em contrapartida, é necessário ter um refinamento grande da malha para capturar a resposta do material, fazendo com que este método se torne muito custoso computacionalmente. Casos com regiões de pequenas deformações ou onde a resposta estrutural não é tão necessária são exemplos disto e para estes esta formulação não vale a pena.

2.6.5. FORMULAÇÃO *ALE*

Uma aproximação alternativa para simular grandes deformações é a formulação *ALE*. O conceito geral desta formulação é que um domínio de referência arbitrária é definido para a descrição do movimento, sendo diferente do domínio do material (Lagrangeano) e do domínio espacial (Euleriano).

Baseada em um sistema de referência material (*SRM*) de coordenadas, a formulação *ALE* desvincula o movimento da malha do movimento da matéria. Por isso é possível utilizar técnicas para realocar os nós da malha, colocando-os em posições mais favoráveis e melhorando, assim, a qualidade da mesma. Essa realocação pode ser feita em cada passo de tempo da análise explícita, a fim de evitar o aparecimento de elementos muito distorcidos [Aymone, 2000].

Ressalta-se para estes casos, diferentes tipos de formulação pode ser utilizados, e que apesar de ser arbitrário, o movimento da malha se deforma com o material em partes próximas a materiais com formulação Lagrangeana. A grande vantagem deste método é permitir a reestruturação da malha distorcida localizadamente, sem, no entanto, causar erros de aproximação Lagrangeana pelo este “alisamento” da malha.

A maior dificuldade do método *ALE* é que o movimento relativo entre malha e material deve ser considerado em equações constitutivas do material. Além disso, a formulação não permite criação de novas superfícies e é limitado para geometrias onde a passagem do material é razoavelmente previsível.

A formulação *ALE*, em conjunto com o método dos elementos finitos ou das diferenças finitas foi usada inicialmente para simular processos de gases, fluidos e interação fluido-estrutura e passou a ter maior importância nas aplicações citadas anteriormente.

2.6.6. HOURGLASS

Hourglass é um modo de deformação de energia nula oscilando a frequências muito mais altas do que as respostas globais das estruturas, resultando em estados matematicamente estáveis

que não são possíveis fisicamente. Normalmente adicionam aos elementos uma aparência de deformação em forma de zig-zag, conforme Figura 2.10.

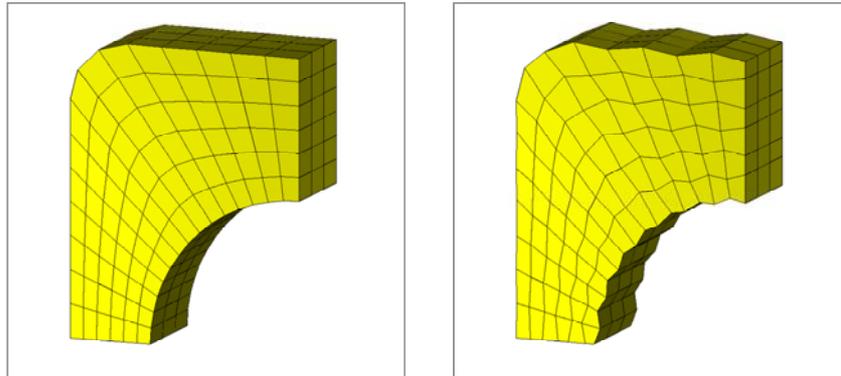


Figura 2.10: Ilustração de uma geometria normal e a apresentação dos chamados hourglass [Ansys Inc., 2000].

A forma como estes movimentos sem resistência modificam a malha lagrangeana retangular para uma espécie de forma em ampulheta é chamada hourglassing. A ausência de tensões e deformações fazem com que estes modos não tenham energia (rigidez), sendo chamados também de modos espúrios [Belytschko & Hughes, 1986].

O aparecimento destes modos espúrios pode invalidar os resultados e deve ser sempre minimizados ou eliminados [Ansys Inc., 2000]. E para quantificar pode-se dizer que se a energia total do *hourglass* for maior de 10 % da energia interna do modelo (ou até mesmo 5% em alguns casos), existe problema na análise.

Em termos de causas do surgimento do *hourglass*, vincula-se diretamente ao número de pontos de integração que será utilizado para cada tipo de modelagem, o qual por sua vez define a acurácia dos resultados de tensões.

Basicamente, um modelo numérico faz a integração dos pontos de Gauss dos elementos de forma completa (inteira) ou de forma reduzida

Ao utilizar a forma reduzida para elementos sólidos cúbicos (Figura 2.11), apenas um ponto no centro dos elementos é calculado nas análises explícitas. Obviamente, esta forma apresenta a vantagem de um menor custo computacional, porém, algumas desvantagens decorrem desta economia. O aparecimento de modos de energia nula, *hourglass*, é uma das mais importantes.

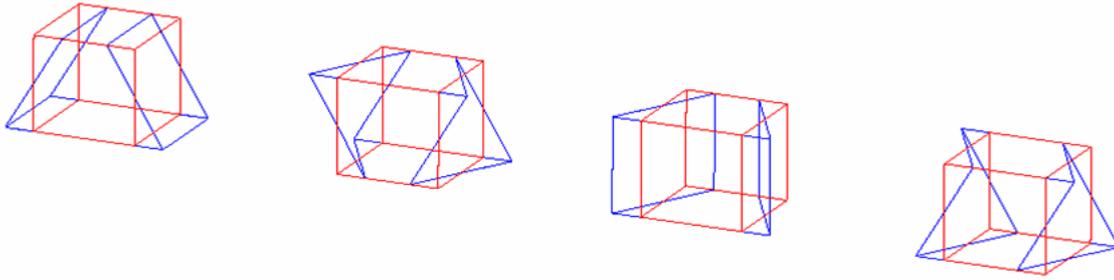


Figura 2.11: Elemento cúbico com forma reduzida de integração mostrando alguns possíveis modos de deformação [LS-Dyna, 2003].

De forma geral, podem afetar elementos 2D (exceto triangulares), elementos quadrilaterais, e elementos cúbicos. Os softwares oferecem controles internos evitando o aparecimento destes modos, os quais estão baseados nos seguintes princípios:

- Adicionando rigidez resistente a tais modos, mas não a movimentos de corpos rígidos e deformações lineares;
- Amortecendo velocidades na direção destes modos.

2.7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA – RESPOSTA DE ESTRUTURAS

Para dissertar sobre este tema, muitos assuntos poderiam ser abrangidos, porém, pretende-se apenas comentar de forma resumida alguns itens específicos utilizados no decorrer do trabalho.

2.7.1. RESPOSTA LOCAL OU GLOBAL

“Na avaliação de danos sobre estruturas devido às explosões, uma distinção deve ser feita entre resposta local e global da estrutura. Resposta local pode ser associada às aberturas em geral, onde a carga e efeito podem ser considerados localmente. A resposta global é tipicamente associada com os membros da estrutura tais como pórticos, colunas, vigas, diagonais, pisos e outros; estes suportam todo conjunto de elementos, levando em consideração a interação entre tais membros” [IAEA, 2005].

2.7.2. TIPO DE MODELO NUMÉRICO

A escolha do modelo numérico e do tipo de análise a ser aplicados são sempre fatores fundamentais na resposta obtida. Modelos de vigas utilizando diferentes elementos podem apresentar resposta dinâmica bastante divergentes. Um exemplo disso é apresentado por

Symonds *et al.* [1986] para o caso de uma viga bi-rotulada modelada, sofrendo uma excitação impulsiva do tipo da Figura 2.12(I).

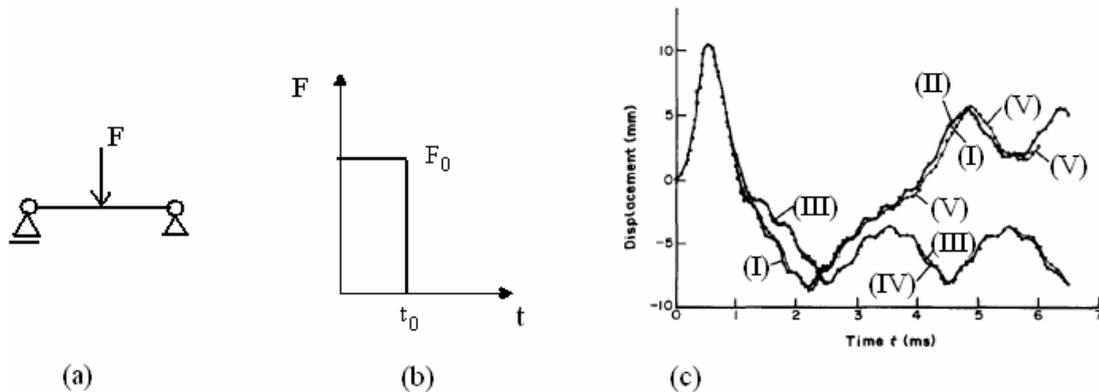


Figura 2.12: Geometria e condições de contorno (a); Tipo de solicitação (b); Curvas (I) e (II) feitas no ABAQUS utilizam elemento B23 (Bernoulli-Euler com matriz de massa consistente), (III) e (IV) elemento B21 (Timoshenko com elementos de massa concentrados nos nós) e curva (V) modelada no ADINA com uso de elemento de viga de Timoshenko sem amortecimento (c) [Symonds *et al.*, 1986].

Verifica-se então a grande diferença resultante da utilização de diferentes elementos de vigas para uma geometria simples submetida a aplicação de uma carga impulsiva.

2.7.3. CARGA ATUANDO OU VIBRAÇÕES LIVRES

A resposta em vibrações livres das estruturas é dominada por modos de baixa frequência com grandes deslocamentos e menores acelerações. Prédios, por exemplo, submetidos a uma forte excitação pelo solo podem ter componentes falhando por corte. Porém, se a rigidez do prédio é suficiente para evitar este rompimento no maior choque, pode acabar colapsando quando em vibrações livres. A extensão destes danos depende da magnitude da excitação.

Neste sentido, Dhakal e Pan [2003] comentam que a resposta de estruturas a impulsos pode ser dividida em duas fases: I- força atuando; II- vibrações livres.

As estruturas submetidas a cargas impulsivas normalmente apresentam a máxima resposta na segunda fase citada. Para esta, utilizam-se como parâmetros iniciais os deslocamentos e velocidades calculados na primeira. Os resultados mostram que a máxima amplitude não depende separadamente do tempo de excitação ou período natural, mas sim, da relação entre eles, para todas as formas de impulso levantadas.

Para impulsos simétricos (senoidal, triangular e retangular), a máxima resposta aparece na vibração livre quando a relação t_1/T é menor do que 0.5, e a razão crítica para cargas impulsivas assimétricas é 0.37 [Dhakal e Pan, 2003].

2.7.4. AMORTECIMENTO: QUANDO CONSIDERÁ-LO?

Para respostas transientes, Johnson *et al.* [2001] citam o amortecimento como menos importante e freqüentemente estimado ou ignorado para problemas com cargas de curta duração.

O amortecimento se torna mais importante quando a estrutura está submetida a uma função de força com freqüência próxima à freqüência natural do sistema. Para estruturas com resposta elástica linear, que possuem duração muito maior do que o período de vibração fundamental, uma aproximação comum da modelagem é o uso de elementos finitos em uma análise implícita. Nesse caso as freqüências naturais e seus modos são determinados e é possível representar o amortecimento como uma fração do amortecimento crítico para cada freqüência natural [Johnson e Beissel, 2001].

2.8. EFEITO SLOSHING

Um dos principais efeitos da movimentação de uma quantidade grande de fluido dentro de uma estrutura de armazenagem (tanque ou vaso), é o deslocamento da estrutura provocado pela oscilação do fluido, também chamado de *sloshing*.

Muitas vezes estes deslocamentos, quando projetados para tal, podem ser benéficos às estruturas, a exemplo de grandes caixas d'água que são utilizadas sobre prédios para amortecer suas vibrações. Porém, quando se trata de solicitações acidentais sobre locais de grandes armazenamentos, explosões e/ou terremotos em refinarias, por exemplo, o comportamento não previsto de ditos fluidos pode causar danos irreparáveis às estruturas.

Neste sentido, uma série de considerações pode ser feita para prever e/ou modelar numericamente este comportamento. Modelos mecânicos são utilizados para representar tais forças hidrodinâmicas através de sistemas massa-mola. Estes sugerem a utilização de duas (ou mais) zonas de fluidos para representar o fenômeno: a chamada zona de *sloshing* (componente convectivo) e a zona de fluido restringido (componente impulsivo).

A idéia principal apresentada é que uma parte inferior do fluido armazenado fica “imóvel” (como se estivesse solidária à estrutura) e outra parte, superior, movimenta-se fixada por um sistema de molas, (ver Figura 2.13).

Por analogia podem-se representar as duas partes num modelo de massas concentradas, no caso de movimentação lateral. Sendo que para a massa superior (m_1), a fixação deve ser feita através de molas com elasticidade determinada. E para a massa inferior (m_0), vigas rígidas devem ser consideradas vinculando-a na estrutura (Figura 2.13).

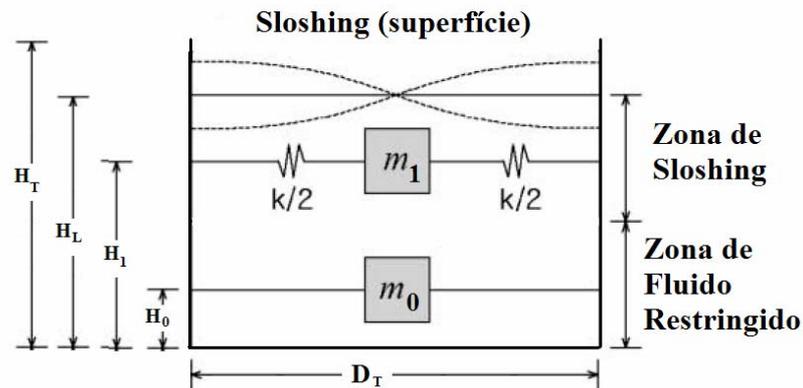


Figura 2.13: Esquema básico ilustrativo das zonas consideradas para vasos cilíndricos com líquidos no interior [Cho *et al.*, 2001].

Um histórico sobre estes tipos de modelos pode ser encontrado em Jaiswal *et al.* [2003]. Em termos de equacionamentos, estes autores apresentam uma série de códigos que tratam de diferentes situações, tanto em tipos de solicitações quanto em tipos de tanques. Já Tedesco *et al.* [1987] fornecem parâmetros para uma analogia mecânica simples de um container cilíndrico, os quais são utilizados nas aplicações a serem apresentadas no Capítulo 3.

Em termos de simulação por elementos finitos, Cho *et al.* [2001] analisam um tanque frente a uma ação sísmica, e o modelam utilizando método de superposição modal no programa Ansys [2000]. Suas comparações envolvem principalmente a questão de frequências naturais de vibração e seus modos com e sem o efeito *sloshing*.

3. PROBLEMAS ABORDADOS NESTE ESTUDO

Neste Capítulo apresentam-se as seguintes aplicações desenvolvidas:

- Análise do Comportamento de Estruturas Laminares Submetidas à Ação de Cargas Explosivas;
- Efeito da Pressão interna na Modelagem Numérica de Vasos de Pressão (Extintores de Incêndio);
- Modelagem de Vaso Esférico de GLP Sob Ação de uma Explosão;
- Modelagem de uma Camada de Solo / Propagação das Ondas
- Simulação Numérica Completa de uma Explosão mostrando as possibilidades do *MEF* com esquema de integração explícita para este tipo de modelagem;

3.1. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS LAMINARES SUBMETIDAS À AÇÃO DE CARGAS EXPLOSIVAS

Para uma explosão localizada em uma região urbana, as primeiras conseqüências sobre estruturas são, em geral, o rompimento e/ou pulverização das partículas das janelas e outras esquadrias de vidros, causando danos diversos. Isto ocorre devido à fragilidade deste tipo de material, que normalmente não possui camadas de filmes protetivos nas suas superfícies para evitar esse efeito.

A avaliação disto não deve ser menosprezada, uma vez que em zonas urbanas muitas reflexões acontecem devido às estruturas mais rígidas (prédios), as quais modificam a forma de propagação da onda de choque, acabando esta por atingir janelas a centenas de metros do epicentro da explosão, como foi verificado no atentado à Embaixada de Israel em Buenos Aires em 1992.

Neste sentido, esta seção tem por objetivos fazer uma comparação entre os dados apresentados por Autoridad Regulatoria Nuclear [1998] – a qual apresenta uma análise de placas de vidro submetidas a um carregamento proveniente de uma explosão – e os resultados obtidos através de uma análise dinâmica linear com uso do *MEF*. Também se pretende definir a carga de explosivo e distância capazes de gerar tal solicitação, utilizando para isto a metodologia proposta por Baker *et al.* [1983] a qual foi implementada em um programa computacional.

3.1.1. DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE PRESSÃO NO TEMPO – PLANILHA ELETRÔNICA

O primeiro passo na definição de uma solicitação gerada por uma explosão deve ser o levantamento da quantidade de explosivo e da distância a qual se pretende analisar os efeitos, possibilitando assim o cálculo da distância em escala (Z) e, a partir desta, dos valores necessários para caracterização da função pressão-tempo.

Existem programas que auxiliam nestes cálculos (seção 2.1.6), mas geralmente, seu uso é restrito a alguns órgãos dos governos ou possui um custo elevado. Também há os métodos analíticos já descritos anteriormente, que basicamente definem os valores de sobrepressão, impulsos e tempos envolvidos. Para todos esses, os dados de entrada são semelhantes, entre eles o tipo de explosivo, a quantidade e a distância.

O estudo proposto pela Autoridad Regulatoria Nuclear [1998] define uma função de carga proveniente de uma explosão, mas não apresenta qual a explosão capaz de gerar tal função. Neste sentido, observa-se a importância da determinação de tais valores como uma primeira aplicação desta metodologia a ser definida. Sendo assim, neste trabalho apresenta-se um algoritmo (Explo2003) desenvolvido dentro de uma planilha eletrônica de cálculo (Excel), que aplica o Método Simplificado (ver seção 2.1.1) com e sem a linearização da função de decaimento. Tal metodologia permite relacionar a carga explosiva e a distância da explosão com a função da onda de choque esperada.

Basicamente, nos ábacos apresentados por Baker *et al.* [1983] foram realizadas leituras de ponto a ponto e construídas tabelas eletrônicas com os valores encontrados. Uma vez determinados os dados de entrada (R , W e cd), a distância em escala é calculada e com este valor faz-se uma busca nas tabelas referentes, obtendo-se as variáveis procuradas. Um exemplo de interface do programa pode ser vista na Figura 3.1, onde uma visão geral dos parâmetros é apresentada à esquerda e em forma gráfica à direita, ilustrando-se a função de pressão para uma explosão sem o efeito da reflexão com o decaimento exponencial e com a forma linearizada, indicando para este caso qual o erro cometido em termos de impulso para esta simplificação (entre a função logarítmica e a função linearizada).

Parâmetros sobre Explosões

Dados de entrada	
R =	27,9 (Distância, [m])
W =	223,3 (Massa de TNT, [kg])
Cd =	1 (Coeficiente de Arrasto)
Variáveis calculadas	
Z =	4,61 (Distância em escala, [m/kg ^{0,333}])
W ^{1/3} =	6,06 (Fator de escala, [kg ^{0,333}])
Parâmetros retirados dos ábacos	
P _{so} =	32,2 [kPa] ↔ 4,735 [psi]
T _s =	20,0 [ms] ↔ 3,30 [ms/kg ^{0,333}]
t _s =	43,4 [ms] ↔ 7,16 [ms/kg ^{0,333}]
i _s =	266,46 [kPa.ms] ↔ 44,00 [kPa.ms/kg ^{0,333}]
q ₀ =	2,244 [kPa] ↔ 0,33 [psi]
U _s =	378 [m/s]
P _{so} +C _d q ₀ =	34,444 [kPa] ↔ 5,065 [psi]
b =	0,780 [kPa] ↔ (Decaimento da curva)

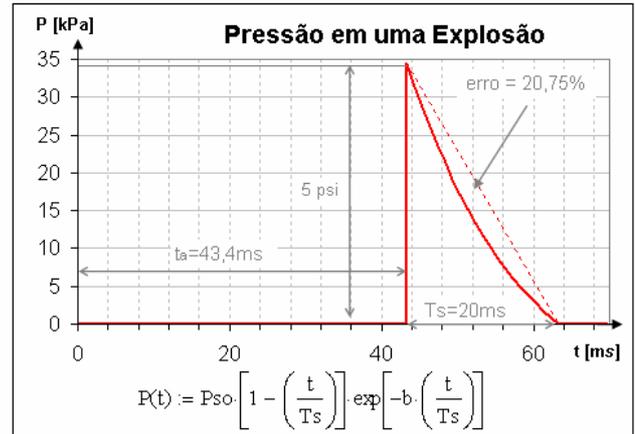


Figura 3.1: Apresentação da planilha gerada para calcular os parâmetros das explosões.

Um comentário já realizado na seção 2.1.1 e reforçado aqui é a forma escalada que alguns parâmetros são fornecidos pelos ábacos [Baker *et al.*, 1983], onde é necessária uma correção para os mesmos, multiplicando-se pela raiz cúbica da massa ($W^{1/3}$), para assim se obter as variáveis em unidades do SI.

Outra interface existente no programa Explo2003 está ilustrada na Figura 3.2, onde se considera a pressão refletida sobre um objeto e se utiliza a linearização da função de pressão no tempo. Dos mesmos ábacos e métodos utilizados anteriormente, os parâmetros referentes às reflexões da onda de choque em corpos (P_r , t_r e i_r) são obtidos, permitindo o Explo2003 a correção dos valores de pressão para considerar tal situação.

Parâmetros sobre Explosões

Dados de entrada	
R =	27,9 (Distância, [m])
W =	223,3 (Massa de TNT, [kg])
Cd =	1 (Coeficiente de Arrasto)
Parâmetros de forma (simplificados) de estruturas alvo	
W _a =	4,5
H _a =	2,2
Variáveis calculadas	
Z =	4,61 (Distância em escala, [m/kg ^{0,333}])
W ^{1/3} =	6,06 (Fator de escala, [kg ^{0,333}])
Parâmetros retirados dos ábacos	
P _{so} =	32,2 [kPa] ↔ 4,735 [psi]
T _s =	20,0 [ms] ↔ 3,30 [ms/kg ^{0,333}]
t _s =	43,4 [ms] ↔ 7,16 [ms/kg ^{0,333}]
i _s =	266,46 [kPa.ms] ↔ 44,00 [kPa.ms/kg ^{0,333}]
q ₀ =	2,244 [kPa] ↔ 0,33 [psi]
P _r =	76,06833 [kPa] ↔ 11,19 [psi]
t _r =	15,87405 [ms] ↔ 2,621 [ms/kg ^{0,333}] (t _r = 2i _r /P _r)
i _r =	603,7563 [kPa.ms] ↔ 99,7 [kPa.ms/kg ^{0,333}]
U _s =	378 [m/s]
P _{so} +C _d q ₀ =	34,444 [kPa] ↔ 5,065 [psi]

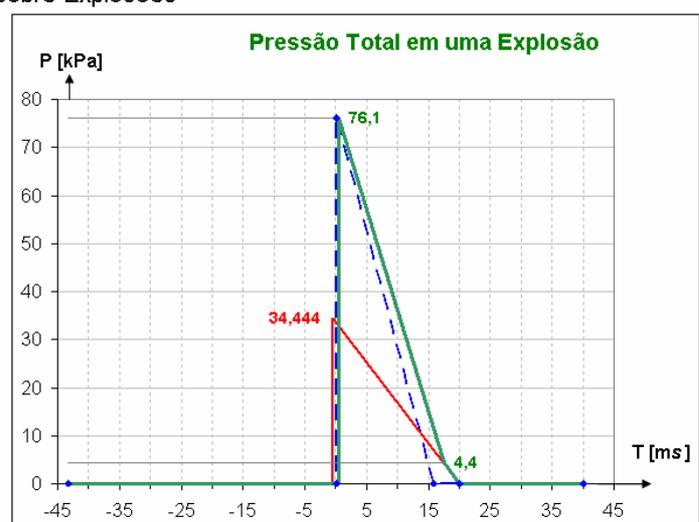


Figura 3.2: Interface do Explo2003 para consideração da pressão total.

Verifica-se que para ambos os casos, os dados de entrada são a distância (R), a massa de explosivo (equivalente em TNT) e o coeficiente de arrasto. No caso da função de pressão no

tempo para reflexão, uma geometria simplificada do corpo (por onde passa a onda de choque) necessita ser definida e a velocidade da onda deve ser considerada, possibilitando o cálculo do tempo que a onda de choque leva para ultrapassar tal corpo e assim o gráfico da pressão resultante pode ser determinado.

Para este caso de reflexão da onda de choque exemplificado na Figura 3.2, a função resultante da pressão está representada pelos segmentos de retas contínuos (verdes). Os segmentos tracejados representam a parte refletida e os segmentos contínuos (vermelhos) os apenas a parte da sobrepressão.

Assim, duas interfaces diferentes de um algoritmo simples de ser aplicado são apresentadas e, desta forma, o Explo2003 acaba sendo uma ferramenta ágil e confiável na obtenção dos parâmetros necessários definidos anteriormente. Em uma comparação de resultados com exercícios propostos na bibliografia [Baker *et al.*, 1983] e [Smith e Hetherington, 1994], o programa mostrou resultados satisfatórios, mostrando inclusive um engano no exercício do capítulo 2 do Baker *et al.* [1983], na determinação de tempos de chegada e duração da fase positiva, em sua página 210.

Outra aplicação na qual o uso do Explo2003 se mostrou útil foi a determinação de quantidade de explosivo e distância do epicentro para causar uma onda de pressão com certas características. Isto foi importante na comparação com os resultados mostrados em Autoridad Regulatoria Nuclear [1998], pois os dados de entrada não foram determinados, mas apenas um gráfico pressão-tempo (Figura 3.4).

Para isto, o primeiro passo é descobrir qual o pico de sobrepressão incidente, que neste caso já é conhecido (34,470 kPa). A partir daí uma distância em escala deve ser encontrada para que esta onda de choque tenha o determinado pico. É importante mencionar que apenas uma distância em escala apresentará o pico determinado.

Parte-se então para a determinação da massa de explosivo. Se o caso for semelhante ao aqui proposto, onde um tempo de duração da fase positiva está determinado (20ms), a resposta é razoavelmente simples de se obter.

$$\text{Tempo proposto (20ms)} = \frac{T_S}{W^{1/3}} (3,30) \cdot [\text{Fator de escala procurado}]$$

Onde basta dividir este tempo pelo tempo escalado encontrado no ábaco. Desta forma é definido o fator de escala ($W^{1/3}=6,06$) e conseqüentemente a massa de explosivo ($W=223,3\text{kg}$) e

a distância ($R=27,9\text{m}$) são definidas. Para isto uma outra interface foi criada de forma a facilitar o desenvolvimento dos passos apresentados.

Outras aplicações possíveis podem ser: descobrir a carga de explosivo utilizada e a distância que tenha causado um dano a uma estrutura, o que seria uma espécie de procedimento reverso ao convencional. Caso não se saiba o tempo de duração da onda de choque aplicada, uma infinidade de soluções (R e W) podem ser encontradas que satisfaçam a distância em escala (Z) e conseqüentemente o pico de sobrepressão e, desta forma, muitas soluções poderiam preencher as soluções impostas.

3.1.2. ESTRUTURA, MATERIAIS, CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO

Na continuação, analisa-se uma placa de vidro com dimensões, propriedades mecânicas, tipo de solicitação aplicada e resposta esperada, todos estes apresentados em Autoridad Regulatoria Nuclear [1998]. A descrição da geometria está mostrada na Figura 3.3, com os apoios aplicados nas laterais, onde esta representa um típico padrão de janelas utilizado em prédios de zonas urbanas.

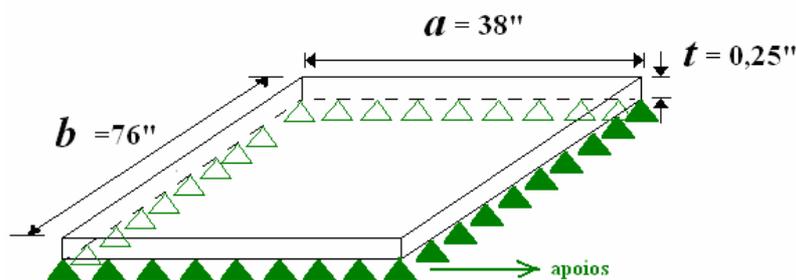


Figura 3.3: Geometria e suas condições de contorno a ser analisada na comparação de resultados.

Definidas as dimensões do problema, tem-se na Tabela 3.1 os valores de propriedades mecânicas utilizadas para o vidro em questão também definidos pela mesma referência.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas do material estudado (vidro).

Propriedade		Valor
E	Módulo de Young	$10^7 \text{ psi} = 68,965 \text{ GPa}$
ρ	Massa específica	$0,00023 \text{ lb-sec}^2/\text{in}^4 = 2457,9 \text{ kg/m}^3$
ν	Coefficiente de Poisson	0,25

Para a definição do carregamento aplica-se uma pressão perpendicular aos elementos da placa de forma semelhante à proposta em Autoridad Regulatoria Nuclear [1998] através do Programa Ansys [2000], como é apresentada na Figura 3.4.

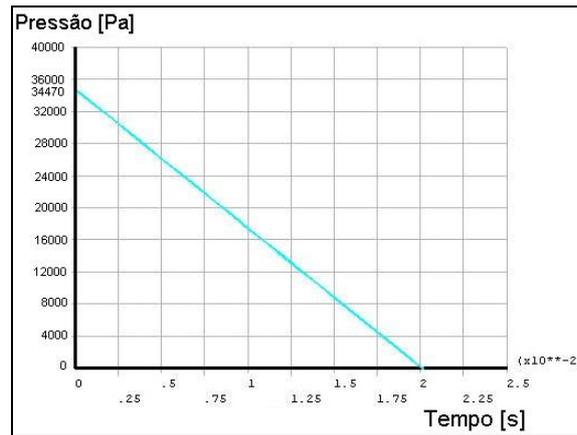


Figura 3.4: Forma da função de pressão-tempo aplicada em Autoridad Regulatoria Nuclear [1998].

3.1.3. ANÁLISES E RESULTADOS

Em termos de análises dividiu-se o estudo em três fases: definição dos dados de entrada com o uso do Explo2003; verificação do modelo com a análise modal; comparação dos resultado na análise transiente.

1- *Definição dos dados de entrada:* Conforme já apresentado, para se ter uma função pressão-tempo como a proposta pela referência deve-se aplicar uma carga de $W = 223.3$ kg a uma distância de $27,9m$. Duas observações a este respeito precisam ser mencionadas:

- Neste cálculo não foi considerada nenhuma reflexão da carga explosiva;
- O valor de pressão total inclui a sobrepressão somada à pressão dinâmica (q_0) gerada pelos ventos provenientes da explosão;

OBSERVAÇÃO: uma questão importante de salientar é a forma de utilização dos valores de pressão dinâmica (q_0) multiplicada pelo coeficiente de arrasto (C_d), conforme é apresentada em Autoridad Regulatoria Nuclear [1998]. A aplicação do coeficiente de arrasto tem sentido se o vento dinâmico gerado pela explosão acontece durante tempo suficiente para que o mesmo envolva toda a estrutura sobre a qual se está calculando o coeficiente de arrasto. Isto vai depender da geometria do alvo e da magnitude da explosão.

Sem dúvida, este ponto polêmico mereceria um estudo mais aprofundado e nas análises realizadas foi adotado como índice de arrasto $C_d=1$.

2- *Análise modal:* Um modelo em elementos finitos (elementos de casca shell63) empregando o software Ansys [2000] é utilizado, obtendo-se através de uma análise modal uma frequência fundamental próxima aos 21Hz, valor obtido em forma analítica [Roark, 2004], com um erro menor do que 1%.

3- *Análise transiente*: Ainda utilizando o mesmo software se fez uma análise transiente utilizando um esquema implícito de integração, sendo considerada a estrutura modelada com comportamento linear elástico. Na Figura 3.5 tem-se uma comparação entre os resultados obtidos em Autoridad Regulatoria Nuclear [1998] e os calculados para a deflexão da placa no ponto A, onde se vê que os valores obtidos pelos dois métodos são bastante próximos (diferença < 2%).

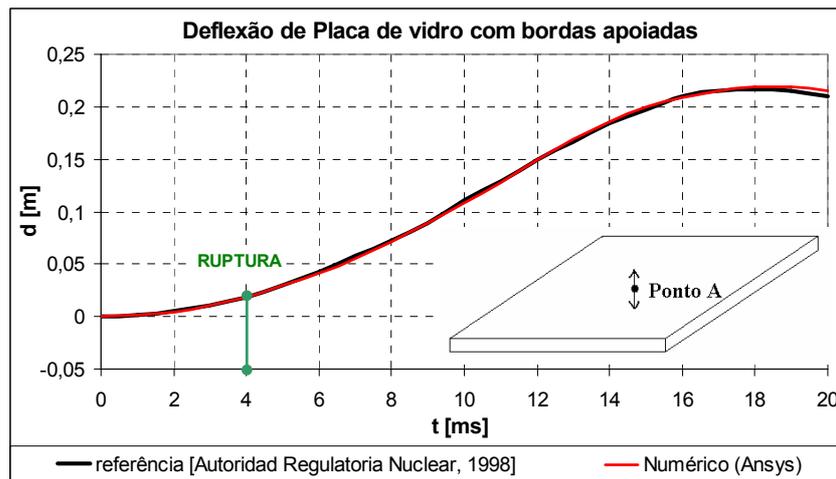


Figura 3.5: Comparativo das curvas de deflexão (Ponto A) no tempo entre calculado por elementos finitos e definido pela referência para o centro da placa [Autoridad Regulatoria Nuclear, 1998].

3.1.4. CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste trabalho mostrou-se uma técnica simples com programação em Excel que permite automatizar a leitura dos parâmetros apresentados por Baker *et al.* [1983] e, assim, determinar os principais parâmetros que caracterizam a explosão através do Método Simplificado.

Posteriormente, quando definida a carga, obteve-se a resposta transiente de uma placa de material frágil mediante o uso de um programa de elementos finitos [Ansys, 2000]. Deve-se salientar que para tal material uma pequena deformação já provocaria a ruptura do vidro e ditas deflexões não seriam possíveis na realidade. Esta ruptura aconteceria aproximadamente quando o valor de deflexão atingisse o valor de $0,023m$ aos primeiros $4ms$ aproximadamente, como mostrado na Figura 3.5. Os resultados obtidos por elementos finitos mostraram que a modelagem foi corretamente realizada e serviram para a comparação proposta inicialmente. Porém, um modelo que contemplasse a lei constitutiva correta do vidro juntamente com ensaios sobre tal material trariam grandes contribuições para outros trabalhos.

