

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**UM ESTUDO DO FENÔMENO EXPLOSÃO E DAS ONDAS DE**  
**CHOQUE UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA**  
**COMPUTACIONAL**

**MURILO LIMEIRA DA COSTA NETO**

**ORIENTADORA: GRACIELA NORA DOZ DE CARVALHO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO**  
**CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.DM – 004A/15**

**BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**UM ESTUDO DO FENÔMENO EXPLOSÃO E DAS ONDAS DE  
CHOQUE UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

**MURILO LIMEIRA DA COSTA NETO**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU  
DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof<sup>a</sup> Graciela Nora Doz de Carvalho, Dr. Ing. (ENC-UnB)  
(Orientadora)**

---

**Prof. José Luís Vital de Brito, Dr. (ENC-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. Yosiaki Nagato, DSc (ENC-UnB)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 25 DE MARÇO DE 2015**

## FICHA CATALOGRÁFICA

|   |                    |
|---|--------------------|
| NETO, MURILO LIMEIRA DA COSTA   |                    |
| Um Estudo do Fenômeno Explosão e das Ondas de Choque Utilizando a Fluidodinâmica Computacional [Distrito Federal] 2015. |                    |
| xvii, 103 p., 297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2015).  |                    |
| Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  |                    |
| Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.   |                    |
| 1. Explosões  | 2. Ondas de Choque |
| 3. Fluidodinâmica Computacional   | 4. Estruturas      |
| I. ENC/FT/UnB   | II. Título (série) |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Neto, M. L. C. (2015). Um Estudo do Fenômeno Explosão e das Ondas de Choque Utilizando a Fluidodinâmica Computacional. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação – E.DM – 004A/15 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 103p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Murilo Limeira da Costa Neto

TÍTULO: Um Estudo do Fenômeno Explosão e das Ondas de Choque Utilizando a Fluidodinâmica Computacional

GRAU: Mestre

ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Murilo Limeira da Costa Neto  
CLN 408, bloco E, apt 112, Asa Norte  
70.856-550 Brasília – DF – Brasil.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus e a meus pais, Sandro e Kátia, pela força, pelo estímulo, pelo amor e pela manutenção dos principais valores em meu caráter que me permitem trilhar o caminho mais correto de aplicação em meus objetivos e de hombridade para com os meus semelhantes.

Agradeço ao meu irmão Jader por estar sempre presente ora fisicamente ora de coração nas horas difíceis e nas de alegria de minha vida, principalmente naquelas dentro destes 3 últimos anos que envolveram a minha formatura e a elaboração desta dissertação de mestrado.

À minha namorada Jéssica por se fazer presente nos meus dias e mostrar-se tão companheira e amorosa. Na vida se passam por momentos difíceis, mas nada que um amor de verdade, um amor compreensivo e verdadeiro não adocique e suavize.

A meus familiares pelo apoio e incentivo das mais diversas maneiras ao meu trabalho.

À minha orientadora Graciela Doz pelo apoio e por seus importantes e valorosos ensinamentos que me permitiram poder pesquisar e desenvolver trabalhos numa área que tanto gosto. É incrível a sensação de desenvolver trabalhos ao lado de uma pessoa tão admirável.

Agradeço aos meus amigos do PECC e a todos aqueles que direta ou indiretamente fizeram-se presentes em minha vida durante a elaboração deste trabalho.

Dedicado a todas as pessoas  
vinculadas ou não à pesquisa que  
buscam, no dia a dia, superar a si  
mesmos e seguir seus sonhos mais  
profundos não importando quão  
distantes estejam, o quão difíceis  
sejam, nem o quão improváveis  
pareçam...

## **RESUMO**

### **UM ESTUDO DO FENÔMENO EXPLOSÃO E DAS ONDAS DE CHOQUE UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

**Autor: Murilo Limeira da Costa Neto**

**Orientadora: Graciela Nora Doz de Carvalho**

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, março de 2015**

Atentados terroristas ao redor do mundo, acidentes envolvendo explosões ou mesmo utilização destas para fins de demolição ou mineração vem fazendo com que o estudo do fenômeno explosão e das ondas de choque ganhe cada vez mais importância. A grande complexidade envolvida na análise deste fenômeno demanda um número crescente de estudos que envolvem pesquisadores das mais diversas áreas como, por exemplo, engenheiros químicos, civis, aeroespaciais etc. As não-linearidades existentes no estudo das explosões e ondas de choque são originadas do grande número de fatores que orientam estes fenômenos, onde boa parte deles varia com o tempo. No âmbito da engenharia civil o evento de uma explosão não programada impõe risco às edificações e aos usuários desta. Devido ao elevado nível de dificuldade de estudo e análise deste fenômeno, faz-se necessária a utilização de recursos e ferramentas computacionais cada vez mais eficientes. Neste trabalho foi realizada uma revisão do fenômeno explosão e ondas de choque, abordando os principais conceitos envolvidos no estudo deste dentro da engenharia civil, além da utilização de uma ferramenta baseada na fluidodinâmica computacional (Autodyn) para a execução de diversas simulações envolvendo fatores importantes no estudo das explosões. Com os resultados obtidos através das simulações foi analisada a acurácia e limitações dos métodos empíricos de predição das pressões da onda de choque em comparação com os numéricos. Também foi feita uma análise de características importantes referentes ao estudo das explosões, como efeitos de canalização e a influência de obstáculos na mitigação das pressões de onda no interior de edificações.

**Palavras Chave:** Explosões; Ondas de Choque; Fluidodinâmica Computacional; Estruturas

## **ABSTRACT**

### **A STUDY OF BLAST AND SHOCK WAVE PHENOMENA USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

**Author: Murilo Limeira da Costa Neto**

**Supervisor: Graciela Nora Doz de Carvalho**

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, March of 2015**

Terrorist attacks around the world, accidents involving explosions or use of these for demolition or mining purposes make the explosion phenomenon and the study of shock waves even more important. The great complexity involved in the analysis of this phenomenon requires a growing number of studies involving researchers from various fields, for example, chemical engineers, civil engineers, aerospace engineers etc. The nonlinearities in the study of explosions and shock waves come from the large number of factors that guide this phenomenon, where many of them are time variants. In civil engineering the event of an accidental explosion imposes risks to buildings and their users. The high level of difficulty of the blasts study and analysis demands the use of computational tools and resources to help the development of optimized structures designs. The limitations and accuracy of empirical methods to predict the blast wave pressures were analysed. The results permitted the analysis of important features of blast waves as channelling effects and the influence of rigid obstacles on the blast wave pressure profile.

**Keywords:** Explosion; Shock wave; Computational Fluid Dynamics; Structures

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1.1 - INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1.2 - OBJETIVOS .....</b>   | <b>2</b>  |
| <b>1.3 - METODOLOGIA.....</b>  | <b>3</b>  |
| <br>   |           |
| <b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>   | <b>4</b>  |
| <br>   |           |
| <b>3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>  | <b>11</b> |
| <b>3.1 - FUNDAMENTOS DO ESTUDO DAS EXPLOSÕES.....</b>  | <b>11</b> |
| <b>3.2 - PROPAGAÇÃO DAS EXPLOSÕES .....</b>  | <b>13</b> |
| <b>3.2.1 - Considerações para o estudo das ondas de choque .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>3.2.2 - Ondas de choque .....</b>   | <b>17</b> |
| <b>3.2.3 - Fundamentos de uma onda de choque .....</b>   | <b>22</b> |
| <b>3.2.4 - Conceitos básicos dos efeitos de reflexão das ondas de choque .....</b>                           | <b>23</b> |
| <b>3.2.5 - Consideração sobre o carregamento incidente em uma estrutura produzido por uma explosão .....</b> | <b>28</b> |
| <b>3.3 - SOBREPRESSÕES DE UMA ONDA DE CHOQUE .....</b>   | <b>30</b> |
| <b>3.3.1 - As relações de distância-quantidade de explosivo e a lei de escala.....</b>                       | <b>30</b> |
| <b>3.3.2 - Predição das sobrepressões de uma onda de choque devido à detonação de alto explosivos.....</b>   | <b>31</b> |
| <b>3.3.3 - Avaliação geral dos danos causados a uma estrutura por uma explosão.....</b>                      | <b>35</b> |
| <b>3.4 - PROTEÇÃO CONTRA EXPLOSÕES.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>3.4.1 - Conceitos básicos para proteção.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>3.4.2 - Considerações no estudo de explosões internas e externas .....</b>                                | <b>40</b> |
| <br>   |           |
| <b>4 - FERRAMENTA COMPUTACIONAL.....</b>   | <b>45</b> |
| <b>4.1 - INTRODUÇÃO AOS HIDROCÓDIGOS .....</b>   | <b>45</b> |
| <b>4.2 - AUTODYN.....</b>  | <b>46</b> |
| <b>4.3 - OS PRINCÍPIOS DE ANÁLISE DOS MATERIAIS CONSTITUINTES .....</b>                                      | <b>48</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>5 - SIMULAÇÕES REALIZADAS .....</b>  | <b>54</b>  |
| <b>5.1 -1° SIMULAÇÃO: ESTUDO DAS PRESSÕES INCIDENTES SOBRE UM<br/>PILAR DE CONCRETO ARMADO - MOON (2009) .....</b>  | <b>54</b>  |
| <b>5.2 -2° SIMULAÇÃO: AVALIAÇÃO DAS SOBREPRESSÕES A 5 METROS DE<br/>DISTÂNCIA DO EPICENTRO DE UMA EXPLOSÃO A CÉU ABERTO.....</b>  | <b>60</b>  |
| <b>5.3 -3° SIMULAÇÃO: ANÁLISE E MENSURAÇÃO DAS SOBREPRESSÕES EM<br/>UM AMBIENTE SUJEITO ÀS REFLEXÕES DE ONDA.....</b>   | <b>63</b>  |
| <b>5.4 -4° SIMULAÇÃO: AVALIAÇÃO DO EFEITO DE CANALIZAÇÃO DA ONDA<br/>DE CHOQUE SOBRE O VALOR DA PRESSÃO.....</b>  | <b>67</b>  |
| <b>5.5 -5° SIMULAÇÃO: AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO AMBIENTE<br/>SOBRE A PRESSÃO ORIUNDA DE UMA ONDA DE CHOQUE .....</b>   | <b>72</b>  |
| <b>5.6 -6° SIMULAÇÃO: AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA<br/>AMBIENTE SOBRE A PRESSÃO ORIUNDA DE UMA ONDA DE CHOQUE .</b>   | <b>76</b>  |
| <b>5.7 -7° SIMULAÇÃO:AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES DE UMA ONDA DE<br/>CHOQUE ORIGINADA POR UMA EXPLOSÃO EM MEIO URBANO.....</b>  | <b>79</b>  |
| <b>5.7.1 - Avaliação das pressões de onda de choque em meio urbano - Grupo 1.</b>   | <b>82</b>  |
| <b>5.7.2 - Avaliação das pressões de onda de choque em meio urbano - Grupo 2.</b>   | <b>85</b>  |
| <b>5.7.3 - Avaliação das pressões de onda de choque em meio urbano - Grupo 3.</b>   | <b>90</b>  |
| <b>5.8 -8° SIMULAÇÃO: AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES DE UMA ONDA DE<br/>CHOQUE CAUSADA PELA EXPLOSÃO ACIDENTAL DE UM CILINDRO<br/>COMERCIAL DE PROPANO EM MEIO URBANO .....</b> | <b>93</b>  |
| <br>  |            |
| <b>6 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>   | <b>97</b>  |
| <b>6.1 - ANÁLISE DOS MÉTODOS EMPÍRICOS E DAS REFLEXÕES DE ONDA NO<br/>CALCULO DAS SOBREPRESSÕES.....</b>  | <b>97</b>  |
| <b>6.2 - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES AMBIENTES E DA<br/>PRESENÇA DE EDIFÍCIOS NAS PRESSÕES DA ONDA DE CHOQUE.....</b>   | <b>98</b>  |
| <b>6.3 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>   | <b>100</b> |
| <br>  |            |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>101</b> |
| <br>  |            |
| <b>REFERÊNCIAS CONSULTADAS.....</b>   | <b>103</b> |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 3.1- Relação de alguns explosivos e suas referências em TNT. Usmani (2012).....  | 12 |
| Tabela 3.2 - Propriedades do ar seco sob pressão atmosférica. Kinney e Graham (1985)..  | 16 |
| Tabela 3.3 - Classes de dano causadas por explosões nas estruturas. Kinney e Graham (1985).<br>.....  | 37 |
| Tabela 3.4 - Danos causados a edificações por diferentes sobrepressões incidentes. Applied<br>Technology Council (2003). .....  | 38 |
| Tabela 5.1 - Características dos pilares utilizados por Moon (2009) – Adaptado de Moon<br>(2009).....   | 55 |
| Tabela 5.2 - Propriedades do ar .....   | 57 |
| Tabela 5.3 - Propriedades do TNT. ....  | 57 |
| Tabela 5.4 - Propriedades do concreto .....   | 58 |
| Tabela 5.5 - Resultados para sobrepressões e tempos de duração da fase positiva da onda de<br>choque (ms), fornecidos pelo Autodyn, por Moon (2009) e outros autores.....                                       | 58 |
| Tabela 5.6 - Propriedades do ar .....   | 62 |
| Tabela 5.7 - Propriedades do TNT .....  | 62 |
| Tabela 5.8 - Resultado para sobrepressões, tempo de chegada (ms) e tempos de duração da<br>fase positiva da onda de choque (ms), obtidos neste trabalho, por Smith (1994) e outros<br>métodos de predição ..... | 63 |
| Tabela 5.9 - Resultados de sobrepressão e tempo de chegada da onda de choque para os<br>diferentes casos analisados .....   | 66 |
| Tabela 5.10 - Propriedades do ar.....   | 68 |
| Tabela 5.11 - Propriedades do TNT .....   | 69 |
| Tabela 5.12 - Propriedades do concreto .....  | 69 |
| Tabela 5.13 - Pressões máximas para os casos de uma explosão ao ar livre e anteparos a 2 m e<br>4 m do ponto de explosão .....  | 72 |
| Tabela 5.14 - Propriedades do TNT .....   | 74 |
| Tabela 5.15 - Propriedades do ar.....   | 74 |
| Tabela 5.16 - Casos analisados nas simulações .....   | 75 |
| Tabela 5.17- Valores da pressão inicial (ambiente), pressão máxima e sobrepressão da onda<br>de choque para os casos analisados (kPa).....  | 75 |
| Tabela 5.18 - Propriedades do ar.....   | 77 |

|   |    |
|---|----|
| Tabela 5.19 - Propriedades do TNT .....   | 78 |
| Tabela 5.20- Resultados em termos de temperatura final, variação de temperatura e pressão máxima para cada caso analisado.....                                    | 79 |
| Tabela 5.21- Propriedades do ar.....  | 81 |
| Tabela 5.22- Propriedades do concreto .....   | 81 |
| Tabela 5.23- Propriedades do TNT .....  | 82 |
| Tabela 5.24- Valores da pressão máxima (kPa) e tempo de chegada (ms) captados pelos sensores virtuais em cada um dos casos analisados .....                       | 85 |
| Tabela 5.25- Valores da pressão máxima (kPa) e tempo de chegada (ms) referentes aos sensores virtuais 2,3 e 5 das simulações do grupo 2 .....                     | 89 |
| Tabela 5.26- Valores da pressão máxima (kPa) e tempo de chegada da onda de choque (ms), coletados pelos sensores virtuais 2, 3 e 5 das simulações do grupo 3..... | 92 |
| Tabela 5.27- Propriedades do ar.....  | 94 |
| Tabela 5.28- Propriedades do concreto .....   | 94 |
| Tabela 5.29- Propriedades do TNT.....   | 95 |
| Tabela 5.30 - Valores da pressão máxima (kPa) e tempo de chegada da onda de choque (ms) das simulações analisadas.....  | 95 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.1 - Curva típica da pressão x distância de uma explosão. Kinney e Graham (1985)  | 17 |
| Figura 3.2 - Esquema das propriedades de uma onda de choque em movimento . Graham (2010)  | 18 |
| Figura 3.3 - Gráfico da pressão em função do tempo típica para uma onda de choque. Ngo (2007)   | 22 |
| Figura 3.4 - Esquema da propagação de uma onda de choque devido uma explosão acima do nível do solo. Le Blanc et. al. (2005)  | 24 |
| Figura 3.5 - Reflexões normais para ondas de choque ao nível do mar. Graham (2010)  | 25 |
| Figura 3.6 - Interação de uma onda de choque com uma superfícies, para diferentes sentidos de propagação. Mays (1995)   | 26 |
| Figura 3.7 - Interação de uma onda de choque atingindo uma superfície obliquamente. Mays (1995)   | 26 |
| Figura 3.8 - Interação de uma onda de choque com uma superfície para diferentes ângulos de incidência . Mays (1995)   | 27 |
| Figura 3.9 - Detonação de um dispositivo explosivo acima do nível do solo e as formas de propagação das ondas de choque. Silva (2007)   | 28 |
| Figura 3.10 - Carregamento impulsivo; carregamento $F(t)$ relacionado com a resposta do sistema $R(t)$ e seu tempo de resposta ( $t_d$ ). Smith (1994)  | 29 |
| Figura 3.11 - Comparativo entre as expressões utilizadas na determinação das sobrepressões; com a distância em escala $Z$ variando de $2 \text{ m/kg}^{1/3}$ a $6,6 \text{ m/kg}^{1/3}$                           | 34 |
| Figura 3.12 - Comportamento de uma estrutura submetida a uma onda de choque, Kinney e Graham (1985)   | 35 |
| Figura 3.13 - Esquema de uma explosão interna resultando em colapso progressivo. Van Acker et al (2012)   | 41 |
| Figura 3.14 - Consequências de uma explosão em meio urbano. Mays (1995)   | 43 |
| Figura 3.15 - Comportamento da propagação da onda de choque em estruturas com diferentes geometrias. Vê-se que a estrutura mostrada em “a)” apresenta um índice bem menor de reflexões quando comparada as demais | 44 |
| Figura 4.1 - a) Malha Lagrangeana; b) Malha Euleriana   | 47 |
| Figura 5.1 - Discretização do modelo  | 56 |
| Figura 5.2 - Sobrepressões da onda de choque nos sensores virtuais 1, 2 e 3   | 59 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.3 - Parâmetros da onda de choque para explosões advindas de cargas esféricas de TNT. Adaptado de Smith (1994). .....  | 60 |
| Figura 5.4 - Volume de ar discretizado por uma malha de 50 mm.....   | 61 |
| Figura 5.5 - Esquema do modelo utilizado para o estudo da propagação da onda de choque e a predição das pressões devido às reflexões oblíquas, Luccioni e Ambrosini (2005).....                              | 64 |
| Figura 5.6 - Malha utilizada na discretização do volume de ar .....  | 65 |
| Figura 5.7 - I) Obstáculos a 2m do epicentro; II) Obstáculos a 4m do epicentro; III) Obstáculos a 6m do epicentro IV) Obstáculos a 8m do epicentro .....   | 67 |
| Figura 5.8 - Modelo discretizado em malha de 50 mm e posicionamento dos sensores....   | 68 |
| Figura 5.9 - Gráfico da pressão em função do tempo de uma onda de choque gerada pela detonação de 50 kg de TNT. (Sensor 1) .....   | 70 |
| Figura 5.10 - Gráfico da pressão em função do tempo de uma onda de choque gerada pela detonação de 50 kg de TNT. (Sensor 3) .....  | 70 |
| Figura 5.11 - Gráfico da pressão em função do tempo de uma onda de choque gerada pela detonação de 50 kg de TNT. (Sensor 3) .....  | 71 |
| Figura 5.12 - a) Elemento utilizado na modelagem; b) Malha gerada para o modelo e posicionamento do sensor virtual.....  | 73 |
| Figura 5.13 - a) Elemento utilizado na modelagem; b) Malha gerada para o modelo e posicionamento do sensor virtual.....  | 77 |
| Figura 5.14 - I: Discretização do volume de ar envolvendo as edificações; II: Discretização das edificações simuladas e posição dos sensores virtuais.....   | 80 |
| Figura 5.15 - a) Edificações sem obstáculo para proteção; b) Obstáculo do tipo mureta rígida; c) Obstáculos prismáticos alternados; d) Obstáculo do tipo grade; .....  | 83 |
| Figura 5.16 - I) Esquema do obstáculo tipo mureta ; II) Esquema dos obstáculos prismáticos alternados; III) Esquema do obstáculo tipo grade.....   | 83 |
| Figura 5.17 - I: Esquema geral das edificações em que a linha azul indica as aberturas das janelas; II: Posicionamento dos sensores virtuais no modelo simulado.....   | 84 |
| Figura 5.18 - Esquema das edificações I e II dos modelos G1, G2 e G3 no Autodyn e posição dos sensores virtuais.....   | 86 |
| Figura 5.19 - Geometrias das aberturas da edificação I .....   | 87 |
| Figura 5.20 - Geometrias das aberturas da edificação II .....  | 88 |
| Figura 5.21 - Gráficos da pressão em função do de uma onda de choque, gerados pelo sensor 2 das simulações g1 e g2. Em vermelho, os picos de pressão da fase positiva; Em azul o pico da fase negativa ..... | 89 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.22 - Esquema dos modelos simulados no grupo 3. À esquerda, cotas principais; À direita o posicionamento dos sensores ..... | 91 |
| Figura 5.23 - Gráfico da pressão em função do tempo de uma onda de choque captada pelo sensor 2 no modelo Int. 2.....               | 92 |
| Figura 5.24 - Discretização das edificações simuladas .....   | 93 |

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

|             |  |
|-------------|--|
| $P_a$       | - Pressão absoluta   |
| $V$         | - Volume de um mol de gás ideal                            |
| $T$         | - Temperatura  |
| $R_m$       | - Constante molar dos gases                                |
| $v_m$       | - Volume expresso em unidades de massa                     |
| $R_{Ma}$    | - Constante molar dos gases expressa em unidades de massa  |
| $\rho$      | - Massa específica   |
| $Z_c$       | - Fator de compressibilidade                               |
| $C_v$       | - Calor específico a um volume constante                   |
| $C_p$       | - Calor específico a uma pressão constante                 |
| $\gamma$    | - Razão entre os calores específicos                       |
| $u$         | - Velocidade material                                      |
| $U$         | - Velocidade de deslocamento da onda de choque             |
| $E$         | - Energia total  |
| $P$         | - Pressão  |
| $\Delta P$  | - Sobrepressão   |
| $P_o$       | - Pressão atmosférica                                      |
| $\rho_0$    | - Massa específica inicial                                 |
| $u_0$       | - Velocidade material no ar ambiente                       |
| $C_0$       | - Velocidade do som no ar ambiente                         |
| $q$         | - Pressão dinâmica   |
| $\Delta Pr$ | - Sobrepressão refletida                                   |
| $T_a$       | - Tempo de chegada   |
| $T_d^+$     | - Duração da fase positiva                                 |
| $T_d^-$     | - Duração da fase negativa                                 |
| $I_s$       | - Impulso específico                                       |
| $e_i$       | - Energia interna  |
| $e_{im}$    | - Energia interna por unidade de massa                     |
| $Z$         | - Distância em escala                                      |
| $R$         | - Distância do ponto de detonação a um ponto de referência |
| $W$         | - Massa do Explosivo (TNT)                                 |

|               |   |
|---------------|---|
| $E_e$         | - Energia da Explosão   |
| $\omega$      | - Frequência de um sistema de um grau de liberdade  |
| $K$           | - Constante elástica  |
| $M$           | - Massa do sistema  |
| $R(t)$        | - Resposta da estrutura ao longo do tempo   |
| $T_{al}$      | - tempo de resposta da estrutura  |
| $F(t)$        | - Carregamento  |
| $T_n$         | - Período natural   |
| $H$           | - Altura da edificação  |
| $B_a$         | - Largura da edificação   |
| $Cr$          | - Coeficiente de reflexão   |
| $\alpha_i$    | - Ângulo de incidência  |
| $Ur$          | - Velocidade da onda refletida  |
| $\alpha_r$    | - Ângulo de reflexão  |
| $Inci$        | - Onda incidente  |
| $Refl$        | - Onda refletida  |
| $Mac$         | - Onda Mach   |
| $t$           | - Tempo   |
| $u_c$         | - Componente cartesiana de velocidade - Euler   |
| $\nabla$      | - Gradiente   |
| $v$           | - Componente cartesiano de velocidade - Lagrange  |
| $ve$          | - Volume específico do explosivo  |
| $p$           | - Pressão hidrostática  |
| $\rho_{0m}$   | - Massa específica inicial do material  |
| $C_1$         | - Constante determinada a partir de experimentos dinâmicos  |
| $C_2$         | - Constante determinada a partir de experimentos dinâmicos  |
| $r_1$         | - Constante determinada a partir de experimentos dinâmicos  |
| $r_2$         | - Constante determinada a partir de experimentos dinâmicos  |
| $\omega_{co}$ | - Constante determinada a partir de experimentos dinâmicos  |
| $V_{esp}$     | - Volume específico do material poroso  |
| $\alpha'$     | - Razão do volume específico do material poroso e o volume específico do material em estado sólido, para as mesmas condições de temperatura e pressão |

|                    |  |
|--------------------|--|
| $\rho'$            | - Pressão, equação de Mie-Gruneisen                  |
| $\mu$              | - Compressão, equação de Mie-Gruneisen               |
| $A_1$              | - Constantes do material, equação de Mie-Gruneisen   |
| $A_2$              | - Constantes do material, equação de Mie-Gruneisen   |
| $A_3$              | - Constantes do material, equação de Mie-Gruneisen   |
| $B_0$              | - Constantes do material, equação de Mie-Gruneisen   |
| $B_1$              | - Constantes do material, equação de Mie-Gruneisen   |
| $T_1$              | - Constantes do material, equação de Mie-Gruneisen   |
| $T_2$              | - Constantes do material, equação de Mie-Gruneisen   |
| $f_c$              | - Resistência a compressão do concreto não-confinado |
| $P_{spall}$        | - Resistência ao lascamento                          |
| $A_{con}$          | - Constante do material                              |
| $N$                | - Constante do material                              |
| $Y_{falha}$        | - Falha na superfície                                |
| $Y_{txc}$          | - Resistência ao longo do meridiano de compressão    |
| $F_{rate}$         | - Fator para análise no modelo RHT                   |
| $R_3$              | - Fator para análise no modelo RHT                   |
| $\dot{\epsilon}$   | - Frequência   |
| $\dot{\epsilon}_0$ | - Frequência inicial                                 |
| $\alpha_{con}$     | - Constantes do material                             |
| $\delta_{con}$     | - Constantes do material                             |
| $\theta_r$         | - Rotação ao redor do eixo hidrostático              |
| $Q_2$              | - Parâmetro para definição da redução da resistência |



# **1 - INTRODUÇÃO**

## **1.1 - INTRODUÇÃO**

As explosões nas suas mais diversas formas sempre acompanharam as civilizações. O potencial do conhecimento das propriedades e características das explosões e ondas de choque reside no fato da sua imensa utilidade nos mais diversos campos do conhecimento como na mineração, nas indústrias e na engenharia. Entretanto, uma aplicação segura das explosões está vinculada a um conhecimento profundo da física e da química do fenômeno que relacionam conceitos da termodinâmica, das equações de estado e das relações físico-químicas do material explosivo.

Atualmente, por motivos que variam de ameaças terroristas a acidentes ou mesmo utilização comercial (extração de determinada matéria prima ou demolição) o tema explosão vem ganhando muita importância nas áreas da engenharia civil, química, de minas, entre outras. Do risco à segurança das edificações e de seus usuários advém o interesse do estudo deste fenômeno pela engenharia civil.

A complexidade do fenômeno explosão é imensa e o seu alto grau de não-linearidade requer estudos constantes apoiados por desenvolvimentos experimentais, numéricos e analíticos. Pelo fato de existir um grande número de fatores que orientam o processo da explosão e das ondas de choque geradas, fazem-se necessárias análises contínuas de modo a permitir a identificação, em cada caso, dos fatores que mais influenciarão não apenas na explosão como na resposta da estrutura submetida a este tipo de ação.

Os recursos computacionais mais recentes auxiliam no estudo deste fenômeno. Estes amparam o projeto e desenvolvimento de estruturas mais resistentes e com leiautes mais bem elaborados para proteção de usuários ou materiais. Uma boa organização do leiaute interno pode facilitar a saída de gases aquecidos e evitar que as reflexões sucessivas impliquem na canalização da onda de choque. Projetos especiais podem levar em consideração a grande sobrecarga advinda das pressões da onda de choque tanto na fachada da edificação quanto em ambientes internos, o que envolve uma melhor qualidade dos materiais envolvidos nos elementos estruturais e um conhecimento profundo da dinâmica estrutural.

Na área das explosões, o estudo numérico da propagação da onda de choque em meios urbanos e da interação desta com obstáculos rígidos é alvo de importantes pesquisas e trabalhos, visto que através deste tipo de estudo é possível a execução de simulações que

melhor representem o fluxo dos gases aquecidos incidentes sobre as edificações e suas aberturas, considerando os efeitos das múltiplas reflexões de onda e fornecendo valores das sobrepressões em pontos importantes, que depois podem ser usados em um pós-processamento para a análise de algum elemento estrutural específico. Nesse âmbito pode se citar simulações realizadas por Birnbaum et al. (1996), Luccioni e Ambrosini (2005) e Mamrak (2011), entre outros. A simulação de edificações rígidas submetidas a uma explosão, para variados tipos de proteção, níveis de abertura e leiaute internos, associado a simulações prévias para o estudo dos principais fatores que influenciam a sobrepressão de uma onda de choque representam, em síntese, os objetivos deste trabalho.

Em linhas gerais, neste trabalho se apresenta um estudo das explosões realizado por meio de um software computacional baseado na fluidodinâmica computacional (CFD), o Autodyn ®. Esta ferramenta permite a avaliação de diversos parâmetros de uma explosão desde variações nas propriedades do explosivo utilizado a alterações na temperatura e pressão ambiente. Também permite o desenvolvimento de uma série de simulações que tornam possível o estudo da propagação da onda de choque pelo ar, a interação desta com superfícies rígidas e como a orientação dos obstáculos interfere na composição das pressões em determinados pontos. Para uma maior compreensão do fenômeno das explosões e ondas de choque em meios urbanos, além de uma análise crítica dos fatores envolvidos nesses processos, foi desenvolvido o presente trabalho.

