



**Universidade Federal do Rio de Janeiro**  
**Escola Politécnica**  
**Programa de Projeto de Estruturas**

Juliana Sousa de Araujo Anelli

**DETERMINAÇÃO DO CARREGAMENTO EM UM PRÉDIO  
SUBMETIDO À ONDA DE CHOQUE DECORRENTE DE UMA  
EXPLOSÃO**



UFRJ

Juliana Sousa de Araujo Anelli

DETERMINAÇÃO DO CARREGAMENTO EM UM PRÉDIO  
SUBMETIDO À ONDA DE CHOQUE DECORRENTE DE UMA  
EXPLOÇÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Orientador:

Sérgio Hampshire de Carvalho Santos

Rio de Janeiro

2018

Anelli, Juliana Sousa de Araujo

Determinação do carregamento em um prédio submetido à onda de choque decorrente de uma explosão / Juliana Sousa de Araujo Anelli – 2018.

79: 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2018.

Orientador: Sérgio Hampshire de Carvalho Santos

1. Fenômeno da Explosão, 2. Carregamento de Explosão, 3. Sobrepressão da Onda de Choque. I. Santos, Sergio Hampshire de Carvalho II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. III. Título.

DETERMINAÇÃO DO CARREGAMENTO EM UM PRÉDIO  
SUBMETIDO À ONDA DE CHOQUE DECORRENTE DE UMA  
EXPLOSÃO.

Juliana Sousa de Araujo Anelli

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Aprovada pela Banca:

---

Prof. Sergio Hampshire de Carvalho Santos, D. Sc., UFRJ

---

Prof. Silvio de Souza Lima, D. Sc., UFRJ

---

Prof. Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho, D. Sc, PUC-RJ

---

Julio Cesar Gonçalves da Silva, D. Sc., COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro

2018

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, o Criador, que tornou tudo possível. Até aqui Ele me ajudou.

Ao meu esposo amado, pela paciência, compreensão, apoio e amor incondicional.

Aos meus pais, pelo investimento que fizeram em mim, me incentivando e apoiando em todos os momentos.

À Marinha do Brasil pela oportunidade de realizar este Mestrado.

Ao meu orientador, Sergio Hampshire, pela paciência, disposição e conhecimento transmitido.

Ao Major Letivan, do IME, pela prestatividade e conhecimento transmitido.

Ao amigo e colega de trabalho William Koeller, que labutou comigo desde o início deste Mestrado.

## RESUMO

ANELLI, Juliana Sousa de Araujo. **Determinação do carregamento em um prédio submetido à onda de choque decorrente de uma explosão.** Rio de Janeiro. 2018. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.

O fenômeno de explosão tem sido estudado, ao longo de anos, visando conhecer seu comportamento para prever e evitar danos. Durante muito tempo essas pesquisas estiveram limitadas ao âmbito militar, devido aos aspectos de segurança nacional. Dentro da Engenharia, esses estudos muitas vezes estão relacionados a estruturas de proteção, onde o foco é conhecer o fenômeno, visando projetos com desempenho eficiente na resistência aos efeitos da explosão. Ao se chocar contra uma edificação existente, a onda de choque devida à explosão poderá provocar danos em sua estrutura, bem como causar danos aos humanos no local. Os principais efeitos da energia de explosão a serem considerados na análise de uma estrutura, no caso de explosões acidentais, são as sobrepressões, os fragmentos e as cargas de choque. Desses três fatores, as sobrepressões são geralmente o dominante na determinação da resposta estrutural de uma edificação. O presente trabalho visa determinar o carregamento de explosão (sobrepressão) na fachada frontal de uma estrutura retangular sem aberturas, situada acima do solo, submetida a uma onda de choque. Para tal, apresenta a determinação dos parâmetros de explosão e o cálculo do carregamento. Por fim, apresenta uma ferramenta computacional para a obtenção dos parâmetros de explosão confinada e a elaboração do gráfico do histórico do carregamento para utilização na análise estrutural.

Palavras-chave: Fenômeno de explosão; carregamento de explosão; sobrepressão da onda de choque

## ABSTRACT

ANELLI, Juliana Sousa de Araujo. **Determination of the loading on a building subjected to the shock wave resulting from an explosion.** Rio de Janeiro. 2018. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.

The phenomenon of explosion has been studied, over the years, aiming to know its behavior for predicting and avoiding damages. During a long time these investigations have been limited to the military scope, due to the aspects of national security. In Engineering, these studies are often related to protection structures, where the focus is to know the phenomenon for designing with efficient performance, resisting the effects of the explosion. When attaining an existing building, the shock wave could cause damage to its structure as well as cause damage to humans on the spot. The main effects of the explosion energy to be considered in the analysis of a structure, in case of accidental explosions are overpressures, fragments and shock loads. Of these three effects, overpressures are generally the dominant factor in determining the structural response of a building. The present work aims to determine the explosion loading (overpressure) on the front wall of a rectangular structure without openings, above the ground, subjected to a shock wave. The determination of the parameters of explosion and the calculation of the loading is herein presented. Finally, a computational tool for obtaining the parameters of confined explosion and the elaboration of the graphs of the load histories for using in the structural analysis is presented.

Keywords: Phenomenon of the explosion; blast loading; shock wave overpressure

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Propósito .....	2
1.2	Breve histórico de acidentes militares .....	2
1.3	Revisão Bibliográfica .....	4
1.4	Organização do trabalho .....	5
1.5	Metodologia .....	5
2	FENÔMENO DE EXPLOSÃO .....	6
2.1	Deflagração e Detonação .....	6
2.1.1	Explosivos Sólidos .....	7
2.2	Ondas de choque .....	9
2.2.1	Reflexão das Ondas de Choque .....	11
3	EFEITOS DE UMA EXPLOSÃO .....	12
3.1	Efeito de explosão nas estruturas .....	12
3.2	Efeitos no ser humano .....	15
4	DETERMINAÇÃO DAS PRESSÕES DEVIDAS A EXPLOSÕES DE ACORDO COM O MANUAL DO UNIFIED FACILITES CRITERIA (UFC, 2008) .....	17
4.1	Propósito e objetivo .....	17
4.2	Escopo .....	18
4.3	Fator de segurança .....	18
4.4	TNT equivalente .....	19
4.5	Categorias de carregamento explosivo .....	19
4.5.1	Explosões não confinadas .....	21

4.5.2	Explosões confinadas .....	21
4.6	Proteção contra o carregamento explosivo.....	22
4.7	Fenômeno da onda explosiva .....	23
4.7.1	Explosão não confinada.....	25
4.7.2	Explosões confinadas .....	39
4.8	Carregamento de explosão externa em estruturas .....	42
4.8.1	Forças agindo na estrutura.....	42
4.8.2	Estrutura retangular sem aberturas acima do solo .....	45
5	BLAST EFFECTS COMPUTER (BEC) – UTILIZAÇÃO DO MICROSOFT EXCEL PARA CÁLCULO DOS EFEITOS EXPLOSIVOS NO COMPUTADOR.....	51
5.1	Utilizando o programa.....	51
5.2	Exemplo de cálculo .....	54
6	CARREGAMENTO DE EXPLOSÃO PARA ANÁLISE DE ESTRUTURA RETANGULAR SEM ABERTURAS ACIMA DO SOLO.....	56
6.1	Exemplo de cálculo .....	57
7	CONCLUSÃO .....	63
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64
9	SÍTIOS DA INTERNET.....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplos de comportamentos de deflagrações - Pressão x tempo (SANTIAGO, 2003 apud CASAGRANDE, 2006).....	6
Figura 2.2 - Exemplo de comportamento de uma detonação do ponto de vista de um alvo (SANTIAGO, 2003 apud CASAGRANDE, 2006). .....	7
Figura 2.3 - Desenvolvimento da onda de choque gerada por uma explosão (KINNEY & GRAHAM, 1985 apud CASAGRANDE, 2006).....	9
Figura 2.4 - Função pressão-distância de uma explosão (KINNEY & GRAHAM, 1985 apud NETO, 2015). .....	9
Figura 2.5 - Ilustração das fases de uma explosão e seus efeitos sobre estruturas alvo (KINNEY & GRAHAM, 1985 apud CASAGRANDE, 2006). .....	10
Figura 2.6 - Efeito da detonação no ar formando Onda Mach (SILVA, 2007).....	11
Figura 3.1 – Estimativa de danos sobre uma edificação, modificado SILVA (2007)....	14
Figura 3.2 – Distância de segurança contra os efeitos diretos de uma onda de choque sobre o ser humano, modificado SILVA (2007). .....	16
Figura 3.3 – Principais danos causados pelos efeitos diretos da onda de choque sobre o homem , modificado SILVA (2007).....	16
Figura 4.1 – Categorias de cargas explosivas, adaptado do Manual UFC (2008).....	20
Figura 4.2 – Variação pressão vs. tempo em campo livre, adaptado do UFC (2008). ...	23
Figura 4.3 – Pico da pressão incidente versus pico da pressão dinâmica, densidade do ar atrás da frente de choque e velocidade da partícula, adaptado do UCF (2008). .....	24
Figura 4.4 – Ambiente de explosão ao ar livre, adaptado do Manual UFC (2008).....	25
Figura 4.5 – Variação pressão versus tempo para uma explosão ao ar livre, adaptado do UFC (2008).....	26

Figura 4.6 – Relação entre pressão normal refletida e pressão incidente, para uma explosão ao ar livre, versus o pico da pressão incidente, adaptado do UFC (2008). ....	27
Figura 4.7 – Parâmetros da onda de choque para explosão esférica de TNT ao ar livre no nível do mar, adaptado do UFC (2008). .....	28
Figura 4.8 – Parâmetros de choque da pressão negativa para explosão esférica ao ar livre de TNT no nível do mar, adaptado do UFC (2008). .....	29
Figura 4.9 – Variação da pressão refletida versus ângulo de incidência, adaptado do UFC (2008). .....	31
Figura 4.10 – Variação do impulso refletido escalonado versus ângulo de incidência, adaptado do UFC (2008). .....	32
Figura 4.11 – Ambiente de explosão no ar, adaptado do UFC (2008). .....	33
Figura 4.12 – Variação pressão versus tempo para explosão no ar, adaptado do UFC (2008). .....	33
Figura 4.13 – Altura Escalonada do Ponto Triplo, adaptado do UFC (2008). .....	34
Figura 4.14 – Ambiente de explosão na superfície, adaptado do UFC (2008). .....	36
Figura 4.15 – Parâmetros da onda de choque da fase positiva para explosão de TNT na superfície do solo, ao nível do mar, adaptado do UFC (2008). .....	37
Figura 4.16 – Parâmetros de choque da pressão negativa para explosão de TNT na superfície do solo ao nível do mar, adaptado do UFC (2008). .....	38
Figura 4.17 – Explosão em estruturas confinadas, adaptado do UFC (2008). .....	40
Figura 4.18 – Variação pressão-tempo idealizada, adaptado do UFC (2008). .....	43
Figura 4.19 – Carregamento da parede frontal, adaptado do UFC (2008) .....	46
Figura 4.20 – Velocidade do som em regiões de sobrepressão refletida versus o pico da sobrepressão incidente, adaptado do UFC (2008). .....	47

Figura 4.21 – Coeficiente de pressão refletida versus ângulo de incidência (UFC, 2008). .....	49
Figura 4.22 – Impulso refletido escalonado versus ângulo de incidência, adaptado do UFC (2008).....	49
Figura 4.23 – Impulso refletido escalonado versus ângulo de incidência, adaptado do UFC (2008).....	50
Figura 5.1 – Caixa de diálogo <i>Goal Seek</i> (BEC, 2000).....	53
Figura 5.2 – Exemplo de cálculo – Saída e Entrada (BEC, 2000). ....	54
Figura 6.1 – Onda de choque incidindo na fachada frontal da estrutura.....	56
Figura 6.2 – Exemplo de retirada do parâmetro “Pressão Refletida” do gráfico da Figura 4.15, modificado do UFC (2008).....	58
Figura 6.3 – Exemplo de retirada do parâmetro “Impulso Refletido” do gráfico da Figura 4.16, modificado do UFC (2008). ....	59
Figura 6.4 – Exemplo de retirada da “Velocidade do som” do gráfico da Figura 4.20, modificado do UFC (2008).....	60
Figura 6.5 – Exemplo de retirada da “Pressão Dinâmica” do gráfico da Figura 4.3, modificado do UFC (2008).....	61
Figura 6.6 – Exemplo do gráfico da fase positiva de um histórico de pressão. ....	62
Figura 6.7 – Exemplo do gráfico completo de um histórico de pressão .....	62

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Classes de danos causadas pelas explosões nas estruturas (KINNEY e GRAHAM, 1985 apud NETO, 2015).....	13
Tabela 3.2 – Danos causados a edificações por diferentes sobrepressões incidentes. (APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL, 2003 apud NETO, 2015).....	14
Tabela 3.3 – Danos causados diretamente aos seres humanos devidos às explosões (KINNEY e GRAHAM, 1985 apud SILVA, 2007). .....	15
Tabela 5.1 – Saída da tabela resumo (BEC, 2000).....	55
Tabela 6.1 – Dados do exemplo .....	57

# 1 INTRODUÇÃO

---

Nos tempos atuais, na chamada “Era da Informação Digital”, vivenciamos quase que diariamente notícias de acidentes cujo ponto central é a ocorrência de uma explosão, seja em acidentes na indústria, seja em atentados terroristas, frequentes na Europa e Oriente Médio, com homens ou carros bomba que explodem no meio da rua, ou nos frequentes ataques a caixas eletrônicos nos estados brasileiros, como Rio de Janeiro e São Paulo, por exemplo.

Ao longo dos anos tem-se estudado o fenômeno de explosão, visando conhecer seu comportamento para prever e evitar danos. Durante muito tempo essas pesquisas estiveram limitadas ao âmbito militar, devido ao aspecto de segurança nacional.

Na ocorrência de acidentes relacionados com explosivos militares, por exemplo, é liberada uma grande quantidade de energia, que se propaga rapidamente pelo meio, água ou ar, provocando variações de pressão, com velocidades superiores à do som. Esta frente de onda, com elevada pressão dinâmica e velocidade supersônica, é conhecida como onda de choque, sopro ou “Blast Effect”. (SILVA *et al.*, 2007).

Ao se chocar contra uma edificação existente, a onda de choque poderá provocar danos na sua estrutura, bem como causar danos aos seres humanos no local.

Dentro da Engenharia, esses estudos muitas vezes estão relacionados às estruturas de proteção, nas quais o foco em conhecer o fenômeno são projetos com desempenho eficiente na resistência aos efeitos da explosão.

Os principais efeitos da energia de explosão a serem considerados na análise de uma estrutura, no caso de explosões acidentais, são as sobrepressões, os fragmentos e as cargas produzidas pelas ondas de choque, que causam movimentos vibratórios, transitórios ou de curta duração, na superfície do solo e na estrutura. Desses três fatores, as sobrepressões são geralmente o fator dominante na determinação da resposta estrutural de uma edificação. Entretanto, em algumas situações, os fragmentos podem ser tão importantes quanto as pressões, dependendo da configuração da instalação. As cargas de choque podem não causar danos estruturais significativos, mas, induzem um movimento que pode danificar equipamentos e deslocar componentes internos da

edificação como, por exemplo, forros, divisórias e luminárias, podendo ainda causar ferimentos às pessoas.

Neste trabalho o estudo apresentado se aterá as sobrepressões das ondas de choque.

### **1.1 Propósito**

O objetivo deste trabalho é determinar o carregamento (considerando apenas o efeito da sobrepressão) na fachada frontal de um prédio submetido à onda de choque decorrente de uma explosão de alto explosivo.

### **1.2 Breve histórico de acidentes militares**

Os paióis de munição são pontos sensíveis à ocorrência de explosões e seguem normas e critérios rigorosos quanto à construção, instalação, distâncias de segurança, armazenagem de material, monitoramento de temperatura e umidade, etc.

As informações sobre explosões acidentais relatadas a seguir mostram a importância de se ter o conhecimento da área de influência de uma explosão para proteção de pessoas e estruturas.

#### ***30 de abril de 1931***

Acidente ocorrido no antigo Centro de Armamento da Marinha, na Ponta da Armação em Niterói-RJ, vitimou 47 servidores civis e militares na explosão nas instalações daquele Centro, fato ocorrido durante carregamento de bombas de aviação (MARINHA DO BRASIL, 2017).

#### ***2 de agosto de 1958***

Uma série de explosões fez estremecer todo o bairro de Deodoro. Foram mais de 72 horas de explosões nos paióis do Depósito Central de Armamento e Munição do Exército, situado em Deodoro, bairro da Zona Oeste do Rio de Janeiro. Projéteis foram lançados ao ar pelas explosões, entre balas de fuzis e granadas.

Os deslocamentos de ar produzidos pelos repetidos estouros das granadas tiveram reflexos em muitos bairros, mesmo os mais distantes, como Leblon e Copacabana. No

Grajaú e em Vila Isabel ocorreram rachaduras no reboco de paredes de diversas casas, e muitas vidraças foram quebradas.

Os bairros limítrofes a Deodoro tinham aspecto de cidades bombardeadas: paredes arrebitadas, vidraças esvaçadas, telhados destruídos. Muitos destroços ficaram espalhados pela Avenida das Bandeiras.

O Depósito Central de Armamento e Munição era considerado o maior da América do Sul. Possuía 10 paióis e 60 depósitos de armamento bélico. (BLOG DO GIL, 2016).

### ***16 de julho de 1995***

A explosão em três paióis de munição no Rio de Janeiro deixou 23 militares feridos. A explosão fortíssima provocou um forte abalo nas áreas adjacentes à Baía de Guanabara, principalmente na Ilha do Governador e outros bairros da cidade, além de Niterói e São Gonçalo, num raio de 50 quilômetros.

Segundo a Marinha, os paióis eram semienterrados e com paredes reforçadas. Proprietários de casas e apartamentos em vários bairros da cidade tiveram prejuízos com vidros quebrados, paredes rachadas e danificadas. (FOLHA DE SÃO PAULO, 2016)

### ***19 de março de 2013***

Uma explosão em um paiol de munições do Exército no deserto de Nevada, no oeste dos Estados Unidos, matou sete fuzileiros navais e deixou outros sete feridos durante um treinamento. (REUTERS BRASIL, 2016)

### ***16 de agosto de 2016***

Um paiol da Indústria de Material Bélico do Brasil (IMBEL) em Juiz de Fora explodiu, não havendo registro de feridos e mortos. De acordo com o Corpo de Bombeiros, um paiol que fica ao lado teve o telhado danificado. A onda de choque causou danos em várias residências e em alguns veículos. A explosão quebrou vidros de janelas de casas e de carros, além de causar o deslocamento de telhas e danos em portas no entorno da fábrica. (JORNAL O GLOBO, 2018)

### 1.3 Revisão Bibliográfica

Este tópico visa apresentar algumas das principais contribuições de trabalhos de pesquisa realizados sobre explosões e seu impacto sobre estruturas.