A partir do exemplo de aplicação do Explo2003 e de comparações com exercícios apresentados por diversas referências pode-se concluir que a planilha criada, com as diferentes

interfaces citadas, vem a facilitar a aquisição dos parâmetros apresentados por Baker *et al.* [1983], diminuindo as possibilidades de erros de leituras das mesmas. Uma proposta interessante para estudos futuros seria realizar uma comparação entre diferentes métodos de aquisição de ditos parâmetros e, se possível, aferição com resultados experimentais.

Como foi levantado anteriormente, um estudo detalhado da aplicabilidade do coeficiente de arrasto para calcular a força que os ventos gerados pela explosão produzem sobre o sistema considerado como alvo também se mostra um assunto importante e interessante de se pesquisado.

3.2. EFEITO DA PRESSÃO INTERNA EM VASOS DE PRESSÃO (EXTINTORES DE INCÊNDIO)

A utilização de recipientes pressurizados é muito comum em diversos tipos de operações industriais, tanto durante os processos quanto no armazenamento final de produtos. O dimensionamento mecânico destes vasos exige cuidado uma vez que, em determinadas circunstâncias, seu colapso pode ser de alto risco devido às altas pressões às quais estes equipamentos podem estar submetidos. Quando os carregamentos incluem forças externas (ventos dinâmicos, ondas de pressão, oscilações no solo) a verificação de segurança é mais complicada ainda e, nestes casos, as solicitações dinâmicas podem ter conseqüências desastrosas.

Um dos fatores que influencia o comportamento dinâmico de um vaso de pressão de armazenamento de grande porte é a interação entre o conteúdo do vaso e a estrutura. Em geral, o fluido se encontra em duas fases, uma líquida, que pode ser considerada como incompressível e outra gasosa. O efeito dinâmico que a massa do fluido exerce quando o vaso se desloca é conhecido como efeito *sloshing*, e será considerado em forma simplificada na análise de um vaso submetido a uma carga explosiva apresentado na seção 3.3 deste trabalho. Nesta seção o foco é o estudo da interação da pressão interna sobre as propriedades dinâmicas do vaso (modos e frequências naturais de vibração), e também explorar a sensibilidade destas propriedades à mudanças na geometria do mesmo.

Para realizar este estudo analisa-se um vaso de pressão pequeno (extintor de incêndio de 1kg) e pretende-se determinar, através de comparações entre resultados experimentais e numéricos, se há influência da pressão interna nas propriedades dinâmicas. E observar também a influência da forma dos tampos nas propriedades mencionadas.

3.2.1. DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA UTILIZADA

Para este estudo considera-se a estrutura de um extintor de incêndio automotivo de 1kg conforme Figura 3.6(a).



Figura 3.6: Extintor de incêndio automotivo utilizado para a realização dos ensaios e modelos: Suspensão pela válvula (a). Extintor em corte longitudinal (b).

Basicamente, o corpo do vaso é composto pela região cilíndrica (central) e pelos tampos, sendo que num deles localiza-se o bocal. Pode-se observar na Figura 3.6(b) que o vaso é estampado em duas partes de aço baixo carbono (Módulo de Elasticidade = 207GPa; Coeficiente de Poisson = 0,3; Massa Específica = 7850kg/m³) unidas por meio de solda na região central do cilindro. Esta solda, assim como a utilizada para fixação do bocal, aporta rigidez à estrutura, e este fator deve ser considerado no momento de modelá-lo.

Para a caracterização mais detalhada do recipiente dois itens são importantes de serem detalhados além dos dados básicos como diâmetro (0,1m) e comprimento do cilindro (0,11m). O primeiro é a verificação da espessura, pois uma série de medidas foi realizada com um micrômetro verificando-se uma espessura média de 0.90mm e uma variação de 0.15mm (16,6%) ao longo da geometria. Em segundo, é importante a caracterização da forma dos tampos, realizada através da medição em um equipamento tridimensional e, neste caso, com os pontos adquiridos não se conseguiu definir uma função para representar tal curvatura. Levando em conta estas duas observações, verifica-se que a modelagem necessita de simplificações que influenciarão nas respostas, sendo:

- Para os tampos, três diferentes tipos foram admitidos no modelo numérico, conforme é mostrado na Figura 3.7. Com estes, pode-se verificar a sensibilidade das respostas em relação à mudança de tampo mesmo sabendo que o tampo toroidal é o mais próximo da estrutura real;
- Em relação à espessura, o valor médio é utilizado. Na parte do bocal e da região cilíndrica soldada a respectiva espessura foi aumentada.

Em termos de operação, este vaso possui uma pressão de trabalho igual a $1,0 \text{ MPa}$, que é tida como estática devido ao longo período que fica submetido às mesmas condições.

3.2.2. MODELO NUMÉRICO / CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para o modelo numérico realizado foi utilizado um elemento de casca quadrilátero de quatro nós, tanto para a parte dos tampos e bocal, quanto para o corpo cilíndrico. A Figura 3.7 ilustra o recipiente com tampos toroidais (a) e o detalhe dos outros dois tipos de tampos.

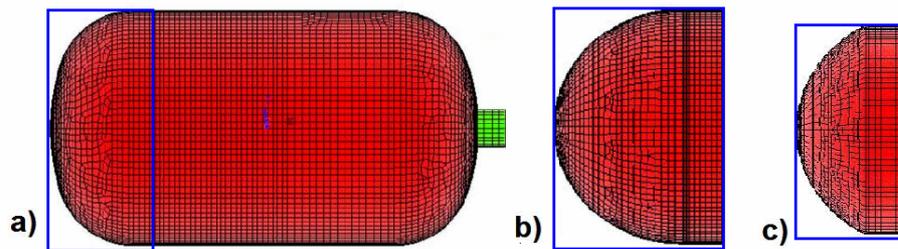


Figura 3.7: Modelo numérico inteiro com tampo toroidal (a); Exemplo do tampo hemisférico (b); Exemplo do tampo achatado (c).

Ao extintor é adicionada uma válvula no bocal, que é utilizada como ponto de fixação do mesmo no teste experimental, sendo suspensa por um cabo de aço. Mesmo assim, não foi modelada, pois não adiciona rigidez nem massa ao extintor, não interferindo nos resultados obtidos em uma análise modal.

Este efeito realizado pela suspensão do extintor não foi modelado e a condição de contorno utilizada para fixação do mesmo foi uma restrição total de deslocamentos para os nós do bocal. Será visto adiante qual efeito que esta simplificação causa na resposta da análise modal.

3.2.3. ANÁLISES NUMÉRICAS / RESULTADOS OBTIDOS

Diante do descrito, partiu-se para a análise modal utilizando o sistema Ansys [2000] na busca das frequências fundamentais e seus modos de vibração. Os objetivos principais desta etapa são as caracterizações dos modos e a quantificação das frequências para os diferentes modelos. O conhecimento dos modos auxilia na determinação dos pontos a serem instrumentados e as frequências mostram numericamente a variação entre os modelos.

Os valores encontrados para os primeiros modos estão apresentados na Tabela 3.2 com as respectivas imagens na Figura 3.8.

Tabela 3.2: Freqüências naturais e modos encontrados numericamente através de análise modal para três geometrias distintas.

Modos	Freqüências [Hz]			Descrição do modo
	Tampo Hemisférico	Tampo Toroidal	Tampo Achatado	
1° e 2° modo	66,6	71,2	81,3	Translação no corpo
3° modo	645,1	872,4	722,0	Giro no Bocal
4° modo	1475,8	1057,7	1417,5	Amassamento no bocal
5° modo	2263,2	2594,1	2636,4	Amassamento no corpo cilíndrico
6° modo	2319,4	2696,5	2859,3	Amassamento no corpo cilíndrico

Cabe ressaltar que a análise numérica fornece como primeiro e segundo modo a translação do corpo tendo os mesmos valores porque a geometria possui uma simetria axial e o ponto de fixação é o bocal. Também se deve salientar que os três primeiros modos do modelo numérico não apresentam correspondência na análise experimental porque o tipo de vinculação real utilizado é diferente da vinculação do modelo numérico. Sendo assim, os deslocamentos e giros do corpo do extintor a partir do bocal fixo não acontecem fisicamente.

As apresentações dos 5° e 6° modos também são muito parecidas entre si, com amassamento do corpo cilíndrico e por isto o 6° modo não está ilustrado.

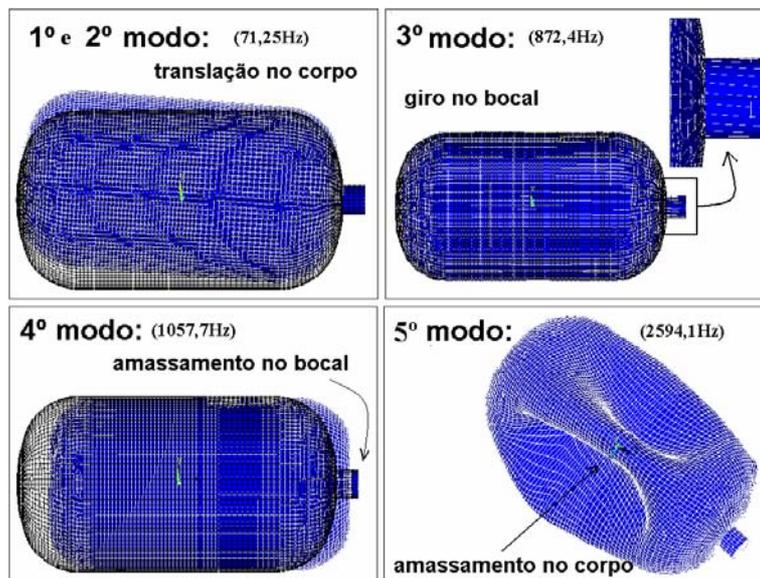


Figura 3.8: Ilustração dos primeiros modos do extintor para o modelo com tampo toroidal.

3.2.4. MEDIÇÕES REALIZADAS / RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a realização das medições experimentais, primeiramente, e por motivo de segurança, foi realizado um teste hidrostático onde se aplicou uma pressão aproximadamente vinte vezes

maior do que a de trabalho até ocorrer o escoamento do vaso. Esta situação indica total segurança para aplicação da pressão pretendida ($2MPa$).

Na seqüência, descrevem-se as etapas seguidas para a obtenção dos valores de freqüências expostos na Tabela 3.3.

1- Medição de acelerações em três pontos distintos do Extintor com microacelerômetros (Endevco 2250A), utilizando sensibilidade de $100mV/g$, a partir de solicitações impulsivas realizadas com martelo especial (Endevco).

Observa-se na Figura 3.9 o extintor suspenso pela válvula para que a excitação impulsiva (através do martelo) fosse aplicada em cada aquisição. A excitação foi realizada em três pontos distintos do extintor para cada ponto de colagem do microacelerômetro. Como foram três os pontos de fixação dos microacelerômetros, um total de nove medições foi considerado. Para os dois estados do sistema (pressurizado e sem pressurizar) foram realizadas 18 aquisições diferentes.



Figura 3.9: Extintor a ser ensaiado (com os microacelerômetros colados por meio de fitas adesivas) e martelo utilizado na solicitação aplicada.

2- Aquisição e tratamento de dados no programa HPVee 4: Os dados foram adquiridos através de uma placa de aquisição A/D e um computador a uma taxa de $40kHz$, onde fez-se um tratamento dos mesmos através do programa HPVee 4, aplicando-se uma transformada de Fourier para visualização no domínio da freqüência. Na Figura 3.10 verifica-se na parte superior a resposta do sistema medida pelo acelerômetro frente ao pulso aplicado (domínio do tempo) e abaixo, sua transformada de Fourier.

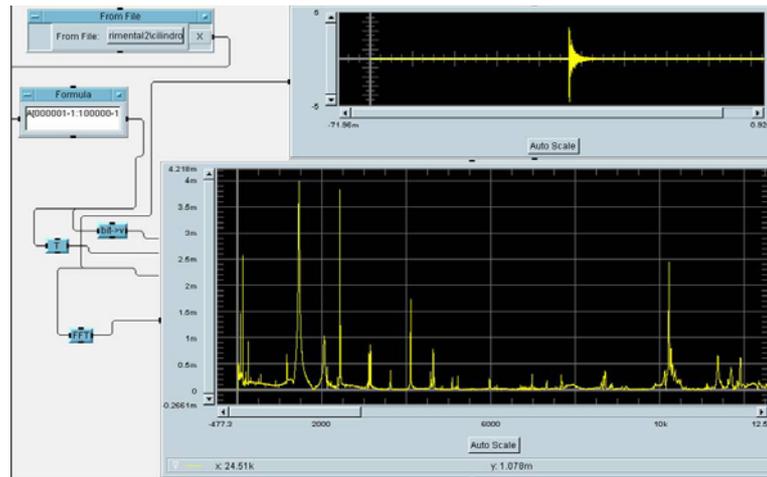


Figura 3.10: Apresentação do algoritmo montado no programa HPVee 4 utilizado para o tratamento dos dados.

3- Tabelamento dos resultados e processamento dos valores mais repetitivos: A partir das dezoito medições realizadas construiu-se uma tabela para verificar as faixas de frequências que mais se repetem. Estes resultados são apresentados na Tabela 3.3, onde cada coluna representa uma medição diferente realizada. As medições restantes (8, 9, 17 e 18) não estão mostradas porque apresentaram problemas.

Tabela 3.3: Frequências encontradas para extintor a partir de solicitação impulsiva.

Número da medição	Extintor a pressão atmosférica								Faixa de valores numéricos correspondentes	
	1	2	3	4	5	6	7	média		desvio padrão
Valores de frequências [Hz]	-	-	-	1154	1154	1154	1154	1154	0,0	1057,4 - 1475,8Hz (4ºmodo)
	-	1451	-	1440	1440	-	1444	1443,7	5,2	
	-	-	2035	2032	2030	2031	2042	2032	4,8	2263,2 - 2636,4Hz (5ºmodo)
	3070	3072	3071	-	3077	-	3075	3072,5	2,9	
	4084	4084	4086	4095	4089	-	4089	4087,6	4,2	2319,4 - 2859,3Hz (6ºmodo)

Número da medição	Extintor com pressão interna (2 MPa)								Faixa de valores numéricos correspondentes	
	10	11	12	13	14	15	16	média		desvio padrão
Valores de frequências [Hz]	1166	-	-	-	-	-	-	1166	0,0	1057,4 - 1475,8Hz (4ºmodo)
	-	1238	1259	1290	1296	-	-	1270,75	27,2	
	1390	-	1407	-	1392	1392	-	1395,25	7,9	2263,2 - 2636,4Hz (5ºmodo)
	2268	-	2268	-	-	2253	2254	2263	8,4	
	2933	-	2939	-	2929	-	2932	2933,7	4,2	2319,4 - 2859,3Hz (6ºmodo)
	3192	-	-	3195	3192	3189	3191	3192	2,2	
	3864	-	3864	-	-	3861	3861	3863	1,7	

Muitas outras frequências com picos menores em amplitudes foram encontradas nas medições, algumas delas representando claramente o ruído imposto pela rede (60Hz e suas harmônicas) e outras, valores que não foram computados por serem muito diferentes dos

tabelados. Também se observa que se determinou um limite próximo de 4000Hz para o tabelamento, faixa na qual os seis primeiros modos numéricos se situaram.

3.2.5. CONCLUSÕES PARCIAIS

A partir da observação da Tabela 3.2 verifica-se a sensibilidade do modelo numérico para os valores das primeiras frequências naturais, mostrando a importância de se conhecer a forma da curvatura dos tampos do extintor. Ainda sobre os resultados numéricos, ressalta-se que as variações de espessura (até 16%) constatadas no extintor não foram modeladas, pois uma varredura trabalhosa deveria ser feita para cobrir a maioria dos pontos e isto é mais uma simplificação do modelo.

Ainda assim, bons resultados são obtidos da análise numérica. Considerando que os primeiros três modos numéricos não têm correspondentes na análise experimental, verifica-se que a 4ª frequência numérica (que está dentro da faixa de 1057-1475Hz dependendo do tipo de tampo) possui valores muito próximos da experimental (1154Hz) visto na Tabela 3.3. Observa-se ainda que o 5º e 6º modos numéricos apresentaram frequências entre 2200Hz a 2800Hz, valores estes que podem ser comparados ao 2032Hz encontrado na análise experimental.

Da análise dos resultados experimentais conclui-se que a pressão interna possui influência no comportamento dinâmico de vasos de pressão, o que era o objetivo do trabalho. Porém não se tem dados suficientes para quantificar esta influência.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma primeira sugestão seria refazer as medições sobre o extintor, correlacionando as magnitudes medidas com a posição do ponto de medição, para ajudar a identificar o modo de vibração.

Outra sugestão seria realizar medições experimentais com níveis crescentes de pressão interna para identificar como as frequências naturais vão modificando em função desta pressão. Para modelar isto poder-se-iam criar modelos em elementos finitos com aplicação de carregamentos diferenciados através de análises explícitas.

Uma vez definida e quantificada a influência da pressão, outro estudo interessante seria fazer a avaliação do efeito sloshing (numérica e experimental) em um recipiente em pequena escala, com o objetivo de aferir o modelo numérico objetivando a modelagem em escala industrial.

3.3. MODELAGEM DE VASO ESFÉRICO DE GLP SOB AÇÃO DE UMA EXPLOSÃO

Nesta seção se apresenta uma análise complementar ao trabalho desenvolvido na Dissertação de Mestrado de Santiago [2003] a qual determina a solicitação da função pressão produzida por uma nuvem gasosa sobre um vaso de pressão esférico de GLP.

De forma resumida, Santiago [2003] utilizou o Método Multienergia – TNO para estimar a pressão a ser aplicada numa esfera de armazenamento para o caso de explosão de nuvem de gás pesado (GLP) em uma região de um horto florestal.

3.3.1. DESCRIÇÃO DO CENÁRIO

É comum haver hortos florestais ao redor de refinarias e instalações petroquímicas, com o objetivo de auxiliar na dispersão de vazamentos de gases na atmosfera. Isto porque estes hortos adicionam rugosidade ao solo e, conseqüentemente, geram maior turbulência nos ventos, aumentando a dispersão de gases na região. Tal efeito é desejável quando o vazamento de gases tóxicos ou inflamáveis ocorre nestas instalações, diminuindo o alcance das nuvens e reduzindo o risco de explosões e de danos à saúde das populações próximas.

Porém, em situações especiais com poucos ventos, a acumulação de gases pesados (*GLP*) é facilitada pela presença desses hortos, formando nuvens próximas ao solo. E assim, os efeitos da queima dessas nuvens podem ser agravados pela presença de obstáculos (troncos e os galhos das árvores), o que acaba gerando maior turbulência e acelera a reação de queima. Nessas circunstâncias, as conseqüências podem ser explosões substancialmente danosas.

“Alem da capacidade de geração de turbulência, com conseqüente aumento da sobrepressão gerada, o volume total do horto e a distância a que ele se encontra da esfera são fatores igualmente importantes para esta avaliação” [Santiago, 2003]. Neste estudo são avaliados os efeitos de uma explosão em uma região congestionada, na qual o fator de obstrução (β) é de 25% da sua seção transversal.

Considerando a onda de choque gerada na explosão sobre vaso de pressão esférico, estudam-se duas distâncias de afastamento do vaso (50m e 100m) e, para esta estrutura, diferentes níveis de preenchimento (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) de líquido são considerados. Na Figura 3.11 esquematiza-se o problema estudado.

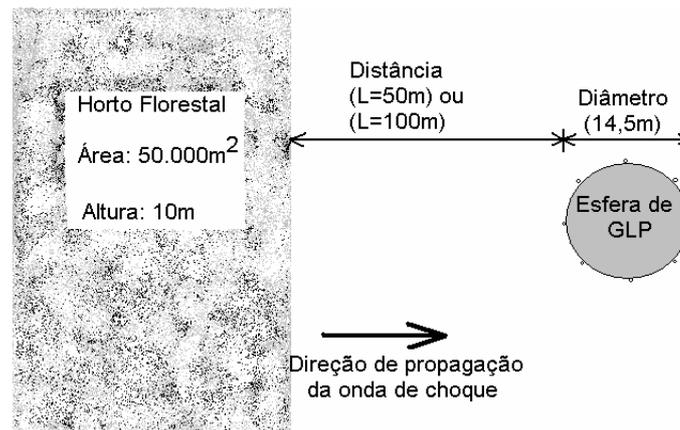


Figura 3.11: Layout do problema: Onda de sobrepresão gerada por uma nuvem gasosa congestionada numa região horto florestal que atinge um vaso de pressão esférico de *GLP*.

As dimensões do problema foram determinadas com base na referência citada, e procurou-se utilizar um “cenário representativo de um razoável conjunto de instalações”, principalmente “refinarias e plantas industriais de médio e grande porte” [Santiago, 2003].

Em relação ao horto florestal, utilizaram-se os mesmos parâmetros aplicados por Santiago [2003]: área retangular, espaçamento regular entre árvores (1,2m), modelagem das árvores como hastes cilíndricas (diâmetro médio de 0,3m).

3.3.2. DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO DE CARGA

A determinação da variação espacial e temporal da carga produzida pela explosão de gases é razoavelmente simples, porém trabalhosa, como já foi especificado nos capítulos 1 e 2. Existem vários métodos para estimar a função de pressão produzida pela explosão de uma nuvem gasosa, entre eles o Método Multienergia [TNO, 1997] descrito na seção 2.1.5, sendo que este permite levar em conta a influência das obstruções do cenário estudado e, por isto, foi o escolhido para este caso. O método de equivalência em TNT apresentado na seção 2.1.3 não deveria ser utilizado para este caso, pois suas estimativas de sobrepresão seriam exageradas devido à pequena distância entre esfera e horto e o método do Shock Wave produziria estimativas inferiores ao esperado para sobrepresões geradas numa região com grau de obstrução na faixa aqui avaliada, também segundo Santiago [2003].

Para a aplicação do método se utilizam inicialmente as etapas apresentadas na seção 2.1.5 para levantamento do pico de sobrepresão da onda de choque e posteriormente o algoritmo criado por Santiago [2003] para a determinação das pressões perpendiculares à esfera ao longo do tempo em cada caso analisado. Sendo assim, a Tabela 3.4 apresenta os dados de entrada e valores calculados para definição da função da pressão no tempo.

Tabela 3.4: Parâmetros básicos utilizados para a obtenção da função de pressão sobre a esfera a 50m e 100m.

Parâmetros de entrada:	
Dados ambientais: $T_{amb} = 300\text{ K}$	$P_{amb} = 101325\text{ Pa}$ $\gamma = 1,4$
Volume específico: Propano = $0,558\text{ m}^3/\text{kg}$	ar = $0,849\text{ m}^3/\text{kg}$
Área Congestionada:	50.000 m^2
Altura das árvores:	10 m
Diâmetro médio:	0,3 m
Espaçamento:	1,2 m
Curva utilizada no método Multienergia:	curva 8
Parâmetros calculados:	
Energia de Combustão:	$1,711\text{E}12\text{ J}$
Fator de escala ($W^{1/3}$):	256,538
Distância em escala (50m do horto):	0,631
Distância em escala (100m do horto):	0,826
Sobrepessão - Pso (50m do horto):	181.878,375 Pa
Sobrepessão - Pso (100m do horto):	142.361,625 Pa
Velocidade da onda:	560,338 m/s

Apresentam-se no anexo III as tabelas com os valores (pressões) aplicados horizontalmente na esfera. Cabe ressaltar que mais detalhes de aplicação do método e, principalmente, das pressões aplicadas à esfera, estão apresentados por Santiago [2003].

3.3.3. DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO DA ESTRUTURA

A estrutura submetida à onda de choque consiste num vaso esférico com diâmetro interno de $14,5\text{m}$, construído em aço carbono com a espessura média de $0,038\text{m}$. Ele é sustentado por oito colunas tubulares cilíndricas, também de aço carbono, com altura de $9,41\text{m}$, diâmetro externo de $0,5\text{m}$ e uma espessura de $0,01\text{m}$ cada uma, as quais estão contraventadas por tirantes diagonais, conforme mostra a Figura 3.12. Os elementos desta estrutura são unidos por juntas soldadas (submetidas a um tratamento térmico de alívio de tensões) e/ou aparafusadas.

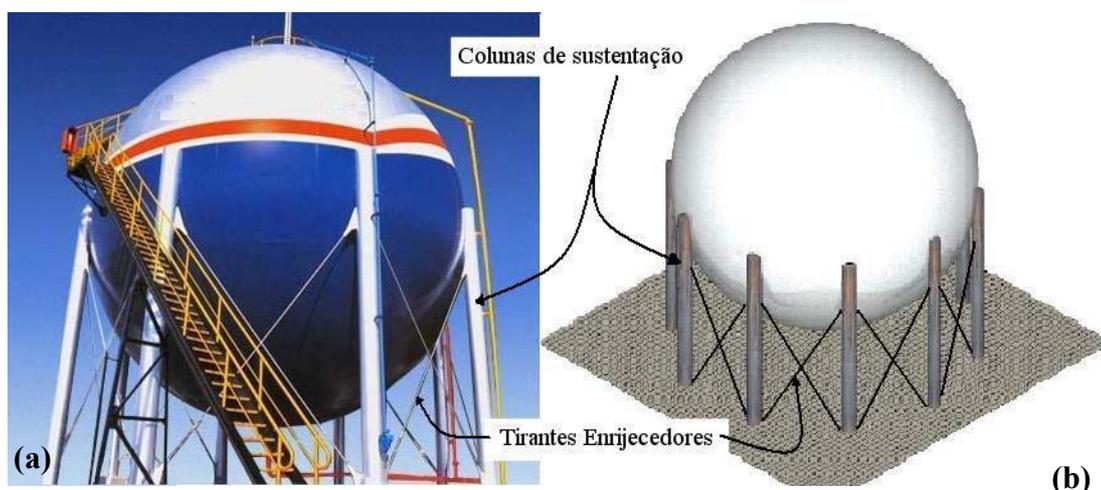


Figura 3.12: Fotografia de uma Esfera (a), desenho simplificado da Esfera de armazenamento de GLP (b), com suas colunas de apoio e tirantes de enrijecimento.

A massa do conjunto de colunas é aproximadamente igual a 1.000kg . Já a esfera possui 211.708kg e o *GLP* 814.095kg (recipiente cheio), valores estes utilizados no modelo numérico. O *GLP* contido nesse reservatório possui uma massa específica de 510kg/m^3 , estando liquefeito devido à pressão de 8 atm utilizada na sua armazenagem à temperatura ambiente.

3.3.4. DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

Aqui se descrevem as características dos modelos estruturais que foram implementados para analisar o efeito da onda de choque sobre o vaso de pressão esférico. Para cumprir este objetivo, foi empregado o *MEF* utilizando o sistema Ansys [2000]. As principais características dos modelos são discriminadas a seguir:

- Na modelagem da estrutura, conforme Figura 3.14, não foram considerados os acessórios pertencentes ao vaso, tais como: escadas, tubulações de entrada e saída de produtos, válvulas de alívio e outros.
- A parte esférica está modelada com elementos de casca, assim como as placas de ligação coluna-esfera indicadas no detalhe da Figura 3.14(b), as quais buscam representar a união da estrutura real;
- Para aumentar a rigidez da parte esférica, com o intuito de não considerar deformações desta parte devido à alta pressão interna ($P_{interna} = 8\text{ atm}$), um artifício numérico foi utilizado. Trata-se de um aumento na espessura da casca com diminuição da densidade, gerando assim uma esfera mais rígida;
- As oito colunas de sustentação estão modeladas com elementos de viga, assim como os tirantes de enrijecimento. As ligações das colunas ao piso possuem rótulas com apenas um grau de liberdade, devido ao tipo de fixação com dois parafusos utilizada, estando essas restrições mostradas na Figura 3.13.

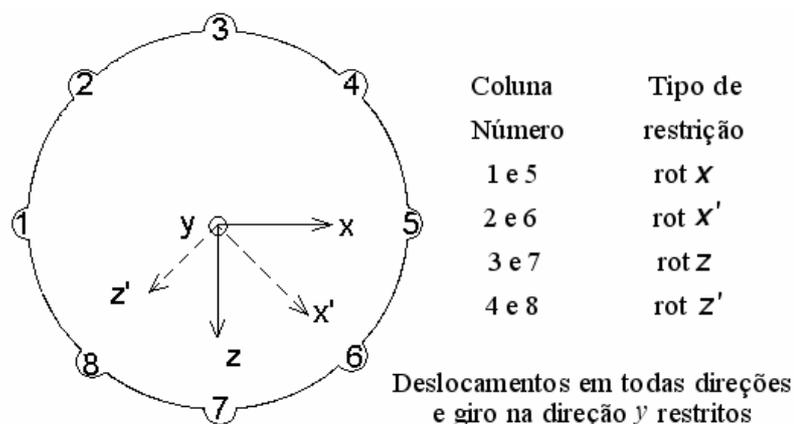


Figura 3.13: Esquema explicativo dos tipos de condições de contorno aplicadas na base das colunas.

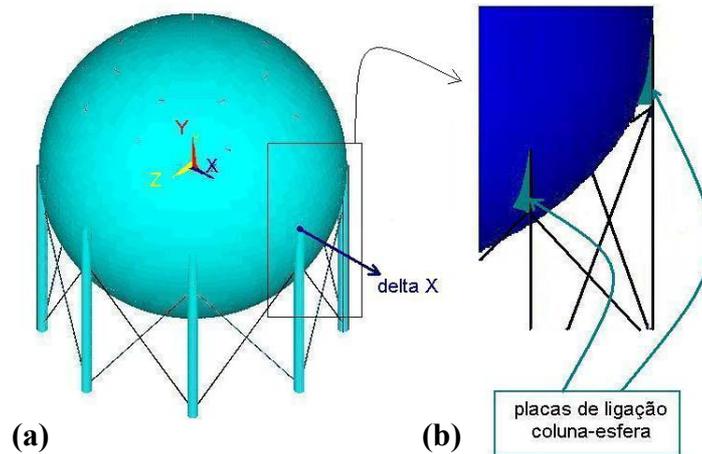


Figura 3.14: Esfera de *GLP* modelada em elementos finitos (a); detalhamento da ligação coluna-esfera (b).

Os materiais referentes à estrutura são aço carbono ($E = 205 \text{ GPa}$, $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, $\nu=0,3$) assim como as fixações das massas concentradas utilizadas para simular o efeito sloshing.

Casos Analisados

São analisadas 10 situações distintas combinando duas distâncias à borda do horto (50 e 100 m) e cinco diferentes volumes de líquido no interior da esfera (0%, 25%, 50%, 75%, 100%);

O gás liquefeito armazenado será representado em forma simplificada por massas pontuais, considerando um sistema discreto equivalente proposto por Tedesco *et al.* [1987] para modelar o efeito *Sloshing* (seção 2.8). Este modelo permite levar em conta o movimento de líquido no interior de contêineres rígidos cilíndricos, sendo seus coeficientes utilizados para aproximar o caso a um recipiente esférico, como aqui proposto.

O sistema estudado se apresenta na Figura 3.15, onde se considera uma porcentagem de líquido representada pela massa fixa na parte inferior do vaso (m_0), sendo tal massa fixada através de barras rígidas ao recipiente a uma altura h_0 . A massa móvel (m_1) está vinculada através de uma mola de rigidez K_1 a uma altura h_1 e possui apenas dois graus de liberdade (horizontais).

Os parâmetros (m_0, m_1, K_1, h_1, h_0) são definidos pelas Equações (34 a 37), propostos por Tedesco *et al.* [1987].

$$m_T = \frac{1}{4} \cdot \rho_L \cdot \pi \cdot D_0^2 \cdot h_L \quad (34)$$

$$m_1 = m_T \cdot (D_0^2 / 4,4 \cdot h_L) \cdot \tanh(3,68 \cdot h_L / D_0) \quad (35)$$

$$m_0 = m_T - m_1 \quad (36)$$

$$K_1 = m_T (g / 1,19 \cdot h_L) \cdot [\tanh(3,68 \cdot h_L / D_0)]^2 \quad (4) \quad (37)$$

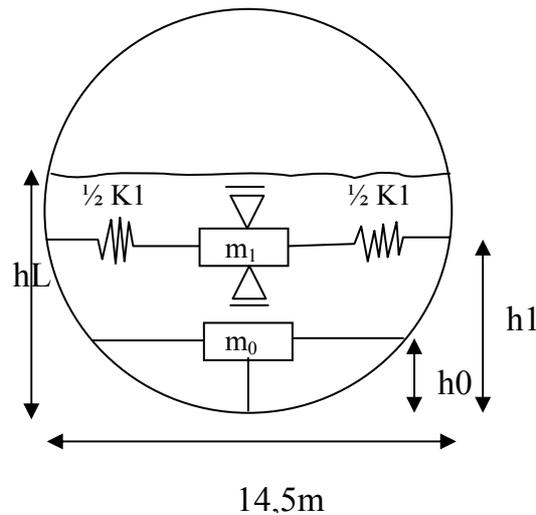


Figura 3.15: Esquema simplificado das massas e suas respectivas alturas aplicadas.

Uma vez determinadas as massas m_1 , m_0 e conhecidas as dimensões do vaso, é possível determinar os volumes de líquido correspondentes às mesmas, e posteriormente seus centros de gravidade.

Os valores dos parâmetros calculados para esses casos são apresentados na Tabela 3.5, que define o posicionamento das massas utilizadas para simular o fluido (parte móvel e fixa) e as propriedades das molas que fixam as massas discretas. Observa-se que na esfera vazia nenhuma massa foi adicionada ao sistema para representar o fluido, já com a esfera cheia, toda a massa foi considerada fixa (m_0) e posicionada no centro.

Tabela 3.5: Valores utilizados para simulação numérica.

CASO	V(m ³)	h _L (m)	h ₁ (m)	h ₀ (m)	k ₁ (N/m)	m _t (kg)	m ₁ (kg)	m ₀ (kg)
100%	1596,3	14,5	-	7,25	1,00E20	814090,7	-	814090,7
75%	1197,2	9,77	7,07763	2,8133	508709,7	610568,0	176291,3	434276,8
50%	798,1	7,25	6,36830	2,5551	442857,0	407045,4	147772,2	259273,1
25%	399,1	4,73	3,94000	2,0103	308631,2	203522,7	94542,6	108980,0
0%	0	0	-	-	-	-	-	-

Aplicando o Método Multienergia citado na seção 2.1.5 e a metodologia utilizada por Santiago [2003], foi possível calcular a sobrepressão efetiva ($\Delta p_{ef}(x,y,z,t)$) em cada ponto da esfera. A aplicação dessas pressões no tempo para o modelo implementado foi realizada dividindo a esfera em seções de 0,5m de comprimento, como se indica na Fig. 3.15(a). Todos os

pontos de cada seção são considerados com mesma pressão aplicada e, por esse motivo, foi considerada somente a componente horizontal da força (direção x), pois nas outras direções as forças se anulam. Isto se justifica por ser o escopo desse trabalho a busca da estabilidade global da estrutura na direção da frente da onda de choque (direção x) e não efeitos localizados sobre a mesma.