## **1.2 - OBJETIVOS**

O objetivo geral do presente trabalho é estudar explosões em meios urbanos, por meio da fluidodinâmica computacional, identificando os principais fatores que caracterizam o fenômeno e analisando a influência deles na propagação das ondas de choque e nas pressões geradas em obstáculos rígidos. Como objetivos específicos pode se mencionar:

- Verificação da influência de propriedades ambientes como pressão e temperatura, na magnitude das pressões incidentes em estruturas próximas;
- Verificação da influência do efeito de canalização no valor das pressões incidentes em estruturas próximas;
- Estudo da eficiência de diferentes anteparos para proteção contra explosões, situados entre o epicentro e as edificações, quanto à redução das pressões incidentes;

- Estudo da eficiência de diferentes níveis de aberturas em edificações urbanas, quanto à redução nas pressões em ambientes internos, para uma explosão externa;

- Estudo da influência de alterações no layout das edificações na distribuição das pressões naqueles ambientes;

### **1.3 - METODOLOGIA**

Para este trabalho foi utilizada uma abordagem de caráter numérico em que foram desenvolvidas diversas simulações no software Autodyn®. A partir dos objetivos considerados foi realizada uma fundamentação em referências bibliográficas importantes na área das explosões e na tecnologia CFD.

A opção por uma abordagem numérica quando se estuda as explosões em meios urbanos está vinculada à considerável dificuldade de execução de experimentos em escala real. A utilização da tecnologia CFD, em especial a utilização do Autodyn, viabilizou o estudo da propagação da onda de choque e a interação com superfícies rígidas, fornecendo resultados quanto às sobrepressões e temperaturas. Vale salientar que esta tecnologia é largamente utilizada nas engenharias naval e aeroespacial. Comparando com outras nações o Brasil não apresenta muitos estudos na área das explosões em meios urbanos, ainda menos, a utilização de *softwares* como o Autodyn para simular a interação das ondas de choque com as edificações.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As explosões, pela sua importância para o ser humano, são alvos de constante estudo e pesquisa nas mais variadas áreas do conhecimento. No decorrer da história foram executados e apresentados inúmeros trabalhos que expandiram a fronteira do conhecimento nessa área. Com o aprimoramento das tecnologias, a partir das contribuições provenientes dos resultados empíricos e experimentais, foi possível o desenvolvimento de técnicas e modelos computacionais eficientes e sofisticados que atualmente auxiliam no estudo das explosões.

A utilização dos hidrocódigos e a modelagem por meio da dinâmica de fluidos computacional (CFD - computational fluid dynamics), tema de capítulos posteriores, representam atualmente as técnicas mais modernas de abordagem do problema das explosões. Em linhas gerais, este capítulo apresenta um apanhado de diversos trabalhos importantes na área das explosões, apresentando suas principais contribuições.

Glasstone et al. (1977) apresentaram em sua obra tópicos importantes sobre as explosões direcionando o estudo para a análise de explosões nucleares. No escopo deste trabalho se encontram informações relacionadas à descrição deste fenômeno, que variam desde explosões sobre a superfície, como em elevadas altitudes, até sob a água, discorrendo sobre os aspectos científicos relacionados ao fenômeno. O autor também aborda o tema do carregamento gerado pela onda de choque e os danos que podem ser causados nos mais variados tipos de estrutura, avaliando os fatores que afetam a resposta em cada caso. As implicações ocasionadas pela radioatividade da explosão nuclear também são apresentadas, assim como o pulso eletromagnético gerado e as consequências biológicas que uma explosão nuclear impõe ao organismo humano.

Kinney e Graham (1985) buscaram descrever e sintetizar o fenômeno explosão em todas as suas características enfatizando a importância do conhecimento do mesmo tanto para fins construtivos, como na construção do Canal do Panamá, quanto para o caso de fins malevolentes como no terrorismo. Os autores abordam o fenômeno explosão sob diferentes pontos de vista avaliando os processos químicos e físicos envolvidos, além de tratar sobre a formação da onda de choque e os métodos para considerar o carregamento advindo desta e a resposta das estruturas submetidas a explosões. Também citam maneiras de defender as estruturas contra explosões visando minimizar os efeitos destrutivos.

Uma grande equipe de engenheiros e pesquisadores contribuiu para a elaboração de um trabalho pelo Department of the Army, the Navy and the Air Force (1990) no qual o escopo se

baseia no projeto de estruturas para resistir aos efeitos de uma explosão. A obra contém uma vasta gama de informações acerca do fenômeno explosão que vai desde a predição das pressões por métodos analíticos até às implicações que este causa nas pessoas, equipamentos e nas estruturas. São apresentados estudos para a explosão, fragmentos e propagação da onda de choque, assim como da avaliação da resposta estrutural. No escopo da obra também há informações detalhadas para o projeto de estruturas em concreto armado e aço visando um melhor desempenho relativamente às cargas advindas de uma explosão.

Smith e Hetherington (1994) fizeram um levantamento de importantes características relativas ao estudo das explosões como, por exemplo, fundamentos da termodinâmica, misturas e compostos explosivos, descrição do processo de detonação, ondas de choque e parâmetros para o estudo da penetração e perfuração. No livro deles também é possível encontrar referências analíticas para o cálculo e a avaliação de explosões em diferentes meios de propagação como a água e em ambientes confinados, além de apresentar informações sobre a interação da onda de choque com o solo realizando uma descrição da propagação da onda através dos materiais geológicos e a influência destas em estruturas sob o solo (fundações ou instalações sob o solo). Também são apresentados os preceitos básicos da análise estrutural visando a obtenção da resposta de uma estrutura submetida a uma explosão, considerando casos diversos como, por exemplo, estruturas enterradas. Um capítulo desta obra se destina às técnicas de projeto existentes para o aprimoramento do desempenho das estruturas que poderão ser submetidas a uma explosão.

Mays e Smith (1995) apresentam as características e propriedades das explosões e se concentram nas relações que caracterizam a interação das explosões com as estruturas, enfatizando a importância de que os projetos levem em consideração métodos de projeto estrutural adequados, visando o aprimoramento da resposta da edificação. Os autores apresentam técnicas para projetos de estruturas ou reforço das existentes de modo a torná-las mais resistentes contra as explosões, sendo abordadas as formas das edificações e aspectos arquitetônicos, o projeto dos elementos estruturais, localização de equipamentos vitais e zonas de abrigo e projeto de elementos em aço e concreto armado.

Birnbaum et al. (1996) fizeram uma apresentação de ferramentas computacionais para análise de explosões como, por exemplo, Autodyn-2D, Autodyn-3D, BLAPAN entre outras e uma análise da interação de explosões com as estruturas em um meio urbano, dando ênfase às pressões atuantes nos edifícios. Os autores realizaram simulações de explosões em meios

urbanos, e os resultados numéricos foram comparados com algumas expressões propostas na literatura.

Fairlie (1998) trabalha a utilização de ferramentas numéricas para análise em duas e três dimensões da explosão de alto-explosivos. Para isso ele realiza simulações estudando a capacidade do hidrocódigo Autodyn-2D e 3D na modelagem de eventos envolvendo explosões.

Chock (1999) faz uma revisão dos métodos utilizados para o cálculo das pressões geradas por uma explosão a céu aberto buscando desenvolver um programa computacional para auxiliar no desenvolvimento destes cálculos. Utilizando o software NASTRAN em conjunto com o código BLAST.F foram desenvolvidas simulações envolvendo explosões em uma placa quadrada de alumínio.

Houghton e Carpenter (2003) apresentam em seu livro uma abordagem da aerodinâmica para estudantes de engenharia. A obra contém muitos conceitos básicos relativos ao estudo da aerodinâmica e fluidos em geral como velocidade do som, propriedades termodinâmicas, análise de fluidos compressíveis, propulsão, entre outros.

Através de um grupo de pesquisadores e estudiosos de diferentes áreas, o Applied Technology Council (2003) elaborou um documento com um grande número de informações referentes ao design de estruturas comerciais visando mitigar os efeitos de ataques terroristas. O trabalho apresenta uma abordagem geral sobre o fenômeno e potencialidade do risco envolvido, apresentando informações acerca do efeito das armas utilizadas pelos terroristas, a predição dos níveis de dano às edificações e a correlação disto com a segurança dos usuários, guias para o projeto arquitetônico e estrutural das edificações, abordando ainda métodos para proteção contra incidentes químicos, biológicos e radiativos.

Le blanc et al. (2005) apresentam em seu trabalho informações sobre simulações de explosões pelo software LS-DYNA. Descrevem algumas características da modelagem de explosões por este software.

Luccioni e Ambrosini (2005) fazem uma avaliação das pressões e impulsos oriundos de uma explosão utilizando hidrocódigos comparando os resultados obtidos de sua modelagem numérica com os provenientes de expressões analíticas. Foram analisados os efeitos do tamanho da malha na distribuição das pressões no modelo, sendo também executada uma análise da explosão ocorrida no atentado em AMIA.

Bangash e Bangash (2006) em seu livro retrata os efeitos de uma explosão sobre as edificações e os métodos para o estudo da resposta estrutural. O autor realiza um estudo de edificações resistentes a explosões com e sem o impacto de detritos e o efeito do fogo. Variados casos são analisados como, por exemplo, o atentado ao edifício Alfred P. Murrah e ao antigo World Trade Center. Os estudos realizados envolvem a resposta da estrutura e estratégias de combate ao incêndio, procedimentos de segurança, entre outros.

Casagrande (2006) realiza um estudo de cargas impulsivas com ênfase nas explosões, analisando a resposta de estruturas laminares utilizando-se de métodos simplificados. Estuda também os campos de pressão gerados pela detonação de um explosivo sólido sobre uma superfície e a propagação de ondas pelo solo, modelado como um meio elástico. É executado um experimento visando o estudo da propagação de ondas pelo solo onde os resultados são comparados com desenvolvimentos numéricos.

Black (2006) realizou uma modelagem numérica de uma explosão para estudar o carregamento gerado por esta sobre uma ponte. Seu trabalho também apresenta uma visão geral do hidrocódigo Autodyn, onde discute sobre as vantagens do seu uso como interface gráfica simplificada, capacidade de remapeamento, entre outras.

Ngo et al. (2007) apresentam um trabalho sobre o carregamento gerado por uma explosão e os efeitos sobre uma estrutura, apresentando uma visão geral do fenômeno. No escopo da obra são apresentadas uma visão geral das propriedades de uma explosão como distância em escala, tempo de chegada, fórmulas para predição das sobrepressões de uma onda, entre outras. É apresentado também o comportamento de alguns materiais sob elevadas tensões como, por exemplo, o concreto armado fazendo uma pequena comparação entre os níveis de tensão gerados por uma explosão com outros devido a fontes como terremotos, por exemplo. Apresentam ainda uma modelagem numérica e citam exemplos de softwares mais comumente utilizados no estudo de explosões.

Silva (2007) tratou dos efeitos de uma explosão sobre uma estrutura, além de descrever os principais aspectos pertinentes às reações químicas da detonação e os efeitos da onda de choque sobre os seres humanos.

Koccz et al. (2008) apresentam uma visão geral das teorias existentes para o aprimoramento da segurança das edificações contra explosões, abordando aspectos estruturais e arquitetônicos. Além dos conceitos básicos de uma explosão, como distância em escala, carga e tipo de explosivo, abordam a interação desta com as edificações como a influência do

número de aberturas em explosões confinadas, a alocação segura de edificações em um terreno e o planejamento adequado do leiaute visando a proteção contra explosões. São apresentadas também algumas informações quanto ao reforço da ligação viga-pilar para estruturas de aço e de concreto armado submetidas a uma onda de choque.

Krehl (2009) faz um levantamento de informações históricas importantes sobre as pesquisas na área de explosões e outras afins, detalhando de uma maneira cronológica os eventos referentes às pesquisas, às descobertas analíticas e experimentos que tiveram grande influência nesses estudos. Na obra também consta uma galeria com imagens importantes retratando inúmeros fatos relacionados à pesquisa na área de explosões, como por exemplo, imagens dos primeiros dispositivos para visualização da onda de choque.

Moon (2009) mostra as relações das ondas de choque com as estruturas. É feita a análise computacional da resposta de pilares submetidos a um carregamento dinâmico proveniente de uma explosão, por meio do método de elementos finitos. Também são analisados diferentes tipos de pilar sem e com reforço contra terremotos submetidos a uma explosão muito próxima, semelhante à do atentado em Oklahoma.

Graham (2010) contribui muito para o entendimento das explosões em sua obra com informações relativas ao estudo da propagação da onda de choque gerada por uma explosão através do ar. Ao longo deste livro é possível observar a grande importância dos modelos numéricos e experimentais para o estudo das explosões. Além de fazer uma introdução ao estudo das ondas de choque mostrando as relações de Rankine-Hugoniot e as equações de estado, o livro apresenta informações quanto ao estudo experimental de explosões a céu aberto descrevendo técnicas de medição de sobrepressão, massa específica do fluido (ar) e velocidade da onda entre outros. Também é descrito o fenômeno de reflexão de ondas, apoiado por imagens de experimentos relacionados (algumas imagens capturadas por interferometria laser).

Luccioni e Ambrosini (2010) fazem uma descrição breve das principais leis de escala para o estudo das explosões. Apresentam uma avaliação da aplicabilidade dessas leis e a precisão das análises numéricas em modelos de explosão em escala reduzida.

Mamrak (2011) discorre em seu trabalho sobre a propagação das ondas de choque considerando obstáculos rígidos. Por meio da ferramenta computacional Abaqus, ele desenvolve uma análise do tamanho adequado das malhas para estudo das explosões e executa um estudo das sobrepressões oriundas de uma onda de choque sobre uma edificação.

Vijayaraghavan et al. (2012) apresentam um estudo sobre as pressões geradas por uma explosão de um dispositivo nuclear, abordando os efeitos sobre as estruturas e seus residentes. Pelo fato das explosões nucleares serem bem mais poderosas e destrutivas que as causadas por explosivos sólidos, pois envolvem uma quantidade muito maior de energia por massa de explosivo, o seu modelo leva em consideração informações geográficas da região para prever as zonas danificadas pela explosão. Estas zonas compunham uma cidade fictícia desenvolvida pelo próprio autor.

Draganić e Sigmund (2012) estudam o carregamento imposto sobre uma estrutura advindo de uma explosão. O estudo visava, além de uma contribuição para o conhecimento na área, a familiarização dos projetistas com a carga proveniente de uma explosão visto que em muitos países não há diretrizes que façam a regulamentação da verificação de estruturas potencialmente expostas a este fenômeno. Para isto desenvolvem numericamente o problema de um edifício fictício de 6 pavimentos submetido a diferentes cargas de explosivos (1kg, 10kg e 100kg de TNT).

Usmani (2012) publica um estudo onde apresenta uma visão geral sobre o fenômeno das explosões associado a informações relacionadas a modelos arquitetônicos adequados, gestão de recursos e respostas a emergências. Em seu trabalho apresenta aspectos interessantes inerentes ao estudo das explosões como a conversão de determinados explosivos em TNT equivalente e a avaliação das consequências de uma explosão no meio e nas pessoas, através de modelagem numérica.

Van Acker et al (2012) apresentam um trabalho sobre o projeto de estruturas de concreto submetidas a cargas acidentais submetidas a carregamentos provenientes de uma explosão. A obra apresenta informações acerca das considerações de carregamento, coeficientes de segurança, análise de risco e normas. No âmbito das explosões, ele apresenta formas de se avaliar o risco de colapso progressivo das estruturas.

Abdelalim (2013) faz uma avaliação da mitigação dos danos de uma explosão através da utilização de escudos ventilados supressivos através de uma abordagem experimental e numérica utilizando CFD's (Dinâmica computacional de fluidos). Seu trabalho apresenta informações gerais sobre o fenômeno explosão, como carga de explosivo, tempo de chegada, distância em escala e sobre as características e princípios da modelagem utilizando a tecnologia CFD's.

A partir do que foi exposto, observa-se a importância do estudo das explosões e das ondas de choque para a ciência. Neste trabalho, foi realizado um conjunto de simulações numéricas através do hidrocódigo Autodyn permitindo o estudo de características importantes das ondas de choque e de sua interação com edificações rígidas.

### **3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### **3.1 - FUNDAMENTOS DO ESTUDO DAS EXPLOSÕES**

As explosões são fenômenos caracterizados por uma liberação repentina de energia e podem ocasionar grandes desastres. Quando a céu aberto, são responsáveis por deslocar um grande volume de gases, além de impor mudanças bruscas de temperatura e pressão. As explosões costumam ser classificadas de acordo com a sua natureza em três tipos: as mecânicas, as químicas e as nucleares.

As explosões mecânicas são caracterizadas por uma liberação repentina de energia devido a grandes diferenciais de pressão como, por exemplo, a que ocorre quando acontece a ruptura de um recipiente de gases comprimidos. Explosões deste tipo acontecem, basicamente, quando o invólucro utilizado para conter o material sob alta pressão, não resiste mais aos esforços internos e rompe-se. Erupções vulcânicas também são consideradas como explosões mecânicas.

As explosões químicas são oriundas das reações físico-químicas de combustão nas quais a liberação súbita de energia é proveniente de uma velocidade de reação extremamente alta e, como produto, altas pressões e elevações bruscas de temperatura são geradas. A energia liberada na combustão possui dois mecanismos de propagação que dão prosseguimento à reação, a deflagração e a detonação.

A deflagração pode ser entendida como um processo de combustão lenta, ou seja, é um fenômeno térmico que origina calor e luz no qual a velocidade de propagação da reação dá-se por transferência de calor, os elementos vão sendo inflamados a uma velocidade inferior à do som no gás de modo que não originam ondas de choque, Krehl (2009). Por outro lado, a detonação é uma reação explosiva que produz uma onda de choque que se propaga a uma velocidade supersônica. Os explosivos químicos que originam explosões mediante uma detonação são conhecidos como “alto explosivos” ou explosivos de detonação, podendo se citar como exemplo o TNT.

As explosões nucleares são responsáveis por liberações de grandes quantidades de energias caloríficas e de radiação, além de serem responsáveis por ondas de choque extremamente poderosas. Estas são geradas a partir dos processos de fissão ou fusão nuclear, onde são responsáveis pela criação de partículas  $\alpha$  e  $\beta$  além de raios X e gamma. As temperaturas geradas no epicentro podem superar dezenas de milhares de graus. As explosões nucleares

apresentam o maior potencial destrutivo dentre os tipos apresentados, entre outros fatores, por apresentar uma maior relação de energia liberada por massa de explosivo do que os demais. Com relação à distribuição típica de energia de uma explosão nuclear sobre a superfície, pode-se apontar que cerca de 50% da energia gerada é direcionada à geração da onda de choque enquanto o resto se divide na propagação da radiação térmica e de radiação nuclear residual, Graham (2010).

A magnitude de uma explosão é estabelecida de acordo com o total de energia liberada, comumente expressa em Joules (J). Para estudos que envolvem as energias das explosões, devido ao grande número de experimentos e dados coletados envolvendo este explosivo, é aceitável a utilização de um “equivalente de TNT”. Este equivalente permite uma definição da energia dos mais variados tipos de explosivos em relação ao TNT que é de mais fácil produção e utilização em ensaios.

De um modo geral, as explosões nucleares são mensuradas por kilotons ( $10^3$  toneladas de TNT) ou megatons ( $10^6$  toneladas de TNT), sendo referentes à massa de TNT envolvida. Na Tabela 3.1 são apresentadas as equivalências de TNT de alguns explosivos.

Tabela 3.1 - Relação de alguns explosivos e suas referências em TNT. Usmani (2012)

| Explosivo      | TNT<br>Factor |
|----------------|---------------|
| TNT            | 1             |
| C4             | 1,18          |
| Pólvora        | 0,55          |
| Nitroglicerina | 1,50          |
| RDX            | 1,60          |

As explosões também podem receber uma classificação de acordo com o local onde a mesma ocorreu podendo ser sobre a superfície ou céu aberto, sub-aquáticas, as de altas-altitudes e subterrâneas. Elas também possuem diferentes categorias de acordo com o nível de confinamento da carga de explosivo, sendo tratadas como confinadas quando a explosão se dá em um ambiente com muitos anteparos ou obstáculos de modo que a onda de choque colide de imediato com muitas superfícies e como não-confinadas quando acontecem a céu aberto onde a onda de choque se propaga livremente a partir do epicentro até colidir com algum sólido, Department of the Army, the Navy and the Air Force (1990). O que basicamente influencia nas classificações apresentadas é o meio onde ela aconteceu e a forma com que a energia é dispersa que implica, por exemplo, em maneiras diferentes para a propagação do calor ou da onda de choque naquele meio.

Este trabalho está focado nas explosões químicas causadas por alto-explosivos.

O estudo dos explosivos é importante, pois auxilia na definição das pressões geradas pelas ondas de choque. Existe uma categorização quanto à massa equivalente em TNT de alto-explosivos apresentada por Bangash e Bangash (2006), que permite definir a magnitude do problema em análise.

- Pequenas cargas de explosivo: Até 5kg de TNT

- Médias cargas de explosivo: de 5kg a 20kg de TNT

- Grandes cargas de explosivo/bombas: de 20kg a 100kg de TNT

- Imensas cargas de explosivos/bombas: a partir de 200kg até 2500kg TNT

## **3.2 - PROPAGAÇÃO DAS EXPLOSÕES**

### **3.2.1 - Considerações para o estudo das ondas de choque**

No estudo das explosões é de fundamental importância o conhecimento do meio de propagação. Uma avaliação mais precisa deste fenômeno se dá a partir do conhecimento de uma série de fatores e propriedades relativas ao meio em que a energia se propaga, por exemplo, explosões sub-aquáticas desencadeiam bolhas que se deslocam pelo fluido, enquanto nas a céu aberto a dispersão da massa gasosa tende a originar ondas de choque. No estudo das explosões a céu aberto, que engloba as simulações realizadas neste trabalho, são realizadas considerações quanto às propriedades físico-químicas do ar que é tomado como um

gás ideal. Estas considerações são citadas por algumas bibliografias como Graham (2010) e Kinney e Graham (1985) e serão descritas neste capítulo.

O conceito de gás ideal é um modelo idealizado cujas partículas movem-se arbitrariamente e possuem relações intermoleculares desprezíveis para efeitos de cálculo. Esta simplificação da condição real dos gases permite a aplicação das equações de estado e o atendimento da lei dos gases ideais.

Uma das considerações adotadas para o estudo das explosões ao ar livre é atribuir ao ar as características e propriedades de um gás ideal. Com isso, é possível obter a equação de estado (3.1) apresentada por Kinney e Graham (1985) que relaciona a temperatura, a pressão e o volume e baseia-se em importantes leis da química e da física dos fluidos como a Boyle, Charles e Gay-Lussac.

$$P_a V = R_m T \quad (3.1)$$

onde:

- $P_a$ : Pressão absoluta
- $V$ : Volume de um mol de gás ideal
- $T$ : Temperatura
- $R_m$ : Constante molar dos gases

Esta equação também pode ser escrita conforme (3.2), onde  $V$  e  $R_m$  passam a ser expressos por unidade de massa. Quando o problema envolve o trabalho com efeitos inerciais e velocidade esta configuração é a mais adequada.

$$P_a v_m = R_{Ma} T \quad (3.2)$$

onde:

- $v_m$ : volume do gás expresso em unidades de massa
- $R_{Ma}$ : constante molar dos gases expressa em unidades de massa

É importante salientar que estas equações de estado, apesar de serem bastante úteis nos estudos, são uma simplificação do que ocorre na realidade, visto que o ar é uma composição complexa de diferentes gases, portanto o ar é considerado como um gás ideal nos cálculos, mas na natureza ele se apresenta como um gás real. Os gases reais estão sujeitos a efeitos de compressibilidade, transição de fase, interações entre suas moléculas e condições como as forças de Van der Waals, Krehl (2009), tornando bastante difícil a obtenção de sua equação de

estado. Para se mensurar o tamanho da divergência de um gás real para um gás ideal pode se utilizar a fórmula do fator de compressibilidade ( $Z_c$ ), como mostra a equação (3.3), conforme Kinney e Graham (1985):

$$Z_c = \frac{P_a V}{R_{Ma} T} \quad (3.3)$$

onde:

-  $Z_c$ : Fator de compressibilidade

$Z_c$  mensura a extensão dos desvios de um gás real para com a lei dos gases ideais. Um  $Z_c$  igual a 1 indica que o gás real analisado pode ser tomado como um gás ideal.

Entre algumas hipóteses para se considerar o ar como gás ideal toma-se a capacidade calorífica do mesmo como sendo efetivamente constante.

Para se descrever a física envolvida na geração e propagação de ondas de choque pelo ar é necessário, além do conhecimento sobre os gases ideais, informações sobre alguns parâmetros e conceitos termodinâmicos, como o do calor específico e a razão entre os calores específicos.

Basicamente, o calor específico de um dado material consiste na quantidade de calor necessária para se elevar a temperatura do mesmo em uma unidade. Com relação a isso pode-se determinar duas outras importantes propriedades termodinâmicas, sendo estas advindas do aquecimento a um volume constante ou uma pressão constante.

Quando se adiciona calor a um sistema onde há uma quantidade fixa de massa e o seu volume não sofre alterações, este aquecimento apenas aumentará a temperatura do sistema incrementando a energia interna do mesmo. Portanto, ao se manter o volume constante, a quantidade de calor inserida por unidade de massa para se aumentar a temperatura em uma unidade define o calor específico a um volume constante,  $C_v$ .

De forma semelhante, pode se definir também o calor específico a uma pressão constante,  $C_p$ . Baseando-se no conceito apresentado por Houghton e Carpenter (2003),  $C_p$  é definido como a quantidade de calor necessária para incrementar a temperatura de uma unidade de massa de um gás em um grau, considerando a pressão do gás constante durante o aquecimento.

A razão dos calores específicos,  $\gamma$ , se define como a razão entre o calor específico a uma pressão constante,  $C_p$ , e o calor específico a um volume constante,  $C_v$ , equação (3.4). É um valor sempre superior a 1 visto que  $C_p$  é sempre maior que  $C_v$ .

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (3.4)$$

A partir de uma série de experimentos onde se trabalhou com temperaturas de 200 K até 400 K, foram encontrados  $\gamma$  do ar, oscilando entre 1,406 e 1,398. Por conta desta pequena variação do  $\gamma$ , em relação ao conjunto de temperaturas analisadas, as literaturas costumam adotar  $\gamma$  igual a 1,4. A Tabela 3.2 apresenta valores da capacidade calorífica para algumas temperaturas.

De uma maneira qualitativa atribui-se ao  $\gamma$  a capacidade de mensurar a eficiência potencial do gás em converter a energia sendo adicionada ao mesmo em trabalho. Isso se exemplifica pelo fato de que quando um gás é mantido a pressão constante a energia utilizada na expansão do mesmo também o aquece.

Tabela 3.2 – Propriedades do ar seco sob pressão atmosférica. Kinney e Graham (1985)

| Temperatura | Velocidade do som à pressão constante | Capacidade calorífica |                            |
|-------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
|             |                                       | Calor Específico      | Razão ( $\gamma$ )         |
| K           | m/s                                   | J/g.K                 | $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ |
| 250         | 317,1                                 | 1,005                 | 1,404                      |
| 260         | 323,4                                 | 1,005                 | 1,403                      |
| 280         | 335,6                                 | 1,006                 | 1,402                      |
| 288,15      | 340,4                                 | 1,006                 | 1,402                      |
| 290         | 341,5                                 | 1,006                 | 1,402                      |
| 310         | 353,1                                 | 1,007                 | 1,401                      |
| 320         | 358,7                                 | 1,007                 | 1,401                      |

### 3.2.2 - Ondas de choque

Quando uma grande quantidade de energia é liberada de maneira repentina em um dado volume, se a velocidade de expansão desta energia superar a velocidade do som neste meio, uma onda de choque será gerada, Graham (2010).

Os primeiros instantes após a detonação de um explosivo a céu aberto são caracterizados por um incremento brusco na temperatura e na pressão na região próxima ao ponto de explosão. A energia liberada pela explosão passa a se propagar pelo ar, radialmente em todas as direções a partir do epicentro, na forma de calor e pela onda de choque gerada.

Durante a propagação da onda de choque pelo ar, parcelas de energia vão sendo perdidas ao longo da distância percorrida. Este fenômeno pode ser mensurado pela redução expressiva das pressões com o incremento da distância, conforme mostra a Figura 3.1. Nela as indicações (1), (2), (3) e (4) apontam a redução da pressão em diferentes distâncias e intervalos de tempo sucessivos.

Na figura 3.1, além do decaimento das pressões da onda de choque com a distância, existe uma fase de pressão negativa (sucção), esta fase será mais bem detalhada em tópicos posteriores.

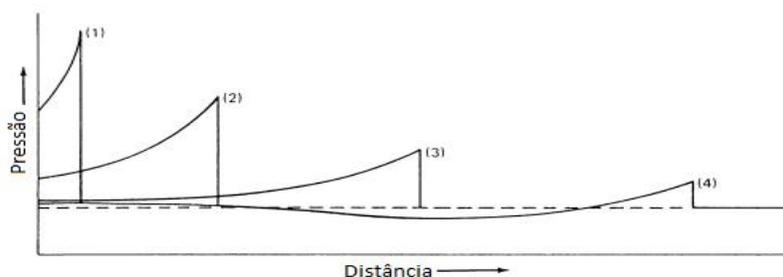


Figura 3.1 - Curva típica da pressão x distância de uma explosão. Kinney e Graham (1985)

As elevadas pressões de uma onda de choque podem ser bastante danosas às edificações. Entretanto, apesar da complexidade do fenômeno, pode-se realizar uma estimativa simplificada dos danos, adotando as pressões de pico para este estudo.

Ondas de choque provenientes de explosivos detonados ao ar livre, comumente chamadas nas literaturas de “blast waves”, possuem uma série de parâmetros importantes a serem avaliados durante sua expansão pelo ar (Bangash e Bangash, 2006). Entre eles podem-se citar pressão, temperatura, massa específica (visto que o aquecimento insere novas condições nas relações moleculares) e a velocidade de propagação da onda.

Para se descrever as equações que representam este fenômeno são utilizadas as relações de Rankine-Hugoniot, que consistem, basicamente, em expressões para conservação de massa, quantidade de movimento e energia, Graham (2010). Considerando que as ondas podem ter diversas configurações de propagação é importante salientar que as leis de conservação se aplicam a um número qualquer de dimensões.

A descrição dos parâmetros básicos de uma onda de choque, pode ser realizada utilizando um conjunto de expressões que relacionam a conservação de massa, quantidade de movimento e energia, definidas por Rankine-Hugoniot para um dado fluxo, como apresentado na Figura 3.2 e nas equações de conservação de massa (3.5), conservação de quantidade de movimento (3.6), Equação de estado (3.7) e conservação de energia (3.8):

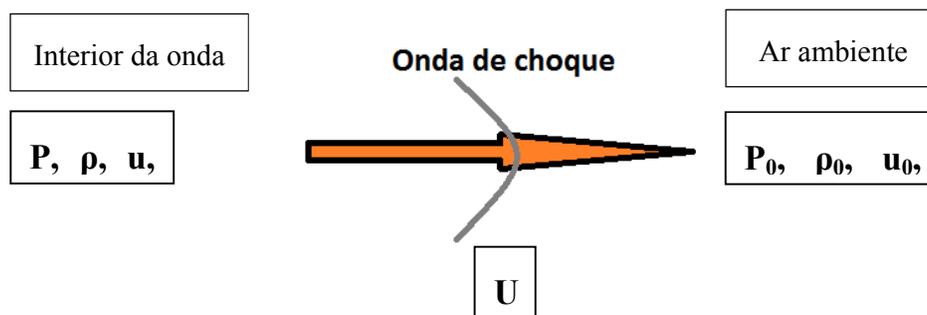


Figura 3.2 - Esquema das propriedades de uma onda de choque em movimento .

