

**ANÁLISE DA PERFURAÇÃO DE ELEMENTOS DE CONCRETO POR  
EXPLOSIVOS UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

**MURILO LIMEIRA DA COSTA NETO**

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**ANÁLISE DA PERFURAÇÃO DE ELEMENTOS DE  
CONCRETO POR EXPLOSIVOS UTILIZANDO A  
FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

**MURILO LIMEIRA DA COSTA NETO**

**ORIENTADORA: GRACIELA NORA DOZ DE CARVALHO**

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**BRASÍLIA/DF: JUNHO – 2019**

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

**ANÁLISE DA PERFURAÇÃO DE ELEMENTOS DE CONCRETO POR**  
**EXPLOSIVOS UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA**  
**COMPUTACIONAL**

**MURILO LIMEIRA DA COSTA NETO**

**BANCA:**

---

**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. Roberto Francisco Bobenrieth Miserda, Ph.D. (DENM-UnB)**  
**(Examinador Externo)**

---

**Prof. Bibiana Luccioni, Ph.D. (UNT)**  
**(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 6 DE JUNHO DE 2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

NETO, MURILO LIMEIRA DA COSTA	
Análise da Perfuração de Elementos de Concreto por Explosivos Utilizando a Fluidodinâmica Computacional [Distrito Federal] 2019.	
xvii, 106 p., 297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2019). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Explosões	2. Ondas de Choque
3. Fluidodinâmica Computacional	4. Perfuração utilizando explosivos
I. ENC/FT/UnB	II. Título (Doutor)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Neto, M. L. C. (2019). Análise da Perfuração de Elementos de Concreto por Explosivos Utilizando a Fluidodinâmica Computacional. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-07A/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 106p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Murilo Limeira da Costa Neto

TÍTULO: ANÁLISE DA PERFURAÇÃO DE ELEMENTOS DE CONCRETO POR EXPLOSIVOS UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

GRAU: Doutor

ANO: 2019

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

---

Murilo Limeira da Costa Neto  
SHIN CA02, bloco F, apt 233, Ed. Millenium, Lago Norte  
72.503-502 Brasília – DF – Brasil.

## **AGRADECIMENTOS**

A jornada do doutorado foi dura, muito mais do que se poderia imaginar assim que o iniciei. A estrada tornou-se amena e possível de ser trilhada graças às poucas, mas grandes pessoas que conheci no caminho e ao longo da vida.

Por conta disso, gostaria de, inicialmente, agradecer aos meus pais, ao meu irmão, à minha esposa pelo valoroso suporte dado mesmo quando eu estava insuportável. Ter uma base dessas foi e é muito importante.

Agradecer à minha incrível orientadora Graciela por ser minha segunda mãe. Aprendi muito com ela e vou continuar aprendendo, com toda certeza.

Agradecer aos meus colegas e amigos do PECC, bem como todas as pessoas que me ajudaram nesse meu tempo em Brasília de tal forma que criei raízes fortes nesta cidade.

Muito obrigado a todos!

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**

### **ANÁLISE DA PERFURAÇÃO DE ELEMENTOS DE CONCRETO POR EXPLOSIVOS 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, junho de 2019**

Na demolição de antigas edificações, em situações extremas de resgate ou mesmo na invasão de fortificações, é usual a detonação de explosivos anexados ao elemento a ser perfurado. Nesta técnica há um uso direcionado da energia de explosão em detrimento do elemento ou obstáculo a ser superado que requer, para sua utilização correta, o conhecimento preciso do fenômeno físico. Entretanto, em muitos casos, o risco da utilização destas técnicas de forma não-planejada, acidental, ou mesmo criminosa, demanda o desenvolvimento de metodologias para proteção da construção ou de elementos estruturais importantes.

Neste âmbito, este trabalho, através de uma análise numérica, faz uma análise de situações envolvendo explosões próximas e em contato com o alvo. Através da ênfase nas explosões por contato, buscou-se entender seus efeitos e mecanismos de dano predominantes de modo a sugerir proteções viáveis para placas de concreto submetidas a este tipo de evento. As simulações desenvolvidas neste trabalho foram realizadas utilizando o Ansys Autodyn ® (2014).

O desempenho de cada uma das proteções propostas foi avaliado de forma crítica, sendo observadas as especificidades de cada uma das alternativas sugeridas quanto a proteção do concreto contra perfuração, em todos os casos foi constatado uma redução significativa dos danos por crateramento e lascamento no concreto.

**Palavras Chave:** Explosões; Ondas de Choque; Fluidodinâmica Computacional; Perfuração utilizando explosivos

## **ABSTRACT**

### **AN ANALYSIS OF CONCRETE ELEMENTS BREACHING BY EXPLOSIVES 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, June of 2019**

The explosive breaching is a technique widely used during demolition of old buildings, risk rescue scenarios or breaching of fortifications. In this technique there is a channelized use of explosion energy in order to overcome target element or obstacle. Despite that usefulness, the high risk of an unplanned, accidental or even criminal close explosion demand the development of useful methodologies to protect buildings or key structural elements against this kind of event.

In this context, this work, using a numerical simulation, makes an analysis of situations involving close and contact explosions. The simulations were developed in order to verify the predominant blast effects and damage mechanisms of contact explosions and these preliminary results were used in the development of viable protections for concrete slabs. The simulations developed in this work were performed using the Autodyn from Ansys Workbench. The results were evaluated critically, they guided an important path to be followed in the future works.

Some of the suggested protections were enough to protect the concrete against breaching process, minimizing cratering and spalling effects.

**Keywords:** Explosion; Shock wave; Computational Fluid Dynamics; Explosive Breaching

## SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 - OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 - METODOLOGIA .....</b>	<b>3</b>
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
<b>3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 - FUNDAMENTOS DO ESTUDO DAS EXPLOSÕES .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2 - PROPAGAÇÃO DAS EXPLOSÕES .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2.1 - Ondas de choque .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2.2 - Fundamentos de uma onda de choque .....</b>	<b>17</b>
<b>3.3 - INTERAÇÃO DA ONDA DE CHOQUE COM SÓLIDOS .....</b>	<b>19</b>
<b>3.3.1 - Conceitos básicos da transmissão de ondas de choque.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3.2 - Conceitos básicos relacionados à reflexão das ondas de choque.....</b>	<b>24</b>
<b>3.4 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS DAS EXPLOSÕES .....</b>	<b>27</b>
<b>3.4.1 - As relações de distância-quantidade de explosivo e a lei de escala.....</b>	<b>27</b>
<b>3.4.2 - Predição das sobrepressões de uma onda de choque devido à detonação de alto explosivos .....</b>	<b>28</b>
<b>3.4.3 - Considerações quanto a explosões próximas ou por contato .....</b>	<b>29</b>
<b>3.5 - INTRODUÇÃO À DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL .....</b>	<b>32</b>
<b>4 - MODELAGEM NUMÉRICA .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1 - INTRODUÇÃO AOS HIDROCÓDIGOS .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2 - O AUTODYN .....</b>	<b>35</b>
<b>4.2.1 - Discretizando um problema no Autodyn .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2.2 - Modelando materiais no Autodyn .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2.3 - Materiais e modelos constitutivos .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2.4 - Critérios de erosão .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.5- Representação dos níveis de dano.....</b>	<b>46</b>

<b>5 - SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....</b>	<b>47</b>
<b>5.1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>5.2 - PRIMEIRO GRUPO DE SIMULAÇÕES: AVALIAÇÃO DE UM ELEMENTO TUBULAR DE AÇO PREENCHIDO POR CONCRETO SUBMETIDO A UMA EXPLOSÃO PRÓXIMA.....</b>	<b>47</b>
5.2.1 - Modelo experimental .....	47
5.2.2 - Modelo numérico no Autodyn.....	48
5.2.3 - Propriedades dos materiais .....	49
5.2.4 - Resultados do primeiro grupo de simulações .....	51
<b>5.3 - SEGUNDO GRUPO DE SIMULAÇÕES: PERFURAÇÃO DE UMA PAREDE DE CONCRETO ARMADO POR EXPLOSIVO – AVALIAÇÃO DO CRITÉRIO DE EROSÃO. ....</b>	<b>55</b>
5.3.1 - Modelo experimental .....	55
5.3.2 - Modelo numérico no Autodyn.....	55
5.3.3 - Propriedades dos materiais .....	57
5.3.4 - Resultados do segundo grupo de simulações .....	60
<b>5.4 - TERCEIRO GRUPO DE SIMULAÇÕES: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ELEMENTOS DE PROTEÇÃO NA MITIGAÇÃO DO DANO EM UM ELEMENTO DE CONCRETO SUBMETIDO A UMA EXPLOSÃO PRÓXIMA.65</b>	<b>65</b>
5.4.1 - Modelo numérico no Autodyn.....	65
5.4.2 - Propriedades dos materiais .....	68
5.4.3 - Resultados do terceiro grupo de simulações.....	70
<b>5.5 - QUARTO GRUPO DE SIMULAÇÕES: METODOLOGIAS PARA MITIGAÇÃO DO DANO EM UMA PLACA DE CONCRETO SUBMETIDA À UMA EXPLOSÃO POR CONTATO .....</b>	<b>75</b>
5.5.1 - Modelo experimental .....	75
5.5.2 - Modelo numérico no Autodyn.....	75
5.5.3 - Propriedades dos materiais .....	80
5.5.4 - Resultados do quinto grupo de simulações: Nivel 1.....	85
5.5.5 - Resultados do quinto grupo de simulações: Nivel 2.....	86
5.5.6 - Resultados do quinto grupo de simulações: Nivel 3.....	88

<b>6 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>93</b>
<b>7 - RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS POSTERIORES .....</b>	<b>96</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>97</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Relação de alguns explosivos e suas equivalências em TNT para sobrepressão, Norma ASCE (2011).....	15
Tabela 3.2 - Formulações para predição de onda de choque ao ar livre.....	28
Tabela 3.3 - Espessura limite de perfuração e lascamento para paredes de concreto.....	31
Tabela 5.1 - Propriedades do ar.....	49
Tabela 5.2 - Propriedades do TNT.....	49
Tabela 5.3 - Propriedades do Concreto.....	50
Tabela 5.4 - Propriedades do aço.....	51
Tabela 5.5 – Resultados do primeiro grupo de simulações.....	51
Tabela 5.6 – Síntese dos modelos simulados.....	57
Tabela 5.7 - Propriedades do C4.....	58
Tabela 5.8 - Propriedades do aço.....	58
Tabela 5.9 - Propriedades do Concreto.....	59
Tabela 5.10 – Diâmetro máximo dos furos produzidos pela explosão em cada modelo.....	60
Tabela 5.11 – Síntese dos modelos simulados.....	67
Tabela 5.12 - Propriedades do Aço.....	68
Tabela 5.13 - Propriedades do Alumínio.....	69
Tabela 5.14 - Propriedades da areia.....	69
Tabela 5.15 – Síntese dos modelos simulados.....	77
Tabela 5.16 – Espessuras das proteções empregadas nos modelos.....	78
Tabela 5.17 - Propriedades do neoprene.....	80
Tabela 5.18 – Propriedades do Concreto.....	81
Tabela 5.19 - Propriedades da fibra de vidro.....	82
Tabela 5.20 - propriedades do poliuretano.....	83
Tabela 5.21- Propriedades do epoxy.....	83
Tabela 5.22 - Propriedades do Kevlar.....	84
Tabela 5.23 - Diâmetros dos danos de crateramento e lascamento.....	86

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Pilar tubular de aço preenchido por concreto danificado por explosão a 0,12 m/kg <sup>1/3</sup> (a) e 0,15 m/kg <sup>1/3</sup> (b), Remmenikov e Uy (2014).....	10
Figura 2.2 – Dano local em pilar tubular de aço sem preenchimento (a) e preenchido por concreto (b) por explosão próxima, Ngo et al. (2014).....	11
Figura 3.1 – Esquema das propriedades de uma onda de choque, Needham (2010).....	17
Figura 3.2 - Gráfico da pressão em função do tempo típica para uma onda de choque. Ngo (2007).....	18
Figura 3.3 – Esquema das pressões de uma onda de choque sendo transmitidas do meio A para o meio B.....	19
Figura 3.4 – Componentes de tensão agindo em um elemento infinitesimal, Kolsky (1963).....	21
Figura 3.5 – Esquema da propagação de uma onda de choque devido uma explosão sobre o solo, Le Blanc et. al. (2005).....	24
Figura 3.6 – Interação de uma onda de choque com superfícies, para diferentes sentidos de propagação, Mays e Smith (1995).....	25
Figura 3.7 – Interação de uma onda de choque atingindo uma superfície obliquamente, Mays e Smith (1995).....	26
Figura 3.8 – Interação de uma onda de choque com uma superfície para diferentes ângulos de incidência, Mays e Smith (1995).....	26
Figura 3.9 – Detonação de um dispositivo explosivo acima do nível do solo e as formas de propagação das ondas de choque. Silva (2007).....	27
Figura 3.10 – Padrão de dano e medidas importantes para explosões por contato, Beppu et al. (2010).....	30
Figura 4.1 – Superfície de falha no plano desviador, Hansson et al. (2011).....	41
Figura 5.1 – Esquema do experimento desenvolvido por Remennikov e Uy (2014) (a) e modelo numérico no Autodyn (b).....	48
Figura 5.2 – a) Modelo desenvolvido por Remennikov e Uy (2014); b) Modelo desenvolvido no Autodyn com os blocos de concreto ocultos.....	52

Figura 5.3 – a) e b) deformação na viga causada pela explosão Remennikov e Uy (2014); c) e d) deformações apresentadas pela viga ao fim das simulações no Autodyn.....	53
Figura 5.4 – Modelo numérico no Autodyn (a) e experimento desenvolvido por Akers et al. (2005) (b).....	56
Figura 5.5 – Vista frontal do furo produzido na parede de concreto armado por uma explosão, em que a) e b) são o experimento desenvolvido por Akers et al. (2005).....	61
Figura 5.6 – Seção danificada da parede de concreto armado após a explosão para cada um dos modelos simulados .....	62
Figura 5.7 – Distribuição da energia total dos modelos em uJ.....	63
Figura 5.8 – Esquema dos modelos desenvolvidos no terceiro grupo de simulações, materiais usados nos modelos estão dispostos na legenda.....	66
Figura 5.9 – Níveis de dano nos modelos A) em 0,5ms , B) 1,5 ms e C) 2,5 ms após a detonação, Modelo A1.....	70
Figura 5.10 – Níveis de dano nos modelos A) em 0,5ms , B) 1,5 ms e C) 2,5 ms após a detonação, Modelo A2.....	71
Figura 5.11 – Níveis de dano nos modelos A) em 0,5ms , B) 1,5 ms e C) 2,5 ms após a detonação, Modelo A3.....	72
Figura 5.12 – Níveis de dano nos modelos A) em 0,5ms , B) 1,5 ms e C) 2,5 ms após a detonação, Modelo A4.....	72
Figura 5.13 – Níveis de dano nos modelos A) em 0,5ms , B) 1,5 ms e C) 2,5 ms após a detonação, Modelo A5.....	73
Figura 5.14 – Níveis de dano nos modelos A) em 0,5ms , B) 1,5 ms e C) 2,5 ms após a detonação, Modelo A6.....	74
Figura 5.15 – Esquema dos modelos simulados.....	76
Figura 5.16 – Posição da armação no modelo B2, modelo com dupla simetria.....	78
Figura 5.17 – Seção transversal dos modelos A1 e A2 mostrando a distribuição do dano....	85
Figura 5.18 – Seção transversal dos modelos B1 e B2 mostrando a distribuição do dano.....	87
Figura 5.19 – Seção transversal dos modelos C1, C2, C3 e C4 mostrando a distribuição do dano.....	89
Figura 5.20 – Seção transversal dos modelos C5 e C6 mostrando a distribuição do dano.....	90
Figura 5.21 – Esquema das velocidades absolutas de cada modelo em m/s, 2 ms após a detonação.....	91

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

$P$ ou $p$	- Pressão
$\rho$	- Massa específica
$u$ ou $u_p$	- Velocidade material
$U$	- Velocidade de deslocamento da onda de choque
$E$	- Energia total
$\Delta P$	- Sobrepressão
$T$	- Temperatura
$T_o$	- Temperatura inicial
$P_o$	- Pressão atmosférica
$\rho_o$	- Massa específica inicial
$u_o$	- Velocidade material no ar ambiente
$T_a$	- Tempo de chegada
$T_d^+$	- Duração da fase positiva
$T_d^-$	- Duração da fase negativa
$P_{m\acute{a}x}$	- Pressão máxima
$P^-$	- Pressão máxima negativa
$P_{a_i}$	- Pressão incidente
$P_{a_r}$	- Pressão refletida
$P_{b_t}$	- Pressão transmitida
$c$	- Velocidade da onda no material
$I_z$	- Impedância de choque
$\sigma_{ij}$	- Componentes do tensor de tensões
$\varepsilon$	- Deformação
$\omega$	- Rotação
$\sigma$	- Tensão
$\Delta$	- Dilatação
$\lambda$	- Primeiro parâmetro
$\mu$ ou $G$	- Segundo parâmetro
$E$	- Módulo de elasticidade
$\nu$	- Coeficiente de poisson
$k$	- Módulo volumétrico

$\nabla^2$	- Operador Laplaciano
t	- Tempo
$\Upsilon$ ou $\gamma$	- Coeficiente de expansão adiabática
$\Delta Pr$	- Magnitude da onda de choque refletida
$\alpha_i$	- Ângulo de incidência
$U_r$	- Velocidade da onda refletida
$\alpha_r$	- Ângulo de reflexão
<i>Inci</i>	- Onda incidente
<i>Refl</i>	- Onda refletida
<i>Mac</i>	- Onda Mach, <i>Mach stem</i>
Z	- Distância em escala, distância escalonada
R	- Distância do epicentro até o ponto de referência
W	- Massa de explosivo
R <sub>c</sub>	- Espessura da placa de concreto
P <sub>c</sub>	- Profundidade da cratera produzida
D <sub>c</sub>	- Diâmetro da cratera
K <sub>o</sub>	- Fator que relaciona propriedades do explosivo e o alvo
n <sub>p</sub>	- Coeficiente do fator de lascamento
$\mu_f$	- Fator de forma
h	- Espessura da parede
X	- Raio da área de aplicação do impulso
H	- Espessura do explosivo
D <sub>e</sub>	- Diâmetro do explosivo (explosivos cilíndricos) ou a largura (explosivos prismáticos).
$\xi$	- Fator de impacto adimensional
r <sub>e</sub>	- Raio do explosivo
$\nabla$	- Gradiente
e <sub>i</sub> ou e	- energia interna
$u_c$	- Componente cartesiana de velocidade - Euler
v	- Componente cartesiano de velocidade - Lagrange
P <sub>h</sub> ou p <sub>h</sub>	- Pressão hidrostática
C <sub>1</sub>	- Constante relacionada com o tipo de explosivo
C <sub>2</sub>	- Constante relacionada com o tipo de explosivo

$R_1$	- Constante relacionada com o tipo de explosivo
$R_2$	- Constante relacionada com o tipo de explosivo
$\omega c_o$	- Constante relacionada com o tipo de explosivo
$V_e$	- Razão entre o volume específico do produto de detonação e o volume específico do explosivo não detonado
$\mu_a$	- Alteração do volume relativo
$A_n$	- Em que n varia de 1 a 3, coeficientes da EOS P-alpha
$B_n$	- Em que n varia de 0 a 1, coeficientes da EOS P-alpha
$T_n$	- Em que n varia de 1 a 2, coeficientes da EOS P-alpha
$\bar{\mu}$	- Alteração relativa de volume para materiais porosos
$\alpha$	- Porosidade
$Y_{falha}$	- Superfície de falha
$Y_c$	- Meridiano de compressão
$f_c$	- Resistência a compressão uniaxial do material
$A$ e $N_{falha}$	- Constantes do material do modelo RHT
$f_t$	- Resistência a tração uniaxial
$F_{rate}(\dot{\epsilon})$	- Fator de amplificação dinâmica em função da taxa de deformação
$R_3(\theta_r)$	- Função escalar do ângulo de Lode
$\alpha_c$	- Fator relacionado à taxa de deformação na tração
$\delta_c$	- Fator relacionado à taxa de deformação na compressão
$\dot{\epsilon}$	- Constante relacionada com o tipo de tensão sendo aplicada
$Q_2$	- Constante relacionada com a pressão aplicada
$\sigma_e$ ou $\sigma_m$	- Tensão de escoamento
$Y_{fratura}$	- Superfície de fratura
$Y_{residual}$	- Superfície de resistência residual
$D$	- Parâmetro de dano
$e_{fmin}$	- Deformação mínima de falha
$\epsilon_p$	- Deformação plástica
$\dot{\epsilon}_p^*$	- Taxa de deformação plástica
$T_h$	- Função linear da temperatura
$A_{jc}$	- Parâmetros do material do modelo de Johnson-Cook
$B_{jc}$	- Parâmetros do material do modelo de Johnson-Cook

$n_{jc}$	- Parâmetros do material do modelo de Johnson-Cook
$C_{jc}$	- Parâmetros do material do modelo de Johnson-Cook
$m_{jc}$	- Parâmetros do material do modelo de Johnson-Cook
$C_o$	- Velocidade do som
$s$	- Parâmetro do material, equação de Mie-Grüneisen
$p_u$	- Pressão Hugoniot
$e_u$	- Energia Hugoniot
$\Gamma$	- Coeficiente de Grüneisen ou Gamma de Grüneisen
$G_m$ ou $G_o$	- Módulo de cisalhamento
$\sigma_0$	- Tensão de escoamento de referência do material, Steinberg-Guinan
$\beta$	- Coeficientes de endurecimento do material
$n_e$	- Coeficientes de endurecimento do material
$\epsilon_i$	- Deformação plástica inicial
$\eta$	- Razão entre volume específico inicial e volume específico
$c_o$	- Velocidade do som no material nas condições iniciais
$c_s$	- Velocidade do som no material compactado
$C_{ij}$	- Coeficientes elásticos
$\epsilon_{inst}$	- Deformação geométrica instantânea efetiva
$\epsilon_{ij}$	- Componentes do tensor deformação
DGI	- Critério de Erosão, deformação geométrica instantânea efetiva
CF	- Critério de Erosão, critério de falha



# **1 - INTRODUÇÃO**

## **1.1 - INTRODUÇÃO**

Explosões são eventos que envolvem grandes quantidades de energia e que, apesar de sua aplicabilidade em diversos setores da indústria e mineração, podem representar um perigo real às construções civis e seus usuários caso seja provocada acidentalmente ou de forma criminosa. Uma eventual explosão sobre uma estrutura convencional de concreto armado pode ocasionar elevados níveis de tensão seguidos por grandes deformações, fratura, fragmentação e colapso estrutural.

Ao longo dos anos, principalmente a partir das grandes guerras mundiais, muitas pesquisas foram realizadas de modo a compreender o fenômeno da explosão e suas implicações com o meio. No campo da engenharia civil, este tipo de conhecimento pode auxiliar no desenvolvimento de estruturas mais seguras e resistentes, por outro lado, também permite a criação de técnicas de demolição eficientes. Atualmente, dentre os tipos mais pesquisados de explosões, destacam-se as próximas ou por contato, extensamente utilizadas por engenheiros civis e militares para demolição de construções indesejáveis e para produzir fendas em paredes de concreto ou tijolos, Remennikov et al. (2015).

Explosões próximas ou as de dispositivos anexados ao alvo começaram a receber uma maior atenção do meio científico recentemente devido aos incidentes envolvendo explosivos ao redor do mundo. Trabalhos como os desenvolvidos por Tanaka et al. (2001), Morishita apud Beppu et al. (2010) e Morishita et al. (2006), por exemplo, fundamentaram uma base importante nesta área, principalmente com relação a uma caracterização do dano esperado. Ainda assim, são necessárias mais pesquisas de modo a consolidar o conhecimento existente quanto a projetos de segurança, à proposta de metodologias de proteção e à definição precisa do comportamento de estruturas submetidas a este tipo de evento, Remennikov e Uy (2014).

Diferentemente de explosões a médias e longas distâncias que, geralmente, distribuem sua carga de pressão ao longo da estrutura durante um intervalo de tempo, as explosões de dispositivos anexados causam dano imediato no elemento em contato, por conta disso, na ausência de proteções ou mecanismos dissipadores de energia, é possível haver a perfuração ou ruptura do elemento estrutural. Em linhas gerais, os mecanismos de falha mais comuns estão relacionados ao esmagamento e estilhaçamento do material.

As atuais metodologias de pesquisa envolvendo o estudo das explosões baseiam-se em dois tipos distintos de abordagem: o numérico e o experimental. Entretanto, experimentos envolvendo explosões costumam ser complexos e custosos. Nesse âmbito, ferramentas computacionais calibradas com resultados experimentais se tornam um recurso valioso para o estudo deste tipo de evento.

Contribuições recentes de diversos pesquisadores ampliaram a fronteira do conhecimento no campo das explosões próximas, trabalhos importantes como os desenvolvidos por Akers et al. (2005), Luccioni e Ambrosini (2005), Akers et al. (2006), Luccioni e Ambrosini (2010), Wu et al. (2011), Luccioni e Aráoz (2011), Li et al. (2012), Zhang et al. (2013), Naito et al. (2014), Siba (2014), Remennikov e Uy (2014), Remennikov et al. (2015), Yan et al. (2015), Shi et al. (2016), Zhang et al. (2015), Codina et al. (2016a, 2016b, 2016c), Esteban e Gebbeken (2016), Luccioni et al. (2017) entre outros, além de auxiliar projetos nesta área, servem de base e fomentam pesquisas futuras.

De uma forma geral, o estado da arte no campo das explosões próximas indica um interesse importante no desenvolvimento e teste de medidas para proteção de elementos estruturais, bem como a avaliação do comportamento de diferentes materiais submetidos a este tipo de evento. Também são observados alguns estudos quanto às metodologias de predição do comportamento estrutural, uma vez que é importante tentar parametrizar as variáveis envolvidas como massa, posição ou geometria do explosivo com relação à sua influência no dano causado.

Neste âmbito, este trabalho apresenta um estudo do efeito das explosões próximas em estruturas de concreto, com o objetivo de avaliar os parâmetros importantes relacionados a este tipo de evento e encontrar alternativas de projeto que incrementem a segurança do elemento estrutural, mitigando o possível dano causado por uma explosão. O estudo é realizado por meio do software baseado na dinâmica dos fluidos computacional, Ansys Autodyn® (2014). Nele a resolução de problemas ocorre via solução das equações de conservação acopladas às descrições das propriedades dos materiais, podendo trabalhar com fenômenos dinâmicos não-lineares. Neste software é possível desenvolver simulações complexas envolvendo explosões e a interação destas com estruturas.

## **1.2 - OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de sistemas de proteção de placas de concreto submetidas a explosões próximas ou por contato.

A partir deste objetivo principal surgem, como objetivos secundários:

- O estudo do efeito das explosões próximas em elementos de concreto, avaliando os mecanismos de dano e os principais parâmetros que influenciam este fenômeno;
- Avaliação das potencialidades do software Autodyn quanto à precisão na modelagem deste tipo de evento;
- Verificação de métodos de predição do dano em paredes de concreto devido a explosões por contato; e
- Análise crítica do desempenho dos sistemas de proteção propostos.

## **1.3 - METODOLOGIA**

Neste trabalho optou-se por uma abordagem numérica, os estudos foram desenvolvidos com base em simulações no software Autodyn ®. A base teórica deste trabalho está fundamentada nas principais bibliografias do estudo das explosões, considerando, durante as pesquisas, o estado da arte das explosões próximas. Por outro lado, o tipo de tecnologia que compõe este software é amplamente utilizado em diversas engenharias, como a naval e a aeroespacial. Com ela é possível o estudo de fenômenos dinâmicos não-lineares, como as explosões, que envolvem circunstâncias extremas de carregamento e elevados níveis de tensão.

A eficiência da abordagem numérica está vinculada à considerável complexidade e aos custos envolvidos na execução de experimentos em escala real. A utilização da dinâmica dos fluidos computacional, em especial, o uso do hidrocódigo Ansys Autodyn ® (2014), viabilizou o estudo das explosões em contato com elementos estruturais, assim como a avaliação dos parâmetros envolvidos e do dano causado.

Ao todo, utilizando o software mencionado foram desenvolvidos cinco grupos de simulações, primeiramente para compatibilizar os resultados numéricos com experimentos reais de diversos autores, de modo a verificar e validar a eficiência do programa para este tipo de análise. Posteriormente, foram desenvolvidas simulações com foco nos objetivos estipulados para, desta forma, se analisar os mecanismos de dano, as técnicas de predição e as metodologias para mitigação de dano propostas.

## **2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

As explosões são alvo de constantes pesquisas devido a sua grande utilidade em diversos setores econômicos e estratégicos, além disso, a complexidade deste fenômeno demanda contribuições de diversas áreas do conhecimento. As tecnologias atuais permitiram um volume maior de produções neste campo.

Os recursos computacionais auxiliam no desenvolvimento de estudos com abordagem numérica, visto que os experimentos envolvendo explosões tendem a ser complexos e dispendiosos. A utilização dos hidrocódigos e a modelagem por meio da dinâmica dos fluidos computacional, representam atualmente as técnicas mais modernas de abordagem do problema das explosões. Este capítulo apresenta um compilado de diversos trabalhos importantes na área das explosões, principalmente no campo das explosões próximas. Também são descritas suas principais contribuições.

Inicialmente é importante citar bibliografias fundamentais ao estudo das explosões, nesse âmbito pode-se citar a obra de Glasstone e Dolan (1977) que apresentaram tópicos importantes sobre as explosões, especificamente sobre o estudo das explosões nucleares. Neste trabalho são abordados aspectos relativos a explosões sobre a superfície do solo, sob o solo e sob a água, além de fornecer informações sobre o comportamento da onda de choque. As implicações ocasionadas pela radiação nuclear e térmica são apresentadas, assim como o pulso eletromagnético gerado e as consequências biológicas que uma explosão nuclear impõe ao organismo.

Kinney e Graham (1985), em seu livro, buscaram descrever o fenômeno explosão em suas características fundamentais, abordando desde os produtos de detonação e a termodinâmica do processo até a interação da onda de choque com estruturas. Também citam formas de proteger as estruturas contra explosões visando mitigar os danos causados.

O trabalho apresentado pelo Department of the Army, the Navy and the Air Force (1990) foi desenvolvido por um conjunto de pesquisadores, o objetivo da obra é a análise da interação da explosão com as estruturas. Por conta disso são avaliados diversos aspectos relativos ao fenômeno das explosões e da resposta estrutural, por considerar aspectos estratégicos relacionados à segurança, além de apresentar as consequências da sobrepressão de onda em indivíduos e equipamentos, mencionou informações quanto ao projeto de estruturas resistentes a explosão.

Smith e Hetherington (1994), em seu livro, realizaram 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. Esta obra também apresenta proposições analíticas para avaliação das sobrepressões de onda em diferentes meios, como a água e o ar, por exemplo. São mostradas informações sobre a interação da onda de choque com sólidos, através disso é possível a análise dos efeitos de uma explosão em uma estrutura sob o solo, bem como uma predição de danos ou avaliação do incremento das pressões de onda de uma explosão em um ambiente confinado. O livro descreve alguns preceitos básicos da análise estrutural visando a obtenção da resposta de uma estrutura submetida a este evento e algumas técnicas de design existentes para o aprimoramento do desempenho das estruturas também são mostradas.

Mays e Smith (1995), apesar de apresentarem características e propriedades fundamentais das explosões em sua obra, voltaram seu trabalho para técnicas de projeto de edificações resistentes a explosões. Foram descritas informações relativas ao projeto de novas estruturas, assim como o reforço das existentes, sendo abordados os aspectos arquitetônicos, o design dos elementos estruturais, a localização de equipamentos vitais e zonas de abrigo e projeto de elementos em aço e concreto armado.