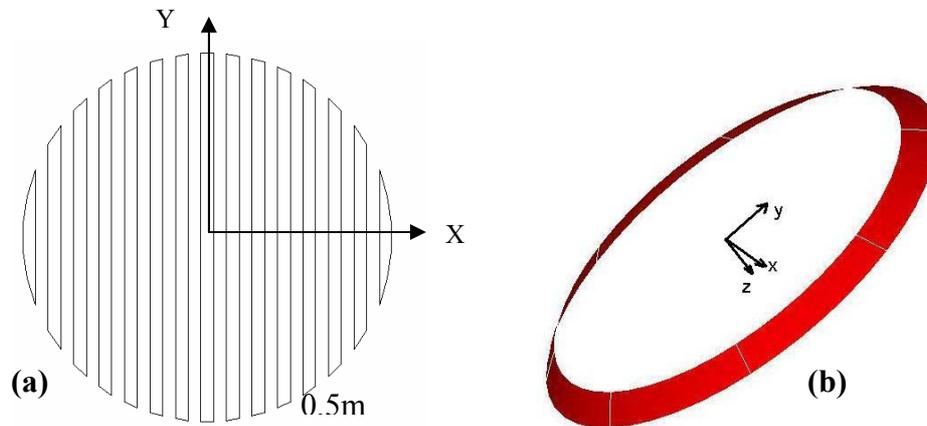


Figura 3.16: Esquema da divisão da esfera em seções transversais à direção de propagação da pressão (a); Anel da esfera a qual é aplicada uma pressão definida variável no tempo (b).

Na Tabela 3.6 são mostrados alguns dos valores de pressão aplicadas em cinco das vinte e nove seções indicadas na Figura 3.16(a), para diferentes tempos de análise, no caso do horto florestal localizado à 100m de distância. Os outros valores para este caso bem como para o caso a 50m estão no apêndice III.

Tabela 3.6: Valores de pressões aplicadas em função do tempo, para explosão à 100m.

Distância do centro da esfera [m]	$P_{(T=0\text{ ms})}$ [Pa]	$P_{(T=25\text{ ms})}$ [Pa]	$P_{(T=50\text{ ms})}$ [Pa]	$P_{(T=75\text{ ms})}$ [Pa]	$P_{(T=100\text{ ms})}$ [Pa]	$P_{(T=125\text{ ms})}$ [Pa]	$P_{(T=150\text{ ms})}$ [Pa]
-7,25 ↔ -6,75	31220	117800	113690	74100	37450	16510	4932
-3,75 ↔ -3,25	0	85360	99940	54600	27910	12540	3958
-0,25 ↔ 0,25	0	36440	42670	23940	12540	5790	1928
3,25 ↔ 3,75	0	32760	38340	22110	11860	5616	1962
6,75 ↔ 7,25	0	31220	36780	21320	11550	5546	2011

Analisando a Tabela 3.6 verifica-se que o instante de tempo igual a zero é o momento em que a onda de choque atinge a esfera na sua primeira fatia, estando as outras fatias sem pressão para o mesmo momento.

Arbitrou-se uma discretização de tempo de 25ms para definição dos carregamentos, o que devido à velocidade de onda de choque encontrada (560m/s) mostra que a cada passo de 25ms a onda avança 14m (diâmetro da esfera 14,5m).

Integrando as pressões ao longo da estrutura, as funções de pressões totais aplicadas na esfera para as duas distâncias analisadas se apresentam na Figura 3.17. Na mesma é possível observar a forma exponencial das duas curvas bem como a característica apresentada pela curva utilizada (Método Multienergia), onde o pico máximo de sobrepressão está deslocado em 25ms.

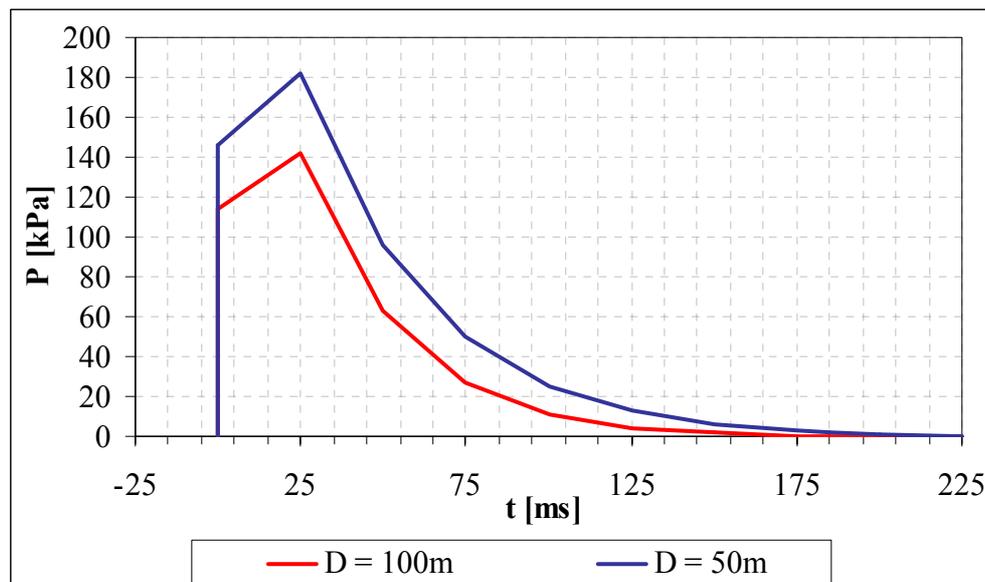


Figura 3.17: Comportamento da força total aplicada na estrutura para 50m e 100m de distância entre o horto e a esfera.

Outra observação importante sobre a mesma é o fato da onda a 50m ter maior duração do que a 100m. Isto acontece porque as distâncias analisadas (50 e 100m) são muito próximas da explosão onde a curva 8 (Figura 2.3) ainda é descendente, fazendo com que uma distância maior tenha um tempo de duração menor.

3.3.5. RESULTADOS DE MODOS E FREQUÊNCIAS

Apresentam-se a seguir os modos e freqüências para o vaso com diferentes níveis de fluido. Para obtê-los foi utilizado o método de integração por subespaços [Bathe, 1995]. As massas que simulam o líquido ficam concentradas em dois pontos onde seus valores e posições já foram comentados na Tabela 3.4.

Para o caso da esfera totalmente cheia, duas situações foram consideradas: distribuindo-se a massa total de líquido em toda a casca esférica (Caso A) e concentrando a massa no centro da esfera (Caso B).

Tabela 3.7: Modos de vibração e frequências naturais do vaso de pressão analisado para diferentes níveis de preenchimento de fluido (GLP).

Porcentagem de Líquido Modos de vibração	FREQUÊNCIAS [Hz]					
	0%(vazia)	25%	50%	75%	100%	
					Caso A	Caso B
1 ^o (fluido)	-	0,28646	0,2739	0,2686	-	-
2 ^o (translação em z)	2,1982	1,7948	1,4840	1,2683	1,0023	1,0009
3 ^o (translação em x)	2,1993	1,8013	1,4918	1,2761	1,0030	1,0009
4 ^o (torsão em y)	3,0986	3,0859	3,0851	3,0846	1,4144	3,0793

Como pode ser observado na Tabela 3.7, aumentando a quantidade de líquido, as frequências naturais diminuem. Nos dois casos da esfera cheia utilizados (Caso A e Caso B), os valores encontrados para os modos de translação são similares, indicando coerência entre os dois modelos. Para o modo de torsão vertical, existe uma diferença justificada pelo fato de haver grande variação no momento de inércia dos dois modelos. Os valores de frequências naturais e modos apresentaram resultados esperados, o que parcialmente valida os modelos numéricos implementados.

As formas características dos primeiros modos para o caso da esfera com 75% de líquido, excluído o primeiro modo que se trata da movimentação do fluido na direção x (pois as outras direções estão restritas), estão ilustradas na Figura 3.18, sendo estes modos similares nos outros casos.

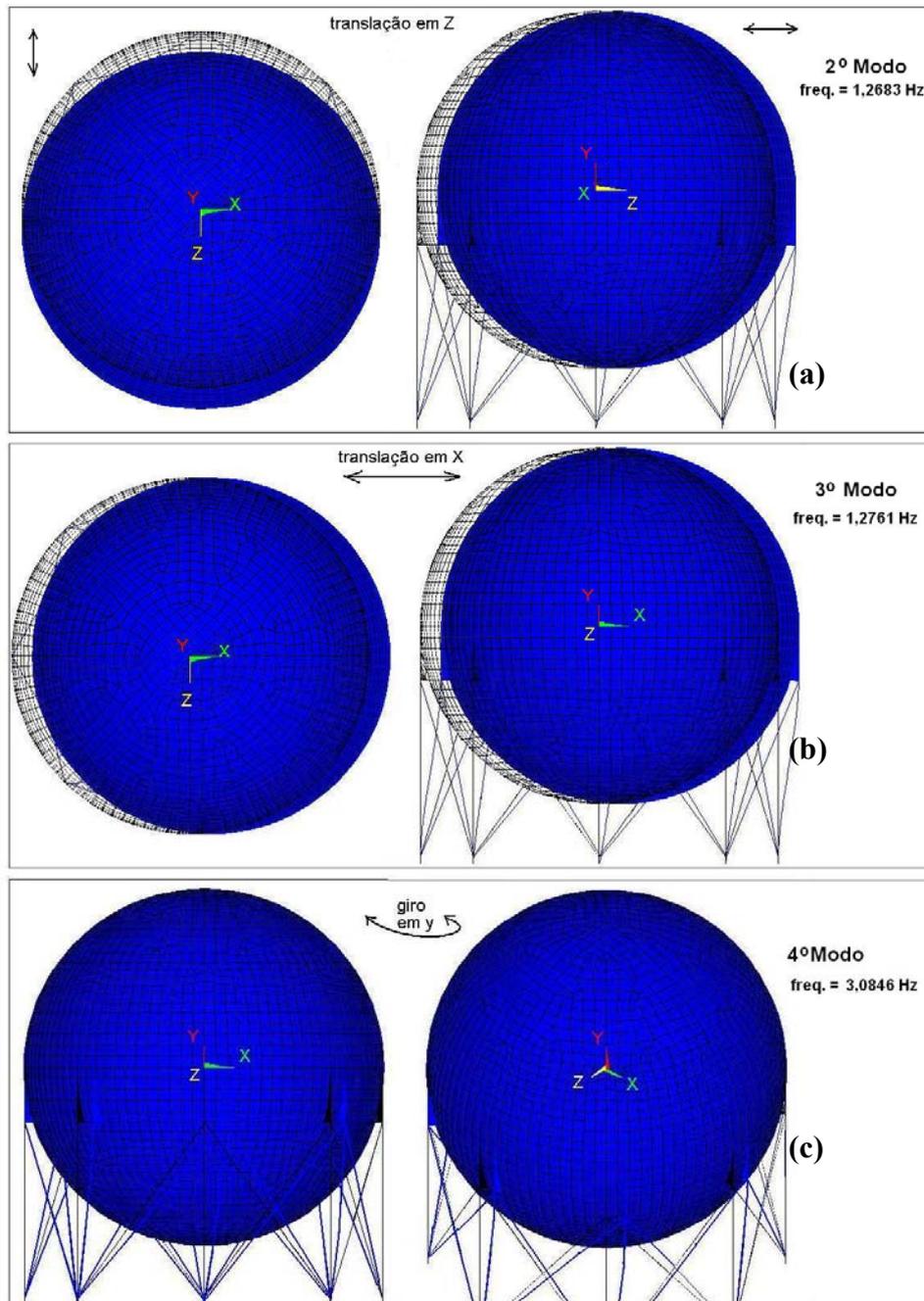


Figura 3.18: Modos de vibração para o recipiente com 75% de líquido: segundo modo (a), terceiro modo (b), e quarto modo (c).

3.3.6. ESTUDO DA ESFERA CONSIDERANDO SISTEMA LINEAR

Sobre os modelos implementados, aplicou-se a função de pressão $\Delta p_{ef}(x,y,z,t)$ como está estabelecida na seção 3.3.4 para simular a ação da onda de choque da explosão, utilizando um esquema implícito de integração. O sistema foi considerado com um comportamento linear tanto geométrico quanto físico.

Um deslocamento horizontal num ponto da casca foi escolhido como resposta para avaliar o comportamento dos modelos (ver Δx na Figura 3.14(a)) e, nas Figuras 3.18 e 3.19 mostram-se os deslocamentos encontrados para esse ponto. Como se pode observar claramente existe uma relação entre a distância da estrutura à borda do horto e a pressão incidente e, conseqüentemente, o deslocamento da estrutura.

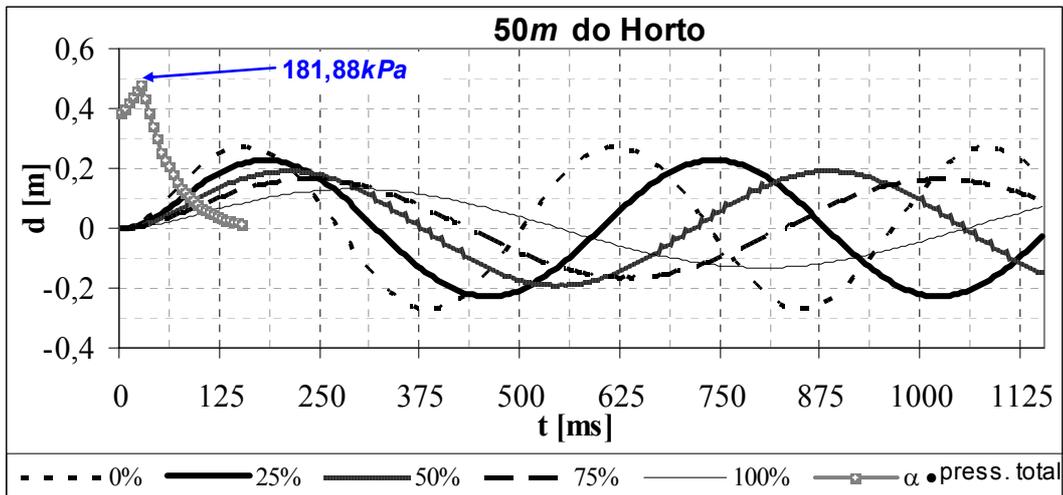


Figura 3.19: Deslocamentos da esfera na direção x em função do tempo, 50m ($\alpha=365$).

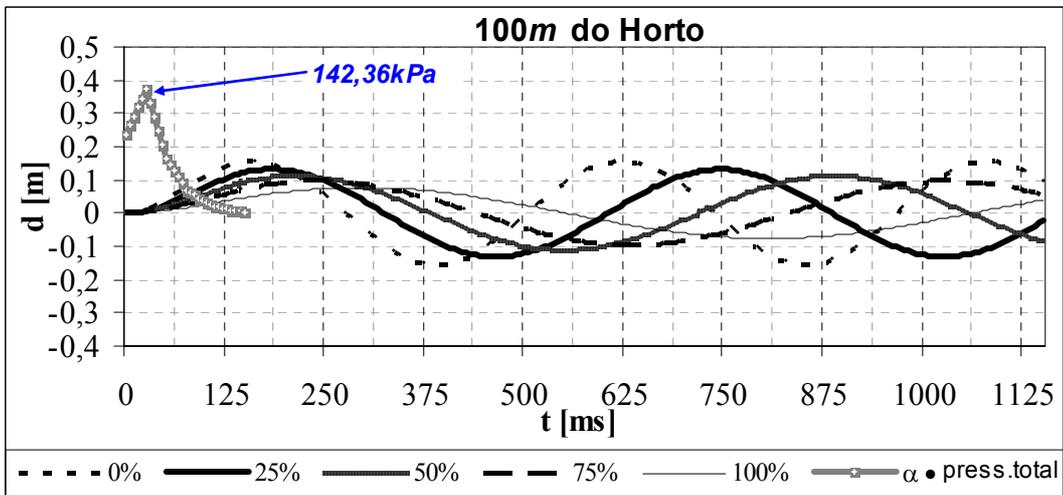


Figura 3.20: Deslocamentos da esfera na direção x em função do tempo, 100m ($\alpha=365$).

Duas observações devem ser feitas sobre os resultados obtidos: a primeira é que, à medida que aumenta a massa de líquido no interior da esfera, seu deslocamento horizontal diminui. A segunda que, após a passagem da onda de choque (aprox 150ms), a estrutura fica vibrando livremente, conforme indicado nas Figuras 3.18 e 3.19.

3.3.7. ANÁLISE EXPLÍCITA CONSIDERANDO SISTEMA NÃO LINEAR FÍSICO E GEOMÉTRICO

Segundo Wall [1978], uma esfera de armazenamento de *GLP* submetida a uma ação explosiva apresentando deslocamentos horizontais entre 5 e 6cm perde a rigidez com o rompimento dos tirantes de enrijecimento, deixando assim o sistema mais flexível e conseqüentemente permitindo que ocorra rapidamente o colapso total e o tombamento da esfera.

Considerando este critério, e tendo em vista uma análise mais completa desta situação, um novo modelo é analisado empregando não linearidade física e geométrica e utilizando um esquema explícito para integrar a equação de movimento de problemas transientes. A análise foi implementada no sistema LS-Dyna [2003], onde, para a adequação do modelo, algumas considerações foram feitas:

- Para reduzir o número de graus de liberdade do sistema, a esfera é modelada como um corpo rígido, pois objetiva-se aqui a resposta global da estrutura. Utilizam-se elementos de viga para tal e localiza-se a massa equivalente da mesma nos nós da estrutura. Desta forma, a força horizontal que representa a onda de choque é aplicada em apenas um nó da parte rígida;
- As colunas de sustentação e os tirantes de enrijecimento são modelados com elementos de viga com uma lei constitutiva implementada no LS-Dyna [2003], definida como se apresenta na Figura 3.21. Para o caso das colunas, a tensão representa Von Mises e, para o caso dos tirantes de enrijecimento, a tensão na direção da carga, pois é um esforço de tração puro. O ajuste da curva referente aos tirantes de enrijecimento foi realizado de forma que ao atingir um deslocamento de 6cm (esfera), eles comecem a romper por terem alcançado sua tensão máxima.

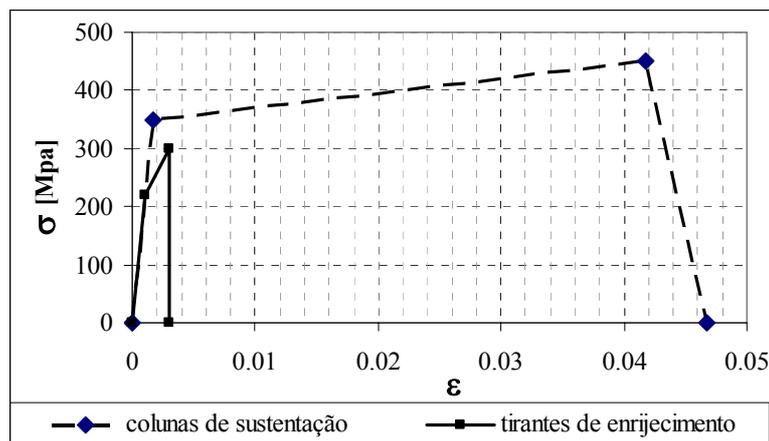


Figura 3.21: Lei constitutiva utilizada para os elementos da estrutura analisada.

Apenas quatro situações estão sendo consideradas nesta análise, são elas:

- Esfera cheia, horto a 100m;
- Esfera vazia, horto a 100m;
- Esfera cheia, horto a 50m;
- Esfera vazia, horto a 50m;

Foram escolhidas essas quatro por serem os extremos das situações consideradas na análise linear apresentada em 3.3.5.

É estimado um coeficiente de amortecimento de 2% para diminuir a amplitude da oscilação, evitando um aumento devido à superposição de modos em frequências mais altas.

Na seqüência, têm-se os resultados graficados em termos de deslocamento horizontal em função do tempo (Figuras 3.21 e 3.22), para comparação de respostas das análises implícita linear (seção 3.3.6) e explícita não linear física e geométrica (seção 3.3.7). Uma validação prévia do modelo explícito foi realizada considerando-o elástico linear, obtendo resultados similares aos da análise implícita.

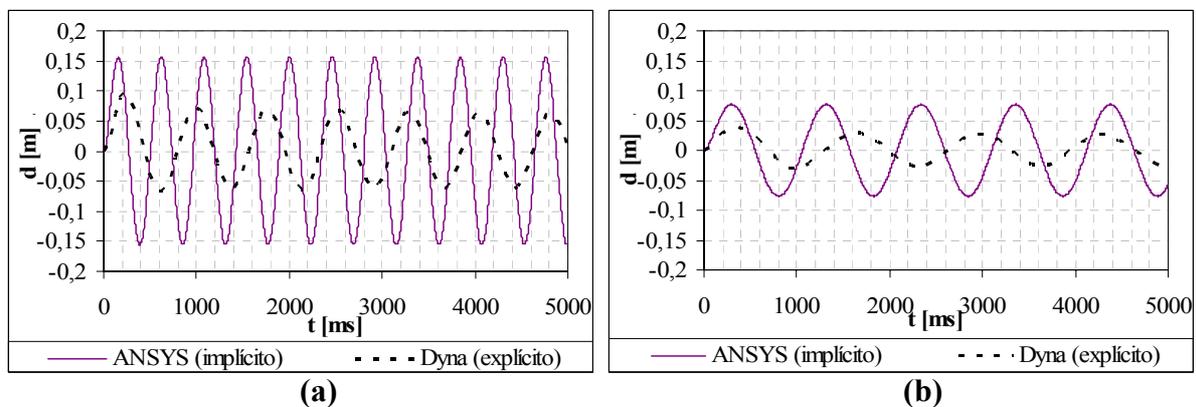


Figura 3.22: Deslocamentos horizontais da esfera na direção x em função do tempo – carga aplicada a 100m: esfera vazia (a), esfera cheia (b).

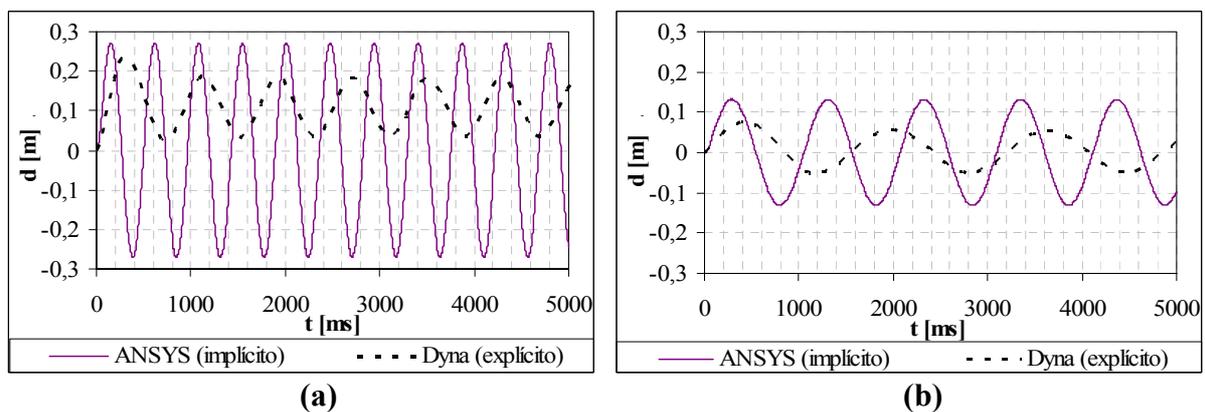


Figura 3.23: Deslocamentos horizontais da esfera na direção x em função do tempo – carga aplicada a 50m: esfera vazia (a), esfera cheia (b).

Uma observação importante é que não foi adicionada a aceleração gravitacional nas análises realizadas e isto resulta em erros nas respostas obtidas. Uma vez deslocada horizontalmente a estrutura pelo efeito da carga impulsiva o peso da estrutura será um fator importante de ser avaliado para determinar a estabilidade da estrutura frente a este tipo de solicitação. Ainda com esta limitação, as análises realizadas servem para mostrar a capacidades

dos métodos numéricos empregados de modelar este tipo de eventos e que classe de informação se pode obter das mesmas.

Nas Figuras 3.21, 3.22 e 3.23 é possível verificar uma menor amplitude na oscilação da análise não linear realizada, pois a estrutura passa a apresentar um comportamento não linear previsto pela lei constitutiva. Após a passagem da onda de choque da explosão (175ms) a estrutura fica oscilando em vibrações livres, observando-se a ocorrência de rupturas de tirantes ou plastificações localizadas nos suportes e reduzindo assim a rigidez do sistema. Isto é evidenciado pela menor frequência natural de vibração do sistema não-linear, quando comparada com resposta do sistema linear.

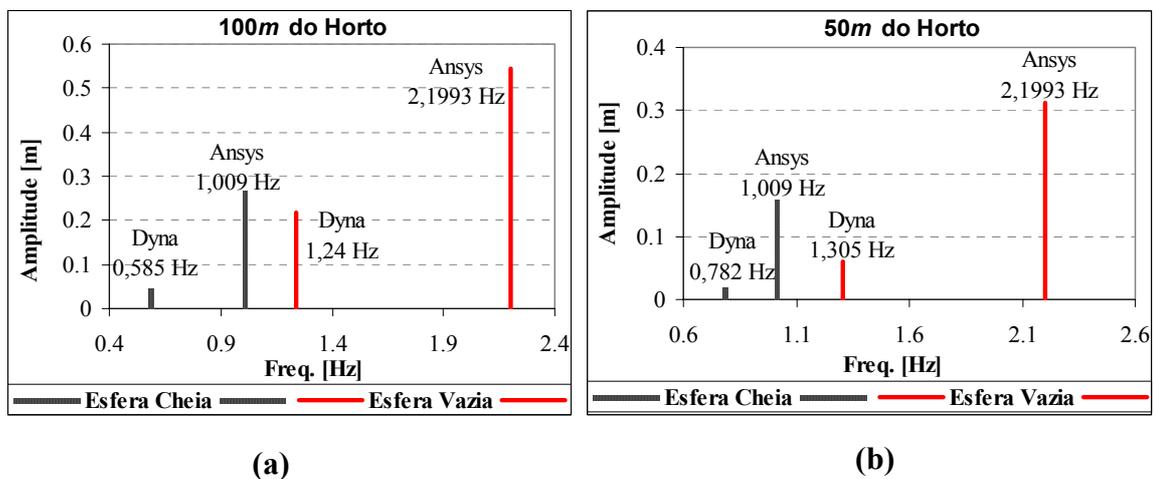


Figura 3.24: Resposta do deslocamento δx no domínio da Frequência para as diferentes análises feitas: horto a 100m (a), horto a 50m (b).

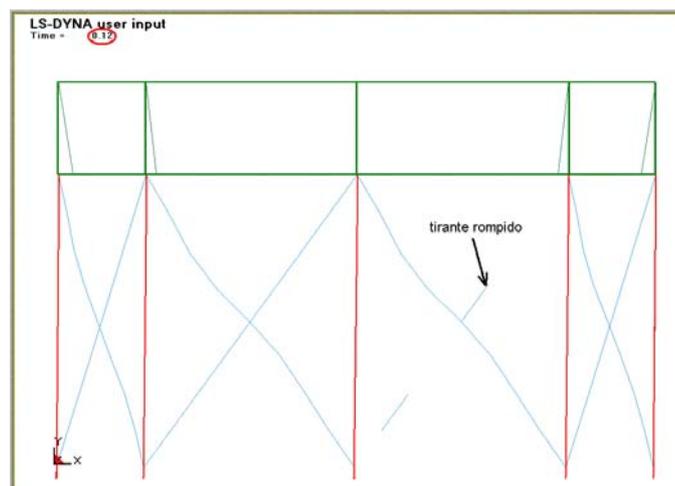


Figura 3.25: Modelo do LS-Dyna [2003] com ilustração dos deslocamentos no momento do rompimento do tirante de enrijecimento (esfera vazia a 100m do horto).

Nos quatro modelos estudados, observou-se que em apenas um caso não acontece o rompimento dos tirantes: com a esfera cheia e o horto florestal a 100m de distância. Para os outros três casos o processo de desestabilização da estrutura inicia com o rompimento do tirante.

Na Figura 3.25 verifica-se que o momento de ruptura dos tirantes acontece entre 115ms e 120ms, quando ainda há aplicação da pressão. Isto é considerado um fator agravante e acontece o mesmo com a esfera vazia à 50m da explosão. Já com 100% de preenchimento, o colapso dos tirantes se dá em um período de vibração livre (270ms), pois a carga aplicada cessa aos 125ms e o deslocamento de 6cm só ocorre em 240ms. Porém, nos três modelos, essa ruptura ocorre antes do primeiro pico de oscilação, já citado.

As Figuras 3.25 e 3.26 apresentam os deslocamentos horizontais obtidos na análise explícita para os dois casos extremos analisados, esfera cheia a 100m e esfera vazia a 50m (pior caso).

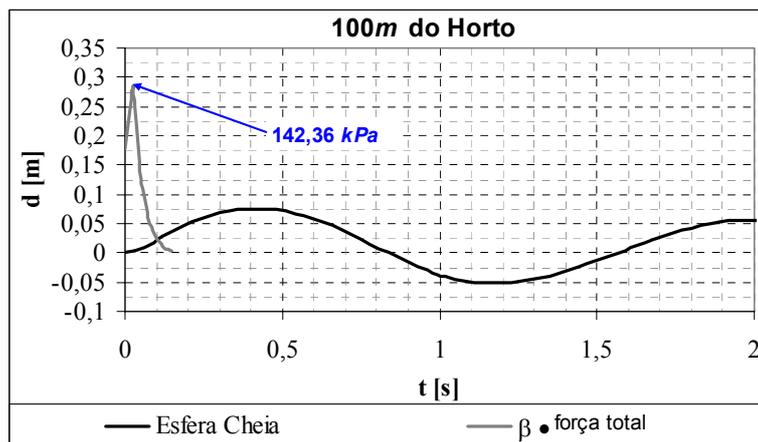


Figura 3.26: Deslocamentos ao longo do tempo obtidos com a esfera cheia a 100m de distância do horto florestal (análise explícita; $\beta=500$).

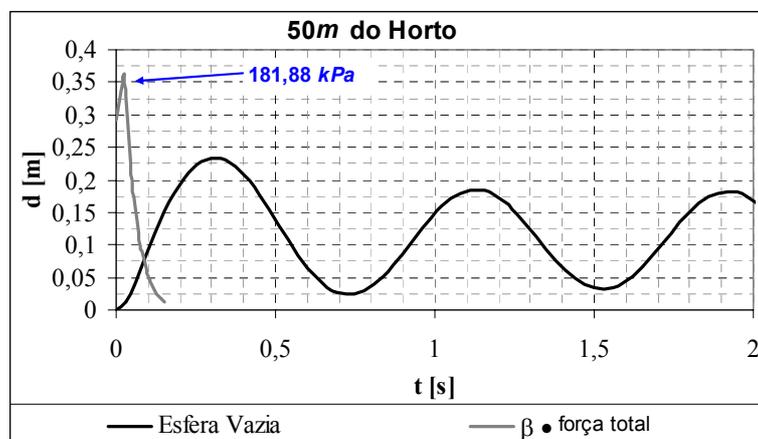


Figura 3.27: Deslocamentos ao longo do tempo obtidos com a esfera vazia a 50m de distância do horto florestal (análise explícita; $\beta=500$).

Na Tabela 3.8 se apresenta um resumo que engloba os dados observados tanto na análise implícita quanto explícita para os diferentes casos.

Tabela 3.8: Resultados de tempos e deslocamentos comparativos entre os dois tipos de análises realizadas, Implícita e Explícita.

Tipo de Análise	Análise Implícita				Análise Explícita			
	0	100	0	100	0	100	0	100
Preenchimento de GLP (%)								
Dist. da borda do horto	50 m		100 m		50 m		100 m	
Desloc. Máx. na direção x [m]	0,270	0,132	0,155	0,077	0,230	0,075	0,088	0,038
Primeiro pico de desloc. [ms]	155	295	155	295	300	450	240	350
Ruptura Tirante (tempo) [ms]	-				60	270	100	-

3.3.8. CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo numérico, com modelos de diferentes níveis de complexidade, no intuito de avaliar a integridade estrutural de um vaso de pressão esférico, preenchido com gás liquefeito e submetido à onda de choque de uma explosão de gás confinado num horto florestal posicionado a duas distâncias diferentes. No transcorrer deste foram obtidas as seguintes conclusões:

- Os modelos numéricos elaborados apresentaram propriedades dinâmicas (modos e frequências naturais) na ordem das esperadas, as quais validam os mesmos.

- O método Multinergia e os critérios utilizados para determinar a sobrepressão efetiva (Δp_{ef}), atuante em cada porção da estrutura durante a passagem da onda de choque foram baseados no algoritmo proposto por Santiago [2003] e forneceram resultados coerentes, mostrando a viabilidade da metodologia seguida para a avaliação deste tipo de solicitação.

- A implementação do modelo discreto equivalente, para determinar a interação entre o fluido e a estrutura, permitiu avaliar a influência do mesmo na resposta global desta, mostrando que a condição mais segura para um recipiente frente a este tipo de solicitação é o total preenchimento de fluido em seu interior.

- A comparação entre os resultados numéricos obtidos com diferentes tipos de análises se mostrou consistente, sendo que as diferenças encontradas podem ser explicadas a partir das limitações ou potencialidades de cada um dos mesmos. Mesmo assim, a não implementação de das cargas verticais devido ao peso próprio implica em erros nas respostas.

- A adoção de um critério global de ruptura da estrutura (deslocamento máximo horizontal do vaso de 6cm, Wall [1978]), permite dar uma resposta objetiva a um problema de extrema

complexidade, onde os ensaios e evidências experimentais são escassos, reservados por razões de segurança ou mal documentados

-A discretização do domínio (malha) utilizada foi suficiente para obter a resposta procurada. Na discretização temporal, principalmente de aplicação da carga, deve-se ressaltar uma consideração utilizada, o intervalo de 25ms. Considerando a velocidade calculada, este é suficiente para que a onda ultrapasse a esfera e, mesmo assim, pode-se dizer que apenas pequenos erros são introduzidos por esta simplificação, porque a função de interpolação entre um ponto e outro é linear, fazendo com que o carregamento seja composto de vários segmentos de retas conforme Figura 3.16.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Implementar nos modelos a ação da gravidade para simular o efeito do peso próprio da estrutura.

Realizar medições experimentais em vasos, principalmente esféricos, preenchidos com fluido, para validar a utilização das expressões (34, 35, 36, 37), estudando assim com mais detalhe o efeito *Sloshing*. Após, verificar qual a influência da pressão interna neste caso e, junto a isto, quantificar o aumento de rigidez do vaso devido à pressão interna.

Por último, sugere-se realizar uma comparação entre diferentes métodos de estimativa das pressões com o aplicado, o Método Multienergia, possibilitando uma confirmação da escolha correta da metodologia e uma verificação de possíveis erros cometidos no desenvolvimento dos cálculos. Se possível, utilizar resultados experimentais é altamente enriquecedor ao trabalho.