Em 1985, Kinney e Graham abordaram o fenômeno da explosão sob diferentes pontos de vista. Trataram da formação da onda de choque e de métodos para o cálculo do carregamento oriundo desta. Estudaram também a resposta das estruturas submetidas a explosão e citaram algumas formas de protegê-las, visando minimizar os efeitos destrutivos (NETO, 2015).

Em 1990, foi elaborado pelo *Department of the Army, the Navy and the Air Force* um trabalho objetivando o projeto de estruturas resistentes aos efeitos de uma explosão. A obra apresenta, dentre outras informações, estudos sobre explosões, fragmentos, propagação da onda de choque, cálculo das pressões e avaliação das respostas estruturais. Aborda também os critérios de projeto que podem ser adotados para estruturas de concreto e de aço submetidas a esse carregamento (NETO, 2015).

NGO *et al.* (2007) elaboraram um trabalho em que apresentam uma visão abrangente dos efeitos de uma explosão na estrutura, o mecanismo de ondas de choque ao ar livre e alguns métodos para estimar cargas explosivas e resposta estrutural.

SILVA (2007) abordou os fundamentos teóricos dos explosivos químicos e os efeitos de uma detonação sobre as estruturas. Descreveu também os efeitos das ondas de choque sobre as pessoas.

KOCCAZ *et al.* (2008) apresentam uma abordagem estrutural e arquitetônica para o aumento da capacidade de um edifício resistir aos efeitos da explosão.

Em 2010, Graham desenvolveu um trabalho em que apresenta, entre outras informações, a descrição do fenômeno de reflexão de ondas e o estudo experimental de explosões a céu aberto com técnicas de medição de sobrepressão, da massa específica do fluido (ar), da velocidade da onda, entre outras. Graham contribuiu muito para o conhecimento do fenômeno de explosões, apresentando inclusive uma descrição da reflexão de ondas de choque apoiada por imagens de experimentos relacionados (NETO, 2015).

Deste modo, observa-se um aprofundamento dos estudos e a importância da obtenção do conhecimento do fenômeno das explosões e de sua interação com as estruturas, bem como do desenvolvimento das técnicas construtivas e de critérios de projeto que visem minimizar os danos causados.

#### **1.4 Organização do trabalho**

Inicialmente é apresentado o fenômeno da explosão e seus efeitos nas estruturas e no ser humano. Nos capítulos seguintes são apresentados: a determinação dos parâmetros de explosões, o cálculo do carregamento de explosão para a fachada frontal de uma estrutura retangular sem aberturas e a utilização de uma ferramenta computacional para a obtenção dos parâmetros de explosões confinadas. Ao fim do trabalho, é apresentado um exemplo de cálculo com a determinação do histórico completo do carregamento de explosão, para fins de projeto, e a conclusão com sugestões para pesquisas futuras.

#### **1.5 Metodologia**

O presente trabalho visa determinar o carregamento (considerando apenas o efeito da sobrepressão) na fachada frontal de uma estrutura retangular sem aberturas, situada acima do solo, submetida a uma onda de choque decorrente de uma explosão de alto explosivo, cuja frente é considerada plana. Para tal, se utiliza o Manual Americano UFC - UNIFIED FACILITIES CRITERIA (2008) para a determinação dos parâmetros de explosão não confinada e o cálculo do carregamento. Apresenta-se ainda a ferramenta computacional “*Blast Effects Computer*” (BEC) para obtenção dos parâmetros de explosão confinada, de acordo com o UFC (2008).

Este trabalho tem sequência e é complementado por outra Dissertação no Programa de Projeto de Estruturas da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPE/ UFRJ), desenvolvida por KOELLER (2018), que apresenta a análise e verificação estrutural de um edifício submetido à onda de choque decorrente de uma explosão aqui determinada.

## 2 FENÔMENO DE EXPLOSÃO

---

Explosão é um fenômeno caracterizado por uma súbita liberação de energia com deslocamento de grande volume de gases, impondo mudanças bruscas de temperatura e pressão. Pode ser classificada como Nuclear, Mecânica e Química.

Este trabalho trata de explosões químicas, ocasionadas por reações físico-químicas de combustão, onde a velocidade extremamente alta da reação propicia a liberação repentina de energia, acompanhada de altas pressões e temperatura. Esta energia liberada na combustão pode ser propagada por duas formas, por deflagração e por detonação (NETO, 2015).

### 2.1 Deflagração e Detonação

A deflagração se propaga por condutividade térmica das porções da mistura de explosivo, onde já ocorreu a reação de combustão para aquelas ainda não reagidas, com velocidade de propagação da reação inferior à do som no ar (343 m/s), podendo apresentar a formação de onda de choque, que via de regra, viaja com a velocidade do som (Figura 2.1).

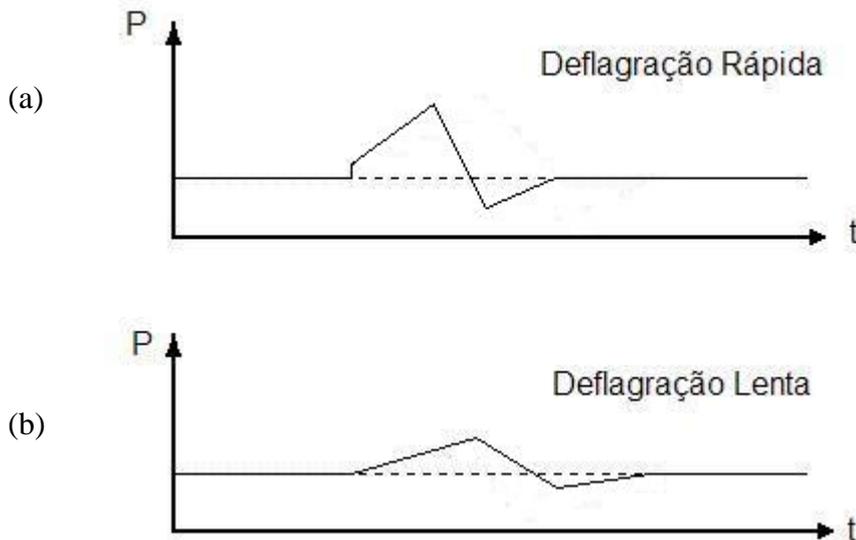


Figura 2.1 - Exemplos de comportamentos de deflagrações - Pressão x tempo (SANTIAGO, 2003 apud CASAGRANDE, 2006).

Já a detonação tem a velocidade e propagação supersônica e sempre será acompanhada de uma onda de choque, em virtude da quantidade de energia envolvida no processo (Figura 2.2). Segundo SILVA (2007), “é esta onda de choque que, com sua frente de elevada pressão, confere a detonação um enorme poder de ruptura”. É importante ressaltar que na detonação a reação ocorre pela passagem da onda de choque no meio.

Como exemplo de explosivo químico que desenvolve uma explosão por detonação, logo, com velocidade de reação supersônica, tem-se o TNT (Trinitrotolueno).

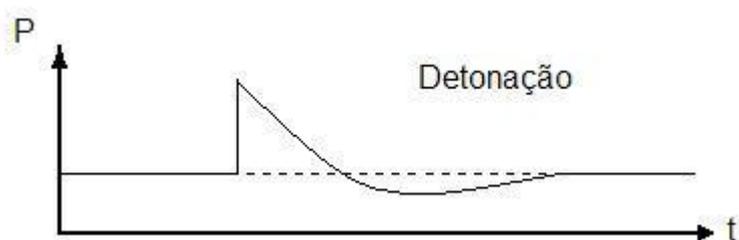


Figura 2.2 - Exemplo de comportamento de uma detonação do ponto de vista de um alvo (SANTIAGO, 2003 apud CASAGRANDE, 2006).

### 2.1.1 Explosivos Sólidos

Os explosivos sólidos são divididos em “alto explosivo” (HE - *High Explosive*) e “baixo-explosivo” (LE - *Low Explosive*). A diferença entre eles está na velocidade da queima: enquanto no HE a velocidade da queima é maior que a do som, no LE esta velocidade é subsônica.

Os altos explosivos são classificados, quanto à sensibilidade, como primários ou secundários: os primários têm alta sensibilidade ao choque mecânico, calor e atrito, enquanto que os secundários, possuindo baixa sensibilidade a estes fatores, são iniciados somente por choque de alta intensidade, produzindo grande quantidade de gases. O TNT é um explosivo do grupo secundário.

Em relação às misturas gasosas, os explosivos sólidos possuem grande diferença de densidade, logo tem um volume muito menor para cargas semelhantes. Pode-se então considerá-los como uma carga concentrada, que vai gerar uma onda de pressão esférica

no ar. A partir deste pressuposto, o volume atingido pelos efeitos da explosão no tempo vai depender da distância até o centro da explosão ao cubo ( $R^3$ ).

Determina-se então uma distância escalonada ( $Z$ ) a qual representa uma lei de escala para a explosão de sólidos (HOPKINSON-CRANZ, 1926 apud CASAGRANDE, 2006):

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (2-1)$$

Onde  $W$  é a massa do explosivo equivalente em TNT em quilos.

Uma regra empírica geral pode ser definida para a distância mínima segura, utilizando os mesmos fundamentos (KINNEY & GRAHAM, 1985 apud CASAGRANDE, 2006):

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

Onde:

$r_{seg}$  é uma distância radial mínima em metros do local do centro da explosão para garantir a segurança de pessoas e estruturas. Pode ser utilizada para estudos experimentais, quando o objetivo for uma aproximação rápida.

Porém, no caso de se avaliar os efeitos sobre estruturas, é necessário fazer uso de cálculos mais aprofundados.

Na utilização da lei de escala, o TNT é adotado como referência para explosivos, devido a sua boa reprodutibilidade em ensaios de explosão e, principalmente, ao material que é puro quimicamente (KINNEY & GRAHAM, 1985 apud CASAGRANDE, 2006). Desta forma, os explosivos têm suas massas convertidas para a massa de TNT e convertidas para “massas equivalentes”.

## 2.2 Ondas de choque

A onda de choque é gerada quando uma liberação súbita de grande quantidade de energia em um dado volume ocorre com velocidade superior à do som no meio (GRAHAM, 2010 apud NETO, 2015).

Uma região de pressão alterada é formada ao redor do material explosivo, iniciada normalmente em forma hemisférica (Figura 2.3a), e desloca-se radialmente do centro da explosão (epicentro), Figura 2.3b, assumindo a forma apresentada na Figura 2.3c, na medida em que se afasta deste ponto central. Essa frente de onda é denominada onda de choque.

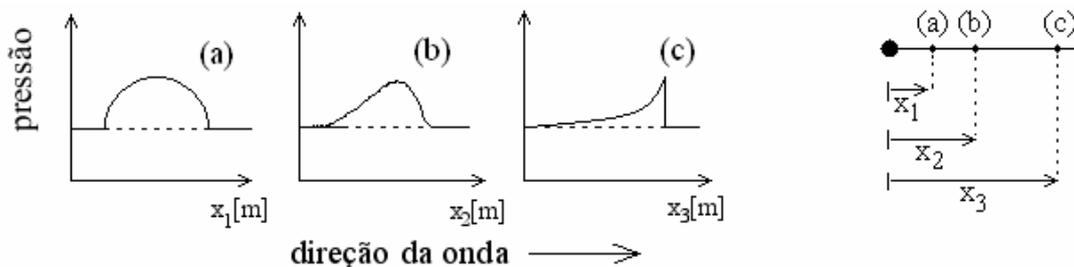


Figura 2.3 - Desenvolvimento da onda de choque gerada por uma explosão (KINNEY & GRAHAM, 1985 apud CASAGRANDE, 2006).

Durante a propagação da onda de choque pelo ar, há uma redução considerável das pressões em função da distância percorrida, pois a energia vai sendo perdida (Figura 2.4). Ocorre também uma fase de pressão negativa (sucção), como pode ser observado na curva (4) da Figura 2.4.

Este efeito de sucção (pressão abaixo da atmosférica) deve-se à contração dos fluidos que expandiram na explosão para proporcionar o equilíbrio do sistema.

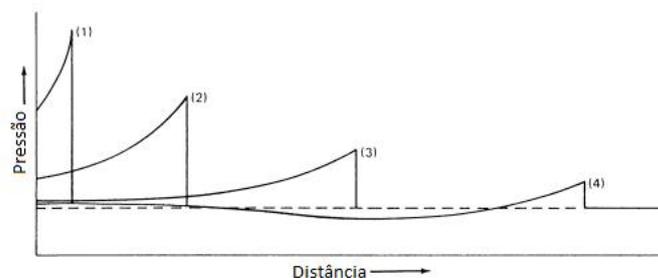


Figura 2.4 - Função pressão-distância de uma explosão (KINNEY & GRAHAM, 1985 apud NETO, 2015).

A Figura 2.5 abaixo ilustra as fases da passagem de uma onda de choque sobre um alvo, onde se observa: a situação inicial normal (fase A); o pico de sobrepressão, após a detonação do explosivo (fase B); um decréscimo em forma similar à logarítmica até a fase de pressão “negativa” (fase C); e a estabilização, como tendência natural, atingindo novamente a pressão atmosférica (fase D).

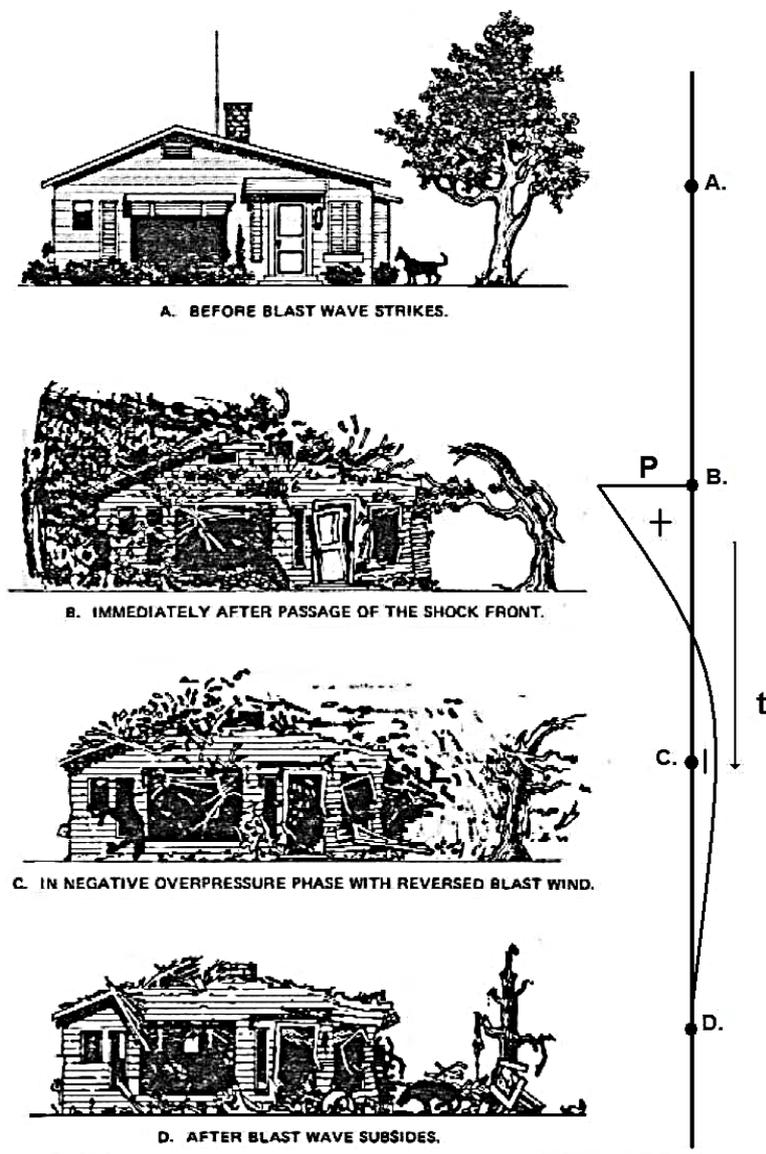


Figura 2.5 - Ilustração das fases de uma explosão e seus efeitos sobre estruturas alvo (KINNEY & GRAHAM, 1985 apud CASAGRANDE, 2006).

A incidência da onda de choque sobre corpos gera reflexões que também devem ser consideradas, modificando a forma como a pressão é aplicada nos diferentes pontos de tais corpos.

O efeito da onda de choque pode causar danos mais sérios em uma edificação do que os originados por fragmentos (TECHNICAL MANUAL No 9-1300-214, 1967 apud LIMA, 2009).

### 2.2.1 Reflexão das Ondas de Choque

Uma detonação no ar é ilustrada na Figura 2.7, onde se observa a onda de choque incidente sendo refletida no solo. Observa-se também que uma onda de intensidade maior que a incidente é formada quando esta encontra com a onda refletida. Esta onda é chamada de Onda Mach.

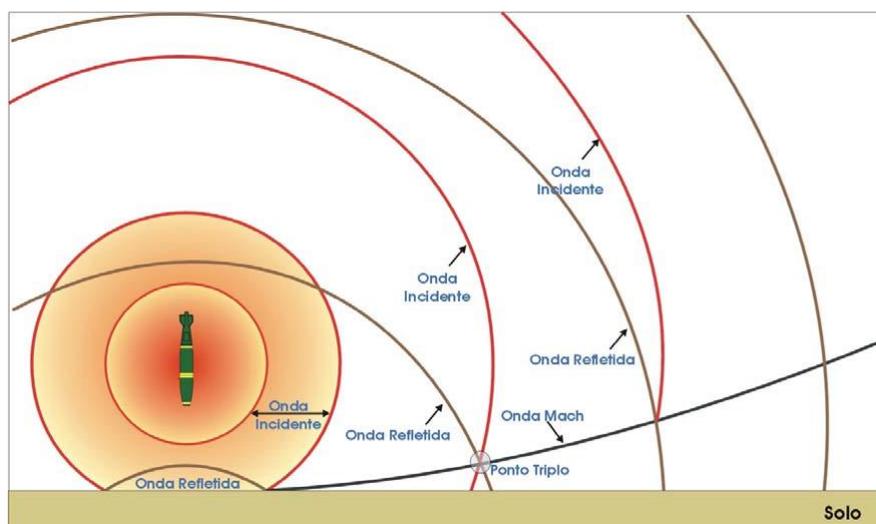


Figura 2.6 - Efeito da detonação no ar formando Onda Mach (SILVA, 2007).