Birnbaum et al. (1996) realizaram uma apresentação de ferramentas computacionais para análise de explosões como, por exemplo, Autodyn-2D, Autodyn-3D e BLAPAN. Neste trabalho foram realizadas simulações de explosões em meios urbanos.

Fairlie (1998) aborda a utilização de ferramentas numéricas para análise em duas e três dimensões da detonação de alto-explosivos. Para isso ele realiza simulações estudando a capacidade do hidrocódigo Autodyn-2D e 3D na modelagem deste tipo de evento.

Gebbeken e Ruppert (2000) apresentaram um trabalho que propôs um modelo de concreto para simulações em hidrocódigos. Nesta obra, foram abordados temas importantes relativos à caracterização do concreto, a explosões por contato e informações sobre o funcionamento dos hidrocódigos.

Tanaka et al. (2001) analisaram o padrão de dano provocado no concreto por explosões em diferentes posições. A investigação foi experimental e envolveu explosões a curtas distâncias, em contato e internas, um dos objetivos foi tentar estabelecer alguns parâmetros para comparação entre estes diferentes tipos de explosões.

Por meio 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 as explosões e da análise de risco onde são descritas informações sobre o tipo de armamento utilizado pelos criminosos, de como realizar a predição do nível dano às edificações e a correlação disto com a segurança dos usuários. Também são apresentadas sugestões para o design arquitetônico e estrutural das edificações que possam, por ventura, ser submetidas a uma explosão.

Luccioni e Ambrosini (2005) avaliaram as pressões e impulsos oriundos de uma explosão utilizando hidrocódigos, os resultados obtidos pelas simulações numéricas são comparados com os provenientes de expressões analíticas. Foi analisada a influência do tamanho da malha nos resultados relativos à distribuição da pressão e impulso.

Akers et al. (2005) e Akers et al. (2006) apresentaram trabalhos voltados para o estudo da perfuração de paredes de concreto armado através de explosivos anexados em sua superfície. Ambos os trabalhos tiveram uma abordagem experimental associada a um desenvolvimento numérico do experimento. Estes trabalhos fundamentaram uma base interessante para uma avaliação inicial do fenômeno de perfuração, nos casos analisados o explosivo era posicionado na situação crítica, ou seja, no espaço entre as armaduras.

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

Ngo et al. (2007) apresentaram um trabalho sobre os efeitos de uma explosão sobre uma estrutura, descrevendo parâmetros fundamentais do fenômeno como distância em escala, tempo de chegada, fórmulas para predição das sobrepressões de uma onda de choque, entre outros. O trabalho apresenta métodos para se estimar o carregamento imposto por uma explosão bem como a resposta estrutural.

Razqpur et al. (2007) avaliaram experimentalmente o desempenho de placas de concreto convencional (40 MPA de resistência à compressão) protegidas com polímeros de fibra de vidro reforçado submetidas a explosões próximas. Os resultados mostraram que a resistência residual à carregamentos estáticos das placas protegidas foi 75% superior àquelas que ficaram sem

proteção, ou seja, nas placas protegidas, houve uma maior preservação de regiões íntegras de concreto.

Krauthammer (2008) em sua obra faz um compilado de importantes informações relativas ao estudo das explosões e sua interação com as estruturas. O livro abrange conteúdos referentes a avaliação de riscos, os processos físico-químicos da explosão, a interação e transmissão da onda de choque em diferentes meios, detalhes sobre as formas de carregamento de uma explosão em uma estrutura, colapso progressivo e metodologias de projeto de estruturas mais seguras e resistentes às explosões.

Ohkubo et al. (2008) desenvolveram experimentos buscando analisar a performance de folhas de fibra no aumento da resistência de placas de concreto submetidas a explosões, sendo empregadas fibras de carbono e aramida nos modelos. Os resultados mostraram uma redução importante nos níveis de dano, bem como um controle do lascamento combatendo a fragmentação da placa.

Moon (2009) realiza uma análise computacional da resposta de pilares de concreto submetidos a um carregamento dinâmico proveniente de uma explosão, por meio do método de elementos finitos. Nesse estudo, foram avaliados diferentes tipos de pilar com e sem reforço contra terremotos, submetidos a uma explosão muito próxima, semelhante à do atentado em Oklahoma.

Millard et al. (2010) desenvolveram um trabalho em que foi analisado o desempenho a carregamentos axiais e a flexão do concreto de alta performance reforçado com fibras, considerando efeitos de uma explosão ou impacto.

Needham (2010), em sua obra, faz um compilado de informações importantes relativas ao estudo da propagação da onda de choque gerada por uma explosão. O livro apresenta uma introdução ao estudo das ondas de choque mostrando as relações de Rankine-Hugoniot e as equações de estado, também são mostrados detalhes relativos à abordagem experimental de explosões à céu aberto, descrevendo técnicas de aferição da sobrepressão de onda, massa específica do fluido, velocidade da onda, entre outros.

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

Nyström e Gylltoft (2009, 2011) desenvolveram estudos numéricos relativos aos efeitos do carregamento por impacto de projéteis, fragmentos e explosão. Destes trabalhos, dentre outras

informações importantes, pode-se destacar os modelos de erosão utilizados para descrever o comportamento dos materiais nessas condições. Esses modelos representam um valioso recurso numérico no estudo do desempenho de elementos estruturais em circunstâncias críticas como, por exemplo, o caso de explosões anexadas à superfície.

Yamaguchi et al. (2011) realizaram investigações experimentais para avaliar os danos em placas de concreto reforçado com fibra de polietileno submetidas a explosões por contato. Os resultados mostraram que o concreto reforçado desta forma apresentou uma maior resistência ao dano por lascamento, entretanto, com relação ao dano de crateramento, o concreto reforçado comportou-se de forma similar a um concreto convencional.

Kazemi-Kamyab et al. (2011) apresentaram um trabalho sobre a transmissão de ondas de choque em materiais porosos. A abordagem foi experimental e avaliou como o nível de porosidade das amostras de alumínio afetava as características de transmissão da onda, sendo observado que nos elementos com elevado nível de porosidade houve uma redução da magnitude da onda de tensão transmitida.

Wu et al. (2011) analisou a resistência residual à compressão de pilares mistos de aço-concreto danificados por uma explosão próxima. Este estudo foi baseado em uma abordagem experimental e foram avaliados diferentes modelos de modo a permitir uma análise paramétrica de alguns dados como, por exemplo, localização do explosivo, dimensões da coluna, influência de carregamento axial etc.

Luccioni e Aráoz (2011) e Luccioni et al. (2013) apresentaram estudos relativos aos critérios e limites dos modelos de erosão adotados em simulações numéricas. Nestes trabalhos, foi avaliada a influência destes modelos na abordagem numérica, também foram detalhadas características da função erosão e foi realizada uma revisão dos modelos utilizados por diferentes autores.

Li et al. (2012) desenvolveram uma abordagem experimental visando definir a capacidade residual de pilares de concreto armado submetidos a uma explosão simulada, já que nesse caso foram utilizados atuadores hidráulicos para reproduzir a deflexão lateral. Em todos os pilares foram aplicados carregamentos axiais, sendo realizada uma análise comparativa para avaliação do desempenho dos pilares em diferentes níveis de carregamento.

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. Também aborda em seu trabalho aspectos 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, como as provenientes de uma explosão. A obra apresenta informações acerca das considerações de carregamento, coeficientes de segurança, análise de risco e normas.

Abdelalim (2013) fez uma avaliação da mitigação dos danos de uma explosão através da utilização de escudos supressivos ventilados, baseando-se em uma abordagem experimental e numérica. Seu trabalho também apresenta informações gerais sobre o fenômeno explosão e princípios de modelagem utilizando a tecnologia da dinâmica dos fluidos computacional.

Alhadid et al. (2014) realizaram uma revisão bibliográfica importante sobre a resistência de diferentes tipos de concreto submetidos a explosões, apresentando posteriormente uma análise crítica das atuais técnicas de *retrofitting* e de reforço.

Zhang et al. (2013) apresentaram um trabalho em que foi avaliado o efeito de escala em vigas de concreto armado submetidas a uma explosão próxima. O estudo foi centralizado no nível de dano e na deflexão da viga, sendo desenvolvidas equações empíricas de modo a propor relações de escala considerando os efeitos dimensionais na viga.

Pichandi et al. (2013) realizaram uma revisão sobre o estado da arte da utilização de fibras e compósitos no concreto para aumento da resistência a explosão. Ao longo do trabalho é apresentada uma longa lista de referências importantes, com destaque às abordagens experimentais.

Shen e Ren (2013) apresentaram um trabalho, baseado em uma pesquisa experimental, sobre a transmissão de ondas de tensão em elementos tipo sanduíche de concreto. Como materiais de preenchimento, foram utilizados concreto de baixa massa específica, areia e limo calcário. Os diferentes tipos de preenchimento foram comparados com relação à resistência e capacidade de absorção de energia, sendo que o concreto de baixa massa específica apresentou os melhores resultados.

Remmenikov e Uy (2014) realizaram uma abordagem experimental e numérica para avaliar o desempenho de pilares de aço submetidos a explosões próximas, também propuseram uma função de carregamento simplificada para tratar o problema como dinâmico não linear com um grau de liberdade. Observaram que há um limite em que este grau de simplificação é válido e

corresponde a uma distância em escala de  $0,15 \text{ m/kg}^{1/3}$  para o caso analisado. Comparando dois pilares tubulares de aço preenchidos por concreto de 35 MPa submetidos a uma explosão com distâncias em escala de  $0,12 \text{ m/kg}^{1/3}$  e  $0,15 \text{ m/kg}^{1/3}$ , respectivamente, verificou-se que a diferença de 20% entre essas distâncias em escala foi suficiente para uma grande diferença no nível de dano, Figura 2.1.

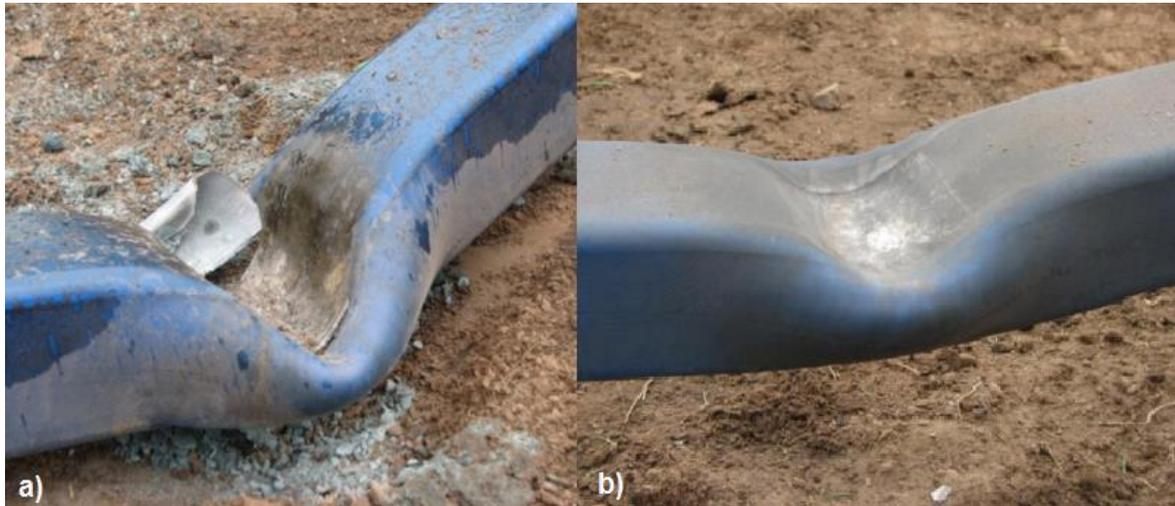


Figura 2.1 – Pilar tubular de aço preenchido por concreto danificado por explosão a  $0,12 \text{ m/kg}^{1/3}$  (a) e  $0,15 \text{ m/kg}^{1/3}$  (b), Remmenikov e Uy (2014).

Ngo et al. (2014) apresentaram um trabalho em que abordaram os danos causados por uma explosão em uma coluna tubular de aço preenchida por concreto, baseando-se em uma abordagem experimental e numérica. A distância em escala utilizada nos testes foi de  $0,12 \text{ m/kg}^{1/3}$ . Foi observado que o preenchimento da seção transversal por concreto de 35 MPa auxiliou o elemento estrutural a conter o dano por perfuração muito embora, aparentemente, não tenha sido suficiente para evitar o colapso. A Figura 2.2 mostra a diferença entre a configuração do dano no pilar sem preenchimento (a) e com preenchimento de concreto (b).



Figura 2.2 – Dano local em pilar tubular de aço sem preenchimento (a) e preenchido por concreto (b) por explosão próxima, Ngo et al. (2014).

Zhang et al. (2013) e Zhang et al. (2016) apresentaram trabalhos em que abordaram o desempenho de tubos de aço submetidos a explosões próximas. Nesses estudos, foram consideradas explosões próximas e em alguns casos, os tubos de aço eram preenchidos por concreto. Os resultados destes trabalhos possuem muitas características em comum, principalmente no que tange à configuração, mecanismos e nível de dano apresentado por este tipo de elemento.

Naito et al. (2014) desenvolveram um estudo sobre o desempenho de paredes de concreto com painéis de espuma submetidos a uma explosão próxima. A distância em escala utilizada nos experimentos foi de  $1,2 \text{ m/kg}^{1/3}$ , sendo observado um bom desempenho dessas paredes ao lascamento e à perfuração, mostrando que as diferentes camadas de material foram eficientes na dissipação da energia da explosão no interior da parede.

Siba (2014) desenvolveu um trabalho experimental com o objetivo de verificar o desempenho de diferentes pilares de concreto armado submetidos a explosões próximas considerando distâncias em escala inferiores a  $1 \text{ m/kg}^{1/3}$ . No programa experimental foram utilizados pilares convencionais, assim como pilares resistentes a terremotos e pilares de concreto protendido, a eficiência de cada tipo de pilar foi avaliada parametricamente com relação à distância das explosões.

Li e Hao (2014), a partir de resultados numéricos, desenvolveram expressões para definir a região de lascamento em pilares de concreto armado submetidos a uma explosão. Também observaram nas simulações que a rigidez a flexão e as condições de contorno adotadas nos pilares não exerceram influência significativa na região de concreto afetada pelo lascamento.

Remennikov et al. (2015) compilaram informações relativas à perfuração de paredes por explosivos, apresentando algumas técnicas de análise e desenvolvendo uma metodologia relacionando a quantidade e forma do explosivo e a espessura da parede a ser perfurada.

Yan (2015) desenvolveram uma análise numérica para avaliação dos mecanismos de dano em uma viga de concreto armado submetida a uma explosão próxima. Apresentando que o furo produzido pela explosão na viga é resultado da junção da trinca compressão na face exposta à explosão com a trinca produzida pela tração na face posterior.

Esteban e Gebbeken (2016) compararam diferentes estratégias para avaliar numericamente explosões por contato em alvos de concreto utilizando hidrocódigo Ansys Autodyn® (2014). Neste trabalho, uma mesma explosão foi desenvolvida sob diferentes técnicas de modelagem e os resultados comparados entre si. Como resultado, observou-se que a fluidodinâmica suave de partículas apresentou os melhores resultados, já que o dano previsto no modelo simulado foi semelhante ao do experimento adotado como base.

Codina et al. (2016a), Codina et al.(2016b) e Codina et al. (2016c) desenvolveram trabalhos numéricos e experimentais no campo das explosões próximas focando na interação delas com pilares de concreto armado. Muitas informações importantes podem ser observadas nos resultados destes trabalhos como, por exemplo, uma avaliação quantitativa e qualitativa da mitigação do dano em pilares para diferentes tipos de proteção e recomendações para modelagem numérica do concreto submetido a explosões próximas.

Shi et al. (2016) avaliaram o desempenho de paredes de alvenaria submetidas a uma explosão próxima, atentando aos mecanismos de dano e os fragmentos produzidos. Foi observado que danos locais, como o lascamento, eram esperados para detonações próximas das paredes e que danos causados por flexão e cisalhamento ficavam mais visíveis para distâncias em escala maiores.

Li et al. (2016), em seu trabalho, avaliaram experimentalmente o desempenho de concretos convencionais em comparação com concretos de ultra alta performance (UHPC) quando submetidos a explosões em contato, posteriormente foi realizado um estudo estatístico com relação a distribuição dos fragmentos produzidos. Como esperado, foi observado que o concreto de alta performance mostra um desempenho muito superior ao concreto convencional com relação a resistência tanto ao crateramento e quanto ao lascamento.

Luccioni et al. (2017) avaliaram o comportamento do concreto de alta resistência reforçado com fibras de aço sob condições de carregamento estático e quando submetido a explosões próximas.

Foi observado que o acréscimo de fibras pode incrementar a resistência dos elementos de concreto e, no caso das explosões, são capazes de alterar o mecanismo predominante de dano.

Yue et al. (2017) desenvolveram um estudo analítico sobre o dano causado em uma laje de concreto por uma explosão por contato. Através de seu trabalho buscaram definir limites para crateramento e lascamento de uma parede, com base em um fator de impacto adimensional que envolve a resistência ao cisalhamento do concreto com a energia liberada pelo explosivo.

Yu et al. (2018) apresentaram um trabalho sobre a mitigação do dano provocado por uma explosão utilizando uma proteção de concreto com um núcleo interno de ar, este tipo de proteção funciona como um abrigo (*shelter*) envolvendo a estrutura a ser protegida. Os resultados mostraram que este tipo de proteção, por ser robusta, tem a capacidade de resistir ao impacto e a subsequente explosão do projétil.

Iannitti et al. (2018) desenvolveram um trabalho numérico sobre lajes de concreto submetidas a explosões buscando identificar os mecanismos principais na geração do dano. Os elementos de concreto que foram analisados possuíam núcleos de poliestireno além de uma camada de manta impermeabilizante. Os autores simularam partições rígidas sobre a laje de forma a verificar se haveria alguma influência no nível de dano. Os resultados mostraram que a presença de partições sobre a laje confinou a onda de choque produzida pela explosão incrementando os níveis de dano.

### **3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

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

As explosões são caracterizadas por uma liberação repentina de energia, capazes de produzir calor, luz e ondas de choque. Como podem ser produtos de diferentes circunstâncias, as explosões são classificadas de acordo com sua natureza podendo ser mecânicas, nucleares e químicas de acordo com Smith e Hetherington (1994).

As explosões mecânicas são causadas principalmente por elevados diferenciais de pressão e podem ser exemplificadas pelo rompimento de um cilindro de gás comprimido ou mesmo por uma erupção vulcânica.

Consideradas as explosões mais poderosas, por apresentar uma maior relação de energia liberada por massa de explosivo do que os demais tipos, as explosões nucleares podem ser produzidas por processos de fissão ou fusão nuclear. Os danos advindos da detonação de um explosivo deste tipo estão relacionados à elevada magnitude da onda de choque produzida que, associada com altas temperaturas e radiação, incrementam seu poder destrutivo.

As explosões químicas são produto de reações físico-químicas de combustão nas quais a liberação súbita de energia é proveniente de uma velocidade de reação extremamente alta. A energia liberada durante o processo de combustão possui dois mecanismos de propagação que dão prosseguimento à reação, a deflagração e a detonação.

A deflagração é um processo de combustão lenta que origina calor e luz no qual a velocidade de propagação da reação dá-se por transferência de calor, por conta disso a propagação desta energia ocorre numa velocidade inferior à do som, não originando ondas de choque segundo Krehl (2009).

A detonação, basicamente, é um processo de natureza mecânica em que a transferência de energia no interior do explosivo é provocada, principalmente, por pressões de choque, por conta disso esse processo é relativamente independente das condições ambientes, Kinney e Graham (1985). Nesse âmbito, em explosivos em estado sólido ou líquido, geralmente nomeados de explosivos condensados, haverá uma facilitação do processo de detonação. A nomenclatura adequada para se nomear explosivos químicos que produzem explosões a partir de um processo de detonação é de alto explosivo.

No estudo das explosões, muitas informações relativas à detonação de alto explosivos estão bem documentadas, principalmente as relacionadas ao TNT. Por conta disso, em termos

práticos, é usual a utilização de um equivalente de TNT, com este equivalente é possível relacionar diferentes compostos explosivos em termos de sobrepressão e impulso com o TNT.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as equivalências em TNT de alguns explosivos.

Tabela 3.1 - Relação de alguns explosivos e suas equivalências em TNT para sobrepressão.  
Norma ASCE (2011)

Explosivo	TNT Equivalente em Massa
TNT	1
C4	1,20
PENT	1,27
Nitroglicerina	0,90
RDX	1,10
ANFO	0,87
Tetryl	1,07
Tropex	1,23
LX-14	1,80

A magnitude de uma explosão está diretamente relacionada com a quantidade de explosivo utilizada. Existe uma categorização de danos a estruturas baseadas na massa de explosivo, chamada de ODS (danos observados em estruturas), Bangash (2006):

- Pequenas cargas de explosivo: Até 5kg de TNT
- Médias cargas de explosivo: de 5kg à 20kg de TNT
- Grandes cargas de explosivo/bombas: de 20kg à 100kg de TNT
- Imensas cargas de explosivos/bombas: a partir de 200kg até 2500kg TNT

Esta categorização considera explosivos dentro ou no entorno de uma edificação. Apesar da definição da massa do explosivo ser útil em uma análise inicial, isto não é suficiente para uma estimativa precisa, uma vez que existem outros parâmetros que influenciam no dano causado por uma explosão a uma estrutura como, por exemplo, a distância até o alvo, a posição do explosivo, o tipo de estrutura, etc.

## 3.2 - PROPAGAÇÃO DAS EXPLOSÕES

### 3.2.1 - Ondas de choque

As ondas de choque são formadas quando uma onda atinge uma velocidade superior à do som no meio em que se propaga havendo um acúmulo de energia no volume. Ao ar livre, este acúmulo de energia comprime o gás no entorno, essa camada de ar comprimido que passa a se deslocar pelo meio a velocidades supersônicas é chamada de onda de choque, Needham (2010).

A onda de choque que surge como produto de uma explosão vai perdendo energia à medida que se propaga pelo meio, isto pode ser observado pelos decréscimos na pressão de onda a partir do primeiro pico de sobrepressão, Vijayraghavan et al. (2012).

O estado de carregamento que uma onda de choque impõe pode ser extremamente danoso. Entretanto, apesar da complexidade do fenômeno, pode-se realizar uma estimativa preliminar de danos, adotando as pressões de pico ou avaliando o impulso produzido.

Ondas de choque provenientes da detonação de explosivos, também chamadas de “*blast waves*”, possuem uma série de parâmetros importantes a serem avaliados durante sua propagação segundo Bangash et al. (2006). Entre eles podem-se citar a sobrepressão, tempo de chegada, tempo de duração das fases, a velocidade de propagação da onda, entre outros, esses parâmetros serão detalhados em tópicos posteriores.

Dentro das abordagens iniciais sobre ondas de choque, Rankine apud Salas (2006) foi um dos pioneiros a tentar estabelecer as bases matemáticas para análise, posteriormente, Hugoniot apud Salas (2006) estabeleceu a teoria completa. Desse modo, o estudo das ondas de choque pode ser realizado através das relações de Rankine-Hugoniot, que consistem em expressões para conservação de massa, *momentum* e energia, Needham (2010).

As relações de Rankine-Hugoniot definem as condições anteriores e posteriores ao choque através das expressões de conservação de massa, *momentum* e energia que são apresentadas nas equações 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente. A Figura 3.1 esquematiza o princípio adotado na idealização do modelo.

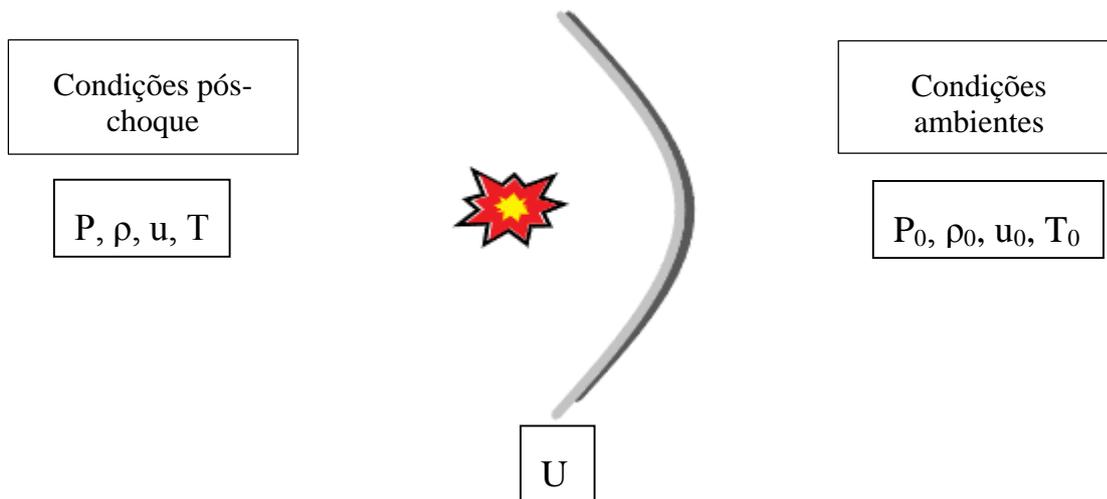


Figura 3.1 - Esquema das propriedades de uma onda de choque, Needham (2010).

$$\rho(U - u) = \rho_0(U - u_0) \quad (3.1)$$

$$P - P_0 = \rho_0 U u \quad (3.2)$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2}(P + P_0) \left( \frac{1}{P_0} - \frac{1}{P} \right) \quad (3.3)$$

Nas equações acima,  $P$  é a pressão,  $\rho$  foi empregado para representar a massa específica do gás,  $T$  é a temperatura,  $u$  é a velocidade da partícula (*material velocity*),  $U$  é a velocidade de deslocamento da onda de choque e  $E$  é a energia. Os parâmetros com índices “0” são referentes às condições do ambiente, enquanto os demais são relativos aos gases por trás da onda de choque.

A sobrepressão da onda de choque ( $\Delta P$ ) é um parâmetro importante numa avaliação preliminar de danos, ela é obtida através da diferença entre a pressão da onda e a pressão ambiente, conforme mostra a equação (3.4):

$$\Delta P = P - P_0 \quad (3.4)$$

Em que  $\Delta P$  é a sobrepressão,  $P$  é a pressão da onda e  $P_0$  é a pressão ambiente.

### 3.2.2 - Fundamentos de uma onda de choque

O registro do histórico das pressões de uma onda de choque ao longo tempo, Figura 3.2, permite a definição de parâmetros importantes. Estes parâmetros auxiliam, não só apenas na avaliação do comportamento da onda de choque, como habilitam análises de dano em estruturas e predições do potencial destrutivo de um determinado explosivo.

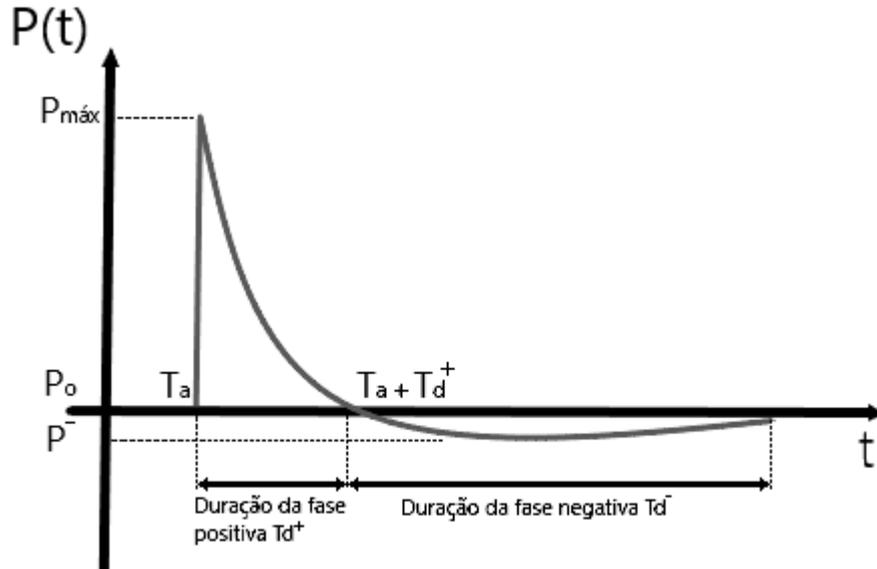


Figura 3.2 - Gráfico da pressão em função do tempo típica para uma onda de choque, Ngo (2007).

Na figura anterior é possível observar alguns parâmetros importantes no estudo das ondas de choque, são eles:

$T_a$  ou tempo de chegada, define o tempo decorrido do início da explosão até que a onda de choque atinge um determinado ponto.

$T_d^+$  ou duração da fase positiva da onda, ele tem início quando a onda de choque atinge o ponto de análise ( $T_a$ ) e permanece ao longo da fase positiva até o início da fase negativa da onda. A região sob a curva neste instante caracteriza o impulso da fase positiva.

$T_d^-$  ou 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. Segundo Silva (2007) o tempo de duração da fase positiva da onda é cerca de  $\frac{1}{4}$  do  $T_d^-$ .

$P_{máx}$ , ou pressão máxima da fase positiva, é caracterizada pelo pico de pressão que ocorre quando a onda de choque atinge um determinado ponto de análise.

$P_o$ , ou pressão de referência do ambiente, é a pressão inicial onde ocorreu a explosão, em situações normais de temperatura e pressão possui um valor de 101,3 kPa.

$P^-$ , ou pressão máxima da fase negativa, possui valor bem inferior ao da pressão máxima da fase positiva. As pressões da fase negativa geralmente possuem uma grandeza muito baixa,

na avaliação de danos, seu efeito se resume em arrastar os detritos e fragmentos oriundos da colisão da onda de choque com o alvo.

### 3.3 – INTERAÇÃO DA ONDA DE CHOQUE COM SÓLIDOS

#### 3.3.1 – Conceitos básicos da transmissão de ondas de choque

Como mencionado, uma onda de choque pode propagar-se através de diversos materiais. Desse modo, quando uma onda atinge uma região de fronteira entre dois materiais parte dela é refletida e a outra transmitida através da interface de contato, Krauthammer (2008). Esta interação é extremamente complexa e dependente das propriedades dos materiais relacionados. A Figura 3.3 apresenta um esquema simplificado desta interação.

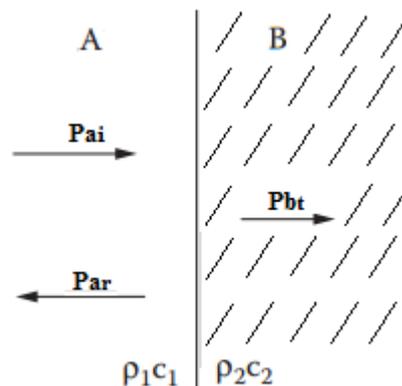


Figura 3.3. Esquema das pressões de uma onda de choque sendo transmitidas do meio A para o meio B.

Nesse sistema, uma onda de choque se desloca do meio A para o meio B. Nele,  $\rho_1$  e  $\rho_2$ , são as massas específicas dos diferentes materiais que caracterizam os dois ambientes, enquanto que a velocidade da onda nesses materiais é definida por  $c_1$  e  $c_2$ , respectivamente. Em A,  $P_{ai}$  é a pressão incidente e  $P_{ar}$  a pressão refletida.  $P_{bt}$  representa a parcela da onda de choque que foi transmitida para o material B.

A impedância de choque ( $I_z$ ) ou impedância mecânica, advinda do conceito de impedância acústica, é um parâmetro importante que permite uma avaliação inicial sobre a distribuição da energia da onda na região de interface entre os materiais. Ela é definida pelo produto entre a massa específica do material ( $\rho_i$ ) e a velocidade da onda naquele material ( $c_i$ ), este último, em termos práticos, é considerado como sendo a velocidade do som naquele meio.