3.4. MODELAGEM DE UMA CAMADA DE SOLO / PROPAGAÇÃO DAS ONDAS

Quando se realiza uma avaliação dinâmica em um domínio de grandes proporções (solo), um tópico importante é a análise das ondas mecânicas geradas. Estas se propagam com velocidades muito elevadas, chegando à do som no meio, ou maiores, caracterizando carregamentos transientes e como tais devem ser tratados.

Uma série de eventos impulsivos pode gerar ondas mecânicas no solo, a exemplo de explosões. Nestes casos, não só a propagação da onda de choque no ar pode causar danos em estruturas, como também a propagação das ondas mecânicas no solo, principalmente, os deslocamentos provocados pelas ondas de superfície.

Esta questão torna-se ainda mais importante quando se deseja projetar estruturas com seus alicerces em um terreno, as quais tenham características muito específicas e rigorosas, principalmente quando a análise é baseada em modelos numéricos. Nestes casos, o domínio do maior número de variáveis e a existência de medições confiáveis é fundamental para se chegar a valores coerentes e, para tal, a obtenção de valores de mesma ordem na comparação de resultados numéricos e experimentais é considerada mais do que satisfatória, segundo Waarts e Wit [2004].

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar o desempenho do modelo numérico (*MEF* com um esquema de integração explícita) utilizado no estudo de um problema real de propagação de ondas em solos. Utiliza-se para isto uma aferição do modelo com resultados experimentais. A partir desta idéia, alguns objetivos específicos podem ser determinados:

- Modelar o solo através de elementos finitos, com uso de integração explícita (Ls-Dyna [2003]);
- Comparar os valores experimentais e numéricos nos ajustes do modelo;
- Analisar o efeito da inserção de uma valeta para minimizar a propagação das ondas de superfície através do modelo numérico;
- Analisar o comportamento das ondas ao longo da profundidade do solo analisado através do modelo numérico;

3.4.1. DESCRIÇÃO DO CENÁRIO:

O estudo foi motivado pela medição de vibrações em uma possível fábrica de componentes eletrônicos, onde há necessidade de certos limites quanto às vibrações de alguns

loais. A partir disto, a aplicação de modelos numéricos aferidos pode auxiliar na determinação da resposta de pontos localizados.

A representação em planta do local está mostrada na Figura 3.28, situando o modelo numérico dentro da região tracejada e ilustrando as cotas das dimensões utilizadas. A aquisição de dados é realizada através de acelerômetros fixados em bases de concreto existentes nos pontos P1 a P6 ilustrados na mesma figura.

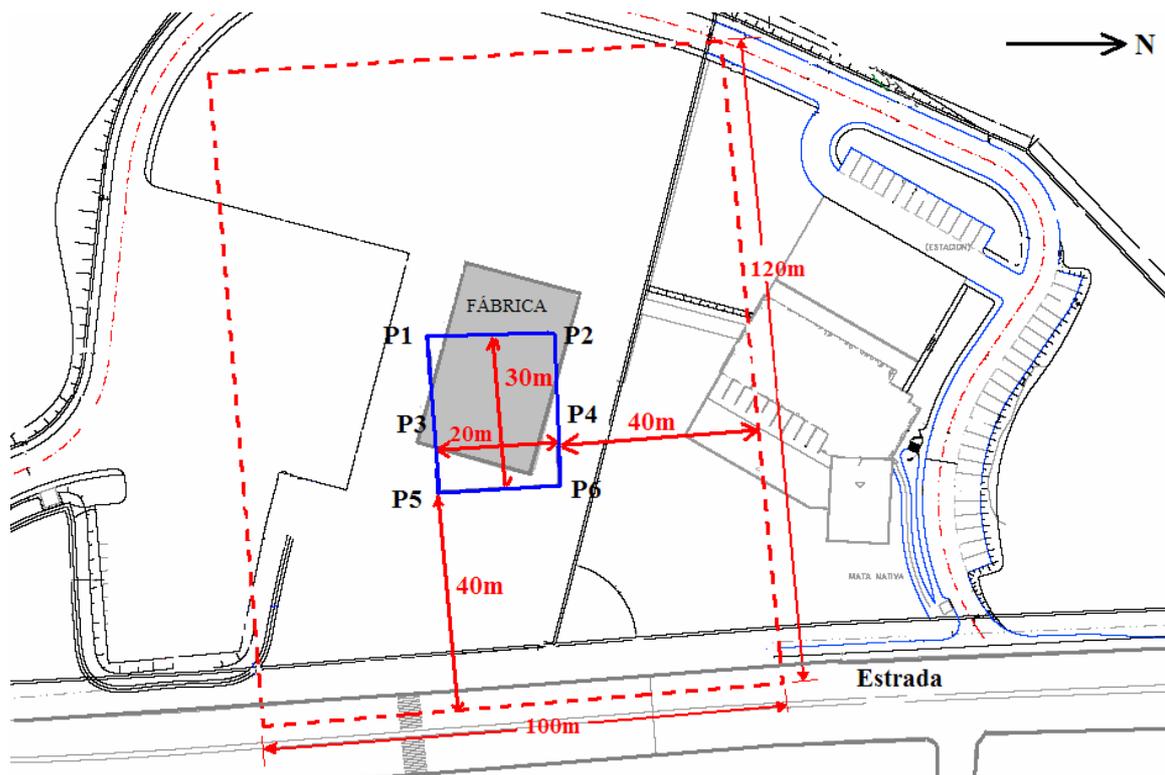


Figura 3.28: Planta simplificada do sítio com localização do modelo e dos pontos analisados.

3.4.2. DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO / CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para a construção do modelo numérico é utilizado o programa de elementos finitos LS-Dyna [2003], utilizando-se uma análise com esquema explícito de integração no tempo. Para iniciar a modelagem, o primeiro passo é a definição de propriedades mecânicas do material (solo) e a determinação da sua lei constitutiva. Neste ponto, uma primeira simplificação numérica é aplicada, o uso de material elástico linear.

Na Tabela 3.9 apresentam-se as propriedades do solo estimadas a partir da inspeção visual e das respostas medidas experimentalmente.

Tabela 3.9: Propriedades do solo.

Propriedade		Valor
E	Valor esperado do módulo de Young	700 MPa
ρ	Massa específica	1750 kg/m ³
ν	Coefficiente de Poisson	0,25

As outras simplificações que devem ser citadas são:

- as pequenas ondulações e desníveis do terreno (aprox. 0,6m) serão desconsideradas na análise numérica, ou seja, o modelo numérico é totalmente plano;
- a consideração de profundidade constante de 10m de solo até atingir a rocha (a partir da qual se tem uma condição de restrição total dos elementos do modelo numérico).

O Volume de controle adotado no modelo numérico, já identificado dimensionalmente na Figura 3.28, é apresentado na Figura 3.29(a), onde se pode observar o nível de discretização utilizado (30.000 elementos cúbicos de 8 nós), sendo que todos elementos possuem as mesmas dimensões horizontais (variando sua altura), conforme Figura 3.29(b). Verifica-se ainda, na Figura 3.29(a), a origem do sistema de coordenadas cartesianas utilizado, as condições de contorno aplicadas e a linha que representa a “Estrada”, através da qual serão aplicados os carregamentos dinâmicos para simular a passagem de caminhões.

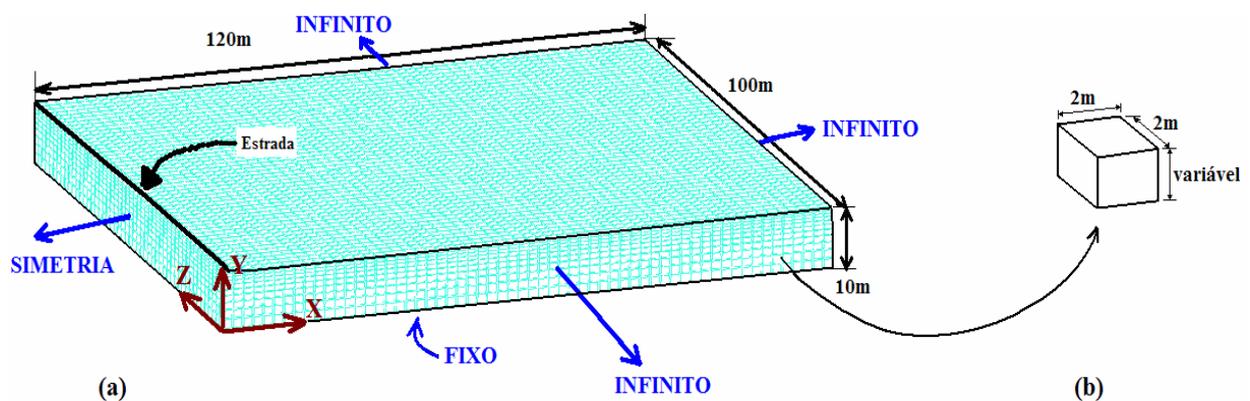


Figura 3.29: Representação do modelo numérico com dimensões, sistema de coordenadas e condições de contorno aplicadas (a), elemento prismático com dimensões utilizadas (b).

A utilização de elementos de altura variável possibilita uma maior discretização próximo à superfície, com altura de 0,45m para a primeira camada de elementos, ficando a última camada com altura de 1,81m. Isto é aplicado, pois objetiva-se maior acurácia nas respostas próximas à superfície (onde são medidas as oscilações) sem haver um aumento do número de elementos do modelo.

3.4.3. APLICAÇÃO DA CARGA

Duas são as formas de aplicação e análise de cargas neste estudo chamadas de: *caso a* e *caso b*, definidas como carga de impacto pontual e carga dinâmica ao longo de uma linha (Estrada), respectivamente.

Carregamento Experimental:

caso a: Os ensaios referentes ao impacto (*caso a*) foram realizados com o uso de um bloco de concreto de 60kg em queda livre a partir de 1m de altura no ponto P3.

Carregamento Numérico:

caso a: Por não haver conhecimento exato sobre a forma como tal bloco de concreto atingiu o solo, definiu-se de maneira arbitrária um pulso triangular em um nó da malha de elementos finitos para representar carregamento pontual.

A partir daí, três situações foram criadas (a_I , a_{II} e a_{III}), todas elas mantendo o mesmo impulso aplicado, 265.76 N.s. Estes foram desenvolvidos para se estudar a sensibilidade do modelo numérico quanto à aplicação da carga. Os casos a_I e a_{II} diferenciam-se pelo tempo de aplicação da carga e pelo valor de pico do pulso aplicado, já que o ensaio não considerou a forma como o bloco atingiu o solo. A terceira situação criada para aplicação de carga é o *caso a_{III}*, que é obtido com a modelagem numérica de um bloco rígido com uma velocidade inicial entrando em contato com o solo, carregamento através do impacto.

Todos os três *casos a* comentados estão apresentados na Tabela 3.10 juntamente com o carregamento definidos como *caso b* e apresentado a seguir.

caso b: Para este caso também se definiram arbitrariamente os parâmetros, considerando-se um caminhão passando pela Estrada a uma velocidade de 54 km/h (15 m/s), com as cargas distribuídas de forma que 60% do peso ficasse sobre o eixo traseiro e os 40% restantes, no eixo dianteiro e, a distância entre eixos foi estipulada em 5m.

Para a aplicação desta carga dinâmica sobre os elementos do modelo numérico, utilizou-se um esquema semelhante ao apresentado na Figura 3.30(a), obtendo-se um gráfico (força x tempo) conforme exemplificado na Figura 3.30(b) para cada ponto da linha que representa a Estrada no modelo.

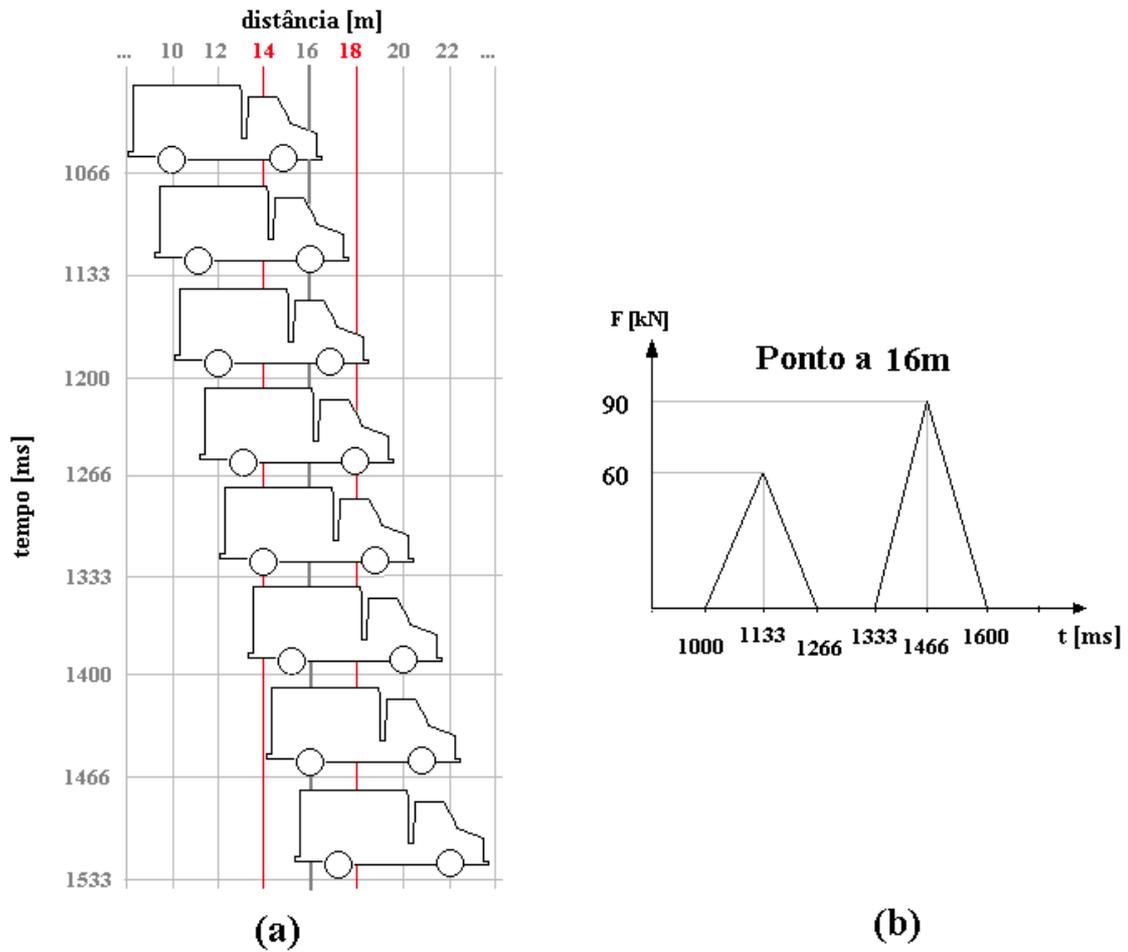
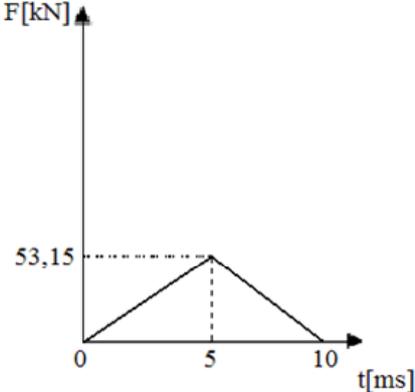
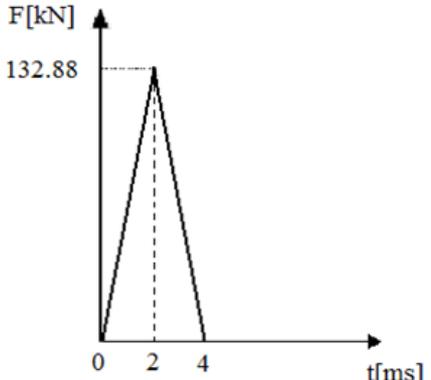
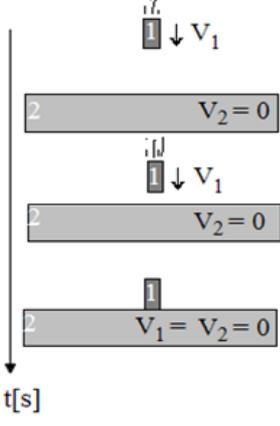
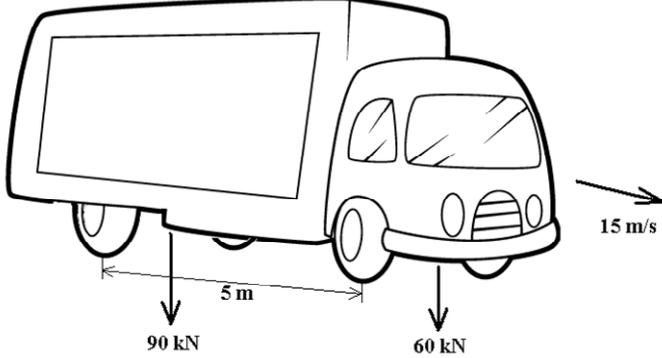


Figura 3.30: Esquema ilustrativo para determinação das cargas aplicadas para cada ponto localizado ao longo da linha de simetria, visualização geral (a), função carga-tempo sobre o ponto localizado a 16m sobre o trajeto do caminhão (b).

Tabela 3.10: Tipos e detalhes dos carregamentos aplicados para os modelos numéricos.

Casos:	Situação:	Carregamento:	
a_I	Massa de 60 Kg em queda livre sobre o solo com altura de 1.0 m	Direto sobre nós do modelo	
a_{II}			
a_{III}		Aplicação de contato entre sólidos	
b_I	caminhão trafegando pela estrada	Direto sobre nós do modelo	

3.4.4. MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Conforme citado, as medições foram realizadas com acelerômetros fixados em blocos de concreto localizados na superfície, e posteriormente um tratamento de dados foi executado. Os dados obtidos experimentalmente nos pontos P1, P2, P5 e P6 são relativos às acelerações apenas na direção Y . Isto se deve a dois motivos:

- Amplitudes maiores neste sentido;
- Orientação do sistema de coordenadas no modelo numérico não ser igual aos dados experimentais, para eixos horizontais.

Ainda sobre os dados adquiridos, alguns filtros são aplicados para excluir frequências que supostamente não sejam parte da vibração medida. Devido à existência de picos de muito maiores amplitudes em frequências de 60Hz e suas harmônicas, estes valores são os primeiros a serem excluídos. Segundo LDEC / UFRGS [2005], devido à camada de solo ser relativamente pequena até a rocha, as acelerações na faixa de frequências de interesse (1 – 100 Hz) não devem exceder significativamente as acelerações na interface. Desta forma, as respostas foram determinadas para uma faixa de 3 – 30 Hz, apesar do tipo impulsivo de carregamento, o qual excita em uma faixa maior de frequência, desconsiderando-se as mais altas nesta análise.

Esta consideração não acarreta em grandes erros, porque as altas frequências são de menores amplitudes e sofrem maiores amortecimentos. Também porque utiliza-se o mesmo filtro de frequências para ambas as respostas (numérica e experimental), fazendo com que a modelagem tenha os mesmos parâmetros e haja equivalência nas respostas.

A Figura 3.31 ilustra novamente os pontos analisados, situando-os dentro do volume de controle e definindo as distâncias entre os mesmos.

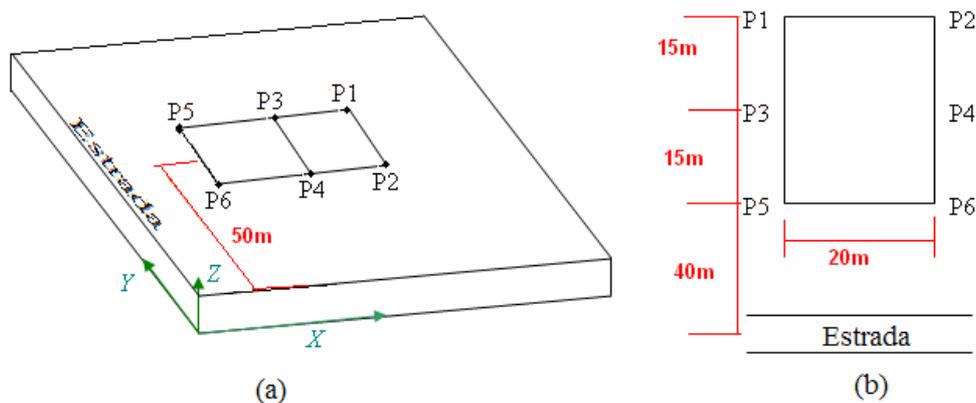


Figura 3.31: Localização dos pontos numerados analisado, e sistema de coordenadas (a), distâncias de ponto a ponto.

3.4.5. CALIBRAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MODELOS

Inicialmente apresentam-se na Figura 3.32 os resultados obtidos comparando as acelerações nos casos a_I , a_{II} e a_{III} para ao ponto P1 e valores experimentais (*exp 1*, *exp 2*) para os pontos P1 e P5, e na Figura 3.33 os mesmos dados para o ponto P2 e P6.

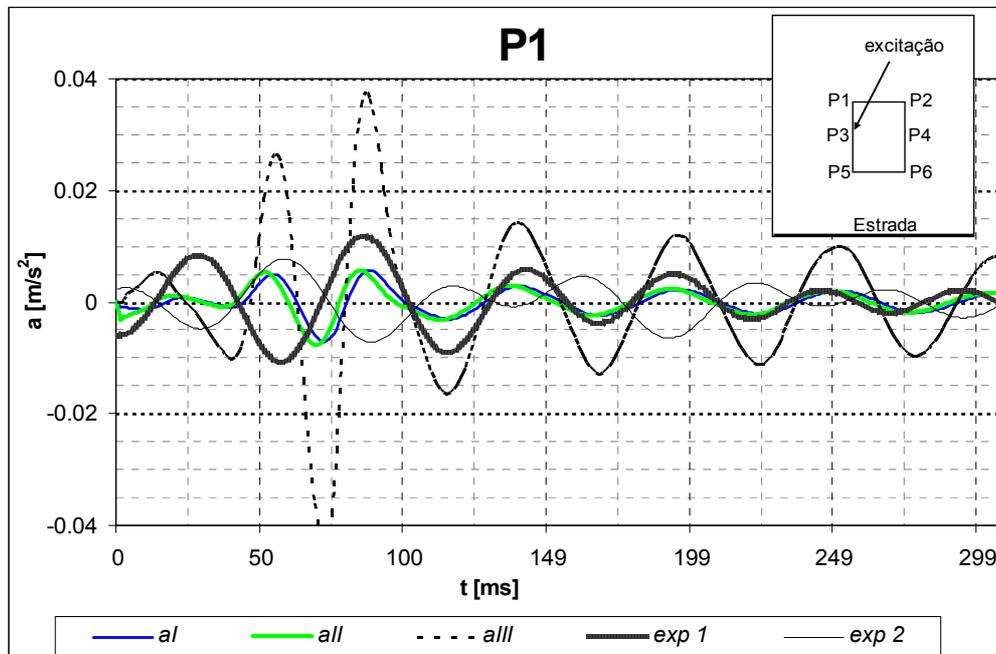


Figura 3.32 Acelerações verticais [m/s^2] tomadas no ponto P1 indicado no detalhe para o caso de uma carga de impacto (60kg em queda livre) aplicada no ponto P3

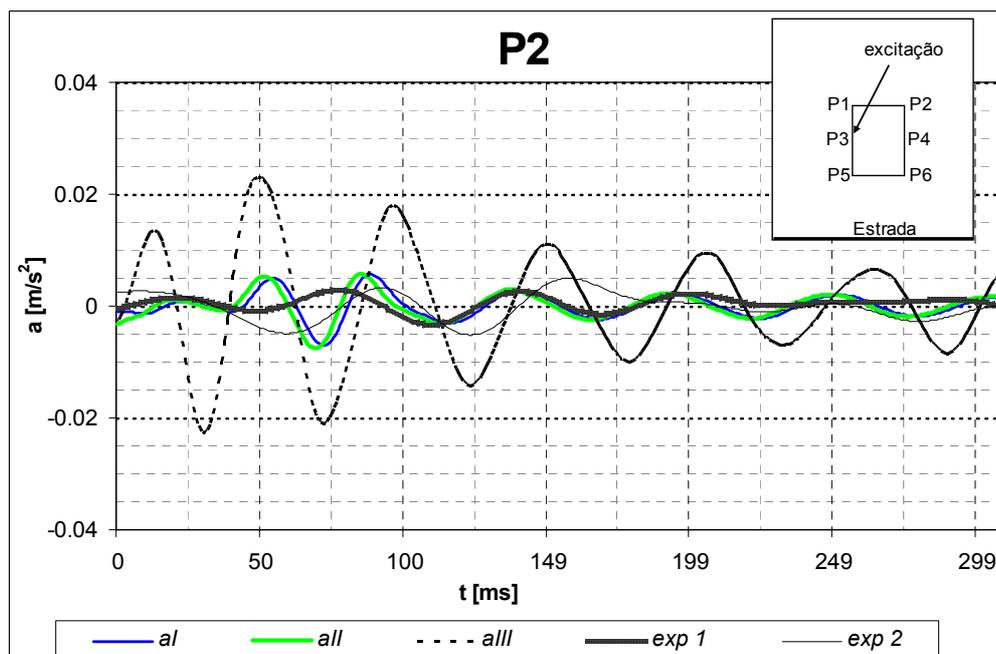


Figura 3.33: Acelerações verticais [m/s^2] tomadas no ponto P2 indicado no detalhe para o caso de uma carga de impacto (60kg em queda livre) aplicada no ponto P3

Observa-se que, para o caso apresentado, duas respostas experimentais diferentes foram obtidas, uma para o ponto P1 e outra para P5. Já para a resposta numérica nenhuma diferença foi encontrada, devido à simetria em relação ao P3 e às condições de contorno do modelo, as quais não representam exatamente a realidade. Verifica-se que o mesmo ocorre em relação aos pontos P2 e P6 quando da excitação no P3.

Com respeito aos gráficos de aceleração apresentados pode-se dizer que:

- as respostas numéricas e experimentais são da mesma ordem em amplitudes para os casos de excitação a_I e a_{II} , havendo uma diferença aproximada de 15 vezes para o caso a_{III} .
- em termos do padrão geral da resposta (forma da curva), a amplitude e a frequência são semelhantes para as três formas de modelar a carga a_I e a_{II} e a_{III} .
- Para efeito de comparação dos resultados, os gráficos de acelerações apresentados foram deslocados no tempo para que todos os picos (valores máximos de cada caso) ficassem alinhados.

Sendo assim, a comparação dos resultados experimentais e numéricos permitiu calibrar o modelo teórico, ajustando os parâmetros relacionados com a forma de aplicar a excitação e características do material (rigidez, massa e amortecimento do solo da região modelada).

Na Figura 3.34 apresentam-se os deslocamentos verticais obtidos para P1 e P2, sob as mesmas condições de carregamento. Ilustram-se ainda os pontos teóricos de chegada de cada tipo de onda analisados (Primárias, Secundárias, Rayleigh). Diferentemente das acelerações, os deslocamentos em P1 e P2 não foram deslocados para seus picos ficarem alinhados.

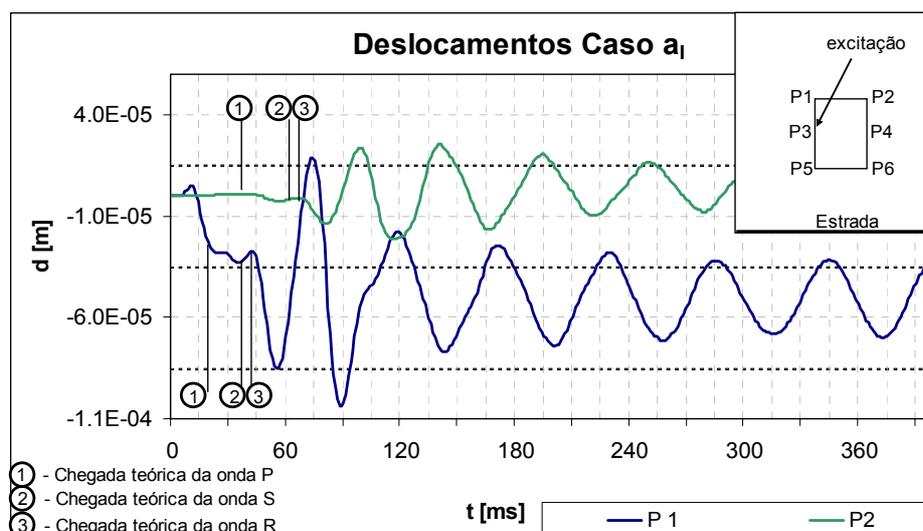


Figura 3.34: Deslocamento vertical tomado nos pontos P1 e P2 indicados no detalhe para uma excitação impulsiva aplicada no ponto P3 (Caso a_I). Indicação de momentos teóricos de chegada dos três tipos de ondas analisados.

3.4.6. EFEITO DE UMA VALETA NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS PRODUZIDAS PELA PASSAGEM DE UM CAMINHÃO

Neste caso, estuda-se a capacidade de atenuação das ondas de vibração produzidas pela passagem de um caminhão na Estrada (Figura 3.31(a)), com a construção de uma valeta que isole a região de medição, uma vez que o modelo numérico está aferido.

Dimensionando a valeta segundo os conceitos apresentados por Das [1982], verificou-se a necessidade de ser utilizada uma profundidade de $20,75m$ para se atingir uma eficiência máxima. Porém, devido às condições deste problema, apenas uma profundidade de $10m$ de solo é considerada, não sendo possível uma valeta maior.

Desta forma, o estudo não teria sentido se a valeta atravessasse verticalmente todo o modelo. Então, foram utilizadas três configurações para análise de resultados, conforme Figura 3.35:

- sem valeta (*caso b_I*) – para servir de parâmetro de comparação da atenuação;
- valeta de $0,984m$ de profundidade (*caso b_{II}*) – valeta rasa;
- valeta de $4,85m$ de profundidade (*caso b_{III}*) – valeta funda.

As valetas utilizadas possuem a mesma largura ($2m$) e comprimento ($100m$). Este comprimento abrange toda a largura do modelo numérico, indicando ser uma valeta infinita e que sua posição em seu sentido longitudinal não interfere nos resultados.

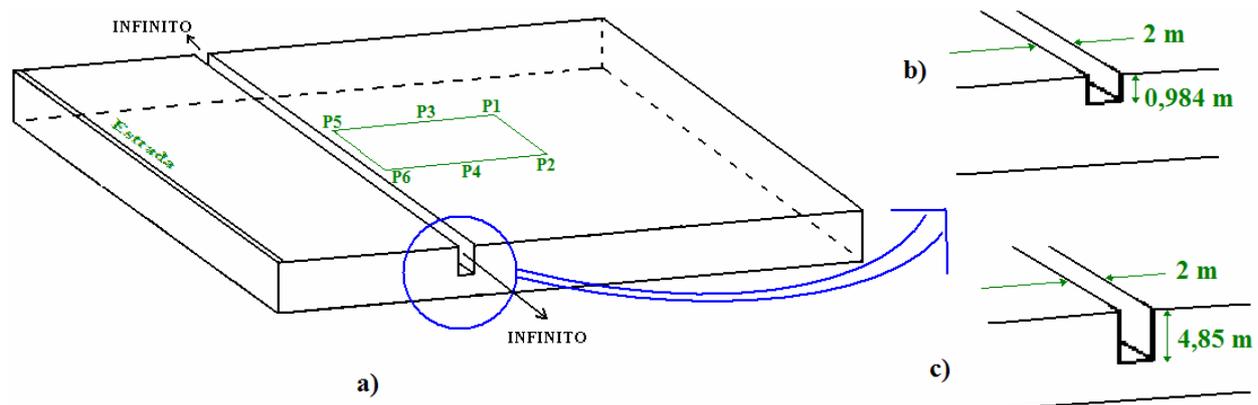


Figura 3.35: Apresentação do modelo numérico com inserção de valeta (a); Geometria da valeta *caso b_{II}* (b); Geometria da valeta *caso b_{III}* (c).

A excitação é realizada conforme expresso na Figura 3.30 e Tabela 3.10 caracterizada pela letra *b*.

O significado destes parâmetros está explicado no apêndice VII do presente trabalho, onde o $\lambda = 17,295m$. A comparação das três simulações é apresentada nas Figuras 3.36 e 3.37

para acelerações obtidas nos pontos P2 e P6, considerados representativos da região. Para a construção dos mesmos, o valor de pico máximo apresentado no *caso* b_I (sem valeta) para cada ponto foi tomado como fator de adimensionalização. Por isto, o valor máximo obtido na Figura 3.36 é 100%, ou seja, 0% de amortecimento.

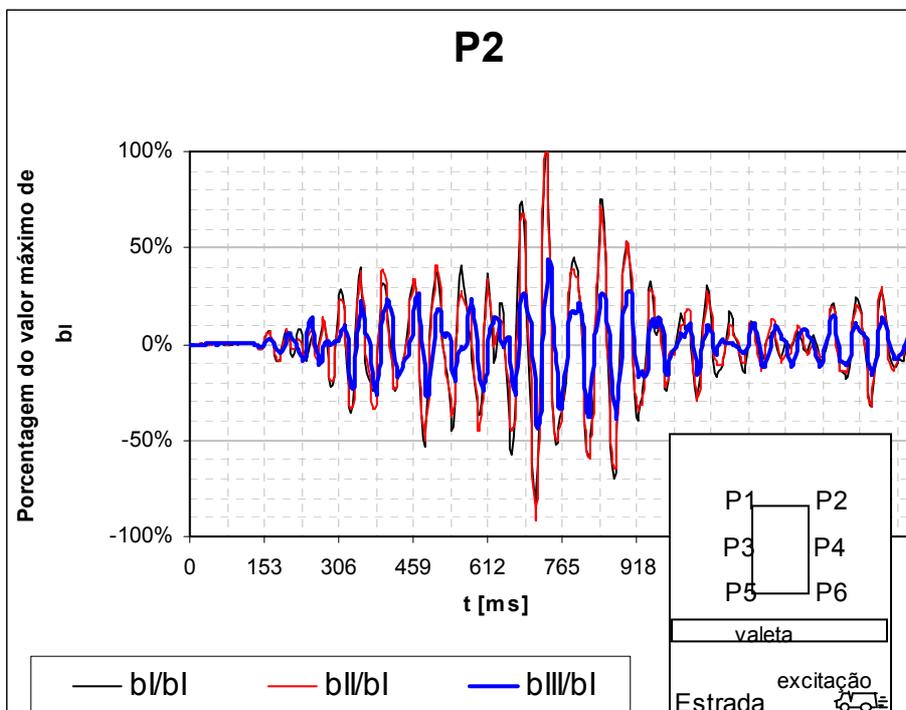


Figura 3.36: Acelerações normalizadas pelo pico máximo encontrado para *caso* b_I no ponto P2 relacionando *casos* b_{II} b_{III} .