Quando uma estrutura é atingida pela onda de choque, há um aumento instantâneo da sobrepressão efetiva, causado pela reflexão da onda incidente, seguido de um período de rápido decaimento da sobrepressão, ao fim do qual a sobrepressão e a pressão dinâmica retornam ao patamar encontrado no fluxo livre, conforme será mostrado no Capítulo 4.

### **3 EFEITOS DE UMA EXPLOSÃO**

---

#### **3.1 Efeito de explosão nas estruturas**

A forma com que cada estrutura vai reagir/resistir à onda explosiva varia conforme suas características: rigidez, período natural, forma, orientação espacial, etc.

Ainda, os danos que uma explosão pode causar à estrutura vão depender do tipo de explosivo, da duração do pulso da onda de choque, assim como da quantidade, disposição e forma dos obstáculos que refletirão a onda de choque.

Ao incidir sobre uma edificação, a onda de choque interage com sua geometria, refletindo nas superfícies e penetrando nas aberturas.

Os danos que uma estrutura pode sofrer ao ser submetida a uma explosão, primeiramente, se devem à onda de choque com sua frente de elevada pressão, podendo ainda ocorrer colisão de fragmentos e incêndios desencadeados pelas altas temperaturas.

A detonação quando ocorre dentro de uma estrutura é considerada como uma explosão confinada, sendo toda a energia dissipada no meio interno, afetando diretamente os componentes estruturais. As dimensões e a configuração geométrica do ambiente e a quantidade de aberturas são fatores preponderantes na escolha da arquitetura e concepção da estrutura, pois a pressão da onda de choque pode ser amplificada pelas inúmeras reflexões que podem ocorrer devido às dimensões e configuração geométrica. As aberturas representam um alívio de carga para a estrutura.

Em explosões externas, dependendo da configuração do arruamento em que ocorrer, a explosão pode ser considerada confinada, pois haverá reflexão das ondas de choque das edificações no entorno, aumentando a sobrepressão.

Vale ressaltar que uma estrutura projetada para resistir a explosões externas, deve estar apta a suportar altos carregamentos laterais. Assim, estruturas projetadas para resistir a terremotos podem apresentar bom desempenho quando submetidas a explosões.

Além dos danos causados pela onda de choque e seus efeitos, pode ocorrer o colapso progressivo da estrutura, ou seja, um elemento estrutural ao sofrer um dano pode comprometer a estabilidade da estrutura como um todo, levando a mesma ao colapso.

KINNEY e GRAHAM (1985) dividiram em cinco classes os danos que uma estrutura pode sofrer devido a uma explosão, sendo que a classe A é a que representa os efeitos mais devastadores, como mostrado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Classes de danos causadas pelas explosões nas estruturas (KINNEY e GRAHAM, 1985 apud NETO, 2015)

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

A tabela 3.2 mostra a sobrepressão incidente numa escala de 1 a 83kPa relacionada aos potenciais danos causados a edificações.

Em seu trabalho, SILVA (2007) apresenta um gráfico de danos nas estruturas, relacionada à distância do foco e ao peso líquido do explosivo em até 700kg, como reproduzido na Figura 3.1.

Tabela 3.2 – Danos causados a edificações por diferentes sobrepressões incidentes.  
(APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL, 2003 apud NETO, 2015).

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

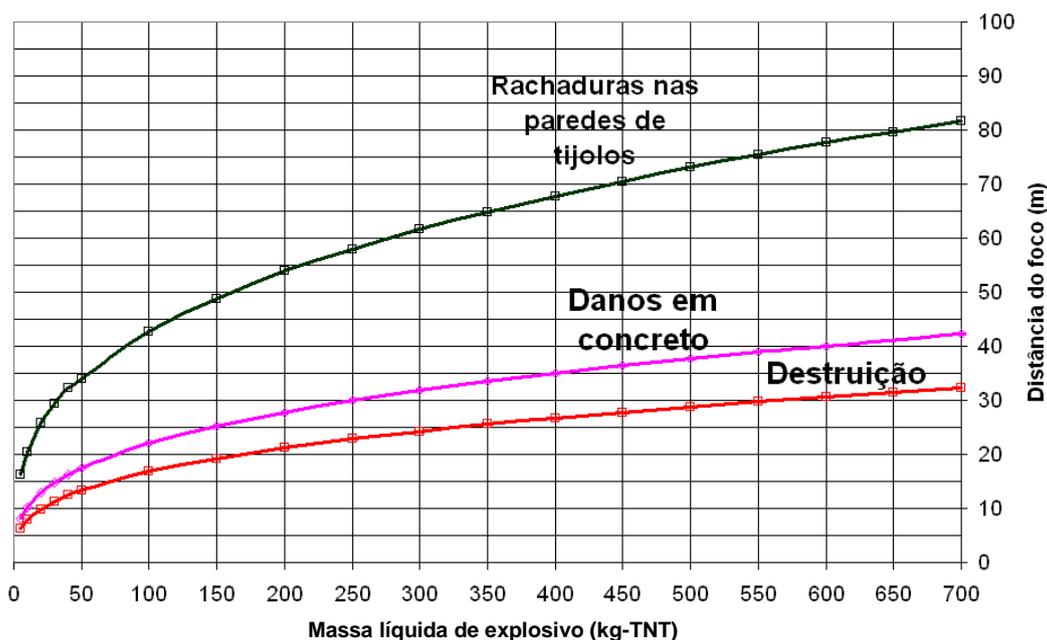


Figura 3.1 – Estimativa de danos sobre uma edificação, modificado SILVA (2007).

Observa-se, a partir do gráfico da Figura 3.1, que uma explosão cuja massa de TNT é de 250kg, distante 30m de uma estrutura, a mesma sofre danos no concreto, porém com uma massa de 550kg de TNT na mesma distância sofre colapso estrutural.

### 3.2 Efeitos no ser humano

Os efeitos de uma detonação sobre o ser humano podem ser diretos ou indiretos (BAKER *et al.*, 1983 apud CASAGRANDE, 2006).

Os efeitos diretos estão relacionados com as variações de pressão geradas pela detonação da carga, podendo também ser chamados de primários, e os indiretos estão relacionados basicamente ao lançamento de fragmentos, à passagem da onda de choque e à aceleração/desaceleração que o corpo humano pode atingir ao ser atingido por uma onda de choque.

A tabela 3.3 apresenta alguns dos danos causados diretamente aos seres humanos devido às explosões.

Tabela 3.3 – Danos causados diretamente aos seres humanos devidos às explosões (KINNEY e GRAHAM, 1985 apud SILVA, 2007).

Efeito	Variação de Pressão	
	Bar	psi
Suportável (não causa danos)	Até 0,0001	Até 0,0015
Queda	0,07 - 0,1	1,05 - 1,5
Ruptura do tímpano	0,35 - 1,0	5,25 - 15
Lesões nos pulmões	2,0 - 5,0	30 - 75
Morte	7,0 - 15,0	105 - 225

SILVA (2007) apresentou um gráfico, reproduzido na Figura 3.2, com a distância de segurança adequada para proteção dos seres humanos contra os efeitos diretos da onda de choque (sobrepessão).

Na Figura 3.3 os principais danos causados pelos efeitos diretos da onda de choque sobre o homem (SILVA, 2007).

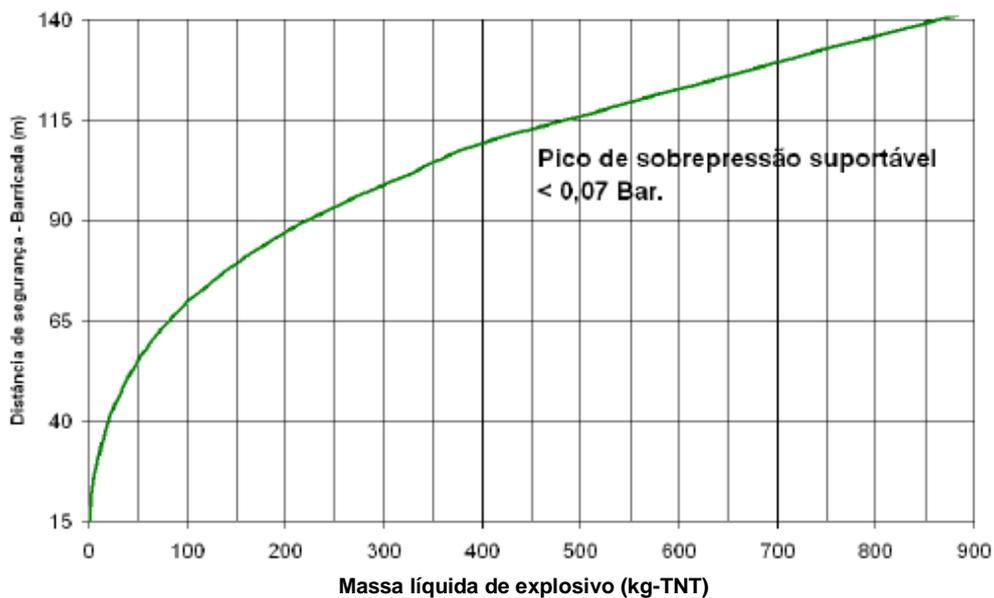


Figura 3.2 – Distância de segurança contra os efeitos diretos de uma onda de choque sobre o ser humano, modificado SILVA (2007).

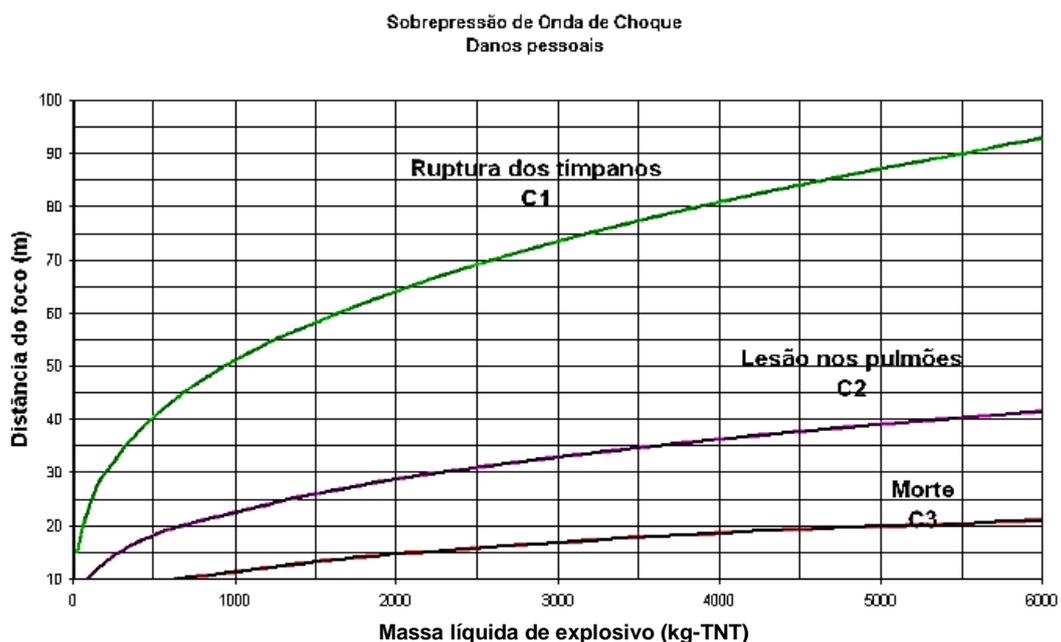


Figura 3.3 – Principais danos causados pelos efeitos diretos da onda de choque sobre o homem, modificado SILVA (2007).

Observa-se, a partir do gráfico da Figura 3.3, que uma explosão com massa de TNT de 3000kg a uma distância de 74m de um ser humano, o dano causado é a ruptura do tímpano, mas com 33m de distância já ocorre lesão nos pulmões e com 12m morte.

## **4 DETERMINAÇÃO DAS PRESSÕES DEVIDAS A EXPLOSÕES DE ACORDO COM O MANUAL DO UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC, 2008)**

---

A primeira edição do Manual do UFC foi lançada no final da década de 1960. Este Manual era baseado em extensa pesquisa e desenvolvimento de programas que permitiam uma aproximação mais confiável para os projetos de estruturas da época e futuras. Após a sua primeira publicação, mais testes e desenvolvimentos foram realizados, inclusive com materiais diferentes do concreto armado, principal material abordado na primeira versão do referido Manual, sendo a última revisão disponível a de 2008.

### **4.1 Propósito e objetivo**

O propósito do Manual é o de apresentar métodos de projeto para a construção de estruturas de proteção a serem utilizadas em instalações para desenvolvimento, testes, produção, armazenamento, manutenção, modificação, inspeção, desmilitarização e eliminação de materiais explosivos.

Os seus objetivos primários são os de estabelecer premissas de projeto e técnicas de construção onde a propagação da explosão (sobre uma estrutura ou parte de uma estrutura) ou massa de detonação possa ser prevista e, conseqüentemente, a proteção para pessoas e equipamentos.

Seus objetivos secundários são:

- 1) Estabelecer os parâmetros de carregamento explosivo requeridos para o projeto de estruturas sob a ação de explosão.
- 2) Prover métodos para o cálculo da resposta dinâmica de elementos estruturais, incluindo os de concreto armado e estruturas de aço.
- 3) Estabelecer detalhes construtivos e procedimentos necessários para garantir a resistência requerida para uma determinada explosão.

4) Estabelecer diretrizes para os depósitos de explosivos, obtendo sua configuração ótima, com relação ao arranjo do material depositado e à estrutura da edificação, prevenindo danos a partes interiores da estrutura devidos ao movimento da estrutura, choque ou perfuração por fragmentos.

## **4.2 Escopo**

O Manual é aplicável a projeto de estruturas de proteção submetidas aos efeitos associados de detonação de altos explosivos. Para essas situações, o Manual irá considerar valores menores ou iguais a 11.339 kg ou 11,34 t (25.000 libras) para explosões de efeitos próximos.

Entretanto, o Manual também é aplicável para situações de efeitos de alcance médio ou longo. Para estas situações, as premissas de projeto foram originalmente desenvolvidas para quantidades de explosivos da ordem de 226,8 t (500.000 libras), que é a quantidade máxima de explosivos aprovada para depósitos sobre a terra pelo manual do Departamento de Defesa dos EUA, DEPARTMENT OF DEFENSE (2010).

Outros manuais podem ser consultados para complementar este Manual UFC (2008) com relação a efeitos de altos explosivos e detonações nucleares.

## **4.3 Fator de segurança**

Simplificações conservadoras podem ser adotadas para o projeto estrutural, mas fatores desconhecidos podem ainda causar uma superestimativa da capacidade de resistência da estrutura devido a efeitos incertos de uma explosão (reflexão da onda de choque inesperada, métodos construtivos, qualidade dos materiais da construção, entre outros). Para compensar estas incertezas, é recomendado que a massa de TNT equivalente seja aumentada em 20%. Este aumento da massa da carga é a “massa efetiva de carregamento” a ser usada para projeto e análise da estrutura.

#### 4.4 TNT equivalente

Os efeitos da pressão de explosão oriunda de explosivos TNT podem ser estendidos para incluir outros materiais com potencial de detonação, relacionando a energia de explosão destes materiais a uma “massa de carga efetiva”, que seria a massa equivalente em TNT. Outros fatores podem afetar a equivalência do material em relação ao TNT. Estes fatores incluem o formato do material (achatado, quadrado, redondo, entre outros), o número de itens no explosivo, o tipo de confinamento do explosivo (revestimento, receptáculo, entre outros), e a pressão de alcance considerada (próxima, intermediária ou distante).

Para projetos de resistência à explosão, os efeitos da potência de energia de materiais explosivos, de um determinado formato, referente ao TNT, de formato similar, pode ser expresso como uma função de calor de detonação dos vários materiais, conforme a equação (4-1):

$$W_E = \frac{H_{exp}^d}{H_{TNT}^d} \cdot W_{exp} \quad (4-1)$$

Onde:

$W_E$  = massa efetiva da carga

$W_{exp}$  = massa do explosivo em questão

$H_{exp}^d$  = calor de detonação do explosivo em questão

$H_{TNT}^d$  = calor de detonação do TNT

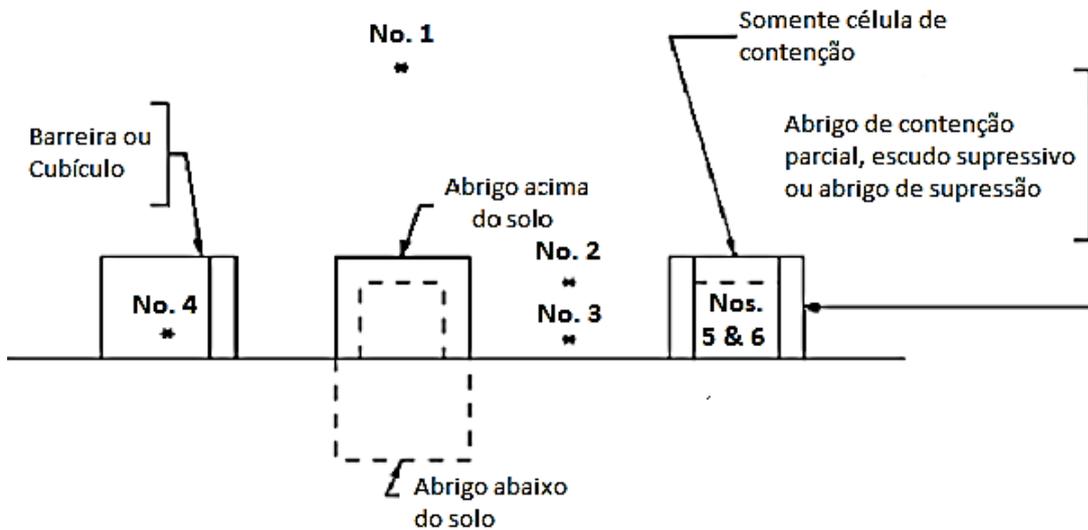
#### 4.5 Categorias de carregamento explosivo

As cargas de explosão em estruturas podem ser divididas em dois grupos principais baseados no confinamento da carga explosiva: confinadas e não confinadas.

As explosões não confinadas são subdivididas em três categorias: explosão ao ar livre, explosão no ar e explosão na superfície.

As explosões confinadas são subdivididas em três categorias: totalmente ventiladas, parcialmente confinadas e totalmente confinadas.

A Figura 4.1 ilustra as categorias e subcategorias de explosão, mostrando os carregamentos associados ao posicionamento da carga explosiva e das estruturas sujeitas a esses carregamentos.