Graham (2010)

$$\rho(U - u) = \rho_0 U \quad (3.5)$$

$$P - P_0 = \rho_0 U u \quad (3.6)$$

$$P = (\gamma - 1)\rho E \quad (3.7)$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2}(P + P_0) \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \quad (3.8)$$

Onde:

P: é a pressão

$\rho$ : é massa específica do gás

u: é a velocidade material (velocidade do fluido)

U: é a velocidade de deslocamento da onda de choque

E: é a energia

As equações acima são referentes à conservação de massa, quantidade de movimento, estado e energia, respectivamente. Os parâmetros com índices 0 ( $P_0$ ,  $\rho_0$ , por exemplo) fazem referência às condições do ambiente, enquanto os demais são relativos à expansão gasosa por trás da onda de choque.

Outro parâmetro importante é o que define a sobrepressão ( $\Delta P$ ) gerada pela onda, conforme mostra a equação (3.9) abaixo:

$$\Delta P = P - P_0 \quad (3.9)$$

onde:

$\Delta P$ : sobrepressão

P: é a pressão

$P_0$ : é a pressão ambiente

Utilizando-se da razão de calores específicos  $\gamma$ , e associando-a às relações de Rankine-Hugoniot é possível definir basicamente qualquer parâmetro da onda, por exemplo, a massa específica, equação (3.10):

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{2\gamma + (\gamma + 1) \frac{\Delta P}{P_0}}{2\gamma + (\gamma - 1) \frac{\Delta P}{P_0}} \quad (3.10)$$

Para se definir a velocidade da onda, pode-se combinar as equações (3.5), (3.6) e (3.10). Organizando os termos de (3.6) e substituindo em (3.5):

$$u = \frac{\Delta P}{\rho_0 U}$$

$$\frac{P}{P_0} \left(1 - \frac{\Delta P}{\rho_0 U^2}\right) = 1$$

Aplicando a equação do parâmetro massa específica (3.10) na equação anterior:

$$U^2 = \frac{\Delta P (2\gamma + (\gamma + 1) \frac{\Delta P}{P_0})}{\rho_0 \frac{2 \Delta P}{P_0}}$$

$$U^2 = \left(\frac{P_0 \gamma}{\rho_0}\right) \left(1 + \frac{(\gamma + 1) \Delta P}{2\gamma P_0}\right) \quad (3.11)$$

Sendo a velocidade do som ( $C_0$ ) no ambiente dada pela equação (3.12), a seguir:

$$C_0 = \sqrt{\frac{P_0 \gamma}{\rho_0}} \quad (3.12)$$

resulta:

$$U = C_0 \sqrt{\left(1 + \frac{(\gamma + 1) \Delta P}{2\gamma P_0}\right)} \quad (3.13)$$

onde:

-U: velocidade da onda

A partir disso pode se definir também a velocidade das partículas atrás da onda de choque, também conhecida como velocidade material, tomando a equação (3.6) e aplicando nela a (3.13), obtém-se a (3.14):

$$u = \frac{\Delta P}{\rho_0 C_0 \sqrt{\left(1 + \frac{(\gamma + 1) \Delta P}{2\gamma P_0}\right)}} \quad (3.14)$$

Multiplicando-se o numerador e o denominador pela velocidade do som:

$$u = \frac{\Delta P}{P_0 C_0 \sqrt{\left(1 + \frac{(\gamma + 1) \Delta P}{2\gamma P_0}\right)}} \frac{C_0}{C_0}$$

$$u = \frac{C_0 \Delta P}{\rho_0 \frac{P_0 \gamma}{\rho_0} \sqrt{\left(1 + \frac{(\gamma + 1) \Delta P}{2\gamma P_0}\right)}}$$

Logo:

$$u = \frac{\Delta P}{\gamma P_0} \frac{C_0}{\sqrt{\left(1 + \frac{(\gamma + 1)\Delta P}{2\gamma P_0}\right)}} \quad (3.15)$$

onde:

-u: velocidade material

Neste âmbito é possível caracterizar a pressão dinâmica ou vento (q) que é causada pela agitação das moléculas do gás resultando em seu deslocamento, o que ocasiona pressões. Para se obtê-lo, pode-se utilizar a equação (3.16), abaixo:

$$q = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (3.16)$$

Esta equação pode ser dada em função das pressões e do  $\gamma$ , logo substituindo em (3.16) a equação (3.10) e a (3.15), tem-se:

$$q = \frac{1}{2} \left( \frac{2\gamma + (\gamma + 1) \frac{\Delta P}{P_0}}{2\gamma + (\gamma - 1) \frac{\Delta P}{P_0}} \rho_0 \right) \left( \frac{\Delta P}{\rho_0 C_0 \sqrt{\left(1 + \frac{(\gamma + 1)\Delta P}{2\gamma P_0}\right)}} \right)^2$$

$$q = \frac{1}{\frac{\rho_0 C_0^2}{\gamma}} \frac{\Delta P^2}{2\gamma + (\gamma - 1) \frac{\Delta P}{P_0}}$$

Aplicando a equação (3.12) na expressão acima, obtém-se (3.17):

$$q = \frac{\Delta P^2}{2P_0\gamma + (\gamma - 1)\Delta P} \quad (3.17)$$

Uma importante propriedade das ondas de choque é a sobrepressão refletida. A equação a seguir (3.18) apresentada por Graham (2010), define a sobrepressão refletida para o caso mais simples, onde há uma colisão frontal entre a onda de choque e uma superfície:

$$\Delta Pr = 2\Delta P + (\gamma + 1)q \quad (3.18)$$

Esta equação representa a sobrepressão refletida na frente da onda de choque ( $\Delta Pr$ ), a mesma ocorre quando a onda encontra uma superfície sólida e perpendicular ao seu sentido de propagação, o que ocasiona a reflexão com máximo valor. Pelo apresentado em tópicos anteriores, pode-se adotar um  $\gamma$  igual a 1,4, com isso a partir da equação anterior:

$$\Delta Pr = 2\Delta P + \frac{12}{5}q \quad (3.19)$$

Substituindo (3.17) em (3.19), obtém-se (3.20):

$$\Delta Pr = 2\Delta P \left( \frac{7 + 4 \frac{\Delta P}{P_0}}{7 + \frac{\Delta P}{P_0}} \right) \quad (3.20)$$

Pode-se observar que para qualquer arranjo de valores da pressão ambiente ( $P_0$ ) e, por conseguinte, da sobrepressão incidente ( $\Delta P$ ) o valor da sobrepressão refletida sempre apresentará um acréscimo com relação a que atingiu a superfície. Esta importante característica das ondas de choque e suas respectivas consequências serão mostradas em tópicos mais avançados.

### 3.2.3 - Fundamentos de uma onda de choque

Quando se estuda as explosões é imprescindível o desenvolvimento do gráfico da pressão em função do tempo para uma onda de choque. Com este gráfico se torna possível a definição de vários parâmetros importantes como, por exemplo, tempos de chegada, tempos de duração, sobrepressão máxima, entre outros. A análise destas características permite, não só apenas um estudo mais detalhado da onda de choque, como a interação desta com estruturas ou alvos quaisquer. Um diagrama típico da pressão em função do tempo de uma onda de choque pode ser visto na Figura 3.3.

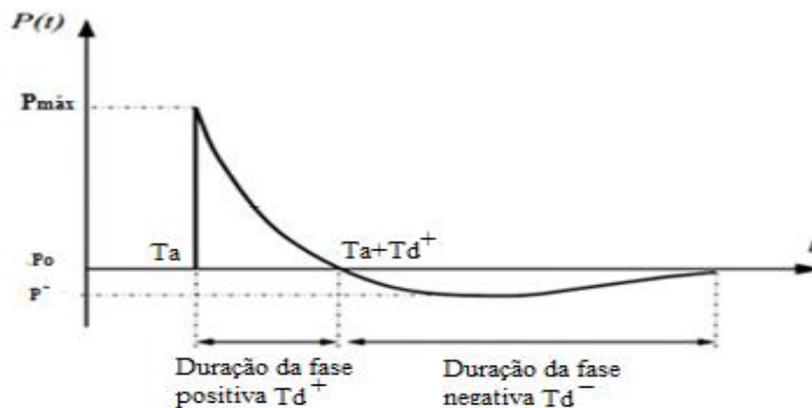


Figura 3.3 - Gráfico da pressão em função do tempo típica para uma onda de choque. Ngo (2007).

A figura anterior apresentou vários parâmetros relativos ao estudo das ondas de choque:

Ta ou arrival time: Também conhecido como tempo de chegada, define o tempo decorrido do início da explosão até que a onda de choque atinja um determinado ponto.

Td<sup>+</sup> ou Duration time<sup>+</sup>: Também conhecido como tempo de duração da fase positiva da onda, ele tem início quando a onda de choque atinge o ponto de análise (Ta) e permanece ao longo da fase positiva até o início da fase negativa da onda. O tempo de duração da fase positiva, juntamente com as pressões que caracterizam esta fase, são utilizados no estudo do pulso.

Td<sup>-</sup> ou Duration time<sup>-</sup>: Conhecido como tempo de duração da fase negativa da onda de choque, ele tem início ao fim da fase positiva da onda e permanece até que as pressões decorrentes da onda de choque se estabilizem com a ambiente. Quanto ao tempo de duração das fases da onda de choque, segundo Silva (2007), o tempo de duração da fase positiva da onda é cerca de ¼ do Td<sup>-</sup>.

P<sub>máx</sub> ou pressão máxima: É a pressão máxima da fase positiva, caracterizada pelo pico de pressão que ocorre quando a onda de choque atinge um determinado ponto de análise.

Po ou pressão ambiente: É a pressão de referência do ambiente onde ocorreu a explosão, em situações normais de temperatura e pressão possui um valor de 101,3 kPa.

P<sup>-</sup> ou pressão máxima da fase negativa: É a pressão máxima atingida durante a fase negativa, possui valor bem inferior ao da pressão máxima da fase positiva. As pressões da fase negativa geralmente possuem uma grandeza muito baixa, servindo apenas para arrastar os detritos oriundos da primeira colisão da onda de choque com o alvo.

É importante salientar que a diferença entre a pressão máxima (P) e a pressão ambiente (Po) caracteriza a sobrepressão ( $\Delta P$ ).

#### **3.2.4 – Conceitos básicos dos efeitos de reflexão das ondas de choque**

Quando uma onda de choque encontra uma superfície sólida ou algum obstáculo constituído de um meio bem mais denso que aquele em que ela se desloca e que oferece resistência a sua propagação, a mesma será refletida. Com isso pode-se observar que estruturas podem refletir as ondas de choque nela incidentes assim como o solo, como mostra a Figura 3.4, caso a detonação tenha ocorrido com certa altura.

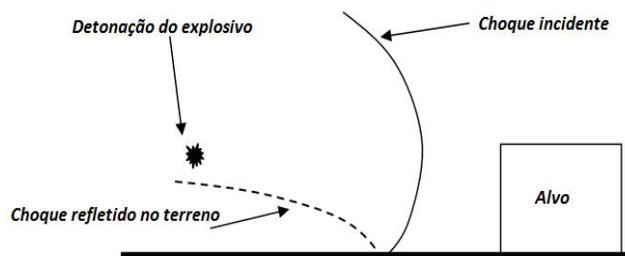


Figura 3.4 - Esquema da propagação de uma onda de choque devida a uma explosão acima do nível do solo. Le Blanc et. al. (2005)

A reflexão de ondas de choque é um fenômeno complexo que engloba inúmeros fatores e parâmetros, de modo que a determinação do valor da pressão da onda de choque refletida é de difícil obtenção. Para facilitar a análise deste fenômeno, se divide a reflexão em três tipos básicos:

- Reflexão normal;
- Reflexão oblíqua;
- Reflexão Mach;

Basicamente, a reflexão normal ocorre quando a superfície da onda de choque é paralela à superfície em que ela incide, ou seja, a reflexão da onda ocorre com um ângulo zero de incidência. Logo, pode-se concluir que a reflexão normal trata do produto de um choque frontal de uma onda com uma superfície.

Para este tipo de reflexão pode-se utilizar as formulações de Rankine-Hugoniot. Adotando uma propagação no meio ar, onde o  $\gamma$  pode ser considerado 1,4, chega-se a equação (3.21):

$$\Delta Pr = 2\Delta P \left( \frac{7P_0 + 4\Delta P}{7P_0 + \Delta P} \right) \quad (3.21)$$

Buscando relacionar diretamente a sobrepressão refletida com a incidente, pode-se atribuir valores extremos para pressão ambiente em comparação com a sobrepressão, como pode ser visto a seguir:

$$\begin{aligned} \Delta Pr &= 2\Delta P && \text{quando } P_0 \gg \Delta P \\ \Delta Pr &= 8\Delta P && \text{quando } P_0 \ll \Delta P \end{aligned}$$

Observa-se que um choque frontal pode originar, teoricamente, ondas refletidas de duas a oito vezes maiores que a incidente. A partir disso, é possível definir um importante parâmetro

advindo da razão da sobrepressão refletida sobre a sobrepressão incidente, essa razão caracteriza o coeficiente de reflexão ( $C_r$ ) como mostrado na equação (3.22):

$$C_r = \frac{\Delta P_r}{\Delta P} \quad (3.22)$$

O ábaco da Figura 3.5 apresenta uma relação do coeficiente de reflexão normal e a sobrepressão incidente, nele é possível observar curvas para diferentes  $\gamma$ . Deve-se atentar que para a curva com  $\gamma=1,4$ , o valor máximo para o coeficiente de reflexão é de 8. No entanto, o ar sofre decréscimos em seu valor de  $\gamma$  para grandes acréscimos de sobrepressão o que implica em mudanças no coeficiente de reflexão.

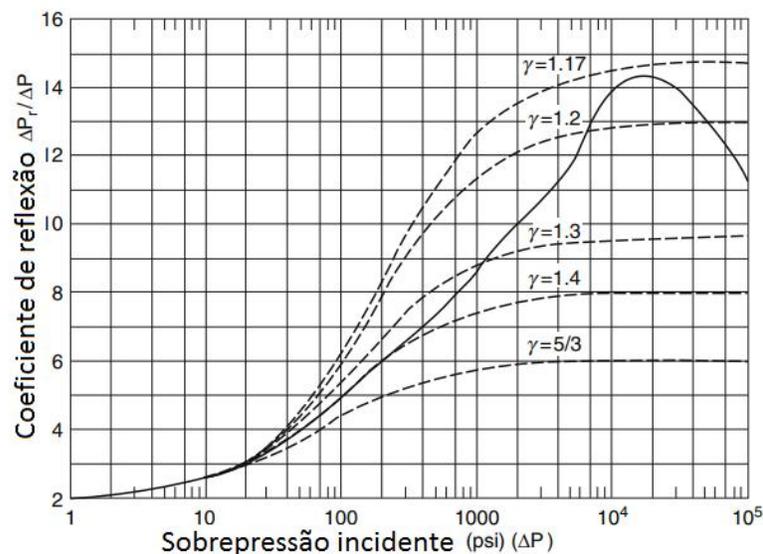


Figura 3.5 - Reflexões normais para ondas de choque ao nível do mar. Graham (2010)

Uma análise minuciosa do fenômeno mostra que a partir do momento que a onda de choque colide com uma superfície a uma determinada velocidade, o movimento das partículas no plano de contato é abruptamente interrompido. As partículas que colidiram com a superfície têm uma velocidade relativa com relação a aquelas ainda distantes, esta velocidade relativa mantém sua magnitude quando essas mesmas partículas passam a se deslocar no sentido inverso ao qual incidiram. O choque refletido a partir daí passa a se mover a uma dada velocidade, as características entre o choque incidente e o refletido são diferentes, visto que o primeiro se movia sob as condições ambientes de pressão e temperatura, já o segundo está em um meio cujo estes parâmetros foram alterados.

A Figura 3.6 ilustra a onda de choque atingindo uma superfície com zero grau de incidência (a), ou seja, o vetor velocidade é perpendicular à superfície. Também mostra quando o vetor

velocidade é paralelo à superfície (b), nesse caso, não há reflexão da onda e a mesma implica um carregamento igual a sua sobrepressão estática.

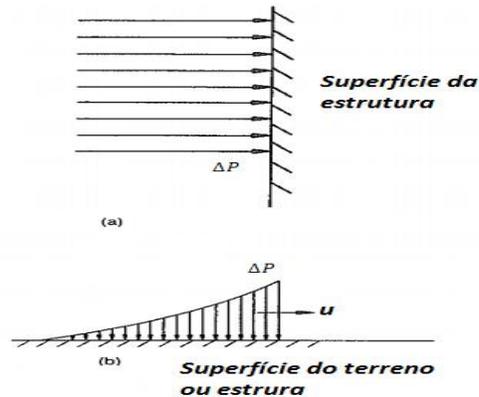


Figura 3.6 - Interação de uma onda de choque com uma superfícies, para diferentes sentidos de propagação. Mays (1995)

Quando uma onda de choque colide com uma superfície com certo ângulo de incidência ( $\alpha_i$ ), o vetor velocidade da onda, faz um ângulo não nulo com a superfície atingida. A onda refletida possui um ângulo de reflexão  $\alpha_r$  de valor diferente do ângulo de incidência. A Figura 3.7 ilustra um exemplo de reflexão oblíqua, onde  $U_r$  é o vetor velocidade da onda refletida.

As reflexões oblíquas têm um comportamento semelhante às reflexões normais, o que implica em alguns coeficientes de reflexão similares. Pode-se atribuir isto ao fato de que quanto menor for o ângulo de incidência, mais próximo o fenômeno estará de uma reflexão normal.

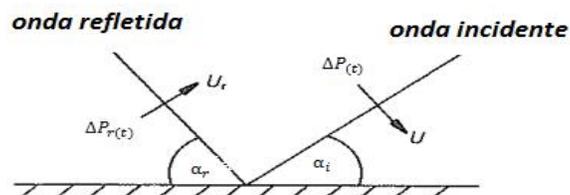


Figura 3.7 - Interação de uma onda de choque atingindo uma superfície obliquamente. Mays (1995)

Para um caso em que se deseja estudar reflexão oblíqua o ângulo de incidência da onda deve estar entre  $0^\circ$  e aproximadamente  $40^\circ$ , visto que a partir desse valor ocorre a reflexão Mach o que atribui uma maior dificuldade no problema.

De maneira similar como o que ocorre na reflexão normal, a onda refletida propaga-se em um meio diferenciado do da onda incidente, visto que os valores iniciais de pressão e temperaturas foram alterados. A Figura 3.8 a seguir, mostra um esquema de uma detonação

originando reflexões no terreno, deve-se notar o surgimento da reflexão Mach após um ângulo de incidência crítico.

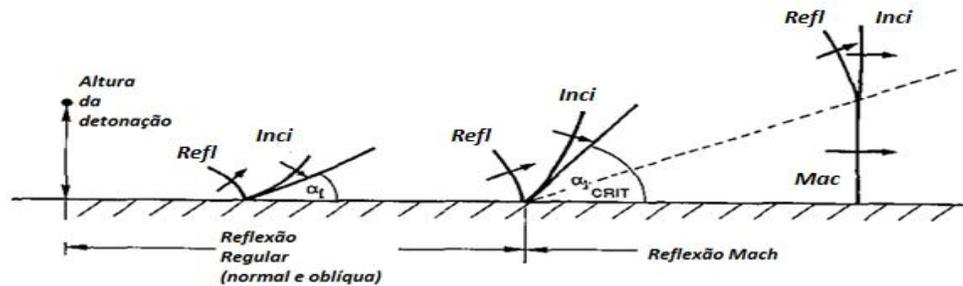


Figura 3.8 - Interação de uma onda de choque com uma superfície para diferentes ângulos de incidência . Mays (1995)

onde:

Inci – Onda incidente;

Refl – Onda Refletida;

Mac – Onda Mach;

Quando o ângulo de incidência supera  $40^\circ$ , a reflexão Mach acontece. Este fenômeno é um processo complexo e ocorre quando a onda refletida consegue alcançar a incidente, de modo que quando elas se encontram, a combinação origina a onda Mach. A Figura 3.9 a seguir ilustra o processo de formação desta onda, verifica-se uma importância especial no estudo da mesma devido ao cunho militar que esta possui.

O efeito destrutivo da onda Mach é superior ao da onda incidente, por este motivo, são executadas e analisadas explosões de dispositivos a uma determinada altura do solo de modo às ondas serem refletidas no terreno e após a combinação das ondas, ser avaliado o potencial destrutivo desta.

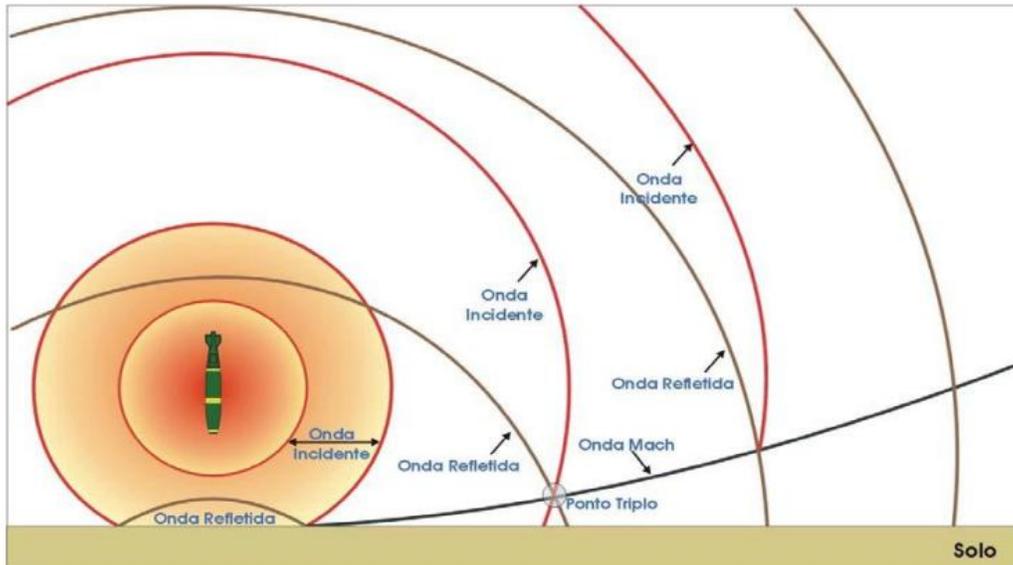


Figura 3.9 - Detonação de um dispositivo explosivo acima do nível do solo e as formas de propagação das ondas de choque. Silva (2007)

O ponto triplo assinalado na ilustração anterior refere-se ao ponto onde a onda de choque incidente, a refletida e a Mach se interceptam.

### 3.2.5 – Considerações sobre o carregamento incidente em uma estrutura produzido por uma explosão

Quando se deseja considerar o carregamento imposto por uma onda de choque sobre uma estrutura deve-se atentar para as relações oriundas do tempo de duração da fase positiva (onde se encontram os maiores diferenciais de pressão) e o período natural da mesma ( $T_n$ ). Deformações dentro do regime elástico da estrutura, portanto inferiores ao limiar de escoamento, podem ser repetidas dentro de alguns ciclos sem ocasionarem danos permanentes. A frequência de um sistema de um grau de liberdade,  $\omega$ , é definida conforme a equação (3.23), onde  $K$  é a constante elástica e  $M$  a massa do sistema:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (3.23)$$

Pode-se classificar o regime de carregamento imposto pela onda de choque em três tipos fundamentais, o carregamento quase-estático, o impulsivo e o dinâmico, cujas diferenças residem na relação entre o tempo de duração da fase positiva da onda ( $T_d^+$ ) e a frequência ( $\omega$ ).

O carregamento do tipo quase-estático é tido como aquele em que a estrutura submetida a onda de choque atinge o seu deslocamento máximo bem antes do decaimento da

sobrepessão. Nesse tipo de carregamento a duração da fase positiva da onda de choque é muito superior ao período natural da estrutura. De maneira simplificada, a relação apresentada na equação (3.24) indica a condição básica para um carregamento quase-estático.

$$40 < \omega T_d^+ \quad (3.24)$$

O carregamento impulsivo ocorre quando a duração da fase positiva da onda de choque é muito inferior ao período natural da estrutura, ou seja, o carregamento começa e termina muito antes da estrutura poder respondê-lo significativamente. O gráfico da Figura 3.10 ilustra esse tipo de carregamento. Nele observa-se que o tempo de resposta da estrutura (tal) é muito superior à duração do carregamento. De modo simplificado, se pode caracterizar um carregamento como impulsivo, quando atendida a relação (3.25).

$$0,4 > \omega T_d^+ \quad (3.25)$$

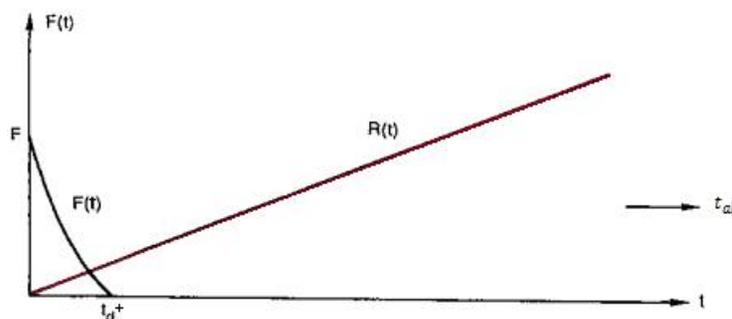


Figura 3.10 - Carregamento impulsivo; carregamento  $F(t)$  relacionado com a resposta do sistema  $R(t)$  e seu tempo de resposta ( $t_{al}$ ). Smith (1994)

O carregamento dinâmico é caracterizado quando o tempo de duração da fase positiva e o período da estrutura são aproximadamente os mesmos. Este tipo de carregamento apresenta-se como mais complexo do que os já descritos, necessitando de correlações e aproximações advindas das respostas quase-estáticas e impulsivas quando se deseja solucionar problemas em que ele esteja inserido. Assim como os carregamentos já apresentados, o carregamento dinâmico também pode ser identificado com base na relação entre a duração da fase positiva da onda ( $T_d^+$ ) e a frequência ( $\omega$ ) como mostra a equação (3.26):

$$0,4 < \omega T_d^+ < 40 \quad (3.26)$$

O período natural das estruturas pode ser estimado, na prática, a partir de relações como a apresentada na equação (3.27) por Kinney e Graham (1985), razoável no tratamento de estruturas retangulares ( $T_n$  será obtido em segundos). Nela,  $H$  é a altura da edificação e  $B$  a largura, ambas inseridas em metros.

$$T_n = \frac{0,09H}{\sqrt[2]{B_a}} \quad (3.27)$$

Kinney e Graham (1985) também indica que em estruturas genéricas pode se usar, com certa incerteza, a equação (3.28), onde o período é obtido em segundos e, de acordo com ele, 250ms é uma boa aproximação para o período de muitas estruturas.

$$T_n = \frac{H}{50} \quad (3.28)$$

Estes métodos de predição têm o intuito de auxiliar nos cálculos, mas nunca devem substituir uma análise mais profunda analítico-numérica do período das estruturas.

### 3.3 – SOBREPRESSÕES DE UMA ONDA DE CHOQUE

#### 3.3.1 – As relações de distância-quantidade de explosivo e a lei de escala

Os efeitos de uma explosão em um determinado local estão relacionados a dois principais fatores, são eles a quantidade de explosivo e a distância deste ao local considerado.

Em uma avaliação geral pode-se afirmar que quanto maior a distância do epicentro ao ponto de análise, menores serão os efeitos destrutivos da explosão, visto que a energia vai sendo dissipada no meio conforme a onda de choque e a energia calorífica vão se propagando. Neste âmbito pode-se observar que a quantidade de energia envolvida durante a explosão também tem influência decisiva, numa relação direta em que acréscimos na energia incrementam o potencial destrutivo da explosão.

A detonação de explosivos sólidos é comumente considerada como uma explosão de uma carga pontual onde são originadas ondas de choque com uma dispersão radial a partir do epicentro. Já no caso de explosões de nuvens gasosas, esta consideração não pode ser realizada, pois a carga explosiva não está concentrada em um só ponto.

Para os explosivos químicos foi desenvolvida uma série de leis de escala que relacionam os parâmetros básicos de uma explosão. Uma delas é a distância em escala (Z), que foi obtida por Hopkinson apud Smith (1994). A expressão que define a distância em escala (Z) é apresentada a seguir, equação (3.29):

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \text{ ou } Z = \frac{R}{\sqrt[3]{E_e}} \quad (3.29)$$

onde:

Z: distância em escala

R: distância do epicentro até o ponto de referência

W ou  $E_e$ : massa de explosivo (TNT) ou energia da explosão

Observa-se que nos denominadores a energia envolvida pode ser dada por “W” numa referência à massa de explosivo utilizada, geralmente o TNT. Entretanto a energia do explosivo para estudos mais específicos pode ser inserida em unidades de energia, como Joules, geralmente utilizada em casos onde a conversão em massa de TNT equivalente não foi possível.

No estudo empírico das explosões, um mesmo valor de distância em escala Z representa que de diferentes cargas de explosivos a diferentes distâncias de um ponto podem resultar efeitos semelhantes sobre um mesmo alvo. Pode-se obter ainda uma equação (3.30) que relaciona a proporcionalidade do alcance e de diferentes cargas de um mesmo explosivo, tomando a equação (3.29):

$$Z = \frac{R_1}{\sqrt[3]{W_1}} \quad e \quad Z = \frac{R_2}{\sqrt[3]{W_2}}$$

$$\frac{R_2}{\sqrt[3]{W_2}} = \frac{R_1}{\sqrt[3]{W_1}}$$

$$\frac{\sqrt[3]{W_1}}{\sqrt[3]{W_2}} = \frac{R_1}{R_2}$$

Logo:

$$\left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{\frac{1}{3}} = \frac{R_1}{R_2} \quad (3.30)$$

### 3.3.2 - Predição das sobrepressões de uma onda de choque devido à detonação de alto explosivos

Para categorizar o estudo do fenômeno explosão, pode-se dividi-lo em três partes fundamentais:

- A primeira é relacionada à carga explosiva considerando a energia de detonação e as reações físico-químicas, ou seja, o explosivo em si.

- A segunda engloba todo o perímetro pós-detonação onde ocorre o diferencial de pressão e a expansão gasosa que origina a onda de choque.