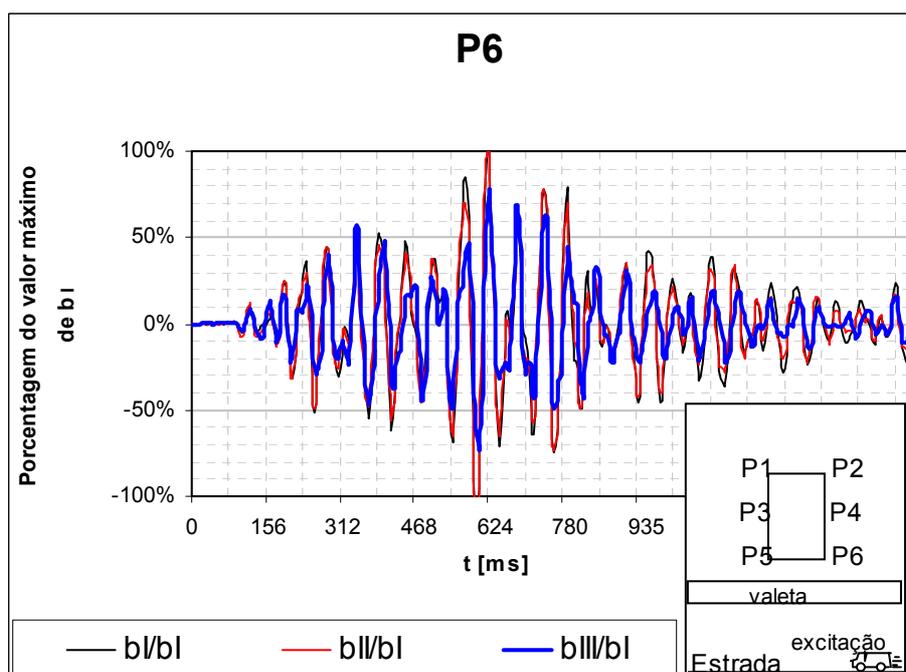


Figura 3.37: Acelerações normalizadas pelo pico máximo encontrado para *caso* b_I no ponto P6 relacionando *casos* b_{II} b_{III} .

Observa-se na Figura 3.36 que a atenuação obtida no ponto P2, na aplicação da valeta rasa (*caso b_{II}*), chega a ser nula no pico de oscilação, mostrando a baixa eficiência obtida. Já no caso da valeta funda (*b_{III}*), esta atenuação está em 55% no pico.

Nas duas figuras anteriores é possível visualizar a atenuação obtida principalmente para o *caso b_{III}* (valeta funda) nos pontos de medição P2 e P6. Já a valeta rasa apresenta uma atenuação muito reduzida. Quando o ponto de medição se encontra mais perto da valeta, como é o caso do ponto P6, o efeito desta diminui, e os resultados indicam uma menor influência da valeta. Neste caso atinge-se uma atenuação de apenas 22% para a valeta funda (*b_{III}*), e nenhuma atenuação para valeta rasa (*b_{II}*).

3.4.7. VARIAÇÃO DA AMPLITUDE DOS DESLOCAMENTOS AO LONGO DA PROFUNDIDADE DO SOLO

Conforme foi citado nos fundamentos teóricos, os deslocamentos causados por ondas de Rayleigh, tanto verticais quanto horizontais, apresentam um decréscimo considerável ao longo da profundidade. Sendo assim, uma estrutura com fundações mais profundas poderia atenuar os efeitos de vibrações causados por ondas de superfície. Das [1982] apresenta duas curvas (Figura VIII.4) que relacionam um fator de atenuação proveniente do aumento de profundidade.

Nesta seção, pretende-se coletar os dados de deslocamentos de duas cotas (A e B) do modelo numérico e posicionar os respectivos pontos em um gráfico que contenha tais curvas. Observam-se, em cada cota escolhida, seis pontos ao longo da profundidade sendo selecionados, incluindo o da superfície. Neste sentido, a Figura 3.38 ilustra todos os 12 pontos analisados. Cabe lembrar que o modelo numérico utilizado é o mesmo do *caso a_I* descrito anteriormente, onde a excitação é realizada em P3.

Ressalta-se que os três primeiros pontos tomados ao longo do eixo *Y* de cada cota possuem uma profundidade correspondente ao tamanho dos elementos. Os outros três pontos foram escolhidos arbitrariamente assim como as cotas horizontais.

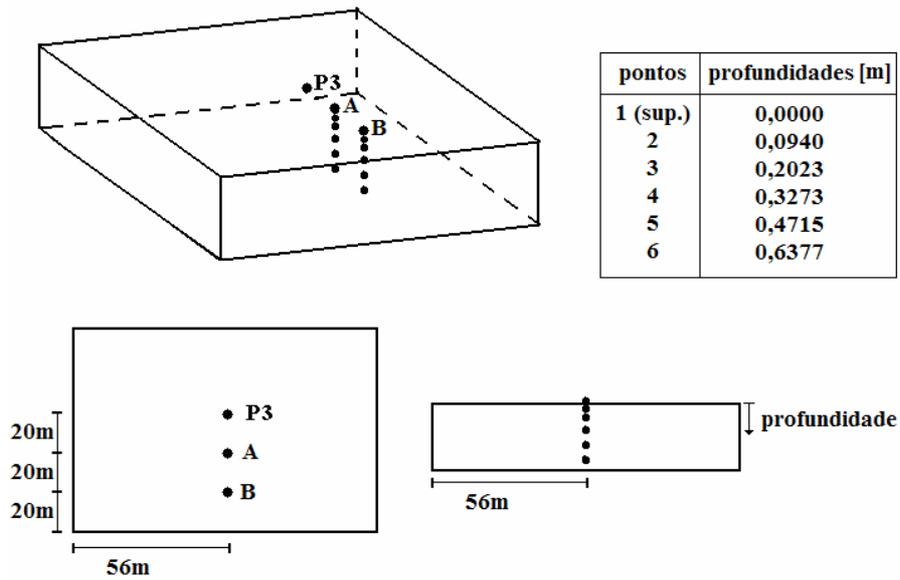


Figura 3.38: Esquema ilustrativo dos pontos escolhidos para comparação.

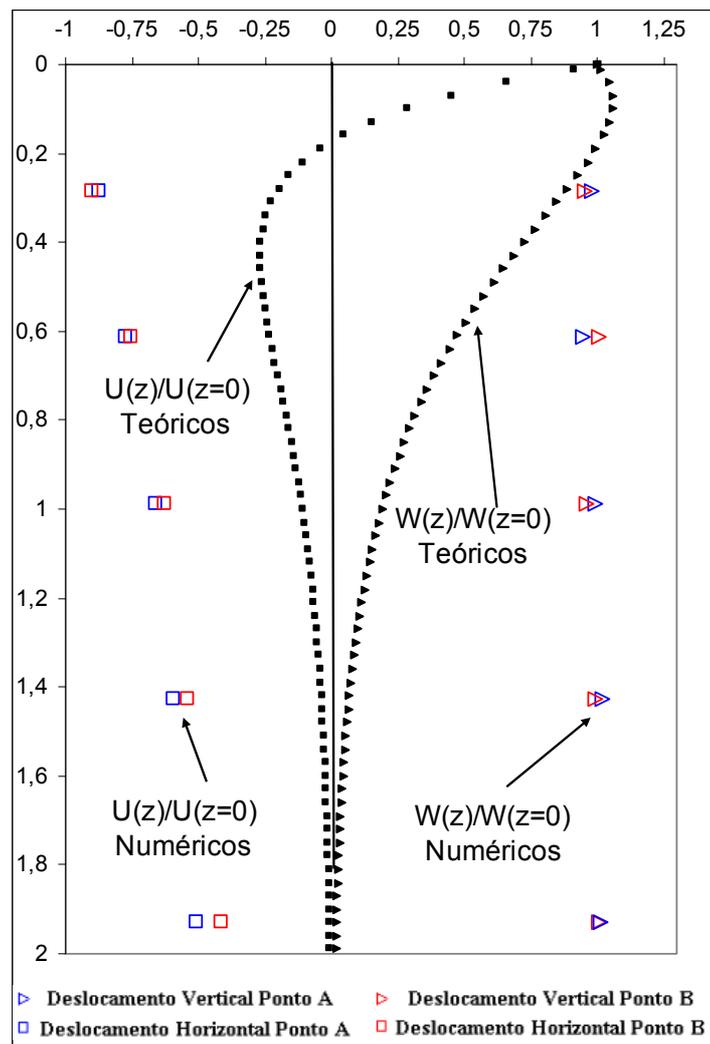


Figura 3.39: Verificação dos pontos coletados no modelo numérico sobre a curva fornecida por Das [1982].

Fazendo uma leitura da curva apresentada por Das [1982] (Figura 3.39 - Teóricos), pode-se dizer que a relação de deslocamento do ponto de interesse com sua projeção na superfície, para as ondas de Rayleigh, define o seguinte comportamento: o topo da curva representa um ponto na própria superfície, onde tem valor igual a 1 (um); ao longo da profundidade a curva tende a zero.

Para os pontos obtidos, ainda na Figura 3.39 (Numéricos), apresentam-se resultados insatisfatórios, muito distantes das curvas apresentadas, principalmente com o aumento da profundidade, onde deveriam tender a zero.

3.4.8. CONCLUSÕES PARCIAIS

Com estas análises, pretende-se obter conclusões em relação à validade do método utilizado na modelagem, incluindo considerações e restrições pertinentes. Também se deseja definir pontos importantes para fundamentação de futuros trabalhos que utilizem a mesma metodologia.

Sobre a calibração do modelo numérico:

-Os resultados obtidos utilizando a forma de excitação a_I e a_{II} mostraram comportamento coerente com os resultados experimentais disponíveis, tanto na forma global da resposta como na sua amplitude e frequência.

-Dos três casos, a_I e a_{II} permitiram ajustar os valores experimentais, sendo que a_{III} produziu uma amplitude da resposta 15 vezes maior.

Sobre a influência da valeta na atenuação das vibrações produzidas por caminhões na Estrada:

- Os resultados apresentados nas Figuras 3.35 e 3.36 são bons. Mostram que a configuração b_{III} apresenta um melhor comportamento (já era esperado) para realizar uma atenuação, mesmo que não seja a ideal. A profundidade de apenas 10m de solo até a rocha dificulta a aplicação de valetas mais profundas no modelo numérico construído. Celebi [2005] recomenda que a abertura de valetas em profundidades ótimas é muito eficiente para reduzir acelerações nas direções vertical e horizontal paralelas à direção da carga, mas amplifica as acelerações horizontais perpendiculares, que não foram observadas neste estudo. Um novo modelo mais espesso contemplando um pedaço de camada rochosa deveria ser construído permitindo a aplicação de valetas com profundidades mais próximas do ideal proposto por Das [1982], para, assim, visualizar as diferenças entre as diferentes configurações. Outros estudos

poderiam ser realizados com a mudança de parâmetros geométricos como a distância R (Figura VIII.5).

- Verifica-se que o caso b_{II} não apresenta boa atenuação, mostrando que o uso de valetas rasas representaria apenas custo para sua implementação, não trazendo benefícios.

- A discretização da malha utilizada é adequada para o tipo de análise proposto, inclusive devido ao número limitado de elementos para a capacidade computacional atualmente disponível.

- As condições de contorno aplicadas mostraram-se coerentes e confiáveis, principalmente pela não reflexão obtida nas laterais do volume de controle, fator que amplificaria as respostas.

Sobre a variação de amplitude de deslocamentos devido a ondas de Superfície para pontos ao longo da profundidade:

-Os resultados obtidos para a relação de deslocamentos apresentados na Figura 3.39 não são bons. Para encontrar a possível fonte da diferença entre o valor teórico e o numérico pretende realizar os seguintes estudos adicionais:

- Um refinamento maior da malha de elementos finitos ao longo da profundidade: desta forma mais pontos poderão ser coletados na região curva apresentada.
- Uma distância maior ao ponto de excitação ($>100m$) é fundamental para que haja um domínio das ondas de Superfície que estão sendo avaliadas, e para que haja um amortecimento das ondas Primárias e Secundárias. Nos casos analisados, distâncias de $20m$ e $40m$ ao ponto de excitação foram utilizadas, regiões estas as quais são difíceis de diferenciar os resultados.

Em termos gerais foi possível demonstrar que, embora tendo muitas incertezas no ajuste do modelo numérico a respeito das condições reais estudadas, é possível achar resultados com respostas para soluções de engenharia.

Uma sugestão final seria comparar os resultados obtidos com outros tipos de análises (Método dos Elementos Discretos, Método dos Elementos de Contorno, etc.) e outros experimentos, principalmente.

3.5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPLETA DE UMA EXPLOSÃO

Nesta aplicação procura-se simular uma explosão no ar (explosivo sólido) e a resposta de um semi-espaço para mostrar as possibilidades desta metodologia. A simulação é realizada empregando o *MEF* através de um esquema explícito de integração no domínio do tempo fazendo-se uso do sistema LS-Dyna [2003] para modelar o solo, o ar e o material explosivo.

Lembra-se que poucos dados são encontrados na literatura sobre modelagens deste tipo utilizando programas de múltiplos propósitos de elementos finitos. Por isto, os resultados apresentados são de caráter preliminar e têm o intuito de avaliar as possibilidades destas ferramentas. Tais resultados podem-se dividir em:

- Curvas de pressão gerada em diferentes pontos do volume de controle;
- Comparação dos valores encontrados com os obtidos através do método simplificado utilizado na seção 3.1 e do método do TNT Equivalente proposto por AIChE [2000];
- Comparação entre os modelos numéricos utilizando formulação Lagrangeana e *ALE* (Formulação Arbitrária Lagrangeana Euleriana), já apresentados na Seção 2.2.2 deste trabalho.

3.5.1. DEFINIÇÃO DE GEOMETRIA / MATERIAIS

Foi considerado para este estudo um volume de controle prismático aproveitando a dupla simetria possível para o problema proposto e, desta forma, utilizaram-se 33.000 elementos (cúbicos de 8 nós). Basicamente, o problema possui as seguintes características geométricas:

- Camada de solo com profundidade de $50m$;
- Camada de ar com altura de $160m$ até o topo do modelo;
- Explosivo sólido com volume de $592,70m^3$, localizado a $150m$ de altura do solo.

Este volume de controle simplificado foi definido visando facilitar tanto sua construção quanto a obtenção das respostas, uma vez que representa um explosivo simétrico no ar, o qual gerará uma onda de choque praticamente esférica e, não terá os efeitos de reflexões com outros corpos. Os valores das dimensões apresentadas na Figura 3.40 (a) foram arbitrados, onde a única intenção seria ter um volume de controle tal que houvesse distância interna suficiente para se analisar os efeitos da explosão. Optou-se por utilizar uma malha estruturada para evitar variações na resposta pela influência da forma da malha. Com também há uma restrição computacional de número de elementos a ser utilizados, o valor de explosivo utilizado seja muito grande, pois os elementos ficaram com dimensões grandes.

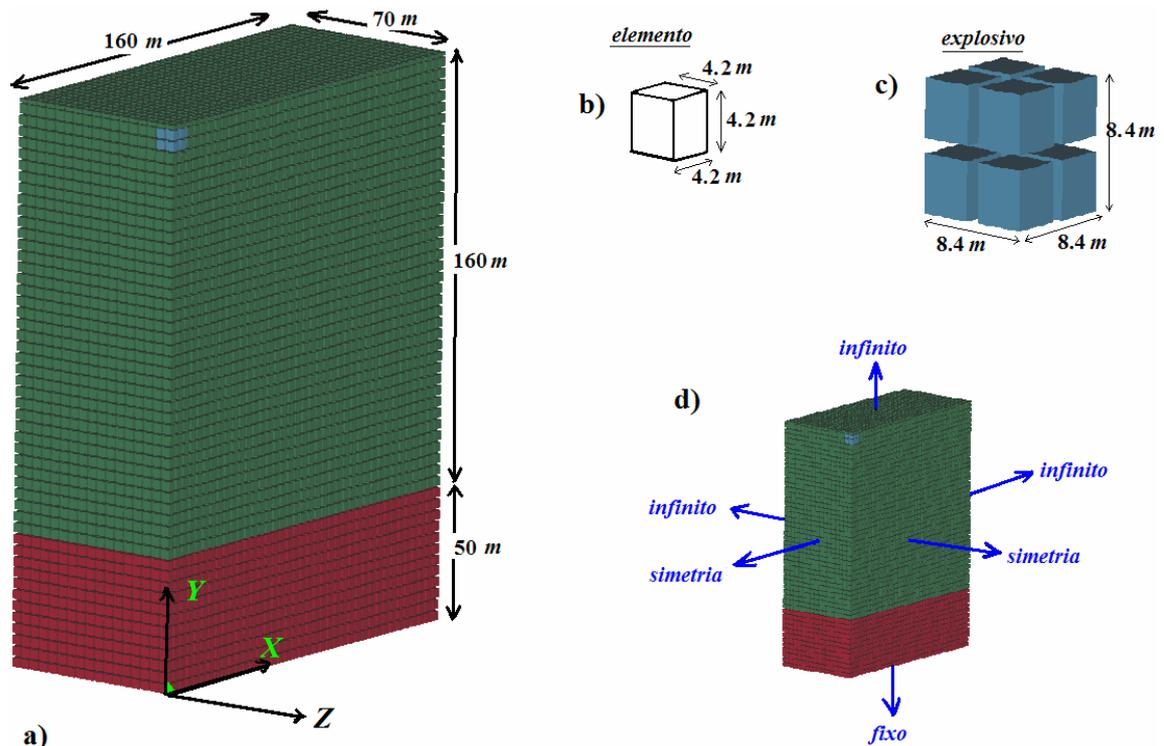


Figura 3.40: $\frac{1}{4}$ do volume de controle do problema a ser analisado apresentando as dimensões gerais e o sistema de coordenadas utilizado (a); Elementos cúbicos (8 nós) utilizados com dimensões (b); $\frac{1}{4}$ da geometria de explosivo sólido utilizado com dimensões (c); Resumo das condições de contorno aplicadas para cada face do volume de controle (d).

3.5.2. MÉTODO UTILIZADO / CONSIDERAÇÕES E APROXIMAÇÕES NUMÉRICAS

Nesta seção pretende-se apresentar algumas informações específicas utilizadas na modelagem. Faz-se uso dos programas comerciais Ansys [2000] para o pré-processamento e LS-Dyna [2003] para o pós-processamento.

Em termos de solução matemática, a integração direta das equações de movimentos é utilizada, aplicando-se análise explícita e fazendo-se uso do método das Diferenças Centrais (Apêndice VII). Como já citado, e para fins de comparação, dois tipos de formulação são aplicados: Lagrangeana e *ALE*.

Em termos de hardware disponível, um computador com 1.8GHz de velocidade e 750MB de memória RAM foi utilizado, necessitando para cada análise em torno de 20h de processamento.

Primeiramente, uma listagem das propriedades que caracterizam os materiais empregados pode ser observada na Tabela 3.11. Os valores utilizados nas constantes são retirados de exemplos encontrados na literatura (principalmente LS-Dyna [2003]).

Tabela 3.11: Definição das propriedades dos materiais utilizados.

COMPONENTE	MATERIAL		Equação de Estado (EOS)	
	Lei Constitutiva	PROPRIEDADES	Nome	Constantes
SOLO	Plasticidade Linear	$\rho = 2450 \text{ kg/m}^3$ $E = 188 \text{ GPa}$ $V = 0,20$	-	-
AR	Nulo	$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ $\mu = 0,20$	Linear Polinomial	$C_0 = 0$ $C_1 = 0,00001$ $C_{02} = 0$ $C_3 = 0$ $C_4 = 0,4$ $C_5 = 0,4$ $C_6 = 0$ $E_0 = 0,25e-5$ $V_0 = 1,0$
EXPLOSIVO	High Explosive Burn	$\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$ $D = 0,0374$ $PCJ = 0,18503$	JWL	$A = 3,73 \text{ Mbar}$ $B = 0,0374 \text{ Mbar}$ $\omega = 0,35$ $R_1 = 4,15$ $R_2 = 0,95$ $E_0 = 0,06656 \text{ Mbar}$ $V_0 = 1,0 \text{ m}^3$

3.5.3. RESULTADOS OBTIDOS

Na Figura 3.41 ilustram-se os primeiros resultados obtidos através da metodologia utilizada. Inicialmente verificam-se os contornos de pressão deslocando-se de forma aproximadamente esférica ao longo dos elementos que caracterizam o ar ambiente.

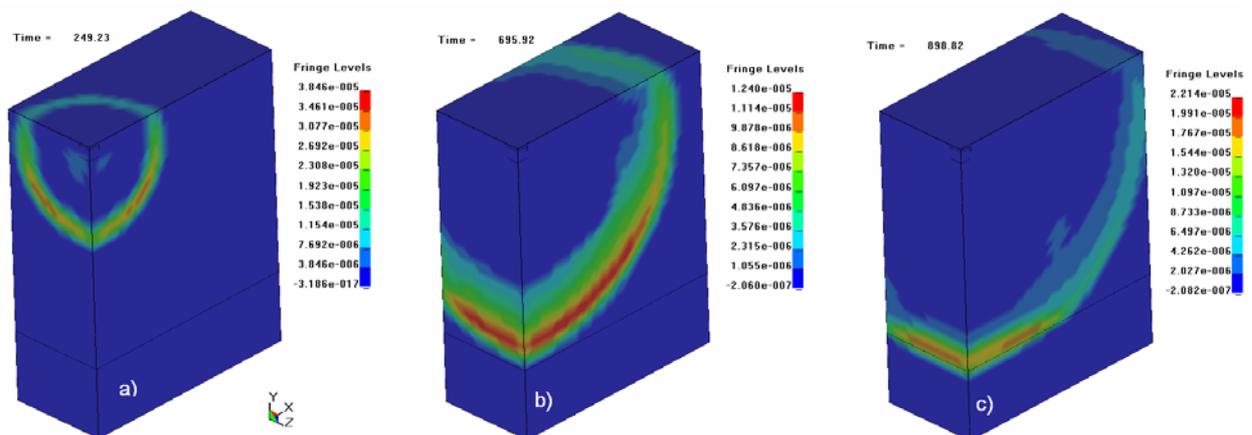


Figura 3.41: Propagação da onda de sobrepressão ao longo da geometria: para 249.23ms (a); para 695.92ms (b); para 898.82ms (c).

Na Figura 3.41 (b) verifica-se que, quando a onda de choque atinge as laterais do volume de controle, não sofre reflexão, sendo totalmente absorvida pelos elementos das faces externas. O mesmo efeito não acontece quando a onda chega ao solo, na Figura 3.41 (c), pois inicia um processo de interação da onda com o solo e sua conseqüente reflexão, o qual será mais estudado na continuação deste trabalho.

Como os resultados apresentaram um comportamento coerente, passa-se a coletar respostas específicas para as comparações propostas inicialmente. Para apresentá-las, definem-se

seis pontos (A, B, C, D, E, F) ao longo do volume de controle, escolhidos de forma aleatória e distribuídos na região representada pelo ar. A Figura 3.42 apresenta-os indicando suas cotas e distâncias ao explosivo.

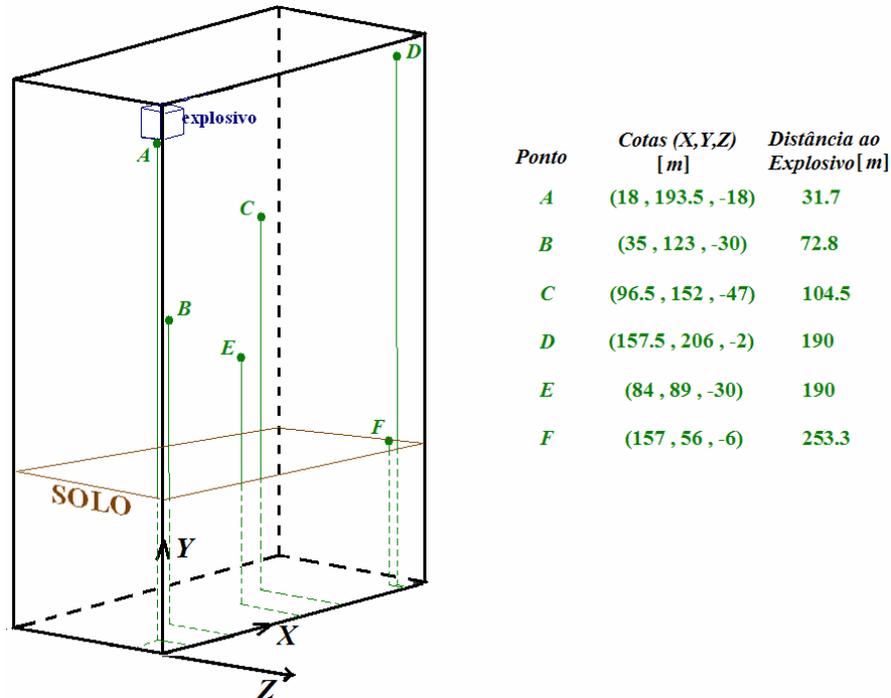


Figura 3.42: Localização dos pontos escolhidos dentro da geometria com suas respectivas distâncias ao explosivo.

A partir daí, observa-se nas Figuras 3.42 a 3.47 os históricos de pressões obtidos para cada ponto listado para diferentes métodos aplicados. Tais figuras apresentam:

- Curvas de pressões para cada ponto apenas com os resultados numéricos (canto superior esquerdo);
- Tabela comparativa entre valores numéricos encontrados nas simulações e outros valores obtidos pelo método simplificado e pelas equações apresentadas por Lees [1996] (canto superior direito);
- Detalhe das curvas de pressões para cada ponto ilustrando ambos os resultados, numéricos (malha Lagrangeana, malha *ALE*) e outros métodos analíticos (Método Simplificado e proposto por Lees [1996] *apud* AICHE [2000]).

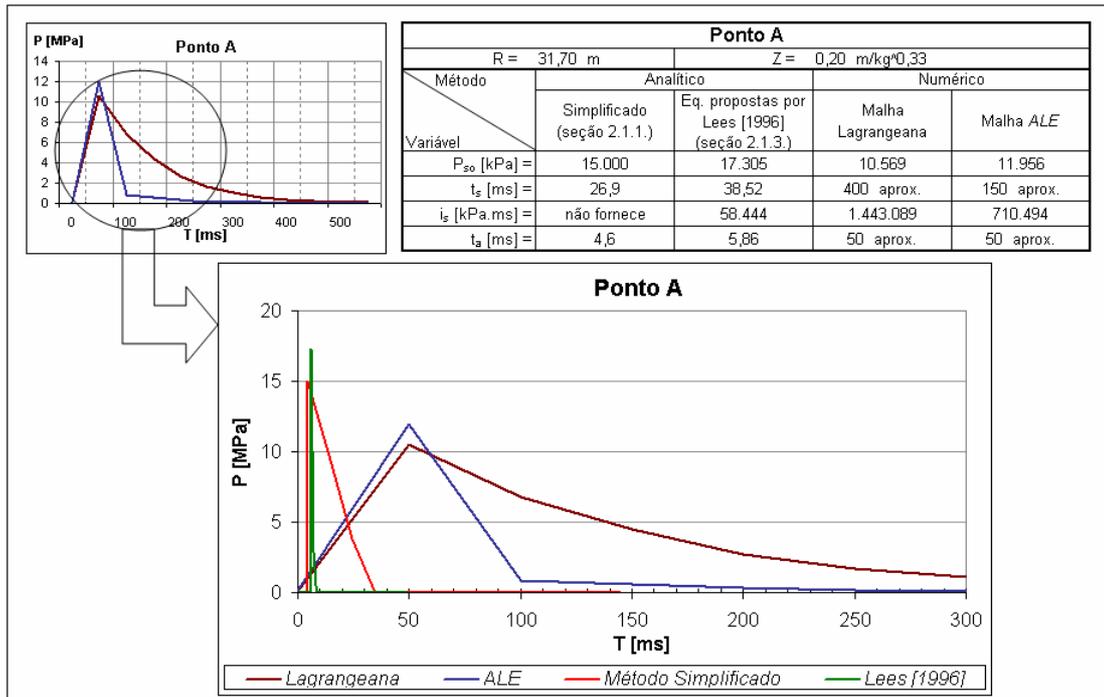


Figura 3.43: Comparativo de pressões geradas para ponto A entre análises numéricas e Métodos analíticos.

Pode-se notar na Figura 3.43 que o valor máximo para os picos de sobrepressão das simulações juntamente com os Métodos analíticos referenciais estão com valores de mesma ordem

Em relação aos valores apresentados na tabela da figura 3.42, assim como nas tabelas das figuras seguintes, pode-se notar que os tempos de chegada da onda e de duração da fase positiva estão indicados como valores aproximados para as respostas numéricas, pois esta análise realizada não permite uma definição exata destes valores e porque alguns parâmetros de entrada da análise numérica ainda devem ser ajustados. Com isto, verifica-se que os tempos de chegada do pico e de decaimento são maiores (aprox. 10 vezes) para os casos numéricos, resultando também em impulsos maiores.

A Figura 3.44 apresenta os resultados a um ponto localizado a 72,80m (Ponto B) do epicentro da explosão. As mesmas observações referentes aos tempos e impulsos gerados nos modelos numéricos servem para este caso, bem como para os seguintes. Observa-se uma grande proximidade entre os resultados analíticos e que, para picos de sobrepressão, os modelos numéricos fornecem valores de mesma ordem.

Para os casos seguintes, Pontos C, D, E e F, observações semelhantes podem ser feitas, mostrando que independentemente da distância, os resultados numéricos estão apresentando resultados satisfatórios.

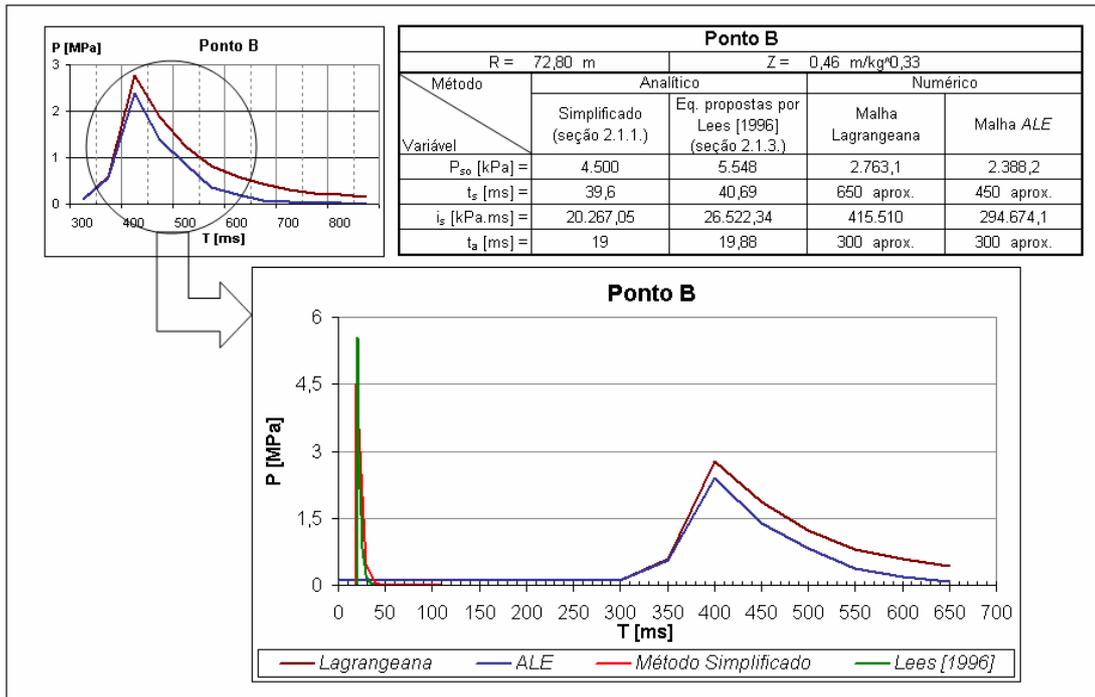


Figura 3.44: Comparativo de pressões geradas para ponto B entre análises numéricas e Métodos analíticos.

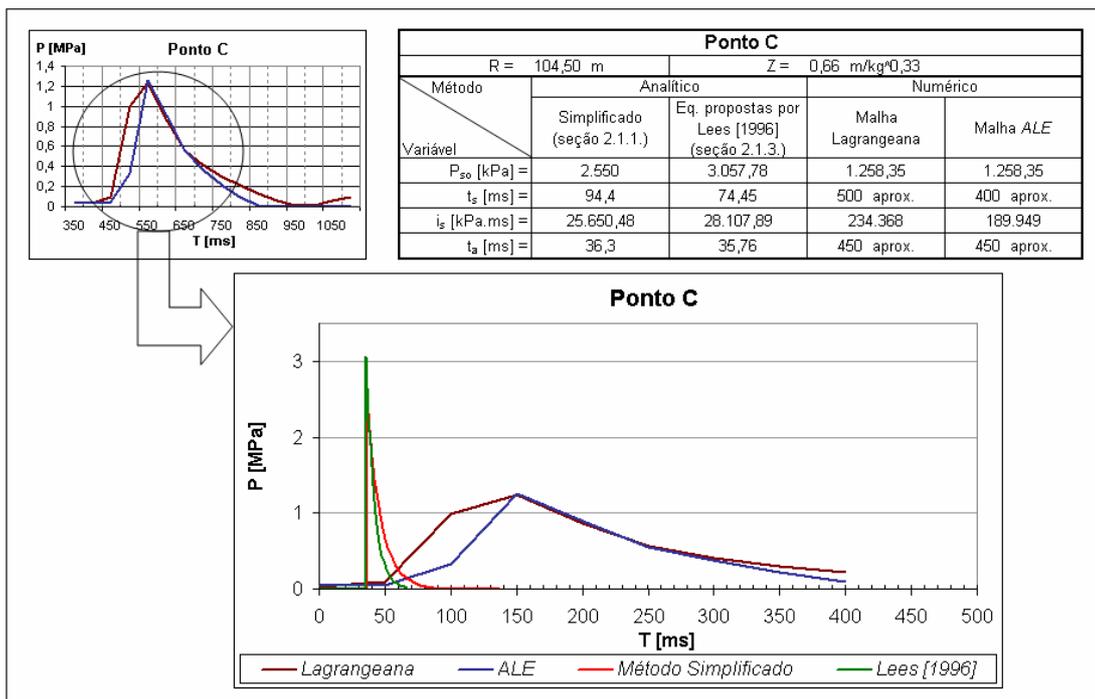


Figura 3.45: Comparativo de pressões geradas para ponto C entre análises numéricas e Métodos analíticos.