Categorias de Carregamento Explosivo			
Confinamento da Carga	Categoria	Pressão de Carregamento	Estrutura de Proteção
Explosões não confinadas	1. Explosão ao ar livre	a. Não refletida	Abrigo
	2. Explosão no ar	b. Refletida	
	3. Explosão na superfície	b. Refletida	
Explosões confinadas	4. Totalmente ventilada	c. Choque interno	Cubículo
		d. Dispersão	
	5. Parcialmente ventilada	c. Choque interno	Célula de contenção parcial ou abrigo de supressão
		e. Gás interno	
		d. Dispersão	
	6. Totalmente confinada	c. Choque interno	Célula totalmente confinada
e. Gás interno			

Figura 4.1 – Categorias de cargas explosivas, adaptado do Manual UFC (2008).

#### 4.5.1 Explosões não confinadas

##### ***Explosões ao ar livre***

A explosão ao ar livre produz uma onda de choque que se propaga do centro da detonação para o exterior, atingindo uma estrutura protetora sem amplificação da onda de choque.

##### ***Explosão no ar***

A explosão no ar irá ocorrer a uma distância e altura determinadas, de forma que as ondas de choque refletidas pelo solo chegam à estrutura protetora antes da onda de choque principal.

##### ***Explosão na superfície***

A explosão de superfície irá ocorrer quando a detonação é localizada próxima ou no solo, de forma que o choque inicial é amplificado no ponto de detonação devido às reflexões no solo.

#### 4.5.2 Explosões confinadas

##### ***Explosão totalmente ventilada***

Uma explosão totalmente ventilada será produzida dentro ou imediatamente adjacente a uma barreira ou estrutura do tipo cúbica com uma ou mais superfícies abertas à atmosfera. A onda inicial, que é amplificada pelas porções não frágeis da estrutura, e os produtos da detonação são totalmente ventilados para a atmosfera formando uma onda de choque que se propaga para longe da estrutura.

##### ***Explosão parcialmente confinada***

Uma explosão parcialmente confinada será produzida dentro ou imediatamente adjacente a uma barreira ou estrutura do tipo cúbica com aberturas de dimensões limitadas e/ou superfícies frágeis. A onda inicial, que é amplificada pelas porções frágeis e não frágeis da estrutura, e os produtos da detonação são ventilados para a atmosfera após um período de tempo finito. O confinamento dos produtos da detonação,

que consistem no acúmulo a altas temperaturas de produtos dos gases, é associado com o acúmulo de uma pressão quase estática. Esta pressão tem um tempo de duração longo em comparação à pressão de uma onda de choque.

### ***Explosão totalmente confinada***

O confinamento total de uma explosão é associado com o confinamento total ou quase total do volume da explosão por uma barreira estrutural. Os carregamentos explosivos internos consistirão de carregamentos de choque não ventilados e duração muito longa de pressões de gás, que serão uma função do grau de confinamento. A magnitude do alívio das pressões será geralmente menor e irá apenas afetar as construções imediatamente fora da estrutura de confinamento.

## **4.6 Proteção contra o carregamento explosivo**

A proteção de pessoas e de equipamentos valiosos irão envolver abrigos de proteção localizados longe do ponto de detonação. O seu projeto irá envolver um ou mais tipos de categorias de carregamento explosivo, como definido na Figura 4.1. O manual do UFC (2008) considera tanto a posição da explosão quanto a explosão na estrutura protetiva.

Embora as categorias de carregamento explosivo possam ser separadas e classificadas individualmente, não há limites claramente definidos entre cada categoria. Na maioria das explosões em instalações, os vários tipos de explosão irão se sobrepor, e uma análise mais criteriosa deverá ser feita para a aplicação das recomendações do Manual UFC (2008), para determinar os parâmetros explosivos consistentes com as várias categorias de carregamento explosivo.

#### 4.7 Fenômeno da onda explosiva

A onda de choque ou frente de choque é caracterizada por um aumento da pressão ambiente quase instantâneo para um pico de pressão incidente  $P_{so}$  em  $t_A$  (tempo de chegada da onda de choque), conforme apresentado na Figura 4.2. O tempo  $t_A$  vai depender basicamente da distância (do ponto ao epicentro), da turbulência do ambiente e da velocidade de propagação da onda.

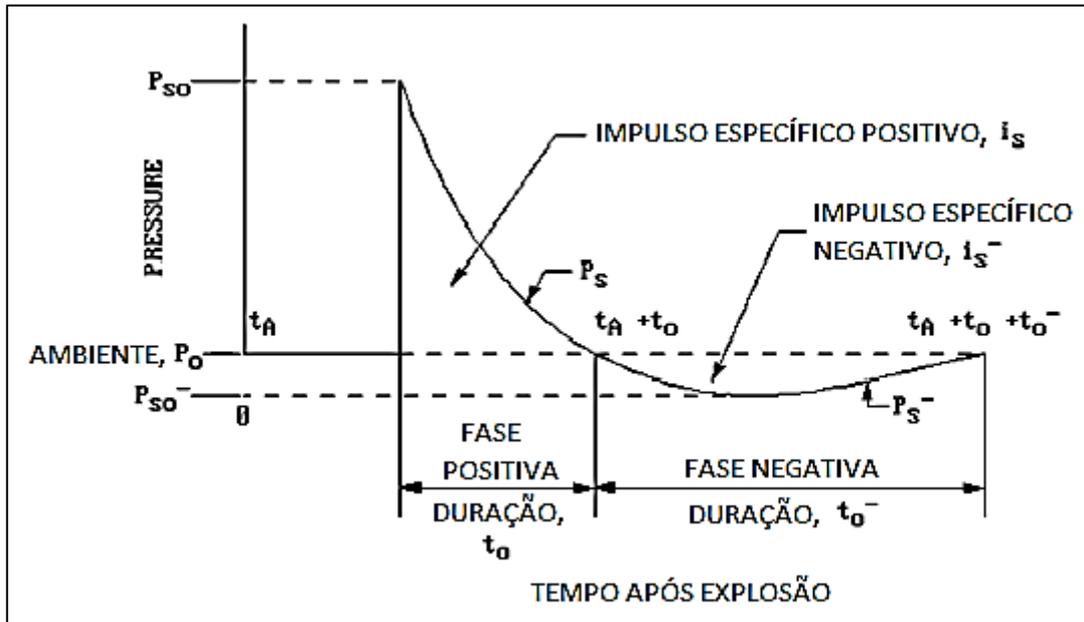


Figura 4.2 – Variação pressão vs. tempo em campo livre, adaptado do UFC (2008).

A frente de choque desloca-se radialmente do ponto de explosão com uma diminuição na velocidade de choque ( $U$ ), que é sempre superior à velocidade sônica do meio. As moléculas de gás atrás do primeiro movimento de onda se movem a uma velocidade mais baixa, denominadas de velocidade de partícula  $u$ . Estas últimas partículas de velocidade são associadas com as pressões dinâmicas formadas pelos ventos da passagem da frente de choque, que tem uma máxima pressão ( $q_0$ ). À medida que a frente de choque se expande em volumes cada vez maiores no meio, o pico das pressões incidentes diminui e a duração das pressões aumenta. A velocidade de choque, o pico da velocidade da partícula e o pico da pressão dinâmica variam de acordo com a variação do pico da pressão incidente, conforme a Figura 4.3.

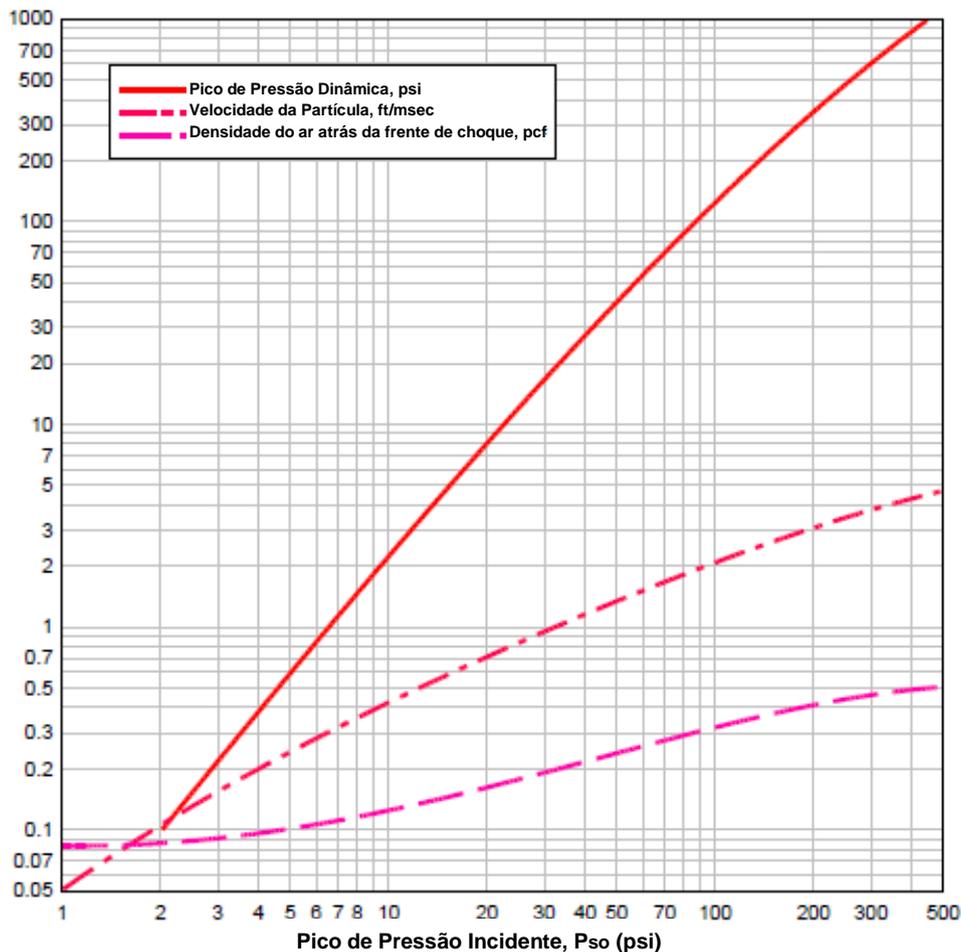


Figura 4.3 – Pico da pressão incidente versus pico da pressão dinâmica, densidade do ar atrás da frente de choque e velocidade da partícula, adaptado do UCF (2008).

Em qualquer ponto da explosão, a perturbação da pressão tem um formato mostrado na Figura 4.2. A frente de choque chega até determinado local em um tempo  $t_A$  e, após o crescimento do valor de pico,  $P_{SO}$ , a pressão incidente decai para o valor do ambiente em um período de tempo denominado duração da fase positiva. Isto é seguido por uma fase negativa com uma duração  $t_0^-$  que é geralmente mais longa que a fase positiva e é caracterizada por uma pressão negativa (menor que a pressão ambiente) com um valor máximo denominado  $P_{SO}^-$ , bem como uma inversão no fluxo das partículas.

A fase negativa é geralmente menos importante para o projeto que a fase positiva, e sua amplitude  $P_S^-$  deve, em todos os casos, ser menor que a pressão

atmosférica ambiente  $p_0$ . O impulso incidente associado com a onda de choque é a integral da área sob a curva pressão versus tempo, e é denominado por  $i_s$  para fase positiva e  $i_s^-$  para a fase negativa.

Um parâmetro adicional da onda de choque, o comprimento de onda, é definido como  $Lw+$ , comprimento positivo da onda, e  $Lw-$ , comprimento negativo da onda. Estes parâmetros, porém, não serão utilizados neste trabalho.

#### 4.7.1 Explosão não confinada

##### *Explosão ao ar livre*

Quando ocorre uma detonação adjacente ou acima de uma estrutura de proteção, na qual nenhuma amplificação da onda de choque inicial ocorre entre a fonte de explosão e a estrutura de proteção, então os carregamentos explosivos atuando na estrutura são pressões de explosão ao ar livre (Figura 4.4).

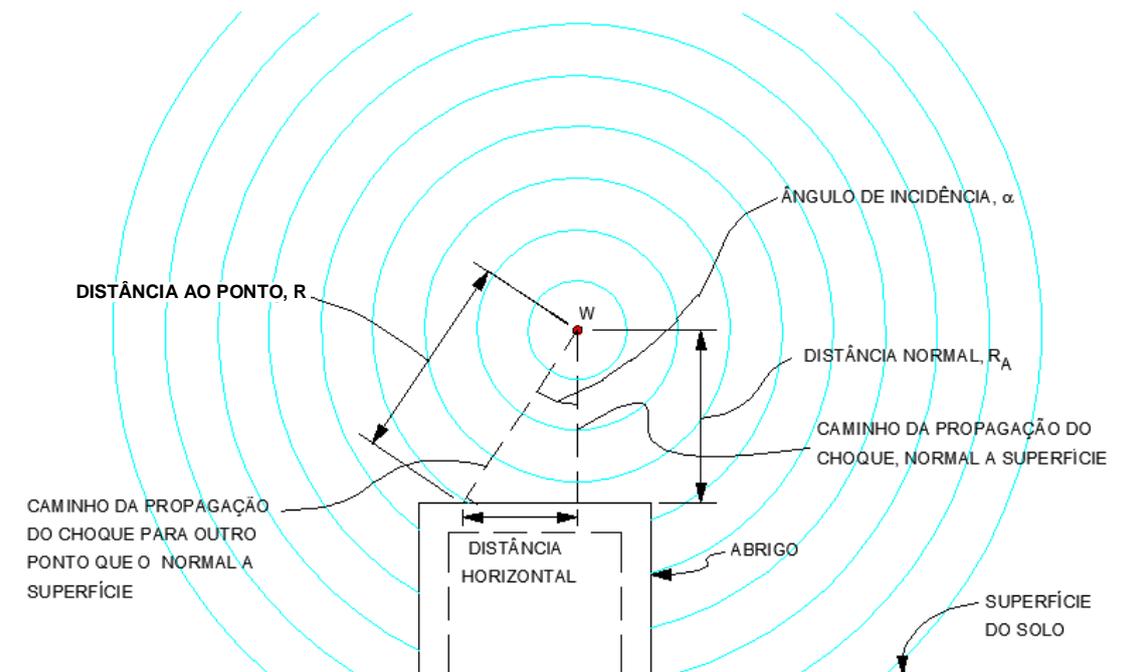


Figura 4.4 – Ambiente de explosão ao ar livre, adaptado do Manual UFC (2008).

Como a onda incidente se move radialmente para fora do centro da explosão, ela irá impactar na estrutura, e, após o impacto, a onda inicial (pressão e impulso) será reforçada e refletida (Figura 4.5).

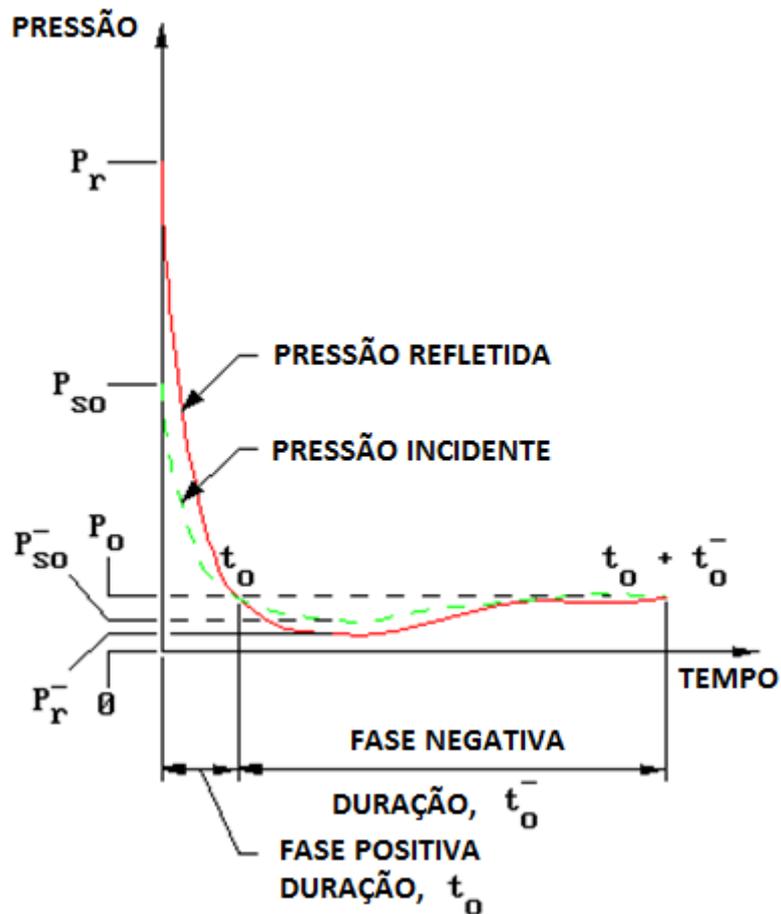


Figura 4.5 – Variação pressão versus tempo para uma explosão ao ar livre, adaptado do UFC (2008).

Quando a onda de choque atinge uma superfície normal ao seu deslocamento, então é dito que o ponto de contato inicial sustenta a máxima pressão e impulso (reflexão normal). A Figura 4.6 apresenta as taxas de pressões normais como uma função das pressões incidentes.