- A terceira está relacionada com a interação da onda com obstáculos no meio, como uma estrutura.

Os métodos para predição das sobrepressões de uma onda de choque sobre um determinado ponto estão vinculados principalmente à distância até o epicentro e à quantidade de explosivo, e desse modo são, em sua maioria, baseados no conceito da distância em escala  $Z$ . Entre outras vantagens a utilização da distância em escala permite um comparativo entre as diferentes formulações.

Sendo a sobrepressão ( $\Delta P$ ) a diferença da pressão gerada pela explosão e a pressão ambiente, Brode apud Smith (1994) relacionou-a com a distância em escala ( $Z$ ). Desse modo, desenvolveu um dos primeiros métodos para a definição das sobrepressões, composto por duas fórmulas básicas cuja aplicação é dependente do valor de  $Z$ . A primeira, conforme mostra a equação (3.31), é utilizada para detonações muito próximas do ponto de análise onde  $Z \ll 1$ , nas quais as sobrepressões geralmente apresentam-se superiores a 10 bar (1MPa).

$$\Delta P = \frac{6,7}{Z^3} + 1 \text{ bar} \quad (3.31)$$

A equação (3.31) é válida somente para sobrepressões superiores a 10 bar (near field), sob as condições expostas anteriormente.

A segunda formulação, equação (3.32), deve ser utilizada para pressões máximas calculadas a médias e longas distâncias, onde  $0,1 < \Delta P < 10$  bar.

$$\Delta P = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019 \text{ bar} \quad (3.32)$$

Em ambas as formulações apresentadas, a sobrepressão é obtida em bar e o  $Z$  é inserido em  $\text{m/kg}^{1/3}$ .

Outro método baseado em análises numéricas e experimentais foi apresentado por Henrych apud Smith (1994). É importante enfatizar que a capacidade de se prever as pressões em distâncias muito pequenas do ponto de detonação (naquelas em que se pode considerar a distância em escala inferior a  $1 \text{ m/kg}^{1/3}$ ) é bastante difícil dada a complexidade de se analisar e quantificar o fluxo dos gases, os complexos fenômenos termodinâmicos envolvidos e a influência disto na formação da onda de choque.

As equações de Henrych apud Smith (1994) para se definir a sobrepressão ( $\Delta P$ ) em bar, são mostradas a seguir:

$$\Delta P = \frac{14,072}{Z} + \frac{5,540}{Z^2} - \frac{0,357}{Z^3} + \frac{0,00625}{Z^4} \quad \text{onde } 0,05 \leq Z \leq 0,3 \quad (3.33)$$

$$\Delta P = \frac{6,194}{Z} - \frac{0,326}{Z^2} + \frac{2,132}{Z^3} \quad \text{onde } 0,3 \leq Z \leq 1 \quad (3.34)$$

$$\Delta P = \frac{0,662}{Z} + \frac{4,05}{Z^2} + \frac{3,288}{Z^3} \quad \text{onde } 1 \leq Z \leq 10 \quad (3.35)$$

Existem outras importantes relações para se definir a sobrepressão gerada pela detonação de um forte explosivo, entre elas destacam-se duas que são comumente encontradas nas bibliografias, Ngo (2007).

A relação de Newmark e Hansen de 1961, indicada na equação (3.36), apresenta alguns diferenciais em relação às apresentadas anteriormente já que não relaciona diretamente a sobrepressão ( $\Delta P$ ) à distância em escala  $Z$ , e sim à distância da explosão até o alvo. Nela, o valor de  $W$  deve ser inserido em toneladas de TNT e o valor da pressão nesta equação é obtido em bar.

$$\Delta P = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left( \frac{W}{R^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.36)$$

onde:

- $W$ : Massa de explosivo em toneladas de TNT

- $R$ : Distância do epicentro da explosão ao ponto de análise

A relação de Mills de 1987, encontra-se expressa na equação (3.37), nela a distância em escala deve ser inserida em  $m/kg^{1/3}$  e o resultado obtido para sobrepressão  $\Delta P$  estará em kPa.

$$\Delta P = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad (3.37)$$

Kinney e Graham (1985) apresentam uma fórmula para determinação da sobrepressão oriunda de explosões químicas, mostrada na equação (3.38), e o tempo de duração da fase positiva ( $Td+$ ) em milissegundos conforme a equação (3.39).

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{808 \left[ 1 + \left( \frac{Z}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left( \frac{Z}{0,048} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{0,32} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{1,35} \right)^2}} \quad (3.38)$$

$$\frac{Td^+}{W^{\frac{1}{3}}} = \frac{980 \left[ 1 + \left( \frac{Z}{0,54} \right)^{10} \right]}{\left[ 1 + \left( \frac{Z}{0,02} \right)^3 \right] \left[ 1 + \left( \frac{Z}{0,74} \right)^6 \right] \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{6,9} \right)^2}} \quad (3.39)$$

Estes mesmos autores também apresentam formulas para determinação da pressão em bar e do tempo de duração da fase positiva em milissegundos, para explosões de origem nuclear, Eq. (3.40) e Eq. (3.41):

$$\frac{\Delta P}{P_0} = 3,2 * 10^6 Z^{-3} \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{87} \right)^2} \left[ 1 + \frac{Z}{800} \right] \quad (3.40)$$

$$\frac{Td^+}{W^{\frac{1}{3}}} = \frac{180 \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{100} \right)^3}}{\sqrt{1 + \left( \frac{Z}{40} \right)^6} \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{285} \right)^5} \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{50000} \right)}} \quad (3.41)$$

O gráfico da Fig. 3.11 mostra uma comparação das expressões propostas para estimar as sobrepressões apresentadas até agora, para o caso particular de distâncias em escala variando entre 2 e 6,6 m/kg<sup>1/3</sup>. Em linhas gerais, as sobrepressões tendem a divergir quando se consideram distâncias mais próximas do epicentro, devido às não-linearidades do fenômeno.

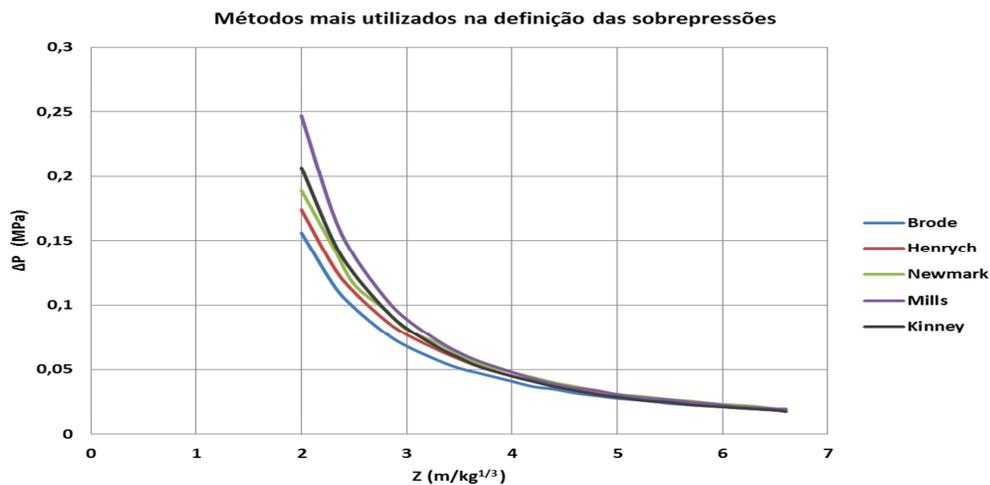


Figura 3.11 - Comparativo entre as expressões utilizadas na determinação das sobrepressões; com a distância em escala Z variando de 2 m/kg<sup>1/3</sup> a 6,6 m/kg<sup>1/3</sup>

### 3.3.3 - Avaliação geral dos danos causados a uma estrutura por uma explosão

Os danos que uma explosão pode causar estão relacionados a uma série de fatores, entre eles cita-se: o tipo e a quantidade de explosivo, a duração do pulso causado (da onda de choque), a quantidade, disposição e forma dos obstáculos que implicará na reflexão das ondas de choque. Além disso, podem-se relacionar também os projéteis e fragmentos advindos dos efeitos da explosão sobre o ambiente. Portanto com tantos fatores a serem avaliados, o processo de prever os danos que serão causados pela explosão pode ser bastante difícil.

Vê-se, na Figura 3.12, que a onda de choque fora gerada por uma explosão externa com relação a residência, em alguns casos mais graves, a detonação pode ocorrer dentro da estrutura, o que caracteriza uma explosão confinada, nessa situação toda a energia está sendo dissipada no meio interno afetando diretamente os componentes estruturais, o grau de confinamento deste tipo de explosão implica em efeitos adicionais causados pela temperatura, pelo acúmulo de gases e pela amplificação de pressões causadas pelas ondas refletidas estendendo por muito a situação de carregamento imposta.

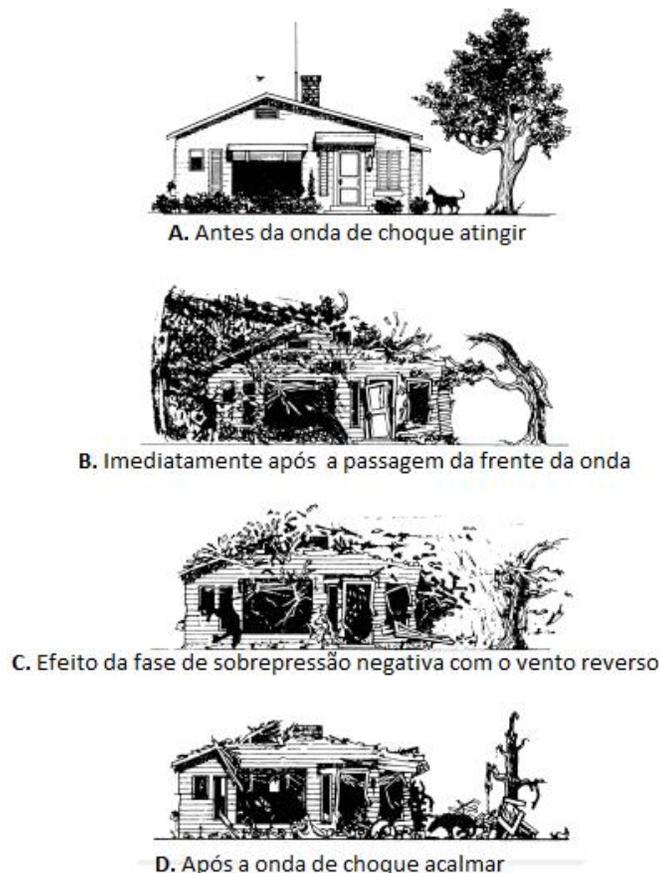


Figura 3.12 - Comportamento de uma estrutura submetida a uma onda de choque, Kinney e Graham (1985)

O primeiro efeito mecânico danoso de uma explosão é a onda de choque causada pelo acréscimo súbito e significativo na pressão na frente da onda, que pode ser seguido por diferentes mecanismos de dano como colisão de fragmentos e incêndios (devido às altas temperaturas).

Os mecanismos de dano à estrutura podem ser divididos em dois grupos principais o primeiro agrupando a onda de choque e seus efeitos, enquanto que o segundo refere-se à ocorrência de colapso progressivo.

Entende-se por colapso progressivo a condição em que um dano causado a um elemento estrutural primário, passa a se propagar pela estrutura no decorrer do tempo, impossibilitando esta de estabilizar os seus esforços internos. Em linhas gerais, o conceito de colapso estrutural, implica que uma falha local ao longo do tempo comprometerá toda a capacidade portante da estrutura.

As temperaturas geradas em algumas explosões são extremamente elevadas podendo implicar em consequências indiretas como grandes incêndios.

Pode se categorizar os níveis de danos causados por explosões nas estruturas em cinco classes, sendo a classe A que representa os efeitos mais devastadores. A Tabela 3.3 apresenta as respectivas classes e suas características.

Tabela 3.3 - Classes de dano causadas por explosões nas estruturas. Kinney e Graham (1985)

---

| Classes de dano |   |
|-----------------|---|
| Classe A        | Colapso completo, estrutura reduzida a escombros  |
| Classe B        | Estrutura muito danificada além de reparos  |
| Classe C        | Sérios danos, a estrutura não pode ser usada até ser reparada                                   |
| Classe D        | Algum dano estrutural, mas a estrutura permanece parcialmente utilizável antes mesmo de reparos |
| Classe E        | Sem danos estruturais apenas vidros quebrados e fissuras em peças de gesso                      |

---

Em linhas gerais, para uma estrutura apresentar uma boa resposta a uma explosão externa, no mínimo, deve estar apta a suportar altos carregamentos laterais. O que permite afirmar que estruturas que foram projetadas para suportar terremotos, em geral, apresentam um melhor desempenho quando submetidas a explosões, isto será comentado com mais detalhes em tópicos posteriores. A Tabela 3.4 apresenta danos causados a elementos das edificações para respectivas variações de pressão.

Tabela 3.4 - Danos causados a edificações por diferentes sobrepressões incidentes. Applied Technology Council (2003)

| Dano   | Sobrepressão (KPa) |
|--|--------------------|
| Quebra de vidros                               | de 1,0 à 1,5       |
| Dobramento em painéis metálicos                | de 7,5 à 12        |
| Falha de blocos de concreto                    | de 12 à 20         |
| Danos sérios a estruturas em aço               | de 28 à 48         |
| Danos severos em estruturas de concreto armado | de 41 à 62         |
| Provável colapso da maioria das construções    | de 70 à 83         |

### 3.4 - PROTEÇÃO CONTRA AS EXPLOSÕES

#### 3.4.1 - Conceitos básicos para proteção

Quando se deseja projetar sistemas estruturais ou edificações em que se busca minimizar os efeitos destrutivos de uma explosão é preciso entender que, embora muitos estudos já tenham sido realizados, é difícil realizar com exatidão uma predição clara da extensão dos danos devidos a uma explosão. Neste âmbito, como análise preliminar deve-se avaliar a conjuntura de potenciais incidentes que podem ocorrer de acordo com tipo de projeto que está sendo desenvolvido. A análise de risco torna-se imprescindível nestes casos, pois sabendo a probabilidade da frequência de ocorrência e a magnitude das consequências pode-se associar a análise do risco ao nível de proteção adequado, pois quanto maiores às chances de haverem

perdas e danos a seres humanos, equipamentos ou dados importantes, maior deverá ser o nível de precaução quanto à proteção a ser adotada.

Uma análise de risco costuma ser dividida em dois tipos básicos, o quantitativo e o qualitativo. O primeiro busca quantificar os efeitos negativos que o evento pode vir a causar e estimar as chances de ocorrência enquanto o segundo trata da procura e avaliação dos pontos fracos do objeto em estudo.

É importante enfatizar que elevados níveis de proteção não necessariamente irão garantir a segurança total de uma estrutura, mas são responsáveis por maiores níveis de confiabilidade, aos usuários desta e ao fim a que se destina. Uma definição adequada dos riscos quanto à carga de explosivo e a proteção necessária são determinantes na elaboração de um bom projeto.

Em contrapartida, quando um estudo de avaliação dos riscos de uma explosão não é executado corretamente pode ocorrer um desperdício de recursos no projeto e construção da edificação. Portanto uma avaliação clara de um projeto quanto aos riscos advindos de uma explosão, envolve o estudo sobre a possibilidade de vítimas, descrição da resistência e das características dos elementos estruturais utilizados (tipos de conexões, materiais, etc.), probabilidade de riscos adicionais (atividades da indústria, mineração, etc.).

A estimativa da carga oriunda de uma explosão deve abranger às características da região (por exemplo, região pacífica ou em conflito), função da estrutura (residencial, hospitalar, industrial, etc.) entre outras, pois as pressões de uma onda de choque são consideradas como cargas acidentais e a magnitude destas pode variar bastante como, por exemplo, de uma explosão doméstica de gás à detonação de uma massa de TNT.

É importante ressaltar que as condições desta explosão também devem ser levadas em conta no estudo, visto que explosões domésticas de gás costumam ser em ambientes confinados resultando em inúmeras reflexões e, portanto, ocasionando acréscimos à pressão máxima, estas também causam danos imediatos a elementos próximos como placas de gesso, paredes ou lajes que podem originar fragmentos.

Explosões envolvendo massas de TNT tem procedência externa na maioria das vezes, por isso, sendo considerado seu efeito destrutivo nas fachadas e o perigo advindo da penetração da onda de choque pelas aberturas do edifício.

### 3.4.2 - Considerações no estudo de explosões internas e externas

Uma explosão em um ambiente confinado como um quarto, caracterizam uma explosão interna, tendo suas características para as pressões e a propagação de onda, segundo Van Acker et al (2012), regidos pelos seguintes fatores (quando uma explosão gasosa):

- Dimensões e configuração geométrica do quarto
- Volume do gás
- Tipo do gás e ignição
- Quantidade de aberturas do ambiente

As dimensões e a configuração geométrica do quarto são importantes na análise, pois o pico da pressão da onda de choque pode ser amplificado pelas inúmeras reflexões que podem ocorrer dentro da estrutura. Associado a isto, e dependendo do grau de confinamento da explosão, efeitos adversos como incêndios provenientes das altas temperaturas e o aumento da duração do tempo de carregamento das pressões, pelo acúmulo dos produtos gasosos originados pelas reações químicas, podem ocorrer. Caso a estrutura não tenha sido projetada para suportar tais cargas a combinação destes efeitos negativos podem fazê-la sucumbir às pressões internas.

Em linhas gerais, os níveis de abertura de uma estrutura submetida a uma explosão interna podem representar um alívio de carga para os elementos estruturais, visto que os gases internos vão ser dissipados mais rapidamente para fora da estrutura. Sendo assim, uma estrutura com muitas aberturas (por exemplo, janelas que podem ser quebradas) servem de mecanismo para dispersão dos gases internos e das pressões.

Quantificar a magnitude das pressões em ambientes confinados é um processo complexo, embora alguns autores já tenham conseguido executar esta predição com alguma precisão para estruturas simétricas, Smith (1994).

Ambientes assimétricos, geralmente compostos por uma geometria variada, acabam tornando-se específicos demais para permitir a eficácia de uma predição mais geral, visto que as ondas de choque refletem obliquamente e ao atingir os cantos tornam a análise mais complexa, isto ainda se associa ao fato destas reflexões tenderem a induzir o surgimento da Onda Mach, que implica em um acréscimo abrupto das pressões.

É importante salientar, quando se trata do estudo das explosões internas, que os andares superiores das estruturas acabam sendo muito afetados, pois estão sujeitos a problemas como

desprendimento de placas e grandes deformações de seus elementos, ainda mais se a estrutura for composta por componentes como paredes estruturais, isto se deve ao fato destes elementos estarem submetidos a menores cargas axiais e, portanto, ficam mais sensíveis às pressões de expansão advindas de uma explosão interna. A Figura 3.13 apresenta uma imagem retratando uma explosão em andar elevado.

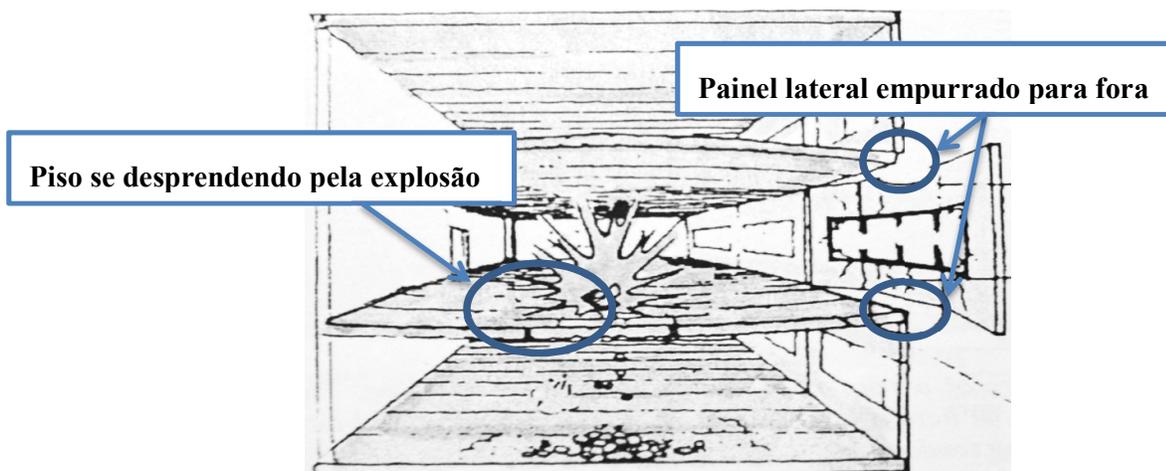


Figura 3.13 - Esquema de uma explosão interna resultando em colapso progressivo. Van Acker et al (2012)

Em linhas, gerais os danos causados por explosões internas de pequeno porte (como as de gás, por exemplo) podem ser sintetizadas como responsáveis por falhas locais no piso e nas paredes no entorno da explosão (um ponto especial de avaliação, pela possível função estrutural de algumas destas) e danos a elementos não-estruturais como janelas, portas, forros, partições etc.

O projeto de estruturas contra explosões externas deve ser produto de uma série de conhecimentos que vão deste o estudo sobre este fenômeno, avaliando a carga accidental a ser considerada e englobar o meio onde esta explosão pode ser dar, visto que o fenômeno das reflexões de onda deve ser levado em consideração.

Considerando uma explosão dentro de um meio urbano, pode-se afirmar que a energia liberada desta é dividida em duas:

- Radiação termal: Cujas consequências são grandes incrementos na temperatura ambiente devido o aquecimento dos gases podendo, por exemplo, provocar incêndios.

- Onda de choque: Pode se propagar pelo meio ar atingindo as edificações a velocidades supersônicas, sendo a principal causa de danos às construções.

A configuração das ruas de uma cidade faz com que uma explosão que nela ocorra seja considerada como confinada pois esta passará a ser refletida nas edificações no entorno e, por isso, pode amplificar a pressão a que estas estão submetidas. As ondas de choque possuem características invasivas e, dependendo da quantidade de explosivo detonado, tendem a se propagar por longas distâncias e além de submeter todos os lados de uma edificação (fachada, cobertura, etc) a sobrepressões, penetrando nestes por suas aberturas como janelas, portas e invadindo lugares que virtualmente deveriam estar protegidos como corredores e salas.

A distância até o epicentro da explosão é um parâmetro fundamental na predição das pressões visto que, intuitivamente, distâncias maiores do epicentro implicam em pressões incidentes menores no alvo. Em grandes cidades, devido ao grande volume de edificações, existe uma ausência de zonas livres para dispersão da energia da onda, associado a isto, ainda há o fenômeno das reflexões, incrementando a sobrepressão imposta nas fachadas e o tempo de duração deste tipo de carregamento.

Existem algumas medidas básicas para proteção contra eventos envolvendo explosão, englobando a colocação de elementos de paisagismo como árvores e muretas que tendem a dissipar a energia da onda. Em contra partida, embora possam atenuar as sobrepressões em um dado ponto, essas medidas podem originar fragmentos danosos às pessoas e estruturas, o que pode ocasionar outras complicações.

Existem algumas medidas de proteção simplificadas para conter os efeitos nocivos das explosões em edifícios. Pode-se citar desde a utilização de materiais dúcteis nos elementos estruturais, por estes terem a capacidade de absorver grandes quantidade de energia, até a utilização de vidraças resistentes nas janelas. Quanto à utilização de vidraças para proteção, Mays (1995) cita alguns modos para utilização desta:

- Aplicação de poliéster transparente anti-fragmentação na superfície interna do vidro de modo evitar que fragmentos que se desprendam venham a causar riscos às pessoas;

- Utilização de vidros resistentes à explosão;

- Instalação de uma segunda vidraçaria resistente a explosão no interior de uma vidraçaria comum pré-existente;

A Figura 3.14, mostra as consequências de uma explosão em meio urbano. Na imagem vê-se o grande grau de destruição causado desde janelas destruídas a inúmeros outros fragmentos espalhados.

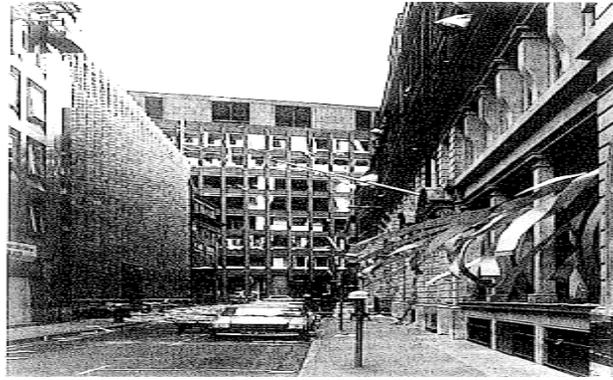


Figura 3.14 - Consequências de uma explosão em meio urbano. Mays (1995).

Ao incidir sobre uma edificação a onda de choque interage com a geometria desta, refletindo nas superfícies e penetrando pelas aberturas. Esta interação, em partes, lembra a ação de fortes ventos, onde há a formação de vórtices nos cantos do edifício, associado ao efeito de reflexão da onda de choque. Portanto no projeto de estruturas resistentes a explosões externas um projeto adequando da geometria da edificação pode agir como mecanismo mitigador dos danos.

Estruturalmente uma maior regularidade na distribuição das vigas e pilares com a utilização de elementos robustos representam uma otimização da estrutura no que diz respeito à redundância estrutural e a capacidade de redistribuição dos esforços. O mesmo dificilmente irá ocorrer em uma estrutura arrojada no aspecto arquitetônico onde há uso de grandes vãos ou seções muito esbeltas.

Analisando o aspecto arquitetônico da edificação é importante salientar que irregularidades como reentrâncias e a existência de muitos cantos servem como amplificadores das ondas de choque por permitirem reflexões sucessivas em um mínimo espaço de tempo. Formas externas convexas são mais eficientes e preferíveis às côncavas para conter ondas de choque, visto que as pressões refletidas em superfícies circulares são bem menos intensas do que nas demais geometrias, Van Acker et al (2012). A Figura 3.15 a seguir apresenta uma série de vistas para diferentes geometrias com o comportamento da onda de choque ao incidir sobre elas.

Buscar evitar sucessivas reflexões das ondas de choque por meio de uma arquitetura otimizada é uma das melhores e mais econômicas maneiras de se preparar uma estrutura contra explosões.

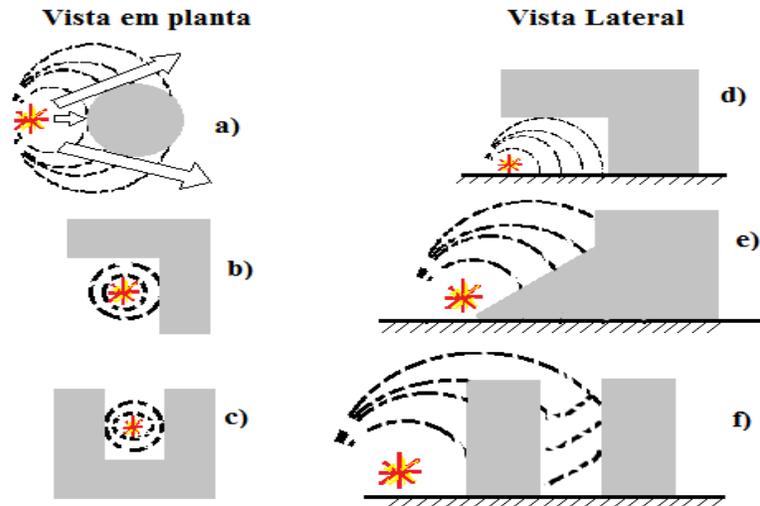


Figura 3.15 - Comportamento da propagação da onda de choque em estruturas com diferentes geometrias. Vê-se que a estrutura mostrada em "a)" apresenta um índice bem menor de reflexões quando comparada as demais.

## **4 - FERRAMENTA COMPUTACIONAL**

### **4.1 - INTRODUÇÃO AOS HIDROCÓDIGOS**

A avaliação das pressões de uma onda de choque em ambientes com muitos obstáculos é complexa de ser realizada e historicamente esta análise se deu predominantemente por meio de métodos empíricos. Isto, associado ao caráter dinâmico do fenômeno, à interação da onda de choque com o alvo e à magnitude dos intensos carregamentos que variam com o tempo, tornam o fenômeno complexo e custoso de ser estudado experimentalmente.

Nesse âmbito a utilização dos códigos hidrodinâmicos, conhecidos como hidrocódigos, surge como uma ferramenta computacional bastante útil no estudo e análise das explosões e das ondas de choque. Os hidrocódigos baseiam-se na realização de cálculos onde são considerados os comportamentos hidrodinâmicos de cada material, Abdelalim (2013).

Em síntese, pode-se caracterizar um hidrocódigo como sendo um programa computacional para o estudo de situações de carregamentos muito intensas e aplicadas muito rapidamente em algum elemento. Uma das vantagens da utilização dos hidrocódigos em comparação com experimentos se baseia no fato das altas sobrepressões geradas durante uma explosão ultrapassarem as resistências dos materiais utilizados, Zukas apud Black (2006).

A despeito da utilização dos métodos aproximados durante muito tempo no estudo das explosões, efeitos importantes como múltiplas reflexões das ondas de choque, avaliações da fase negativa, efeito Mach e considerações sobre a termodinâmica do fenômeno só puderam ser considerados com a utilização dos hidrocódigos em si e os códigos da fluidodinâmica computacional ou da dinâmica dos fluidos computacional (CFD), estes últimos que também são conhecidos como “hidrocódigos modernos”.

A versatilidade da utilização dos hidrocódigos modernos permite que sejam usados em problemas que envolvam impacto de aviões e de outros veículos, análise de recipientes com líquidos, modelagem de detritos colidindo com satélites, etc.

A modelagem de explosões utilizando hidrocódigos está baseada nos métodos de elementos finitos, volumes finitos e diferenças finitas. Baseados nestes métodos numéricos os hidrocódigos dão uma aproximação mais precisa do fenômeno explosão do que os métodos tradicionais aproximados, podendo levar em consideração geometrias complexas em três dimensões - 3D, Birnbaum et al. (1996). A ferramenta numérica utilizada neste trabalho para

executar o estudo das explosões é o Ansys AUTODYN ®, cujas características são apresentadas a seguir.

## 4.2 - AUTODYN

O Autodyn é uma ferramenta versátil de análise explícita desenvolvida especificamente para lidar com problemas dinâmicos não lineares como, por exemplo, modelagem de penetração, impacto e explosões. Ou seja, esta ferramenta permite a análise da dinâmica dos sólidos, fluidos e gases e a interação entre eles considerando, para isso, elevados níveis de tensão e deformação. Quando aplicado ao estudo das explosões, o Autodyn pode ser utilizado para modelagem e análise em diversos casos, entre eles:

- Modelagem de cargas explosivas para militares;
- Situações de explosões em que haja projéteis ou fragmentação envolvida;
- Demolição;
- Explosões no ar, sob o solo ou sob a água;

O *software* é composto por um grande conjunto de técnicas numéricas (volumes finitos, elementos finitos, etc.), sendo que a aplicação de cada uma delas depende do tipo de análise que está sendo realizada. É possível, ainda, utilizar diferentes processadores para o estudo de diferentes regiões de um mesmo problema.