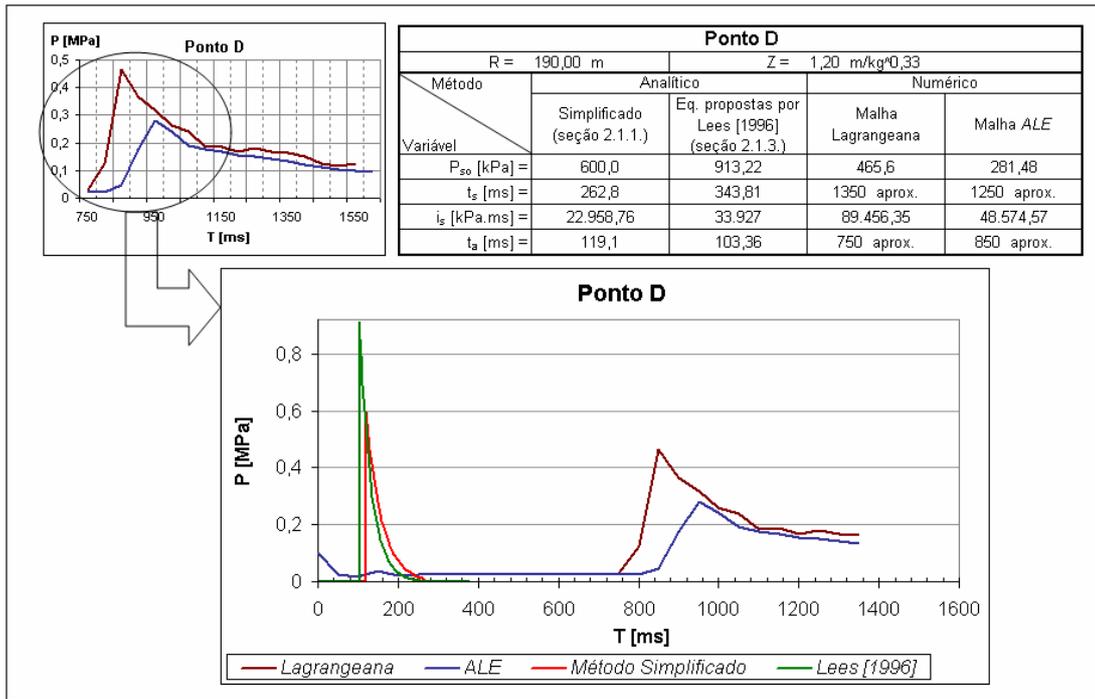


Figura 3.46: Comparativo de pressões geradas para ponto D entre análises numéricas e Métodos analíticos.

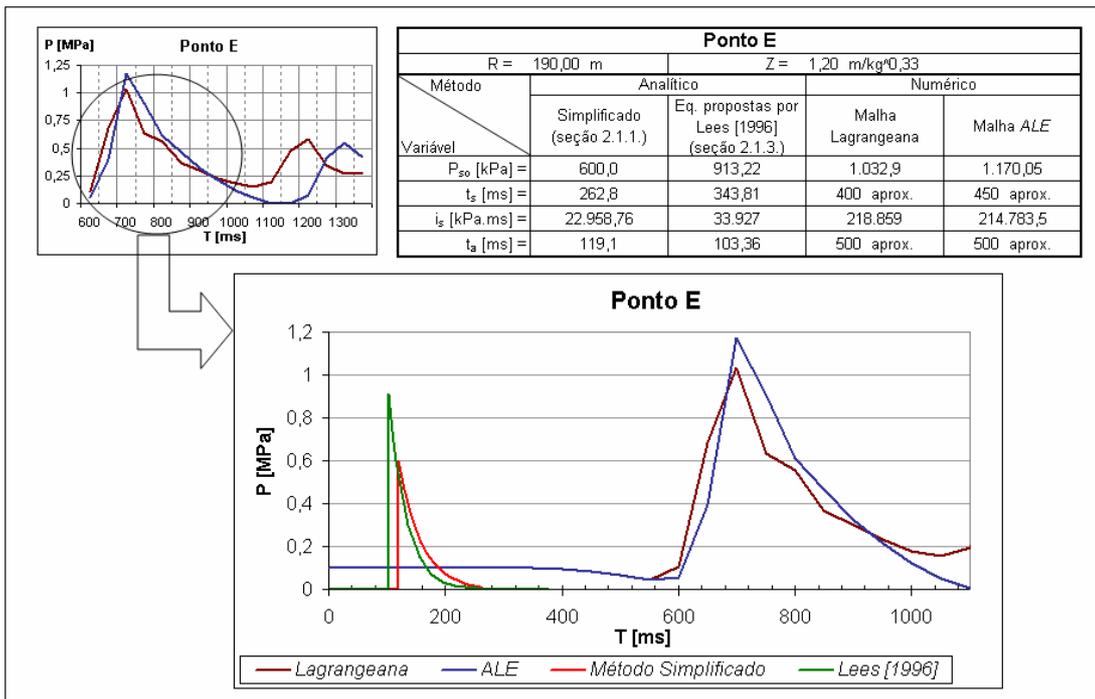


Figura 3.47: Comparativo de pressões geradas para ponto E entre análises numéricas e Métodos analíticos.

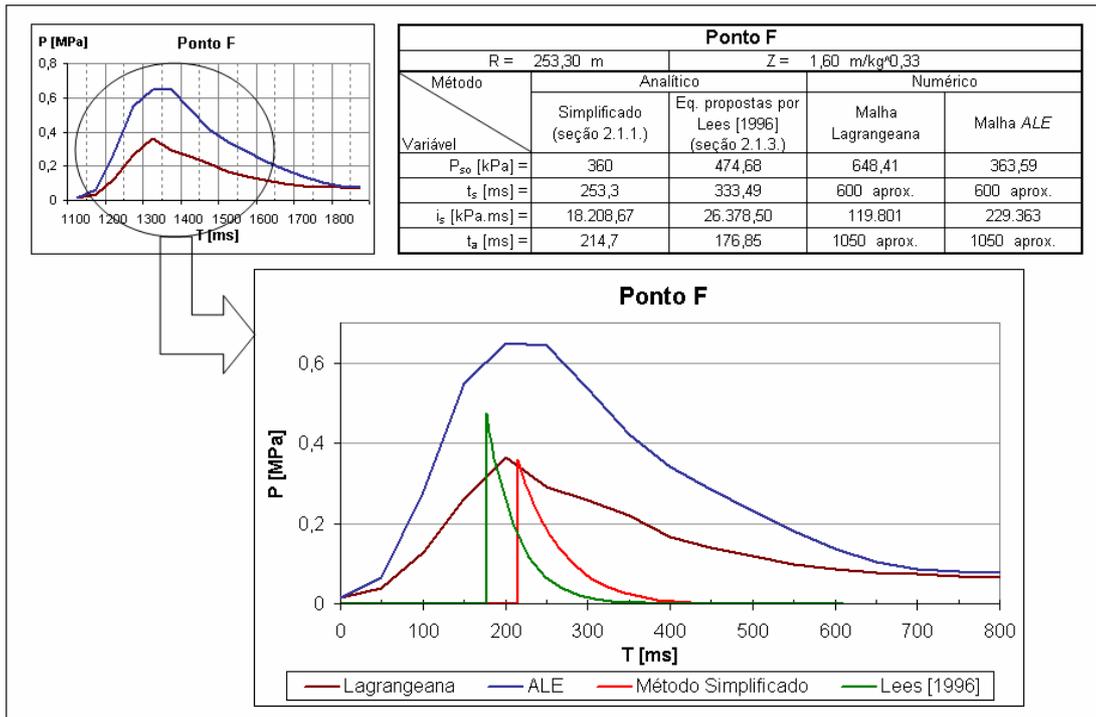


Figura 3.48: Comparativo de pressões geradas para ponto F entre análises numéricas e Métodos analíticos.

Verifica-se que, para maiores distâncias, Pontos D, E e F, alguns efeitos de reflexão da onda no solo já começam a se fazer presentes, acabando por influenciar na forma como a pressão se apresenta nos modelos numéricos. Mesmo assim, as respostas estão próximas dos modelos analíticos, reforçando a idéia de que a aplicação destes modelos pode ser realizada através do MEF.

Observa-se na Figura 3.48 que os valores analíticos e numéricos apresentaram valores da ordem em termos de impulso e pico de sobrepressão entregue pela explosão.

Uma questão importante de reforçar é o aumento da sobrepressão para pequenas distâncias em escala no método proposto por Lees [1996] *apud* AICHe [2000], já comentado na seção 2.1.3 e visualizado na Figura 3.42. Neste sentido, a Figura 3.49 ilustra uma relação entre os picos de sobrepressão (normalizados pelo resultado obtido com o método simplificado) em função da distância em escala, incluindo os valores encontrados nas simulações apresentadas anteriormente.

Analisando os dados verifica-se que há uma distorção muito grande entre os valores quando $0,3 < Z < 8$, apesar de o método estar proposto para um intervalo de Z entre 0,0674 e 40. Observa-se na mesma figura que as equações propostas por Lees [1996] *apud* AICHe [2000] oscilam com uma diferença entre 20% e 60% em relação à resposta apresentada nos ábacos propostos por Baker *et al.* [1983].

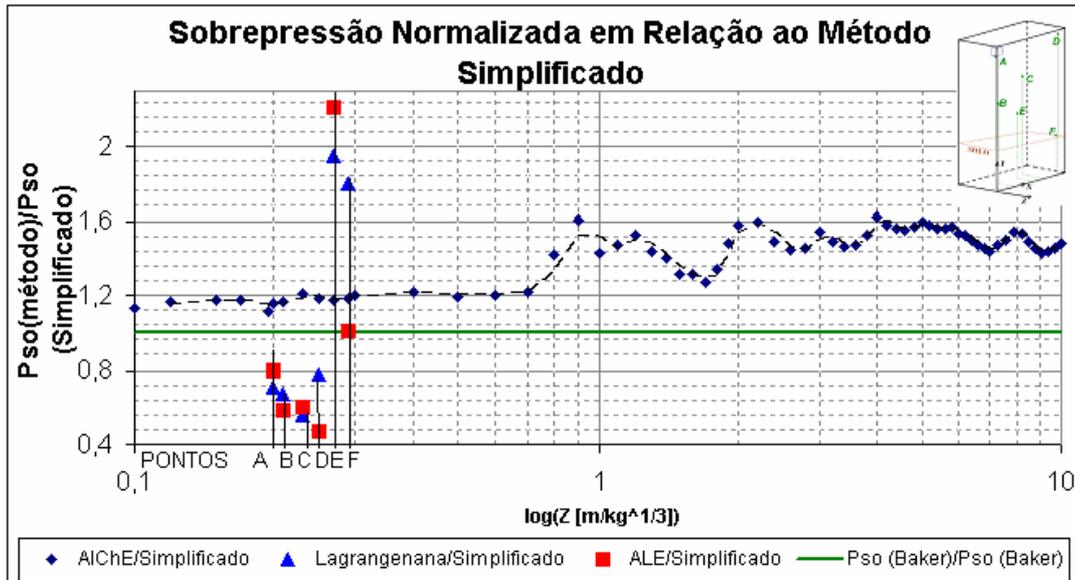


Figura 3.49: Sobrepensões normalizadas em relação ao método simplificado.

3.5.4. CONCLUSÕES PARCIAIS

Com base nas respostas, algumas conclusões podem ser obtidas quanto à aplicação do Método Numérico utilizado para a modelagem completa de explosões:

- Há uma quantidade grande de variáveis envolvidas nesta modelagem e algumas delas devem ser ajustadas. Porém, as respostas obtidas são satisfatórias em vista da proposta deste estudo preliminar que foi mostrar as possibilidades do método. As questões numéricas, Hourglass, *EOS* e os parâmetros determinados no modelo ainda devem ser pesquisados para verificar como cada um destes influencia na obtenção das respostas. Esta questão pode estar fazendo com que os tempos (chegada e decaimento) nas análises numéricas sejam maiores do que nas analíticas, gerando conseqüentemente maiores impulsos;

- O tipo simplificado de volume de controle escolhido é adequado para tal modelagem, principalmente nesta fase de ajuste e aferição do modelo. As condições de contorno aplicadas com elementos infinitos (não reflexivos) foram corretamente definidas e a dupla simetria permitiu a modelagem de apenas $\frac{1}{4}$ da simetria, reduzindo também o número de elementos no modelo;

- A partir destes resultados de pressão nos pontos escolhidos não se pode definir qual formulação (Lagrangeana ou ALE) se aplica melhor para os casos estudados;

- A malha regular com a discretização utilizada foi suficiente para a apresentação dos primeiros resultados. Mesmo assim, uma malha mais refinada seria mais adequada para

representar os três tipos de materiais aplicados. Ao considerar uma malha regular deixa-se de lado a influência da forma da malha nos resultados. O efeito do uso de malhas adaptativas também deve ser estudado;

- Pôde-se observar uma grande deformação nos elementos do material explosivo para a malha Lagrangeana, não vista na outra formulação. Este efeito deverá ser melhor estudado, assim, seus efeitos e conseqüências também serão conhecidos;

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Posteriormente, em outros trabalhos, pretendem-se utilizar o mesmo volume de controle para estudar o efeito na formação de crateras no solo, uma vez acertadas as variáveis envolvidas na modelagem. Nestes casos então, diferentes profundidades/quantidades de explosivos e variações nas propriedades do solo serão aplicadas, a fim de comparar este método numérico com respostas experimentais já conhecidas [Ambrosini *et al.*, 2003] e com outros métodos.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria utilizar esta metodologia aplicada para geometrias mais complexas, oferecendo resultados numéricos a aplicações reais de engenharia.

Basicamente, investigar com mais profundidade as potencialidades do Ls-Dyna [2003] no estudo deste tipo de problemas, daí objetivando respostas reais e, se possível, fazendo comparativos com experimentos que envolvem estes tipos de solicitações para assim, validar os modelos utilizados.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se uma exploração das técnicas numéricas existentes, as quais permitem simular diferentes aspectos relacionados a carregamentos impulsivos enfatizando as explosões, desde a modelagem da solicitação produzida até a resposta de estruturas.

Das aplicações realizadas é possível concluir que os Modelos Numéricos no estado atual do conhecimento, com programas de múltiplos propósitos disponíveis na engenharia e com capacidade numérica limitada (PC's), são ferramentas que podem auxiliar de forma eficaz na modelagem de uma solicitação explosiva e na simulação da resposta das estruturas frente a estes tipos de solicitações. Assim, mostrou-se possível que, através de técnicas numéricas, podem-se obter respostas que auxiliem a resolver problemas de engenharia relacionados tanto com a simulação da excitação produzida por uma explosão quanto na determinação da resposta à solicitação. Cabe salientar, como foi ilustrado nas aplicações, que problemas destes tipos são complexos, razão pela qual os modelos numéricos utilizados devem ser calibrados com ensaios experimentais ou com modelos analíticos mais simples.

Tanto o objetivo geral “Explorar técnicas de análise disponíveis em softwares comerciais de múltiplos propósitos (Ansys, LS-Dyna, etc.) de situações onde se apresentam ações impulsivas ou explosões, desde o evento em si até o efeito sobre uma estrutura ou alvo fazendo aplicação para cinco casos práticos”, quanto os objetivos específicos apresentados na introdução deste trabalho foram cumpridos.

De forma específica, as conclusões parciais obtidas são apresentadas após cada aplicação desenvolvida no Capítulo 3, assim como as sugestões para trabalhos futuros. Entre estes, surgem como prioridades para a continuidade deste trabalho:

-Explorar as potencialidades do programa LS-Dyna [2003] para sua aplicação na modelagem da solicitação e da resposta de estruturas frente a explosões;

-Programar experimentos com explosões para calibrar os modelos numéricos desenvolvidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abeyaratne, R., Knowles, J. K., 2000. “**A Phenomenological Model for Failure Waves in Glass**”, Shock Waves 10: 301-305, Springer Verlag 2000.

Alves Filho, A., 2005. “Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE / Análise Dinâmica”, São Paulo, Ed. Érica, p.301.

AICHE/CCPS (Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineer), 2000, “**Chemical Process Quantitative Risk Analysis**”, New York, New York 10016-5991.

Ambrosini, R. D., Luccioni, B. M., Danesi, R. F., Riera, J. D., Rocha, M. M., 2002. “**Size of Craters Produced by Explosives Charges On or Above the Ground Surface**”, Shock Waves, Springer Verlag 2002.

Ambrosini, R. D., Luccioni, B. M., Danesi, R. F., 2003. “**Craters Produced by Explosions on the Soil Surface**”, Mecánica Computacional Vol. XXII, Bahía Blanca, Argentina.

Ambrosini, R. D., Luccioni, B. M., Danesi, R. F., 2003. “**Influence of the Soil Properties on Craters Produced by Explosions on the Soil Surface**”, Mecánica Computacional Vol. XXII, pp. 571-590, Briloché, Argentina.

Ansys Inc., 2000. “**Ansys Educational Resources – Online Tutorials**”, disponível em: <http://www.ansys.com/education/resources.htm>, acessado em março/2003.

Autoridad Regulatoria Nuclear, 1998. “Efectos de Explosiones y Acciones Mitigantes Aplicables a Estructuras, Sistemas y Componentes de Instalaciones Civiles”, Buenos Aires, Argentina.

Aymone, J. L. F., 2000. “Remanejo de malhas em problemas tridimensionais de grandes deformações”, PPGEC – UFRGS.

Bacci, D. LC., Landim, P. M. B., Eston, S. M., Iramina, W. S., 2003. “Principais Normas e Recomendações Existentes para o Controle de Vibrações Provocadas pelo Uso de Explosivos em Áreas Urbanas – Parte II”, Revista Escola de Minas vol 56 no.2, Ouro Preto.

Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulesz, J. J., Strehlow, R. A., 1983. “**Explosion Hazards and Evaluation – Fundamental Studies in Engineering 5**”, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York.

Bathe, K. J., 1996. “**Finite Element Procedures**”, Prentice Hall – Englewood Cliffs, New Jersey.

Belytschko, T., Hughes, T. J. R., 1983. “**Computational Methods for Transient Analysis**”, Stanford University, California, USA.

Blessmann, J., 1983. “**Aerodinâmica das Construções**”, Porto Alegre, Ed. Da Universidade, UFRGS, p. 254.

Brode, H. L., 1955. “**Numerical Solution of Spherical Blast Waves**”, Journal of Applied Physics n° 6.

Celebi, E., Schmid, G., 2005. “**Investigation of Ground Vibrations Induced by Moving Loads**”, Engineering Structures, vol. 27, p.1981-1998, Elsevier.

Chapman, T. C., Rose, T. A., Smith, P.D., 1995. “**Reflected Blast Wave Resultants Behind Cantilever Walls: A New Prediction Technique**”, International Journal of Impact Engineering, vol.16, p. 397-403, Pergamon.

Chapman, T. C., Rose, T. A., Smith, P.D., 1995. “**Blast Wave Simulation Using AUTODYN2D: A Parametric Study**”, International Journal of Impact Engineering, vol.16, p. 777-787, Pergamon.

Cho, J. R., Song, J. M., Lee, J. K., 2001. “**Finite Element Techniques for the Free-Vibration and Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks**”, Finite Element in Analysis and Design, 37: 467-483, Elsevier.

Clough, R. W., 1993. “**Dynamics of Structures**”, 2nd ed. New York, Mcgraw-Hill, xxii, p.738.

Clutter J. K., Whitney M. G., 2001. “**Use of computational modeling to identify the cause of vapor cloud explosion incidents**”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 14: 337-347, Elsevier.

Cook, D. H., 2005. “**The R. B. Grover & Company Shoe Factory Boiler Explosion**”, no site: www.rootsweb.com/~macbrock/boiler.html acessado em julho/2004.

Das, B. M., 1982. “**Principles of Soil Dynamics**”, El Paso, Texas, 399p.

Dhakal, R.P., Pan, T. C., 2003. “**Response Characteristics of Structures Subjected to Blasting-Induced Ground Motion**”, International Journal of Impact Engineering, vol.28, p. 813-828, Pergamon.

Dowding, C. H., 1985. “**Blast Vibration Monitoring and Control**”. Library of Congress Cataloging in Publication Data.

Evangelista, S.H., 2000. “Diagramas de Limite de Conformação Aplicados à Análise por Elementos Finitos de um Processo de Estampagem em Chapas Metálicas”, Dissertação de Mestrado – USP, São Carlos, p.133.

Groehs A. G., 1999. “**Mecânica Vibratória**”, São Leopoldo: Ed. Unisinos, 650p.

Hanssen, C. A., 2003. “**Proteção Contra Incêndios e Explosões**”, Curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho.

Henrych, J., 1979. “**The Dynamic of Explosion and Its Use**”, Elsevier, Amsterdam.

Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 1995. “**Introduction to the Abaqus / Explicit**”, U.S.A.

Huebner, K., Thornton, E., 1982. “**The Finite Element Method for Engineers**”, 2.ed. New York, John Wiley & Sons.

Hughes, T. J. R., 1987. “**The Finite Element Method**”, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, p.797.

IAEA – International Atomic Energy Agency, 2005. “**External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plants**”, Safety Guide No. NS-G-1.5.

Jacinto, A. C., Ambrosini, R. D., Danesi, R. F., 2001. “**Experimental and Computational Analysis of Plates Under Air Blast Loading**”, International Journal of Impact Engineering, vol.25, p. 927-947, Pergamon.

Jaiswal, O. R., Rai, D., Jain, S. K., 2003, “**Review of Code Provisions on Seismic Analysis of Liquid Storage Tanks**”, IITK-GSDMA-EQ04-V1.0, Project on Building Codes.

Johnson, G. R., Beissel, S. R., 2001. “**Damping Algorithms and Effects for Explicit Dynamics Computations**”, International Journal of Impact Engineering, p. 911-925, Pergamon.

Júnior, Roberto C.P., 2000. “**Vivemos os Últimos Anos do Juízo Final / Incêndios e Explosões**”, no site: www.msantunes.com.br/juizo/incndios.htm, visitado em 21/06/2005.

K-9 Search & Detection, Inc, 2004. “**K-9 Explosive Detection Services**”, no site: www.k9narcotics.com/pages/6/

Kinney G. F. & Graham, K. J., 1985. “**Explosive Shocks in Air**”, 2. ed. Springer-Verlag.

Krauthammer T., Altenberg A., 2000. “**Negative Phase Blast Effects on Glass Panels**”, International Journal of Impact Engineering, vol.24, p. 1-17, Pergamon.

Kury J. W., Breithaupt R. D., Tarver C. M., 1999. “**Detonation waves in trinitrotoluene**”, Shock Waves 9: 227-237, Springer Verlag 1999.

LDEC / UFRGS (Laboratório de Dinâmica Estrutural e Confiabilidade), 2005. “**Ground Vibration Measurements**”, Technical Report.

Leal, C. A., 2003. “**SEG 006 Gerência de Riscos**”, Curso de Especialização de Engenharia de Segurança do Trabalho, Departamento de Engenharia Nuclear, Ufrgs.

Lees, F. P., 1996. “**Loss Prevention in the Process Industries**”, 2. ed. Butterworth-Heinemann.

LS-Dyna, 2003. “**User Manual**”, www.lsdyna.com acessado em 2003.

Manzano, J. A., Manzano, A. L., 2002. “**Estudo Dirigido de Excel 2000 - Avançado**”, São Paulo, Ed. Erica, p.234.

Mercx, P., 1997. “Curso Internacional sobre Avaliação dos Efeitos de Incêndios e Explosões para Análise de Riscos”, Rio de Janeiro, 26 a 28 de maio.

NBR6123, 1988. “**Forças Devidas ao Vento em Edificações**”, ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Sistema Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial.

Pinaev A. V., Kuzavov V. T., Kedrinskii V. K., 2001. “**Focusing of Shock Waves Upon Explosion of Annular Charges in Air**”, Combustion, Explosion and Shock Waves, vol. 37, N.4, p. 461-463.

Ponthot, J. P., 1995. “**Traitement Unifié de La Mécanique des Milieux Continus Solides em Grandes Transformations par la Méthode des Éléments Finis**”.

Protective Design Center, 2005. Unites States Army Corps of Engineers. <https://pdc.usace.army.mil/software>.

Ramajeyathilagam, K., Vendhan, C.P., Rao, V. Bhujanga, 2000. “**Non-linear Transient Dynamic Response of Rectangular Plates under Shock Loading**”, International Journal of Impact Engineering, vol.24, p. 999-1015, Pergamon.

Rao, S., 1989. “**The Finite Element Method in Engineering**”, Oxford, Pergamon Press

Riera, J. D., Iturrioz, I., 2005. “**Numerical Study of the Effect of Explosive sources Near the Ground Surface: Crater Formation**”, Nuclear Engineering and Design, Elsevier.

Riera, J. D., Iturrioz, I., 2005. “**Avalização dos Efeitos de Detonações – Dona Francisca Energética S.A.**”, Laudo Técnico, Faxinal do Soturno, RS.

Rose, T. A., Smith, P. D., 2002. “**Influence of the Principal Geometrical Parameters of Straight City Streets on Positive and Negative Phase Blast Wave Impulses**”, International Journal of Impact Engineering, p.359-376, Pergamon.

Sánchez, C.A.A., 2001. “**Estudo do Impacto Usando Elementos Finitos e Análise não Linear**”, Dissertação de Mestrado – USP, São Carlos, p.115.

Santiago, G. F., 2003. “**Efeitos de Explosão de Nuvem de Vapor Inflamável**”, Dissertação de Mestrado – PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, p.76.

Schleyer, G. K., Hsu, S. S., 2000. “**A Modelling Scheme for Predicting the Response of Elastic-Plastic Structures to Pulse Pressure Loading**”, International Journal of Impact Engineering, p.759-777, Pergamon.

Schneider, P., 1998. “**Predicting Damage of Slender Cylindrical Steel Shells Under Pressure Wave Load**”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol.11, p. 223-228, Elsevier.

Siskind, David E., 2000. “**Vibrations from Blasting**”, International Society of Explosives Engineers (ISEE), 120p.

Slkavounos, S., Rigas, F., 2004. “**Computer Simulation of Shock Waves Transmission in Obstructed Terrains**”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol.17, p. 407-417, Elsevier.

Smith, P. D., Hetherington, J. G., 1994. “**Blast and Ballistic Loading of Structures**”, Butterworth-Heinemann Ltd.

Symonds, P. S., McNamara, J. F., Genna, F., 1986. “**Vibrations and Permanent Displacements of a Pin-Ended Beam Deformed Plastically by Short Pulse Excitation**”, International Journal of Impact Engineering, vol.4, p.73-82, Pergamon.

Tamagna, A., 1985. “**Introdução ao Estudo de Vibrações**”, Apostila da disciplina de Vibrações, Escola de Engenharia da UFRGS, DEMEC.

Tedesco, J., Kostem, C. N., Kalnins, A., 1987. “**Free Vibration Analysis of Cylindrical Liquid Storage Tanks**” – Computers & Structures, Vol. 26, n6, pp 957-964.

TNO, 1997. “Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Materials (Liquids and Gases) – Part II”, Yellow Book, 3^a ed.

Uenishi, K., Rossmannith, H. P., 1998. “**The Relation Between Stress and Particle Velocity for Rayleigh Pulses**”, Acta Mechanica, no.131 (3-4), pp.247-253, Institute of Mechanics, Vienna University of Technology.

Unep – Apell, 2005. Production and Consumption Branch, Disasters by Location, site: www.uneptie.org/pc/apell/disasters/lists/disasterloc.html, visitado em 03/04/2006.

Waarts, P. H., Wit, M. S., 2004. “**Does More Sophisticated Modeling Reduce Model Uncertainty? A Case Study on Vibration Predictions**”, TNO Building and Construction Research, Delf, The Netherlands, Heron, vol.49, No. 2.

Wall, J., 1978. “**Blast Loading on a Spherical Storage Vessel**”, An Investigation of Potential Hazards From Operations in the Canvey Island / Thurock Area, Apendix 21, p.184-187.

Zaslavskii, B. I., Shegel, V. R., Morozkin, S. Yu, Denisov, N. N., 2001. “**Force Action of a Shock Wave on a Solid Body**”, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, vol.42, No.3, pp. 533-537.

Zienkiewicz, O.C., 1982. “**El Método de los Elementos Finitos**”, Editorial Reverté S.A., Barcelona, Espanha, p.903.

APÊNDICE I – Diferentes Equações de PROBIT

Estas equações são utilizadas em casos de fatalidades ou grandes hemorragias, devido aos danos diretos de explosões, sendo:

$$Y = -77.1 + 6.91 \ln(P_0) \quad (38)$$

Como citado por Leal [2003], as equações para ruptura de tímpanos, danos estruturais e quebra de vidros, respectivamente são:

$$Y = -12.6 + 1.524 \ln(P_0) \quad (39)$$

$$Y = -23.8 + 2.92 \ln(P_0) \quad (40)$$

$$Y = -18.1 + 2.79 \ln(P_0) \quad (41)$$

Onde a pressão (P_0) está fornecida em unidades do SI [N/m^2].

Por serem essas equações relacionadas a análises probabilísticas, seus resultados devem ser transformados em tabelas de relação Y-P, para assim obter a probabilidade de o dano acontecer em determinada população, conforme Tabela I.1. A sua leitura é simples, bastando encontrar o valor de Y da equação ou interpolar entre os dois mais próximos da tabela e verificar a porcentagem equivalente na primeira coluna somada a primeira linha, resultando assim a probabilidade do evento acontecer.

Tabela I.1: Tabela de transformação de PROBIT em porcentagem [Leal,2003].

Relacao y-P										
%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
-	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

APÊNDICE II - Ábacos apresentados por Baker *et al.* [1983]

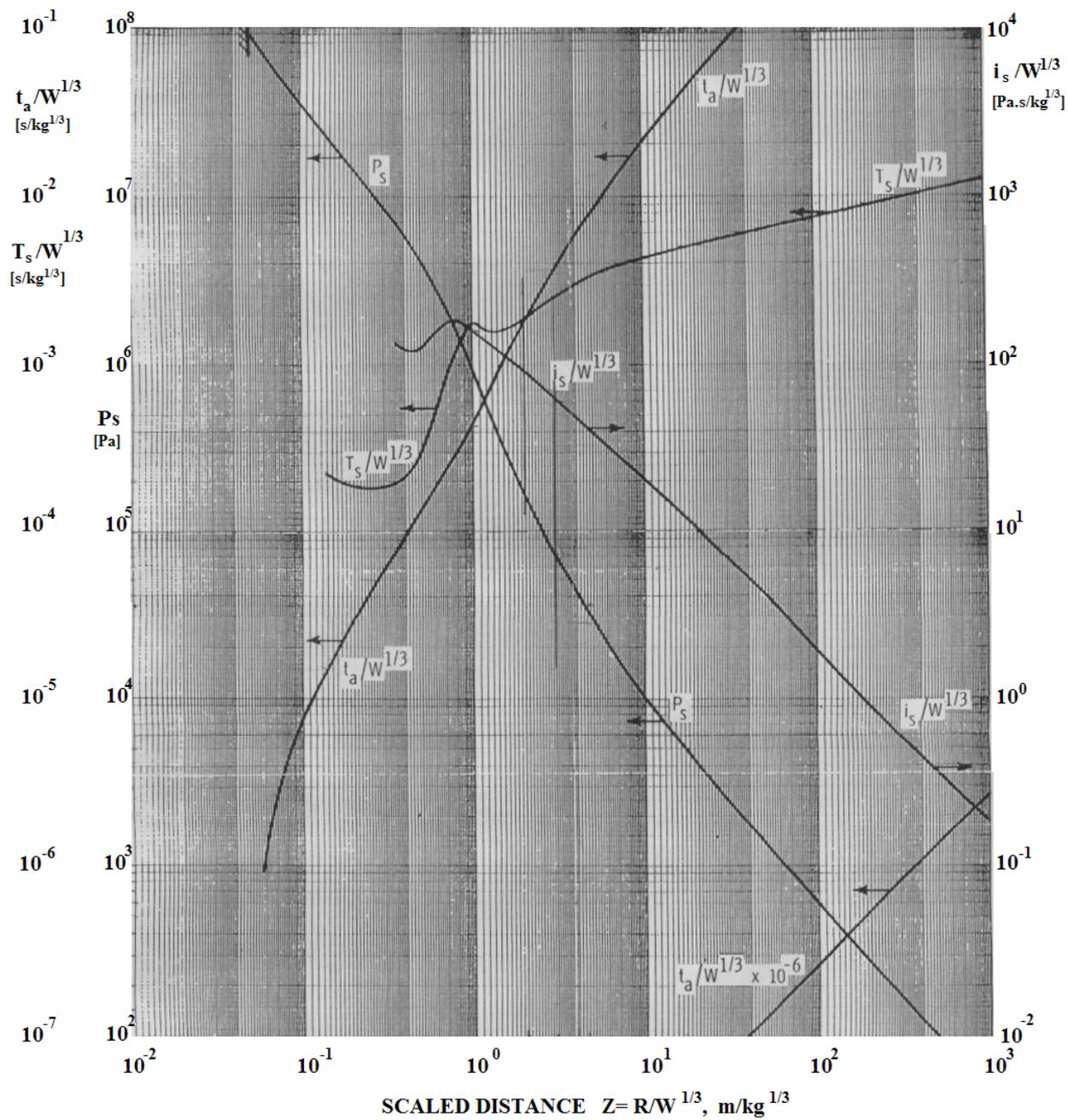


Figura II. 1: Parâmetros de Explosões para TNT.

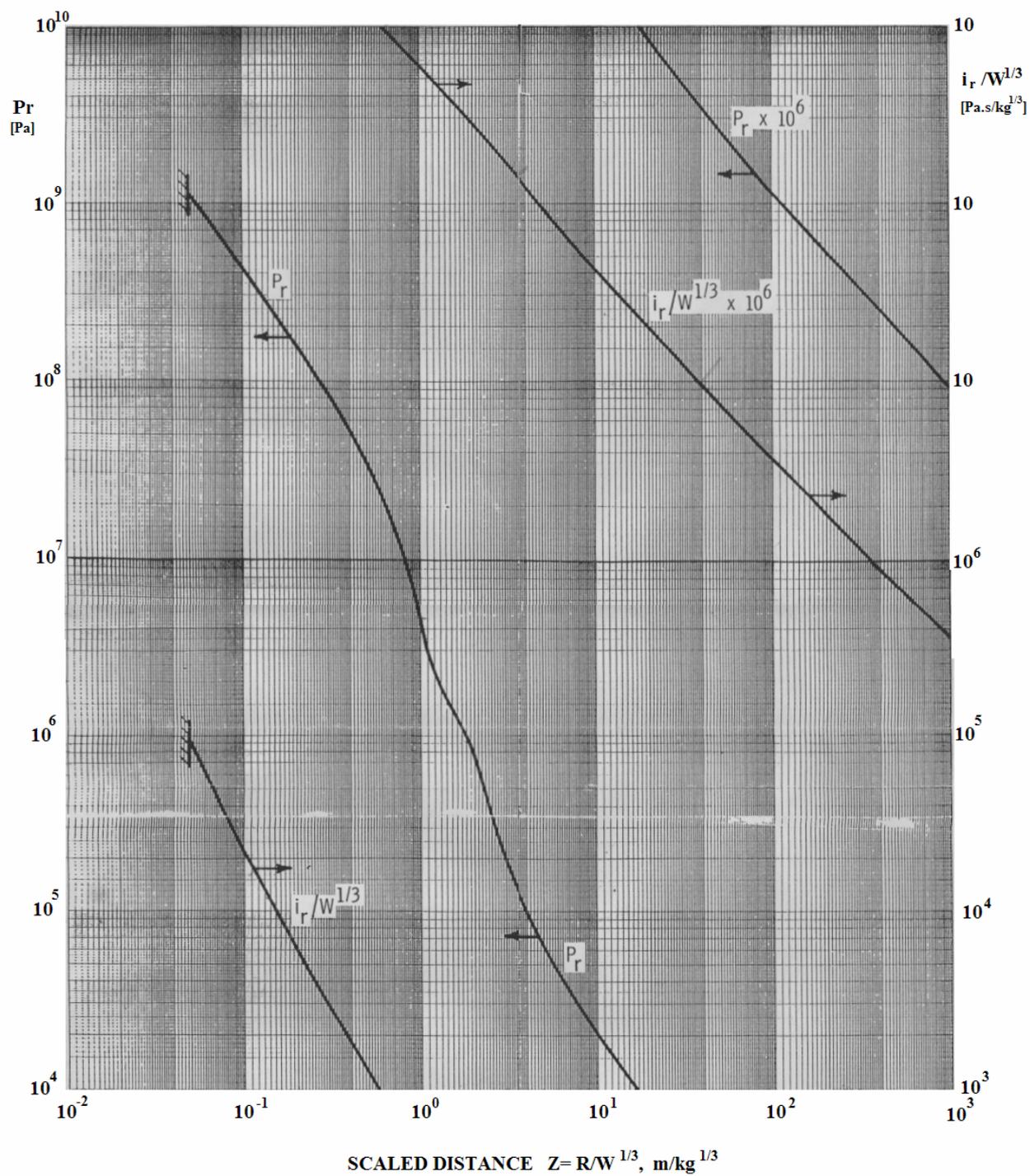


Figura II. 3: Parâmetros de Explosões Refletidas Normalizados para TNT.