Considerando uma onda de choque de incidência normal, através da impedância de choque é possível relacionar as pressões incidente e transmitida, assim como a pressão incidente e a refletida, como pode ser observado nas equações 3.5 e 3.6 a seguir:

$$P_{bt} = 2P_{ai} \frac{I_{zb}}{I_{zb} + I_{za}} \quad (bar) \quad (3.5)$$

$$P_{ar} = P_{ai} \frac{I_{zb} - I_{za}}{I_{zb} + I_{za}} \quad (bar) \quad (3.6)$$

nas quais  $I_{za}$  e  $I_{zb}$  são as impedâncias de choque de A e B, respectivamente.

É possível identificar nestas relações a influência da impedância nas pressões refletidas e transmitidas. Nesse âmbito, observa-se que é possível a criação de dispositivos para a proteção de estruturas, alocando ou combinando diferentes materiais no entorno do elemento que se deseja proteger, uma vez que promover estas sucessivas mudanças de impedância por onde se propaga a onda de choque pode contribuir para uma mitigação de sua magnitude, como observado por Yu et al. (2018).

Nesse sentido, várias pesquisas já foram realizadas, como por exemplo as realizadas por Kazemi-Kamyab et al (2011) que avaliaram a transmissão de tensão em materiais porosos impactados por uma onda de choque. Shen e Ren (2013) apresentaram uma abordagem experimental sobre a transmissão de ondas de tensão em elementos sanduíche preenchidos por concreto de baixa massa específica (*foam concrete*) e Codina et al (2016c) apresentaram um estudo sobre o efeito de explosões próximas em colunas de concreto com diferentes tipos de proteção.

Para ilustrar a propagação de onda em um meio sólido sob a forma de onda de tensão, considere-se o elemento infinitesimal mostrado na Figura 3.4. Este elemento faz parte de um volume maior, elástico.

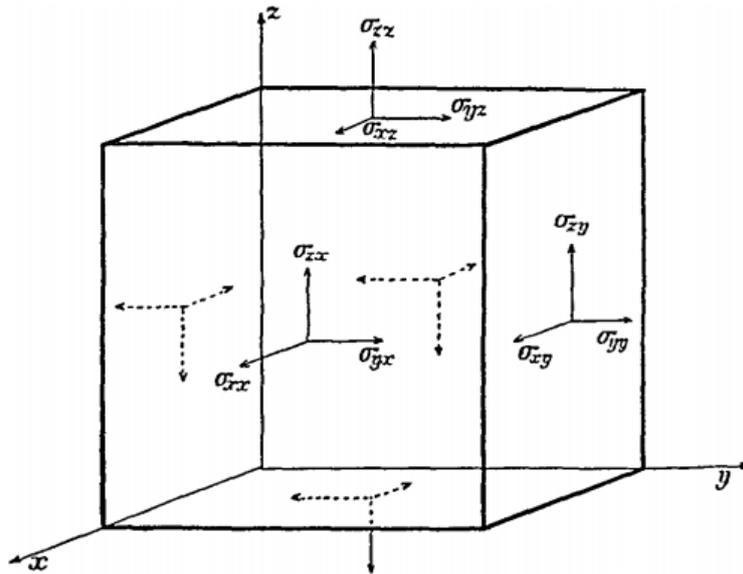


Figura 3.4. Componentes de tensão agindo em um elemento infinitesimal, Kolsky (1963).

O elemento da figura 3.4 está em equilíbrio, ou seja, é possível definir que  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$  ( $i \neq j$ ). Por conta disso, das nove componentes do tensor de tensões, apenas seis são distintas:  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{xz}$  e  $\sigma_{yz}$ . O deslocamento de qualquer ponto do elemento pode ser definido através das componentes  $u, v$  e  $w$  que são paralelas aos eixos  $x, y$  e  $z$ , respectivamente.

Desse modo é possível aplicar as definições de deformação de Timoshenko e Goodier (1951), obtendo as expressões referentes às deformações paralelas aos eixos  $x, y$  e  $z$  e às componentes de deformação relacionadas ao cisalhamento. Também é possível definir as componentes relacionadas à rotação de corpo rígido, Kolsky (1963).

As equações 3.7, 3.8 e 3.9 correspondem às deformações que ocorrem paralelamente aos eixos  $x, y$  e  $z$ , respectivamente.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.9)$$

As equações 3.10, 3.11 e 3.12 correspondem à deformação pelo cisalhamento.

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (3.12)$$

As equações 3.13, 3.14 e 3.15 são as componentes de rotação de corpo rígido.

$$2\omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3.13)$$

$$2\omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3.14)$$

$$2\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.15)$$

Para que se possa exemplificar os dois tipos principais de onda é necessário definir as relações de tensão e deformação por meio das equações 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20 e 3.21, para depois avaliar o equilíbrio dinâmico do elemento através da segunda lei de Newton.

$$\sigma_{xx} = \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{xx} \quad (3.16)$$

$$\sigma_{yy} = \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{yy} \quad (3.17)$$

$$\sigma_{zz} = \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{zz} \quad (3.18)$$

$$\sigma_{xy} = \mu\varepsilon_{xy} \quad (3.19)$$

$$\sigma_{zx} = \mu\varepsilon_{zx} \quad (3.20)$$

$$\sigma_{yz} = \mu\varepsilon_{yz} \quad (3.21)$$

Nestas equações  $\Delta$  é a variação do volume por unidade de volume, também chamado de dilatação, definido segundo a Equação 3.22. Os demais termos são os parâmetros de Lamé, onde  $\lambda$  é o primeiro parâmetro e  $\mu$  ou  $G$  é o segundo parâmetro ou módulo de cisalhamento, com eles é possível estabelecer relações para o módulo de elasticidade ( $E$ ), o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e o módulo volumétrico ( $k$ ), que são descritos nas equações 3.23, 3.24 e 2.25.

$$\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad (3.22)$$

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (3.23)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (3.24)$$

$$k = \lambda + \frac{2\mu}{3} \quad (3.25)$$

Utilizando a segunda lei de Newton e aplicando a equação do equilíbrio dinâmico na direção do eixo x do elemento anterior é possível definir a Equação 3.26.

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.26)$$

Relacionando as equações 3.16, 3.19 e 3.20 na expressão anterior, origina-se a Equação 3.27:

$$\frac{\partial \lambda \Delta}{\partial x} + 2 \frac{\partial \mu \varepsilon_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mu \varepsilon_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \mu \varepsilon_{zx}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.27)$$

A partir da relação anterior e inserindo as equações 3.7, 3.10 e 3.11 é possível definir a equação do movimento como mostrado na Equação 3.28.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \lambda \Delta}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (3.28)$$

De modo similar, é possível aplicar as considerações para o equilíbrio dinâmico nas outras direções, definindo as equações 3.29 e 3.30.

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (3.29)$$

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (3.30)$$

A partir deste ponto é possível obter a Equação 3.31 que descreve uma onda longitudinal ou P-wave, para isto, basta diferenciar as equações 3.28, 3.29 e 3.30 em relação a x, y e z, respectivamente e relacioná-las.

$$(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Delta = \rho \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} \quad (3.31)$$

A expressão que define as ondas tipo S ou ondas de cisalhamento, Equação 3.32, pode ser obtida através das expressões já apresentadas. Basicamente, para encontrar a rotação no x ( $\omega_x$ ), deve-se diferenciar a Equação 3.29 em relação a z e a Equação 3.30 em relação a y e depois efetuar uma subtração entre os resultados. O mesmo procedimento pode ser aplicado para definição das rotações em torno dos outros eixos.

$$\mu \nabla^2 \omega_x = \rho \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial t^2} \quad (3.32)$$

### 3.3.2 – Conceitos básicos relacionados à reflexão das ondas de choque

No tópico anterior foi avaliada a transmissão da onda de choque e sua propagação pelo meio, foi visto que na região de interface entre dois materiais uma parte da energia da onda é transmitida e a outra refletida. Isto ocorre devido à mudança de impedância, um meio mais denso oferece mais resistência à propagação de onda. No caso de uma explosão em meio urbano as edificações e o solo podem refletir as ondas de choque nela incidentes, como mostra a Figura 3.5.

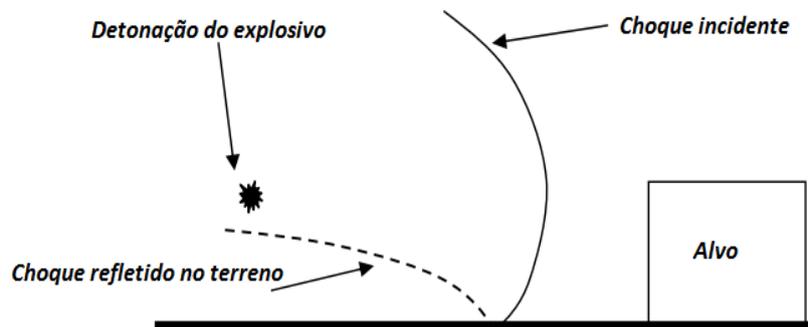


Figura 3.5 - Esquema da propagação de uma onda de choque devido uma explosão sobre o solo, Le Blanc et. al. (2005).

É possível classificar as reflexões de ondas de acordo com o ângulo de incidência em três tipos: a reflexão normal, a reflexão oblíqua e a reflexão Mach. A determinação do modo como uma onda incide em um determinado alvo é importante, uma vez que acréscimos na magnitude da sobrepressão podem surgir.

Basicamente, a reflexão normal ocorre quando a superfície da onda de choque é paralela à superfície em que ela incide, ou seja, a reflexão normal trata do produto de um choque frontal de uma onda com uma superfície.

Para analisar este tipo de reflexão, por exemplo, pode-se utilizar as formulações de Rankine-Hugoniot. Considerando a propagação no ar, em que o coeficiente de expansão adiabática ( $\gamma$ ) pode ser considerado igual a 1,4, chega-se à Equação 3.33:

$$\Delta Pr = 2\Delta P \left( \frac{7P_0 + 4\Delta P}{7P_0 + \Delta P} \right) \quad (3.33)$$

A partir desta fórmula é possível realizar algumas observações quanto à magnitude da onda de choque refletida ( $\Delta Pr$ ), considerando uma incidência normal ao alvo, equações 3.34 e 3.35.

$$\Delta Pr = 2\Delta P \quad \text{quando } P_0 \gg \Delta P \quad (3.34)$$

$$\Delta Pr = 8\Delta P \quad \text{quando } P_0 \ll \Delta P \quad (3.35)$$

Estas equações mostram que quanto maior for a sobrepressão em relação a pressão ambiente, maior será a magnitude da pressão refletida.

É importante mencionar que, ao se deslocar por um meio, uma onda de choque altera o equilíbrio inicial de pressão e temperatura. Por conta disso, a onda que é refletida passa a se propagar por um meio diferenciado daquele da onda incidente.

A Figura 3.6 ilustra uma onda de choque atingindo uma superfície em diferentes ângulos de incidência. No primeiro caso (a) o vetor velocidade é perpendicular à superfície do alvo, caracterizando uma colisão frontal. No segundo caso (b) o vetor velocidade é paralelo à superfície, nesse caso, não há reflexão da onda.

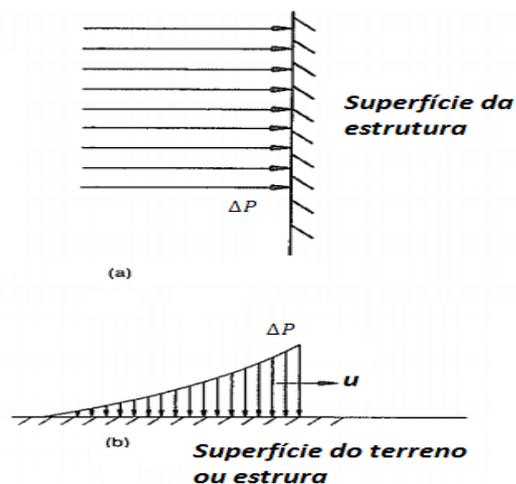


Figura 3.6 - Interação de uma onda de choque com superfícies, para diferentes sentidos de propagação, Mays e Smith (1995).

Quando uma onda de choque interage com um obstáculo tendo um certo ângulo de incidência ( $\alpha_i$ ) não nulo e não perpendicular à superfície, irá produzir uma onda refletida com um ângulo de reflexão  $\alpha_r$  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.

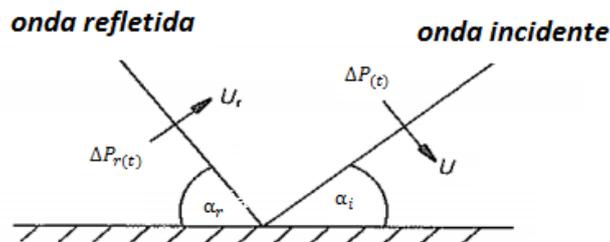


Figura 3.7 - Interação de uma onda de choque atingindo uma superfície oblíqua, Mays e Smith (1995).

No caso das reflexões oblíquas ao ar livre 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 que atribui novas particularidades ao problema. A Figura 3.8, mostra um esquema de uma detonação originando reflexões no terreno, deve-se notar o surgimento da reflexão Mach a partir da superação do ângulo de incidência crítico.

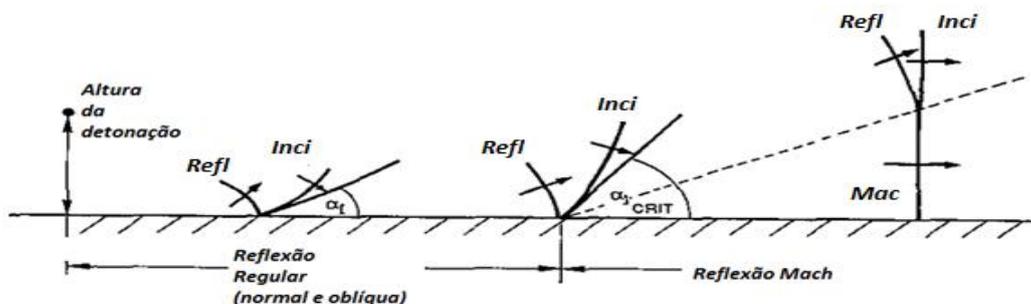


Figura 3.8 - Interação de uma onda de choque com uma superfície para diferentes ângulos de incidência, Mays e Smith (1995).

Na figura anterior Inci, Refl e Mac são referentes à onda incidente, à onda refletida e à haste Mach ou Onda Mach, respectivamente.

A reflexão Mach 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 haste de Mach. A Figura 3.9 a seguir ilustra o processo de formação deste fenômeno e permite observar o ponto

triplo que se trata do ponto em que a onda de choque incidente, a refletida e a haste Mach se interceptam.

O incremento dado à capacidade destrutiva de uma explosão pela haste Mach é costumeiramente objeto de estudo militar, o que justifica a detonação de alguns armamentos a uma determinada altura do solo para cobrir uma maior área com danos significativos.

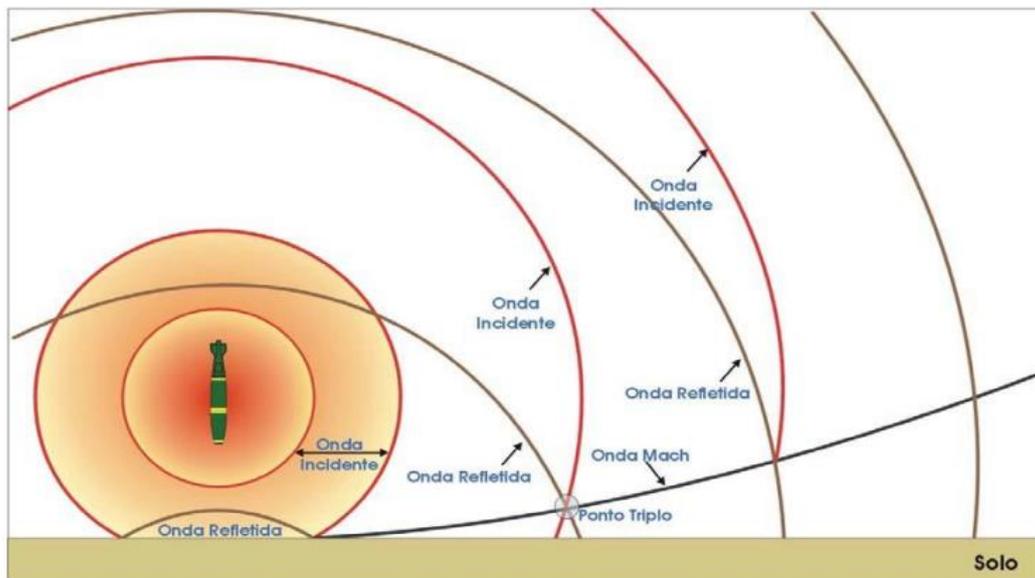


Figura 3.9 - Detonação de um dispositivo explosivo acima do nível do solo e as formas de propagação das ondas de choque. Silva (2007).

### 3.4 – CONCEITOS FUNDAMENTAIS NO CAMPO DAS EXPLOSÕES

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

Os efeitos de uma explosão em um determinado local podem ser mensurados inicialmente com base em dois principais fatores: a quantidade de explosivo e a distância deste ao local considerado, por conta disso é comum a utilização de leis de escala.

A lei de escala mais utilizada no estudo das explosões foi desenvolvida por Hopkinson apud Chock (1999) e estabelece que explosivos de composição diferente, porém da mesma geometria e detonados sob as mesmas condições apresentarão características semelhantes de onda de choque desde que preservada a distância em escala ( $Z$ ). Esta lei também é conhecida como escala da raiz cúbica, Equação 3.36.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (3.36)$$

Na equação 3.36, Z é a distância em escala, R é distância do epicentro até o ponto de referência e W e a massa de explosivo em TNT. Z costuma ser mensurado em metros pela raiz cúbica da massa de explosivo ( $m/kg^{1/3}$ ).

A utilização da distância em escala Z permite uma representação eficiente das informações de uma determinada explosão, Luccioni e Ambrosini (2005).

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

Sendo as ondas de choque o mecanismo primário de dano de uma explosão, a previsão adequada das sobrepressões de onda fornece o embasamento necessário para o desenvolvimento de estudos relacionados à segurança de edificações, elementos estruturais ou de seus usuários.

Muitas proposições para predição das sobrepressões de onda de choque foram apresentadas por diferentes pesquisadores ao longo do tempo. A Tabela 3.2 apresenta uma série de formulações para predição das sobrepressões de onda de choque definidas pelas equações 3.37, 3.38, 3.39, 3.40, 3.41, 3.42, 3.43 e 3.44.

Tabela 3.2 - Formulações para predição de onda de choque ao ar livre

Autor	Fórmulas de predição	Requisito	Unidade
Brode	$\Delta P = \frac{6,7}{Z^3} + 1$ (3.37)	$\Delta P > 10$	Bar
	$\Delta P = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019$ (3.38)	$0,1 < \Delta P < 10$	Bar
Henrych	$\Delta P = \frac{14,072}{Z} + \frac{5,540}{Z^2} - \frac{0,357}{Z^3} + \frac{0,00625}{Z^4}$ (3.39)	$0,05 \leq Z \leq 0,3$	Bar
	$\Delta P = \frac{6,194}{Z} - \frac{0,326}{Z^2} + \frac{2,132}{Z^3}$ (3.40)	$0,3 \leq Z \leq 1$	Bar
	$\Delta P = \frac{0,662}{Z} + \frac{4,05}{Z^2} + \frac{3,288}{Z^3}$ (3.41)	$1 \leq Z \leq 10$	Bar
Mill	$\Delta P = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z}$ (3.42)	-	kPa
Kinney	$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{808 \left[ 1 + \left( \frac{Z}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left( \frac{Z}{0,048} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{0,32} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{1,35} \right)^2}}$ (3.43)	-	-
Newmark	$\Delta P = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left( \frac{W}{R^3} \right)^{\frac{1}{2}}$ (3.44)	-	Bar

Estas fórmulas estão em função da distância em escala ( $Z$ ), da massa do explosivo ( $W$ ) e da distância até a explosão ( $R$ ), elas podem ser facilmente encontradas em bibliografias especializadas como Smith e Hetherington (1994), Moon (2009), Ngo et al. (2007) e Kinney e Graham (1985).

Apesar de apresentarem resultados com boa precisão para médias e longas distâncias da explosão, as fórmulas de previsão costumam divergir bastante para análises mais próximas. Segundo a norma ASCE 59-11 (2011), o caso de explosões próximas envolveria detonações em distâncias inferiores a  $1.2 \text{ m/kg}^{1/3}$  do alvo e, por conta disso, o carregamento provocado pelo explosivo se daria de uma forma não uniforme sobre uma região do elemento em análise.

Esta mesma norma também enfatiza a necessidade de que problemas envolvendo o contato ou quase contato do explosivo com o elemento devem ser analisados através de métodos numéricos, buscando a solução através da dinâmica dos fluidos computacional, por exemplo.

### **3.4.3 – Considerações quanto a explosões próximas ou por contato**

Explosões muito próximas do alvo tendem a causar danos na forma de perfuração (*breaching*), Krauthammer (2008). No caso de elementos de concreto submetidos a uma explosão, estes podem apresentar diversos modos de falha. O comportamento destas falhas está geralmente relacionado com a distância até a explosão, por exemplo, a resposta local de um elemento submetido a uma explosão próxima é caracterizada por falha ao cisalhamento e lascamento, Ma et al. (2007). Por outro lado, uma falha por flexão é esperada como resposta para explosões a médias e longas distâncias, Ngo et al (2007).

ASCE 59-11 (2011) menciona que para análise de explosões muito próximas devem ser avaliados os efeitos de perfuração, cisalhamento, flexão e lascamento como possíveis mecanismos de falha. Fica evidenciado desta forma que a proximidade do explosivo com o elemento de concreto pode induzir a predominância de certos mecanismos de falha sobre outros, por conta disso é necessário o desenvolvimento de estudos tendo a abordagem numérica e/ou experimental como ferramentas.

Como mencionado em tópicos anteriores, quando um explosivo é detonado próximo a outro material a onda de choque advinda da explosão será transmitida. O produto deste processo estará relacionado às propriedades dos materiais em que, avaliando às impedâncias entre os produtos de detonação e o material adjacente, é possível estimar a magnitude da pressão de choque transmitida e a refletida.

Numa explosão por contato, o material da estrutura fica exposto prioritariamente ao carregamento advindo dos produtos de detonação cuja pressão inicial no processo é a mesma da detonação, ou seja, é de cerca de 21 GPa, Remmenikov e Uy (2014). Neste tipo de explosão, a proteção da estrutura está vinculada a metodologias que dissipem a quantidade massiva de energia cinética que chega ao alvo, Bornstein et al. (2012). O padrão de dano esperado para este tipo de evento é mostrado na Figura 3.10.

Nesta figura é possível se observar o comportamento de uma placa de concreto submetida a uma explosão por contato. Ao ocorrer a explosão, parte da energia da onda de choque é refletida devido à diferença entre as impedâncias mecânicas dos materiais e a outra parte se propaga através do concreto como uma onda de tensão. Esta onda de tensão percorre a placa até atingir a face posterior desta e ser refletida, esta segunda reflexão resulta em tensões de tração, provocando o lascamento do concreto. O concreto danificado irá falhar devido às tensões de tração e seus fragmentos serão projetados da parte posterior da parede, Kot (1977) e Millard et al. (2010).

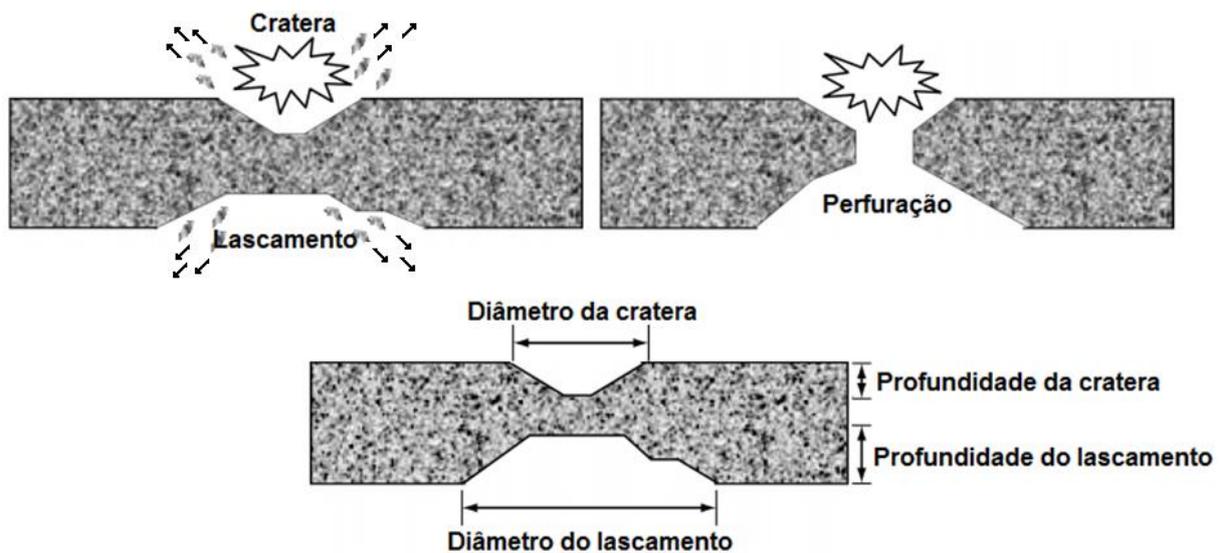


Figura 3.10 – Padrão de dano e medidas importantes para explosões por contato, Beppu et al. (2010).

Nesta área, alguns trabalhos propuseram metodologias para se estimar a perfuração de elementos de concreto através da detonação de explosivos em sua superfície.

Morishita et al. apud Beppu et al. (2010) propuseram a Equação 3.37 relacionando a massa de TNT ( $W$ ) com a espessura da placa de concreto ( $R_c$ ) a ser perfurada. Esta fórmula é válida para concretos de resistência à compressão entre 17,2 MPa e 84,8 MPa.

$$\frac{Rc}{\sqrt[3]{W}} = 2 \quad (3.37)$$

A espessura da placa de concreto está em cm e a massa de TNT em g. Os mesmos autores, baseados em procedimento experimentais, relacionaram a profundidade da cratera produzida ( $Pc$ ) pela explosão com o diâmetro da cratera ( $Dc$ ) conforme as equações 3.38 e 3.39.

$$\frac{Pc}{Rc} = -0,047 \frac{Rc}{\sqrt[3]{W}} + 0,43 \quad (3.38)$$

$$\frac{Pc}{Rc} = 0,20 \frac{Dc}{Rc} \quad (3.39)$$

Remennikov et al. (2015) definiram analiticamente que a carga de explosivo necessária para perfurar um alvo pode ser definida segundo a Equação 3.40:

$$W = K_0 \frac{n_p^2}{\mu_f} h^3 \quad (3.40)$$

Na qual o coeficiente de lascamento,  $n_p$ , é dado pela Equação 3.41.

$$n_p = \tan \alpha + \frac{X}{h} \quad (3.41)$$

Nas formulações acima,  $\mu_f$  é um fator de forma que pode ser determinado através das dimensões e do tipo de explosivo (cilíndrico ou prismático),  $K_0$  relaciona propriedades do alvo e do explosivo, representando a massa específica de explosivo necessária para destruição de  $1m^3$  de material,  $W$  é a massa do TNT em kg e  $h$  a espessura da parede. O coeficiente de lascamento  $n_p$  é obtido a partir de  $\alpha$  (adotado como  $45^\circ$ ), da espessura da parede  $h$  e de  $X$ , este último pode ser obtido da Equação 3.42.

$$\begin{cases} X = \frac{D_e - H}{2} & \text{para } \frac{D_e}{H} \geq 2 \\ X = \frac{D_e}{2} & \text{para } \frac{D_e}{H} \leq 2 \end{cases} \quad (3.42)$$

Nessa equação,  $H$  é a espessura e  $D_e$  o diâmetro do explosivo (explosivos cilíndricos) ou a largura (explosivos prismáticos).

Outra proposta para predição da perfuração do concreto foi apresentada por Yue et al. (2017), em que as condições para perfuração e lascamento da parede foram relacionadas com um fator de impacto adimensional ( $\xi$ ), estas estão sintetizadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Espessura limite de perfuração e lascamento para paredes de concreto

Resistência ao cisalhamento do concreto (MPa)		2	3	4	5	6
Fator de impacto adimensional ( $\xi$ )		298,478	198,985	149,239	119,391	99,493
Espessura limite	Lascamento ( $r_e$ )	13,263	11,606	10,562	9,821	9,257
	Lascamento ( $m/kg^{1/3}$ )	0,699	0,612	0,557	0,518	0,488
	Perfuração ( $r_e$ )	7,208	6,307	5,74	5,337	5,031
	Perfuração ( $m/kg^{1/3}$ )	0,38	0,332	0,303	0,281	0,265

Em que  $r_e$  e  $m/kg^{1/3}$  indicam se os valores apresentados estão relacionados ao raio do explosivo em metros ( $r_e$ ) ou a distância em escala, respectivamente. Esta tabela é válida para análises utilizando explosivos compostos por TNT e de formato esférico.

### 3.5 – INTRODUÇÃO À DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A fluido dinâmica computacional surgiu como um campo novo dentro da dinâmica dos fluidos, advindo da necessidade do estudo e análise de fenômenos super e hipersônicos. Ela proporcionou uma maior integração entre as abordagens experimental e teórica, consolidando, desta forma, as três dimensões da dinâmica dos fluidos, Anderson (1995).

Comumente referida como CFD (*computational fluid dynamics*) a dinâmica dos fluidos computacional é baseada nas equações fundamentais da dinâmica dos fluidos, a equação da continuidade, do *momentum* e da energia que, por sua vez, estão relacionadas aos princípios físicos da conservação de massa, de movimento (segunda lei de Newton) e energia, Wendt (2009).

Desta forma, considera-se que o fluido é um meio contínuo e sua massa está conservada, a taxa variação da velocidade na partícula de fluido é obtida pela soma das forças agindo sobre ela e a taxa de variação de energia está relacionada a taxa de adição de calor e ao trabalho realizado na partícula, Versteeg e Malalasekera (2007).

Usualmente, estes princípios podem ser expressos sob a forma de equações diferenciais parciais (como será apresentado no Capítulo 4, o qual aborda a ferramenta numérica).

Neste âmbito, a metodologia CFD, considerando estes princípios, realiza uma análise numérica do fenômeno utilizando recursos dos métodos dos elementos finitos, diferenças finitas ou dos

volumes finitos na resolução dos problemas, promovendo uma descrição dentro do espaço e tempo do fluxo do fluido.

Em linhas gerais, códigos CFD costumam ser estruturados de forma a conter três elementos principais, que são o pré-processamento, o *solver* e o pós-processamento.

No pré-processamento há a modelagem do problema a ser analisado, nesta fase ocorre a definição da geometria, da malha, a definição dos materiais, condições de contorno etc.

A parte do *solver* está relacionada à técnica numérica para resolução do problema, em que há a integração das equações governantes, a conversão destas equações em um sistema de equações algébricas e a solução destas equações via métodos iterativos, Versteeg e Malalasekera (2007).

O pós-processamento envolve a apresentação e coleta dos resultados sendo comum, por exemplo, a visualização dos vetores velocidade ao longo do modelo, zonas de dano e pressão, trajetória de fragmentos, temperatura do modelo, etc. Inclusive, um modelo já simulado pode servir de base para uma nova simulação, dando início a um novo ciclo de análises.