Identificar devidamente as necessidades e particularidades de cada problema quanto à modelagem de diferentes sólidos, fluidos e a interação entre eles, é um requisito para uma simulação eficiente. Desse modo, para que a modelagem se dê de forma adequada cabe ao usuário a aplicação correta das técnicas numéricas utilizadas pelo programa. Dentre as técnicas de modelagem disponíveis podem se citar os seguintes processadores, segundo Fairlie (1998):

- Lagrange: Onde a malha se distorce junto com o material, como pode ser visto na Figura 4.1. Este processador apresenta a vantagem de ser computacionalmente mais rápido e apresentar uma boa definição da interface do material, sendo assim, ele apresenta-se ótimo para modelagem de sólidos contínuos e estruturas sob deformações moderadas.

- Euler: O processador de Euler utiliza uma malha estacionária (Figura 4.1) onde o material flui por ela. Comparada com o processador de Lagrange, Euler é mais custoso

computacionalmente, porém mais adequado para a análise de grandes deformações ou fluxo de fluidos.

- ALE (“*Arbitrary Lagrange Euler*” ou Lagrange Euler Arbitrário): É um processador cuja utilização permite uma combinação automática das técnicas de Euler e Lagrange. Sua utilização supera algumas limitações de Euler e Lagrange quando utilizados isoladamente, porém demanda um maior número de dados relacionados às superfícies de contato dos modelos, além de não ser adequado para modelagem de problemas com fluxos muito complexos (sejam fluidos ou gases).

- SPH (“*Smooth Particle Hydrodynamics*” ou Hidrodinâmica Suave de Partículas): É um processador baseado no método Lagrangeano que não utiliza malha, sendo usado para solucionar problemas que envolvam grandes velocidades, impacto, penetração, fragmentação e largas deformações. A ausência de malha elimina a necessidade de algoritmos de erosão.

- Elementos estruturais: Permitem o tratamento de elementos tipo “shell” e “beams”, sendo baseados numa formulação em elementos finitos.

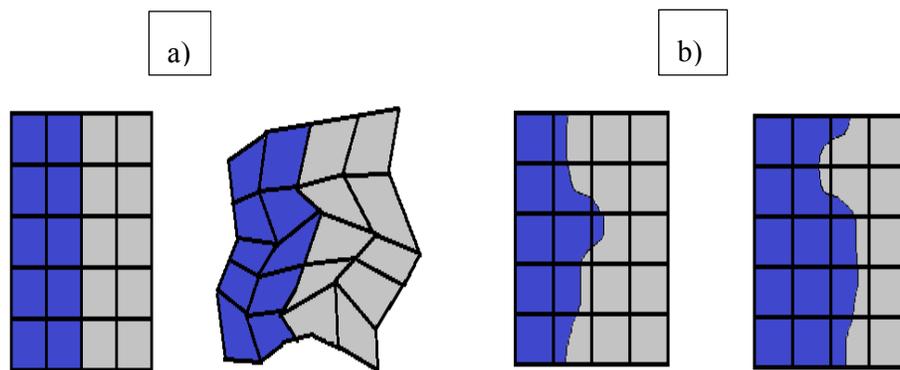


Figura 4.1 - a) Malha Lagrangeana; b) Malha Euleriana

No Autodyn, apesar de ser possível importar modelos de outros *softwares*, é possível a geração automática de vários tipos de modelos através de geometrias pré-definidas, dentre elas podendo-se citar:

- 2D: caixa, círculo, ogiva, losango, triângulo, quadrilátero (geral) e cunha;
- 3D: caixa, cilindro, esfera, ogiva, fragmentos/tijolos e “hex” (poliedros gerais);

Para as simulações realizadas neste trabalho foram utilizadas as modelagens em cunha (“Wedge”) que são bidimensionais e a modelagem em caixa tridimensional. A modelagem em cunha apresenta-se relativamente mais leve computacionalmente que as demais por se tratar

de um modelo de simetria esférico, sendo indicada para avaliações simplificadas ou quando se pretende utilizar a técnica de remapeamento de resultados.

Uma vez definida a geometria e a técnica a ser utilizada na análise do elemento é necessário atribuir-lhe um material. O Autodyn oferece uma grande lista de materiais e suas propriedades, sendo possível também definir um novo material, Black (2006). A análise de um material pelo Autodyn dá-se a partir da avaliação de três componentes:

- Equações de Estado (Equations of State - EOS);
- Modelo de resistência do material;
- Modelo de falha do material;

As propriedades de análise desses modelos serão apresentadas no tópico a seguir.

#### **4.3 - OS PRINCÍPIOS DE ANÁLISE DOS MATERIAIS CONSTITUINTES**

Os hidrocódigos em geral, como o Autodyn, costumam ser implementados por meio de códigos Lagrangeanos e Eulerianos, onde se faz uso das equações de estado dos materiais. Estas equações fazem referência a diversas características dos materiais como massa específica, temperatura e energia interna, por meio da aplicação dos três princípios de conservação, que são:

- Princípio da conservação de massa: afirma que a quantidade de matéria existente em um sistema fechado permanece constante independentemente dos processos que ocorram nele.

- Princípio da conservação de quantidade de movimento: afirma que a quantidade de movimento total dos elementos em um sistema fechado permanece invariável no decorrer do tempo, ou seja, a quantidade de movimento é constante desde que não haja interação com ações de um meio externo.

- Princípio da conservação de energia: afirma que a quantidade total da energia em um sistema fechado permanece constante.

É possível descrever a natureza e o comportamento de vários materiais através da aplicação das equações de estado juntamente com as leis de conservação, cuja função pode ser definida basicamente como tendo a capacidade de descrever a resposta hidrodinâmica dos materiais.

No software Autodyn ®, são atendidos a cada passo de tempo os três princípios de conservação. As leis constitutivas são utilizadas de modo a relacionar as tensões às deformações e à energia interna, Abdelalim (2013), sendo que os sistemas de equações

diferenciais são solucionados mediante a utilização de uma combinação de volume finito, elementos finitos e processador sem malha.

Abdelalim (2013) apresenta as equações da conservação de massa, quantidade de movimento e energia para a evolução de um fluido ideal, baseadas na descrição Euleriana ou Lagrangeana.

As equações (4.1), (4.2) e (4.3) mostram a descrição Euleriana das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_c) = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \rho u_c}{\partial t} + \nabla \cdot (u_c x (\rho u_c)) + \nabla P = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (u_c (E + P)) = 0 \quad (4.3)$$

onde:

$u_c$ : Componente cartesiana de velocidade

$t$ : Tempo

$\rho$ : Massa específica

$\nabla$ : Gradiente, constituído por um campo de vetores cujas componentes são derivadas parciais de uma função.

$E$ : Energia Total

$P$ : Pressão

As equações (4.4), (4.5) e (4.6) a seguir apresentam respectivamente, as equações de massa, quantidade de movimento e energia a partir da descrição Lagrangeana, utilizando a derivada de Lagrange.

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \cdot (\nabla \cdot v) \quad (4.4)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\nabla P}{\rho} \quad (4.5)$$

$$\frac{De_i}{Dt} = -\frac{P}{\rho} (\nabla \cdot v) \quad (4.6)$$

onde:

v: Componente cartesiana de velocidade

$e_i$ : Energia interna

D: Derivada de Lagrange

Em linhas gerais, as equações de estado dos materiais são equações constitutivas que permitem uma descrição da condição do material e de suas propriedades. Para os casos de explosões os comportamentos não lineares dos materiais são levados em consideração por estas equações.

Nas simulações executadas neste trabalho foram considerados, basicamente, três materiais sendo que cada um possui uma equação de estado, todas elas apresentadas a seguir.

O material ar utilizado pelo Autodyn foi definido como um gás ideal. Esta descrição simplificada é a mais comum, sendo aplicada em estudos que envolvam o movimento dos gases. A equação de estado dos gases ideais pode ser vista na equação (4.7) a seguir.

$$P = (\gamma - 1)\rho e_i \quad (4.7)$$

onde:

P: Pressão

$\gamma$ : Razão entre os calores específicos do ar

$\rho$ : Massa específica

$e_i$ : Energia interna

A equação de estado adotada para o material TNT utilizado neste trabalho é a JWL que foi desenvolvida por Jones, Wilkins e Lee durante o período da segunda guerra mundial. Esta equação é a mais utilizada no estudo das explosões e fundamenta-se numa queima

programada do material explosivo. Esta formulação escrita em termos de energia é apresentada na equação (4.8).

$$p = C_1 \cdot \left(1 - \frac{\omega_{co}}{r_1 v_e}\right) e^{-r_1 v_e} + C_2 \cdot \left(1 - \frac{\omega_{co}}{r_2 v_e}\right) e^{-r_2 v_e} + \frac{\omega_{co} e}{v_e} \quad (4.8)$$

onde:

$p$  = pressão hidrostática;

$v_e$  = volume específico do explosivo;

$C_1$ ,  $C_2$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  e  $\omega_{co}$  = constantes determinadas através de experimentos dinâmicos que dependem do explosivo utilizado.

Neste trabalho se utilizou também o concreto para as estruturas consideradas, tendo este suas características constitutivas relacionadas à equação de estado P-alpha, equação (4.9), e à equação de estado de Mie-Gruneisen como mostram as equações (4.10) e (4.11). O modelo P-alpha foi desenvolvido para apresentar boas soluções em elementos submetidos a altos níveis de tensão, mas ainda oferece uma descrição razoável do processo de compactação a níveis baixos de tensão. Ele permite a análise de materiais porosos e a sua equação pode ser função da equação de estado polinomial ou forma geral da equação de Mie-Gruneisen. Esta última é uma equação de estado adequada para o estudo de sólidos submetidos a uma pressão de choque.

Equação de estado P-alpha:

$$p = f\left(\frac{v_{esp}}{\alpha'}, e_i\right) \quad (4.9)$$

onde:

$v_{esp}$ : Volume específico do material poroso;

$\alpha'$ : Razão do volume específico do material poroso e o volume específico do material em estado sólido, para as mesmas condições de temperatura e pressão;

$e_i$ : Energia interna

Equações de estado de Mie-Gruneisen:

$$\rho' = A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 + (B_0 + B_1 \mu) \rho_0 e_{im} \quad \text{para} \quad \mu > 0 \text{ (compressão)} \quad (4.10)$$

$$\rho' = T_1 \mu + T_2 \mu^2 + B_0 \rho_0 e_{im} \quad \text{para} \quad \mu < 0 \text{ (tração)} \quad (4.11)$$

onde:

$\rho'$  = Pressão

$\mu$  = Compressão ( $\rho/\rho_0 - 1$ )

$e_{im}$  = Energia interna por unidade de massa

$\rho_{om}$  = Massa específica inicial do material

$A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, T_1$  e  $T_2$  = Constantes do material.

Boa parte dos problemas envolvendo explosões pode ser estudada apenas com o conhecimento hidrodinâmico advindo das equações de estado, porém há casos em que se faz necessária a consideração dos efeitos de resistência do material. Materiais sólidos, por exemplo, possuem alguma resistência ao cisalhamento e esta tem que ser levada em consideração juntamente com o cálculo da pressão hidrostática para definição da relação entre a tensão de cisalhamento e a deformação.

O Autodyn permite a utilização de um modelo de resistência (Strength Models), que em linha gerais descreve a resposta elasto-plástica não linear dos materiais, e também a utilização de um modelo de falha (Failure Model).

Neste trabalho, o modelo de resistência e o de falha adotados para o concreto foi o de Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT).

De acordo com Hansson e Skoglund (2002), no modelo RHT se descreve o estado de tensão do material com base em três invariantes do tensor de tensões. Através disto se pode definir a superfície de falha, a resistência residual na superfície do material esmagado e o limite elástico da superfície.

A análise da falha na superfície é tomada como sendo função da resistência ao longo do meridiano de compressão  $Y_{TXC}(P)$  multiplicado pelo fatores  $F_{rate}(\dot{\epsilon})$  e  $R_3(\theta_r)$ . O modelo constitutivo do concreto RHT é mostrado na equação (4.12).

$$Y_{falha}(P, \theta_r, \dot{\epsilon}): Y_{TXC}(P)F_{rate}(\dot{\epsilon})R_3(\theta_r) \quad (4.12)$$

Desta equação, pode se definir o  $Y_{TXC}(P)$ , equação (4.13), que é baseado no tipo de concreto utilizado e fornece a resistência ao longo do meridiano de compressão.

$$\frac{Y_{TXC}(P)}{f_c} = A_{con} \left[ \frac{P}{f_c} - \left( \frac{P_{spall}}{f_c} F_{rate} \right) \right]^N \quad (4.13)$$

onde:

$f_c$  = Resistência a compressão do concreto não-confinado;

$P$  = Pressão;

$P_{spall}$  = Resistência ao lascamento;

$A_{con}, N$  = Constantes características do material que dependem do tipo de concreto que está sendo utilizado.

O fator  $F_{rate}(\dot{\epsilon})$  leva em consideração o incremento na taxa de deformação, este é definido conforme mostra a equação (4.14) abaixo.

$$F_{rate}(\dot{\epsilon}) = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^{\alpha_{con}} & \text{para } P > \frac{f_c}{3}, \text{ com } \dot{\epsilon}_0 = 30 \times 10^{-6} s^{-1} \\ \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^{\delta_{con}} & \text{para } P < \frac{f_c}{3}, \text{ com } \dot{\epsilon}_0 = 3 \times 10^{-6} s^{-1} \end{cases} \quad (4.14)$$

onde  $\alpha_{con}$  e  $\delta_{con}$  são constantes do material.

Situações de tensão fora do meridiano de compressão do concreto são ajustadas pelo fator  $R_3(\theta_r)$  dado na equação (4.15). Este fator, que reduz a resistência a falha, é mostrado na equação (4.15) onde  $\theta_r$  é a rotação ao redor do eixo hidrostático.

$$R_3(\theta_r) = \frac{2(1 - Q_2^2)\cos\theta_r + (2Q_2 - 1)[4(1 - Q_2^2)\cos^2\theta_r + 5Q_2^2 - 4Q_2]^{1/2}}{4(1 - Q_2^2)\cos^2\theta_r + (1 - 2Q_2)^2} \quad (4.15)$$

O parâmetro  $Q_2$ , utilizado na equação (4.15), é dependente da pressão e varia de 0,51 a 1, ele foi obtido a partir de relações apresentadas por William e Warnke apud Hansson e Skoglund (2002).

Apesar das condições de contorno utilizadas nas simulações tornarem rígidos os elementos modelados com concreto, foi considerado um modelo de erosão.

O modelo de erosão utilizado foi o “Geometric strain”. Nesse modelo após os elementos Lagrangeanos atingirem um determinado nível de deformação ou distorção, passam a ser considerados como massas livres independentes da malha de origem. A utilização de modelos de erosão permite uma otimização dos cálculos e um ganho no tempo de processamento.

## **5 - SIMULAÇÕES REALIZADAS**

As simulações numéricas realizadas neste trabalho visam à análise pela fluidodinâmica computacional do fenômeno explosão e da interação das ondas de choque com obstáculos rígidos.

Uma vez reunidas informações importantes dos principais parâmetros no estudo das explosões, foram analisados diferentes modelos com o auxílio do software Autodyn, com os seguintes objetivos:

- Comparação dos resultados de sobrepressão de uma onda de choque de modelos empíricos com os resultados do Autodyn (simulações 1 e 2).

- Estudo da influência dos efeitos de múltipla reflexão das ondas de choque nas pressões geradas em um ambiente 3D (simulação 3).

- Estudo da influência do efeito de canalização da onda de choque nas pressões geradas (simulação 4).

- Estudo da influência da temperatura ambiente e da pressão ambiente nas pressões de uma onda de choque (simulações 5 e 6).

- Estudo da distribuição das sobrepressões de uma onda de choque em um ambiente urbano composto por duas edificações (simulação 7 e 8).

### **5.1 - 1º SIMULAÇÃO: ESTUDO DAS PRESSÕES INCIDENTES SOBRE UM PILAR DE CONCRETO ARMADO - MOON (2009)**

O trabalho de referência para esta simulação foi desenvolvido por Moon (2009), no qual foram obtidas as deflexões de diferentes pilares de concreto submetidos a uma detonação de 1816 kg de TNT ao nível do piso e a 5m de distância destes. A Tabela 5.1 apresenta as dimensões e características dos pilares utilizadas pelo autor.

Tabela 5.1 – Características dos pilares utilizados por Moon (2009) – Adaptado de Moon (2009)

| Pilares analisados<br>Moon (2009) | Dimensões<br>mm <sup>2</sup> | Fck<br>MPa | Espaçamento<br>dos Estribos | Detalhe<br>da armação |
|-----------------------------------|------------------------------|------------|-----------------------------|-----------------------|
| NSC 1                             | 500x900                      | 40         | 400                         | Convencional          |
| NSC 2                             | 500x900                      | 40         | 100                         | Sísmica               |
| HSC 1                             | 350x750                      | 80         | 400                         | Convencional          |
| HSC 2                             | 350x750                      | 80         | 100                         | Sísmica               |

Ao todo, foram analisadas as deflexões de quatro pilares com 6,4 m de altura para dois tipos de concreto caracterizados pela resistência  $f_{ck}$  40 e 80 MPa e duas formas de detalhamento de armadura, a convencional e a sísmica.

Moon (2009) obteve a deflexão dos pilares de forma numérica por meio do Ansys enquanto que a sobrepressão da onda de choque foi definida por meio de métodos empíricos.

Visando avaliar os valores de sobrepressão da onda de choque utilizados por Moon (2009), foi simulada a detonação do mesmo explosivo impactando um pilar de concreto cujas dimensões foram baseadas no pilar NSC 1.

O modelo simulado é composto por um pilar com um volume de ar em seu entorno, ambos tendo sido elaborados com elementos de volume, discretizados em uma malha de 50 mm (Figura 5.1). As condições de contorno adotadas restringiram o movimento do pilar no topo e na base.

Foram posicionados os sensores virtuais 1, 2 e 3 para captação das sobrepressões da onda de choque incidente na face frontal do pilar a 80, 160 e 240 cm da base (Figura 5.1), respectivamente.

Na modelagem, o pilar foi considerado dentro de um volume de ar, sob condições ambientes de temperatura e pressão. Foi habilitada a reflexão na superfície inferior deste volume, simulando a presença de um solo rígido e reflexivo.

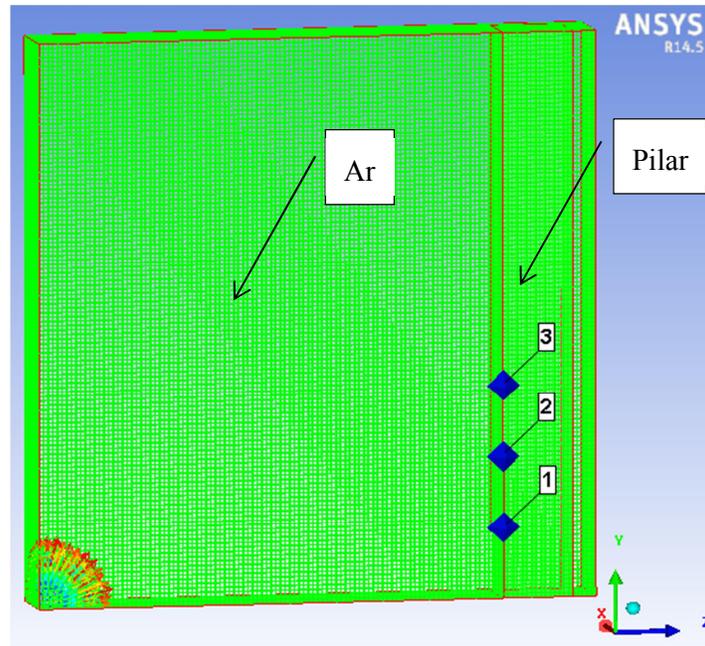


Figura 5.1 – Discretização do modelo

Os algoritmos do Autodyn permitem uma interação entre a técnica Euleriana presente na malha do ar composta de elementos tridimensionais Euler FCT e a Lagrangeana utilizada na definição do pilar, resultando em uma interação fluido estrutura.

As tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam as propriedades consideradas para os materiais utilizados na modelagem.

Tabela 5.2 - Propriedades do ar

| Ar   |                            |
|--|----------------------------|
| Equação de Estado  | Gás ideal                  |
| $\gamma$ (Razão entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a um volume constante) | 1,40                       |
| Massa específica de referência   | 0,001225 g/cm <sup>3</sup> |
| Temperatura de referência  | 288,2 K                    |
| Calor específico – $C_v$   | 717,6 J/kgK                |

Tabela 5.3 - Propriedades do TNT

| TNT                     |                        |
|-------------------------|------------------------|
| Equação de Estado       | JWL                    |
| Massa específica        | 1,63 g/cm <sup>3</sup> |
| $C_1$                   | 373770 MPa             |
| $C_2$                   | 3747,1 MPa             |
| $r_1$                   | 4,15                   |
| $r_2$                   | 0,9                    |
| $\Omega$                | 0,35                   |
| Velocidade de detonação | 6930 m/s               |
| Energia                 | 6000 MJ/m <sup>3</sup> |
| Pressão                 | 21000 MPa              |

Tabela 5.4 - Propriedades do concreto

| Concreto          |                            |
|-------------------|----------------------------|
| Equação de Estado | Polinomial (Mie-Gruneisen) |
| A <sub>1</sub>    | 35,27x10 <sup>6</sup> kPa  |
| A <sub>2</sub>    | 39,58x10 <sup>6</sup> kPa  |
| A <sub>3</sub>    | 9,04x10 <sup>6</sup> kPa   |
| B <sub>0</sub>    | 1,22                       |
| B <sub>1</sub>    | 1,22                       |
| T <sub>1</sub>    | 35,27x10 <sup>6</sup> kPa  |
| T <sub>2</sub>    | 0 kPa                      |

Foi realizada a comparação dos resultados em termos de sobrepressões e tempo de duração da fase positiva da onda de choque com os de Moon (2009) e com os obtidos por meio de expressões de predição das sobrepressões de uma onda de choque propostas por outros autores (Tabela 5.5).

A partir destes resultados é possível observar uma boa aproximação entre o método de predição empírica adotado por Moon (2009) e a abordagem numérica pelo Autodyn, em que as diferenças quanto à sobrepressão da onda de choque e o tempo de duração desta são de aproximadamente 15%.

É importante ressaltar que as diferenças entre os resultados do Autodyn e as predições empíricas devem-se, principalmente, à pequena distância em escala do problema e a consideração dos efeitos de reflexão pelas simulações.

A pequena distância em escala torna mais complexa a previsão da distribuição da energia na formação da onda. Além disso, os métodos empíricos analisados para a predição das sobrepressões não consideram os efeitos de reflexão.

A figura 5.2 apresenta as curvas da sobrepressão da onda de choque ao longo do tempo para cada um dos três sensores virtuais analisados.

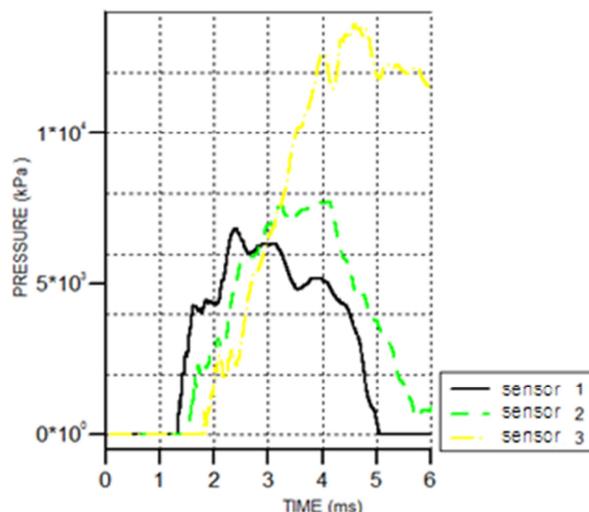


Figura 5.2 - Sobrepressões da onda de choque nos sensores virtuais 1, 2 e 3.

É possível observar que as pressões não foram constantes ao longo da altura do pilar. Este acréscimo nas sobrepressões deve-se às reflexões de onda que não são consideradas pelos métodos empíricos apresentados.

Moon (2009) considerou a sobrepressão estimada por ele constante ao longo de todo o pilar, todavia, pode-se ver pelas simulações que tal consideração não representa com fidelidade o carregamento imposto pela onda de choque.

## 5.2 - 2º SIMULAÇÃO: AVALIAÇÃO DAS SOBREPRESSÕES A 5 METROS DE DISTÂNCIA DO EPICENTRO DE UMA EXPLOSÃO A CÉU ABERTO

O trabalho de referência utilizado para o desenvolvimento desta simulação foi apresentado por Smith (1994). Este é baseado na predição por meios empíricos das sobrepressões causadas pela detonação de um explosivo ao ar livre. Smith (1994) considerou como carregamento a explosão de 25 kg de RDX a 5 metros de distância do ponto de análise.

Para a resolução deste problema, Smith (1994) utilizou um ábaco no qual é possível a obtenção de parâmetros importantes de uma onda de choque mediante o uso da distância em escala.

O ábaco, apresentado na figura 5.3, é uma adaptação dos trabalhos desenvolvidos por Baker apud Smith (1994) e do manual TM5-1300 apud Smith (1994), no qual é possível definir, para condições ambientes normais, a sobrepressão de uma onda de choque, o tempo de chegada, o tempo de duração da fase positiva e o impulso específico.

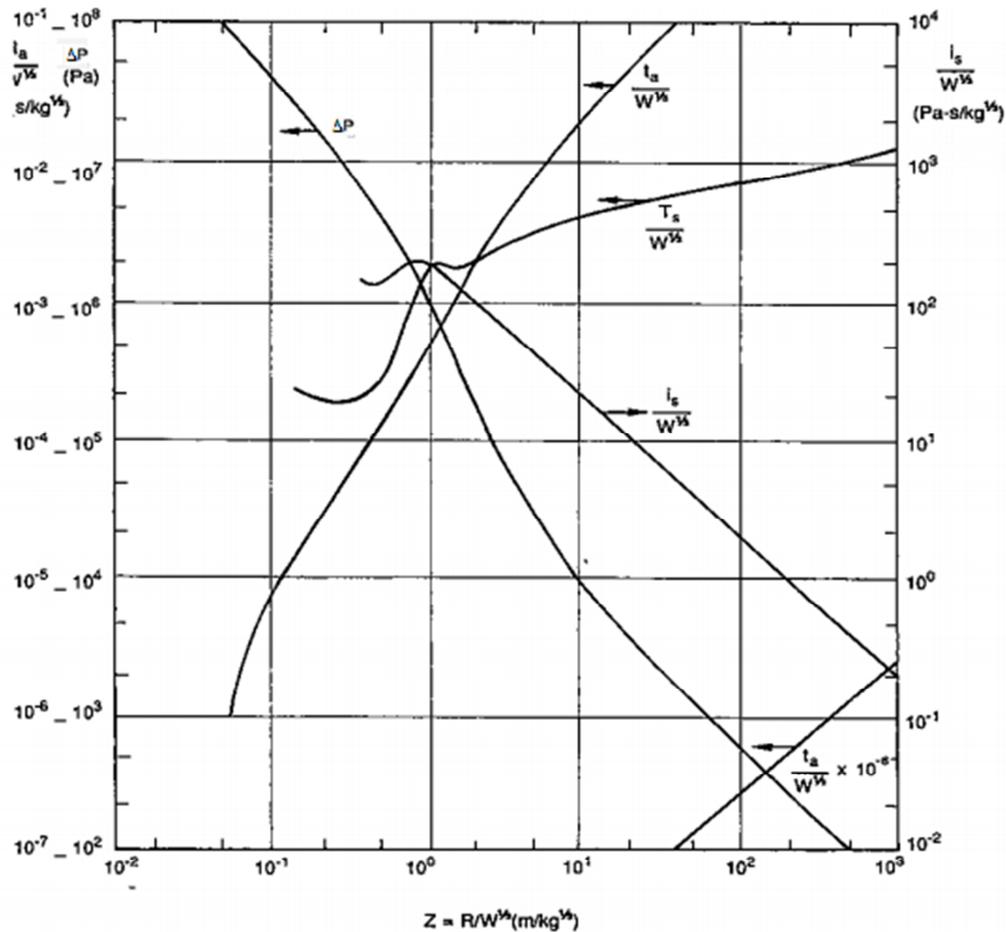


Figura 5.3 - Parâmetros da onda de choque para explosões advindas de cargas esféricas de TNT. Adaptado de Smith (1994)

Smith (1994) definiu, através do ábaco anterior, a sobrepressão da onda de choque, o tempo de duração da fase positiva da onda de choque e o tempo de chegada da onda em um alvo a 5m do epicentro da explosão considerada. Nesta análise não foram considerados obstáculos entre a onda de choque e o ponto de análise ou o fenômeno da reflexão de onda.

Baseado nisto foi modelado no Autodyn a explosão de um dispositivo de mesma massa (em equivalente em TNT) onde são coletadas as mesmas informações para comparação dos resultados. Na simulação são realizadas as mesmas considerações quanto à ausência de obstáculos e desconsideração das reflexões.

O modelo simulado é composto por um volume de ar de dimensões 1000x100x5000 mm<sup>3</sup>, onde foram consideradas as condições normais de temperatura e pressão. Para o desenvolvimento do modelo foram utilizados elementos de volume baseados na técnica Euleriana, também conhecidos por elementos tridimensionais Euler FCT, em uma malha de 50 mm (Figura 5.4). Foi considerada uma explosão de uma massa de 29,63 kg de TNT equivalente à carga de RDX do problema.

O sensor para captação dos dados foi posicionado dentro do volume de ar a 5m de distância do epicentro da explosão. As condições de contorno adotadas não permitiram as reflexões da onda de choque.

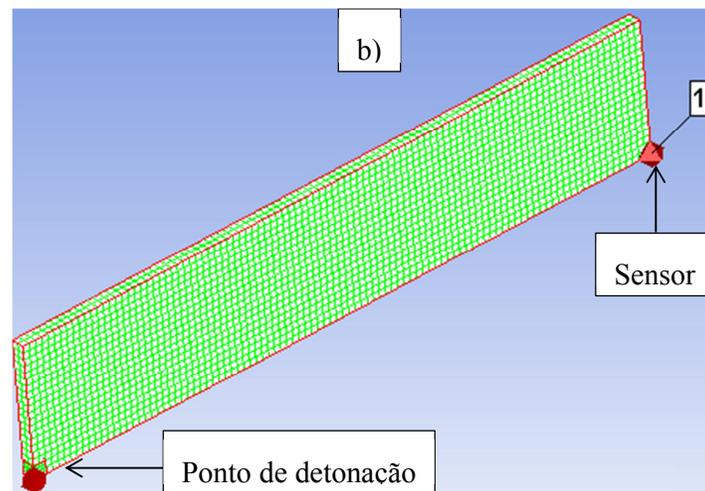


Figura 5.4 – Volume de ar discretizado por uma malha de 50 mm

As tabelas 5.6 e 5.7, apresentam as propriedades dos materiais utilizados na modelagem.