APÊNDICE III - Valores obtidos para aplicação de pressões em esfera de GLP

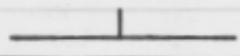
Tabela III. 1: Pressões levantadas pelo Método Multienergia para uma esfera de GLP a 50m da borda de um hortoflorestal.

Horto a distância de 50m da borda da esfera									
Tempo		0 ms	25 ms	50 ms	75 ms	100 ms	125 ms	150 ms	175 ms
Fatía selecionada [m]		Pressão aplicada [Pa]							
-7,25	-6,75	31220	117800	113690	74100	37450	16510	4932	1117
-6,75	-6,25	0	116900	135900	73680	37300	16490	4967	1064
-6,25	-5,75	0	116000	135000	73270	37150	16470	5002	1012
-5,75	-5,25	0	115100	134000	72860	37010	16450	5036	961
-5,25	-4,75	0	110900	129300	70400	35810	15960	4925	884
-4,75	-4,25	0	110180	118800	64750	32990	14740	4585	773
-4,25	-3,75	0	93360	109100	59510	30380	13610	4264	674
-3,75	-3,25	0	85460	99940	54600	27910	12540	3958	504
-3,25	-2,75	0	77980	91280	49930	25570	11520	3661	431
-2,75	-2,25	0	70840	83010	45460	23320	10530	3371	365
-2,25	-1,75	0	63980	75050	41150	21140	9570	3085	305
-1,75	-1,25	0	57360	67340	36970	19020	8633	2802	251
-1,25	-0,75	0	50920	59840	32890	16950	7712	2520	203
-0,75	-0,25	0	44640	52510	28900	14910	6803	2238	159
-0,25	0,25	0	36440	42670	23940	12540	5790	1928	142
0,25	0,75	0	34180	39820	22810	12140	5671	1912	126
0,75	1,25	0	33940	39570	22690	12090	5663	1921	111
1,25	1,75	0	33700	39330	22570	12050	5653	1929	96
1,75	2,25	0	33460	39090	22450	12000	5644	1938	82
2,25	2,75	0	33230	38850	22340	11960	5635	1946	67
2,75	3,25	0	32990	38610	22220	11910	5624	1954	53
3,25	3,75	0	32760	38370	22110	11860	5616	1962	39
3,75	4,25	0	32540	38140	21990	11820	5606	1969	25
4,25	4,75	0	32310	37910	21880	11770	5596	1977	11
4,75	5,25	0	32090	37680	21770	11730	5587	1984	1
5,25	5,75	0	31870	37450	21650	11680	5577	1991	0
5,75	6,25	0	31650	37220	21540	11640	5566	1998	0
6,25	6,75	0	31430	37000	21430	11590	5556	2004	0
6,75	7,25	0	31220	36780	21320	11550	5546	2011	0

Tabela III. 2: Pressões levantadas pelo Método Multienergia para uma esfera de GLP a 100m da borda de um hortoflorestal.

Horto a distância de 100m da borda da esfera								
Tempo	0 ms	25 ms	50 ms	75 ms	100 ms	125 ms	150 ms	175 ms
Fatia selecionada [m]	Pressão aplicada [Pa]							
-7,25 - -6,75	17010	58980	73930	44100	25170	13320	6055	1741
-6,75 - -6,25	0	58620	73520	43890	25070	13280	6052	1754
-6,25 - -5,75	0	58270	73120	43680	24970	13250	6048	1766
-5,75 - -5,25	0	57920	72730	43480	24880	13210	6045	1778
-5,25 - -4,75	0	55940	70280	42040	24080	12800	5870	1739
-4,75 - -4,25	0	51440	64650	38700	22180	11810	5426	1619
-4,25 - -3,75	0	47260	59440	35610	20430	10890	5012	1506
-3,75 - -3,25	0	43340	54540	32700	18770	10020	4621	1398
-3,25 - -2,75	0	39620	49890	29930	17200	9186	4247	1293
-2,75 - -2,25	0	36060	45430	27270	15680	8387	3886	1191
-2,25 - -1,75	0	32630	41130	24710	14220	7614	3534	1091
-1,75 - -1,25	0	29310	36960	22220	12800	6860	3191	990,9
-1,25 - -0,75	0	26070	32890	19790	11410	6120	2852	891,5
-0,75 - -0,25	0	22890	28900	17400	10040	5392	2518	791,8
-0,25 - 0,25	0	19060	23950	14590	8491	4592	2157	684
0,25 - 0,75	0	18260	22820	14070	8266	4501	2126	679,9
0,75 - 1,25	0	18160	22700	14010	8235	4489	2124	683,4
1,25 - 1,75	0	18060	22590	13940	8204	4477	2122	686,8
1,75 - 2,25	0	17960	22480	13880	8174	4465	2121	690,2
2,25 - 2,75	0	17860	22370	13820	8143	4453	2119	693,4
2,75 - 3,25	0	17770	22260	13760	8113	4441	2117	696,7
3,25 - 3,75	0	17670	22140	13700	8083	4429	2115	699,9
3,75 - 4,25	0	17570	22040	13640	8053	4417	2113	703
4,25 - 4,75	0	17480	21930	13580	8023	4405	2111	706,1
4,75 - 5,25	0	17380	21820	13520	7994	4393	2109	709,1
5,25 - 5,75	0	17290	21710	13460	7964	4381	2107	712
5,75 - 6,25	0	17190	21610	13400	7935	4369	2105	714,9
6,25 - 6,75	0	17100	21500	13340	7905	4357	2102	717,8
6,75 - 7,25	0	17010	21390	13290	7876	4345	2100	720,6

APÊNDICE IV - Coeficientes Cd

BODIES OF REVOLUTION		C_d	CIRCULAR PLATE		C_d
SPHERE		0.10	CIRCULAR PLATE		1.17
HALF SPHERE		0.42	60° CONE		0.5
HALF SPHERE		1.42			
STRUCTURAL SHAPES (LONG MEMBERS WITHOUT END EFFECTS)					
	C_d 2.0		C_d 1.8		C_d 1.55
	C_d 2.0		C_d 1.45		C_d 2.0
	C_d 1.65		C_d 2.2		C_d 2.0
	C_d 2.05		C_d 1.2		C_d 1.55
	C_d 2.0		C_d 2.3		C_d 1.05
	C_d 1.2		C_d 1.2		C_d 1.54
PROTUBERANCES (WITHOUT END EFFECTS)					
	C_d 0.80		C_d 1.03		
	C_d 1.20		C_d 1.00		
	C_d 1.25		C_d 1.28		

* Flow direction from left to right. For high Reynolds numbers.

Figura IV. 1: Coeficientes de Arrasto apresentados por Kinney e Graham [1985].

APÊNDICE V - Vasos e Esferas de Armazenamento: Alguns Valores Limites

Schneider (1998) construiu um diagrama que relaciona pressão vs. impulso o qual possibilita a determinação do grau de danos para casos de explosões externas sobre vasos de pressão verticais cilíndricos em plantas industriais, não levando em conta as não linearidades físicas e geométricas e com deformações máximas de 0.3%.

Para o caso de esferas de armazenamento de gás, suportadas por colunas verticais e suas diagonais de reforço, Wall (1978) cita que para que não haja falha estrutural, a esfera não pode sofrer deslocamentos horizontais maiores do que 5-6 *cm*. Rupturas de ditos braços levam a estruturas a se tornarem sistemas mais flexíveis, causando maiores deslocamentos, e podem induzir a ruptura das colunas, parafusos de fixação etc.

APÊNDICE VI -Velocidade de Partícula

A propagação das ondas e sua interação com as estruturas geram danos que estão relacionadas com a *intensidade* da excitação e com as características da construção.

Riera e Iturrioz [2005] comentam que o problema é extremamente complexo, já que fatores como a duração do movimento ou o seu espectro de frequência, que afetam o desempenho das construções, não são de fácil previsão.

No caso específico de explosões em áreas urbanas, a medida que tem dado melhor correlação na avaliação de possíveis danos às estruturas é a denominada *Velocidade Máxima de Partícula (PPV)* [Bacci *et al.*, 2003]. É também importante salientar que o valor de *PPV* não caracteriza completamente a vibração, já que não fornece informação sobre fatores relevantes da excitação, por exemplo, a duração da mesma [Riera e Iturrioz, 2005].

Na realidade, o *PPV* é um parâmetro largamente utilizado para quantificar a movimentação apresentada em um ponto do solo, na direção resultante da medição de 3 eixos ortogonais, medido em termos de velocidade (mm/s). Uenishi e Rossmannith [1998] apresentam equações que relacionam o *PPV* com tensões encontradas no solo para ondas de Rayleigh, mostrando ser este um parâmetro simples, mas viável para uma boa caracterização da vibração.

Bacci *et al.* [2003] apresentam valores definidos de *PPV* por algumas Normas (Brasileiras, Australiana, Indiana, Americana e Alemã) para caracterizar danos às diversas estruturas, citando que em algumas, a frequência de vibração também deve ser levada em conta.

APÊNDICE VII -Vibrações

VII.1. REVISÃO DE ALGUNS CONCEITOS

Uma breve revisão do estudo das vibrações é necessária para dar continuidade aos trabalhos relacionados à modelagem numérica de explosões e seus efeitos sobre as estruturas, que se pretende desenvolver ao longo dos próximos capítulos.

É possível entender as estruturas como sistemas submetidos às excitações, sendo que as mesmas reagem através de uma resposta (a). A excitação pode ser definida em termos de carregamentos, deslocamentos prescritos, velocidades impostas, etc. De maneira semelhante, a resposta pode ser medida em termos de deslocamentos, deformações, esforços, tensões, etc., como estão representados na (b).

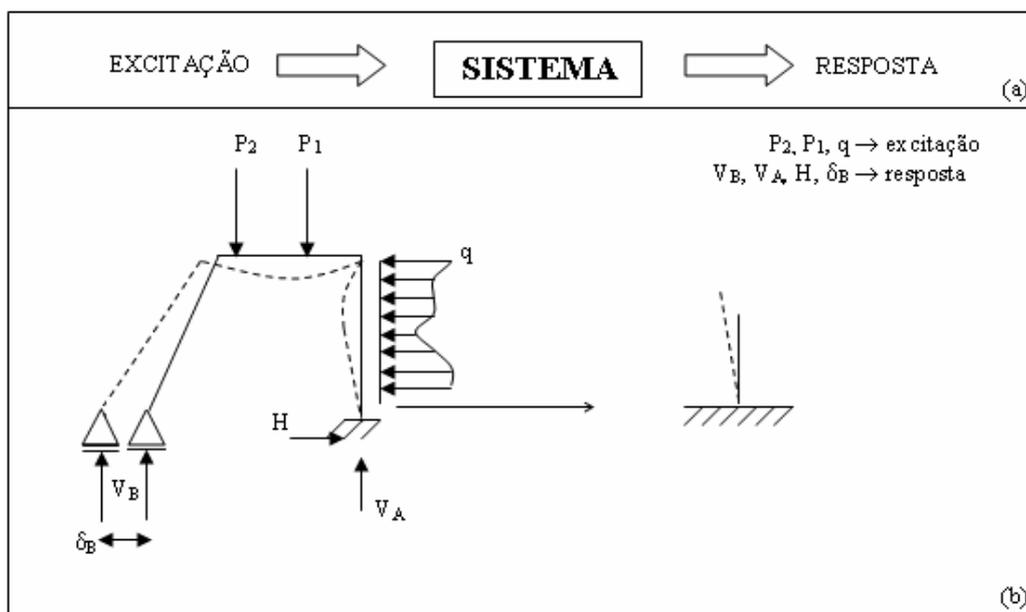


Figura VII. 1: Diagrama de blocos excitação, sistema, resposta (a); Exemplo de sistema estrutural (b).

São duas as formas gerais de consideração do movimento vibratório da estrutura: as vibrações livres (sem forças externas), e as vibrações forçadas. Estas podem ser subdivididas em estáticas ou dinâmicas, em função da forma como se apresentam ao longo do tempo.

- Excitação dinâmica: Quando a mesma muda de grandeza e/ou sentido no tempo. Diversos tipos podem ser citados tais como cargas cíclicas ou periódicas, cargas impulsivas e carregamentos aleatórios.
- Excitação estática: Quando a mesma não muda no tempo, ou é aplicada tão lentamente que em cada instante, pode ser considerada estática.

Para saber se uma excitação é dinâmica ou estática, sua variação no tempo deve ser comparada com os períodos nos quais a estrutura tem tendência natural de vibrar, sendo sua propriedade intrínseca. Basicamente, pode-se definir como sendo um problema dinâmico aquele onde houver forças de inércia presentes. Não tem sentido falar em forma genérica de excitações estáticas ou dinâmicas sem conhecimento do tipo de sistema aos quais estão sendo aplicadas.

A caracterização de como uma estrutura tende a vibrar não depende das excitações ou dos estados de carregamentos aplicados (para os sistemas lineares), estando relacionada apenas com a geometria e com os materiais próprios da estrutura. Desta forma definem-se as chamadas propriedades dinâmicas as quais são inerentes aos sistemas, assim como o Módulo de Elasticidade e a densidade são propriedades mecânicas.

No caso de sistemas não lineares, tais propriedades vão modificando seus valores quando um carregamento é aplicado, pois a rigidez é alterada para diferentes níveis de carga. Segue-se uma breve descrição das mesmas:

- Frequências naturais de vibração: valores das frequências nos quais a estrutura estudada tem tendência a vibrar. Existem tantas frequências quantos graus de liberdade para cada estrutura;
- Modos ou formas de vibração associadas às frequências: definem a forma de vibração da estrutura em cada frequência natural. O número de modos está diretamente relacionado ao número de frequências naturais;
- Amortecimento: característica dos sistemas que diminui as respostas através da dissipação de energia para condições externas e internas de carregamento.

É importante conhecer estas propriedades citadas para cada estrutura, pois através delas pode-se prever a existência ou não de uma resposta dinâmica. No caso de excitações periódicas, poderá ocorrer o fenômeno chamado ressonância, onde a resposta da estrutura é amplificada podendo mudar as suas características mecânicas, produzindo sua plastificação ou colapso. O amortecimento tem grande influência na atenuação deste fenômeno, sendo um artifício muito utilizado para minimizar tal efeito.

VII.1.1. EQUAÇÃO DO MOVIMENTO

As equações de equilíbrio em um sistema dinâmico são estabelecidas segundo expressões da segunda lei de Newton. Esta estabelece que a derivada com relação ao tempo da quantidade de movimento de uma massa é igual ao somatório de forças externas que agem sobre a massa.

$$f = \frac{d}{dt} \left(m \frac{du}{dt} \right) \rightarrow f = m \ddot{u} \quad (42)$$

Esta equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$f - m \ddot{u} = 0 \quad (43)$$

Segundo o princípio de D'Alambert, nesta equação, o termo negativo é interpretado como força de inércia que resiste à aceleração da massa, explicitando a idéia de que esta desenvolve uma força de inércia proporcional à sua aceleração e oposta à força aplicada. Dentro desta abordagem, pode-se dizer que as equações de movimento podem ser expressas em termos de Equilíbrio Dinâmico, podendo ser obtidas a partir das Equações de Equilíbrio Estático.

No caso de um sistema de apenas um grau de liberdade (1GDL), a equação de movimento do sistema pode ser vista em Rao [1989]:

$$f(t) - ku - c\dot{u} - m\ddot{u} = 0 \rightarrow (\sum \text{Forças} = 0) \quad (44)$$

onde ku representam as forças elásticas, $c\dot{u}$ as forças dissipativas que se consideram viscosas (poderia haver outros tipos de forças) e $m\ddot{u}$ as forças de inércia citadas.

Se o sistema possuir N graus de liberdade, os coeficientes passarão a representar matrizes com o tamanho do número de graus de liberdade utilizado, e equação de movimento ficará da seguinte forma.

$$[k]u + [c]\dot{u} + [m]\ddot{u} = [F(t)] \quad (45)$$

Onde $[k], [c], [m]$ = representam respectivamente a matriz de rigidez, de amortecimento e de massa;
 u, \dot{u}, \ddot{u} = representam a posição, velocidade e aceleração respectivamente.

VII.1.2. PROPRIEDADES DINÂMICAS DE UM SISTEMA

Para entender melhor os conceitos básicos das propriedades dinâmicas, é analisado a seguir um modelo de 1GDL, formado por uma massa M e uma mola de rigidez K , como ilustrado na Figura VII. 2.

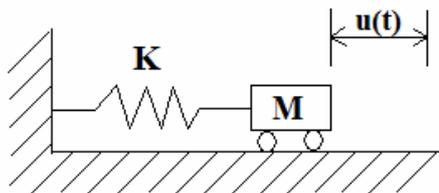


Figura VII. 2: Representação simplificada de um modelo massa mola sem amortecimento.

VII.1.3. FREQUÊNCIAS NATURAIS

Para representar este sistema massa-mola em forma de equação, considerando não haver forças externas nem dissipativas e sendo a massa e rigidez constantes, tem-se a equação (46):

$$ku + m\ddot{u} = 0 \quad (46)$$

Admite-se que a solução geral possa ser escrita assim:

$$u(t) = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) + B \cdot \text{cos}(\omega \cdot t) \quad (47)$$

Operando matematicamente a partir das condições iniciais pode-se encontrar a equação da frequência circular natural ω .

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (48)$$

Onde ω deve ser expresso em *rad/unidade de tempo*. A frequência natural (f_r) em *ciclos/unidade de tempo* é

$$f_r = \frac{\omega}{2\pi} \quad (49)$$

Das equações (48) e (49), verifica-se que com o aumento da rigidez do sistema há um acréscimo da frequência natural e, em contrapartida, um aumento da massa provoca uma queda da frequência natural.

No caso de aplicações do campo de engenharia, para análises dinâmicas de estruturas, procura-se distanciar os valores de frequências de solicitação com os das naturais, para evitar o fenômeno da ressonância.

Uma forma de solucionar este problema é modificar as frequências naturais dos sistemas. Este conceito leva muitas vezes à utilização de outros tipos de materiais, com propriedades que tornam possíveis também economicamente tais estruturas. Isto porque ambas as propriedades definidas (k , m) são dependentes da geometria, onde basicamente, são funções da área da seção transversal basicamente.

Para mostrar esta relação, um exemplo com cinco seções transversais diferentes está montado na Tabela VII.1. Utilizam-se expressões retiradas de Rao [1989] para os cálculos de frequências naturais (torção e flexão) para uma viga em balanço de comprimento fixo.

Tabela VII. 1: Exemplo para seções comuns de relação entre “ ω ” e “ m ” para uma viga simplesmente engastada.

Para viga engastada-livre								
Exemplo	Tipo de Seção Transversal	Massa	$K = \frac{3EI}{L^3}$	ω (modo 1 torção)	ω (modo 1 flexão)	Dimensão "a" [unid]	Dimensão "b" [unid]	
1	 seção quadrada	(1)	25	156,25	1,41	5,08	5	-
		(2)	100	2500	2,81	10,16	10	-
		(2)/(1)	4	16	2	2	2	0
2	 seção retangular	(1)	60	3375	4,22	15,24	4	15
		(2)	240	96000	11,25	40,65	6	40
		(2)/(1)	4	28,44	2,67	2,67	1,5	2,67
3	 seção tubular	(1)	126,45	4362,09	3,30	11,94	15	8
		(2)	506,58	62706,09	6,26	22,61	29	14
		(2)/(1)	4,0062	14,38	1,89	1,89	1,5	1,75
4	 seção redonda	(1)	706,86	75937,50	5,83	21,06	30	-
		(2)	2827,43	1215000	11,66	42,13	60	-
		(2)/(1)	4	16	2	2	2	-
5	 Perfil I	(1)	360	254349,60	14,95	54,02	3	40
		(2)	1449	3074435,07	25,91	93,61	7	69
		(2)/(1)	4,025	12,09	1,73	1,73	2,33	1,73

Para cada exemplo, uma duplicação da frequência natural exige um aumento da área transversal e, conseqüentemente, da massa, em torno de quatro vezes, mantendo-se o mesmo material.

Na prática, este aumento de massa nas estruturas com intuito de elevar as frequências naturais é oneroso e muitas vezes inviável. Outros tipos de soluções acabam sendo tomados para driblar estes problemas dinâmicos, como diminuir comprimentos de vigas, trocar material ou aumentar amortecimento das estruturas.

VII.1.4. AMORTECIMENTO

Outra propriedade inerente aos sistemas mecânicos é o amortecimento, já previamente definido. Tamagna [1985] cita diferentes tipos de amortecimento com algumas características básicas, sendo:

- Amortecimento Viscoso (Newton): quando a força de amortecimento é proporcional à velocidade;
- Amortecimento Histerético (ou Estrutural): quando é causado pela fricção interna de um corpo que é deformado;
- Amortecimento de Coulomb: quando é uma força constante que atua no sentido oposto à velocidade.

Todos os sistemas reais apresentam amortecimento nos seus comportamentos dinâmicos, por menores que sejam seus valores. Na modelagem de estruturas, por exemplo, costuma-se

utilizar amortecimento viscoso por questões de simplicidade numérica, apesar de não ser o tipo observado na realidade [Alves Filho, 2005].

Considerando que o amortecimento é do tipo viscoso, o mesmo pode ser visualizado no decaimento da envolvente dos deslocamentos apresentados por um corpo em vibrações livres (Figura VII.3) Costuma-se definir o mesmo através de um número adimensional chamado de razão de amortecimento (ξ).

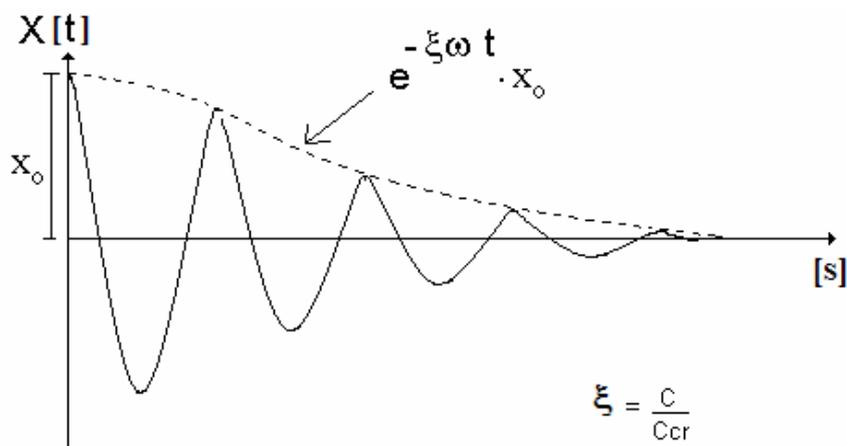


Figura VII. 3: Exemplo de deslocamento de uma massa em função do tempo em vibração livre.

Surge então um outro conceito, o amortecimento crítico (C_{cr}), sendo na verdade o menor valor de amortecimento para o qual um sistema, quando tirado do equilíbrio e livre de forças externas, não apresenta oscilação ao voltar para o mesmo ($\xi = 1$ da Figura VII. 4). Matematicamente, definiu-se C_{cr} conforme a equação (50):

$$C_{cr} = 2m\omega = \frac{2k}{\omega} \quad (50)$$

Definida a situação crítica, exemplificam-se os outros dois estados de amortecimento: subcrítico e supercrítico. Considerando-se então as mesmas condições iniciais, pode-se ver na Figura VII. 4 uma comparação entre estes amortecimentos.

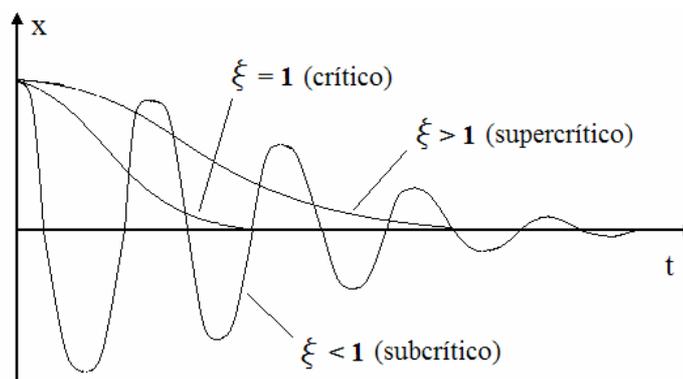


Figura VII. 4: Comparativo entre os três estados de amortecimentos: Subcrítico, Crítico e Supercrítico.

Primeiramente, verifica-se que o amortecimento crítico representa o menor tempo para o equilíbrio do sistema, bem como um maior tempo para o subcrítico.

Nas aplicações reais modifica-se o amortecimento nas estruturas, para se dissipar as oscilações causadas por excitações dinâmicas.

VII.1.5. IMPORTÂNCIA DA FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO

Dado um sistema como o da Figura VII.5 (a), dois tipos de excitação podem ser identificados:

- Aqueles em que a variação da excitação acontece em períodos de tempo (T_e) muito maiores que o período fundamental de vibração do sistema T_n (correspondente ao primeiro modo de vibração) conforme Figura VII. 5(b) e (c). Neste caso pode-se considerar a excitação como quase-estática, não sendo necessário levar em conta a variação no tempo do problema.
- Aqueles em que as variações das ações ocorrem em tempos próximos ao maior período fundamental da estrutura, conforme Figura VII. 5(d) e (e). Em tais casos, as respostas são geralmente defasadas da excitação, e diferem dos resultados estáticos causados pelo valor máximo da mesma. Encontram-se assim, para algumas situações, respostas dinâmicas maiores do que as correspondentes às máximas da excitação estática e, desta forma, não basta um valor instantâneo da ação. Isto exemplifica uma aplicação da importância do conhecimento da frequência de excitação e resposta.

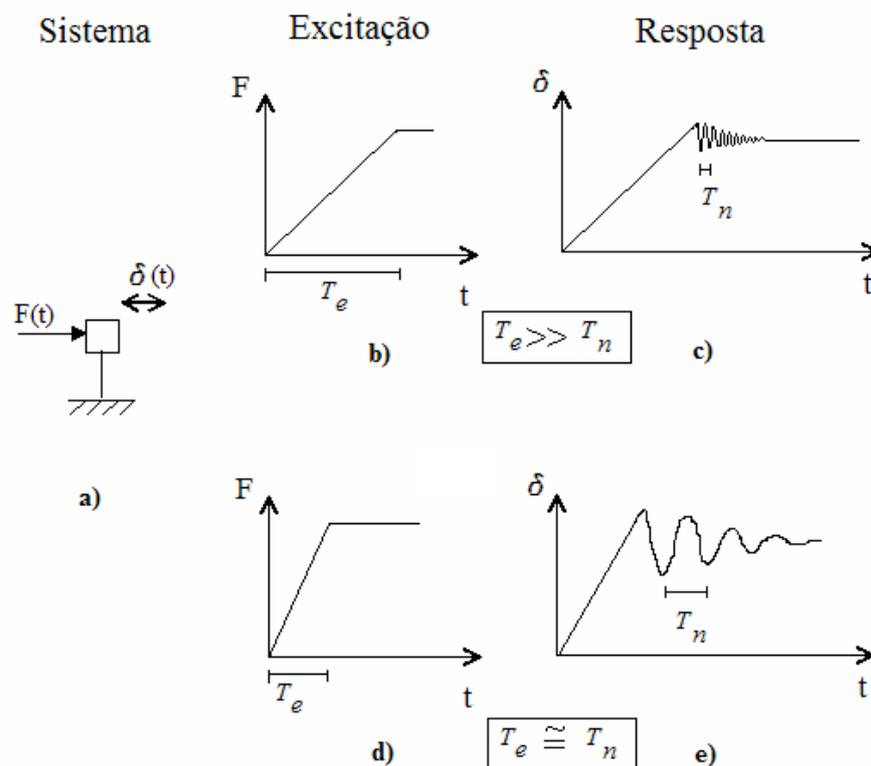


Figura VII. 5: Esquema de um sistema de um grau de liberdade excitado por uma força $F(t)$ (a); variação no tempo da excitação $F(t)$ e da resposta $\delta(t)$ do sistema para $T_n < T_e$ (b) e (c); variação no tempo da excitação $F(t)$ e da resposta $\delta(t)$ do sistema para $T_n > T_e$ (d) e (e).

Para exemplificar este conceito em casos reais, utiliza-se o vento como sendo uma carga variável com o tempo. Para prédios de pouca altura é comum desconsiderar seus efeitos dinâmicos porque $T_e > T_n$. Já para o caso construções maiores, pontes, torres de transmissão, torres estaiadas, etc, tais efeitos são fundamentais.

Geralmente, os conceitos descritos anteriormente são avaliados em estudos dinâmicos de problemas, mas, por não serem o objetivo deste trabalho, este tópico não será aprofundado.

VII.2. MODELAGEM NUMÉRICA

Em geral, os fenômenos da natureza podem ser representados com a ajuda de leis da física, sendo expressos através de equações algébricas, diferenciais e/ou integrais. Assim, para a obtenção das variáveis envolvidas nos eventos, é comum a utilização de aproximações numéricas para representar tais situações. A determinação da temperatura num certo ponto de uma caldeira, o valor da deflexão no centro de uma laje carregada ou a deformação ao longo do tempo apresentada por um corpo sujeito a uma ação impulsiva são exemplos ilustrativos destas modelagens numéricas.

Encontrar as equações que governam alguns problemas é relativamente fácil através de métodos de análise exatos. Outros casos resultam em tarefas difíceis ou impossíveis até os dias atuais, devido à complexidade na definição das condições de contorno. Sendo assim, os métodos aproximados de análise provêm caminhos alternativos para encontrar uma solução e, entre estes, o método dos elementos finitos ocupa um lugar de privilégio.

Apenas para citar, outras ferramentas numéricas existem para estas aproximações, entre elas pode-se citar o Método dos Elementos Discretos, o Método dos Elementos de Contorno e métodos híbridos, os quais combinados aproveitam as vantagens dos outros antes mencionados.

VII.2.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS – *MEF*

Um dos mais difundidos métodos utilizados para soluções de problemas em engenharia, sem dúvida, é o dos elementos finitos (*MEF*). Este consiste em discretizar o domínio em estudo numa série de domínios elementares, cuidando-se para manter a compatibilidade nos deslocamentos entre os mesmos. Embora um estudo deste método demande um aprofundamento maior, nesta seção realiza-se uma introdução com conceitos básicos, que serão utilizados durante o trabalho.

Apesar de haver uma variedade grande de programas comerciais que utilizam tal método, pretende-se apenas fazer uso do Ansys [2000] e do LS-Dyna [2003].

O Ansys [2000] é um sistema que permite realizar a análise de diversos problemas de valores de contorno utilizando o *MEF*. Dentro do contexto estrutural, são utilizados neste sistema os seguintes tipos de análises:

- Estática;
- Modal: determinação de modos e frequências;
- Superposição modal: avaliação de problemas de vibrações forçadas;

- Integração direta da equação do movimento resultante da discretização espacial utilizando um esquema de integração implícito;

Cabe salientar que o sistema em questão permite considerar as não linearidades físicas e geométricas para tais análises. No caso do sistema LS-Dyna [2003], o qual também realiza discretização espacial utilizando o *MEF*, aplica-se sobre a equação do movimento um esquema de integração direta explícito. Este tipo de análise é empregado quando o problema a ser resolvido possui grandes não linearidades e/ou quando é altamente transiente (evento em tempo muito reduzido).

Na Tabela VII. 2 se apresentam aplicações as quais poderiam ser resolvidas com ditos sistemas através das análises mencionadas.

Tabela VII. 2: Tipo de problemas nas diferentes áreas da Engenharia Sánchez [2001].

Áreas de Estudo	Problemas de equilíbrio	Problemas de autovalores	Problemas de propagação
Engenharia Civil Estrutural	Análise estática de estruturas civis	Freq. naturais e modos de vibrar de estruturas. Estabilidades estruturais	Propagação de ondas. Resposta de estruturas a cargas não periódicas
Estruturas Aeronáuticas	Análise estática de aviões, mísseis, foguetes e espaçonaves	Frequências naturais e estabilidade de estruturas aeronáuticas.	Resposta de estruturas de aviões e espaçonaves a cargas aleatórias e/ou não periódicas
Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos	Análise de potencial de fluxos, fluxos de superfícies livres, fluxos viscosos, problemas aerodinâmicos transônicos. Análises de estruturas hidráulicas	Períodos naturais e modos de vibrar de lagos e portos. Movimento de líquidos em reservatórios rígidos e flexíveis	Propagação de ondas e fluxos instáveis de fluidos. Transiente em meios porosos. Dinâmica de gases rarefeitos. Fluxos magneto-hidrodinâmicos
Engenharia Nuclear	Análise de estruturas de contenção. Estado de distribuição de temperatura em componentes de reatores	Frequências naturais e estabilidade de estruturas de contenção. Distribuição de fluxos de nêutrons	Respostas de estruturas de contenção à cargas dinâmicas. Transiente de temperaturas e análises viscoelásticas e térmicas de estruturas de reatores
Projeto Mecânico	Concent. de tensões em dutos, pistões, materiais compósitos, acoplamentos e engrenagens	Frequências naturais e estabilidade de acoplamentos e máq. ferramentas	Problemas de quebras e fraturas sobre cargas dinâmicas

Algumas destas análises são comentados a seguir, fornecendo o embasamento conceitual necessário para o entendimento posterior.