## **4 - MODELAGEM NUMÉRICA**

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

O estudo das explosões, bem como a análise das pressões de uma onda de choque e a interação dela com estruturas, é complexo de ser realizado. Historicamente estes estudos ocorreram, através da combinação de abordagens experimentais e analíticas. Entretanto, o elevado custo e a dificuldade dos experimentos, de certa forma, inibem seu desenvolvimento por muitos pesquisadores.

Nesse âmbito, a utilização da dinâmica dos fluidos computacional surge como uma solução numérica bastante útil no estudo e análise das explosões e das ondas de choque. Esta abordagem permite a utilização de vários métodos para modelagem do comportamento dos materiais e é indicada para análise de fenômenos dinâmicos não lineares como o de explosões, impactos e penetração, Robertson et al. (1994).

As simulações numéricas apresentadas neste trabalho foram desenvolvidas no software de dinâmica dos fluidos computacional Ansys Autodyn® (2014). Neste programa a resolução de problemas ocorre pela resolução das equações de conservação de massa, movimento e energia, acopladas com as descrições das propriedades dos materiais. Estas equações são solucionadas simultaneamente em cada intervalo de tempo, Gebbeken e Ruppert (2000).

O Autodyn é um hidrocódigo, esta terminologia está relacionada a capacidade do programa em simular a física do choque e impacto em altas velocidades. Historicamente, o termo “hidro” se relaciona ao comportamento hidrodinâmico esperado de materiais submetidos a carregamentos de alta intensidade e velocidade. Enquanto que o termo “código” refere-se ao emprego computacional da ferramenta.

Uma das vantagens da utilização dos hidrocódigos, em comparação com a realização de experimentos, se baseia no fato de que as altas sobrepressões produzidas por uma explosão muitas vezes ultrapassam as resistências dos materiais utilizados nas estruturas, o que dificulta análises mais detalhadas desta interação, Zukas apud Black (2006).

Nos tópicos a seguir serão abordadas as particularidades do Ansys Autodyn® (2014), assim como os modelos simulados e a metodologia para a implementação destes.

## 4.2 – O AUTODYN

O Ansys Autodyn ® (2014) do pacote Ansys Workbench é uma ferramenta de análise explícita desenvolvida especificamente para lidar com problemas dinâmicos não lineares como a modelagem de penetração, impacto e explosões.

No programa, um conjunto de processadores numéricos está disponível e podem ser aplicados para modelar diferentes regiões de um mesmo problema, Birnbaum et al. (1996). Esses processadores possuem diferenças entre si, de modo que nenhum deles, isoladamente, pode lidar com toda a complexidade de um evento envolvendo a interação de uma explosão com uma estrutura de forma eficiente. Desse modo, para que a modelagem se dê de forma ideal cabe ao usuário a aplicação adequada desses processadores. Dos processadores disponíveis podem se citar, segundo Fairlie (1998):

- O processador Lagrange: é indicado para modelagem de sólidos, nele a malha se distorce junto com o material. Em simulações convencionais, este processador apresenta a vantagem de ser computacionalmente mais rápido que o processador Euler e apresentar uma boa definição da interface do material.
- O processador Euler: é indicado para análise de fluidos ou de sólidos submetidos a grandes deformações, nele a malha é fixa e o material flui através dela. Comparado com o processador de Lagrange, Euler é mais custoso computacionalmente. Apesar de aplicado com sucesso para modelar o meio em que a explosão ocorre, o desempenho do processador Euler para a simulação de sólidos não é muito adequado. Esteban e Gebbeken (2016) observaram um comportamento “não-físico” em suas simulações quando discretizaram um sólido por Euler, o concreto sob tensão parecia “dissolver-se”. Análises mais detalhadas sobre as técnicas de modelagem serão apresentadas em tópicos posteriores.
- O processador ALE ou “Arbitrary Lagrange Euler” permite uma combinação automática das técnicas de Euler e Lagrange. Sua utilização supera algumas limitações de Euler e Lagrange quando utilizados isoladamente, entretanto, pode ser custoso computacionalmente uma vez que realiza um rezoneamento das malhas distorcidas.
- A Hidrodinâmica Suave de Partículas ou SPH (“Smooth Particle Hydrodynamics”) é um processador que não demanda a utilização de malha, sendo usado geralmente na modelagem de materiais frágeis para uma melhor captação das trincas Arild (2005). Esteban e Gebbeken (2016) observaram que este processador requer menos tempo de

processamento que os demais para solução de um mesmo problema. A ausência de malha elimina a necessidade de algoritmos de erosão, assunto que será apresentado posteriormente.

O Autodyn também permite simulações envolvendo elementos do tipo SHELL e BEAM.

#### 4.2.1 – Discretizando um problema no Autodyn

Com relação à criação dos elementos, Autodyn pode importar modelos de outras plataformas ou gerar seus próprios modelos a partir de geometrias simplificadas em 2D e 3D.

Nos hidrocódigos, a resposta do contínuo é descrita a partir de um conjunto de equações diferenciais baseadas nos princípios de conservação de massa, movimento e energia. Neste contexto, é necessária, para cada material empregado, uma equação de estado que relaciona a massa específica e a energia interna com a pressão, e um modelo constitutivo que, basicamente, relaciona a tensão no material com a distorção deste, Anderson (1987).

Por conta disso, no software, após a implementação da geometria é necessário a atribuição de um material a ela. O Autodyn possui um grande banco de dados com diferentes materiais e suas propriedades, mas também é possível definir um novo material, Black (2006). A descrição do material no Autodyn geralmente requer a determinação de quatro informações específicas, segundo Mohamed et al. (2009): as equações de estado, o modelo de resistência do material, o modelo de falha do material e o modelo de erosão.

As descrições de Euler e Lagrange, que tratam das equações de conservação de massa, movimento e energia, são as duas descrições fundamentais para a análise da deformação cinética de um meio contínuo, Anderson (1987). As equações 4.1, 4.2 e 4.3 relacionam as equações de conservação de massa, movimento e energia, respectivamente, segundo a descrição Euleriana, Abdelalim (2013).

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

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

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

Em que  $u_c$  é a velocidade,  $t$  é o tempo,  $\rho$  é a massa específica,  $E$  é a energia total por unidade de volume,  $P$  a pressão e  $\nabla$  é o Gradiente. Na descrição Euleriana as células do modelo ficam fixas ao longo do tempo, massa, movimento e energia fluem através das células e a avaliação das quantidades entrando e saindo da célula é utilizada para a determinação dos novos valores de massa, pressão, velocidade, etc., Anderson (1987).

As equações 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam, respectivamente, as equações de conservação de massa, movimento e energia a partir da descrição Lagrangeana. Nesta notação observa-se o uso da derivada material ou derivada Lagrangeana.

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

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

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

Em que  $v$  é velocidade e  $e_i$  a energia interna por massa de fluido. Na descrição Lagrangeana a malha se deforma e move-se junto com o material. Por conta disso, a forma da célula pode sofrer alterações devido às expansões e à contração do material, como consequência, nas simulações nas quais se utiliza esta técnica é recomendado o uso de modelos de erosão.

#### **4.2.2 – Modelando materiais no Autodyn**

Como apresentado no tópico anterior, a definição de um material no Autodyn está vinculada à definição de quatro propriedades: as equações de estado, o modelo de resistência do material, o modelo de falha do material e o modelo de erosão.

Apesar do banco de dados do programa possuir configurações habilitando previamente alguns modelos nos materiais, é possível ao usuário alterá-las ou mesmo desativar algumas delas como, por exemplo, os modelos de erosão que em algumas simulações podem ser desconsiderados.

As equações de estado (EOS) caracterizam o estado do material, considerando os efeitos de mudança de massa específica e processos termodinâmicos. Nelas, é definida a pressão como função da massa específica e da energia interna.

Os modelos de resistência devem ser utilizados nos hidrocódigos quando os efeitos de resistência do material simulado não podem ser ignorados. Estes modelos definem os critérios de escoamento, tendo as relações que englobam os regimes elástico e plástico de um material.

Os modelos de falha se aplicam aos materiais que já atingiram seu nível de tensão limite, esses modelos alteram a forma como o material passa a ser tratado, descrevendo as propriedades deste quando o mesmo não apresenta mais resistência.

Os modelos de erosão são aplicados para administrar as grandes distorções apresentadas pelos elementos Lagrangeanos. A função erosão não representa uma propriedade material ou fenômeno físico, ela é um recurso numérico utilizado para fornecer uma representação mais realística do dano de uma explosão de acordo com Luccioni e Araújo (2011), aplicando-se na remoção de células desnecessárias e altamente distorcidas que poderiam reduzir a velocidade de processamento segundo Abdelalim (2013). Em outras palavras, quando as células distorcidas de um elemento sólido atingem um certo valor crítico, elas são deletadas. Este processo é irreversível e as zonas de material deletado não estão mais aptas a oferecer resistência durante o resto da simulação, Xu e Lu (2006).

#### **4.2.3 – Materiais e modelos constitutivos**

Este tópico irá fornecer detalhes da caracterização numérica dos materiais utilizados nas simulações desenvolvidas neste trabalho.

Para o desenvolvimento das simulações foi necessária a utilização dos materiais ar, TNT, C4, concreto, aço, alumínio, areia, poliuretano, fibra de vidro, kevlar, epoxy e neoprene. Estes materiais podem ser encontrados na biblioteca do software utilizado.

O comportamento do ar nas simulações foi representado através da equação de estado de gás ideal, Equação 4.7.

$$P = (\gamma - 1)\rho e + P_{shift} \quad (4.7)$$

Na equação anterior,  $\gamma$  é o coeficiente de expansão adiabática,  $\rho$  é a massa específica do ar,  $e$  representa a energia interna do ar e  $P_{shift}$  é uma pressão inicial.

A equação de estado empregada para descrever a expansão dos produtos de detonação do TNT e do C4 é a JWL que foi desenvolvida por Jones, Wilkins e Lee, Dobratz (1972). Esta equação é a mais utilizada no estudo das explosões e abrange o processo de combustão e de geração dos produtos de detonação. Esta formulação é apresentada na Equação 4.8.

$$P_h = C_1 \cdot \left(1 - \frac{\omega_{co}}{R_1 V_e}\right) e^{-R_1 V_e} + C_2 \cdot \left(1 - \frac{\omega_{co}}{R_2 V_e}\right) e^{-R_2 V_e} + \frac{\omega_{co} E_i}{v_e} \quad (4.8)$$

Em que  $P_h$  é a pressão hidrostática,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  e  $\omega_{co}$  são constantes obtidas empiricamente que dependem do tipo de explosivo utilizado.  $V_e$  é a razão entre o volume específico do produto de detonação e o volume específico do explosivo não detonado.  $E_i$  é a energia interna específica.

A equação de estado P-alpha, Herrmann (1969), em conjunto com o modelo RHT, que define os modelos de resistência e falha, foram utilizados para modelagem do concreto. Esta equação de estado fornece uma boa representação do comportamento de materiais porosos submetidos a grandes tensões além de descrever com boa precisão o fenômeno de compactação.

Um material poroso começa a se deformar plasticamente quando submetido a um determinado nível de pressão hidrostática, com isso, há uma mudança em sua massa específica e, durante esse processo, uma certa quantidade de energia é absorvida, por conta disso é necessária uma equação de estado que englobe este fenômeno, Gebbeken e Hartmann (2010). A equação de estado para um material totalmente compactado ou sólido é mostrada na Equação 4.9 (para  $p \geq 0$ ) e na Equação 4.10 (para  $p < 0$ ), Luccioni et al. (2013).

$$p = A_1 \mu_a + A_2 \mu_a^2 + A_3 \mu_a^3 + (B_0 + B_1 \mu_a) \rho_0 e \quad (4.9)$$

$$p = T_1 \mu_a + T_2 \mu_a^2 + B_0 \rho_0 e \quad (4.10)$$

Na Equação 4.9 e na Equação 4.10  $p$  é a pressão,  $\rho_0$  é a massa específica inicial,  $\mu_a$  é a alteração de volume relativo definido na Equação 4.11, e é a energia interna e  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $T_1$  e  $T_2$  são coeficientes definidos para o material analisado.

$$\mu_a = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (4.11)$$

Para materiais porosos, a equação de estado é definida pela Equação 4.12 (para  $p \geq 0$ ):

$$p = A_1 \bar{\mu} + A_2 \bar{\mu}^2 + A_3 \bar{\mu}^3 + (B_0 + B_1 \bar{\mu}) \rho_0 e \quad (4.12)$$

Na equação anterior a alteração relativa de volume é dada pela Eq.4.13:

$$\bar{\mu} = \alpha \frac{\rho_p}{\rho_0} - 1 \quad (4.13)$$

Em que  $\alpha$  é a porosidade que é definida pela razão entre a massa específica do sólido ( $\rho_s$ ) sobre a massa específica do material poroso ( $\rho_p$ ) na mesma pressão e temperatura, Luccioni et al. (2013).

O modelo RHT empregado para definir a resistência e a falha do concreto é vastamente aplicado na modelagem de materiais frágeis submetidos a cargas altamente impulsivas, como aquelas advindas de impacto ou penetração, Tu e Lu (2010). A aplicação deste modelo se estende a materiais rochosos e cerâmicos.

O modelo RHT engloba efeitos de endurecimento por deformação plástica, por pressão e considera a dependência com o terceiro invariante, Brannon e Leelavanichkul (2009). Esse modelo também incorpora uma superfície independente de resistência à fratura para modelagem mais precisa do relaxamento do material (*softening response*), Tu e Lu (2009). A superfície de falha  $Y_{falha}$  pode ser definida segundo a Equação 4.14, em que  $Y_c$  representa o meridiano de compressão, Equação 4.15.

$$Y_{falha}(p', \theta_r, \dot{\epsilon}) = Y_c(p')R_3(\theta_r)F_{rate}(\dot{\epsilon}) \quad (4.14)$$

$$Y_c(p') = f_c \left[ A(p' - p'_{spall} F_{rate}(\dot{\epsilon}))^{N_{falha}} \right] \quad (4.15)$$

Nas expressões anteriores  $f_c$  representa a resistência à compressão uniaxial do material,  $A$  e  $N_{falha}$  são constantes do material,  $p'$  é a razão entre pressão hidrostática ( $p_h$ ) e a resistência a compressão uniaxial ( $f_c$ ),  $p'_{spall}$  é a razão entre resistência a tração uniaxial ( $f_t$ ) e resistência a compressão uniaxial ( $f_c$ ),  $F_{rate}(\dot{\epsilon})$  é o fator de amplificação dinâmica em função da taxa de deformação (Equação 4.16) e  $R_3(\theta_r)$ , definido pela Equação 4.17, serve para ajustar as tensões fora do meridiano de compressão, de modo a representar a redução na resistência do concreto a tensão triaxial, quando comparada a uma compressão triaxial, por exemplo.

$$F_{rate}(\dot{\epsilon}) = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^{\alpha_c} & \text{para } p_h > \frac{f_c}{3} \\ \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^{\delta_c} & \text{para } p_h < \frac{f_t}{3} \end{cases} \quad (4.16)$$

Na equação anterior,  $\alpha_c$  é o fator relacionado à taxa de deformação na tração,  $\delta_c$  é o fator relacionado à taxa de deformação na compressão e  $\dot{\epsilon}_0$  é uma constante relacionada com o tipo de tensão sendo aplicada.

$$R_3(\theta_r) = \frac{2(1 - Q_2^2)\cos\theta_r + (2Q_2 - 1)[4(1 - Q_2^2)\cos^2\theta_r + 5Q_2^2 - 4Q_2]^{1/2}}{4(1 - Q_2^2)\cos^2\theta_r + (1 - 2Q_2)^2} \quad (4.17)$$

O parâmetro  $Q_2$ , utilizado na Equação 4.17, é dependente da pressão e pode apresentar valores entre 0,5 e 1, Hansson (2011). O parâmetro  $Q_2$  determina a superfície de falha no plano desviador como mostra a Figura 4.1.

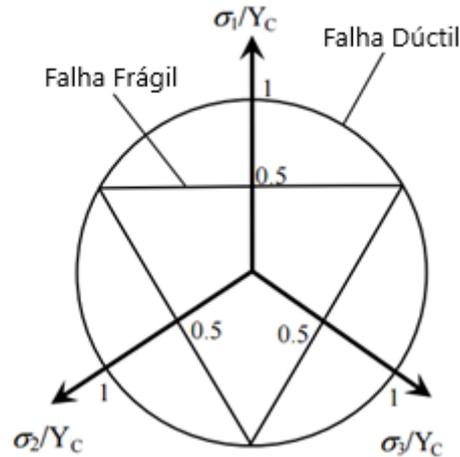


Figura 4.1 –Superfície de falha no plano desviador, Hansson (2011).

Em fenômenos envolvendo explosões ou outros tipos de carregamentos intensos, é importante destacar a capacidade do modelo RHT em relação ao relaxamento do concreto (strain softening), pois considera a redução da capacidade de carga do concreto ao passo que o elemento começa a apresentar falhas. Quando a falha no concreto tem início, o relaxamento é representado através de uma superfície de fratura ( $Y_{fratura}$ ) obtida através da interpolação linear das superfícies de falha ( $Y_{falha}$ ) e da superfície de resistência residual ( $Y_{residual}$ ) havendo a incorporação de um parâmetro de dano ( $D$ ) que é relativo ao material e é dependente da pressão, de fatores de forma e da deformação mínima de falha ( $\epsilon_{fmin}$ ), Hu et al. (2016).

Para a definição do aço foi adotada uma equação de estado linear, como a utilizada no trabalho de Abdelalim (2013) e Nyström e Gylltoft (2009). Esta equação de estado é baseada na lei de Hooke, envolvendo o módulo volumétrico ( $k$ ) como mostrado na Equação 4.18.

$$P = k \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \quad (4.18)$$

Combinado com o módulo cisalhante, esta definição do material é equivalente ao uso da elasticidade linear.

A equação de resistência Johnson-Cook foi utilizada para descrever o comportamento do aço. Este modelo é largamente utilizado para representar materiais submetidos a grandes deformações e taxa de deformação, bem como altas temperaturas, Showichen (2008). No modelo de Johnson-Cook a tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ) é dada pela Equação 4.19, Westerling (2004).

$$\sigma_e = (A_{jc} + B_{jc} \epsilon_p^{n_{jc}}) (1 + C_{jc} \ln(\dot{\epsilon}_p^*)) (1 - T_H^{m_{jc}}) \quad (4.19)$$

Na qual  $\varepsilon_p$  é a deformação plástica,  $\dot{\varepsilon}_p^*$  é a taxa de deformação plástica e  $T_h$  é uma função linear da temperatura, escalonada de modo ser 0 na temperatura ambiente e 1 no ponto de fusão.  $A_{jc}$ ,  $B_{jc}$ ,  $n_{jc}$ ,  $C_{jc}$  e  $m_{jc}$  são parâmetros do material.

Para descrição do comportamento do alumínio 7075-T6, epoxy e do neoprene foi utilizada a equação de estado de choque (*shock EOS*) na forma de Mie-Grüneisen. No caso do alumínio, esta equação ainda foi associada à equação de Steinberg-Guinan para definição da resistência.

A equação de choque baseia-se na equação de estado de Rankine-Hugoniot. As definições de Rankine-Hugoniot para a equação de choque podem ser atendidas desde que relacionadas a um par de variáveis como massa específica, velocidade do choque, pressão, energia e velocidade da partícula, Autodyn (2014). Baseado nisso, a Equação 4.20 apresenta uma relação empírica linear para a obtenção da velocidade do choque, Luccioni e Ambrosini (2008). A equação de choque também pode ser escrita na forma de Mie-Grüneisen (Equação 4.21), Hub e Kneys (2013), convenientemente aplicada na análise de sólidos e líquidos.

$$U = C_o + su_p \quad (4.20)$$

Em que  $U$  é a velocidade da onda,  $C_o$  é a velocidade do som,  $u_p$  é velocidade material e  $s$  é um parâmetro do material definido experimentalmente.

$$p_h = p_u + \Gamma \rho (e - e_u) \quad (4.21)$$

Em que  $p_h$  é a pressão hidrostática,  $p_u$  é a pressão Hugoniot,  $e$  é energia interna,  $e_u$  é a energia Hugoniot,  $\rho$  é a massa específica e  $\Gamma$  é o coeficiente de Grüneisen ou Gamma de Grüneisen.

O modelo de resistência adotado é o de Steinberg-Guinan, utilizado para caracterização de metais submetidos a elevadas taxas de deformação, considerando o incremento na tensão de escoamento e no módulo de cisalhamento devido a acréscimos na pressão e o decréscimo destes com o aumento da temperatura, Steinberg et. al. (1980). Este modelo define a tensão de escoamento ( $\sigma_m$ ) e o módulo de cisalhamento ( $G_m$ ) como funções da pressão, temperatura e deformação plástica equivalente, Pierazzo et al. (2008).

A tensão de escoamento e o módulo de cisalhamento segundo Steinberg-Guinan são definidas pelas equações 4.22 e 4.23, respectivamente, atendendo à condição apresentada na Equação 4.24.

$$\sigma_m = \sigma_0 [1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_i)]^{n_e} \left[ 1 + \frac{\sigma_m' P}{\sigma_0} \frac{P}{\eta^{\frac{1}{3}}} + \frac{G_m' T}{G_0} (T - 300) \right] \quad (4.22)$$

$$G_m = G_0 \left[ 1 + \frac{G_m' P}{G_0} \frac{P}{\eta^{\frac{1}{3}}} + \frac{G_m' T}{G_0} (T - 300) \right] \quad (4.23)$$

$$\sigma_0 [1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_i)]^{n_e} \leq \sigma_{máx} \quad (4.24)$$

Em que  $\sigma_0$  tensão de escoamento do material,  $\beta$  e  $n_e$  são coeficientes de endurecimento do material devido a deformação plástica,  $\varepsilon_i$  é a deformação plástica inicial (normalmente igual a 0),  $\eta$  é compressão definida pela razão entre o volume específico inicial e o volume específico,  $P$  é a pressão e  $G_0$  módulo de cisalhamento. O índice “o” relaciona o material as condições padrão em que a temperatura ( $T$ ) é de 300 K, a pressão  $P$  é igual a 0 e a deformação ( $\varepsilon$ ) é nula. As aspas simbolizam derivadas com relação aos parâmetros indicados nos índices, pressão ( $P$ ) ou temperatura ( $T$ ).

Para a modelagem da areia utilizou-se a equação de estado de compactação associada com o modelo MO granular para modelagem da resistência, metodologia de caracterização similar adotada por Luccioni e Ambrosini (2008) e Tejaswi e Ramesh (2015).

Na equação de estado de compactação, a compactação plástica do material poroso é dada através de uma função linear da pressão pela massa específica enquanto que os ciclos de elásticos são determinados a partir função da velocidade do som pela massa específica. A Equação 4.25 mostra a determinação da rigidez volumétrica do material, Autodyn (2014), o nível de compactação ou porosidade é mostrado na equação 4.26 e a Equação 4.27 descreve a pressão em função da massa específica do material na compactação plástica.

$$k = \rho_0 c_0^2 \quad (4.25)$$

$$\alpha = \frac{\rho_s}{\rho_0} \quad (4.26)$$

$$P = c_s^2 (\rho - \rho_s) \quad (4.27)$$

Em que  $\rho_0$  é a massa específica inicial do material,  $\rho_s$  é a massa específica do material totalmente compactado,  $P$  é a pressão,  $c_0$  a velocidade do som no material no estado inicial e  $c_s$  a velocidade do som no material compactado.

Observa-se que os valores de porosidade em materiais porosos serão sempre maiores que 1, visto que a massa específica inicial ( $\rho_0$ ) nesses materiais é inferior à massa específica desses quando totalmente compactados ( $\rho_s$ ). É importante salientar que o conceito de porosidade também foi utilizado na descrição do comportamento do concreto.

O modelo MO granular é uma extensão do modelo Drucker-Prager que leva em consideração efeitos associados a materiais granulares na determinação da falha, já que, devido ao efeito de compactação, o modelo considera os efeitos de massa específica e as variações do módulo de cisalhamento, em adição ao incremento de resistência pela pressão. A Equação 4.28 apresenta o modelo em que a tensão de escoamento total ( $\sigma_{total}$ ) é definida a partir da tensão de escoamento devido à pressão ( $\sigma_p$ ) acrescida da tensão de escoamento devida à massa específica ( $\sigma_\rho$ ).

$$\sigma_{total} = \sigma_p + \sigma_\rho \quad (4.28)$$

Na modelagem dos materiais fibra de vidro e kevlar foi empregada a equação de estado Ortho, enquanto para o poliuretano foi utilizada a equação de estado linear, a mesma utilizada para o aço. O modelo de resistência destes materiais foi definido como elástico.

A escolha da equação de estado Ortho está vinculada ao comportamento ortotrópico destes materiais, ou seja, o material pode apresentar propriedades com valores diferenciados dependendo a direção analisada. Por conta disso, de modo manter uma maior representatividade do modelo numérico com a situação real, é muito importante considerar esta condição.

Algumas pesquisas, como as desenvolvidas por Khan et al. (2018), Ansari e Chakrabarti (2016), Grujicic et al. (2009), Ramadhan et al. (2012), Kavitha et al. (2015), Nagao et al. (2007) e Riedel et al. (2006) trabalharam com compósitos similares utilizando ferramentas numéricas como o Autodyn.

A relação constitutiva clássica, na forma incremental, para a definição de um material linear elástico ortotrópico é mostrada na Equação 4.29, Ansys Autodyn ® (2014):

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_{11} \\ \Delta\sigma_{22} \\ \Delta\sigma_{33} \\ \Delta\sigma_{23} \\ \Delta\sigma_{31} \\ \Delta\sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{11} \\ \Delta\varepsilon_{22} \\ \Delta\varepsilon_{33} \\ \Delta\varepsilon_{23} \\ \Delta\varepsilon_{31} \\ \Delta\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Em que  $\Delta\sigma_{ij}$  são incrementos na componente de tensão,  $C_{ij}$  são os coeficientes elásticos e os  $\Delta\varepsilon_{ij}$  incrementos na componente de deformação.

Efeitos não lineares como efeitos de choque, por exemplo, podem estar agindo sobre o material analisado, dessa forma para se considerar adequadamente estes efeitos, é desejável separar a resposta volumétrica (termodinâmica) daquela referente às cargas cisalhantes (resistência).

O próprio software realiza este procedimento que consiste em dividir os incrementos de deformação em uma componente média,  $\Delta\varepsilon_{med}$ , e em uma deviatoria,  $\Delta\varepsilon_{ij}^d$ . As equações (4.30), (4.31) e (4.32) apresentam estas componentes, Ansari e Chakrabarti (2016).

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Delta\varepsilon_{ij}^d + \Delta\varepsilon_{med} \quad (4.30)$$

$$\Delta\varepsilon_{med} = \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \quad (4.31)$$

$$\Delta\varepsilon_{vol} \approx (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \quad (4.32)$$

#### 4.2.4 – Critérios de erosão

Os critérios de erosão são técnicas numéricas utilizadas para administrar as grandes distorções apresentadas pelos elementos Lagrangeanos. Neste trabalho, foram adotados critérios de erosão em alguns modelos desenvolvidos, os critérios utilizados foram os de deformação geométrica instantânea efetiva (DGI) e o critério de falha (CF).

O critério de deformação geométrica instantânea efetiva é um critério de erosão representado por um limite na deformação efetiva. A deformação geométrica instantânea efetiva ( $\varepsilon_{inst}$ ) é definida em dependência com as componentes do tensor deformação ( $\varepsilon_{ij}$ ), como o apresentado na Equação 4.33.

Para o critério de deformação geométrica efetiva, a biblioteca do Autodyn apresenta que os valores típicos para limite de erosão estão entre 0,5 e 2,0, sendo recomendado o valor de 1,5 para maioria dos casos.

$$\varepsilon_{inst} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{22}^2 + \varepsilon_{33}^2) + 5(\varepsilon_{11}\varepsilon_{22} + \varepsilon_{22}\varepsilon_{33} + \varepsilon_{33}\varepsilon_{11}) - 3(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)} \quad (4.33)$$

Os critérios de erosão baseados em deformação, como o modelo de deformação geométrica instantânea efetiva, são os mais utilizados dentre os disponíveis no software. Sua aplicação é observada em diversos trabalhos como os de Luccioni e Ambrosini (2008), Silva et al. (2003), Tawadrous et al. (2014), Nyström e Gylltoft (2009, 2011) e Esteban e Gebbeken (2016).

O critério de erosão baseado em falha é outro critério de erosão presente no Autodyn, porém pouco utilizado. Por conta das escassas informações sobre ele optou-se por utilizá-lo visando uma análise de sua aplicabilidade. Com este critério, as células de material que falham são automaticamente erodidas.

#### **4.2.5 – Representação dos níveis de dano**

Nas simulações realizadas neste trabalho foi utilizado um recurso importante do Autodyn que permite a visualização das zonas de dano e os níveis de degradação dos materiais. Visualmente, para a identificação do nível de dano nos modelos, tem-se uma escala de cores em que vermelho representa a falha completa e azul o material íntegro

A variável dano é definida a partir dos modelos de falha empregados, com ela o software permite a geração e visualização das zonas danificadas do modelo numérico em uma escala em que 0 representa o material íntegro e 1 a falha completa.

A variável dano usualmente é obtida pela normalização da deformação plástica efetiva em relação à deformação de fratura efetiva.

## **5 – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

### **5.1 - INTRODUÇÃO**

As simulações numéricas desenvolvidas neste trabalho foram elaboradas de modo a contemplar os objetivos previamente estipulados. Algumas delas tiveram como base, para sua concepção, experimentos realizados por outros autores. Dessa forma, foi possível fazer algumas análises paramétricas e, com esses resultados, efetuar avanços lógicos no entendimento dos mecanismos de dano fundamentais em eventos envolvendo explosões.

As simulações deste trabalho foram organizadas em cinco grupos distintos.

### **5.2 – PRIMEIRO GRUPO DE SIMULAÇÕES: AVALIAÇÃO DE UM ELEMENTO TUBULAR DE AÇO PREENCHIDO POR CONCRETO SUBMETIDO A UMA EXPLOSÃO PRÓXIMA**

O primeiro grupo de simulações foi desenvolvido com base no trabalho experimental e numérico de Remennikov e Uy (2014) e trata da avaliação de um perfil tubular de aço preenchido por concreto submetido a uma detonação próxima.

O objetivo desta análise inicial é verificar a precisão dos resultados numéricos na simulação de um experimento real, de certa complexidade, que compreende a combinação de diferentes materiais, definição das regiões de contato entre eles, duração da simulação e proximidade com a explosão, além de verificar o desempenho do hardware em simulações longas.

#### **5.2.1 – Modelo experimental**

Remennikov e Uy (2014) avaliaram vigas tubulares de aço preenchidas por concreto e submetidas a explosões próximas. Em conjunto com a abordagem experimental, os autores buscaram desenvolver um modelo de um grau de liberdade para efetuar uma predição da resposta estrutural, além de uma modelagem numérica através do software LS-Dyna®.

A viga utilizada nos experimentos tem um vão livre de 2000 mm e a altura com relação ao solo é de 250 mm. A seção tubular de aço possui largura de 100 mm por 5 mm de espessura. Blocos de concreto foram utilizados nos apoios para prover uma maior inércia ao modelo, imersos em cada bloco, dois perfis de aço dobrado com 6 mm de espessura, 200 mm de alma e 75 mm mesa definem os apoios do elemento.

A tensão de escoamento para o aço foi definida laboratorialmente pelos autores e possui valor de 424 MPa. De forma similar, foi definida a resistência à compressão do concreto com o valor 46 MPa.

A carga de TNT utilizada foi de 2,61 kg distribuída na forma de um cubo de 120 mm de lado. A distância em escala adotada foi de  $0,15 \text{ m/kg}^{1/3}$  e o ponto de detonação deste explosivo situa-se no centro da face superior do cubo. Com relação à estrutura, o explosivo está posicionado sobre a porção central do vão da viga.