Tabela 5.6 - Propriedades do ar

| Ar   |                            |
|--|----------------------------|
| Equação de Estado  | Gás ideal                  |
| $\gamma$ (Razão entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a um volume constante) | 1,40                       |
| Massa específica de referência   | 0,001204 g/cm <sup>3</sup> |
| Temperatura de referência  | 293,2 K                    |
| Calor específico - $C_v$   | 717,6 J/kgK                |

Tabela 5.7 - Propriedades do TNT

| TNT                     |                        |
|-------------------------|------------------------|
| Equação de Estado       | JWL                    |
| Massa específica        | 1,63 g/cm <sup>3</sup> |
| $C_1$                   | 373770 MPa             |
| $C_2$                   | 3747,1 MPa             |
| $r_1$                   | 4,15                   |
| $r_2$                   | 0,9                    |
| $\Omega$                | 0,35                   |
| Velocidade de detonação | 6930 m/s               |
| Energia                 | 6000 MJ/m <sup>3</sup> |
| Pressão                 | 21000 MPa              |

A tabela 5.8 apresenta os resultados para a sobrepressão, o tempo de chegada ( $T_a$ ) e o tempo de duração da fase positiva da onda de choque ( $T_d$ ) obtidos pela simulação em comparação com os resultados de Smith (1994) e com outros métodos de predição.

Tabela 5.8 – Resultado para sobrepressões, tempo de chegada (ms) e tempos de duração da fase positiva da onda de choque (ms), obtidos neste trabalho, por Smith (1994) e outros métodos de predição

| Pesquisadores            | Sobrepressão (KPa) | $T_a$ (ms) | $T_d^+$ (ms) |
|--------------------------|--------------------|------------|--------------|
| Smith (1994)             | 260                | 3,40       | 5,25         |
| Murilo Limeira (Autodyn) | 279                | 3,96       | 4,14         |
| Brode                    | 259                | -          | -            |
| Henrych                  | 278                | -          | -            |
| Newmark                  | 304                | -          | -            |
| Mills                    | 456                | -          | -            |
| Kinney                   | 349                | -          | 2,95         |

Pelos resultados apresentados na tabela anterior é possível observar uma boa aproximação entre os resultados do Autodyn, os de Smith (1994) e os obtidos através de Brode e Henrych apud Smith (1994). A diferença entre os resultados nestes casos é inferior a 8%.

A desconsideração dos efeitos de reflexão de onda e a inexistência de obstáculos contribuíram para a boa aproximação entre os resultados numéricos e empíricos. Isso é porque os métodos de predição apresentados utilizam como dados de entrada apenas a distância da explosão ao ponto de análise e a quantidade de explosivo.

### **5.3 - 3º SIMULAÇÃO: ANÁLISE E MENSURAÇÃO DAS SOBREPRESSÕES EM UM AMBIENTE SUJEITO ÀS REFLEXÕES DE ONDA**

O estudo das reflexões de onda de choque quando estas incidem obliquamente sobre uma determinada superfície é de grande complexidade. Nesse sentido, Luccioni e Ambrosini

(2005) desenvolveram uma simulação numérica, na qual se baseia a simulação abordada nesse tópico.

No caso estudado por estes autores, simulou-se a explosão de 300kg de TNT em um volume de ar buscando avaliar como o fenômeno de múltiplas reflexões de onda pode influenciar nas sobrepressões incidentes sobre um determinado ponto.

A simulação dos autores foi realizada através do Autodyn, no qual foi posicionada uma carga de 300 kg de TNT dentro de um volume de ar na posição I conforme mostra a figura 5.5.

O modelo da figura 5.5 representa o volume de ar modelado numericamente e onde a explosão foi gerada. O modelo simulado pelos autores é composto por uma malha de elementos de volume de 100 mm, desenvolvidos pela técnica Euleriana também chamados de elementos tridimensionais Euler FCT.

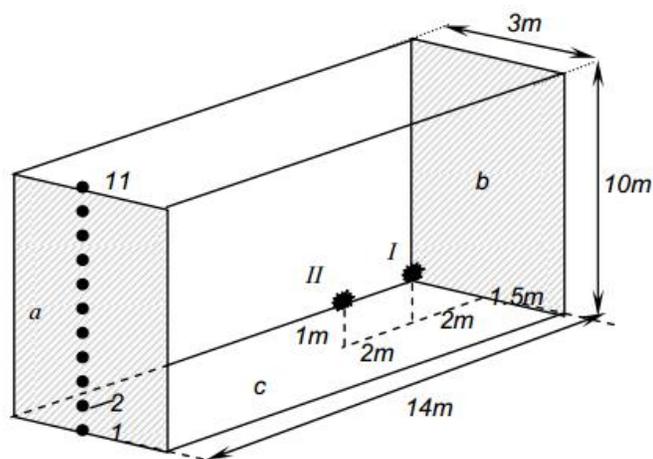


Figura 5.5 – Esquema do modelo utilizado para o estudo da propagação da onda de choque e a predição das pressões devido às reflexões oblíquas, Luccioni e Ambrosini(2005)

O sensor 2 utilizado para obtenção dos valores das sobrepressões situa-se na face “a” e a detonação do explosivo ocorreu na posição I. O objetivo desta simulação é a obtenção e análise dos históricos de pressão no tempo para a determinação das pressões nos seguintes casos:

- Caso I: Se consideram as faces **a**, **b** e **c** infinitamente rígidas. Portanto, nesse caso, as reflexões podem ocorrer e o acréscimo nas sobrepressões devido às reflexões oblíquas e às múltiplas reflexões é levado em consideração.

- Caso II: Neste caso apenas a face **a** é rígida por isso o fenômeno das múltiplas reflexões não ocorre. A avaliação deste caso é importante, pois possibilita uma comparação da magnitude das pressões entre os casos em que se consideram ou não as múltiplas reflexões.

O programa computacional adotado pelos autores da simulação base e por este trabalho é o mesmo. Apesar disso, é importante salientar que algumas considerações quanto à modelagem numérica (utilização da precisão dupla, processador utilizado etc.), condições ambientes do ar e características do explosivo tiveram de ser adotadas neste trabalho e, por isso, têm a possibilidade de divergirem das adotadas na simulação realizada por Luccioni e Ambrosini (2005).

O modelo simulado neste trabalho é composto por um volume de ar discretizado em uma malha de 100 mm composta por elementos tridimensionais Euler FCT (Figura 5.6). Foram consideradas as condições ambientes de temperatura e pressão.

As dimensões do modelo simulado, posicionamento dos sensores, carga de explosivo, condições de contorno e local da explosão foram as mesmas adotadas por Luccioni e Ambrosini (2005).

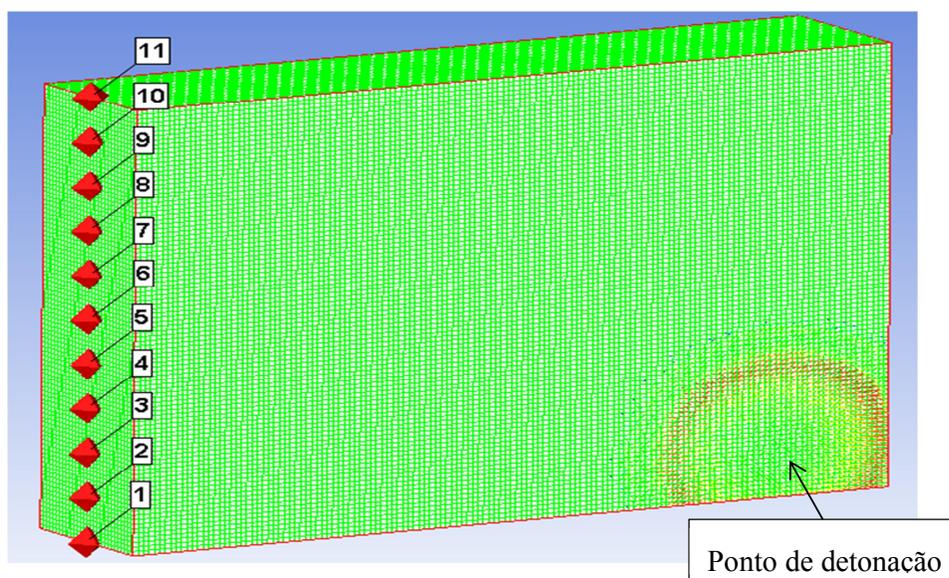


Figura 5.6 – Malha utilizada na discretização do volume de ar

Os valores adotados para as propriedades do ar e do TNT foram os mesmos considerados nas simulações anteriores.

A tabela 5.9 apresenta os resultados para sobrepressão e tempo de chegada da onda de choque, obtidos por Luccioni e Ambrosini (2005) e pela simulação desenvolvida neste trabalho.

Tabela 5.9 - Resultados de sobrepressão e tempo de chegada da onda de choque para os diferentes casos analisados

| Casos analisados | Pesquisadores               | Sobrepressão (kPa) | Ta (ms) |
|------------------|-----------------------------|--------------------|---------|
| Caso I           | Luccioni e Ambrosini (2005) | ~1900              | ~8,1    |
|                  | Murilo Limeira              | 1766               | 8,1     |
| Caso II          | Luccioni e Ambrosini (2005) | ~1100              | ~10     |
|                  | Murilo Limeira              | 1040               | 10,1    |

As pequenas diferenças encontradas nos resultados (inferiores a 8%) podem ser atribuídas a considerações diferentes que podem ter sido realizadas durante a modelagem numérica.

Em linhas gerais, os resultados mostram que a presença de algumas superfícies reflexivas é suficiente para quase duplicar o valor das sobrepressões da onda de choque.

As múltiplas reflexões de onda são um fenômeno característico de explosões em ambientes confinados que pode resultar em incrementos no valor da sobrepressão da onda de choque. Na simulação realizada foi possível observar que apenas algumas superfícies de reflexão associadas a uma detonação acima do nível do solo já são suficientes para maximizar o efeito destrutivo da explosão em termos de sobrepressão de onda de choque.

Portanto, no estudo das explosões, pelo fato das formulações empíricas não contemplarem os efeitos da reflexão no valor da sobrepressão da onda de choque, se faz necessário um desenvolvimento numérico do problema de modo a retratar com melhor aproximação a física do problema.

Nesse âmbito, visando definir a influência que as propriedades e características do meio e do explosivo exercem nas pressões da onda de choque, foi executada uma série de simulações apresentadas nos tópicos a seguir.

#### 5.4 - 4º SIMULAÇÃO: AVALIAÇÃO DO EFEITO DE CANALIZAÇÃO DA ONDA DE CHOQUE SOBRE O VALOR DA PRESSÃO

O efeito de canalização das ondas de choque é resultado da propagação da onda em um meio confinado. A geometria do confinamento pode dificultar a dispersão da onda e direcionar a energia da explosão em uma ou mais direções. O efeito de canalização da onda de choque é responsável por acréscimos nas sobrepressões geradas, elevando a magnitude delas quando comparadas com a mesma explosão ao ar livre.

Com o Autodyn foram desenvolvidas simulações cujo objetivo é quantificar o incremento nas sobrepressões da onda de choque devido ao efeito de canalização quando imposta uma situação de confinamento à explosão.

Para isso, foram simulados quatro modelos considerando uma explosão de 50kg de TNT confinada entre dois obstáculos rígidos a diferentes distâncias do epicentro, conforme mostra o esquema da figura 5.7.

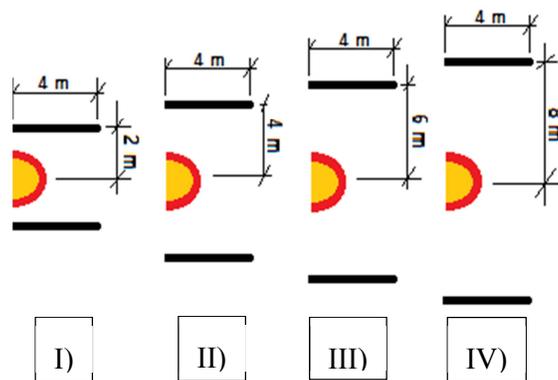


Figura 5.7 – I) Obstáculos a 2m do epicentro; II) Obstáculos a 4m do epicentro; III) Obstáculos a 6m do epicentro IV) Obstáculos a 8m do epicentro

Os modelos são constituídos por uma região de ar confinada por paredes laterais rígidas onde foi simulada uma explosão. Para a modelagem do ar foram utilizados elementos planos Euler FCT e, para a modelagem dos sólidos, elementos planos Lagrange (Figura 5.8). A malha utilizada foi de 50 mm.

O ar foi considerado sob condições ambientes de temperatura e pressão. A coleta dos valores das sobrepressões da onda de choque foi realizada pelos sensores virtuais 1, 2 e 3 posicionados na direção da canalização da onda a 2m, 4m e 8m do epicentro da explosão, respectivamente (Figura 5.8).

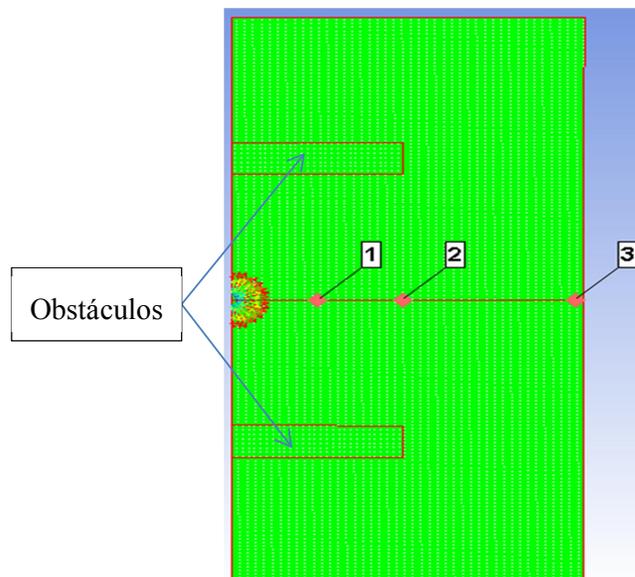


Figura 5.8 – Modelo discretizado em malha de 50 mm e posicionamento dos sensores

As condições de contorno utilizadas tornaram rígidos os obstáculos de concreto e consideraram a região do ar como um meio ilimitado.

Os valores adotados para as propriedades do ar, TNT e concreto são apresentadas nas Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12.

Tabela 5.10- Propriedades do ar

| Ar   |                            |
|--|----------------------------|
| Equação de Estado  | Gás ideal                  |
| $\gamma$ (Razão entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a um volume constante) | 1,40                       |
| Massa específica de referência   | 0,001225 g/cm <sup>3</sup> |
| Temperatura de referência  | 288,2 K                    |
| Calor específico – $C_v$   | 717,6 J/kgK                |

Tabela 5.11- Propriedades do TNT

| TNT                     |                        |
|-------------------------|------------------------|
| Equação de Estado       | JWL                    |
| Massa específica        | 1,63 g/cm <sup>3</sup> |
| C <sub>1</sub>          | 373770 MPa             |
| C <sub>2</sub>          | 3747,1 MPa             |
| r <sub>1</sub>          | 4,15                   |
| r <sub>2</sub>          | 0,9                    |
| Ω                       | 0,35                   |
| Velocidade de detonação | 6930 m/s               |
| Energia                 | 6000 MJ/m <sup>3</sup> |
| Pressão                 | 21000 MPa              |

Tabela 5.12 - Propriedades do concreto

| Concreto          |                            |
|-------------------|----------------------------|
| Equação de Estado | Polinomial (Mie-Gruneisen) |
| A <sub>1</sub>    | 35,27x10 <sup>6</sup> kPa  |
| A <sub>2</sub>    | 39,58x10 <sup>6</sup> kPa  |
| A <sub>3</sub>    | 9,04x10 <sup>6</sup> kPa   |
| B <sub>0</sub>    | 1,22                       |
| B <sub>1</sub>    | 1,22                       |
| T <sub>1</sub>    | 35,27x10 <sup>6</sup> kPa  |
| T <sub>2</sub>    | 0 kPa                      |

Em todos os modelos foram simulados os primeiros 15 ms da explosão. Com os valores de sobrepressão da onda de choque captados pelos sensores 1, 2 e 3 foram elaborados gráficos da pressão em função do tempo apresentados nas figuras 5.9, 5.10 e 5.11.

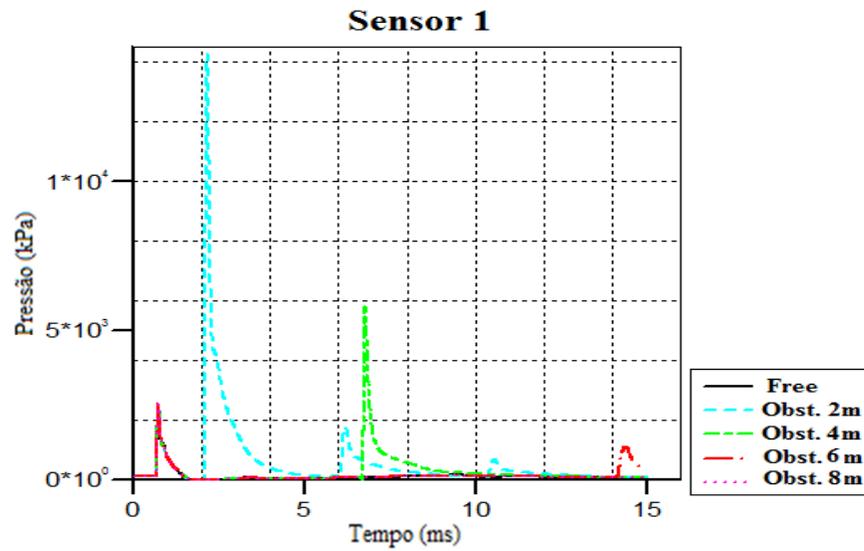


Figura 5.9 – Gráfico da pressão em função do tempo de uma onda de choque gerada pela detonação de 50 kg de TNT. (Sensor 1)

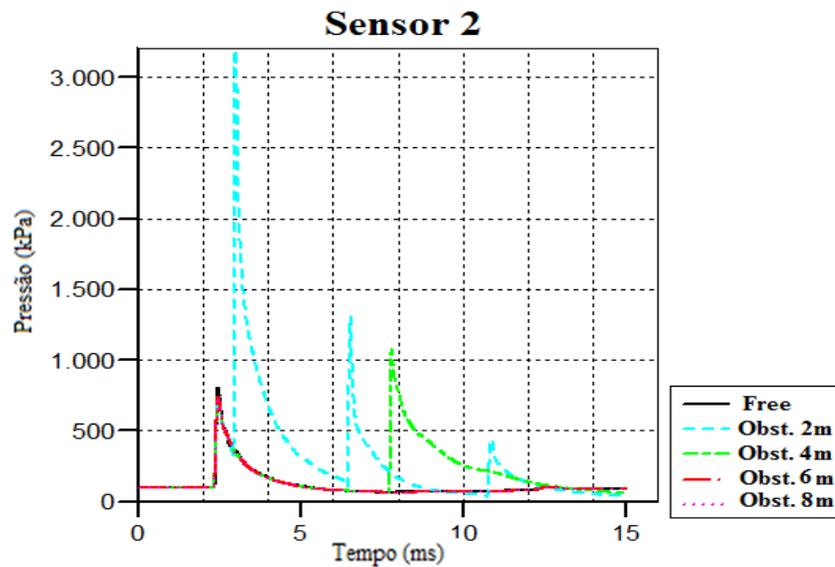


Figura 5.10 – Gráfico da pressão em função do tempo de uma onda de choque gerada pela detonação de 50 kg de TNT. (Sensor 2)

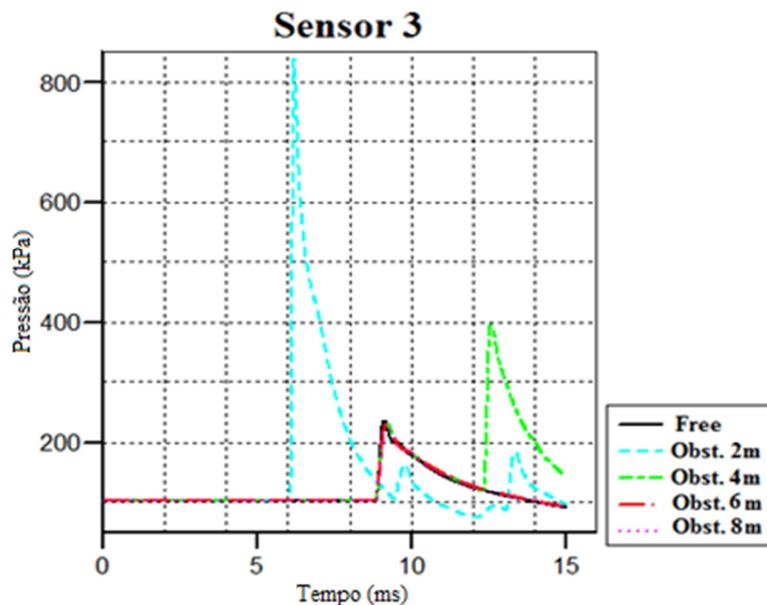


Figura 5.11 – Gráfico da pressão em função do tempo de uma onda de choque gerada pela detonação de 50 kg de TNT. (Sensor 3)

Em todos os gráficos da evolução da pressão em função do tempo apresentados é possível observar sucessivos picos de pressão o que permite identificar a ocorrência do fenômeno de reflexão de ondas de choque.

O caso em que os obstáculos foram posicionados a 2m do epicentro da explosão apresentou, em comparação com os demais casos, os maiores valores de sobrepressão além de mais picos sucessivos.

É possível afirmar, para o caso dos anteparos rígidos posicionados a 2 m do epicentro da explosão, que o nível de canalização da energia foi o maior possível incrementando o valor da sobrepressão em mais de 400% em comparação com a mesma explosão ao ar livre Além disso, a energia acumulada neste mesmo caso fez com que a onda de choque atingisse o sensor 3 mais rapidamente.

A Tabela 5.13 apresenta os valores das pressões para os casos de uma explosão ao ar livre e com anteparos a 2 m e 4m de distância.

Tabela 5.13 – Pressões máximas para os casos de uma explosão ao ar livre e anteparos a 2 m e 4 m do ponto de explosão

| Pesquisadores             | Pressão Máxima (kPa) |                |                |
|---------------------------|----------------------|----------------|----------------|
|                           | Sensor 1 (kPa)       | Sensor 2 (kPa) | Sensor 3 (kPa) |
| Ar livre (sem obstáculos) | 2525                 | 798            | 234            |
| Obstáculo a 2 m           | 14243                | 3192           | 837            |
| Obstáculo a 4 m           | 5775                 | 1072           | 394            |

A partir da tabela 5.13, pode-se comparar as pressões da onda de choque do caso sem obstáculo com os demais. Com isso é possível observar que o efeito de canalização ocasionado pela presença dos obstáculos implica em um incremento no valor das pressões das ondas de choque.

As sucessivas reflexões de onda ocasionadas pelos obstáculos e o incremento nos resultados das pressões incidentes, indicam que estas condições de canalização podem ter contribuído para o surgimento de uma onda Mach. Baseado neste resultado é possível fazer algumas afirmações quanto a explosões em meios urbanos.

- A existência de corredores muito estreitos em uma edificação pode resultar no efeito de canalização de onda caso a estrutura seja submetida a uma explosão.

- Uma explosão acidental em uma grande cidade com edifícios muito próximos e ruas estreitas, por exemplo, dependendo da carga de explosivo pode resultar em uma canalização da onda de choque. Por isso a importância de grandes áreas abertas nos grandes centros.

### **5.5 - 5º SIMULAÇÃO: AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO AMBIENTE SOBRE A PRESSÃO ORIUNDA DE UMA ONDA DE CHOQUE**

A análise do parâmetro da pressão ambiente e como este influencia no valor das sobrepensões da onda de choque é importante, pois boa parte dos trabalhos desenvolvidos na área das explosões considera o ar sob condições normais ao nível do mar. Entretanto a pressão ambiente pode variar bastante, pois está vinculada com a altura em relação ao nível do mar. Por isso é possível se encontrar pressões ambientes elevadas em cavernas profundas de mineração e pressões menores no ar rarefeito no topo de montanhas.

O objetivo das simulações aqui descritas é quantificar as diferenças nas sobrepressões de uma onda de choque ao se analisar a mesma explosão sob diferentes pressões ambientes. A massa de explosivo utilizada será de 6,8 kg de TNT.

Os modelos são compostos por uma região plana de ar no qual foi simulada a detonação de TNT, a opção por um modelo bidimensional neste caso permite um ganho de tempo de processamento em relação aos modelos 3D além de permitir o remapeamento futuro desta detonação em modelos mais complexos. Para a elaboração deste modelo foram utilizados elementos 2D Euler em Wedge (figura 5.12). Este elemento é de simetria esférica, o que possibilita um remapeamento em modelos 3D, possui 2 m de raio e foi dividido em 500 células.

Para a captação das pressões da onda foi posicionado o sensor virtual 1 a 1,5 m do ponto de detonação

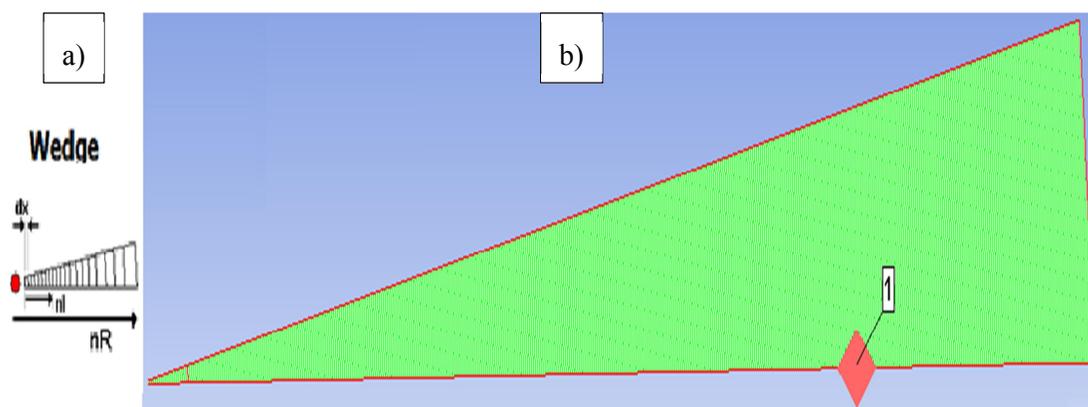


Figura 5.12 – a) Elemento utilizado na modelagem; b) Malha gerada para o modelo e posicionamento do sensor virtual.

As propriedades adotadas para o material explosivo TNT e para o ar são apresentadas na tabela 5.14 e 5.15.

Tabela 5.14- Propriedades do TNT

| TNT                     |                        |
|-------------------------|------------------------|
| Equação de Estado       | JWL                    |
| Massa específica        | 1,63 g/cm <sup>3</sup> |
| C <sub>1</sub>          | 373770 MPa             |
| C <sub>2</sub>          | 3747,1 MPa             |
| r <sub>1</sub>          | 4,15                   |
| r <sub>2</sub>          | 0,9                    |
| Ω                       | 0,35                   |
| Velocidade de detonação | 6930 m/s               |
| Energia                 | 6000 MJ/m <sup>3</sup> |
| Pressão                 | 21000 MPa              |

Tabela 5.15- Propriedades do ar

| Ar  |                                    |
|---|------------------------------------|
| Equação de Estado   | Gás ideal                          |
| γ (Razão entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a um volume constante) | 1,40                               |
| Massa específica de referência  | Definida a partir pressão ambiente |
| Calor específico - C <sub>v</sub>   | 717,6 J/kgK                        |

A Tabela 5.16 apresenta a descrição dos casos estudados nas simulações.

Tabela 5.16 - Casos analisados nas simulações

| Descrição |   |
|-----------|---|
| 1° Caso   | Pressão Ambiente à condições normais (1atm)   |
| 2° Caso   | Ambiente de baixa pressão, topo de uma montanha de altura bem superior a 2500 m (0,1 atm) |
| 3° Caso   | Ambiente de baixa pressão, valor intermediário entre o 1° e o 2° Casos (0,6 atm)          |
| 4° Caso   | Ambiente de alta pressão, valor comum de pressão limite para o trabalho humano (3,2 atm)  |
| 5° Caso   | Ambiente de alta pressão, valor intermediário entre o 4° e o 1° Casos (2,0 atm)           |

A partir das informações coletadas pelo sensor 1 foi elaborada a tabela 5.17 em que foram reunidos os resultados quanto à pressão máxima e a sobrepressão da onda de choque dos casos analisados.

Tabela 5.17 – Valores da pressão inicial (ambiente), pressão máxima e sobrepressão da onda de choque para os casos analisados (kPa)

| Casos Analisados | Pressão Inicial<br>(atm) | Pressão Máxima<br>(kPa) | Sobrepressão<br>(kPa) |
|------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1° Caso          | 1                        | 1580                    | 1479                  |
| 2° Caso          | 0,1                      | 1534                    | 1524                  |
| 3° Caso          | 0,6                      | 1557                    | 1496                  |
| 4° Caso          | 3,2                      | 1749                    | 1424                  |
| 5° Caso          | 2                        | 1633                    | 1430                  |

De acordo com os resultados apresentados na tabela é possível observar alguns aspectos importantes com relação às características de explosões em meios com pressões ambientes diferenciadas das condições normais.

Em relação à pressão máxima, é observado que os maiores valores absolutos das pressões da onda vêm dos lugares onde a pressão inicial é elevada, ou seja, pressões ambientes maiores resultarão em pressões máximas também maiores.

Por outro lado, deve-se atentar que a sobrepressão é superior nos casos em que a pressão ambiente é baixa, isso significa que quanto menor for a pressão local, maior será o diferencial com a pressão da onda de choque.

#### **5.6 - 6º SIMULAÇÃO: AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA AMBIENTE SOBRE A PRESSÃO ORIUNDA DE UMA ONDA DE CHOQUE**

Parte da energia liberada durante as reações químicas que promovem uma explosão se manifesta sobre a forma térmica, elevando de forma brusca a magnitude da temperatura dos gases no seu entorno. A quantidade de explosivo se relaciona diretamente com este incremento, quanto maior a massa de explosivo envolvida na reação maior será energia e, portanto, maiores as temperaturas geradas.

As simulações desenvolvidas neste tópico visam avaliar a influência da temperatura ambiente nas sobrepressões de uma onda de choque gerada a partir da detonação de 6,8kg de TNT.