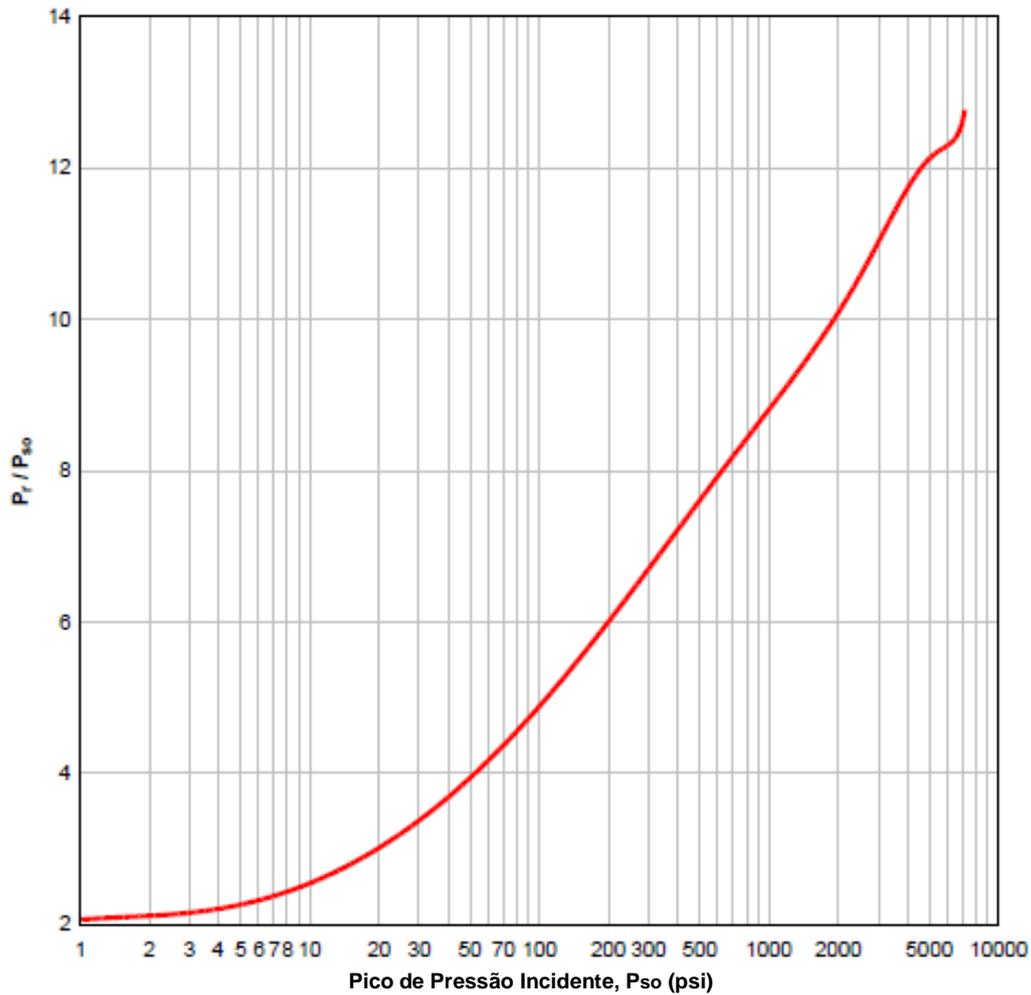


Figura 4.6 – Relação entre pressão normal refletida e pressão incidente, para uma explosão ao ar livre, versus o pico da pressão incidente, adaptado do UFC (2008).

Os padrões de pico de pressão e impulso na estrutura variam com a distância e ângulo de incidência, de um máximo,  $R_A$ , distância normal entre o ponto de detonação e a estrutura, a um mínimo (pressão incidente) onde o plano da superfície da estrutura é perpendicular à frente de choque. As pressões de fase positiva, impulsos, durações e outros parâmetros deste ambiente de choque para uma explosão de TNT esférica são dados na Figura 4.7 em função da distância escalonada (definida na Equação 2-1).

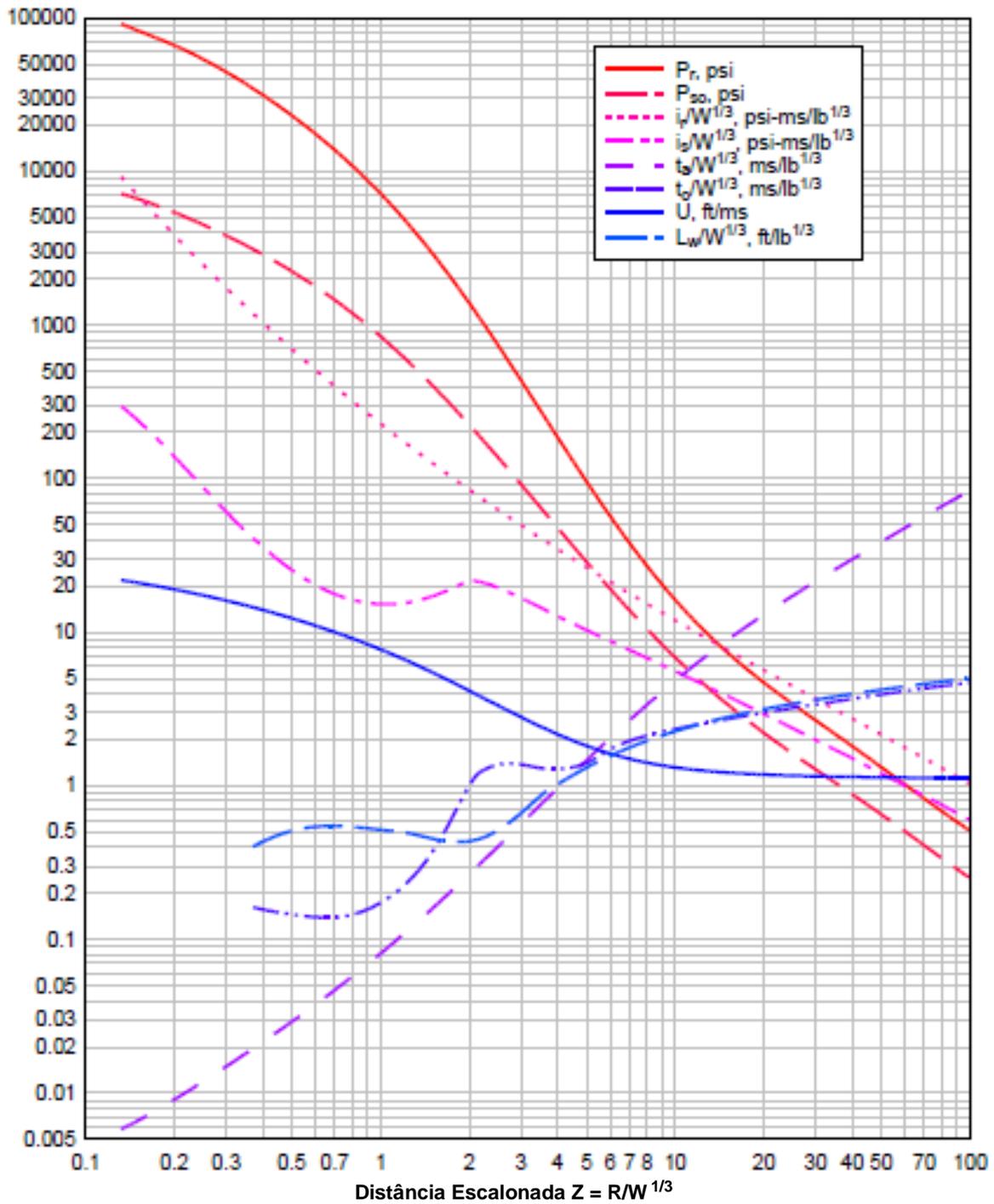


Figura 4.7 – Parâmetros da onda de choque para explosão esférica de TNT ao ar livre no nível do mar, adaptado do UFC (2008).

A menor distância escalonada de  $0,136\text{ft}/\text{lb}^{1/3}$  representa o raio esférico do explosivo TNT e, portanto, representa a superfície do explosivo.

Em algumas situações de carregamento de explosão, parâmetros negativos da onda de explosão, mostrados na Figura 4.8, são necessários para se prever a função no tempo do carregamento da onda de explosão agindo sobre uma estrutura. Isto é particularmente verdadeiro em estruturas de proteção de tipo flexível (normalmente estruturas em aço) em que o movimento global da estrutura é afetado pela fase das cargas de explosão que atuam sobre as várias superfícies da estrutura. Os efeitos dos parâmetros de fase negativa geralmente não são importantes para o projeto das estruturas do tipo mais rígido (como as de concreto armado).

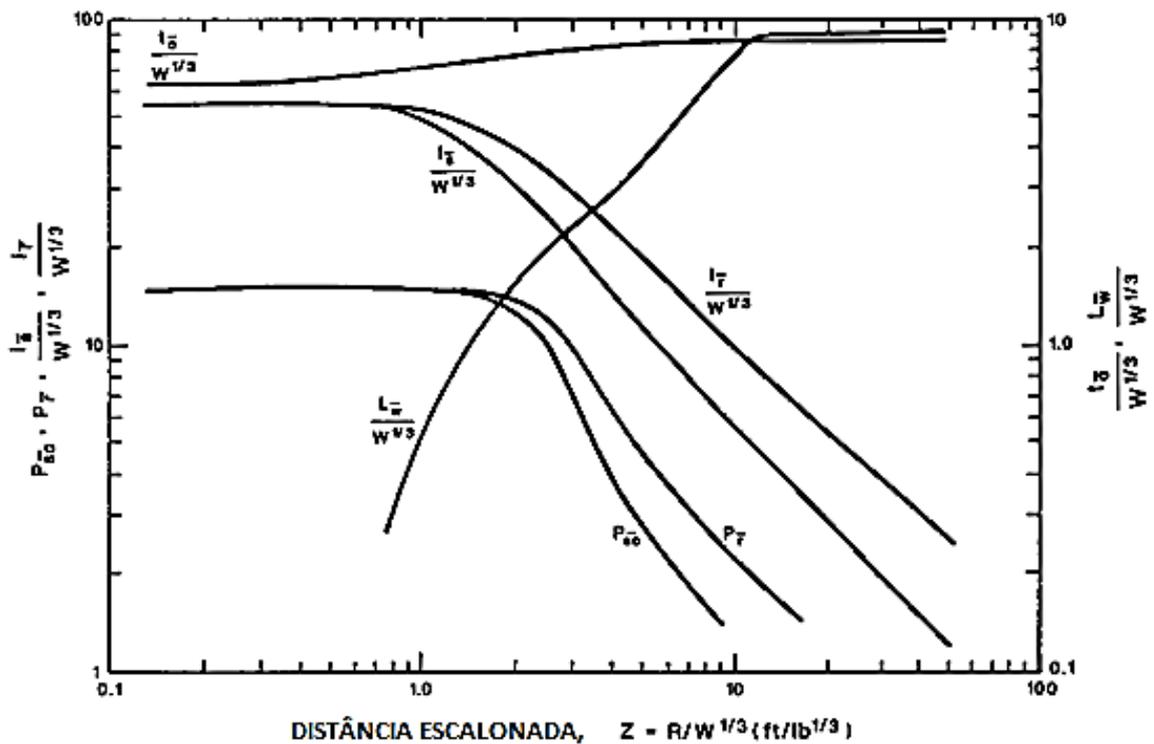


Figura 4.8 – Parâmetros de choque da pressão negativa para explosão esférica ao ar livre de TNT no nível do mar, adaptado do UFC (2008).

As curvas apresentadas nas Figuras 4.7 e 4.8, que fornecem os parâmetros da onda explosiva como uma função da distância escalonada, estendem-se somente a uma distância escalonada  $Z = 100\text{ft}/\text{lb}^{1/3}$ . Para a maioria das estruturas de proteção, ou

mesmo estruturas leves, os danos são relativamente superficiais além desta distância escalonada, consistindo em sua maioria em janelas quebradas, deformação de painéis leves ou ruptura de paredes. As curvas não são estendidas para além desses níveis porque as propriedades da onda explosiva começam a ser seriamente afetadas pelas condições atmosféricas.

A variação dos valores de pressão e impulso na superfície de uma estrutura, entre os valores máximo e mínimo, é uma função do ângulo de incidência  $\alpha$ . Este ângulo é formado pela linha que define a distância normal,  $R_A$ , entre o ponto de detonação e a estrutura, e a linha  $R$  (distância oblíqua) que define o caminho de propagação do choque entre o centro da explosão e qualquer outro ponto em questão na superfície da estrutura (ver Figura 4.4).

Os efeitos do ângulo de incidência sobre o pico da pressão refletida,  $P_{ra}$ , e o impulso refletido escalonado,  $i_{ra}$ , são mostrados nas Figuras 4.9 e 4.10, respectivamente. As figuras são representações gráficas do ângulo de incidência versus o pico de pressão refletida e o impulso refletido, em função da distância normal escalonada entre a carga e a superfície em questão. A distância normal em escala é definida como a altura escalonada da carga acima do solo ( $H_c/W^{1/3}$ ).

Todos os outros parâmetros de explosão são obtidos a partir das Figuras 4.7 e 4.8, para a distância inclinada em escala  $R/W^{1/3}$  até o ponto em questão.

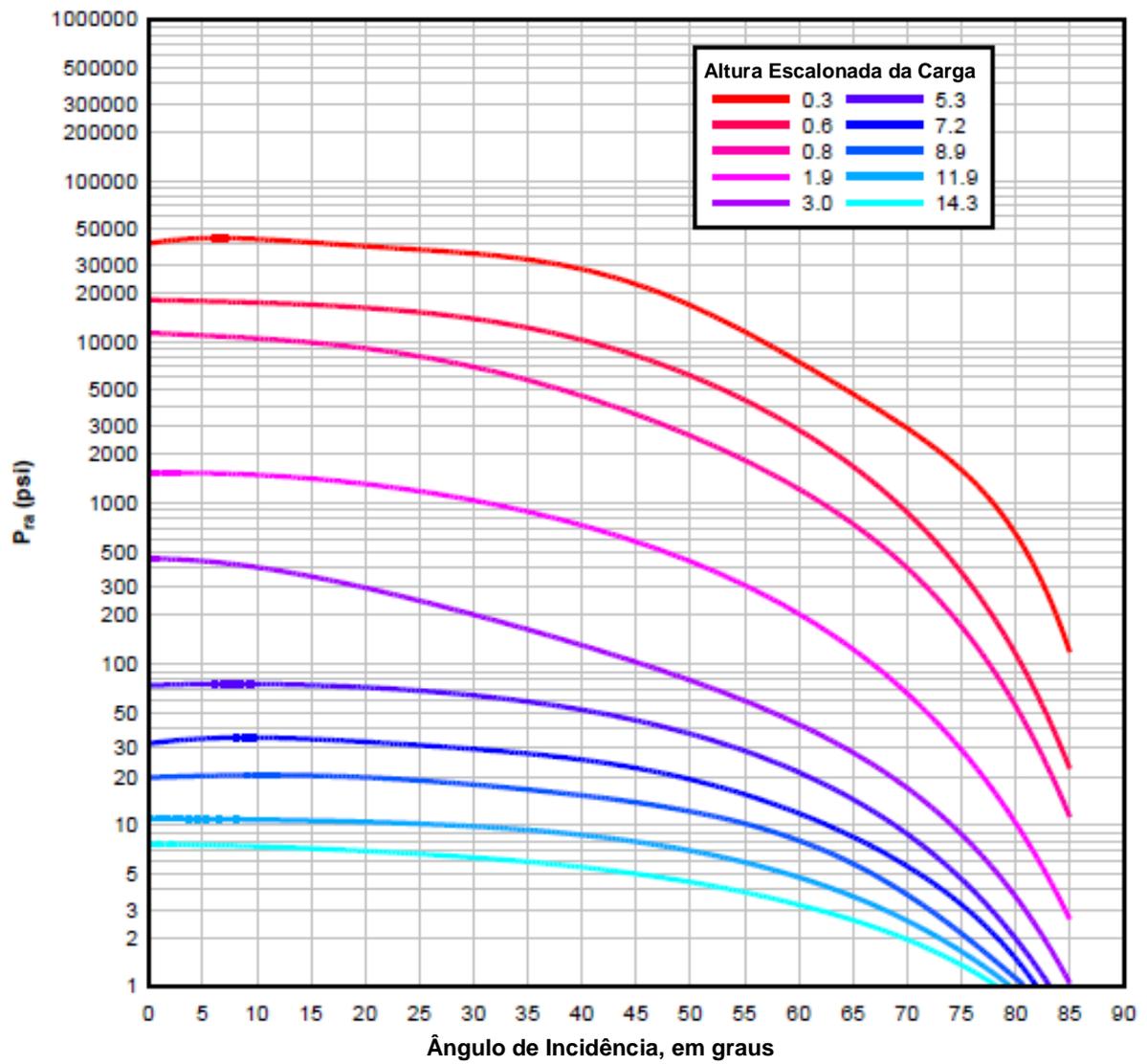


Figura 4.9 – Variação da pressão refletida versus ângulo de incidência, adaptado do UFC (2008).

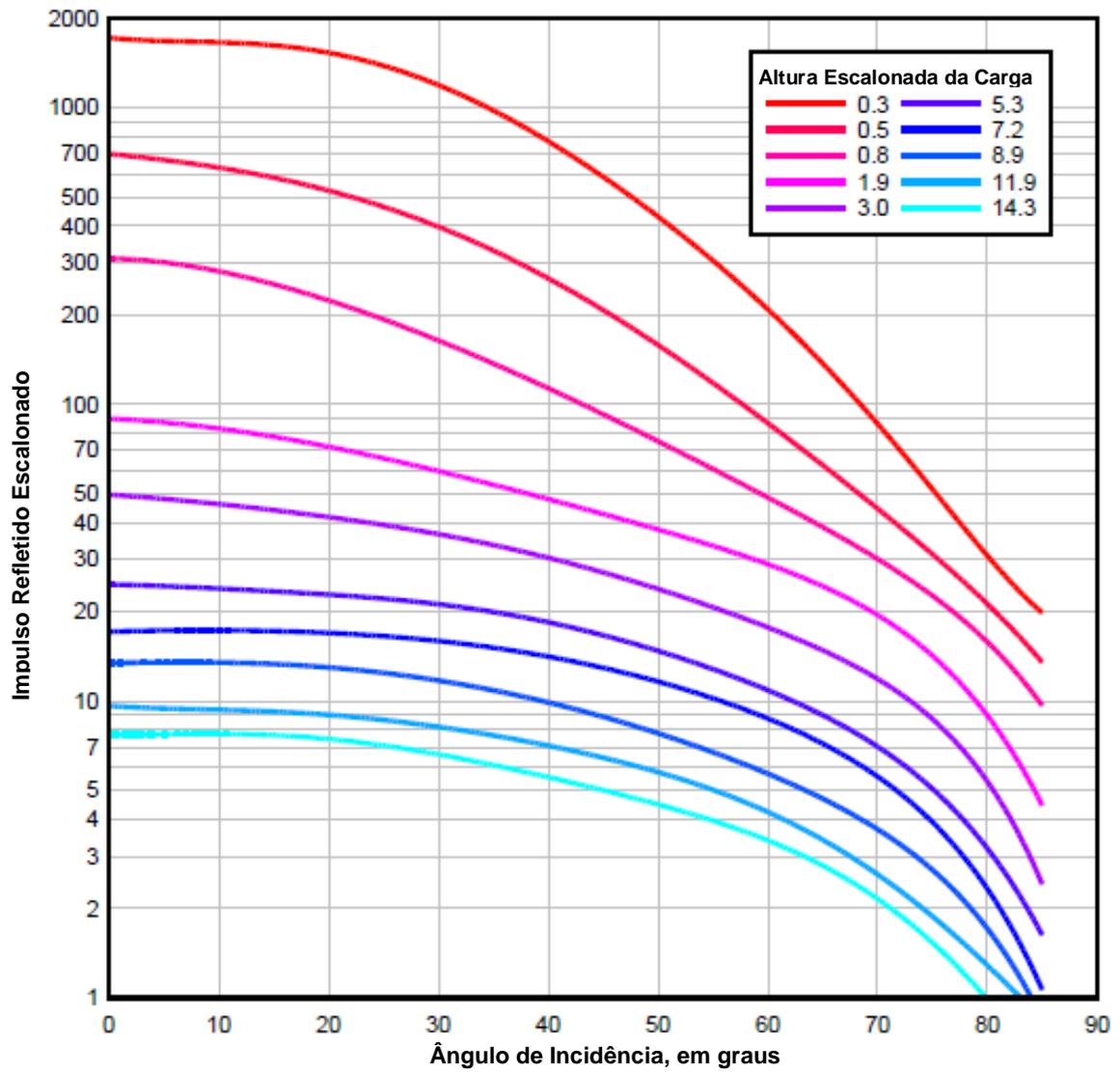


Figura 4.10 – Variação do impulso refletido escalonado versus ângulo de incidência, adaptado do UFC (2008).