### 5.2.2 – Modelo numérico no Autodyn

Para o desenvolvimento do modelo numérico no Autodyn foi utilizada uma malha de 10 mm, mesma dimensão da malha usada por Remennikov e Uy (2014) em suas simulações pelo LS-Dyna ®. Os sólidos da simulação foram modelados através de elementos de volume Lagrangeanos. É importante salientar que para a modelagem da explosão foi utilizada a técnica de remapeamento, em que o refinamento de malha utilizado foi de 1 mm.

A Figura 5.1 apresenta um esquema da viga utilizada no trabalho de Remennikov e Uy (2014) (a) e o modelo numérico desenvolvido no Ansys Autodyn ® para este primeiro grupo de simulações (b).

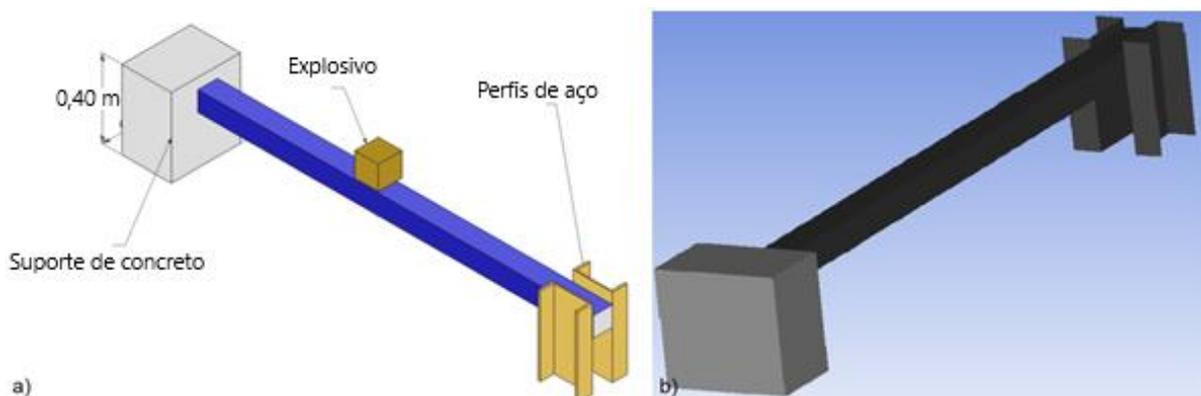


Figura 5.1 –Esquema do experimento desenvolvido por Remennikov e Uy (2014) (a) e modelo numérico no Autodyn (b).

Foi necessária a modelagem do ar para a simulação do ambiente da explosão utilizando elementos de volume Eulerianos, e empregando a condição de contorno *flowout* nas fronteiras do elemento de ar de modo a evitar reflexões de onda. O volume de ar considerado em torno da viga possui dimensões de 2700 mm de comprimento, 600 mm de altura e 600 mm de largura, estas dimensões foram suficientes para englobar todo modelo. Foi habilitada a interação Euler/Lagrange para contemplar a interação entre o sólido e o fluido.

As placas utilizadas nos perfis de aço foram modeladas através de elementos tipo SHELL, seu uso foi embasado no ganho em tempo de processamento e na melhor representação da deformação do elemento, já que elementos sólidos poderiam prover um comportamento mais rígido à flexão, Troup et al. (1998) e Showichen (2008).

Para simular uma superfície rígida de solo foi implementada uma placa rígida de um material arbitrário na base dos apoios, as condições de contorno aplicadas nesta placa restringiam a movimentação em todos os eixos.

### 5.2.3 – Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais utilizados neste grupo de simulações são mostradas nas tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

Tabela 5.1 - Propriedades do ar

Ar	
Massa específica	0,001225 g/cm <sup>3</sup>
Equação de Estado	Gás ideal
$\gamma$	1,4
Temperatura de referência	288,2 K
Calor específico	717,599976 J/kgK

Tabela 5.2 - Propriedades do TNT

TNT	
Massa específica	1,63 g/cm <sup>3</sup>
Equação de Estado	JWL
C1	3,7377.10 <sup>8</sup> kPa
C2	3,7471.10 <sup>6</sup> kPa
R1	4,15
R2	0,90
$\omega_{co}$	0,35
Velocidade de detonação	6,93.10 <sup>3</sup> m/s
Energia	6,00.10 <sup>6</sup> kJ/m <sup>3</sup>

Tabela 5.3 - Propriedades do Concreto

Concreto	
Massa específica	2,50 g/cm <sup>3</sup>
Equação de Estado	P alpha
Modelo de Resistência	Concreto RHT
Modelo de Falha	Concreto RHT
Massa específica porosa	2,31 g/cm <sup>3</sup>
Pressão de compactação inicial	2,33 10 <sup>4</sup> kPa
Pressão de compactação sólido	6,00 10 <sup>6</sup> kPa
Expoente de compactação	3
Parâmetro A1	3,53 10 <sup>7</sup> kPa
Parâmetro A2	3,96 10 <sup>7</sup> kPa
Parâmetro A3	9.04 10 <sup>6</sup> kPa
Parâmetro B0	1,22
Parâmetro B1	1,22
Parâmetro T1	3,53 10 <sup>7</sup> kPa
Parâmetro T2	0,00 kPa
Módulo de cisalhamento	1,80 10 <sup>7</sup> kPa
Resistência à compressão	4,6 10 <sup>4</sup> kPa
Resistência à tração (normalizada)	0,10
Resistência ao cisalhamento (normalizado)	0,18
Tens/Comp Meridiano Q	6,805 10 <sup>-1</sup>
Transição Frágil - Dúctil	1,05 10 <sup>-2</sup>
Constante de dano D1	4,00 10 <sup>-2</sup>
Constante de dano D2	1.00
Deformação mínima para falha	1,00 10 <sup>-2</sup>

Tabela 5.4 - Propriedades do aço

Aço	
Massa específica	7,85 g/cm <sup>3</sup>
Equação de Estado	Linear
Modelo de Resistência	Johnson-Cook
Módulo volumétrico	1,5.10 <sup>8</sup> kPa
Calor específico	477 J/kgK
Temperatura de referência	300 K
Módulo de Cisalhamento	8 10 <sup>7</sup> kPa
Tensão de escoamento	424 MPa
Coeficiente de relaxamento térmico	0

#### 5.2.4 – Resultados do primeiro grupo de simulações

Os resultados das simulações foram comparados com os de Remennikov e Uy (2014) em termos de deformação máxima da viga, o instante da máxima deformação e a deformação residual e a lateral. A Tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos desta análise com o uso do Autodyn em comparação com os do trabalho base.

Tabela 5.5 – Resultados do primeiro grupo de simulações

	Autodyn	Ls-Dyna Remennikov e Uy (2014)	SDOF Remennikov e Uy (2014)	Experimento Remennikov e Uy (2014)
Deformação máxima (mm)	175 mm	190 mm	175 mm	-
Tempo decorrido até a deformação máxima (ms)	12 ms	15 ms	12 ms	-
Deformação residual (mm)	156 mm	150 mm	151 mm	152 mm
Deformação lateral (mm)	152 mm	160 mm	-	158 mm

Com relação à deformação máxima entre os modelos, observa-se uma boa aproximação entre os resultados. Apesar de Remennikov e Uy (2014) terem utilizado outro software na elaboração de seu estudo numérico, as discrepâncias em relação ao trabalho destes autores foram inferiores a 10%. Infelizmente, devido à magnitude das pressões produzidas pela explosão no experimento, os autores não conseguiram coletar o valor de deformação máxima para comparação.

A Figura 5.2 apresenta os resultados do modelo numérico de Remennikov e Uy (2014) em comparação com o modelo desenvolvido no Autodyn. É importante salientar, que além dos diferentes softwares utilizados, houveram diferenças na concepção dos modelos numéricos, por exemplo, no modelo numérico de Remennikov e Uy (2014) não foram modelados os blocos de concreto nos apoios, sendo incluída a massa destes blocos nos perfis de aço utilizados nas extremidades do modelo, outra diferença importante é que os autores não simularam a explosão, ao invés disso estimaram um carregamento impulsivo. Talvez essas diferenças sejam responsáveis pelas pequenas discrepâncias entre os resultados.

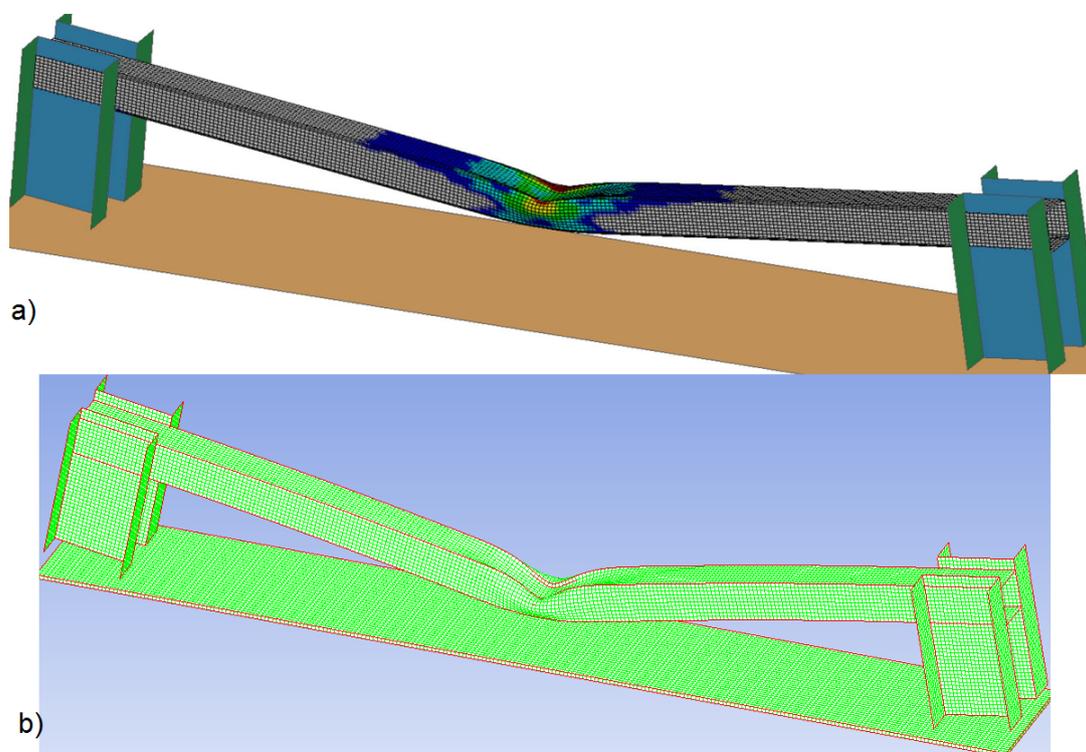


Figura 5.2 a) Resultado do modelo de Remennikov e Uy (2014); b) Resultado do modelo desenvolvido no Autodyn com os blocos de concreto ocultos.

Os resultados para deformação residual e deformação lateral apresentaram uma boa aproximação com os resultados do experimento, as diferenças foram inferiores a 5%. Isso, de certa forma, assegura a boa representatividade do modelo numérico com relação à física complexa do fenômeno real. A Figura 5.3 apresenta a deformação encontrada na análise experimental e nas simulações com o Autodyn.

As pequenas diferenças entre os resultados numéricos com os experimentais podem estar relacionadas com o tamanho da malha, uma vez que malhas mais refinadas descreveriam melhor a região do dano. Neste âmbito, é importante ressaltar que com a capacidade de processamento de um i5 de primeira geração com 4 GB de memória RAM o tempo necessário para efetuar esta simulação foi de quase 2 meses.

Outras razões que poderiam justificar a pequena diferença entre os resultados estariam relacionadas às técnicas de modelagem adotadas como, por exemplo, o amortecimento estático, que é um recurso numérico presente no Autodyn obtido a partir da relação do passo de tempo da simulação com o maior período de vibração do sistema analisado.

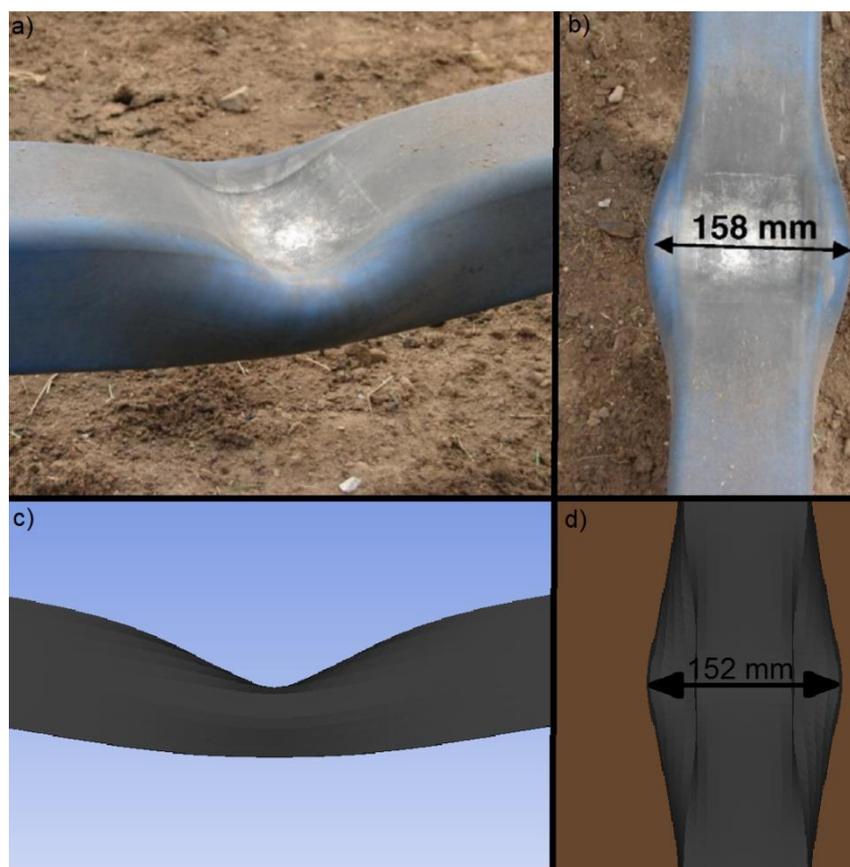


Figura 5.3 a) e b) deformação na viga causada pela explosão Remennikov e Uy (2014); c) e d) deformações apresentadas pela viga ao fim das simulações no Autodyn.

Dessa forma, conclui-se que a ferramenta numérica se mostrou adequada para representar corretamente uma situação complexa conseguindo reproduzir os efeitos da explosão e o comportamento do material. A partir desse grande potencial demonstrado, esta ferramenta foi empregada em todas as simulações desenvolvidas neste trabalho.

### **5.3 – SEGUNDO GRUPO DE SIMULAÇÕES: PERFURAÇÃO DE UMA PAREDE DE CONCRETO ARMADO POR EXPLOSIVO – AVALIAÇÃO DO CRITÉRIO DE EROSÃO.**

O segundo grupo de simulações foi destinado ao estudo dos modelos de erosão, tendo como base uma comparação qualitativa o trabalho numérico e experimental de Akers et al. (2005).

A necessidade do aprofundamento nos modelos de erosão, inicialmente, foi oriunda do grande custo computacional que o primeiro grupo de simulações apresentou já que a vantagem em ganho de tempo de processamento pela adoção adequada de modelos de erosão poderia ser útil nas simulações seguintes. Além disso, também houve a necessidade de se estudar qual a influência dos critérios de erosão nos resultados numéricos.

#### **5.3.1 – Modelo experimental**

Este grupo de simulações foi baseado no trabalho desenvolvido por Akers et al. (2005), em que uma parede de concreto armado foi submetida à ação de explosivos C4 em sua superfície. Estes autores também estudaram o problema numericamente.

Neste experimento foi detonada uma carga de C4 (0,57 kg) anexada no centro da superfície frontal de uma parede de concreto de dimensões 2400 mm de altura, 2400 de largura mm e 200 mm de comprimento.

Foi empregado reforço duplo na parede e a especificação do aço utilizado é No.4 ASTM A615 grade 60. O concreto utilizado na parede possui especificação SAM-35.

#### **5.3.2 – Modelo numérico no Autodyn**

No desenvolvimento do modelo numérico no Autodyn foram realizadas algumas considerações devido à ausência de certas informações específicas do trabalho base como, por exemplo, posicionamento exato das barras de armação, do cobrimento aplicado, além das propriedades físicas do concreto utilizado in loco durante o experimento.

Desse modo, foi adotado um cobrimento de 30 mm para as barras de aço cujo espaçamento é de 232 mm, eixo a eixo. O aço utilizado nos modelos tem 414 MPa de resistência ao escoamento e as barras da armação possuem 12,5 mm de diâmetro.

Um concreto de especificação SAM-35 foi utilizado nos experimentos. Williams et al. (2006) realizaram uma caracterização detalhada deste tipo de concreto, mostrando que a média de resistência para o SAM-35 é de 33,6 MPa. Considerando as incertezas quanto à resistência real

do concreto utilizado no experimento, nas simulações desenvolvidas no Autodyn foi adotado um concreto de 35 MPa, cujas propriedades constam na biblioteca do programa.

O explosivo empregado nos modelos possui especificação M112. Desta forma o bloco explosivo tem comprimento, largura e altura de 280 mm, 51 mm e 38 mm, respectivamente. O ponto de detonação é centrado em sua face externa.

A parede de concreto armado e os apoios foram modelados como elementos em malha Lagrangeana e o ar no entorno foi modelado com elementos de volume em malha Euleriana, para as barras da armação optou-se por uma modelagem com elementos BEAM. A Figura 5.4 ilustra o modelo desenvolvido no Autodyn e o ensaio desenvolvido por Akers et al. (2005). O movimento da parede de concreto é restringido por suportes de aço na parte superior e inferior desta, havendo, desta forma restrições ao movimento vertical e horizontal. Para critérios de simulação, os suportes foram considerados rígidos.

Os modelos foram desenvolvidos considerando uma malha de 10 mm e foi utilizada a técnica de remapeamento do explosivo em que o refinamento de malha foi de 1 mm. No Autodyn, malhas com esta dimensão já foram utilizadas por outros pesquisadores como, por exemplo, Luccioni et al. (2013).

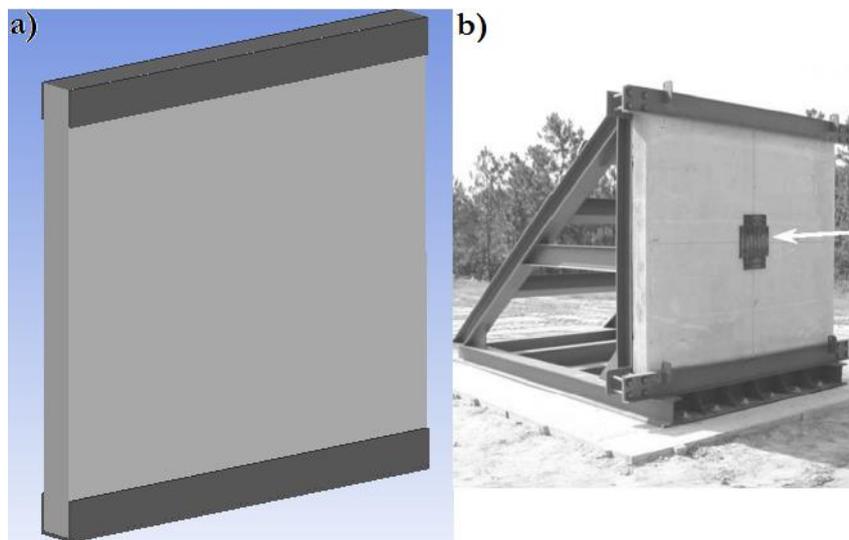


Figura 5.4 – Modelo numérico no Autodyn (a) e experimento desenvolvido por Akers et al. (2005) (b).

Para a simulação do ambiente da explosão foi necessária a modelagem do ar ao redor da estrutura englobando-a por inteiro. Foram usados elementos de volume Eulerianos, juntamente com a condição de contorno *flowout* nas fronteiras do elemento de ar de modo a evitar reflexões

de onda. O ar modelado ao redor da estrutura possui dimensões 2700 mm, 2700 mm e 260 mm, de altura, largura e comprimento, respectivamente. O modelo foi simulado com dupla simetria, sendo habilitada a interação Euler/Lagrange.

Os critérios de erosão avaliados foram os de deformação geométrica instantânea efetiva (DGI) e o modelo de erosão baseado na falha (CF), para isso foram desenvolvidas cinco simulações, sintetizadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Síntese dos modelos simulados

Modelo	Critério de Erosão	Limite de deformação de erosão
Primeiro modelo	DGI	0,1
Segundo modelo	DGI	0,5
Terceiro modelo	DGI	1,0
Quarto modelo	DGI	2,0
Quinto modelo	CF	-

### 5.3.3 – Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais utilizados neste grupo de simulações são mostradas nas tabelas 5.7, 5.8 e 5.9. É importante salientar que o material ar empregado nas simulações deste grupo foi o mesmo utilizado no grupo anterior.

Tabela 5.7 - Propriedades do explosivo C4

C4	
Massa específica	1,601 g/cm <sup>3</sup>
Equação de Estado	JWL
C1	6,0977.10 <sup>8</sup> kPa
C2	1,2950.10 <sup>7</sup> kPa
R1	4,50
R2	1,40
$\omega_{co}$	0,25
Velocidade de detonação	8,193.10 <sup>3</sup> m/s
Energia	9,000.10 <sup>6</sup> kJ/m <sup>3</sup>

Tabela 5.8 - Propriedades do aço

Aço	
Massa específica	7,85 g/cm <sup>3</sup>
Equação de Estado	Linear
Modelo de Resistência	Johnson-Cook
Módulo volumétrico	1,5.10 <sup>8</sup> kPa
Calor específico	477 J/kgK
Temperatura de referência	300 K
Módulo de Cisalhamento	8 ;10 <sup>7</sup> kPa
Tensão de escoamento	414 MPa
Coefficiente de relaxamento térmico	0

Tabela 5.9 - Propriedades do concreto

Concreto	
Massa específica	2,50 g/cm <sup>3</sup>
Equação de Estado	P alpha
Modelo de Resistência	Concreto RHT
Modelo de Falha	Concreto RHT
Massa específica porosa	2,31 g/cm <sup>3</sup>
Pressão de compactação inicial	2,33 .10 <sup>4</sup> kPa
Pressão de compactação sólido	6,00 .10 <sup>6</sup> kPa
Expoente de compactação	3
Parâmetro A1	3,53 .10 <sup>7</sup> kPa
Parâmetro A2	3,96 .10 <sup>7</sup> kPa
Parâmetro A3	9.04 .10 <sup>6</sup> kPa
Parâmetro B0	1,22
Parâmetro B1	1,22
Parâmetro T1	3,53 .10 <sup>7</sup> kPa
Parâmetro T2	0,00 kPa
Módulo de cisalhamento	1,67 .10 <sup>7</sup> kPa
Resistência à compressão	3,5 .10 <sup>4</sup> kPa
Resistência à tração (normalizada)	0,10
Resistência ao cisalhamento (normalizado)	0,18
Tens/Comp Meridiano Q	6,805 .10 <sup>-1</sup>
Transição Frágil - Dúctil	1,05 .10 <sup>-2</sup>
Constante de dano D1	4,00 .10 <sup>-2</sup>
Constante de dano D2	1.00
Deformação mínima para falha	1,00 .10 <sup>-2</sup>

### 5.3.4 – Resultados do segundo grupo de simulações

Os resultados obtidos através das simulações no Autodyn são apresentados na Tabela 5.10 juntamente com os de Akers et al. (2005).

A vista frontal da cratera produzida na parede de concreto e a seção da parede na região de simetria da cratera são mostradas nas figuras 5.5 e 5.6, respectivamente.

Tabela 5.10 – Diâmetro máximo dos furos produzidos pela explosão em cada modelo

	Critério de erosão	Diâmetro máximo aproximado	
		Cratera	Lascamento
Primeiro Modelo	DGI, Lim = 0,1	330 mm	530 mm
Segundo Modelo	DGI, Lim = 0,5	250 ms	490 mm
Terceiro Modelo	DGI, Lim = 1,0	230 mm	-
Quarto Modelo	DGI, Lim = 2,0	220 mm	-
Quinto Modelo	Critério de falha	380 mm	660 mm
Experimento, Akers et al. (2005)	-	203 mm	-

Os resultados obtidos numericamente mostraram uma aproximação razoável com os experimentais, exceto pelo quinto modelo que, apesar de ter demandado um menor tempo de processamento que os demais, apresentou resultados muito superestimados.

É possível observar que, no critério de deformação geométrica instantânea efetiva (DGI), pequenos limites de deformação de erosão tendem a superestimar as dimensões do furo produzido, isso pode ser reparado no primeiro e segundo modelos. Entretanto, estes modelos, principalmente o segundo, apresentaram uma boa aproximação com o dano real do experimento de Akers et al. (2005), conforme indica a Figura 5.5.

Na Figura 5.5 é utilizada uma escala de cores para representação do nível de dano no concreto, em que a cor azul representa o material íntegro e vermelho a falha completa. Esta mesma escala também foi utilizada em figuras posteriores.

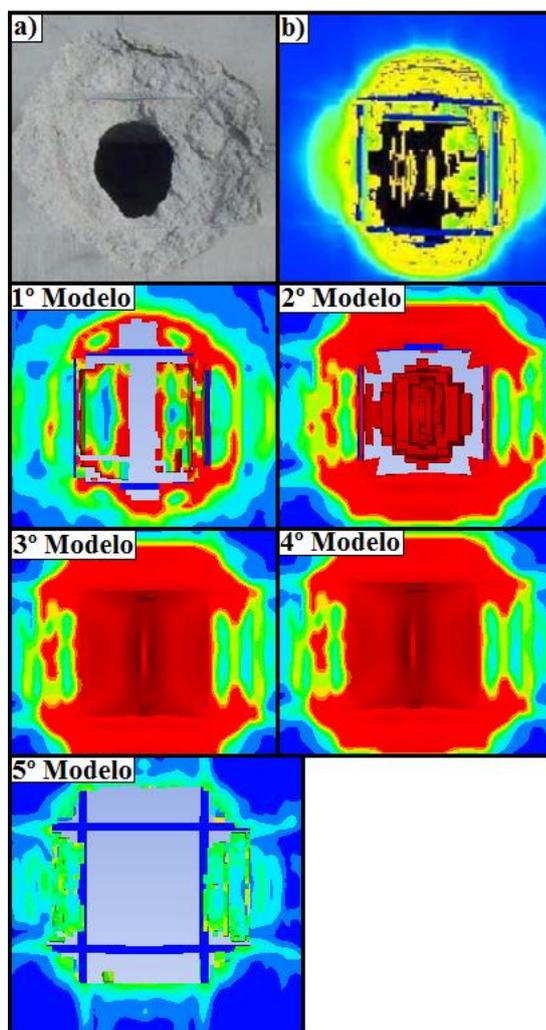


Figura 5.5 - Vista frontal do furo produzido na parede de concreto armado por uma explosão, em que a) e b) são o experimento desenvolvido por Akers et al. (2005).

O terceiro e quarto modelos apresentaram um concreto com um comportamento fisicamente improvável, extremamente plástico. Apesar da região da cratera possuir furo de dimensões similares ao do experimento, não foi possível observar um aspecto realístico na região de lascamento, tampouco a projeção de fragmentos de concreto ou a definição clara do furo, como apresentado na Figura 5.6.

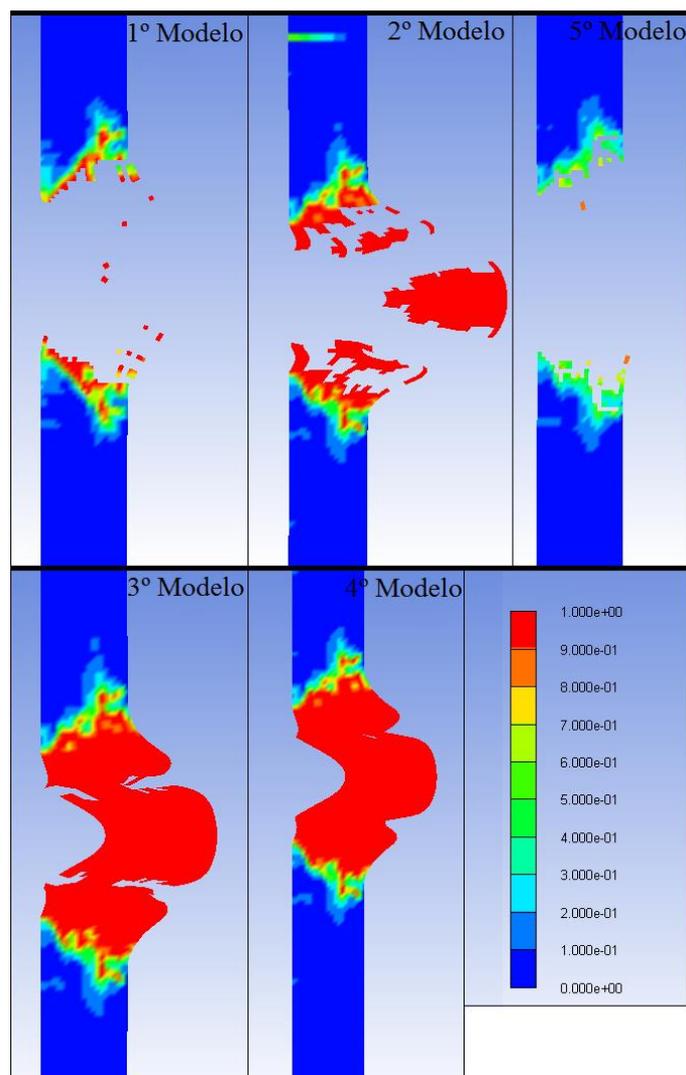


Figura 5.6 - Seção danificada da parede de concreto armado após a explosão para cada um dos modelos simulados.

Foi constatado que as células de concreto nas intermediações da armadura de aço falharam, isto teve influência nos resultados superestimando o dano causado pela explosão. Este tipo de fenômeno também foi observado por Luccioni et al. (2013). Baseado nisso, pode-se concluir que melhores resultados poderiam ser obtidos caso fosse aplicado um maior refinamento de malha ou implementando um modelo específico para modelagem da interação entre o concreto e a armadura.

Em todos os modelos, a integridade da armadura foi preservada. Assim como foi observado no experimento, o nível de dano nela foi desprezível.

Os gráficos da Figura 5.7 mostram a distribuição da energia nos modelos para cada critério de erosão adotado.

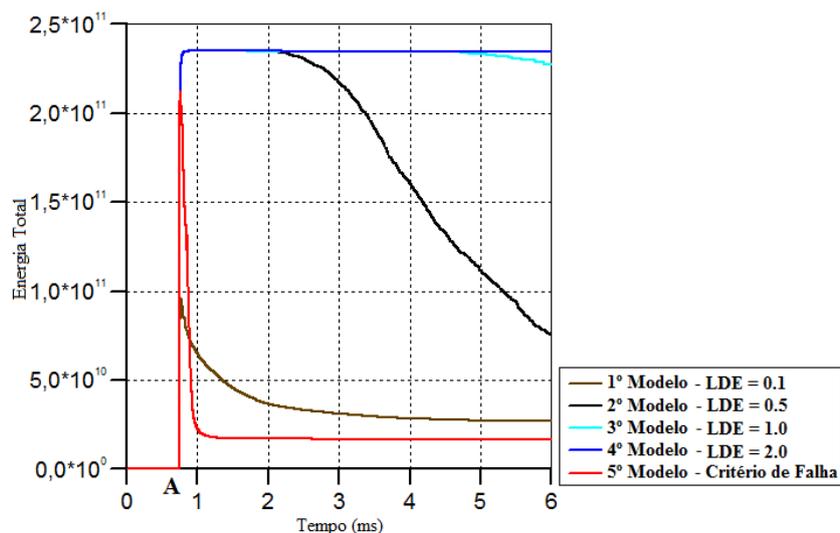


Figura 5.7 - Distribuição da energia total dos modelos em uJ.