A modelagem numérica deste problema deu-se de maneira semelhante à desenvolvida na simulação anterior. Os modelos são compostos por uma região plana de ar no qual foi simulada a detonação de TNT. Como já mencionado no item anterior, o modelo bidimensional adotado permite um ganho de tempo de processamento em relação aos modelos 3D, além de permitir o remapeamento futuro desta detonação em modelos mais complexos. Foram realizadas ao todo três simulações onde se variou a temperatura ambiente no local da explosão. Para o desenvolvimento do modelo foram utilizados elementos 2D Euler em Wedge. O modelo, que pode ser utilizado em problemas de simetria esférica, possui 2500 mm de raio divididos em 1000 células (Figura 5.13).

Para a captação das pressões da onda foi posicionado o sensor virtual 1 a 2 m do ponto de detonação

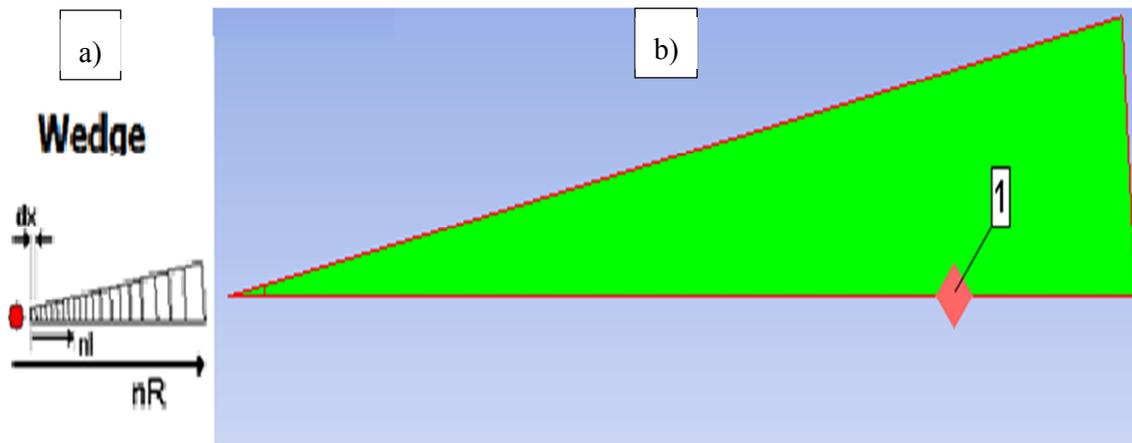


Figura 5.13 – a) Elemento utilizado na modelagem; b) Malha gerada para o modelo e posicionamento do sensor virtual.

As propriedades dos materiais utilizados nas simulações abordadas neste tópico são mostradas nas tabelas 5.18 e 5.19.

Tabela 5.18- Propriedades do ar

| Ar   |   |
|--|---|
| Equação de Estado  | Gás ideal                                 |
| $\gamma$ (Razão entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a um volume constante) | 1,40                                      |
| Massa específica de referência   | Definida a partir da temperatura ambiente |
| Calor específico - $C_v$   | 717,6 J/kgK                               |

Tabela 5.19 - Propriedades do TNT

| TNT                     |                        |
|-------------------------|------------------------|
| Equação de Estado       | JWL                    |
| Massa específica        | 1,63 g/cm <sup>3</sup> |
| C <sub>1</sub>          | 373770 MPa             |
| C <sub>2</sub>          | 3747,1 MPa             |
| r <sub>1</sub>          | 4,15                   |
| r <sub>2</sub>          | 0,9                    |
| Ω                       | 0,35                   |
| Velocidade de detonação | 6930 m/s               |
| Energia                 | 6000 MJ/m <sup>3</sup> |
| Pressão                 | 21000 MPa              |

Neste tópico foram simulados três modelos, que constituem os três casos analisados nos quais se variou a temperatura ambiente do ar em cada um deles.

- 1º Caso: Temperatura de 15°C, tomada convencionalmente como ambiente (padrão do programa Autodyn ®);

- 2º Caso: Temperatura de -20°C, contemplando um ar frio com energia interna sensivelmente menor que o 1º Caso;

- 3º Caso: Temperatura de 40°C, contemplando um ar quente, uma temperatura comum em regiões de clima tropical de modo que o ar apresenta energia interna sensivelmente maior que no 1º Caso.

Sendo admitidas as mesmas cargas de explosivo e a mesma pressão ambiente em todos os casos, se pode avaliar comparativamente os resultados obtidos. A tabela 5.20 a seguir apresenta os resultados para a temperatura final, variação de temperatura e pressão máxima da onda de choque para cada caso analisado.

Tabela 5.20 – Resultados em termos de temperatura final, variação de temperatura e pressão máxima para cada caso analisado

|                | Temperatura inicial<br>(°C) | Temperatura<br>Final (°C) | $\Delta t$ (°C) | Pressão máxima<br>(kPa) |
|----------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------|-------------------------|
| <b>1° Caso</b> | 15                          | 427                       | 412             | 868,56                  |
| <b>2° Caso</b> | -20                         | 382                       | 402             | 854,56                  |
| <b>3° Caso</b> | 40                          | 458                       | 418             | 877,60                  |

Analisando os resultados apresentados na tabela é possível perceber que as diferentes temperaturas ambientes de cada caso pouco influenciam nas pressões finais de uma onda de choque. As diferenças entre as pressões finais entre os diferentes casos foram inferiores a 2%.

Pelo fato da quantidade de energia térmica liberada pela detonação dos explosivos em todos os casos ser basicamente a mesma, observa-se que os diferenciais de temperatura ( $\Delta t$ ) alcançam valores muito próximos.

### **5.7 - 7° SIMULAÇÃO: AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES DE UMA ONDA DE CHOQUE ORIGINADA POR UMA EXPLOSÃO EM MEIO URBANO**

O conjunto de simulações realizadas neste tópico tem como objetivo o estudo da propagação das ondas de choque em um ambiente urbano composto por elementos rígidos e a determinação dos perfis de pressão.

Os modelos simulados são compostos por duas edificações rígidas que foram submetidas a uma explosão externa. Para a realização deste estudo os casos simulados foram divididos em três grupos:

Grupo 1: Neste grupo de simulações foram modeladas proteções entre as edificações e o epicentro da explosão. Sendo feita uma comparação da eficiência destas proteções quanto à redução das pressões da onda de choque incidentes nas edificações. Ao todo foram avaliados quatro modelos.

Grupo 2: Neste conjunto de simulações foi avaliado como o nível de aberturas afeta o comportamento e a dispersão das pressões na parte interna e externa das edificações. Ao todo, foram avaliados três modelos.

Grupo 3: Neste caso avaliou-se como alterações no layout interno das edificações interferem nas pressões internas. Ao todo, foram avaliados três modelos.

Cada modelo simulado é composto por duas edificações rígidas de 2700 mm de altura, modeladas dentro de um volume de ar sob condições ambientes de temperatura e pressão (Figura 5.14). As condições de contorno utilizadas para os elementos de concreto das edificações permitem que os mesmos sejam considerados rígidos, possibilitando um estudo adequado da propagação e reflexão das ondas de choque sem a interferência de fragmentos ou deformações excessivas.

Para a elaboração dos modelos foram utilizados elementos tridimensionais Euler FCT na discretização do ar e elementos tridimensionais Lagrange na discretização das edificações. Todos os modelos simulados foram modelados com uma malha de 50 mm como sugerido por Luccioni e Ambrosini (2005) para o estudo da propagação de ondas de choque em meios urbanos. A Figura 5.14 apresenta a discretização utilizada nos modelos.

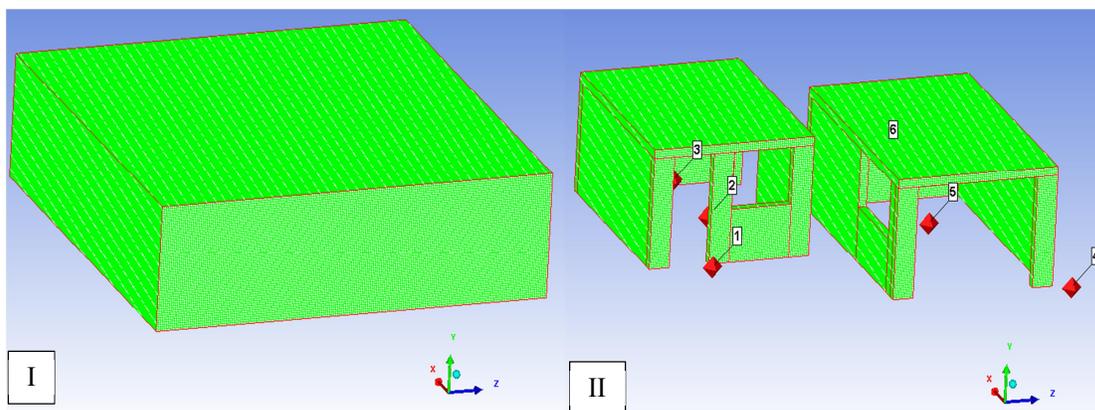


Figura 5.14 - I: Discretização do volume de ar envolvendo as edificações; II: Discretização das edificações simuladas e posição dos sensores virtuais.

As condições de contorno adotadas para o volume ar o simulavam como um meio ilimitado. Foi habilitada a reflexão da onda de choque na superfície inferior do volume, representando a superfície rígida do solo.

Foram posicionados sensores virtuais nos modelos a 500 mm de altura de modo se captar as sobrepressões da onda de choque em pontos importantes.

As Tabelas 5.21, 5.22 e 5.23 apresentam as características dos materiais utilizados para modelagem.

Tabela 5.21- Propriedades do ar

| Ar   |                            |
|--|----------------------------|
| Equação de Estado  | Gás ideal                  |
| $\Upsilon$ (Razão entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a um volume constante) | 1,40                       |
| Massa específica de referência   | 0,001225 g/cm <sup>3</sup> |
| Temperatura de referência  | 288,2 K                    |
| Calor específico - Cv  | 717,6 J/kgK                |

Tabela 5.22 - Propriedades do concreto

| Concreto          |                            |
|-------------------|----------------------------|
| Equação de Estado | Polinomial (Mie-Gruneisen) |
| A <sub>1</sub>    | 35,27x10 <sup>6</sup> kPa  |
| A <sub>2</sub>    | 39,58x10 <sup>6</sup> kPa  |
| A <sub>3</sub>    | 9,04x10 <sup>6</sup> kPa   |
| B <sub>0</sub>    | 1,22                       |
| B <sub>1</sub>    | 1,22                       |
| T <sub>1</sub>    | 35,27x10 <sup>6</sup> kPa  |
| T <sub>2</sub>    | 0 kPa                      |

Tabela 5.23 - Propriedades do TNT

| TNT                     |                        |
|-------------------------|------------------------|
| Equação de Estado       | JWL                    |
| Massa específica        | 1,63 g/cm <sup>3</sup> |
| C <sub>1</sub>          | 373770 MPa             |
| C <sub>2</sub>          | 3747,1 MPa             |
| r <sub>1</sub>          | 4,15                   |
| r <sub>2</sub>          | 0,9                    |
| Ω                       | 0,35                   |
| Velocidade de detonação | 6930 m/s               |
| Energia                 | 6000 MJ/m <sup>3</sup> |
| Pressão                 | 21000 MPa              |

As propriedades dos materiais e características de modelagem, como tipo de elemento e tamanho da malha, foram mantidas em todos os grupos de simulações analisados neste tópico.

### 5.7.1 - Avaliação das pressões de onda de choque em meio urbano – Grupo 1

Neste grupo foram obtidas as pressões da onda de choque oriunda da detonação de 100kg de TNT a 50 cm de altura. E se avaliou o comportamento destas sob a influência de diferentes tipos de obstáculos.

São mostrados na figura 5.15 os tipos de obstáculos rígidos utilizados nas simulações realizadas.

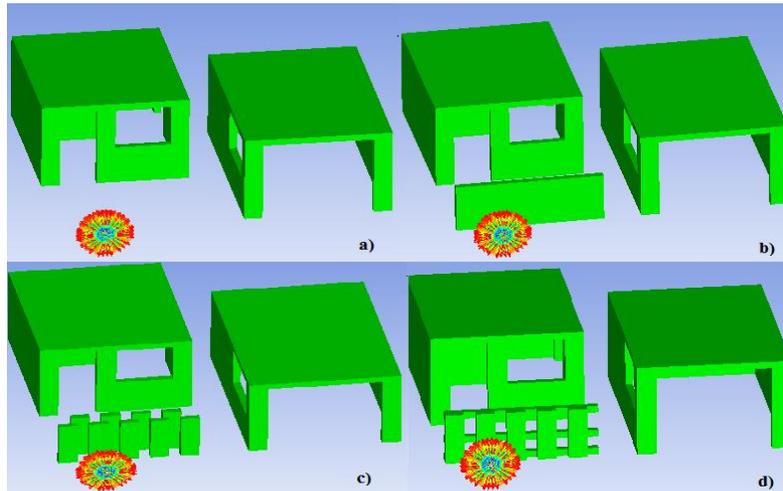


Figura 5.15 - a) Edificações sem obstáculo para proteção; b) Obstáculo do tipo mureta rígida; c) Obstáculos prismáticos alternados; d) Obstáculo do tipo grade;

A utilização destes diferentes tipos de obstáculos nestes modelos permite visualizar a interação da onda de choque com diferentes geometrias além de tornar possível a comparação do desempenho de cada um deles quanto à mitigação das sobrepressões das ondas de choque incidentes nas edificações. A figura 5.16 mostra o esquema dos diferentes tipos de proteção utilizados nas simulações.

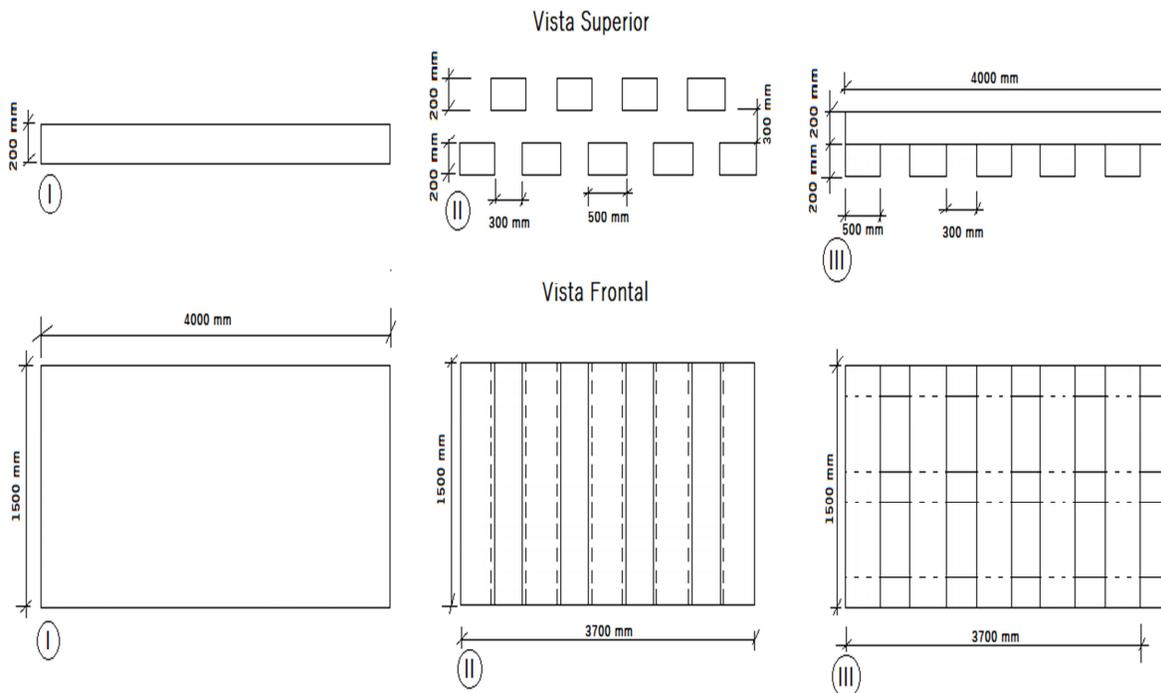


Figura 5.16 – I) Esquema do obstáculo tipo mureta; II) Esquema dos obstáculos prismáticos alternados; III) Esquema do obstáculo tipo grade

A figura 5.17 apresenta o layout das duas edificações simuladas no grupo 1 e o posicionamento dos sensores virtuais.

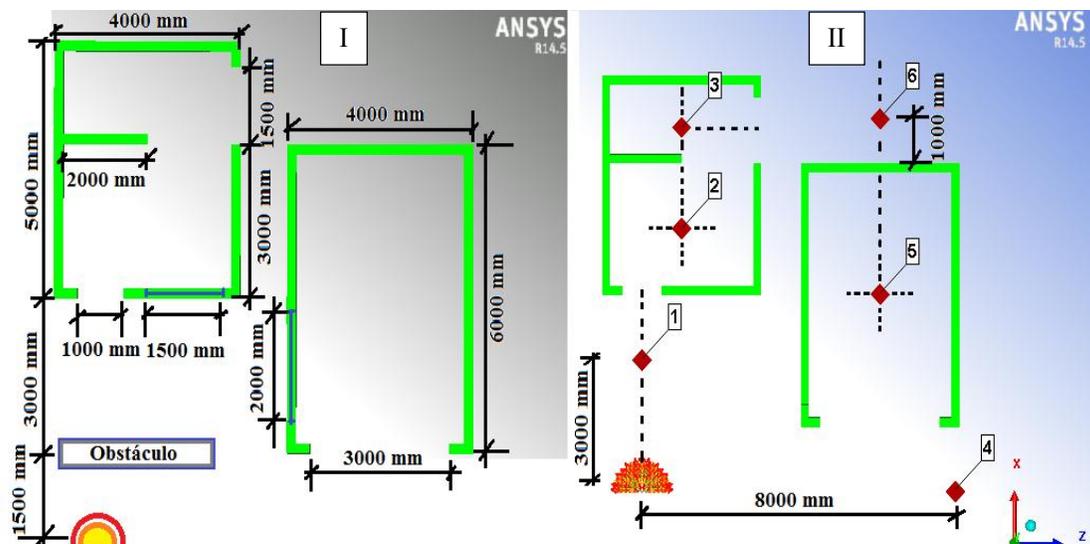


Figura 5.17 - I: Esquema geral das edificações em que uma linha azul sobre as paredes indica a posição das janelas; II: Posicionamento dos sensores virtuais no modelo simulado

Na figura 5.17 é possível observar que os sensores virtuais foram posicionados na parte interna e externa das edificações, permitindo uma análise da distribuição das pressões em todo modelo. O espaçamento entre as duas edificações é de 1m.

Uma vez simulados todos os casos, foram coletados os dados referentes às pressões máximas e tempos de chegada captados pelos sensores virtuais de cada modelo. Também foi considerado um modelo sem nenhuma edificação a título de comparação com as demais simulações. A tabela 5.24 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.24 - Valores da pressão máxima (kPa) e tempo de chegada (ms) captados pelos sensores virtuais em cada um dos casos analisados

| Modelo                | Pressões (kPa)        | Sensor 1 | Sensor 2 | Sensor 3 | Sensor 4 | Sensor 5 | Sensor 6 |
|-----------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                       | Tempo de chegada (ms) |          |          |          |          |          |          |
| Sem edificações       | Pressão Máx.          | 2854     | 1326     | 643      | 736      | 817      | 357      |
|                       | Ta                    | 0,99     | 2,95     | 5,41     | 4,84     | 4,17     | 8,22     |
| a) Sem obstáculo      | Pressão Máx.          | 2854     | 525      | 440      | 784      | 436      | 213      |
|                       | Ta                    | 0,99     | 3,29     | 10,89    | 4,86     | 6,99     | 9,73     |
| b) Mureta rígida      | Pressão Máx.          | 324      | 221      | 165      | 1117     | 372      | 148      |
|                       | Ta                    | 3,16     | 8,85     | 14,41    | 4,31     | 6,47     | 14,68    |
| c) Prismas alternados | Pressão Máx.          | 1333     | 228      | 190      | 995      | 365      | 157      |
|                       | Ta                    | 1,40     | 6,68     | 11,61    | 4,51     | 6,79     | 13,25    |
| d) Grade de proteção  | Pressão Máx.          | 2668     | 301      | 181      | 1055     | 322      | 153      |
|                       | Ta                    | 1,14     | 4,56     | 12,26    | 4,45     | 6,82     | 13,06    |

Se observa em todos os casos que a presença de obstáculos colabora na redução das pressões da onda de choque incidentes nos sensores 1, 2 e 3.

Entretanto, parte da energia refletida pelos obstáculos incrementou o valor da pressão da onda de choque captada pelo sensor virtual 4. Comparando os casos em que foram utilizadas proteções com a situação sem proteção, o incremento nas pressões da onda de choque no sensor 4 chegou a superar os 40%.

Quanto às pressões nos ambientes internos, comparando-se os casos em que foram utilizadas proteções, pode-se observar que os valores das pressões nos sensores 2 e 3 foram próximos. O que pode significar que a geometria e a disposição das aberturas das edificações estejam mais relacionadas à redução destas pressões do que a forma e posicionamento de obstáculos externos.

### 5.7.2 - Avaliação das pressões de onda de choque em meio urbano – Grupo 2

Visando avaliar a influência da forma e da disposição das aberturas de uma edificação na mitigação das pressões de uma onda de choque nos ambientes internos foram executadas as simulações deste grupo.

Para isso foram simulados três modelos com duas edificações cada, submetidas à explosão de um dispositivo de 100kg de TNT a 50cm de altura.

A Figura 5.18 apresenta a discretização numa malha de 50 mm dos modelos G1, G2 e G3. Na figura é possível observar o posicionamento das aberturas das edificações e a indicação dos sensores.

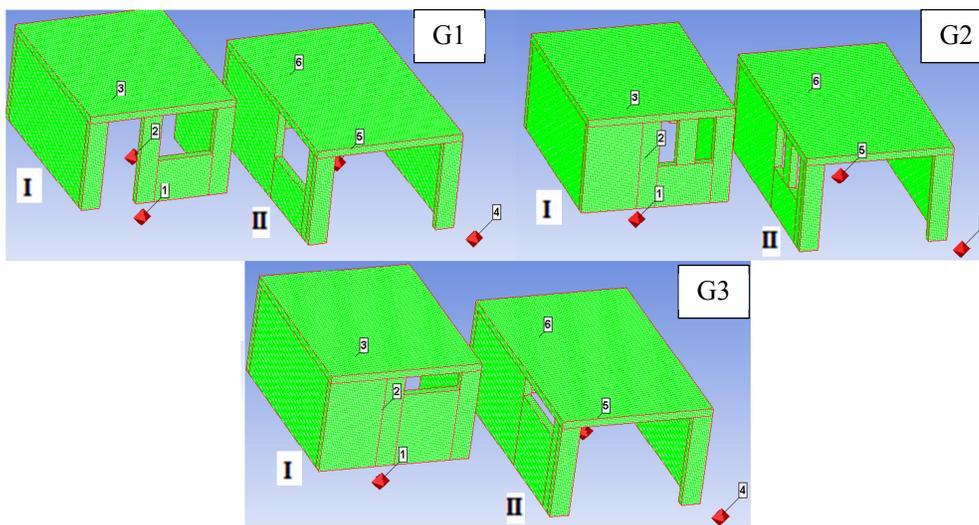


Figura 5.18 – Esquema das edificações I e II dos modelos G1, G2 e G3 no Autodyn e posição dos sensores virtuais

As cotas relativas geometria das aberturas da edificação I e II de cada modelo podem ser observadas na figura 5.19 e 5.20, respectivamente.

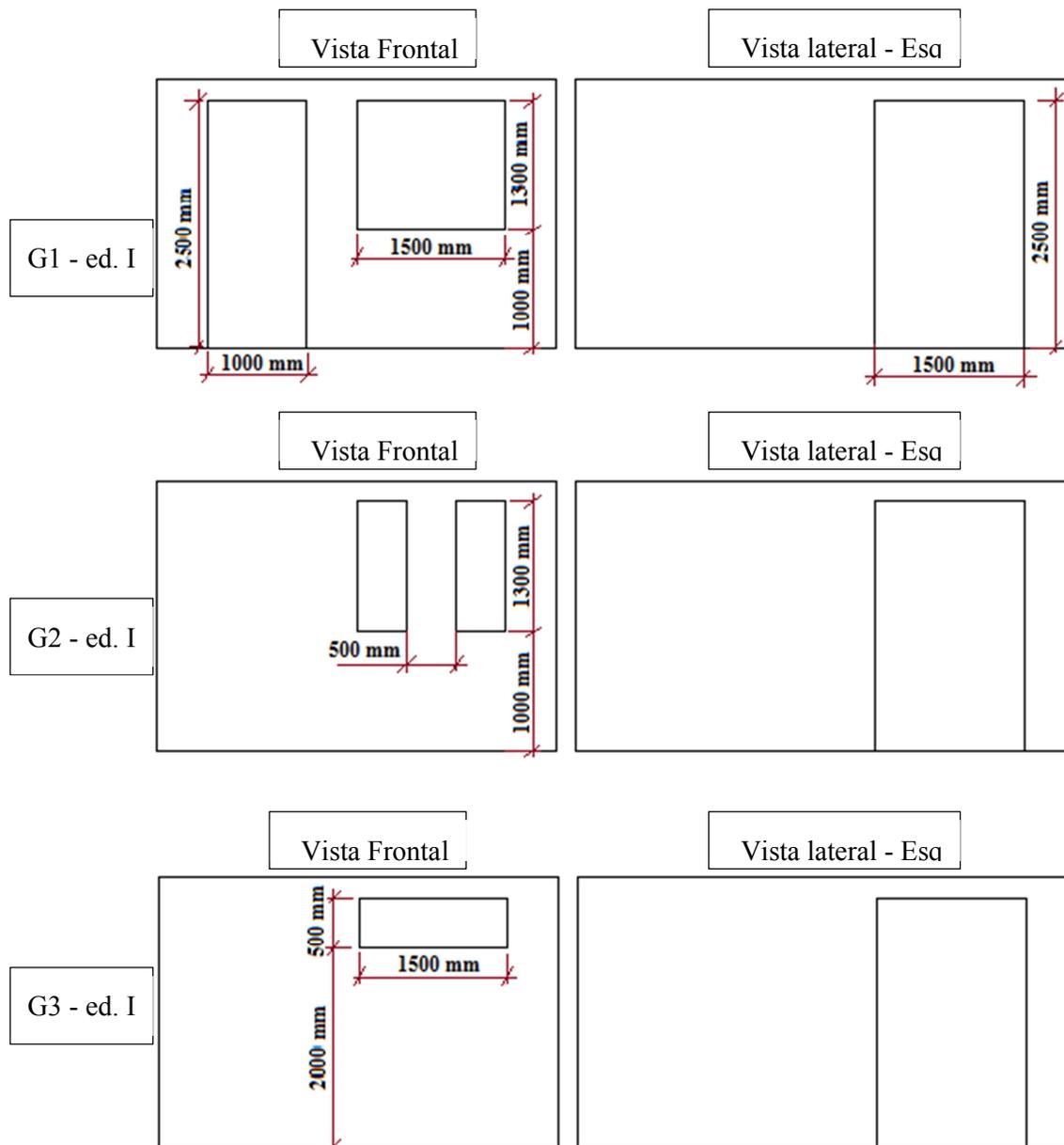


Figura 5.19 – Geometrias das aberturas da edificação I

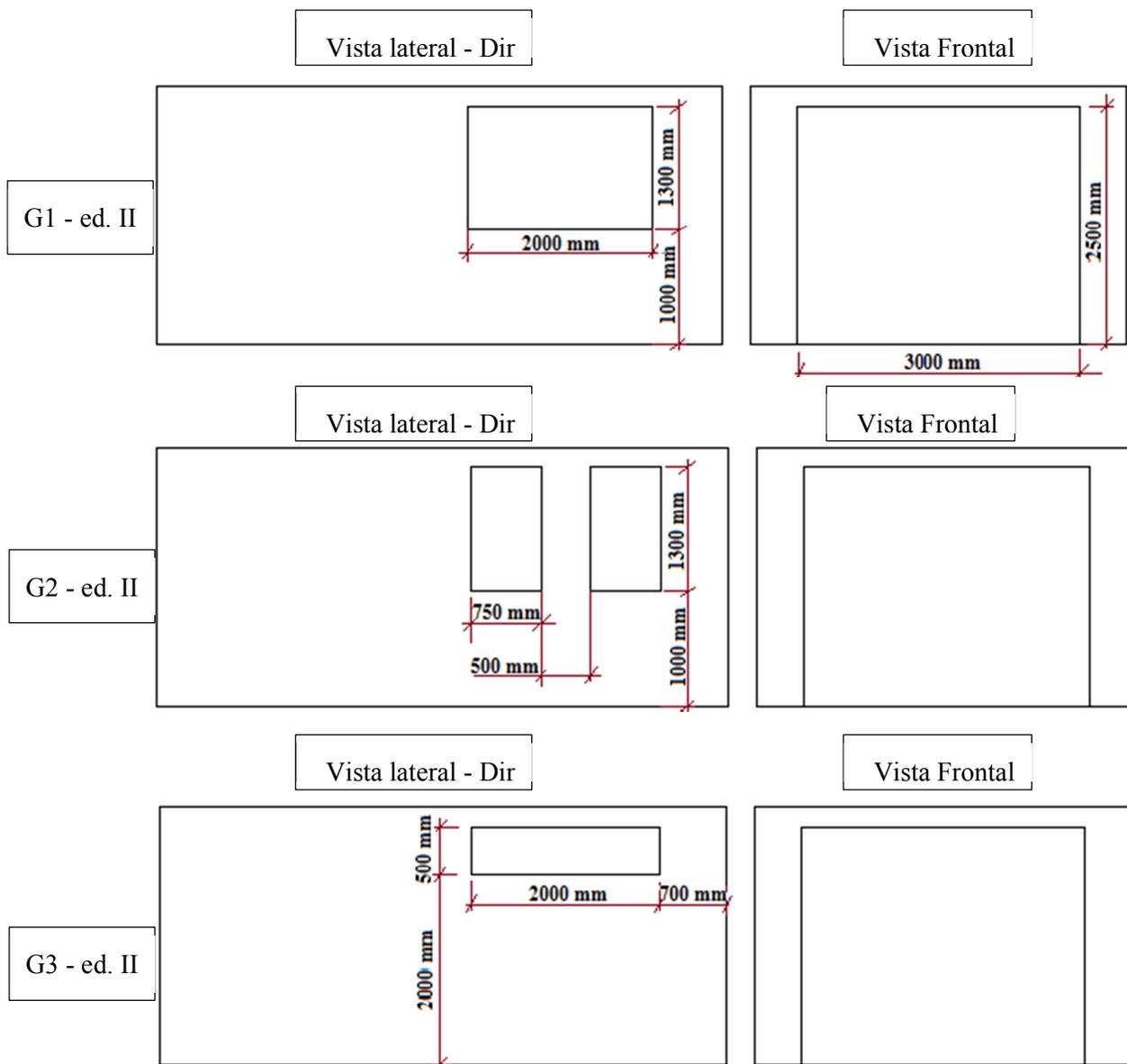


Figura 5.20 - Geometrias das aberturas da edificação II

Uma vez finalizadas as simulações, foram coletados os resultados de pressão máxima e tempo de chegada da onda de choque em todos os sensores virtuais. A tabela 5.25 apresenta os resultados de pressão e tempo de chegada da onda de choque, relativos aos sensores 2, 3 e 5 situados nos ambientes internos de cada modelo.