### *Explosão no ar*

Conforme explicado no item 2.2.1, a Onda Mach (Figura 4.11) é formada pela interação da onda incidente e da onda refletida.

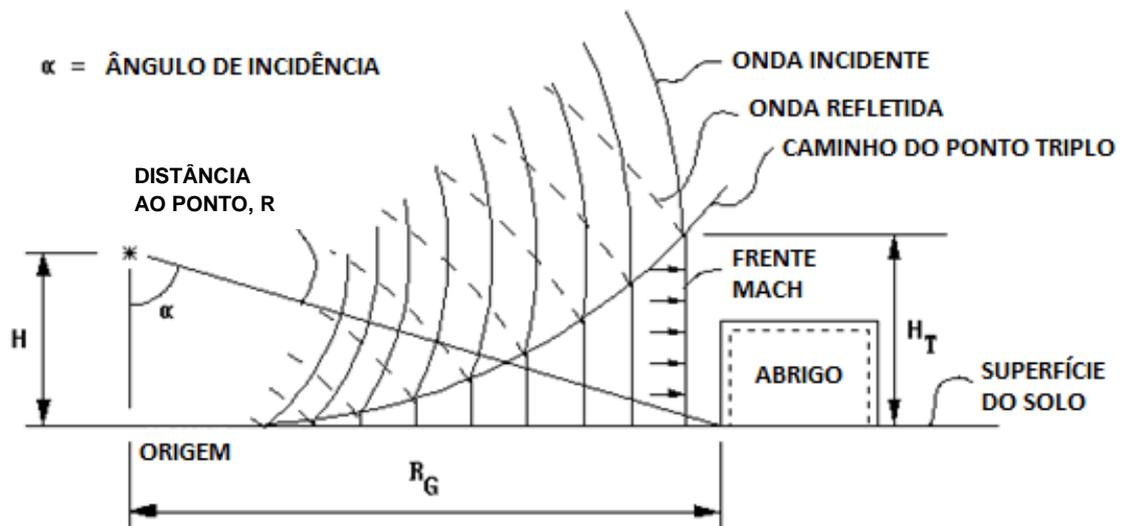


Figura 4.11 – Ambiente de explosão no ar, adaptado do UFC (2008).

As pressões da Onda Mach variam pouco ao longo da altura e para efeitos de projeto esta variação pode ser desprezada e o choque considerado como uma onda plana sobre toda a altura da frente. Os parâmetros de explosão na Onda Mach são calculados na superfície do solo. A variação pressão-tempo da Onda Mach, mostrada na Figura 4.12a, é semelhante à da onda incidente, exceto que a magnitude dos parâmetros de explosão é um pouco maior. A Figura 4.12b apresenta a variação pressão-tempo no ponto acima do Ponto Triplo.

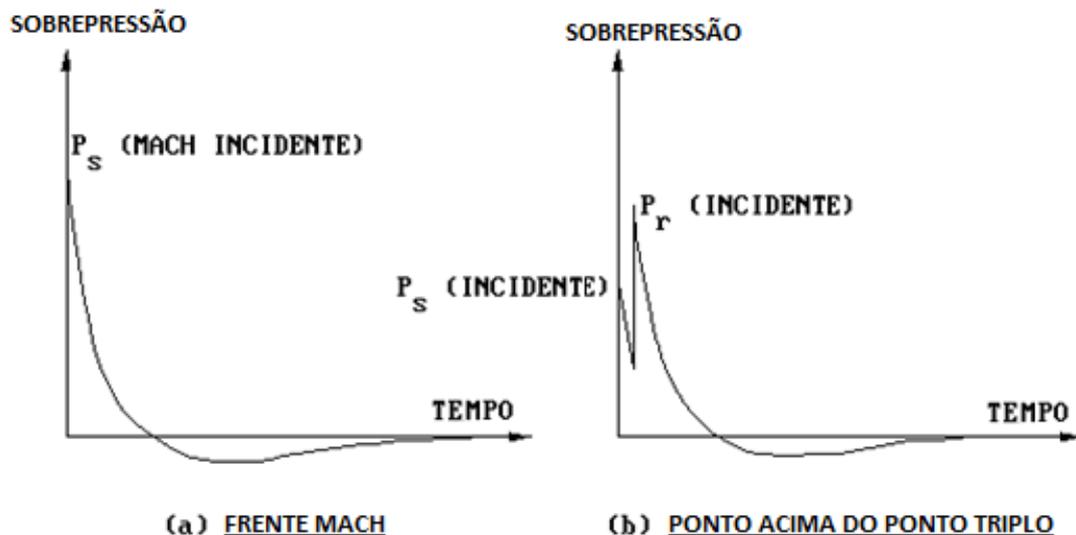


Figura 4.12 – Variação pressão versus tempo para explosão no ar, adaptado do UFC (2008).

A altura da Onda Mach aumenta à medida que a onda se propaga para longe do centro da detonação. Este aumento de altura é referido como o caminho do ponto triplo e é formado pela interseção das ondas inicial, refletida e Mach. Considera-se que uma estrutura protegida está sujeita a uma onda plana (pressão uniforme) quando a altura do ponto triplo excede a altura da estrutura. A altura escalonada do ponto triplo  $H_T/W^{1/3}$  em relação à distância ao solo escalonada  $R_G$  e a altura de carga escalonada  $H_c/W^{1/3}$  é representada na Figura 4.13.

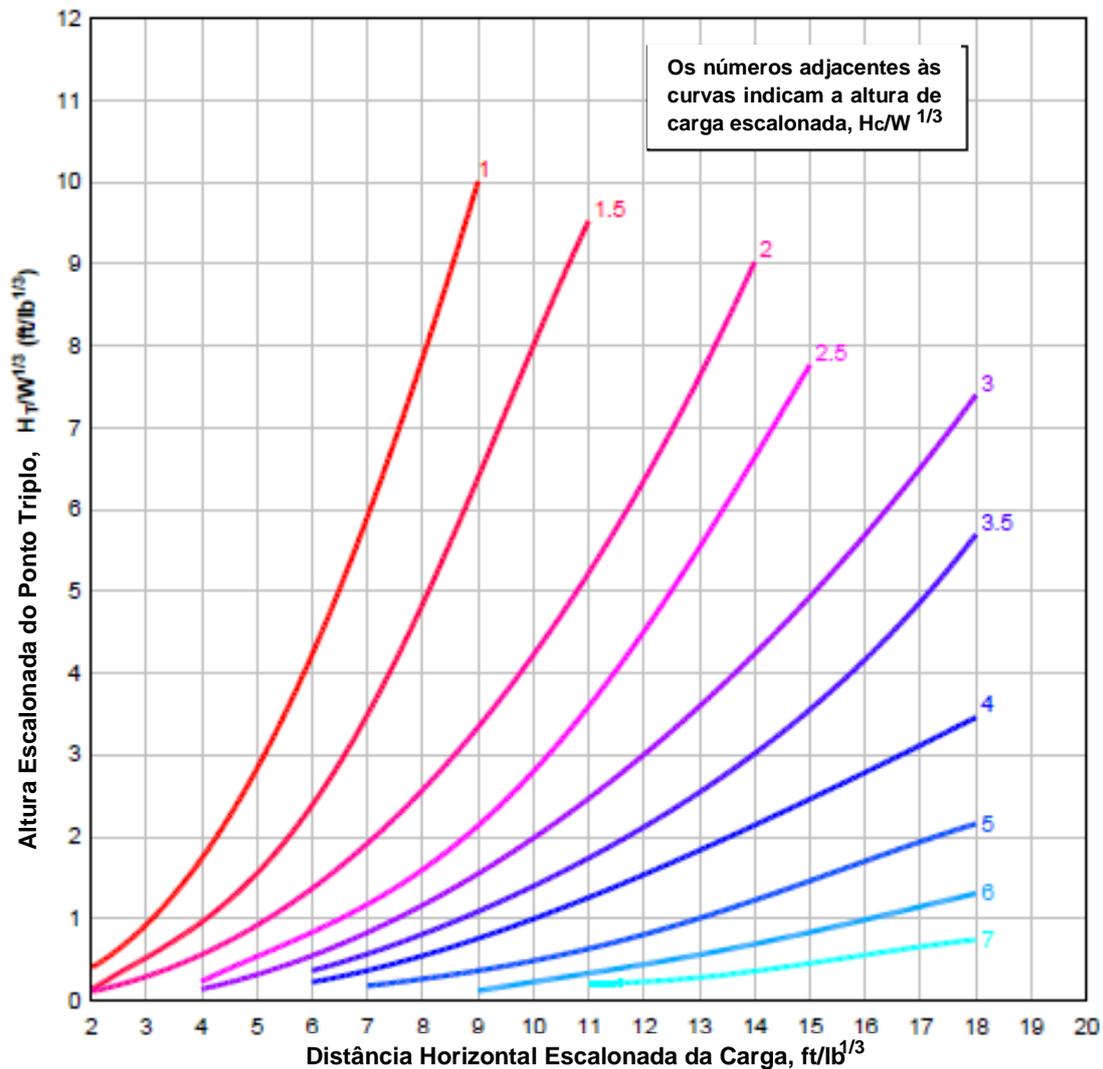


Figura 4.13 – Altura Escalonada do Ponto Triplo, adaptado do UFC (2008).

Se a altura do ponto triplo não se estender acima da altura da estrutura, então a magnitude das cargas aplicadas irá variar com a altura do ponto considerado. Acima do ponto triplo, a variação pressão-tempo consiste em uma interação das pressões da onda

incidente e refletida, resultando em uma variação pressão-tempo (Figura 4.12b) diferente da pressão da onda incidente Mach. A magnitude das pressões acima do ponto triplo é menor do que a da Onda Mach. Na maioria das situações práticas de projeto, a localização da detonação estará suficientemente afastada da estrutura para não se produzir esta variação de pressão. Uma exceção pode existir para edifícios de vários andares, mesmo que estes edifícios estejam geralmente situados em faixas muito baixas de pressão onde o ponto triplo é elevado.

Na determinação da magnitude das cargas de explosão no ar que atuam sobre a superfície de uma estrutura de proteção acima do solo, são calculadas em primeiro lugar, as pressões máximas de impacto incidentes da Onda Mach atuando sobre a superfície do solo imediatamente antes da estrutura. O pico de pressão refletida  $P_{ra}$  é determinado para este ponto pela Figura 4.9, usando a altura de carga escalonada acima do solo  $H_c/W^{1/3}$  e o ângulo de incidência  $\alpha$  (Figura 4.4).

Um procedimento similar é usado com a Figura 4.10 para determinar o impulso,  $i_{ra}$ , da onda de explosão que atua na superfície do solo imediatamente antes da estrutura. Uma estimativa dos outros parâmetros de explosão pode ser obtida a partir das Figuras 4.7 e 4.8, ajustando os valores de  $P_{ra}$  e  $i_{ra}$  como iguais aos valores da pressão incidente máxima  $P_{so}$  e o impulso incidente  $i_s$ , respectivamente. As distâncias escalonadas correspondentes a  $P_{so}$  e  $i_s$  são determinadas a partir da Figura 4.7. A distância escalonada correspondente a  $P_{so}$  é utilizada para obter valores de  $P_r$ ,  $P_{so}^-$ ,  $t_A/W^{1/3}$ ,  $U$ ,  $L_W/W^{1/3}$  e  $L_W^-/W^{1/3}$  enquanto a distância escalonada correspondente a  $i_s$  é utilizada para obter valores de  $i_r$ ,  $i_s^-$ ,  $i_r^-$ ,  $t_o/W^{1/3}$  e  $t_o^-/W^{1/3}$ .

### ***Explosão na superfície***

Uma carga localizada sobre, ou muito próxima da superfície do solo, é considerada como uma explosão de superfície. A onda inicial da explosão é refletida e reforçada pela superfície do solo produzindo uma onda refletida. Ao contrário da explosão no ar, a onda refletida se une com a onda incidente no ponto de detonação formando uma única onda, semelhante em natureza à onda Mach da explosão no ar, mas essencialmente em forma hemisférica (Figura 4.14).

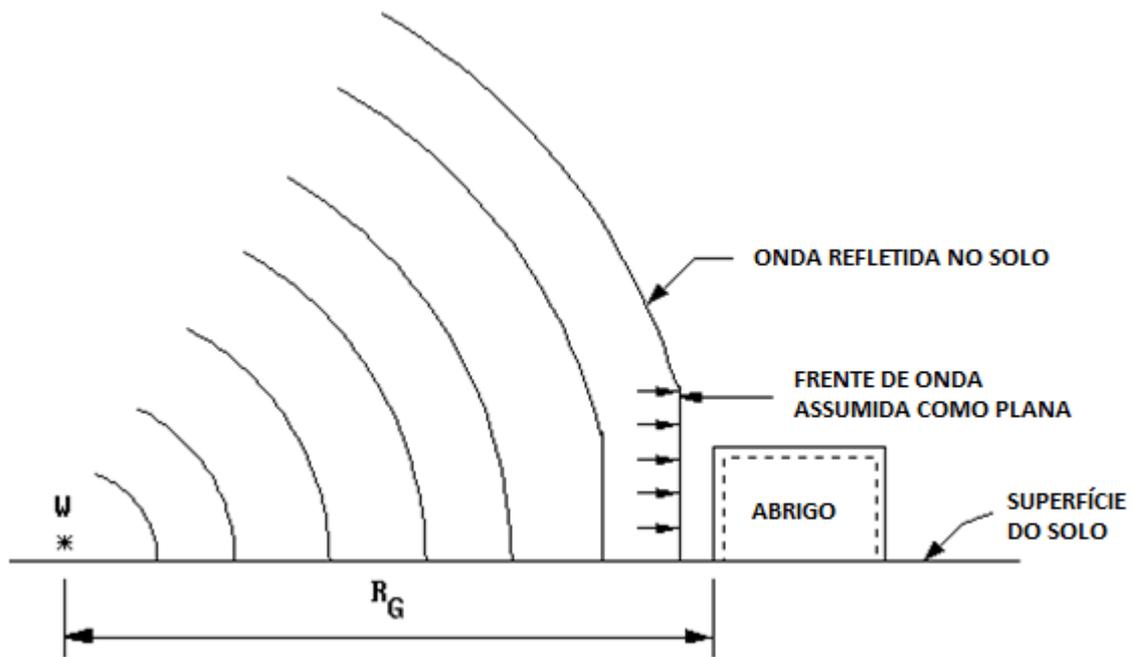


Figura 4.14 – Ambiente de explosão na superfície, adaptado do UFC (2008).

Os parâmetros da fase positiva e negativa de uma detonação superficial oriundas de uma explosão hemisférica de TNT são dados nas Figuras 4.15 e 4.16, respectivamente. Uma comparação desses parâmetros com os de explosões de ar livre (Figuras 4.7 e 4.8) indica que, a uma determinada distância de uma detonação, para uma mesma massa de explosivo, todos os parâmetros da explosão superficial no ambiente são maiores do que aqueles no ambiente ao ar livre.

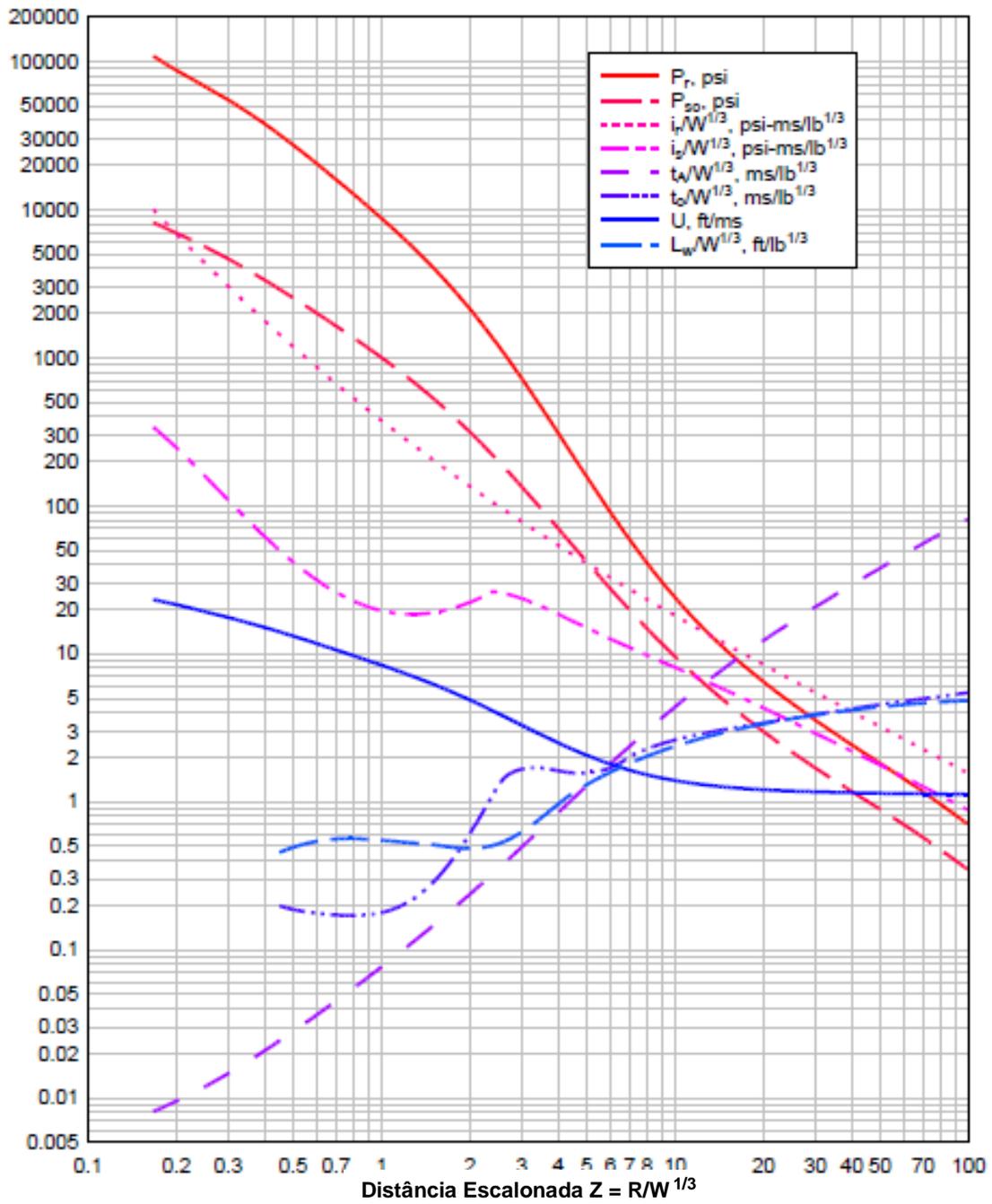


Figura 4.15 – Parâmetros da onda de choque da fase positiva para explosão de TNT na superfície do solo, ao nível do mar, adaptado do UFC (2008).