Na figura anterior é possível observar a influência dos critérios de erosão adotados na distribuição da energia total ao longo do tempo nos diferentes modelos. Essa escolha tem uma influência significativa na modelagem de um problema e nos resultados posteriores.

O primeiro e o quinto modelos, em que foram empregados os critérios de deformação geométrica instantânea efetiva com limite de erosão de 0,1 e critério de falha, respectivamente, apresentaram uma rápida perda energética nos primeiros milissegundos após a detonação. É possível associar esta perda de energia à erosão quase que imediata das células de concreto nas regiões próximas ou em contato com o explosivo, uma vez que ficaram submetidas a distorções extremamente elevadas. Nestes modelos, o pico de energia atingido pela parede foi inferior aos demais casos, causado pela erosão precoce de algumas células. Provavelmente, isso contribuiu para uma menor transmissão da energia da explosão para outras partes do modelo. Talvez a opção pela retenção da massa dos nós erodidos resultasse em um comportamento diferente neste caso.

No terceiro e quarto modelos, em que foi utilizado o critério de deformação geométrica instantânea efetiva (DGI) com limite de deformação de 1,0 e 2,0, respectivamente, observou-se um comportamento incomum na distribuição da energia. Nesses modelos foram aplicados os maiores valores de limite de deformação, recomendados pelo programa no tratamento da maioria dos materiais, entretanto, eles levaram o concreto a um comportamento irreal, extremamente plástico, em que era necessário um nível de distorção muito elevado antes da erosão da célula. Como resultado disso, a energia manteve-se conservada ao longo do tempo na parede. Dessa forma, poderia se dizer que, dentro das condições analisadas e para o tipo de

simulação desenvolvido, esses limites de deformação aparentemente não apresentam bons resultados na representação de materiais frágeis e porosos como o concreto.

O segundo modelo apresentou um comportamento intermediário com relação aos demais em termos de distribuição da energia ao longo do tempo. Embora tenha atingido o pico de energia de magnitude similar ao terceiro e quarto modelos, o segundo modelo apresentou a perda desta energia progressivamente ao longo do tempo pela erosão das células. Isto indica que houve uma transmissão significativa de energia da explosão pela parede antes do início do processo de erosão, sendo possível afirmar que neste segundo modelo houve uma certa combinação entre as características observadas nos demais modelos em termos de taxa de erosão e energia total nos elementos de concreto.

Mesmo com as incertezas envolvidas na concepção dos modelos numéricos oriunda do pouco detalhamento das condições do ensaio, a princípio, os melhores resultados foram obtidos pelo uso do modelo de erosão baseado na deformação geométrica instantânea efetiva com o limite de deformação de 0,5. É importante mencionar que Codina et al. (2016a) também optaram por esse valor como limite de deformação ao simular elementos de concreto submetidos a uma explosão próxima.

Apesar dos resultados obtidos é importante mencionar a pesquisa que Luccioni et al. (2013) desenvolveram. Eles observaram a capacidade dos modelos de erosão em ser utilizados para representar a erosão física, falha ao cisalhamento, crateramento e lascamento de materiais frágeis como o concreto, a relação que o limite de erosão adotado possui com o grau de refinamento da malha e a capacidade de alguns critérios de simularem certos tipos de dano de maneira mais precisa do que outros.

Por conta disso, não se pode, a princípio, generalizar os resultados encontrados e utilizá-los como critérios de erosão definitivos para todas as situações de carregamento envolvendo concreto, sendo necessário analisar pontualmente cada caso antes de se determinar o melhor critério de erosão a ser aplicado.

## **5.4 – TERCEIRO GRUPO DE SIMULAÇÕES: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ELEMENTOS DE PROTEÇÃO NA MITIGAÇÃO DO DANO EM UM ELEMENTO DE CONCRETO SUBMETIDO A UMA EXPLOSÃO PRÓXIMA**

As simulações realizadas neste grupo têm relação direta com o objetivo principal desta Tese, o estudo de diferentes técnicas de proteção de elementos estruturais submetidos a explosões. Para isso, submeteu-se um elemento de concreto à detonação próxima de uma elevada carga de TNT, buscando verificar o desempenho das diferentes medidas adotadas para proteção do concreto e identificar pontos importantes relacionados aos mecanismos de dano.

Em linhas gerais o objetivo deste grupo de simulações é observar como a disposição de diferentes materiais entre o concreto e o explosivo afeta a região de dano provocada no elemento de concreto.

A escolha dos materiais posicionados entre o concreto e o alvo está baseada em metodologias para proteção de elementos de concreto encontradas comumente como encamisados metálicos e proteção de estruturas por camadas de solo como no caso dos bunkers enterrados.

### **5.4.1 – Modelo numérico no Autodyn**

Neste grupo de simulações desenvolveu-se uma análise numérica em um ambiente bidimensional para se avaliar os efeitos destrutivos da detonação de 8 KG de TNT a 200 mm da superfície de um elemento de concreto. Entre o explosivo e o elemento de concreto foram posicionados diferentes tipos de proteção compostos por aço, areia e alumínio, desta forma buscou-se verificar quais foram os principais mecanismos de dano e que configuração absorveu maior quantidade de energia da explosão.

A seção do explosivo simulado possui a geometria de um semicírculo com o ponto de detonação posicionado em sua origem. O raio deste semicírculo é de aproximadamente 100 mm.

Ao todo foram estudados seis modelos, variando o tipo de proteção entre eles. As características dos modelos e a posição dos elementos são mostrados na Figura 5.8 e sintetizados na Tabela 5.11.

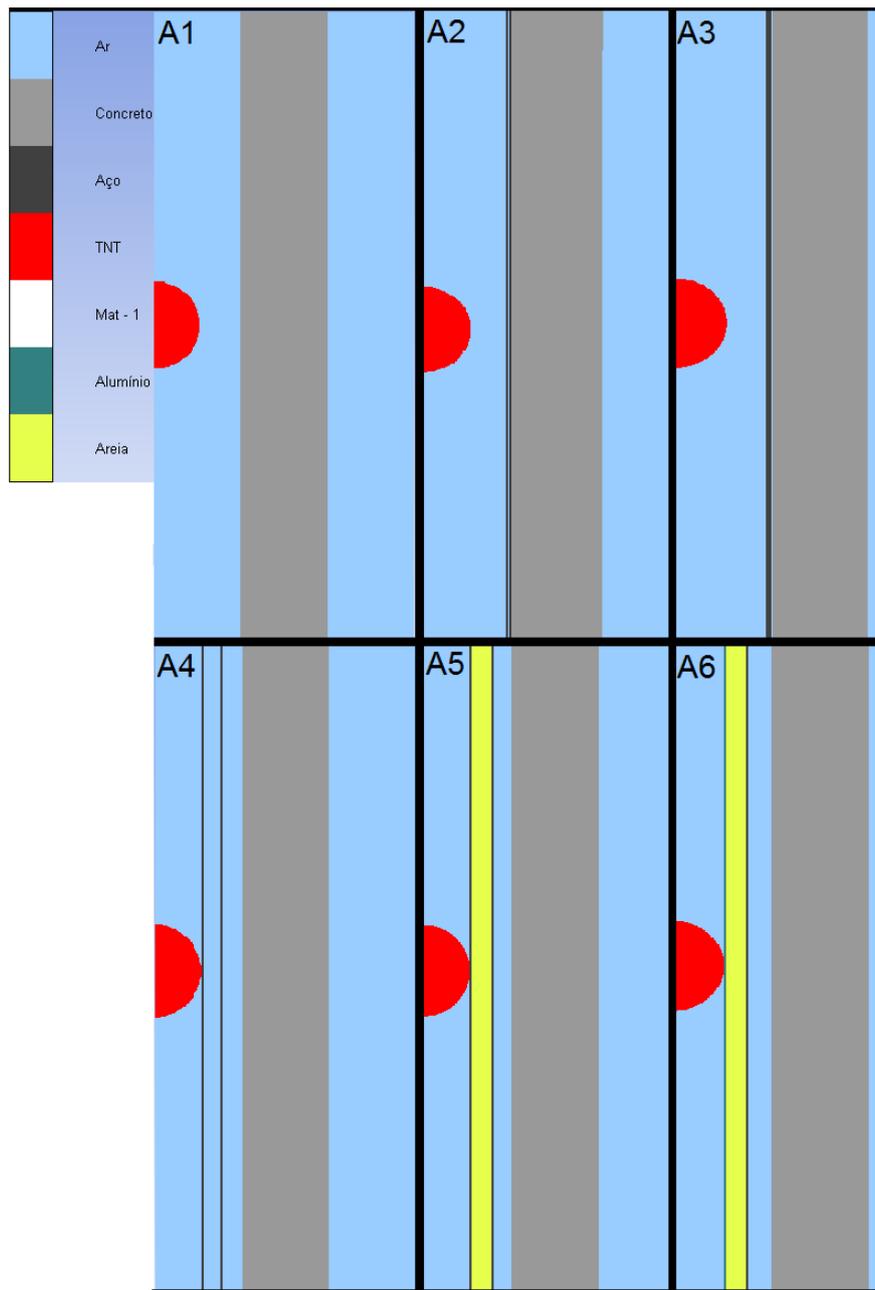


Figura 5.8 – Esquema dos modelos desenvolvidos no terceiro grupo de simulações, materiais usados nos modelos estão dispostos na legenda.

A parede de concreto tem 200 mm de largura e 1500 mm de altura e está inserida em uma camada de ar com 600 mm de largura e 1500 mm de altura junto com os elementos de proteção. O desenvolvimento dos modelos foi baseado na utilização de elementos planos com o processador Lagrangeano para sólidos e Euleriano para fluidos. A malha utilizada foi de 1 mm. Foram adotadas condições de contorno de modo que não houvesse reflexões de onda na fronteira do elemento ar (*flowout*), enquanto que os elementos metálicos e de concreto tiveram

sua base e topo fixados. Um maior realismo da interação entre o sólido e o fluido modelados foi obtido a partir da interação Euler/Lagrange que fora habilitada.

Neste grupo de simulações optou-se por uma abordagem bidimensional já que fora baseada em uma análise qualitativa dos efeitos destrutivos. Entretanto, uma captação mais realística do dano implica na utilização de modelos tridimensionais para poder reproduzir corretamente os efeitos da onda ao longo da espessura da placa em todos os sentidos de propagação.

Com base em análises anteriores, para simular a erosão do concreto optou-se pela deformação geométrica instantânea efetiva com um limite de 0.5. No futuro, com o desenvolvimento de experimentos, haverá a necessidade de se calibrar este valor adotado.

Tabela 5.11 – Síntese dos modelos simulados

Modelo	Proteção adotada
Primeiro modelo - (A1)	Sem proteção
Segundo modelo - (A2)	Duas chapas de aço de 5 mm distantes 3 mm entre si e do elemento de concreto
Terceiro modelo - (A3)	Chapa de aço única de 10 mm distante 3 mm do elemento de concreto
Quarto modelo - (A4)	Duas chapas de aço de 5 mm distantes 50 mm e 100 mm do concreto, respectivamente
Quinto modelo - (A5)	Similar ao A4 com preenchimento do espaço entre as chapas com areia
Sexto modelo - (A6)	Similar ao A5, entretanto a chapa mais distante do concreto é composta por alumínio

#### 5.4.2 – Propriedades dos materiais

As propriedades do aço, alumínio e areia utilizados neste grupo de simulações são mostradas nas tabelas 5.12, 5.13 e 5.14, respectivamente.

Os outros materiais empregados como ar, TNT e concreto de 35 MPa possuem as mesmas propriedades que foram apresentadas nas simulações anteriores.

Tabela 5.12 - Propriedades do Aço

Aço	
Massa específica	7,85 g/cm <sup>3</sup>
Equação de Estado	Linear
Modelo de Resistência	Johnson-Cook
Modelo de Falha	Johnson-Cook
Módulo volumétrico	1,4 .10 <sup>8</sup> kPa
Calor específico	477 J/kgK
Temperatura de referência	300 K
Módulo de Cisalhamento	7,93 .10 <sup>7</sup> kPa
Tensão de escoamento	250 MPa
Coefficiente de relaxamento térmico	0
Constante de dano D1	0,05
Constante de dano D2	3,44
Constante de dano D3	-2,12
Constante de dano D4	0,002
Constante de dano D5	0,61

Tabela 5.13 - Propriedades do Alumínio

Alumínio	
Massa específica	2,804 g/cm <sup>3</sup>
Equação de Estado	Choque ( <i>Shock</i> )
Modelo de Resistência	Steinberg Guinan
Parâmetro C1	5,20 10 <sup>3</sup> m/s
Parâmetro S1	1,36
Parâmetro S2	0
Coefficiente de Grüneisen	2.2
Módulo de Cisalhamento	2,67 .10 <sup>7</sup> kPa
Tensão de escoamento	4,2 .10 <sup>5</sup> kPa
Expoente de endurecimento	0,1

Tabela 5.14 - Propriedades da areia

Areia		
	2,641 g/cm <sup>3</sup>	
Massa específica	Pressão (kPa)	Velocidade do som (m/s)
1,67400	0	265,199982
1,73950	4,57700 .10 <sup>3</sup>	852,100098
1,87380	1,49800 .10 <sup>4</sup>	1,721700 .10 <sup>3</sup>
1,99700	2,91510 .10 <sup>4</sup>	1,875550 .10 <sup>3</sup>
2,14300	5,91750 .10 <sup>4</sup>	2,264800 .10 <sup>3</sup>
2,25000	9,80980 .10 <sup>4</sup>	2,956100 .10 <sup>3</sup>
2,38000	1,79443 .10 <sup>5</sup>	3,112200 .10 <sup>3</sup>
2,48500	2,89443 .10 <sup>5</sup>	4,600000 .10 <sup>3</sup>
2,58500	4,50198 .10 <sup>5</sup>	4,634000 .10 <sup>3</sup>
2,67130	6,50660 .10 <sup>5</sup>	4,634000 .10 <sup>3</sup>
Equação de Estado	Granular	
Modelo de Resistência	Mo Granular	

### 5.4.3 – Resultados do terceiro grupo de simulações

Considerando os trabalhos de Remennikov et al. (2015) e Yue et al. (2017) é possível afirmar que a detonação de 8 kg de explosivo a 200 mm de distância é mais que suficiente para perfurar um elemento de concreto convencional de 200 mm de espessura. Por conta disso, a simulação A1 foi desenvolvida como parâmetro comparativo com as demais, uma vez que não foi considerado nenhum tipo de proteção neste caso.

Na Figura 5.9 é mostrado o padrão de dano no elemento de concreto de 0,5 ms até 2,5 ms do início da explosão. Como esperado, a explosão produzida é forte o suficiente para colapsar integralmente o elemento, sendo possível constatar a linha de falha próxima dos apoios.

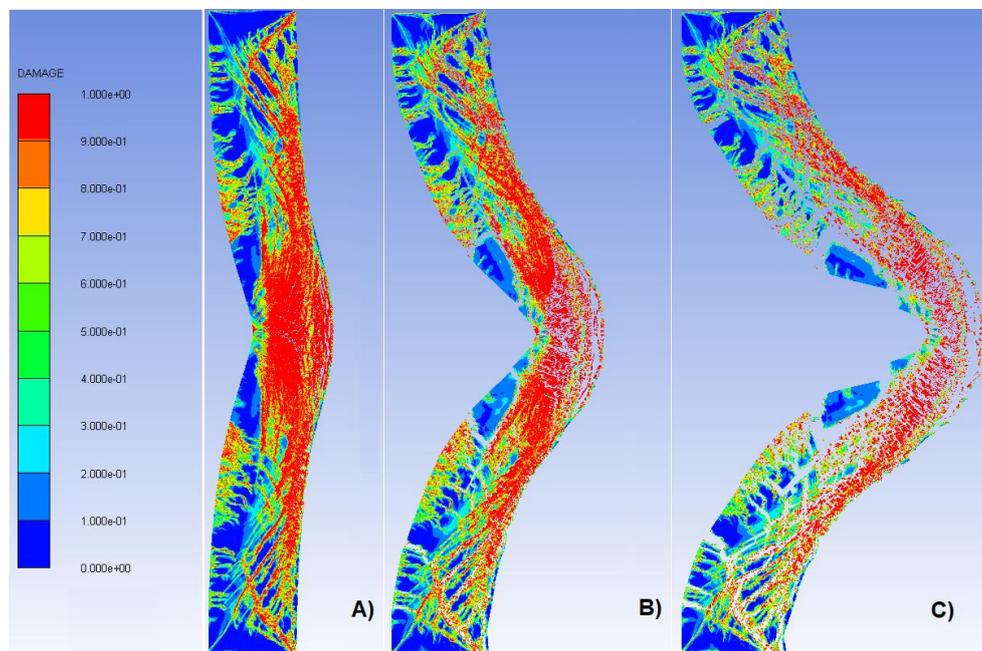


Figura 5.9 - Níveis de dano nos modelos A) em 0,5ms , B) 1,5 ms e C) 2,5 ms após a detonação, Modelo A1.

No modelo A2 (Figura 5.10) foi observado se a interface de ar inserida entre as chapas de 5 mm e o elemento de concreto, promoveria alguma redução na magnitude das pressões, visto a mudança da impedância. Os resultados indicaram que a influência destas chapas na mitigação do dano foi mínima, isto se deve ao fato de que as chapas de aço se deformaram rapidamente e transferiram mecanicamente a energia da explosão até o elemento de concreto que entrou em ruptura.

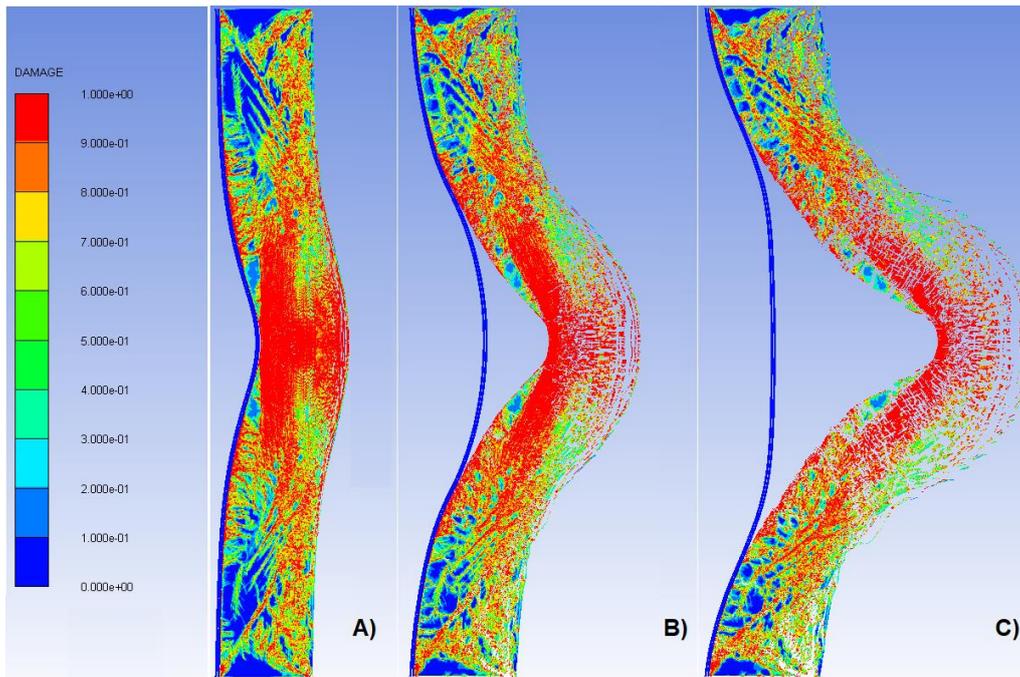


Figura 5.10 - Níveis de dano nos modelos A) em 0,5ms , B) 1,5 ms e C) 2,5 ms após a detonação, Modelo A2.

No modelo A3 (Figura 5.11), em que foi utilizada uma chapa de aço de 10 mm de espessura distante 3 mm do elemento de concreto, não houve melhoras significativas em termos de mitigação de dano no concreto em comparação com o modelo A2. Isto pode indicar que proteções posicionadas muito próximas de alvo, podem não protegê-lo adequadamente, uma vez que a energia que se propaga através da deformação do material de proteção será transmitida mecanicamente para o elemento que se deseja proteger. Em ambos os casos, tanto A2 quanto em A3, não se pôde constatar a eficiência da troca de impedância na mitigação do dano.

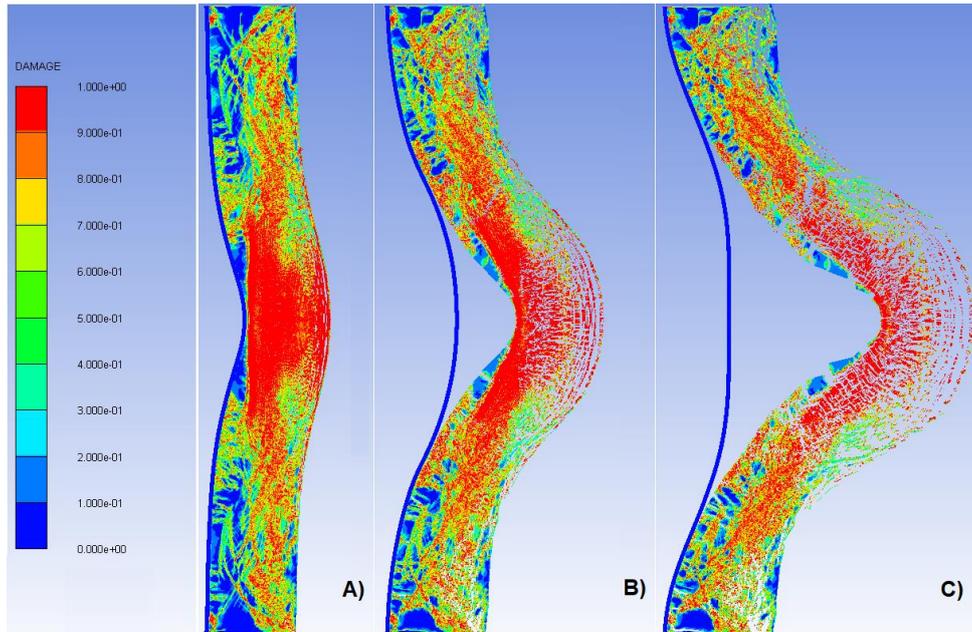


Figura 5.11 - Níveis de dano nos modelos A) em 0,5ms , B) 1,5 ms e C) 2,5 ms após a detonação, Modelo A3.

Os resultados do modelo A4 mostraram a conservação de uma pequena região íntegra de concreto próxima dos apoios, isto não havia sido encontrado nas simulações anteriores. Constatou-se que uma distância maior entre as chapas e o elemento de concreto resultou em mais espaço para deformação do aço, o que atenuou parte da energia transmitida ao concreto. Isto indica que, neste caso, houve uma redistribuição da energia da explosão, reduzindo, mesmo que de forma pouco incisiva, o dano da causado, como pode ser visto na Figura 5.12.

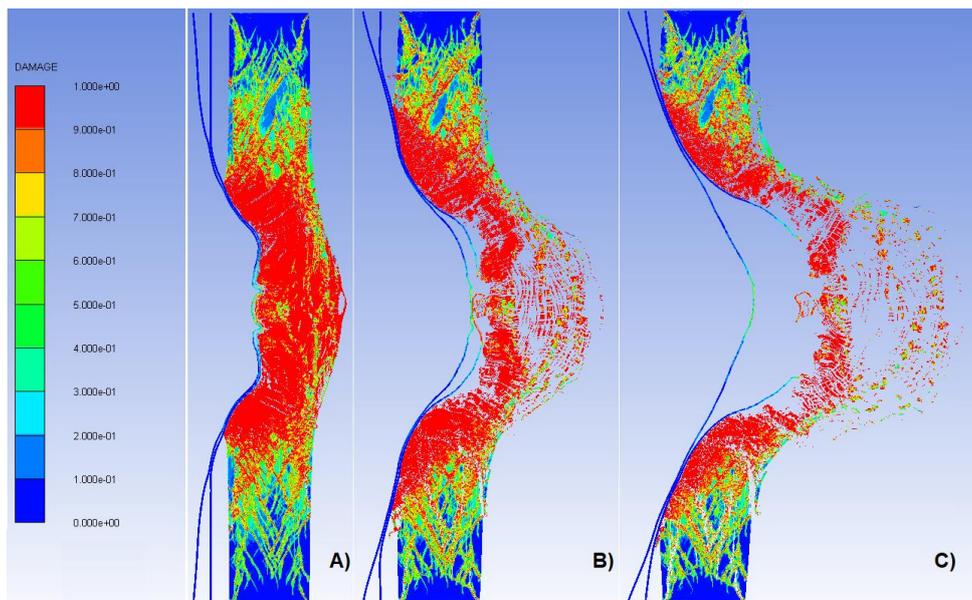


Figura 5.12 - Níveis de dano nos modelos A) em 0,5ms , B) 1,5 ms e C) 2,5 ms após a detonação, Modelo A4.

O modelo A5 é similar ao modelo A4, sendo que o espaço entre as chapas de aço foi preenchido por areia seca. É importante salientar que materiais porosos costumam ser utilizados como mecanismos de proteção contra explosões, Kazemi-Kamyab et al. (2011).

Os resultados deste modelo apresentaram um comportamento similar ao do modelo anterior, Figura 5.13. Aparentemente, isto está vinculado à modelagem da areia, sendo que não foi observada fuga pelas bordas do modelo. Dessa forma, é possível que uma atualização dos parâmetros ou a adoção de um novo modelo de falha aprimore o comportamento da areia nesta simulação.

A situação esperada seria que tanto o aumento da espessura das chapas, quanto da camada de areia incrementassem a eficiência deste tipo de proteção.

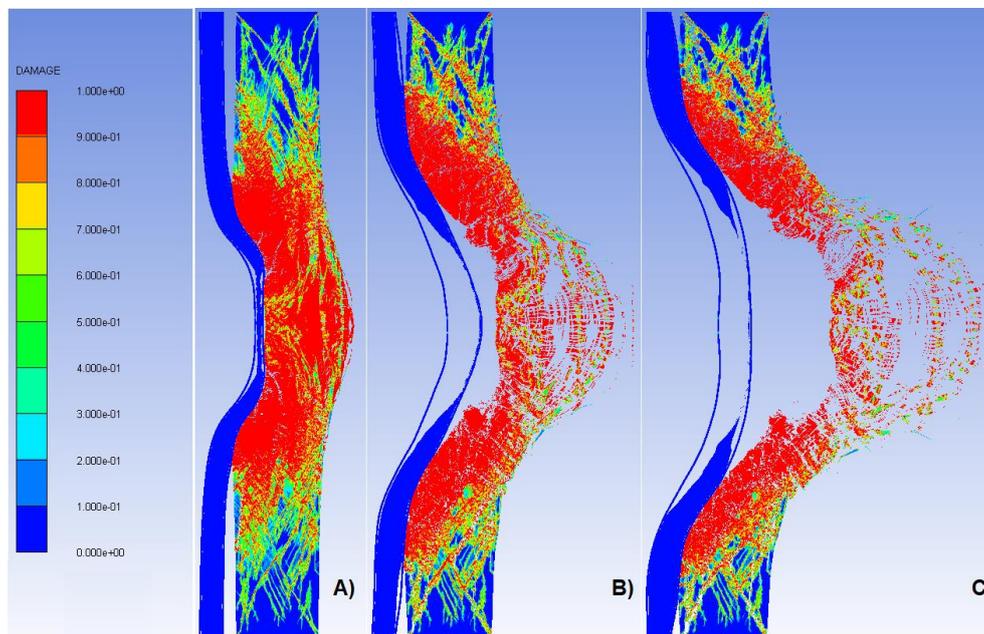


Figura 5.13 - Níveis de dano nos modelos A) em 0,5ms , B) 1,5 ms e C) 2,5 ms após a detonação, Modelo A5.

O modelo A6 é similar ao modelo A5, a diferença é que a chapa mais distante do concreto é de alumínio. Na concepção deste modelo, o elemento de alumínio funcionaria como material de sacrifício, escoando e absorvendo parte importante da energia da onda sob a forma de deformações inelásticas.

Como previsto, a chapa de alumínio apresentou um nível de deformação superior ao da chapa de aço no caso anterior (A5), Figura 5.14. Apesar de ter funcionado dentro do esperado, esta medida ainda não foi suficiente para manter íntegra uma maior região de concreto.

Nesta simulação também se verificou um fenômeno similar ao do modelo anterior quanto ao comportamento da areia. Isto indica que talvez seja necessária uma atualização dos parâmetros da areia e uma verificação da influência disto nos resultados.

A elevada magnitude das tensões oriundas de uma explosão muito próxima torna difícil a elaboração de sistemas para proteção, entretanto, foi possível observar ganhos progressivos em cada modelo quanto à absorção da energia da explosão. Um fator importante a ser observado é que, apesar da distância entre o explosivo e o concreto ser a mesma em todas as simulações, diferentes configurações quanto aos materiais e ao seu posicionamento resultaram em níveis de dano diferenciados.

As observações realizadas neste grupo de simulações serviram de base para a idealização das proteções dos modelos do quinto grupo de simulações.

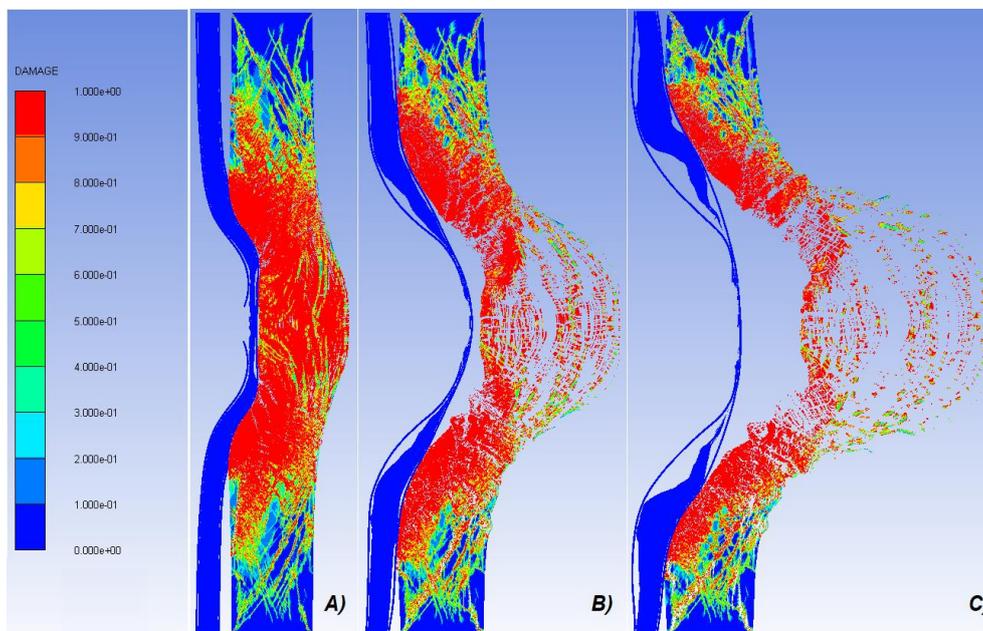


Figura 5.14 – Níveis de dano nos modelos A) em 0,5ms , B) 1,5 ms e C) 2,5 ms após a detonação, Modelo A6.