Tabela 5.25 - Valores da pressão máxima (kPa) e tempo de chegada (ms) referentes aos sensores virtuais 2,3 e 5 das simulações do grupo 2

| Modelo | Pressões (kPa)        | Sensor 2 | Sensor 3 | Sensor 5 |
|--------|-----------------------|----------|----------|----------|
|        | Tempo de chegada (ms) |          |          |          |
| G1     | Pressão Máx.          | 525      | 440      | 436      |
|        | Ta                    | 3,29     | 10,89    | 6,99     |
| G2     | Pressão Máx.          | 172      | 262      | 350      |
|        | Ta                    | 7,46     | 9,54     | 7,17     |
| G3     | Pressão Máx.          | 181      | 286      | 336      |
|        | Ta                    | 7,06     | 9,98     | 7,42     |

Com os resultados da tabela 5.25 é possível concluir que as edificações G2 e G3, por possuírem menos aberturas, apresentaram menores pressões internas em seus ambientes, pois conseguiram manter boa parte da energia da onda de choque do lado externo da edificação. A distribuição das pressões da onda de choque nos ambientes internos das edificações, para os casos G1 e G2, são mostrados na figura 5.21.

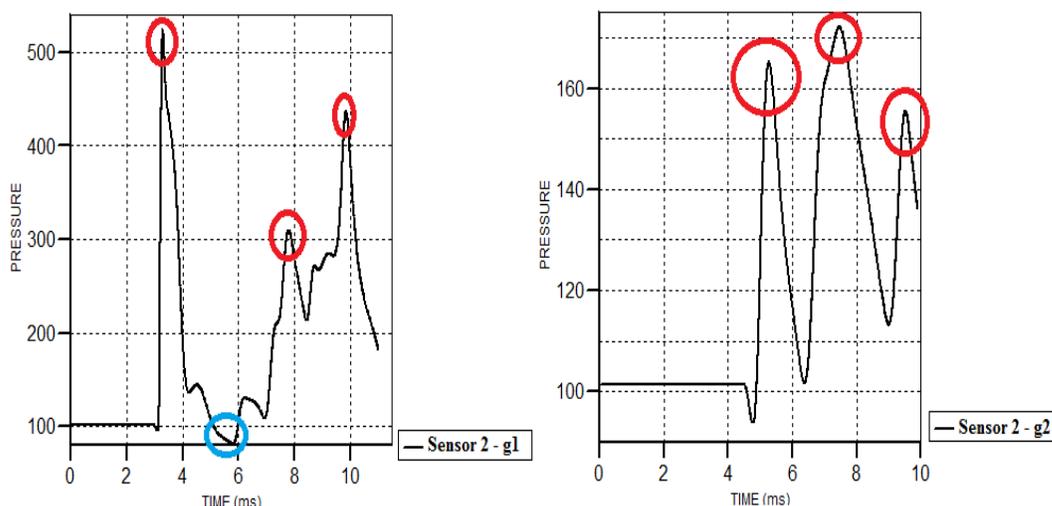


Figura 5.21 - Gráficos da pressão em função do de uma onda de choque, gerados pelo sensor 2 das simulações g1 e g2. Em vermelho, os picos de pressão da fase positiva; Em azul o pico da fase negativa

Analisando os gráficos da figura 5.21, é possível observar que a edificação G2, que possui menos aberturas, protegeu o ambiente interno contra o pico de pressão da onda de choque incidente. Entretanto, por possuir menos aberturas, a onda de choque refletiu diversas vezes dentro daquele ambiente dando origem a picos sucessivos de pressão.

Além disso, é provável que um ambiente com menos aberturas acumule a energia calorífica da explosão por mais tempo, o que pode resultar em incêndios em alguns casos.

### **5.7.3 - Avaliação das pressões de onda de choque em meio urbano – Grupo 3**

As simulações realizadas neste grupo visam o estudo dos layouts internos das edificações e a influência da disposição deles nas múltiplas reflexões que ocorrem no interior das estruturas, incrementando ou mitigando os valores das pressões em um determinado ponto.

Para a realização deste estudo, foram simulados três casos o Int.1, Int.2 e o Int.3, em que as considerações realizadas para modelagem, incluindo o posicionamento das edificações e dos sensores, são os mesmos dos grupos anteriores.

A Figura 5.22 apresenta os layouts das edificações simuladas no Autodyn, nela é possível observar os diferentes layouts internos adotados em cada modelo e a posição dos sensores.

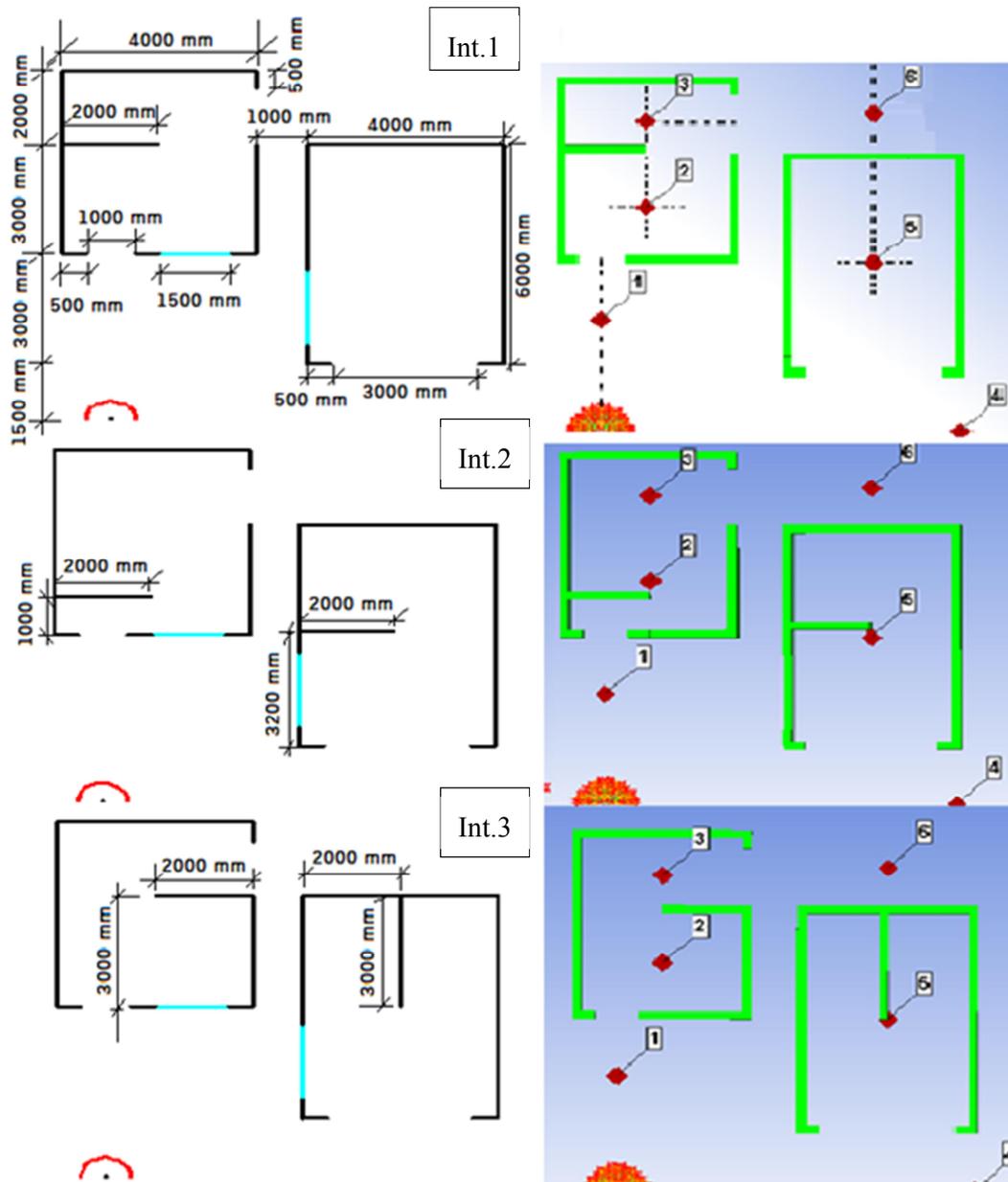


Figura 5.22 - Esquema dos modelos simulados no grupo 3. A esquerda, cotas principais; À direita o posicionamento dos sensores

Uma vez simulados os modelos, foram coletados os dados da pressão e tempos de chegada da onda de choque relativos aos sensores 2,3 e 5 situados no interior das edificações. A tabela 5.26 apresenta estes resultados.

Tabela 5.26 - Valores da pressão máxima (kPa) e tempo de chegada da onda de choque (ms), coletados pelos sensores virtuais 2, 3 e 5 das simulações do grupo 3

| Modelo | Pressões (kPa)<br>Tempo de chegada (ms) | Sensor 2 | Sensor 3 | Sensor 5 |
|--------|---|----------|----------|----------|
| Int. 1 | Pressão Máx.                            | 525      | 440      | 436      |
|        | Ta                                      | 3,29     | 10,89    | 6,99     |
| Int. 2 | Pressão Máx.                            | 230      | 463      | 755      |
|        | Ta                                      | 8,05     | 9,60     | 6,90     |
| Int. 3 | Pressão Máx.                            | 525      | 358      | 673      |
|        | Ta                                      | 3,30     | 10,20    | 7,09     |

Com os resultados apresentados na tabela 5.26, é possível observar que, apesar de mantidas as posições dos sensores em todos os casos, os diferentes layouts internos das edificações resultaram numa redistribuição total das pressões de onda de choque nos ambientes.

Nos casos analisados nenhuma configuração mostrou-se eficiente quanto à mitigação das pressões nos ambientes internos das edificações.

A figura 5.23 apresenta um gráfico da pressão em função do tempo do sensor 2 do modelo Int. 2.

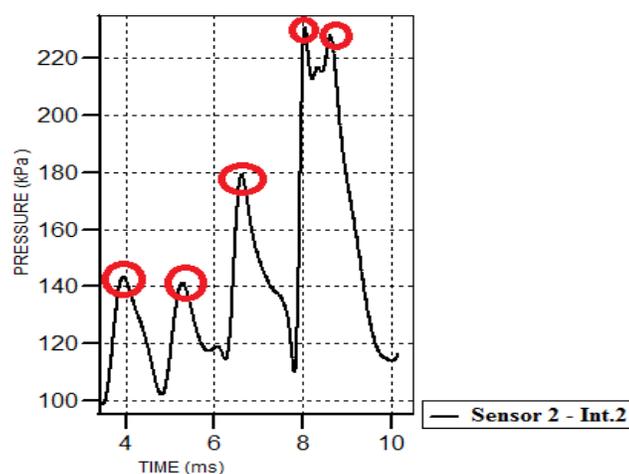


Figura 5.23 - Gráfico da pressão em função do tempo de uma onda de choque captada pelo sensor 2 no modelo Int. 2.

Na figura 5.23 é possível observar que a pressão máxima no ambiente analisado foi resultado do fenômeno de múltiplas reflexões, como pode ser visto pelos picos sucessivos do gráfico.

Analisando os resultados da tabela 5.26 em conjunto com o gráfico da figura 5.23, observa-se que, apesar das paredes paralelas a entrada da edificação reduzirem as sobrepressões incidentes da onda de choque em seu interior, elas acabam resultando em uma geometria favorável ao fenômeno de múltiplas reflexões.

### **5.8 - 8º SIMULAÇÃO: AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES DE UMA ONDA DE CHOQUE CAUSADA PELA EXPLOSÃO ACIDENTAL DE UM CILINDRO COMERCIAL DE PROPANO EM MEIO URBANO**

As explosões acidentais representam um risco real à segurança de pessoas e edificações. Visando encontrar as pressões geradas por uma explosão acidental, foi desenvolvida a simulação abordada neste tópico considerando a detonação de 10 kg de propano.

Determinar a eficiência em TNT da explosão de um hidrocarboneto é uma tarefa complexa, sendo dependente da parcela de energia que será transformada para geração das pressões. Associado a isto, utilizar modelos de previsão de sobrepressão de explosivos sólidos resulta, geralmente, em superestimar as sobrepressões da combustão de nuvens de vapor, Casagrande (2006).

A consideração realizada nesta simulação para determinar o equivalente em TNT do propano permitiu adotar o valor crítico de 1,95, referente à explosão de propano puro, Dewey (2005).

O modelo estudado é composto por duas edificações com um volume de ar em torno delas. Para a simulação numérica foram utilizados elementos tridimensionais Euler FCT na discretização do ar e elementos tridimensionais Lagrange na discretização das edificações. O modelo foi discretizado com uma malha de 50 mm.

A figura 5.24 ilustra a malha adotada para as edificações simuladas neste tópico, observa-se que é idêntica à apresentada na simulação do modelo sem obstáculo do tópico 5.7.1. A diferença entre estes modelos consiste apenas na carga de explosivo utilizada.

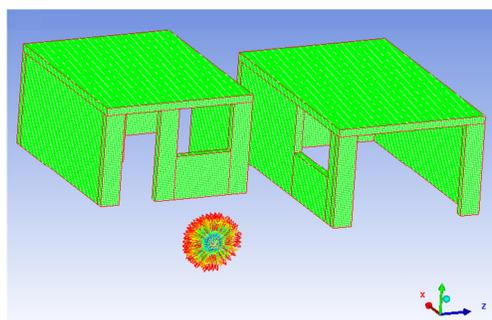


Figura 5.24 - Discretização das edificações simuladas

As tabelas 5.27, 5.28 e 5.29 apresentam as características dos materiais utilizados para modelagem.

Tabela 5.27- Propriedades do ar

| Ar  |                            |
|---|----------------------------|
| Equação de Estado   | Gás ideal                  |
| Y (Razão entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a um volume constante) | 1,40                       |
| Massa específica de referência  | 0,001225 g/cm <sup>3</sup> |
| Temperatura de referência   | 288,2 K                    |
| Calor específico - Cv   | 717,6 J/kgK                |

Tabela 5.28- Propriedades do concreto

| Concreto          |                            |
|-------------------|----------------------------|
| Equação de Estado | Polinomial (Mie-Gruneisen) |
| A <sub>1</sub>    | 35,27x10 <sup>6</sup> kPa  |
| A <sub>2</sub>    | 39,58x10 <sup>6</sup> kPa  |
| A <sub>3</sub>    | 9,04x10 <sup>6</sup> kPa   |
| B <sub>0</sub>    | 1,22                       |
| B <sub>1</sub>    | 1,22                       |
| T <sub>1</sub>    | 35,27x10 <sup>6</sup> kPa  |
| T <sub>2</sub>    | 0 kPa                      |

Tabela 5.29- Propriedades do TNT

| TNT                     |                        |
|-------------------------|------------------------|
| Equação de Estado       | JWL                    |
| Massa específica        | 1,63 g/cm <sup>3</sup> |
| C <sub>1</sub>          | 373770 MPa             |
| C <sub>2</sub>          | 3747,1 MPa             |
| r <sub>1</sub>          | 4,15                   |
| r <sub>2</sub>          | 0,9                    |
| Ω                       | 0,35                   |
| Velocidade de detonação | 6930 m/s               |
| Energia                 | 6000 MJ/m <sup>3</sup> |
| Pressão                 | 21000 MPa              |

Foi realizada a comparação dos resultados em termos de sobrepressão e tempo de duração da fase positiva da onda de choque do modelo simulado neste tópico com o modelo sem obstáculos do tópico 5.7.1 (Tabela 5.30).

Tabela 5.30 - Valores da pressão máxima (kPa) e tempo de chegada da onda de choque (ms) das simulações analisadas

| Modelo                 | Pressões (kPa)        | Sensor 1 | Sensor 2 | Sensor 3 | Sensor 4 | Sensor 5 |
|------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                        | Tempo de chegada (ms) |          |          |          |          |          |
| Sem obstáculo (grupol) | Pressão Máx.          | 2854     | 525      | 440      | 784      | 436      |
| (100 kg TNT)           | Ta                    | 0,99     | 3,29     | 10,89    | 4,86     | 6,99     |
| Explosão Acidental     | Pressão Máx.          | 1433     | 216      | 150      | 250      | 204      |
| (10 kg Propano)        | Ta                    | 1,51     | 6,00     | 12,31    | 9,02     | 10,96    |

A partir dos resultados é possível observar que a carga explosiva de propano, apesar de conter uma energia inferior em comparação com o outro modelo apresentado, é capaz de gerar ondas de choque com pressões suficientemente elevadas para levar ao colapso boa parte das estruturas usuais, Applied Technology Council (2003).

Comparando as simulações, analisando os resultados do sensor 1 e considerando que 10kg de propano são equivalentes a aproximadamente 20kg de TNT, observa-se que uma redução de 80% na carga de explosivo representou um decréscimo de pouco menos de 50% na pressão máxima da onda de choque. Isto permite confirmar a não-linearidade da relação carga de explosivo – pressão da onda de choque.

Além disso, é possível concluir sobre o risco do trabalho com este tipo de gás que é encontrado muitas vezes em centros urbanos, seja utilizado por determinadas indústrias ou mesmo transportados pelas vias de uma grande cidade.

## **6 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com base nos estudos desenvolvidos, buscou-se analisar as explosões por meio da fluidodinâmica computacional. As simulações realizadas contemplaram a detonação de explosivos em TNT e a propagação da onda de choque pelo ar em diversas situações possibilitando, dessa maneira, uma análise geral do fenômeno com relação a suas propriedades fundamentais.

Historicamente a análise das explosões se deu predominantemente através de experimentos e de desenvolvimentos empíricos. Atualmente, a utilização dos hidrocódigos, que compõem a tecnologia CFD, permite o desenvolvimento numérico eficiente das explosões, representando uma das mais importantes ferramentas para a realização deste tipo de estudo.

Com base em estudos anteriores associados à utilização desta tecnologia foi possível a elaboração de modelos numéricos para o estudo das explosões.

### **6.1 – AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS EMPÍRICOS E DA INFLUÊNCIA DAS REFLEXÕES DE ONDA NO CALCULO DAS SOBREPRESSÕES**

Os métodos empíricos para predição das sobrepressões de uma onda de choque foram largamente utilizados no passado. Estes métodos, entretanto, possuem algumas limitações principalmente por não considerarem diferentes condições ambientes ou a presença de obstáculos no local da explosão, isto pode resultar em severas imprecisões na predição das sobrepressões.

Além disso, os métodos empíricos apresentados mostram resultados divergentes para sobrepressões quando realizada uma análise próxima do ponto de explosão.

Como foi já mencionado, uma boa aproximação dos resultados dos métodos de predição se observa para explosões a céu aberto a médias e grandes distâncias em escala Z, em condições ambientes normais.

A modelagem pelo Autodyn permitiu a simulação de modelos com distância em escala pequenas. Há uma maior imprecisão na predição das pressões da onda de choque pelos meios empíricos quando consideradas pequenas distâncias em escala.

Na primeira análise, em que foi simulada uma explosão próxima de um pilar, foi possível observar que a presença do pilar e da superfície rígida do solo foi suficiente para ocasionar

efeitos de reflexão que podem ter afetado a precisão dos resultados dos métodos empíricos quanto à previsão das pressões ao longo da altura do pilar.

A proposta de Henrych apud Smith (1994) é a que mais se aproximou dos resultados numéricos do Autodyn. Na segunda simulação em que foi modelada uma explosão em um ambiente livre de reflexões, portanto mais adequado à comparação com a proposta empírica, a divergência foi de apenas 1%.

O estudo da influência dos efeitos da reflexão de onda foi contemplado nas simulações 3 e 4. Essas simulações permitiram visualizar o incremento nas sobrepressões da onda de choque em um determinado ponto, ocasionado por superfícies rígidas próximas da explosão que dificultam a dispersão da onda, canalizando a energia em uma direção.

A importância dessas simulações reside na dificuldade que existe na predição das sobrepressões em ambientes de geometria complexa ou em explosões confinadas, nesses casos ocorrem, simultaneamente, pressões refletidas normais e oblíquas, além do provável surgimento de uma onda Mach.

Na quarta simulação, em que se simulou uma explosão confinada entre dois anteparos, observou-se que não é linear a relação entre o nível de confinamento da explosão com o incremento da pressão da onda. Analisando os resultados do sensor 1 em termos de pressão máxima da onda de choque, o posicionamento dos anteparos a 2 m do ponto de detonação resultou em um incremento superior 400%, enquanto que anteparos posicionados a 4m incrementaram em menos de 150% esta pressão.

## **6.2 – INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES AMBIENTES E DA PRESENÇA DE EDIFÍCIOS NAS PRESSÕES DA ONDA DE CHOQUE**

Os métodos empíricos e os modelos numéricos para estudo das pressões das ondas de choque costumam considerar as condições normais de temperatura e pressão nas análises. As simulações 5 e 6 realizadas avaliaram a influência que as condições ambientes podem ter sobre as pressões da onda de choque.

Na simulação 5, em que foi simulada uma explosão sob diferentes pressões ambientes, foram observados aspectos interessantes com relação aos resultados de pressão máxima e de sobrepressão da onda, pois os modelos com maior pressão ambiente apresentaram as maiores pressões máximas, porém as menores sobrepressões. Isto indica que regiões com pressões menores ficam sujeitas a maiores diferenciais de pressão quando submetidas a uma explosão.

No exemplo 6 foi simulada uma explosão sob diferentes temperaturas ambientes. Neste caso os resultados indicaram que a temperatura ambiente não exerce grande influência nas pressões da onda. O que se pode observar nesta análise foi que, apesar da temperatura máxima entre os modelos ser diferente, o diferencial de temperatura em todos os casos foi praticamente o mesmo, o que era esperado, visto que foi utilizada a mesma carga de explosivo em todos os modelos.

Na simulação 7 foram elaborados diferentes modelos para o estudo da distribuição das pressões de onda de choque em um meio urbano constituído por edificações rígidas. Foi observado que a distribuição das pressões está diretamente relacionada com a complexidade do meio de propagação e que a presença de obstáculos ou redução das aberturas das edificações tendem a redistribuir as pressões no modelo.

A utilização de proteções se mostrou eficiente quanto à mitigação das pressões incidentes nas edificações, em comparação com o modelo sem proteção. O modelo em que foi utilizada a mureta rígida para proteção apresentou reduções superiores a 80% se comparado com o modelo sem proteção.

Entretanto, foi observado que a mitigação das pressões no interior das edificações, para os casos estudados, estava mais relacionada aos níveis de abertura do que às proteções adotadas. Foi observado que nos modelos com menos aberturas, boa parte da energia da onda fica do lado externo da edificação. Porém, os ambientes internos ficaram submetidos a constantes reflexões de onda, sendo identificado que o pico de pressão captado pelos sensores foi resultado de uma onda refletida.

Os modelos com diferentes layouts internos mostraram que há uma redistribuição das pressões da onda nos cômodos do edifício quando se utilizam diferentes layouts, todavia nenhum dos layouts internos estudados mostrou-se eficiente na mitigação das pressões.

A oitava simulação é composta por um modelo em que foi considerada uma explosão acidental de propano em meio urbano. A carga de propano utilizada na explosão é equivalente à que pode ser encontrada em uma cidade ou indústria e os resultados obtidos foram comparados com uma explosão de 100 kg de TNT. Os resultados dessa simulação permitiram concluir que a explosão de 10kg de propano na distância considerada pode ser extremamente danosa às edificações e às pessoas. Por isso quando necessário o uso deste gás, os reservatórios deste devem ser posicionados distantes das edificações e preferencialmente enterrados.

Comparando as pressões da onda de choque no sensor 1 para o caso de 100kg de TNT e o de 10kg de propano (~20kg TNT), a simulação 8 mostrou que a redução de 80% na massa de explosivo representou um decréscimo de pouco menos de 50% nas pressões da onda de choque. Portanto, é possível observar a existência de uma não-linearidade da relação carga de explosivo – pressão da onda de choque.

De um modo geral, as simulações realizadas neste trabalho forneceram um conjunto de resultados que permitem a visualização de aspectos importantes, inerentes ao estudo das explosões, mostrando que o uso da tecnologia CFD para a simulação de explosões e da propagação da onda de choque parece uma boa alternativa.

### **6.3 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Utilização da fluidodinâmica computacional para o estudo dos danos aos elementos estruturais de uma edificação pelas pressões de uma explosão como, por exemplo, fissuras, quebra e fragmentação, etc.

- Consideração e modelagem do solo como elemento não-rígido, verificando influência deste no processo de propagação da onda e a análise de fenômenos importantes como crateramento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Applied Technology Council (ATC), Hinman, E., Hinman Consulting Engineers. 2003. *Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks*, Federal Emergency Management Agency, United States.
- Abdelalim, O. 2013. *Blast hazard mitigation through vented suppressive shields*, Carleton University, Ottawa, Canadá.
- Bangash, M. Y. H., Bangash. T. (2006). *Explosion-resistant buildings*, Springer-Verlag, Londres, Reino Unido.
- Birnbaum, N. K, Clegg, R. A., Fairlie, G. E. 1996. *Analysis of Blast Loads on Buildings*, Century Dynamics Incorporated, Oakland, California.
- Black, G. 2006. *Computer Modeling of Blast Loading Effects on Bridges*. Lafayette College, Pennsylvania. EUA.
- Casagrande, A. S. 2006. *Estudo de Cargas Impulsivas com Ênfase em Explosões: Estratégias de Análises Utilizando Métodos Numéricos*, Dissertação de Mestrado (BR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Chock, J. M. K. 1999. *Review of Methods for Calculating Pressure Profiles of Explosive Air Blast and its Sample Application*, Tese de Mestrado (US), Department of Aerospace and Ocean Engineering, Blacksburg, Virginia.
- Departments of the Army, the Navy, and the Air Force. 1990. *Structures to resist the effects of accidental explosions*, Headquarters departments of the Army, the Navy and the Air Force, Washington, EUA.
- Dewey, J. M. 2005. *The TNT equivalence of an optimum propane-oxygen mixture*, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol 38.
- Draganić, H., Sigmund, V. 2012. Blast Loading on Structures, *Technical Gazette*, 19, 643-652.
- Fairlie, G. E. 1998. The numerical simulation of high explosives using AUTODYN-2D & 3D, *Institute of Explosive Engineers 4th Biannual Symposium*, Inglaterra.
- Glasstone, S., Dolan, P. J. 1977. *The effects of nuclear weapons*, terceira edição, United states department of defense, EUA.

- Graham, R. A. 2010. *Shock Wave and High Pressure Phenomena*, Springer-Verlag, Berlin.
- Hansson, H. Skoglund, P. 2002. *Simulation of Concrete Penetration in 2D and 3D with the RHT Material Model*. Swedish Defence Research Agency, Tumba, Sweden.
- Houghton, E. L., Carpenter, P. W. 2003. *Aerodynamics for engineering students*. Quinta edição. Butterworth-Heinemann. Jordan Hill, Oxford.
- Kinney, G. F., Graham, K. J. 1985. *Explosive shocks in air*, Springer Science+Business Media, Second Edition, New York.
- Kocczaz, Z., Sutcu, F., Torunbalci, N. 2008. Architectural and Structural Design fo Blast Resistant Buildings, *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- Krehl, P. O. K. 2009. *History of Shock Waves, Explosions and Impact*, Springer-Verlag, Berlin.
- Le Blanc, G., Adoum, M., Lapoujade, V. 2005. External Blast Load on Structures – Empirical Approach, *5th European Ls-Dyna Users Conference*, 5c-39.
- Luccioni, B. M., Ambrosini, D. 2005. *Blast load assessment using hydrocodes, Mecánica Computacional Vol. XXIV*, Buenos Aires, Argentina.
- Mamrak, W. (2011). *Blast wave propagation in the air and action on rigid obstacle, dissertação de mestrado, Poznan University of Technology*, Poznan, Polônia.
- Mays, G. C., Smith, P. D. 1995. *Blast effects on buildings*, Thomas Telford, London.
- Moon, N. N. 2009. *Prediction of Blast Loading and Its Impact on Buildings*, Tese de Mestrado, Department of civil engineering, National Institute of Technology, Rourkela.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J. 2007. Blast Loading and Blast Effects on Structures, *Eletronic Journal of Structural Engineering*, 76-91.
- Silva, W. C. L. 2007. *Blast- Efeitos da Onda de Choque no Ser Humano e nas Estruturas*, Tese de Mestrado (BR), Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo.
- Smith, P. D., Hetherington, J. G. 1994. *Blast and Ballistic Loading of Structures*, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Usmani, Zeeshan-ul-Hassan.2012. Explosions Modeling – A Tutorial. *Autumn Simulation Multi- Conference*, The society for Modeling & simulation International.

Van Acker, A., Rodrigues, C. C., Cholewicki, A., Crisp, B., Lúcio, V. J. G., Elliot, K. S., Engstrom, B., Gasperi, A., Suikka, A., Tsoukantas, S., Vambersky, J., Vantomme, J. 2012. Design of precast concrete structures for accidental loading, International Federation for structural concrete, Lausanne, Suíça.

Vijayaraghavan, C., Thirumalaivasan, D., Venkatesan, R. 2012. A Study on Nuclear Blast Overpressure on Buildings and Other Infrastructures using Geospatial Technology, *Journal of Computer Science*, 8 (9), 1520-1530.

## **REFERÊNCIAS CONSULTADAS**

Luccioni, B. M., Ambrosini, D. 2008. *Evaluating the effect of underground explosions on structures*, *Mecánica Computacional Vol. XXVII*, San Luís, Argentina.

Luccioni, B. M., Ambrosini, D. 2010. *Numerical assessment of blast effects scaling procedures*, *Mecánica Computacional Vol. XXIX*, Buenos Aires, Argentina.

Neto, M. L. C., Doz, G. 2014. Análise paramétrica de uma explosão impactando um pilar de concreto armado, XXXV Iberian Latin American Congress On Computational Methods in Engineering, Fortaleza, Brazil.

Nurick, G. N. 2010. *Blast impact survivability*, IMPLAST 2010 Conference, Rhode Island, USA.

Simion, A., Dragomir., C. 2013. *Attenuation of the Destructive Effects of an Explosion by Stratified Screens*, *Revista CONSTRUCTII*, 1/2013, 85-93.