VII.2.2. ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA

Este tipo de análise é realizada para determinar deslocamentos, tensões, deformações e forças em estruturas ou componentes, os quais possuem seus períodos de vibração muito menores que os períodos das cargas externas. Por isto, os tipos de cargas aplicadas para estas análises são [Ansys Inc., 2000]:

- Forças e pressões externamente aplicadas;
- Forças de corpo;
- Deslocamentos prescritos;
- Temperaturas.

VII.2.3. ANÁLISE MODAL

É o tipo de análise escolhida quando se deseja determinar as propriedades dinâmicas de estruturas lineares (como as frequências naturais e modos de vibração). Pode também ser o ponto de partida para análise de vibração forçada (sistemas lineares) utilizando o método de superposição modal.

Para este tipo de análise, o amortecimento é um fator que muitas vezes é desconsiderado. Isto se justifica pelo fato das estruturas em geral apresentarem valores pequenos de amortecimento, não fazendo diferença no cálculo dos modos e frequências o uso do mesmo [Alves Filho, 2005].

Segue-se um breve resumo das expressões matemáticas necessárias para o cálculo das frequências e dos modos de vibrações de um sistema de N graus de liberdade.

Considerando-se que todos os pontos nodais do modelo em elementos finitos vibram com a mesma frequência, podem-se representar os deslocamentos segundo equações abaixo [Alves Filho, 2005]:

$$\{U(t)\} = \begin{Bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ \vdots \\ \vdots \\ U_n(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_{01}(t) \cdot \text{sen} \omega t \\ U_{02}(t) \cdot \text{sen} \omega t \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{0n}(t) \cdot \text{sen} \omega t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_{01}(t) \\ U_{02}(t) \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{0n}(t) \end{Bmatrix} \cdot \text{sen} \omega t \quad (51)$$

Onde $\{U(t)\}$ é o vetor coluna que contém todos os deslocamentos associados aos $NGDL$ da estrutura em um instante t , e $\{U_0\}$ é o vetor coluna que contém todos os deslocamentos máximos associados aos $NGDL$.

Substituindo-se então na equação geral do movimento, para um sistema de vários graus de liberdade, onde para qualquer valor de t , tem-se:

$$\{U(t)\} = \{U_0\} \cdot \text{sen } \omega t \quad (52)$$

$$\{\dot{U}(t)\} = \{U_0\} \cdot \omega \cdot \text{cos } \omega t \quad (53)$$

$$\{\ddot{U}(t)\} = \{U_0\} \cdot \omega \cdot (-\omega \cdot \text{sen } \omega t) = -\{U_0(t)\} \cdot \omega^2 \cdot \text{sen } \omega t \quad (54)$$

Substituindo-se (53) e (54) em (45), considerando vibrações livres ($\vec{f}(t) = 0$) e ausência de amortecimento ($[c]=0$), chega-se à seguinte expressão:

$$-[m] \cdot \{U_0\} \cdot \omega^2 + [k] \cdot \{U_0\} = 0 \quad (55)$$

a qual, isolando-se o vetor de amplitudes de deslocamentos $\{U_0\}$ fica

$$([k] - \omega^2 \cdot [m]) \cdot \{U_0\} = 0 \quad (56)$$

A partir desta equação, pode-se considerar a solução trivial $\{U_0\}=0$ que será sempre verificada correspondendo a nenhuma deformação inicial imposta e não gerando conseqüentes vibrações. Para solução não trivial o determinante de $([k]-\omega^2[m])$ deverá ser nulo. Desta maneira “ n ” valores serão encontrados para as freqüências circulares naturais (ω_i), que dependem do número de graus de liberdade do sistema. É comum representar $\lambda_i = \omega_i^2$, sendo que estes λ_i são os chamados autovalores do problema. Para cada autovalor existe um autovetor associado $\{U_0\}_i$ o qual define a forma de vibrar do sistema com uma freqüência natural ω_i .

VII.2.4. ANÁLISE DINÂMICA DE UM SISTEMA SUBMETIDO À VIBRAÇÕES FORÇADAS

Este tipo de análise é utilizado para modelar situações onde as estruturas estejam sob a ação de excitações dinâmicas e as respostas obtidas também são funções do tempo. Ao contrário da análise estática, aqui as forças de inércia e de amortecimento não podem, em geral, ser desprezadas. A forma mais simples de levar em conta as forças de amortecimento é considerá-las como função da velocidade (amortecimento viscoso). Sendo assim, tem-se que trabalhar com a equação do movimento na seguinte forma.

$$[m] \{\ddot{u}\} + [c] \{\dot{u}\} + [k] \{u\} = \{f(t)\} \quad (57)$$

Onde se sabe que as matrizes de massa $[m]$ e de rigidez $[k]$ são razoavelmente simples de se obter. Porém, a de amortecimento $[c]$ não é tão fácil de ser determinada na prática. Assim,

uma simplificação utilizada é considerar que a $[c]$ é uma combinação linear das matrizes $[m]$ e $[k]$.

$$[c] = \alpha[m] + \beta[k] \quad (58)$$

Sendo que α e β são coeficientes determinados experimentalmente. Esta forma de se representar o amortecimento é conhecida como Amortecimento de Rayleigh e oferece vantagens matemáticas [Zienkiewicz, 1982]. Em forma mais geral pode-se expressar a equação (20) como:

$$m\ddot{u} + f_i(t) = f_{ext}(t) \quad (59)$$

onde f_i são as forças internas do sistema incluídas as forças restitutivas (associadas à rigidez da estrutura) e as forças dissipativas (associadas à diferentes formas de dissipação de energia).

Para resolver as eq. (58) ou (59) podem ser utilizados dois caminhos: o método de superposição modal aplicado em estruturas lineares e o método de integração direta aplicado em estruturas não lineares.

A - Método de Superposição Modal

O mesmo baseia-se na propriedade de serem a matriz de massa e rigidez ortogonais às matrizes cujas colunas são formadas pelos autovetores do problema estudado $[\Phi]$. Para tal propriedade, que pode ser facilmente demonstrada [Clough, 1993], tem-se:

$$\begin{aligned} [\Phi]^T [m] [\Phi] &= [m_r] \quad (\text{matriz diagonal}) \\ \Downarrow \\ [\Phi]^T [k] [\Phi] &= [k_r] \quad (\text{matriz diagonal}) \end{aligned} \quad (60)$$

Desta forma, partindo da equação (58) e considerando uma mudança de base do vetor deslocamento é possível escrever

$$[\vec{u}] = [\Phi][\vec{Y}] \quad (61)$$

onde \vec{Y} é o vetor de deslocamento expresso em outra base, chamada de coordenadas geométricas. Assim, a equação do movimento fica:

$$[m]\Phi\ddot{\vec{Y}} + [c]\Phi\dot{\vec{Y}} + [k]\vec{Y} = [f(t)] \quad (62)$$

e pré-multiplicando ambos os membros por Φ^T tem-se

$$\Phi^T [m]\Phi\ddot{\vec{Y}} + \Phi^T [c]\Phi\dot{\vec{Y}} + \Phi^T [k]\vec{Y} = \Phi^T [f(t)] \quad (63)$$

sendo c o amortecimento de Rayleigh (eq. 21), será possível escrever

$$[m_r]\ddot{\vec{Y}} + [c_r]\dot{\vec{Y}} + [k_r]\vec{Y} = \Phi^T [f(t)] \quad (64)$$

onde $[m_r]$, $[c_r]$ e $[k_r]$ são matrizes diagonais. Desta forma, um sistema de N equações acopladas apresentadas na equação (58) pode ser reduzido a um sistema de N equações desacopladas de apenas 1 GDL , onde as incógnitas serão cada uma das componentes do vetor \vec{Y} . Obtendo-se tal vetor, é possível encontrar \vec{u} aplicando a equação (62).

Para a maioria dos tipos de cargas e de estruturas prevalece a contribuição dos modos de mais baixas frequências frente aos outros. Isto significa uma vantagem, porque a soma expressa por (62) pode ser truncada desde que já se tenha obtido o grau de precisão desejada da resposta. Assim sendo, só será necessária a determinação das frequências e seus modos mais baixos.

Ao utilizar o método de superposição modal com solicitação impulsiva, Jacinto *et al.* [2001] põe em evidência a importância da escolha da quantidade de formas modais para representar adequadamente o comportamento dinâmico da estrutura analisada. “Quando se trabalha com carga do tipo impulsiva, é importante realizar uma série de provas para determinar o número adequado de modos modais utilizados na análise por superposição modal”. Estas observações se devem porque as cargas impulsivas geralmente excitam os modos de frequências superiores. Os modelos computacionais devem ter o nível de discretização de acordo com a quantidade de modos incluídos na resposta. Uma vez que uma malha mais refinada é capaz de captar mais altas frequências com menores erros, e devido ao tipo de solicitação, a correta determinação da mesma se torna mais importante.

Assim, a aplicação deste método se restringe para casos onde prevaleçam baixas frequências, tornando-se realmente atrativo computacionalmente.

B - Integração direta

Outra maneira de resolver as equações de movimento com $NGDL$ é através da integração direta no tempo do sistema da equação de movimento expressada em (20). Desta forma, são mais facilmente tratadas as questões de não linearidades e amortecimentos. Sendo este método baseado na determinação dos deslocamentos nodais em um dado instante $(t+\Delta t)$, a partir do conhecimento dos deslocamentos dos instantes anteriores $(t-\Delta t)$ e (t) . A princípio, duas considerações são importantes na implementação deste tipo de integração numérica:

- A equação de equilíbrio dinâmico (incluindo todos os efeitos de forças elásticas, inércia e de amortecimento) é satisfeita somente em alguns instantes discretos do intervalo que ocorre o fenômeno dinâmico, onde tais instantes estão separados por intervalos de tempo Δt . Ou seja, além de discretizar o corpo contínuo em uma malha de pontos, o fenômeno do tempo também é particionado.
- Dentro de cada intervalo de tempo, portanto entre dois instantes consecutivos, é assumida uma lei de variação para os deslocamentos, velocidades e acelerações nodais, conforme Figura VII. 6.

Para realizar a integração existem métodos que podem se classificar em: Explícitos e Implícitos.

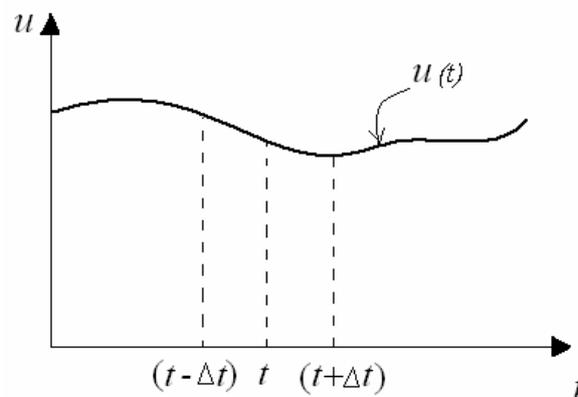


Figura VII. 6: Esquema que ilustra a forma de proceder na integração numérica.

ESQUEMA DE ANÁLISE IMPLÍCITA

Alguns procedimentos são comumente utilizados com esta metodologia, tais como Houbolt, Wilson e Newmark [Bathe, 1996]. Este autor cita ser este esquema de cálculo também entendido como uma extensão do método de aceleração linear. Por ser este o tipo de integração numérica aplicado pelo programa Ansys [2000], uma breve descrição do Método de Newmark será realizada na seqüência.

Segundo este método é possível expressar a velocidade e aceleração no tempo $(t+\Delta t)$ como segue:

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \left[(1-\delta)\ddot{u}_t + \delta\ddot{u}_{t+\Delta t} \right] \Delta t \quad (65)$$

$$\ddot{u}_{t+\Delta t} = \ddot{u}_t + \dot{u}_t \Delta t + \left[\left[\frac{1}{2} - \alpha \right] \ddot{u}_t + \alpha \ddot{u}_{t+\Delta t} \right] \Delta t^2 \quad (66)$$

Os parâmetros α e δ podem ser utilizados para obter estabilidade e boa precisão na integração. Quando $\alpha = 1/4$ e $\delta = 1/2$ estamos na presença do Método de Newmark, o qual é incondicionalmente estável [Bathe, 1996].

A característica dos esquemas de integração implícitos condiciona que a equação do movimento seja calculada no tempo $t+\Delta t$, ou seja

$$[m]\{\ddot{u}_{t+\Delta t}\} + [c]\{\dot{u}_{t+\Delta t}\} + [k]\{u_{t+\Delta t}\} = \{f_{(t+\Delta t)}\} \quad (67)$$

substituindo as equações (66) e (67) e trabalhando-se algebricamente chega-se a:

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{1}{\alpha\Delta t^2}m + \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right) c + k \right\} u_{t+\Delta t} = \\ & = F_{t+\Delta t} + m \left(\frac{1}{\alpha\Delta t^2} u_t + \frac{\delta}{\alpha\Delta t} \dot{u}_t + \frac{1}{\alpha\Delta t} \ddot{u}_t \right) + c \left\{ \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right) \dot{u}_t + \Delta t (1 - \delta) \dot{u}_t + \delta \Delta t u_t \right\} \end{aligned} \quad (68)$$

Cada iteração da análise implícita requer a solução simultânea das equações para os elementos do problema [Hibbit *et al.*, 1995]. Sendo assim, o custo computacional aumenta com o número de graus de liberdade analisados.

ESQUEMA DE ANÁLISE EXPLÍCITA

O procedimento mais efetivo dentro das metodologias explícitas é o método das Diferenças Centrais. As acelerações e velocidades são calculadas no tempo t

$$\{\ddot{u}_t\} = \frac{1}{\Delta t^2} (\{u_{t+\Delta t}\} - 2\{u_t\} + \{u_{t-\Delta t}\}) \quad (69)$$

$$\{\dot{u}_t\} = \frac{1}{2\Delta t} (-\{u_{t-\Delta t}\} + \{u_{t+\Delta t}\}) \quad (70)$$

e são substituídas na equação do movimento

$$[m]\{\ddot{u}_t\} + [c]\{\dot{u}_t\} + [k]\{u_t\} = \{f_{(t)}\} \quad (71)$$

Trabalhando algebricamente a equação (72) fica

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}[m] + \frac{1}{2\Delta t}[c] \right) \{u_{t+\Delta t}\} = \{f_{(t)}\} - \left([k] - \frac{2}{\Delta t^2}[m] \right) \{u_t\} - \left(\frac{1}{\Delta t^2}[m] - \frac{1}{2\Delta t}[c] \right) \{u_{t-\Delta t}\} \quad (72)$$

Desta forma, os deslocamentos calculados para o tempo $(t+\Delta t)$ são obtidos em função dos valores conhecidos no tempo t . É importante observar que a solução é montada utilizando a equação de equilíbrio no tempo t e, por este motivo, o procedimento de integração é chamado de explícito [Bathe, 1996]. Ainda como observação, nota-se que para tal esquema de integração a

fatorização da matriz de rigidez na solução passo a passo não é requerida. Isto permite resolver problemas nos quais as matrizes de rigidez estejam mal condicionadas (estrutura hipostática).

Este método é condicionalmente estável, pois converge para intervalos de integração menores que um determinado valor crítico, sendo este aproximado no caso de sistemas lineares, pela seguinte expressão:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \quad (73)$$

Onde ω_{\max} é a frequência circular natural mais alta obtida.

Este procedimento é utilizado geralmente quando o problema a ser resolvido é transiente (impactos, explosões, etc), e quando não linearidades no comportamento do material são esperadas em regiões localizadas. Neste caso seria necessário um intervalo de tempo de integração suficientemente pequeno para descrever o fenômeno estudado.

COMPARAÇÃO DE ANÁLISES: IMPLÍCITA X EXPLÍCITA

Em termos de equacionamento, pode-se visualizar nas equações (68) e (72) as diferenças entre os dois tipos. Para o esquema implícito, o equilíbrio é realizado para tempo $(t+\Delta t)$, já no esquema explícito ocorre ao contrário, a equação é verificada no tempo t .

Outra diferença existente entre estas análises é que a convergência não poder ser alcançada na forma implícita quando há descontinuidades significantes na solução. Em termos de visualização, acontece quando alguns elementos ficam sem condições de contorno na solução. Pode ser interpretado para este caso como uma desvantagem em relação à solução explícita, pois a análise apresenta um erro e não prossegue.

Hibbit *et al.* [1995] também apresentam comparações entre ambas as análises. A primeira delas relaciona o custo operacional, o qual se comporta conforme Figura VII. 7.

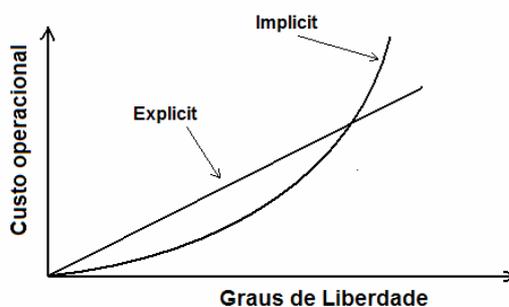


Figura VII. 7: Comparação de custo operacional entre análise implícita e explícita [Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 1995].

Pode-se notar pelas comparações anteriormente expostas, que dependendo do tipo de problema um ou outro método se torna mais interessante para cada análise.

VII.2.5. NÃO LINEARIDADES

Diversos fatores são responsáveis pelo aparecimento conveniente das não linearidades, entre eles a plasticidade, grandes deslocamentos e rotações.

Conforme Bathe [1996], o comportamento não linear é atribuído a três causas principais:

- Comportamento não linear do tipo cinemático devido aos grandes deslocamentos e rotações que ocorrem no processo, conhecida também por não linearidade geométrica;
- Comportamento não linear do tipo constitutivo devido ao caráter inelástico (plástico, viscoplástico e degradação) que caracteriza a deformação do material, não linearidade física;
- Comportamento não linear das condições de contorno (elas mudam durante o processo).

Como em outros casos, algumas situações especiais transformam mais simples e rápidas as soluções destes problemas. Isto pode ser visto no caso do problema não linear estático, onde os vetores de aceleração e velocidade da equação de movimento são nulos, reduzindo a forma da equação para:

$$[k]\{u\} = \{f\} \quad (74)$$

Neste caso, a matriz de rigidez terá modificações ao longo da análise, ficando dependente do tempo e não é mais linear.

APÊNDICE VIII - Propagação de Ondas em um Meio Elástico

Ao aplicar uma carga repentina pontual em um corpo qualquer, as proximidades desta serão afetadas anteriormente do que regiões mais distantes. As deformações obtidas devido à excitação introduzida irão se propagar ao longo de todo o corpo como ondas mecânicas, até dissipar gradualmente a energia. Estas ondas possuem características que serão a seguir comentadas sucintamente, restringindo-se a corpos elásticos e homogêneos.

VIII.1. CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS BÁSICAS - VELOCIDADES

Ao tratar de vibrações num meio elástico, classificam-se as ondas em: primárias, de corte e ondas de superfície [Siskind, 2000]. As ondas primárias (P) ou “compressivas” possuem a maior velocidade de propagação. No esquema da Figura VIII. 1(a), observa-se que a direção de propagação destas ondas possui a mesma direção de movimentação das partículas. Em caso de carga pontual, a propagação se dará de forma radial, como será visualizada na Figura VIII. 2.

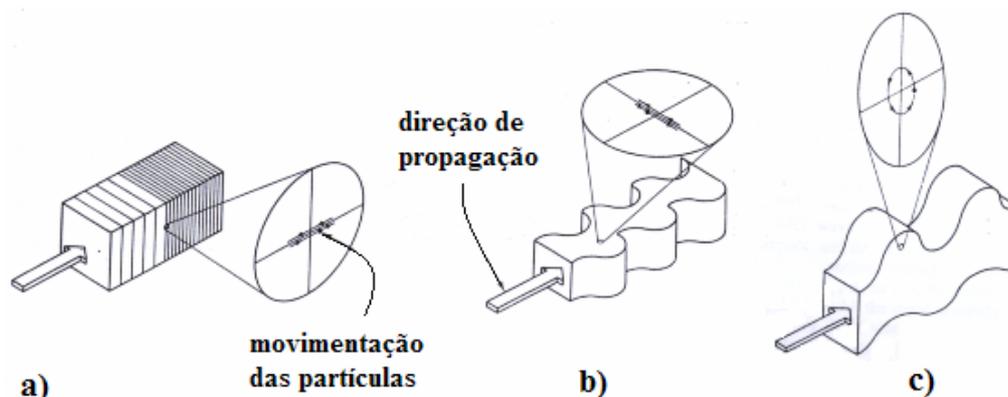


Figura VIII. 1: Esquema ilustrativo de ondas primárias (a), secundárias (b), de superfície (c) [Dowding, 1985].

A velocidade das ondas P é apresentada na equação abaixo, a qual possui sua dedução exemplificada em Das [1982]:

$$V_P = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \cdot \frac{E}{\rho} \quad (75)$$

Onde:

V_P - Velocidade da onda P [m/s];
 E - Módulo de Elasticidade [N/m^2];
 ρ - Densidade mássica [kg/m^3];
 ν - Coeficiente de Poisson.

As ondas de corte (shear waves) “ S ”, também chamadas “*distorcionais*”, por sua vez, diferenciam-se pelas velocidades mais baixas que as P , e pelo movimento das partículas estar na

direção perpendicular à direção radial (Figura VIII. 1 (b)), podendo ser horizontais e/ou verticais. Para quantificar a velocidade de propagação destas ondas, tem-se a equação [Das, 1982].

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (76)$$

Sendo:

V_s - Velocidade da onda S [m/s];

G - Módulo de corte [N/m^2].

Por último, existem soluções que descrevem as ondas de superfície, dentre as quais as mais significativas são as de Rayleigh (r), “*se parecem mais com as ondas dos oceanos batendo nas praias*” [Siskind, 2000]. Estas apresentam as menores velocidades e maiores amplitudes, principalmente quando medidas nas superfícies dos corpos, conforme ilustrado na Figura VIII. 1(c). Das [1982] apresenta uma tabela que quantifica a razão (γ) entre as velocidades das ondas de Rayleigh e das ondas S , a partir de um coeficiente de Poisson.

Tabela VIII. 1: Valores calculados para as expressões acima apresentadas.

ν	$\gamma = \frac{V_R}{V_S}$
0,25	0,919
0,29	0,926
0,33	0,933
0,4	0,943
0,5	0,955

Cabe observar que a velocidade das ondas de Rayleigh é de 5% à 9% menor quando comparadas às secundárias e, por este motivo, distinguir um tipo (S) do outro (r), principalmente na aquisição de sinais, se torna complicado para pequenas distâncias.

Na seqüência, na Figura VIII. 2 pode-se ver a propagação no solo para os três tipos de ondas citados, a partir de uma explosão.

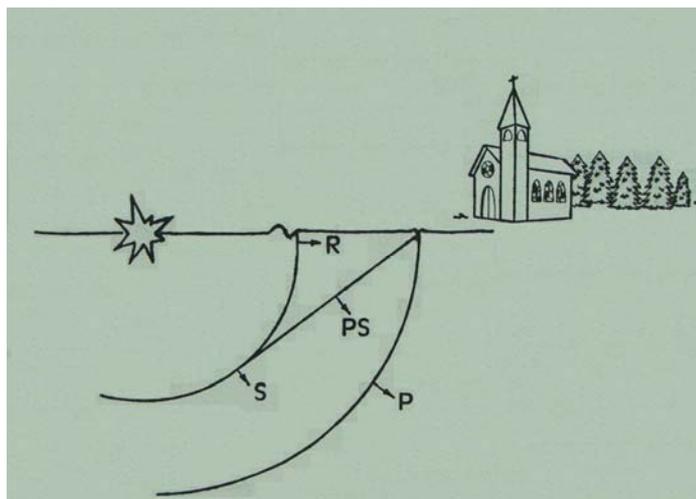


Figura VIII. 2: Esquema ilustrativo de propagação de ondas em meio elástico [Persson *et al.*, 1993]

Um exemplo clássico pode ser visualizado na Figura VIII. 3, o qual apresenta a idéia de comparação do avanço e da amplitude dos diferentes tipos de ondas. Observando-se a Figura VIII. 3(a) fica difícil distinguir os diferentes tipos de ondas comentados. Já em maiores distâncias (700m e 2300m), como nas Figura VIII. 3(b) e (c) respectivamente, verifica-se que a primeira parte do sinal representa a chegada da onda *P*. Ocorre então o amortecimento destas altas frequências, surgindo as ondas de Rayleigh na segunda parte, com frequências mais baixas.

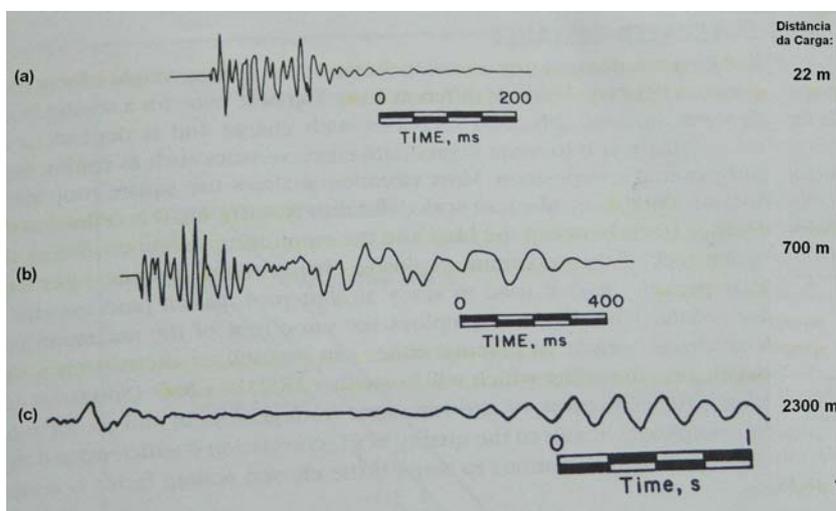


Figura VIII. 3: Exemplo gráfico de modificações das vibrações ao longo da distância e do tempo.

Algumas considerações sobre o comportamento das ondas em função da distância, bem como a apresentação de equações para quantificar a atenuação de deslocamentos (ao longo da profundidade e na implementação de valetas) serão vistas a seguir.

VIII.2. ONDAS NO SOLO – DIMINUIÇÃO COM A PROFUNDIDADE OU COM A ADIÇÃO DE VALETAS

Para aplicações de cargas explosivas as ondas no solo partem inicialmente como compressivas e, com o aumento da distância e a interação com a superfície, aparecem as ondas secundárias e de Rayleigh.

Holmberg e Lee [1993] citam que para distâncias maiores de 300m, as ondas de superfície passam a ter o controle das formas e freqüências de como o solo se movimenta. Baseando-se neste fato e tendo em vista a integridade de estruturas vinculadas ao solo, é evidente a necessidade de se conhecerem as variáveis para se desenvolver técnicas que atenuem e/ou anulem a propagação destas ondas. Neste contexto, utilizam-se dois conceitos bastante eficazes: o efeito da profundidade e o uso de valetas.

VIII.3. ATENUAÇÃO DAS ONDAS DE RAYLEIGH COM A PROFUNDIDADE

Os deslocamentos na superfície do solo devido à propagação de ondas (de Rayleigh ou de superfície) amortecem rapidamente à medida que nos afastamos da superfície. Na Figura VIII. 4(b) é possível observar esta atenuação claramente para as três componentes do deslocamento (u , w , v) de uma partícula do espaço analisado, pois a profundidade do solo está representada pelo eixo Z .

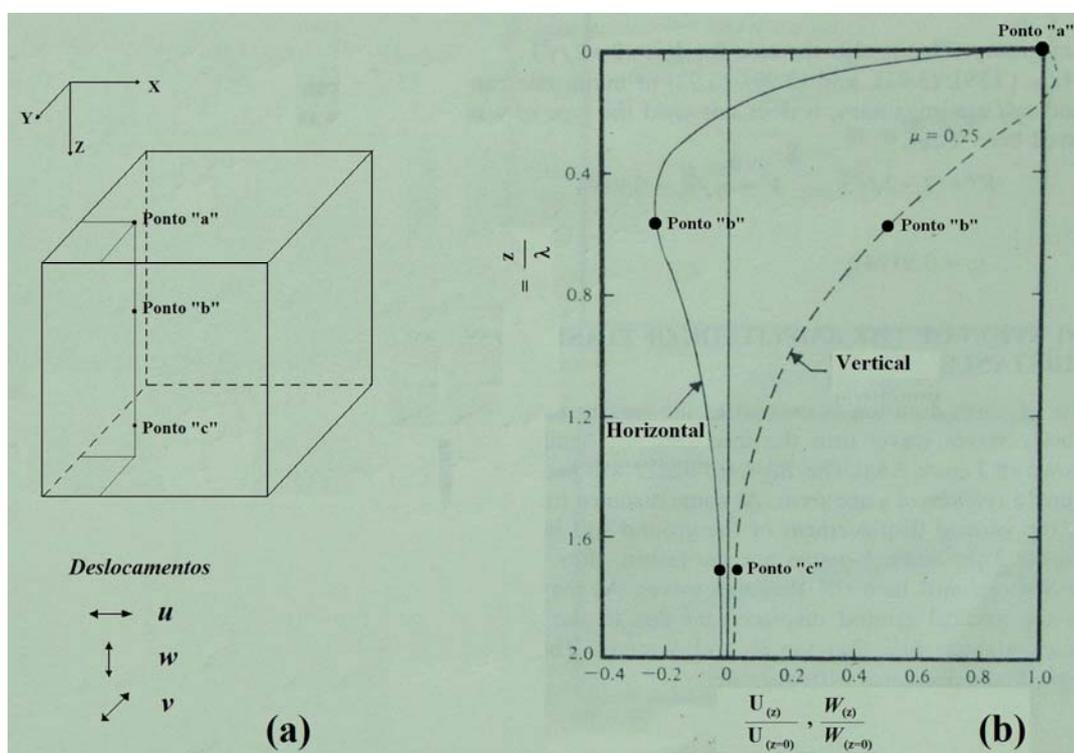


Figura VIII. 4: Sistema de coordenadas e direções de deslocamentos para pontos “a”, “b” e “c” (a); Curva de variação da amplitude de vibração horizontal e vertical para ondas de Rayleigh em função da profundidade (b) [Das, 1982].

VIII.4. EFEITO DE UMA VALETA

Uma forma de proteger estruturas da ação de vibrações transmitidas pelo solo é através da construção de valetas, conforme mostra a Figura VIII. 5.

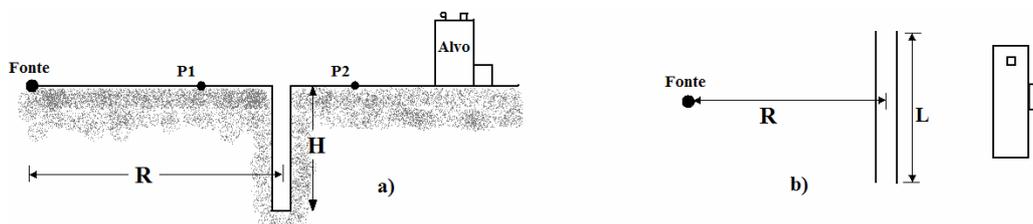


Figura VIII. 5: Representação de fonte emissora de vibrações, dimensões para a valeta em vista frontal (a); em planta para visualização do comprimento “L” da valeta (b) [Das, 1982].

Surge então um outro conceito utilizado para quantificar a eficiência do dito isolamento, o “Fator de Redução de Amplitude (ARF)”. Este representa a razão entre a amplitude vertical de vibrações com e sem a valeta, e é considerado satisfatório quando menor do que 0,25.

Das [1982] afirma ainda que, para atingir boa eficiência, algumas condições geométricas devem ser cumpridas. Ao mesmo tempo em que o autor cita que a largura da valeta não tem influência nenhuma neste isolamento, coloca uma condição para distância mínima e máxima da fonte de excitação (eq. 77). Considerando as dimensões representadas pela Figura VIII. 5, e considerando como sendo λ_R o comprimento de onda de Rayleigh, tem-se:

$$2\lambda_R < R < 7\lambda_R \Rightarrow H \geq 1.2\lambda_R \quad (77)$$

$$\begin{aligned} R = 2\lambda_R &\Leftrightarrow LH = 2,5\lambda_R^2 \\ R = 7\lambda_R &\Leftrightarrow LH = 6,0\lambda_R^2 \end{aligned} \quad (78)$$

Desta forma, os experimentos realizados pelo autor (os quais varreram uma faixa de relação $2.22 < R/\lambda < 9.10$) garantem uma redução satisfatória para uma região semicircular atrás da valeta com raio aproximado de $\frac{1}{2}L$. Estes valores serão utilizados como indicativos para realizar o estudo apresentado na seção 3.4.

Típicos valores de velocidades de ondas de Rayleigh (v_R) para solos variam entre 16 e 420m/s em solo arenoso seco e solo rochoso (pedregoso) compactado, respectivamente. Considerando-se que as ondas de Rayleigh, em geral, apresentam períodos (T) maiores do que 1s e que o comprimento de onda é dado pela eq. (79), pode-se afirmar que o comprimento de onda de Rayleigh (λ_R) no solo possui valores entre 16 e 420m aproximadamente.

$$\lambda_R = v_R \cdot T \quad (79)$$

APÊNDICE IX -Consideração da Pressão Dinâmica Devida ao Vento

Já foi citado que atrás da onda de choque o movimento das partículas de ar provoca uma pressão dinâmica formada pelos ventos produzidos na explosão. Em alguns casos, esta pressão possui valores de mesma ordem dos picos de sobrepressão e, por isso, não podem ser desconsiderados. Assim sendo, uma pequena revisão sobre pressão dinâmica e coeficiente de arrasto é realizada nesta seção.

Ao considerar um alvo atingido por um escoamento de ar, determina-se a pressão dinâmica (q) como sendo a diferença de pressões estáticas entre o ponto a barlavento (onde não há interferência do fluido no escoamento) e o ponto de estagnação. Para superfícies não planas e perpendiculares, esta pressão terá um comportamento variado [Kinney e Graham, 1985], porém não será detalhada esta questão neste estudo.

Uma vez definido o conceito de pressão dinâmica, pode-se analisar a importância de considerá-la quando a mesma incidir numa estrutura. A força global do vento sobre uma edificação ou parte dela é obtida pela soma vetorial das forças atuantes. A força global na direção do vento (F_a) é expressa por:

$$F_d = C_d q A. \quad (80)$$

onde

C_d = coeficiente de arrasto (coeficiente de força)
 A_e = área frontal efetiva

O coeficiente de arrasto é uma grandeza adimensional dependente da forma do corpo atingido pelo escoamento. Normalmente são utilizadas tabelas com valores simplificados para cálculos de engenharia, ou normas [NBR6123, 1988] para um maior detalhamento. No apêndice III, há uma destas tabelas com alguns exemplos extraídos da bibliografia. Em Smith e Hetherington [1994], encontra-se um exemplo para construção do gráfico pressão-tempo, onde são considerados os ventos dinâmicos produzidos por uma explosão.