## **5.5 – QUARTO GRUPO DE SIMULAÇÕES: METODOLOGIAS PARA MITIGAÇÃO DO DANO EM UMA PLACA DE CONCRETO SUBMETIDA A UMA EXPLOSÃO POR CONTATO**

Neste grupo, foram avaliadas metodologias para proteção de uma placa de concreto submetida a uma explosão por contato, principalmente, com relação à mitigação dos danos devidos a crateramento e lascamento do concreto. A placa estudada é a mesma utilizada no experimento desenvolvido por Beppu et al. (2010).

Os sistemas de proteção e mitigação de dano propostos foram elaborados tomando como base materiais usualmente utilizados para proteção balística e de acesso comum. Na concepção dos sistemas de proteção sugeridos tem-se a combinação de materiais de forma a combater, primeiramente, o crateramento do concreto mitigando a energia da explosão que chega neste material e, em segundo lugar, combater o lascamento provendo ao concreto uma maior resistência aos esforços de tração.

### **5.5.1 – Modelo experimental**

No experimento base apresentado por Beppu et al. (2010) a placa de concreto simples utilizada possui 500 mm de lado e 80 mm de espessura e foi submetida à detonação de 46 g de C4 posicionados no centro da placa, sendo o ponto de detonação posicionado no centro da superfície superior do explosivo. A placa de concreto é apoiada em suas extremidades por dois perfis de aço de seção H.

O explosivo utilizado possui um formato cilíndrico e a razão entre a espessura e diâmetro do explosivo é de 1. O concreto utilizado pelos autores do experimento possui resistência à compressão de 28,9 MPa.

### **5.5.2 – Modelo numérico no Autodyn**

As simulações aqui apresentadas envolvem uma composição de materiais posicionados na parte frontal da placa (entre o explosivo e a placa) e na parte posterior.

Após se realizar um estudo da malha, optou-se pelo uso de um refinamento de 5 mm sendo utilizado dupla simetria na concepção dos modelos. Em linhas gerais, cada uma das simulações desenvolvidas neste grupo demandaram um tempo de processamento de duas a três semanas sendo utilizada uma máquina i5-7400 3GHz com 16 GB de memória RAM.

As análises aqui desenvolvidas foram divididas em três níveis distintos.

O primeiro nível foi uma continuação de estudos anteriores de Costa Neto e Doz (2017), com o objetivo de verificar a influência das proteções na interface entre o explosivo e o alvo na mitigação do dano, sendo testados uma camada de poliuretano e depois uma combinação de chapa de aço A36 associada a uma camada de poliuretano.

Com base nos resultados do primeiro nível de simulações, implementou-se uma armadura na placa de concreto sendo verificada a influência desta no dano apresentado, foram adotadas barras com 5 mm de diâmetro, um cobrimento de 30 mm e de especificação CA 60. Também foi verificada a influência da espessura da chapa de aço posicionada sobre a placa nos resultados, sendo este, o segundo nível de simulações.

No terceiro nível de simulações foram testados variados tipos de materiais para proteção da placa, tanto na parte frontal (combatendo o crateramento) quanto na parte posterior da placa (visando combater o lascamento). Os materiais de preenchimento simulados são, em sua maioria, plásticos reforçados com fibra, também conhecidos como FRP, este tipo de material vem sendo estudado como reforço contra ações excepcionais, como aquelas envolvendo colisões, balística em geral e explosões.

É importante salientar que, para os elementos utilizados como proteção na parte posterior da placa de concreto, foi empregada uma camada de resina epoxy de modo criar uma região de transição mais realística entre as superfícies do concreto e da proteção colocada.

A Figura 5.15, a seguir, ilustra um esquema geral da seção transversal dos modelos simulados, apresentando as zonas onde foram posicionadas as proteções com relação ao explosivo. Maiores detalhes dos modelos são apresentados na Tabela 5.15.

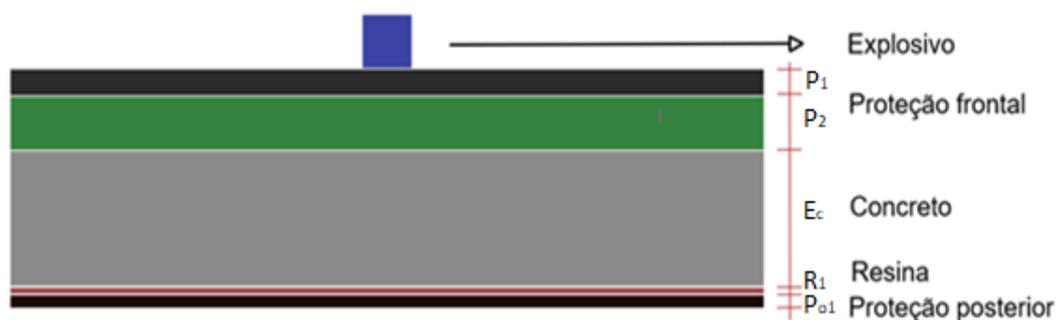


Figura 5.15 – Esquema dos modelos simulados

Da Figura 5.15,  $P_1$  e  $P_2$  são as espessuras das camadas de material empregados na proteção frontal, sendo que  $P_1$  sempre representa a espessura da placa de aço.  $E_c$  representa a espessura da placa de concreto, enquanto que  $R_1$  e  $P_{o1}$  são referentes as espessuras da resina e do material protetivo empregados como proteção posterior, respectivamente.

Tabela 5.15 – Síntese dos modelos simulados

	Simulação	Proteção frontal	Proteção posterior	Objetivo
Primeiro Nível	A1	Poliuretano	-	Verificar o desempenho de proteções na interface entre o explosivo e o concreto.
	A2	Aço (A36) e poliuretano	-	
Segundo Nível	B1	Similar ao A2	-	A diferença deste grupo com relação ao primeiro é verificar o desempenho da armadura no interior da placa na mitigação do nível de dano
	B2	Similar ao A2 com uma maior espessura do aço	-	
Terceiro Nível	C1	Similar ao B2	Fibra de vidro	O posicionamento de proteções na parte posterior da placa visa o controle do lascamento do concreto. Neste âmbito, foram considerados diferentes materiais em conjunto com a proteção frontal proposta mais eficiente.
	C2	Similar ao B2	Poliuretano	
	C3	Similar ao B2	Aço	
	C4	Similar ao B2	Kevlar	
	C5	Aço e neoprene	Neoprene	
	C6	Aço e neoprene	Aço	

Para ilustrar a posição da armadura nos modelos é apresentada a Figura 5.16 a seguir, que ilustra o modelo B2.

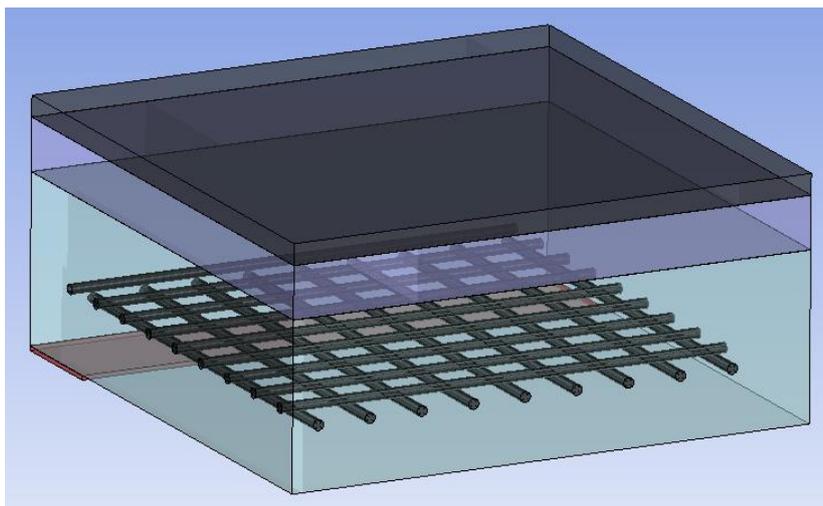


Figura 5.16 – Posição da armadura no modelo B2, modelo com dupla simetria.

Detalhes com relação a espessura das proteções utilizadas podem ser encontrados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Espessuras das proteções empregadas nos modelos

Simulação	Proteção frontal	Espessura	Proteção posterior	Espessura
A1	Poliuretano	35 mm	-	-
A2	Aço e poliuretano	5 e 30 mm, respectivamente	-	-
B1	Similar ao A2	-	-	-
B2	Similar ao A2 com uma maior espessura do aço	10 e 25 mm, respectivamente	-	-
C1	Similar ao B2	-	Fibra de vidro	5 mm
C2	Similar ao B2	-	Poliuretano	5 mm
C3	Similar ao B2	-	Aço	5 mm
C4	Similar ao B2	-	Kevlar	5 mm
C5	Aço e neoprene	10 e 25 mm, respectivamente	Aço	-
C6	Aço e neoprene	10 e 25 mm, respectivamente	Neoprene	5 mm

Foi adotada uma espessura de 0,3 mm para a camada de resina epoxy em todos os modelos em que foram empregadas proteções na parte posterior da placa.

Os materiais adotados e as espessuras empregadas foram idealizadas seguindo critérios construtivos e com base em bibliografias relevantes como Nagao et al. (2007), Ackland et al. (2010), Mostafa et al. (2010), Kumar et al. (2010), Ngo et al. (2014), Ansari et al. (2016), Codina et al. (2016b) e Kavitha et al. (2015).

Toda a estrutura modelada situa-se dentro de um volume de ar de dimensões 510 mm de comprimento, 510 mm de largura e 250 de altura. A condição de contorno empregada nas bordas do ar permitiu a simulação de um meio contínuo sem reflexão de onda.

Os apoios adotados no experimento também foram replicados nos modelos numéricos, sendo modelados como rígidos.

Os critérios construtivos para idealizações das proteções consideraram um elemento de concreto pré-existente e com limitações de espaço para o emprego das proteções. Entretanto, é importante ressaltar que em uma situação envolvendo o projeto de uma nova estrutura, poderiam ser utilizados concretos de maior resistência e reforçados com fibra, associados a uma maior espessura da placa, como medidas protetivas contra explosões. Isto pode ser observado em alguns trabalhos como Li et al. (2016) e Luccioni (2017).

### 5.5.3 – Propriedades dos materiais

Para o desenvolvimento dos modelos numéricos deste grupo de simulações, foi necessário emprego e utilização de diferentes tipos de materiais, grande parte deles já foi utilizada nas simulações anteriores como, por exemplo, o ar, o C4 e o aço sendo então mantidas as mesmas propriedades.

As propriedades dos materiais fibra de neoprene, concreto, vidro, poliuretano, epoxy e Kevlar, utilizados neste grupo de simulações são apresentadas nas tabelas 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22, respectivamente.

Tabela 5.17 - Propriedades do neoprene

Neoprene	
Massa específica	1,439 g/cm <sup>3</sup>
Equação de estado	Choque (Shock)
Coefficiente Gruneisen	1,39
C1	2,785 .10 <sup>3</sup> m/s
S1	1,419
S2	0

Tabela 5.18 - Propriedades do Concreto

Concreto	
Massa específica	2,50 g/cm <sup>3</sup>
Equação de Estado	P alpha
Modelo de Resistência	Concreto RHT
Modelo de Falha	Concreto RHT
Massa específica porosa	2,31 g/cm <sup>3</sup>
Pressão de compactação inicial	2,33 ;10 <sup>4</sup> kPa
Pressão de compactação sólido	6,00 ;10 <sup>6</sup> kPa
Expoente de compactação	3
Parâmetro A1	3,53 .10 <sup>7</sup> kPa
Parâmetro A2	3,96 ;10 <sup>7</sup> kPa
Parâmetro A3	9,04 .10 <sup>6</sup> kPa
Parâmetro B0	1,22
Parâmetro B1	1,22
Parâmetro T1	3,53 .10 <sup>7</sup> kPa
Parâmetro T2	0,00 kPa
Módulo de cisalhamento	1,6 1.0 <sup>7</sup> kPa
Resistência à compressão	2,89 .10 <sup>4</sup> kPa
Resistência à tração (normalizada)	0,10
Resistência ao cisalhamento (normalizado)	0,18
Tens/Comp Meridiano Q	6,805 .10 <sup>-1</sup>
Transição Frágil - Dúctil	1,05 .10 <sup>-2</sup>
Constante de dano D1	4,00 .10 <sup>-2</sup>
Constante de dano D2	1,00
Deformação mínima para falha	1,00 .10 <sup>-2</sup>

Tabela 5.19- Propriedades da fibra de vidro

Fibra de vidro	
Massa específica	1,84 g/cm <sup>3</sup>
Equação de Estado	<i>Ortho</i>
Modelo de Resistência	<i>Elastic</i>
Modelo de Falha	<i>Material Stress/Strain</i>
Temperatura de referência	293
E 11	2,204 .10 <sup>5</sup> kPa
E 22	2,204 .10 <sup>5</sup> kPa
E 33	8,560 .10 <sup>4</sup> kPa
Razão Poisson 12	0,13
Razão Poisson 23	0,84
Razão Poisson 31	0,13
Módulo de Cisalhamento	3,8 .10 <sup>4</sup> kPa
Módulo volumétrico – A1	1,374 .10 <sup>5</sup> kPa
A2	1,205 .10 <sup>6</sup> kPa
B0	0
T1	1,374 .10 <sup>5</sup> kPa
T2	0
Tensão de Falha 11	4,50 .10 <sup>4</sup> kPa
Tensão de Falha 22	4,50 .10 <sup>4</sup> kPa
Tensão de Falha 33	4,50 .10 <sup>4</sup> kPa

Tabela 5.20 - Propriedades do poliuretano

Poliuretano	
Massa específica	1,19 g/cm <sup>3</sup>
Equação de Estado	<i>Linear</i>
Modelo de Resistência	<i>Elastic</i>
Modelo de Falha	<i>Principal Stress</i>
Módulo volumétrico	2 .10 <sup>6</sup> kPa
Módulo de cisalhamento	5 .10 <sup>3</sup> kPa
Tensão de falha principal	3,45 .10 <sup>4</sup> kPa

Tabela 5.21- Propriedades do epoxy

Epoxy	
Massa específica	1,186 g/cm <sup>3</sup>
Equação de estado	Choque (Shock)
Coefficiente Gruneisen	1,13
C1	2,73 .10 <sup>3</sup> m/s
S1	1,493
S2	0

Tabela 5.22 - Propriedades do Kevlar

Fibra do Kevlar	
Massa específica	1,65 g/cm <sup>3</sup>
Equação de Estado	<i>Ortho</i>
Modelo de Resistência	<i>Elastic</i>
Modelo de Falha	<i>Material Stress/Strain</i>
Temperatura de referência	293
E 11	1,978 .10 <sup>6</sup> kPa
E 22	1,799 .10 <sup>7</sup> kPa
E 33	1799 .10 <sup>7</sup> kPa
Razão Poisson 12	0,08
Razão Poisson 23	0,075
Razão Poisson 31	0,69
Módulo de Cisalhamento	1,86 .10 <sup>6</sup> kPa
Módulo volumétrico – A1	4,214 .10 <sup>6</sup> kPa
A2	4,00 .10 <sup>7</sup> kPa
B0	0
T1	4,214 .10 <sup>6</sup> kPa
T2	0
Tensão de Falha 11	1,20 .10 <sup>6</sup> kPa
Tensão de Falha 22	1,85 .10 <sup>6</sup> kPa
Tensão de Falha 33	1,85 .10 <sup>6</sup> kPa

### 5.5.4 – Resultados do quarto grupo de simulações: Nível 1

Como mencionado, as simulações deste primeiro nível foram desenvolvidas visando verificar o desempenho de proteções na interface entre o explosivo e o bloco de concreto. De modo a ilustrar o desempenho de cada uma das proteções quanto à mitigação do dano no concreto, é apresentada a Figura 5.17 em que é possível observar a seção transversal da placa nos dois casos analisados. Nesta figura foi empregada uma escala de cores em que azul representa o material íntegro e vermelho o material danificado. Foram omitidos os materiais utilizados para proteção de modo a facilitar a visualização do dano na placa de concreto.

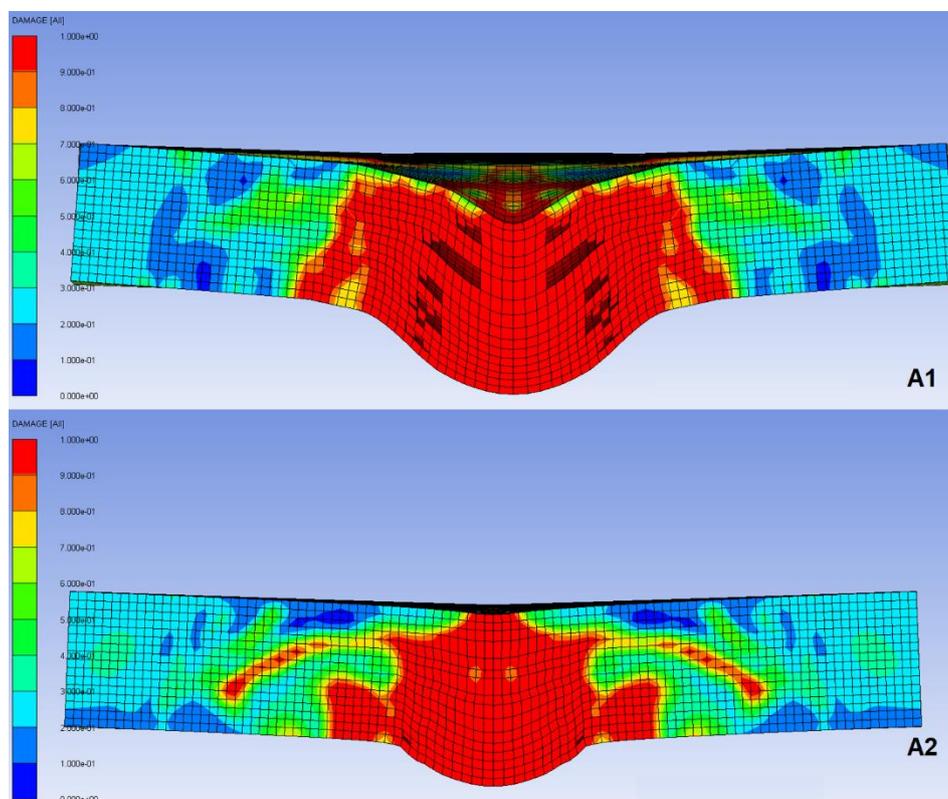


Figura 5.17 – Seção transversal dos modelos A1 e A2 mostrando a distribuição do dano.

Observa-se no modelo A1 que a aplicação apenas do poliuretano não foi suficiente para absorver de forma efetiva o nível de tensão oriundo da passagem da onda de choque pelo material. Entretanto, no modelo A2, a combinação da chapa de aço mais a camada de poliuretano mostrou-se eficiente, já que o aço, por possuir uma maior resistência associada a uma fase elástica longa, foi capaz de absorver grande parte da energia cinética em termos de deformação enquanto que o poliuretano agiu como um meio dissipador, atenuando a magnitude da onda de choque que estava chegando ao concreto.

A combinação mostrada em A2 mostrou um bom desempenho pois foi capaz de reduzir drasticamente os níveis de dano por crateramento. A Tabela 5.23 apresenta uma comparação dos resultados para os diâmetros de crateramento e lascamento obtidos numericamente com os advindos do experimento base em que nenhuma proteção foi utilizada.

Tabela 5.23- Diâmetros dos danos de crateramento e lascamento

	Diâmetro do Crateramento (mm)	Diâmetro do Lascamento (mm)
Experimento, Beppu et al. (2010)	130~160	210
A1	110	180
A2	~40	120

### 5.5.5 – Resultados do quarto grupo de simulações: Nível 2

Neste segundo nível de simulações foi avaliada a influência da disposição de uma armadura simples no interior do concreto na mitigação do dano causado pela explosão por contato, além disso, também se verificou as vantagens do uso de uma chapa de aço um pouco mais espessa.

A Figura 5.18 apresenta a seção transversal do bloco de concreto para os dois casos analisados, nesta figura também foi empregada uma escala de cores para análise do dano em que azul representa o material íntegro e vermelho o material danificado.

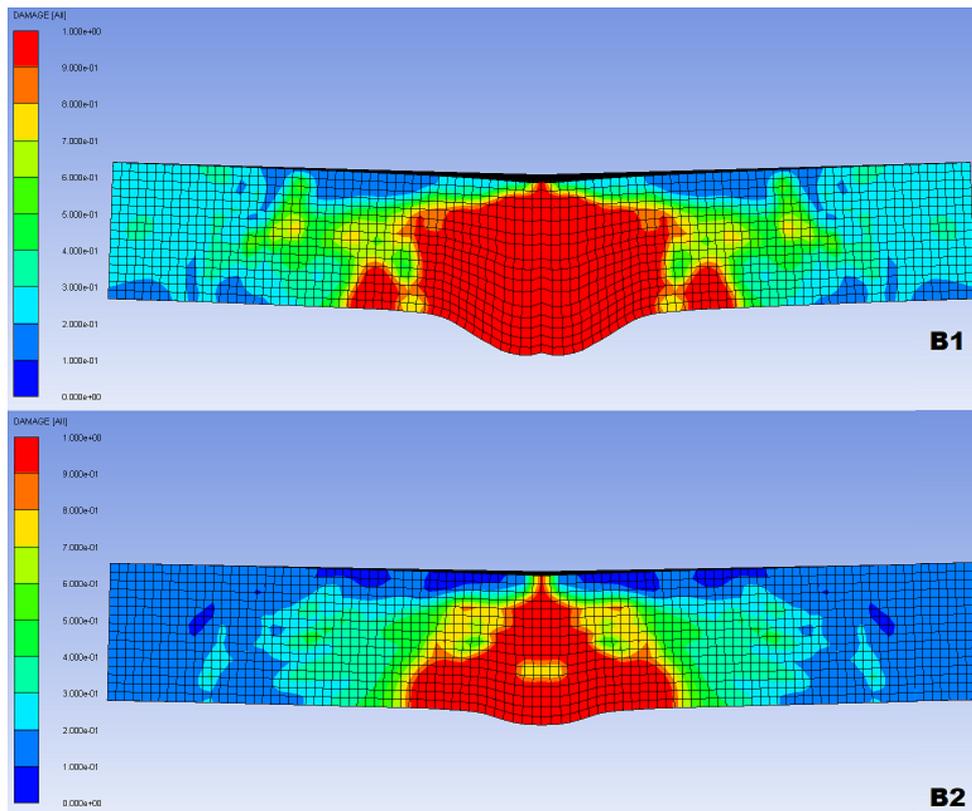


Figura 5.18 – Seção transversal dos modelos B1 e B2 mostrando a distribuição do dano.

O desempenho do posicionamento de uma armadura de forma isolada como medida protetiva foi observada em estudos anteriores, sendo avaliada experimentalmente por Tanaka e Tuji (2003), estes autores constataram que apenas a armação não representa um mecanismo de proteção eficiente contra o crateramento e o lascamento, muito embora a armação auxilie a restringir o crescimento do furo. Todavia, a combinação das proteções propostas com a armação simples foi importante o suficiente para, praticamente, impedir a formação do dano por crateramento. Isto fica mais visível no caso B2 em que a espessura da chapa de aço foi de 10 mm, não sendo observado o dano usual esperado para o crateramento. Por conta disso, a combinação de uma chapa de aço, mais uma espuma de enchimento (poliuretano) associados com a disposição de uma armação mostraram-se suficientes em reduzir drasticamente o dano de crateramento, conservando boa parte da integridade da superfície frontal da placa de concreto.

Entretanto, é possível imaginar que diferentes cargas de explosivo, assim como sua disposição ao longo da placa, podem solicitar proteções de diferentes formas. Obviamente, uma carga mais elevada de explosivo demandaria um maior nível de proteção, o que poderia resultar em camadas mais espessas dos materiais sugeridos.

### **5.5.6 – Resultados do quarto grupo de simulações: Nível 3**

As simulações de nível 3 foram desenvolvidas de modo a buscar alternativas para proteção da parte posterior da placa de concreto, ou seja, a mitigação parcial ou completa do dano por lascamento.

Sobre o dano por lascamento é importante frisar que ele é caracterizado pelo desprendimento e projeção dos fragmentos de concreto oriundos da face posterior da placa devido a passagem da onda de choque.

Algumas metodologias para proteção contra o lascamento podem evitar a projeção de fragmentos apenas, o que pode induzir a uma falsa sensação de mitigação do dano. Nesse âmbito, o terceiro nível de simulações avalia propostas que visam, além de combater a projeção dos fragmentos, contribuir para uma melhor resposta do concreto minimizando a zona danificada pela passagem da onda.

A Figura 5.19 apresenta os resultados das simulações C1, C2, C3 e C4. Nestes modelos foi empregada a melhor configuração de proteção contra o crateramento, observada no segundo grupo, em conjunto com diferentes proteções visando o controle do lascamento do concreto. Assim como nas figuras anteriores, nesta figura também foi empregada uma escala de cores para análise do dano em que azul representa o material íntegro e vermelho o material danificado.

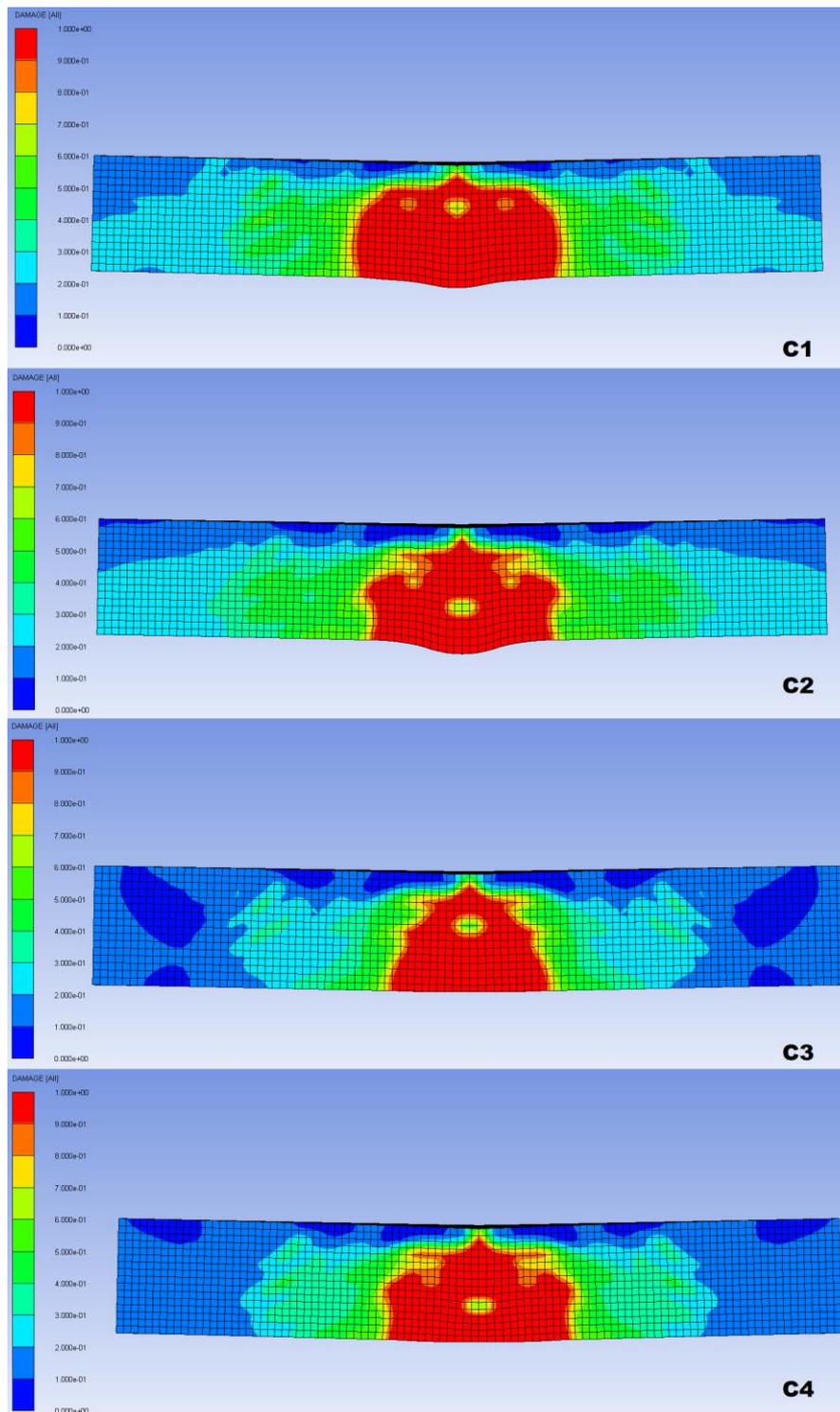


Figura 5.19 – Seção transversal dos modelos C1, C2, C3 e C4 mostrando a distribuição do dano.

Como se pode observar na Figura 5.19, os modelos que apresentaram os melhores resultados foram o C3 e o C4 em que foram empregados Aço e Kevlar, respectivamente, como materiais de proteção. O modelo C1, em que foi utilizado fibra de vidro, mostrou um desempenho interessante ainda mais quando se considera o custo benefício desta medida.

Aparentemente, medida protetiva menos eficiente foi a correspondente ao modelo C2 na qual foi empregado o poliuretano que, apesar de ser um excelente material dissipador e de preenchimento, não contribuiu efetivamente na redução da zona danificada pelo lascamento.

Em adição a estas simulações, foram desenvolvidos dois modelos adicionais o C5 e o C6 nos quais, ao invés de considerar o poliuretano como material de preenchimento, empregou-se o neoprene. O objetivo destas simulações foi, basicamente, comparar o desempenho destes materiais quanto à proteção fornecida ao concreto. A Figura 5.20 apresenta os resultados obtidos para estes dois modelos em termos de dano, utilizando a escala de cores dos casos anteriores.

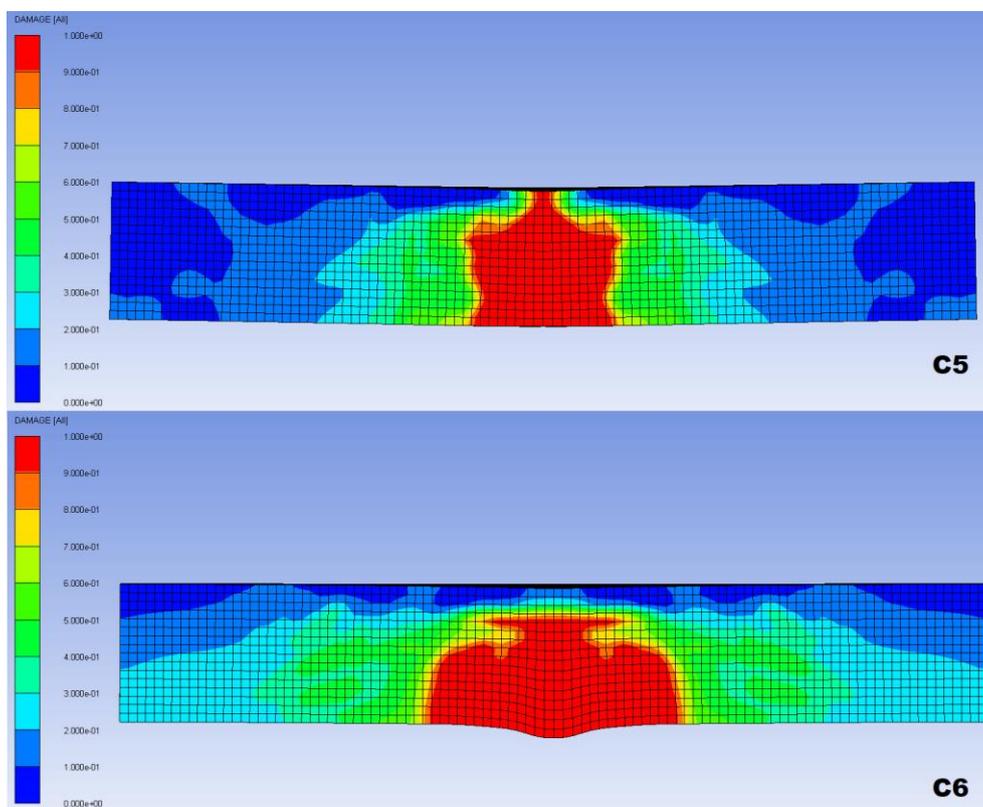


Figura 5.20 – Seção transversal dos modelos C5 e C6 mostrando a distribuição do dano.