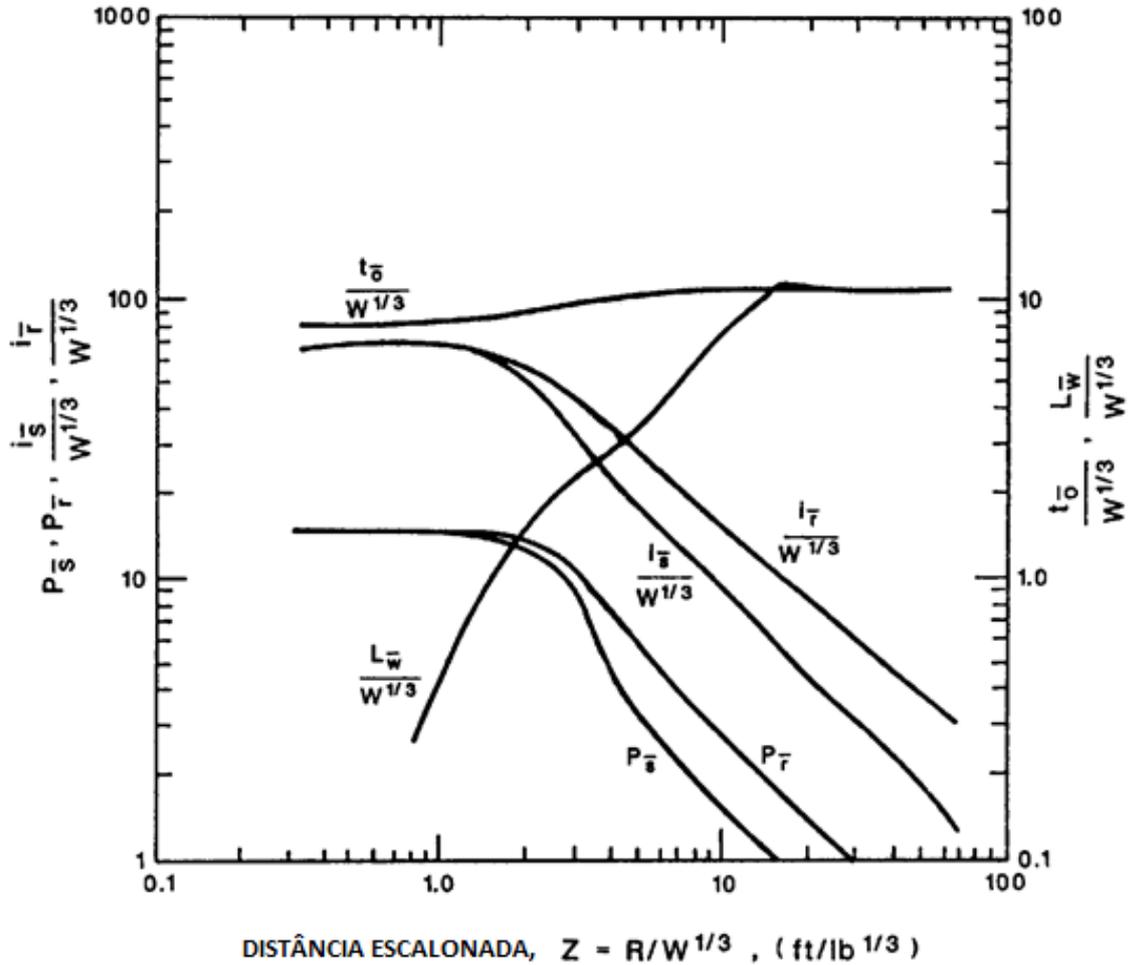


Figura 4.16 – Parâmetros de choque da pressão negativa para explosão de TNT na superfície do solo ao nível do mar, adaptado do UFC (2008).

Como no caso de uma explosão no ar, as curvas apresentadas nas Figuras 4.15 e 4.16, que fornecem os parâmetros da onda explosiva como uma função da distância escalonada, estendem-se somente a uma distância escalonada  $Z = 100\text{ft/lb}^{1/3}$ .

#### 4.7.2 Explosões confinadas

##### *Efeitos do confinamento*

Quando ocorre uma explosão dentro de uma estrutura, os picos de pressão associados com a frente de choque inicial (pressões livres) serão extremamente elevados e, por sua vez, serão amplificados por suas reflexões dentro da estrutura. Além disso, e dependendo do grau de confinamento, os efeitos das altas temperaturas e o acúmulo de produtos gasosos produzidos pelo processo químico envolvido na explosão exercerão pressões adicionais e aumentarão a duração do carregamento dentro da estrutura. Os efeitos combinados dessas pressões podem eventualmente destruir a estrutura, a menos que esta seja projetada para sustentar os efeitos das pressões internas. Dispositivos para ventilação (alívio) dessas pressões irão reduzir a sua magnitude, bem como a sua duração.

A utilização de estruturas do tipo cúbica (Figura 4.17a), ou outras barreiras semelhantes com uma ou mais superfícies suficientemente frágeis ou abertas à atmosfera, proporcionará algum grau de alívio dependendo do tamanho da abertura. Este tipo de estrutura permitirá que a frente de onda de uma explosão interna se espalhe sobre o volume externo circundante, reduzindo assim significativamente a magnitude e a duração das pressões internas. As pressões exteriores são muitas vezes referidas como pressões de fuga ou pressões de escape, enquanto as pressões refletidas e reforçadas dentro da estrutura são denominadas pressões de choque internas. As pressões associadas ao acúmulo dos produtos gasosos e ao aumento da temperatura são identificadas como pressões de gás. Para o projeto da maioria das estruturas do tipo cúbica, totalmente ventiladas, os efeitos da pressão do gás podem ser negligenciados e não serão objeto deste estudo.

A detonação numa estrutura fechada, com aberturas relativamente pequenas (Figura 4.17b), está associada a pressões de choque e de gás cujas magnitudes são máximas.

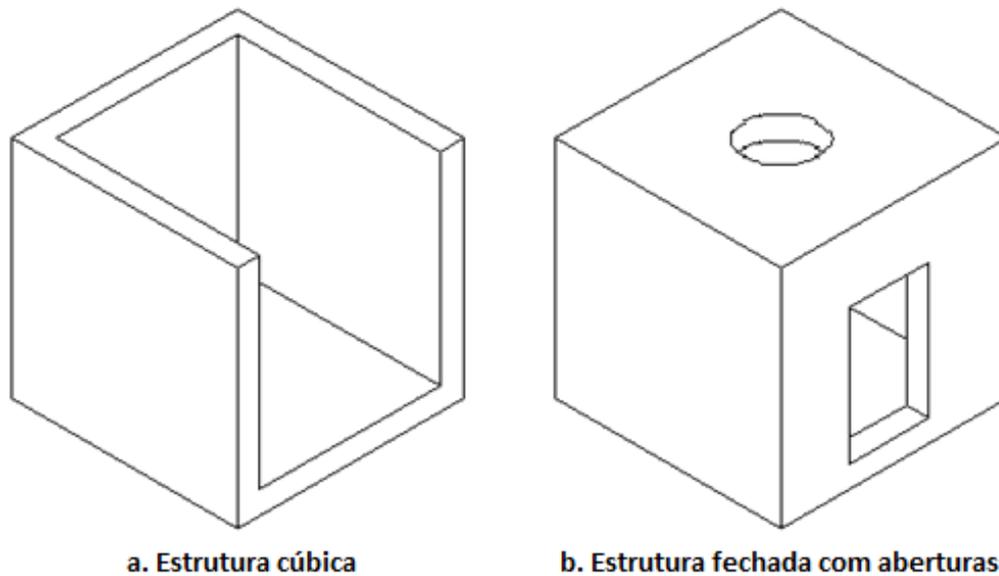


Figura 4.17 – Explosão em estruturas confinadas, adaptado do UFC (2008).

### ***Pressões de choque***

#### ***a) Carregamento de explosão***

Quando ocorre uma explosão dentro de uma estrutura cúbica ou de contenção, os picos de pressão, bem como o impulso associado à frente de choque, são extremamente elevados e serão amplificados pela estrutura de confinamento. Devido aos efeitos da proximidade da explosão e ao reforço das pressões de explosão, causado pelas reflexões dentro da estrutura, a distribuição das cargas de choque em qualquer superfície será não uniforme, com a superfície estrutural mais próxima da explosão submetida à carga máxima.

Os parâmetros necessários para a determinação das cargas de choque médias são a configuração da estrutura e seu tamanho, o peso e a localização da carga.

Devido à grande variedade de parâmetros necessários, o procedimento para a determinação das cargas de choque deve ser programado para soluções em computador.

Não será objeto deste trabalho a determinação da pressão de choque na estrutura, pois o estudo é para o carregamento de explosão em um prédio adjacente,

submetido a esta onda de choque. Isso corresponde ao estudo da proteção de prédios próximos a paióis.

As tabelas numéricas correspondentes podem ser consultadas no Manual UFC (2008), Capítulo 2.

### ***Pressões de Alívio***

Quando ocorre uma explosão dentro de uma câmara ventilada, as pressões de choque escapam para o exterior, juntamente com as pressões do gás. Perto da estrutura, as pressões de explosão são afetadas pela mesma, na situação em que as pressões de choque giram em torno das bordas da estrutura e formam vórtices de turbilhões maiores. Em distâncias maiores, este efeito não estará mais presente e a pressão de choque diminuirá com o aumento das distâncias. As pressões de fuga são maiores, em comparação com uma explosão de ar livre, na direção da ventilação (frente) e reduzida para o lado e para trás. O aumento das pressões na frente e a redução das pressões para o lado e para a retaguarda são menos extremas à medida que a distância da estrutura ao ponto de explosão é aumentada.

As pressões e impulsos que atuam sobre a superfície do solo são fornecidos em função da distância da explosão, direção (frente, lado, fundos) relativamente à abertura de ventilação na estrutura, área da abertura de ventilação e volume da estrutura.

Para fins de projeto, os valores de pressão e impulso podem ser obtidos nas Figuras 4-15 e 4-16 da seguinte maneira: uma vez que a pressão incidente tenha sido calculada, uma distância escalonada equivalente, que corresponde a esta pressão, pode ser determinada a partir da Figura 4-15. Esta distância escalonada equivalente pode então ser aplicada para determinar o valor das outras variáveis de pressão nas Figuras 4-15 e 4-16.

No Manual UFC (2008), Capítulo 2, poderão ser encontrados ábacos para a determinação da pressão e do impulso para os diferentes tipos de estruturas de proteção. Este trabalho apresentará, no Capítulo 5, uma ferramenta computacional para a obtenção dos parâmetros da fase positiva da explosão confinada.

## 4.8 Carregamento de explosão externa em estruturas

A carga de explosão sobre uma estrutura causada por uma detonação altamente explosiva depende de vários fatores:

- 1) A magnitude da explosão;
- 2) O local da explosão relativamente à estrutura em questão (confinada ou não confinada);
- 3) A configuração geométrica da estrutura;
- 4) A orientação da estrutura com respeito à explosão e a superfície do solo (acima, nivelado ou abaixo).

Os procedimentos aqui apresentados para a determinação das cargas de explosão externas nas estruturas são restritos a estruturas retangulares posicionadas acima da superfície do solo, onde a estrutura será submetida a uma frente de choque de onda plana. Os procedimentos podem ser estendidos para incluir estruturas de outras formas (cilíndricas, arqueadas, esféricas, etc.), bem como estruturas posicionadas na superfície do solo ou abaixo dela.

### 4.8.1 Forças agindo na estrutura

As forças que atuam sobre uma estrutura, associadas a uma onda de choque plana, dependem tanto da pressão de pico como do impulso das pressões incidentes e das pressões dinâmicas que atuam no campo livre. As pressões de pico e os impulsos associados à onda de choque de campo livre podem ser apresentados para vários explosivos.

Para cada faixa de pressão há uma velocidade do vento associada à onda de explosão que causa uma pressão dinâmica sobre objetos no caminho da onda. No campo livre, essas pressões dinâmicas são essencialmente funções da densidade do ar e da velocidade da partícula. Para condições típicas, estabeleceram-se relações padronizadas entre a pressão de pico incidente ( $P_{so}$ ), a pressão dinâmica de pico ( $q_o$ ), a velocidade da partícula de ar e a densidade de ar atrás da frente de choque. As magnitudes das

pressões dinâmicas, da velocidade da partícula e da densidade do ar são funções da pressão incidente de pico e, portanto, independentes da dimensão da explosão. A Figura 4.3 fornece os valores destes parâmetros em relação à pressão de pico incidente. Dos três parâmetros, a pressão dinâmica é a mais importante para se determinar as cargas nas estruturas.

Para fins de projeto, é necessário se estabelecer a variação ou decaimento tanto da pressão incidente como das pressões dinâmicas com o tempo, uma vez que os efeitos sobre a estrutura sujeita a um carregamento de explosão dependem do histórico completo de pressão do carregamento. O histórico de pressão da onda de choque incidente (Figura 4.18) é caracterizado por um aumento abrupto da pressão até um valor de pico, um período de decaimento à pressão ambiente e um período em que a pressão cai abaixo da pressão ambiente (fase de pressão negativa).

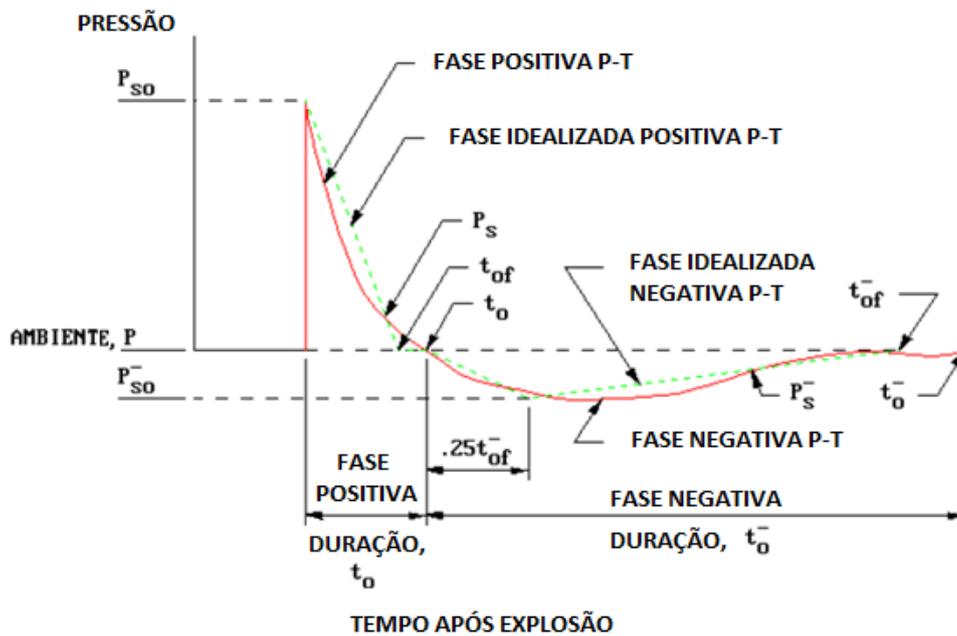


Figura 4.18 – Variação pressão-tempo idealizada, adaptado do UFC (2008).

A taxa de decaimento da pressão de choque incidente e da pressão dinâmica, após a passagem da frente de choque, é uma função da pressão de pico (fases positiva e negativa) e da dimensão da detonação. Para fins de projeto, a forma real do histórico de pressão pode ser aproximada por um impulso de pressão triangular equivalente. A

duração da fase positiva real é substituída por uma duração fictícia,  $t_{of}$ , que é expressa como uma função do impulso positivo total,  $i$ , e da pressão de pico  $P$ , como definido na Equação 4-1.

$$t_{of} = \frac{2i}{P} \quad (4-1)$$

A relação acima, para o impulso triangular equivalente, é aplicável às pressões incidentes, assim como para as refletidas. Nestas últimas, os valores da pressão e do impulso utilizados na Equação 4-1 são associados à onda refletida. A duração fictícia da pressão dinâmica pode ser considerada como igual à da pressão incidente.

Um procedimento similar é usado para determinar o histórico de pressão para a fase negativa da carga explosiva. A curva de pressão-tempo triangular equivalente para a fase negativa tem uma duração fictícia  $t_{of}^-$ , dada pela Equação 4-2, onde  $i^-$  e  $p^-$  são o impulso total e a pressão de pico, respectivamente, do pulso negativo incidente ou da onda de choque refletida.

$$t_{of}^- = \frac{2i^-}{p^-} \quad (4-2)$$

A pressão equivalente começa em zero, após a fase positiva ter terminado, se reduz linearmente para o pico de pressão negativa  $p^-$ , em um tempo igual a 25% de  $t_{of}^-$  e, em seguida, sobe linearmente para zero no tempo  $t_{of}^-$ . Os efeitos da pressão dinâmica na região de fase negativa usualmente podem ser negligenciados para a análise de elementos estruturais onde a pressão da fase negativa é pequena.

Como a duração fictícia da fase positiva será menor do que a duração real, ocorrerá um intervalo de tempo entre a duração fictícia da fase positiva e o início da fase negativa. Este intervalo de tempo, que é ilustrado na Figura 4.18, deve ser mantido em uma análise para a consistência do início dos vários faseamentos da carga.

Neste trabalho será apresentada a determinação do carregamento de explosão na parede frontal de uma estrutura retangular sem aberturas. O Manual UFC (2008) também contempla o cálculo do carregamento incidente no teto, nas laterais e na parede posterior da edificação, além de apresentar o método de cálculo para um carregamento de explosão em estruturas com aberturas.

#### 4.8.2 Estrutura retangular sem aberturas acima do solo

Para cada conjunto de impulsos de pressão de campo livre e dinâmico, as forças transmitidas a uma estrutura acima do solo podem ser divididas em quatro componentes gerais: (a) a força resultante da pressão incidente; (b) a força associada com as pressões dinâmicas; (c) a força resultante da reflexão da pressão incidente que incide sobre a superfície de interesse; e (d) pressões associadas à fase negativa da onda de choque. A importância relativa de cada um destes componentes depende da configuração geométrica e do tamanho da estrutura, da orientação da estrutura em relação à frente de choque e do propósito da consideração das cargas de explosão.