Observa-se que o neoprene apresentou um comportamento similar ao poliuretano em termos de proteção à placa de concreto. Ambos se mostraram úteis como materiais de preenchimento, combatendo a zona de crateramento, mas ineficientes na mitigação do dano por lascamento na parte posterior da placa.

Considerando todas as simulações realizadas neste grupo, um aspecto possível de ser analisado com relação à mitigação do dano por lascamento foi que, quanto maior o módulo de elasticidade do material vinculado à placa de concreto pelo uso da resina, mesmo nos materiais de

comportamento ortotrópico (como a fibra de vidro e o Kevlar), menor foi o dano observado na região de lascamento.

Um ponto importante a se observar seria a velocidade absoluta do concreto nos modelos (composta pela combinação das velocidades axial e radial), Figura 5.21, através destas velocidades é possível ter uma noção do desempenho dos diferentes materiais empregados para proteção quanto a mitigação dos níveis de energia cinética no concreto.

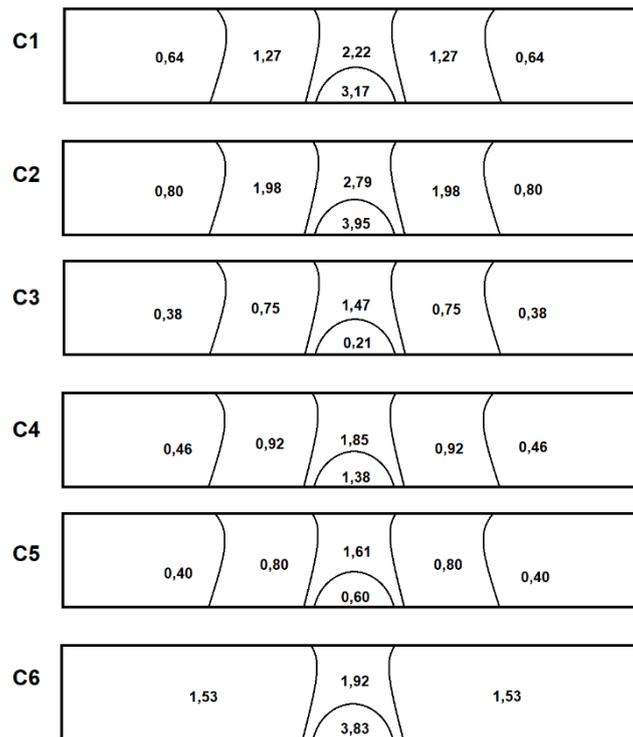


Figura 5.21 – Esquema das velocidades absolutas de cada modelo em m/s, 2 ms após a detonação.

Comparando esta figura com as anteriores em que foi apresentado o nível de dano dos modelos, nota-se que os sistemas de proteção C1, C3 e C4, principalmente estes dois últimos, foram muito eficientes, não apenas na redução da zona de lascamento e no ganho na resistência da placa, como também nos níveis de absorção de energia cinética.

As similaridades entre os resultados correspondentes aos modelos C3 e C5 demonstram que houve uma certa equivalência de desempenhos entre o poliuretano e o neoprene como materiais de preenchimento dissipadores. Entretanto, antes de qualquer conclusão, são necessários experimentos para comprovar se isto, de fato, ocorre na prática.

De um modo geral, os resultados indicam que um reforço adequado em um elemento de concreto submetido a uma detonação em contato deve ser produto da combinação de duas

medidas protetivas. A primeira, na face frontal, serve como meio dissipador de energia, pois além de agir como um dispositivo que distancia o explosivo da superfície da placa concreto, ela deve absorver uma parte importante da energia da explosão atenuando a magnitude com que a onda de choque atinge o concreto, neste aspecto o poliuretano se destaca como material dissipador de energia da onda de choque o que também foi observado por outros autores como Kitagawa et al. (2006) e Komissarov et al. (2016).

A segunda medida protetiva está relacionada à parte posterior da placa de concreto, onde é esperado o dano por lascamento. As proteções a serem aplicadas nesta parte devem prover ao concreto resistência suficiente para suportar os elevados esforços de tração oriundos da passagem da onda, desta forma, reduzindo a zona danificada e retendo os fragmentos de concreto projetados.

A combinação destas duas medidas protetivas impede a formação do furo, o que é usualmente buscado em explosões deste tipo. Em relação à segurança, a combinação destas medidas auxilia tanto na preservação da integridade do elemento de concreto como na segurança dos usuários e bens, uma vez que os fragmentos que seriam projetados em alta velocidade na parte posterior da parede poderiam representar um risco.

Em linhas gerais, as propostas simuladas mostraram um bom desempenho quanto à mitigação dos níveis de dano no concreto, sendo importante destacar que a utilização de chapas de aço associada a uma espuma de preenchimento (poliuretano) apresentou bons resultados quanto à mitigação do dano de crateramento e, na parte posterior da placa, foi observado um bom controle do lascamento pelos materiais fibra de vidro e kevlar.

Com base nos resultados conclui-se que a utilização de um sistema de proteção para placas de concreto utilizando a disposição de materiais proposta poderá ser muito útil e simples de ser aplicada em variadas situações envolvendo risco de explosão.

Entretanto, apesar dos resultados encontrados indicarem um rumo importante a ser seguido nas próximas pesquisas é importante se buscar uma comprovação experimental da eficiência dos modelos sugeridos antes de aplicá-los na prática.

## 6 – CONCLUSÕES

As simulações mostradas no capítulo anterior foram apresentadas seguindo a ordem cronológica de seu desenvolvimento. Verificou-se que, ao longo do tempo, elas contribuíram não apenas com resultados e informações importantes, como também podem servir de base para pesquisas futuras.

Os dois primeiros grupos de simulações, mostraram a robustez do software em lidar com situações de carregamento complexas e da interação entre diferentes materiais.

O primeiro grupo, especificamente, mostrou o desempenho de uma viga composta por uma seção de aço preenchida por concreto submetida a uma explosão. Verificou-se, neste caso, duas respostas da estrutura, a primeira relacionada à flexão da viga e a segunda, local, relacionada ao esmagamento e fragilização da seção de concreto. Isto indicou, em comparação com trabalhos desenvolvidos anteriormente, que ao aproximar a explosão do objeto de estudo a avaliação da interação dos produtos de detonação com a superfície do alvo passa a ter importância ímpar no que diz respeito aos mecanismos de dano.

No segundo grupo de simulações, foram avaliados alguns critérios de erosão. Para que se pudesse prosseguir com os estudos da detonação de explosivos em contato com o alvo, foi necessário buscar meios de otimizar o processo de simulação e encontrar uma maior fidelidade na representação do dano. Este grupo mostrou a importância dos critérios de erosão e a influência deles nos resultados das simulações, entrando, desta forma, em concordância com o que fora apresentado por outros autores como Luccioni et al. (2013).

No terceiro grupo de simulações, buscou-se verificar a influência de diferentes tipos de obstáculos e da mudança de impedância na mitigação dos danos ao concreto. Constatou-se que, além da onda de choque, os materiais utilizados para proteção do concreto podem ser projetados sobre ele alterando, ou mesmo incrementando, os níveis de dano, por conta disso fica imperativo a necessidade de um material de preenchimento entre as proteções.

Considerando que a utilização de chapas de aço muito espessas é inviável, as formas mais eficientes para mitigação do dano envolvem a aplicação de placas tipo sanduíche, que a partir da combinação de diferentes materiais podem prover ao elemento de concreto um nível de proteção adequado.

No quarto grupo de simulações foram avaliadas propostas para proteção de placas de concreto submetidas a explosões por contato, sendo verificada a eficiência de cada um dos modelos

apresentados com relação à mitigação dos principais mecanismos de dano observados no concreto: o crateramento e o lascamento.

A análise ocorreu inicialmente buscando metodologias para proteção da superfície frontal da placa de concreto que estava voltada para o explosivo, a escolha dos materiais neste caso foi realizada com base em simulações anteriores e trabalhos de outros autores. Observou-se que a combinação da chapa de aço associada a um material espumoso dissipador, como o poliuretano, apresentou os melhores resultados ajudando a combater o crateramento da placa. Também se constatou que a utilização apenas do poliuretano não é suficiente para atenuar a magnitude da onda de choque, uma vez que, pela proximidade da explosão, é necessária a consideração de um outro material mais resistente para absorver a energia dos produtos de detonação sob a forma de deformações inelásticas.

Após definida uma proteção eficiente contra o crateramento, buscou-se analisar as proteções para a parte posterior da placa que viriam a combater o lascamento. Neste âmbito, os materiais aço, Kevlar e fibra de vidro apresentaram os melhores resultados o que, de certa forma, seria esperado, uma vez que diversas pesquisas recentes estão trabalhando com FRP, polímeros reforçados com fibras, como medidas de reforço balístico e até mesmo contra explosões.

Ainda sobre a mitigação do dano por lascamento observou-se uma relação entre os módulos de elasticidade dos materiais empregados com o nível de proteção obtido, quanto maior o módulo de elasticidade do material vinculado à placa de concreto pela resina, menores foram os danos observados na placa. Mesmo considerando os materiais ortótropicos, em que este módulo de elasticidade possui um valor que depende da direção em estudo.

Após analisar os resultados de todas as simulações se observa que, para a proteção de uma placa de concreto submetida a uma explosão por contato, é necessária a combinação de duas medidas protetivas que visam o combate ao crateramento e ao lascamento, impedindo desta forma o surgimento do furo. Neste aspecto, os resultados apontaram que a combinação de aço e poliuretano na parte frontal da placa associados com a aplicação de polímeros na parte posterior desta constituem um importante reforço para a proteção do concreto.

Desta forma, foi alcançado o principal objetivo deste trabalho, uma vez que, através das proteções sugeridas, foi possível uma mitigação eficiente dos dois principais mecanismos de dano esperados para eventos envolvendo placas de concreto submetidas à explosões por contato.

Quando comparado com outros modelos existentes, que muitas vezes envolvem o cobrimento do concreto com chapas espessas de aço ou a combinação outros metais, o maior destaque do modelo proposto é a simplicidade e a relação custo-benefício, uma vez que o posicionamento do material é simplificado e os materiais utilizados são convencionais.

Um ponto importante a se destacar é que a medida proposta foi parcialmente inspirada em metodologias para proteções balísticas, em que usualmente são utilizadas placas cerâmicas para restringir o avanço do projétil, mas no caso das explosões, os elementos protetivos empregados servem tanto para absorver a energia oriunda da explosão como prover uma maior resistência ao elemento estrutural, como no caso do reforço com polímeros que incrementa a resistência a tração na parte posterior auxiliando no controle do lascamento.

Por fim, é importante salientar que a avaliação e o emprego das medidas protetivas dependem fundamentalmente da carga, posição e geometria do explosivo considerado, já que isto tem influência no nível de proteção requerido para a estrutura. Isto reforça a importância da continuidade de pesquisas com esta temática para servirem de base na orientação de trabalhos e projetos futuros ou, até mesmo, fundamentarem formalmente uma norma técnica.

## **7 – RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS POSTERIORES**

Com base no que foi mostrado ao longo do trabalho, é possível destacar alguns pontos importantes para serem pesquisados como continuidade ao exposto.

- Verificação do desempenho das proteções em um evento envolvendo a detonação de múltiplas cargas de explosivo.
- Verificação da influência da espessura do preenchimento (poliuretano) na mitigação do dano.
- Análise paramétrica de cargas explosivas de projeto com espessuras dos materiais de proteção.
- Ensaios experimentais envolvendo cada um dos pontos aqui apresentados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelalim, O. 2013. *Blast hazard mitigation through vented suppressive shields*, Carleton University, Ottawa, Canadá.
- Ackland, K., Buckland, M., Thorn, V., Schaaf, P. 2010. *A Review of Battle Damage Prediction and Vulnerability Reduction Methods*, Defense Science and Technology Organisation, Australian Government.
- Akers, S. A., Rickman, D. D., Ehrgott, J. 2006. *Numerical Simulations of Blast Pressures During Wall Breaching*, Proceedings of the Users Group Conference, Computer Society, Denver, USA.
- Akers, S. A., Weed, R., Rickman, D. D., Danielson, K. 2005. *Numerical Simulations of Explosive Wall Breaching*, Proceedings of the Users Group Conference, Computer Society, Denver, USA.
- Alhadid, M., Soliman, A. M., Nehdi, M. L., Youssef, M. A., 2014. *Critical overview of blast resistance of different concrete types*, Magazine of Concrete Research, vol. 66, no. 2, 72-81.
- American Society of Civil Engineers. 2011. ASCE 59-11, *Blast Protection of Buildings*. United States of America.
- Anderson Jr., J. D. 1987. *An overview of theory of hydrocodes*, Int. J. Impact Engineering, vol. 5, 33-59.
- Anderson Jr., J. D. 1995. *Computational Fluid Dynamics: The basics with applications*, McGraw-Hill series in mechanical engineering, McGraw-Hill, Singapura.
- Ansari, M. M., Chakrabarti, A. 2016. *Impact behavior of FRP composite plate under low to hyper velocity impact*, Composites Part B, vol. 95, 462-474.
- ANSYS Autodyn Interactive Non-Linear Dynamic Analysis, software version 15. 2014. User's Manual, SAS IP Inc, EUA.
- 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.
- Arild, J. T. 2005. *Numerical Simulations of Light Armour Piercing Ammunition Against Steel*. FFI RAPPORT, Norwegian Defense Research Establishment, Noruega.

- Bangash, M. Y. H., Bangash. T. (2006). *Explosion-resistant buildings*. Springer-Verlag, Londres, Reino Unido
- Beppu, M., Ohno, T., Ohkubo, K., Li, B. Satoh, K. 2010. *Contact Explosion Resistance of Concrete Plates Externally Strengthened with FRP Laminates*. Int. Journal of Protective Structures, vol. 1, 257-270.
- 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.
- Bornstein, H., Montaya, D., K. Ackland. 2012. *Mitigation of Loads Due Near Field Blast*. Australasian Structural Engineering Conference 2012: The past, present and future of Structural Engineering, 796-803.
- Brannon, R. M. , Leelavanichkul, S. (2009). *Survey of four damage models for concrete*. Report no. SAND2009-5544. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- 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.
- Codina, R. H, Ambrosini, D. Borbón, F. M. 2016a. *Columnas sometidas a explosiones de campo cercano*. XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural, Assunção, Paraguai.
- Codina, R., Ambrosini, D. Borbón, F. 2016b. *Experimental and Numerical Study of a RC Member under a Close-In Blast Loading*. Engineering Structures, vol. 127, 145-106.
- Codina, R., Ambrosini, D., Borbón, F. 2016c. *Alternatives to Prevent failure of RC Members under Close-In Blast Loadings*. Engineering Failure Analysis, vol. 60, 96-106.
- Costa Neto, M. L., Doz, G. 2017. Estudo numérico das pressões de onda de choque em diferentes meios e sua transmissão, Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural, vol. 14, no. 2.
- 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.

- Dobratz, B. M. 1972. *Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants*. Universidade da Califórnia, UCRL-51319, Laboratório Lawrence Livermore, EUA.
- Esteban, B., Gebbeken, N. 2016. *A comparison of numerical modelling strategies in contact detonation scenarios with concrete targets*, Int. J. Comput. Methods Exp. Meas., vol. 4, no. 3, 231–246.
- Zhang, F. R., Wu, C. Q., Wang, H. W., Zhou, Y. 2015. *Numerical simulation of concrete filled steel tube columns against BLAST loads*, Thin-Walled Structures, vol. 92, 82–92.
- Fairlie, G. E. 1998. *The Numerical Simulation of High Explosives Using Autodyn-2D & 3D*. 1998. Institute of Explosive Engineers 4<sup>th</sup> Biannual Symposium.
- Gebbeken, N. and Ruppert, M. 2000. *A New Concrete Material Model for High Dynamic Hydrocode Simulations*, Archive of Applied Mechanics, vol. 70, 463–478.
- Gebbeken, N., Hartmann, T. 2010. *A New Methodology for the Assessment of the EoS Data of Concrete*. International Journal of Protective Structures, vol. 1, 299-317.
- Glasstone, S., Dolan, P. J. 1977. *The effects of nuclear weapons*, terceira edição, United States Department of Defense, EUA.
- Grujic, M., Glomski, P. S., He, G., Arakere, W. C., Cheeseman, B., Cheeseman, B. A. 2009. *Material modeling and ballistic-resistance analysis of armor-grade composites reinforced with high-performance fibers*, Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 18, 1169-1182.
- Hansson, H. 2011. *Warhead Penetration in Concrete Protective Structures*. Royal Institute of Technology, Tese, Estocolmo.
- Hartmann, T., Pietzsch, A., Gebbeken, N. 2010. *A Hydrocode Material Model for Concrete*. International Journal of Protective Structures, vol. 1, no 4, 443-468.
- Headquarters, Department of the Army. 2007. *Explosives and Demolitions, FM 3-34.214*. Estados Unidos.
- Herrmann, W. 1969. *Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials*. J. Appl. Phys., vol. 40, no. 6, 2490–2499.
- Hu, G., Wu, J., Li, L. 2016. *Advanced Concrete Model in Hydrocode to Simulate Concrete Structures under Blast Loading*, Advances in Civil Engineering, 0-13.

- Hub, J., Kneys, P. 2013. *3D Simulation Analysis of Aircraft Protection Material Impacting by 7.62 mm Ammunition*. University Review, vol. 7, 15-19.
- Iannitti, G., Bonora, N., Curiale, G., Muro, S., Marfia, S., Ruggiero, A., Sacco, E., Scafati, Sara., Testa, G. 2018. *Analysis of reinforced concrete slabs under blast loading*, Procedia Structural Integrity, vol. 9, 272-278.
- Kavitha, S., Umadevi, R., Sugandha, N. 2015. *Experimental and numerical simulation of ballistic impact on glass fibre reinforced plastic composite panels*, International Journal of Information Research and Review, vol. 2, no. 4, 606-610.
- Kazemi-Kamyab, V., Subramaniam, K., Andreopoulos, Y. 2011. *Stress transmission in porous materials impacted by shock waves*. Journal of applied Physics, v. 109, n. 1, 109:013523.
- Khan, V. C., Veldanda, A. K., Balaganesan, G., Sivakumar, M S. 2018. *Numerical study on multi layered target material subjected to impact loading*, Latin American Journal of solids and Structures, vol. 15, no. 4, e32.
- Kinney, G. F., Graham, K. J. 1985. *Explosive shocks in air*, Springer Science+Business Media, Second Edition, New York.
- Kitagawa, K., Yasuhara, M., Takayama, K. 2006. Attenuation of shock waves propagating in polyurethane foams, Shock Waves, vol. 15, no. 6, 437-445.
- Kolsky, N. (1963). *Stress Waves in Solids*. Dover Publications, New York.
- Komissarov, P. V., Borisov, A. A., Sokolov, G. N., Lavrov, V. V. 2016. Rigid polyurethane foam as an efficient material for shock wave attenuation, Journal of Physics: Conference Series, vol. 751, no. 1.
- Kot., C. A. 1977. *Spalling of Concrete Walls under Blast Load*. Design and Analysis for Tornado Missile Impact/Design and Analysis for Blast Loading, San Francisco, USA.
- Krauthammer, T. 2008. *Modern Protective Structures*. CRC Press, Florida, USA.
- Krehl, P. O. K. 2009. *History of Shock Waves, Explosions and Impact*, Springer-Verlag, Berlin.
- Kumar, S., Gupta, D. S., Singh, I. Sharma, A. 2010. *Behavior of Kevlar/Epoxy Composite Plates Under Ballistic Impact*, Journal of Reinforced Plastics and composites, vol. 29, no. 13, 2048-2064.
- Le Blanc, G., Adoum, M., Lapoujade, V. 2005. *External Blast Load on Structures – Empirical Approach*. 5th European Ls-Dyna Users Conference, 5c-39.

- Li, B., Nair, A., Kai, Q. 2012. *Residual Axial Capacity of Reinforced Concrete Columns with Simulated Blast Damage*. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, vol. 26, 287-299.
- Li, J., Wu, C., Hao, J., Wang, Z. 2016. *Experimental investigation of ultra-high performance concrete slabs under contact explosions*, International Journal of Impact Engineering, vol. 93, 62-75.
- Li, Jun. Hao, H. 2014. *Numerical Study of Concrete Spall Damage to Blast Loads*. Int. Journal of Impact Engineering, vol. 68, 41-55.
- Luccioni B, Aráoz G. 2011. *Erosion Criteria for Frictional Materials Under Blast Load*. *Mecánica Computacional*. vol. XXX: 1809–1831.
- Luccioni, B. M., Ambrosini, D. 2005. *Blast load assessment using hydrocodes*, Mecánica Computacional Vol. XXIV, Buenos Aires, Argentina.
- 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 v. XXIX*, Buenos Aires, Argentina.
- Luccioni, B. M., Araoz, G. F., Labanda, N. A. 2013. *Defining Erosion Limit for Concrete*. Int. J. Protective structures, vol. 4, no. 3, 315–340.
- Luccioni, B., Isla, F., Ambrosini, D., Zerbino, R., Giaccio, G., Torrijos, M. C. 2017. *Effect of Steel Fibers on Static and Blast Response of High Strength Concrete*. International Journal of Impact Engineering, vol. 107, 23-37.
- Ma, G., Shi, H., Shu, D. 2007. P–I diagram method for combined failure modes of rigid-plastic beams. International Journal of Impact Engineering. vol. 34, 1081-1094.
- Mays G, Smith P. 1995. *Blast Effects on buildings*, London: Thomas Telford, London.
- Millard, S. G., Molyneaux, T. C. K., Barnett, S. J., Gao, X. 2010. *Dynamic enhancement of blast-resistant ultra high performance fibre-reinforced concrete under flexural and shear loading*, Int. J. of Impact Eng., vol. 37, no. 4, 405–413.
- Mohamed, M. E., Eltehawy, E. M., Kamal, I. M., Aggour, A. A. 2009. *Numerical Simulation of Projectile Penetration in Reinforced Concrete Panels*. 13<sup>th</sup> International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology, Cairo, Egito.

- Morishita, M., Asonuma, T., Kuriki, S., Takemoto, K., Saito, K., Matsuo, M. 2006. *Damage of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Standoff Detonations and Effects of Cover Soil as a Shock Absorber*. Doboku Gakkai Ronbunshuu A, vol. 62, no. 4, 865-876.
- Moon, N. N. 2009. *Prediction of Blast Loading and its Impact on Buildings*. MTech. Thesis, National Institute of Technology, Rourkela, India.
- Mostafa, H. E., El-Dakhakhni, W. W., Mekky, W. F. 2010. *Use of reinforced rigid polyurethane foam for blast hazard mitigation*, Reinforced Plastics & Composites, vol. 29, No. 20 ,3048-3057.
- Nagao, Y., Kibe, S., Daigo, K., Hara, A. 2007. *Damage area and residual strenght of a carbon fiber epoxy composite material after subjection to hypervelocity impact*, Journal of the Japan Society for Composite Materials. vol. 35. 15-26.
- Naito, C. ASCE, Olmati, P., Trasborg, P., Davidson, J., Newberry, C. 2014. *Assessment of Insulated Concrete Walls to Close-In Blast Demands*. Journal of Performance of Constructed Facilities, vol. 29.
- Needham C. 2010. Blast Waves. *Shock Wave and High Pressure Phenomena*. New York, Springer-Verlag.
- Ngo, T. Mohotti, D. Remennikov, A. Uy, B. 2014. *Response and failure Mechanism of Tubular Steel Columns Subjected to Close-Range explosions*. 23<sup>rd</sup> Australasian conference on the Mechanics of Structures and Materials, Australia.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J. 2007. Blast Loading and Blast Effects on Structures, *Eletronic Journal of Structural Engineering*, 76-91.
- Nyström, U., Gylltoft, K. 2009. *Numerical studies of the combined effects of blast and fragment loading*. Int. J. Impact Eng., vol. 36, 995–1005.
- Nyström, U., Gylltoft, K. 2011. *Comparative numerical studies of projectile impacts on plain and steel-fibre reinforced concrete*. Int. J. Impact Eng., vol. 38 , p. 99–105.
- Ohkubo, K., Beppu, M., Ohno, T, Satoh, K. 2008. *Experimental study on the effectiveness of fiber sheet reinforcement on the explosive-resistant performance of concrete plates*, International Journal of Impact Engineering, vol. 35, no. 12, 1702-1708.

- Pichandi, S., Rana, S. Oliveira, D. Fangueiro, R. 2013. *Fibrous and Composite Materials for Blast Protection of Structural Elements – A State-of-the-Art Review*. Journal of Reinforced Plastic & Composites, vol. 32, 1477-1500.
- Pierazzo, E., Artemieva, N., Asphaug, E., Baldwin, E. C., Cazamias, J., Cooker, R., Collins, G. S., Crawford, D. A., Davison, T., Elbeshausen, D., Holsapple, K. A., Housen, K. R., Korycansky, D. G., Wunnemann, K. 2008. *Validation of Numerical Codes for Impact and Explosion Cratering: Impacts on Strengthless and Metal Targets*. Meteoritics and Planetary Science, vol. 43, 1912-1938.
- Ramadhan, A. A., Talib, A. R. A, Mohd, A. S., Zahari, R. 2012. *High velocity impact damage in Kevlar29/Epoxy-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*, Journal of Advanced Science and Engineering Research, vol. 2 no.2, 138-154.
- Razaqpur, A. G., Tolba, A., Contestabile, E. 2007. *Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates*, Composites Part B: Engineering, vol 38, no. 5-6, 535-546.
- Remennikov, A. M., Mentus, I., Uy, B. 2015. *Explosive breaching of walls with contact charges: theory and applications*, Int. J. of Protective Structures, vol. 6, no. 4, 629–647.
- Remennikov, A. M., Uy, B. 2014. *Explosive testing and modelling of square tubular steel columns for near-field detonations*, J. Constr. Steel Res., vol. 101, 290–303.
- Riedel, W., Nahme, H., White, D. M., Clegg, R. A. 2006. *Hypervelocity impact damage prediction in composites: Part II – experimental investigations and simulations*, International Journal of Impact Engineering, vol. 33, 670-680.
- Robertson N, Hayhurst C, Fairlie G. 1994. *Numerical simulation of impact and fast transient phenomena using AUTODYN™-2D and 3D*. Nuclear Engineering and Design. vol. 150, 235-241.
- Salas, M. D. 2006. *The Curious Events Leading to the Theory of Shocks Waves*. 17<sup>th</sup> Shock Interaction Symposium, Roma, Itália.
- Shen, J., Ren, X. 2013. *Experimental Investigation on Transmission of Stress waves in Sandwich Samples Made of Foam Concrete*. Defence Technology, vol. 9, no. 2, 110-114.
- Showichen, A. 2008. *Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions*. College of Defence Management and Technology, tese, Reino Unido.

- Siba, F. 2014. *Near-Field Explosion Effects on reinforced Concrete Columns: An Experimental Investigation*. M Sc. Thesis, Carleton University, Ottawa, Canada.
- Silva M, Cismaşiu C, Chiorean C. 2005. *Numerical simulation of ballistic impact on composite laminates*. International Journal of Impact Engineering, vol 31, 289-306.
- Silva, W. C. L. 2007. *Blast- Efeitos da Onda de Choque no Ser Humano e nas Estruturas*, Tese de Mestrado, 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.
- Steinberg, D. J., Cochran, S. G., Guinan, M. W. 1980. *A constitutive model for metals applicable at high-strain rate*, J. Applied Physics, vol. 51, 1498-1503.
- Tanaka, H., Morishita, M., Ito, T., Yamaguchi, H. 2001. *Effects of detonation points on the damage of reinforced concrete slabs*, Doboku Gakkai Ronbunshu, vol. 2001, no. 675, 297-312.
- Tanaka,H. Tuji, M. (2003). *Effects of Reinforcing on Damage of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Explosive Loading*. Concrete Research and Technology, v. 14, n. 1, p.1-11.
- Tawadrous R, Attia W, Laissy M. 2014. *Investigating projectile penetration of concrete blocks reinforced by ceramics*. WIT Trans. Built Environ, vol. 141, 113–124.
- Tejaswi, U. V., Ramesh, V. 2015. *Evaluating the Effects Underground Explosions on Structures*. International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies. Vol.8, 17-22.
- Timoshenko, S., Goodier, J. N. *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill book Company, New York.
- Troup, S., Xiao, R. Y., Moy, S. S. J. 1998. *Numerical Modelling of Extended Endplate and Composite Flush Endplate Connections*. Thin-Walled Structures: Research and Development, 543-552.
- Tu, Z., Lu, Y. 2010. *Modifications of RHT Material Model for Improved Numerical Simulation of Dynamic Response of Concrete*. International Journal of Impact Engineering, vol. 37, 1072-1082.
- Tu, Z.G., Lu Y. 2009. *Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations*. Int. J. Impact Eng., vol. 36, 132-146.
- 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.
- Versteeg, H. K., Malalasekera, W. 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, Harlow, Inglaterra.
- 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, vol. 8, no. 9 , 1520-1530.
- Wendt, J. F. 2009. *Computational Fluid Dynamics*, Springer, Heidelberg.
- Westerling, L. 2004. *Test of the Implementation of the Johnson-Cook Model in Autodyn*. Swedish Defence Agency, Methodology report, Estocolmo.
- Williams, E., Akers, S., Reed, P. 2006. *Laboratory Characterization of SAM-35 Concrete Geotechnical and Structures*. U. S. Army Engineer Research and Development Center.
- Wu, K. C., Li, B, T, K. C. 2011. *The effects of explosive mass ratio on residual compressive capacity of contact blast damaged composite columns*. Journal of Constructional Steel Research, vol. 67, 602-612.
- Xu, K., Lu. Y. 2006. *Numerical simulation study of spallation in reinforced concrete plates subjected to blast loading*. Computers & Structures. vol. 84, 431-438.
- Shi, Y., Xiong, W., Li, Z. X., Xu, Q. 2016. *Experimental studies on the local damage and fragments of unreinforced masonry walls under close-in explosions*. International Journal of Impact Engineering, vol. 90, 122–131.
- Yamaguchi, M., Murakami, K., Takeda, K., Mitsu, Y. 2011. *Blast resistance of polyethylene fiber reinforced concrete to contact detonation*, Journal of Advanced Concrete Technology, Japan concrete Institute, vol. 9, no.1, 63-71.
- Yan, Q. 2015. *Numerical Simulation of Subway Station Structure Subjected to Terrorism Bombing*. The Open Civil Engineering Journal, vol. 9, 688-692.
- Yu, X., Chen, Q., Hou, X., Fan, Y. 2018. *Blast mitigation effect of the layered concrete structure with an air gap: A numerical approach*. International Journal of Protective Structures, vol. 9, no.4, 432-460.

Yue, S., Qiu, Y., Zhang, N., Wang, M. 2017. *Analytical study of local damage on concrete slab subjected to a contact explosion*. Int. Journal of Vibroengineering, vol. 19, 908-929.

Zhang, D., Yao, S., Lu, F. Chen, X. Lin, G., Wang, W., Lin, Y. 2013. *Experimental study on scaling of RC beams under close-in blast loading*. Engineering Failure Analysis, vol. 33, 497-504.

Zhang, J. Jiang, S., Chen, B., Li, C., Qin, H. 2016. *Numerical Study of Damage Modes and Damage Assessment of CFST Columns under Blast Loading*. Shock and Vibration, 12 pag.