A interação da onda explosiva incidente com uma estrutura é um processo complexo. Para reduzir a complexidade do problema da explosão a termos razoáveis, assume-se que: (a) a estrutura é geralmente de forma retangular; (b) a pressão incidente de interesse é de 200 psi ou menos; (c) a estrutura a ser carregada está na região do tronco de Mach; e (d) o tronco de Mach se estende acima da altura do edifício.

##### *a) Cargas na parede frontal*

Para uma estrutura retangular acima do solo, em faixas de baixa pressão, o histórico de pressão no lado da estrutura voltado para a detonação (face frontal) quando este lado é paralelo à frente de choque (reflexão normal) é ilustrado na Figura 4.19a. No momento em que a frente de choque incidente atinge a parede frontal, a pressão imediatamente sobe de zero para a pressão refletida normal,  $P_r$ , que é uma função da pressão incidente (Figura 4.15). O tempo de dissipação,  $t_c$ , necessário para aliviar a pressão refletida é representado como:

$$t_c = \frac{4S}{(1+R)C_r} \quad (4-3)$$

Onde:

S = distância de dissipação, igual a H ou  $W_s/2$  (Figura 4.19a), adotando-se o menor;

$H$  = altura da estrutura;

$R$  = relação entre  $S/G$ , onde  $G$  é igual a  $H$  ou  $W_s/2$ , adotando-se o maior;

$C_r$  = velocidade do som na região de reflexão (Figura 4.20).

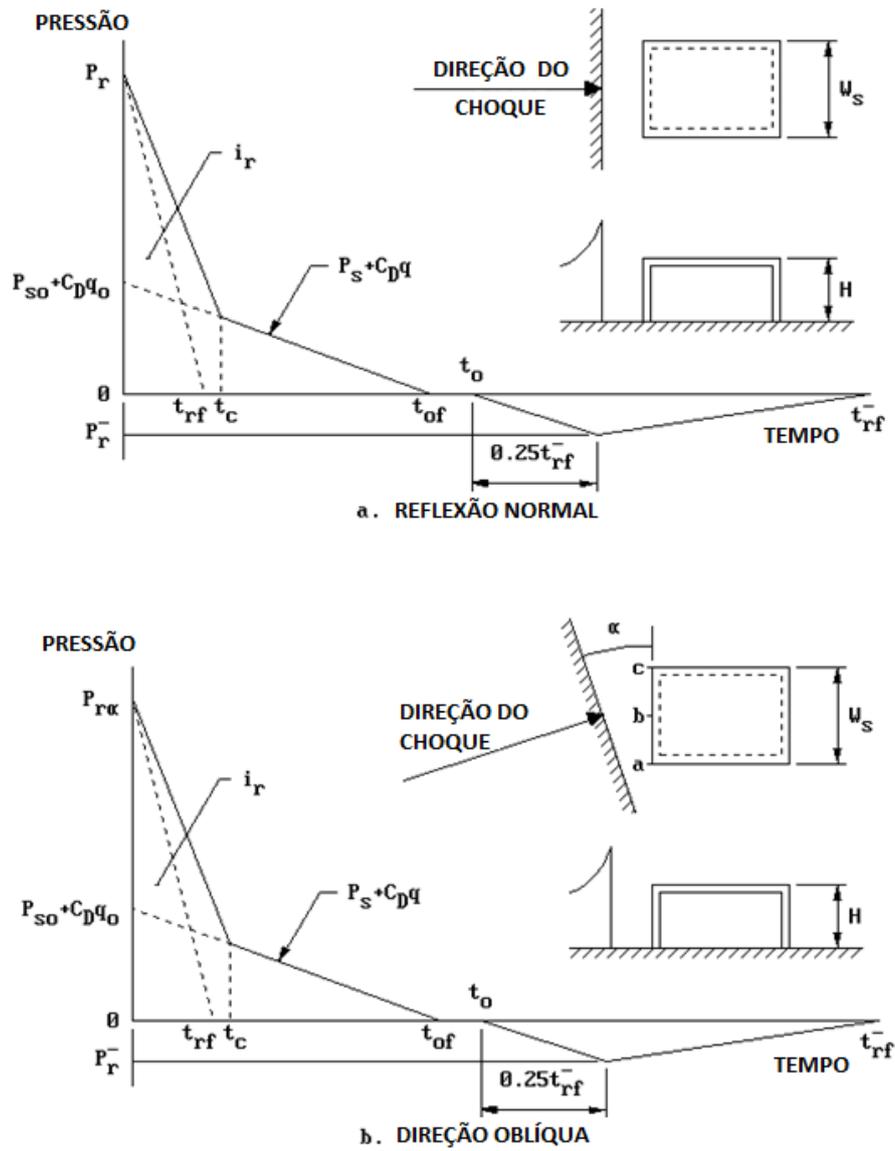


Figura 4.19 – Carregamento da parede frontal, adaptado do UFC (2008)

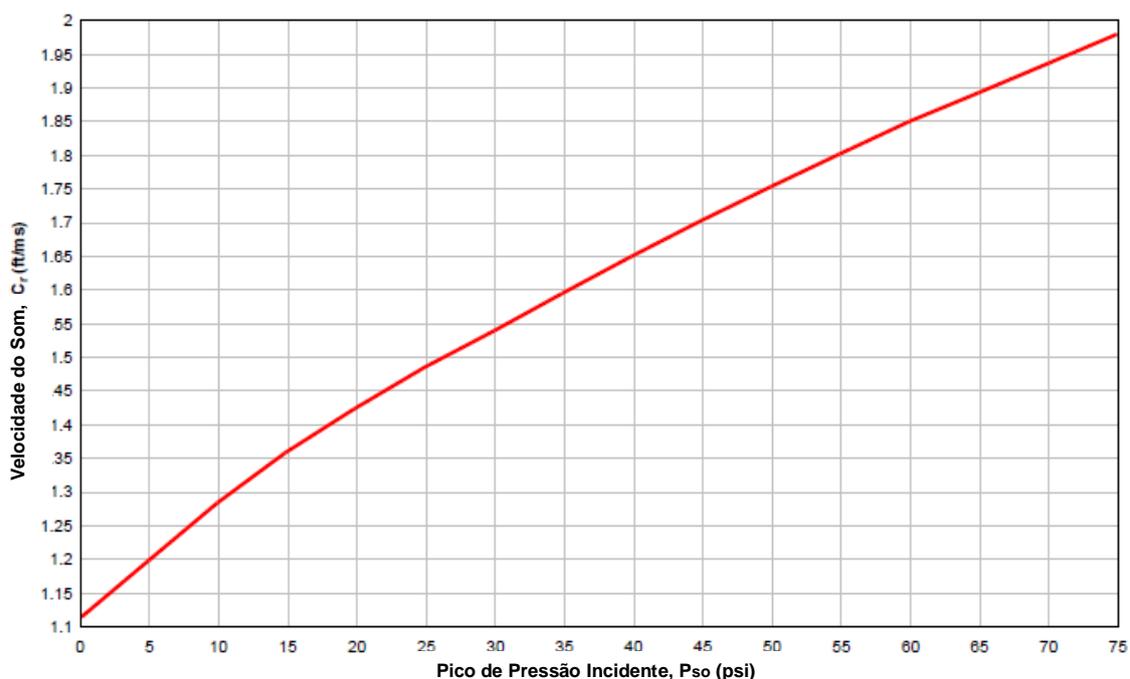


Figura 4.20 – Velocidade do som em regiões de sobrepressão refletida versus o pico da sobrepressão incidente, adaptado do UFC (2008).

A pressão de pico que atua na parede da frente após o tempo  $t_c$  é a soma algébrica do pico da pressão incidente,  $P_s$ , e do pico da pressão de arrasto, que é igual ao pico da pressão dinâmica,  $q$ , multiplicada pelo coeficiente de arrasto,  $C_D$ . Isso é definido na Equação 4-4.

$$P = P_s + C_D q \quad (4-4)$$

O pico da pressão dinâmica é calculado com base no pico da pressão incidente,  $P_s$ , utilizando a Figura 4.3. O coeficiente de arrasto  $C_D$ , que dá a relação entre a pressão dinâmica e a pressão de translação total na direção do vento produzida pela pressão dinâmica, varia com o número de Mach (ou com o número de Reynolds a baixas pressões incidentes) e a geometria relativa da estrutura. Um valor de  $C_D = 1$  para a parede frontal é considerado como adequado para as faixas de pressão consideradas no Manual UFC (2008).

Para valores de pressão mais elevados, a duração da pressão refletida,  $t_{rf}$ , pode ser menor do que o tempo de dissipação,  $t_c$ , fazendo com que o procedimento acima seja

impreciso. Portanto, uma segunda curva de pressão-tempo deve ser construída (triângulo pontilhado como indicado na Figura 4.19a) com base na pressão de choque refletida, usando o impulso de pressão refletido total,  $i_r$ , da Figura 4.15. A duração fictícia,  $t_{rf}$ , para a onda refletida normal é calculada a partir da Equação (4.5):

$$t_{rf} = \frac{2i_r}{P_r} \quad (4-5)$$

$P_r$  é o pico de pressão normal refletida (da Figura 4.15). A curva da Figura 4.19a, que dá o menor valor do impulso (área sob a curva), deve ser usada no cálculo da carga na parede.

Se a frente de choque se aproxima da estrutura em um ângulo oblíquo (Figura 4.19b), então a pressão de pico será uma função da pressão incidente e do ângulo de incidência,  $\alpha$ , entre a frente de onda e a parede frontal, e pode ser obtida a partir de Figura 4.21. O impulso de pico refletido,  $i_{ra}$ , pode ser obtido a partir das Figuras 4.22 e 4.23 (cuja diferença entre elas é a escala do pico de pressão incidente). O impulso de pressão triangular equivalente tem uma duração fictícia  $t_{rf}$ , que é calculada utilizando a Equação 4-6.

$$t_{rf} = \frac{2r_{i\alpha}}{P_r\alpha} \quad (4-6)$$

Usualmente, apenas o impulso positivo da relação pressão-tempo da Figura 4.19b é utilizado para a parede frontal. Para se determinar o movimento global da estrutura, os efeitos das pressões negativas devem ser incluídos. A pressão refletida negativa de pico e o impulso refletido são obtidos na Figura 4.16 e correspondem à pressão incidente máxima (Figura 4.15) que atua na parede frontal. O tempo de subida e a consideração das pressões negativas são calculados de forma semelhante ao descrito no subitem 4.8.1.

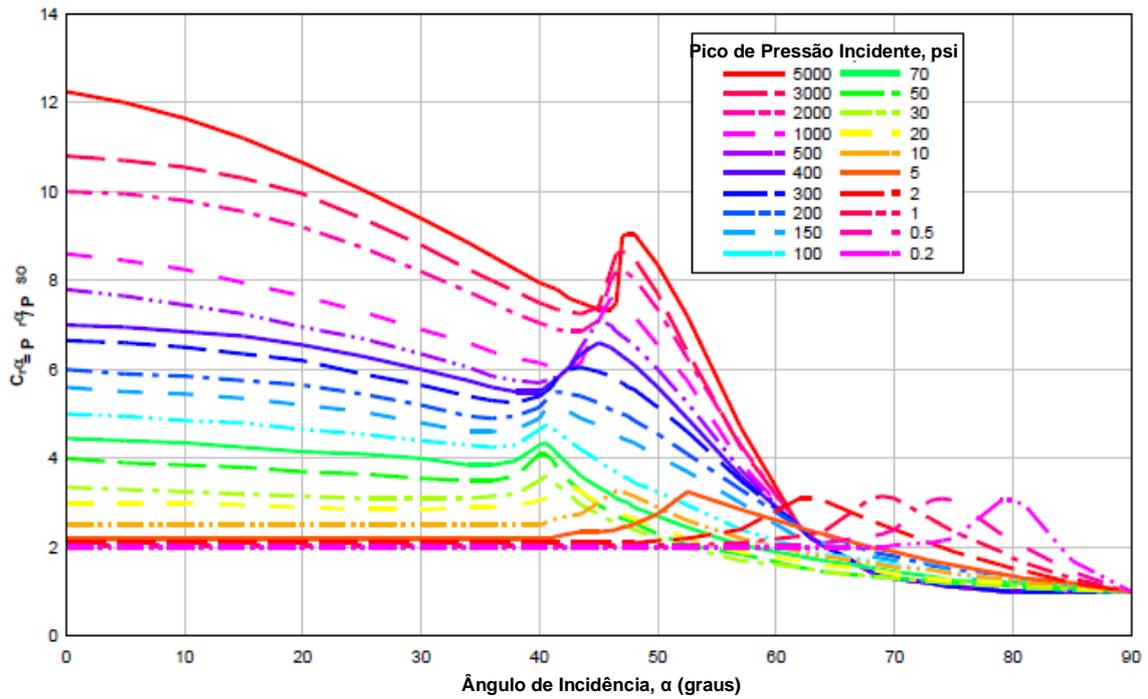


Figura 4.21 – Coeficiente de pressão refletida versus ângulo de incidência (UFC, 2008).

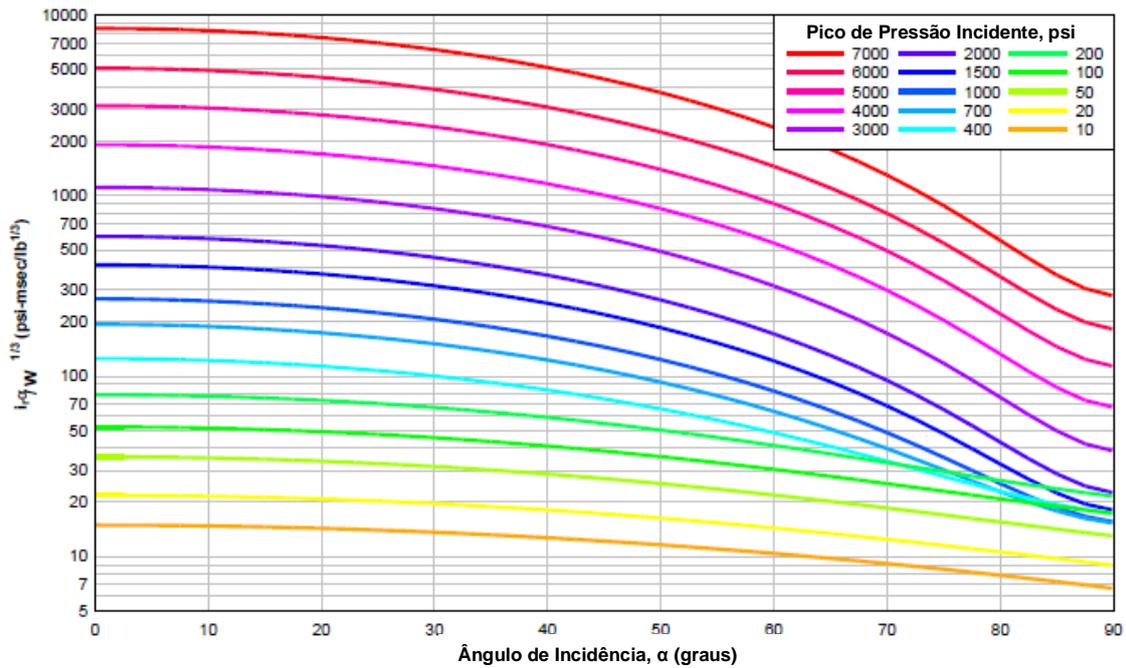


Figura 4.22 – Impulso refletido escalonado versus ângulo de incidência, adaptado do UFC (2008).

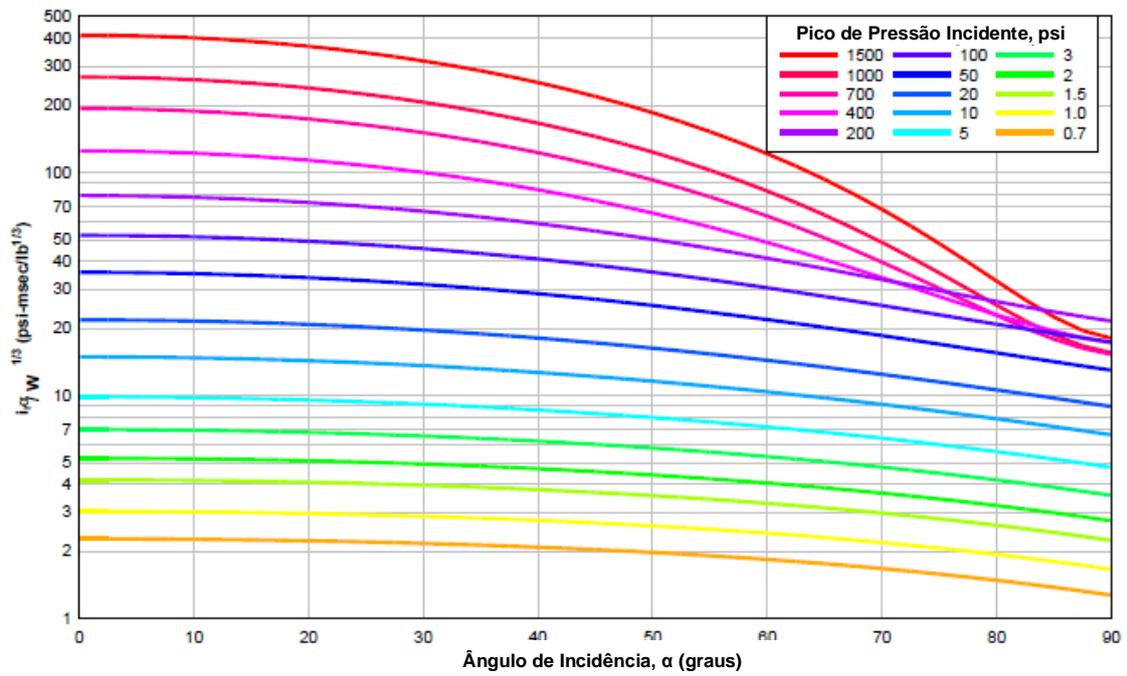


Figura 4.23 – Impulso refletido escalonado versus ângulo de incidência, adaptado do UFC (2008).

## **5 BLAST EFFECTS COMPUTER (BEC) – UTILIZAÇÃO DO MICROSOFT EXCEL PARA CÁLCULO DOS EFEITOS EXPLOSIVOS NO COMPUTADOR**

---

O “Department of Defense Explosives Safety Board” (DDESB) norte-americano tem tido um papel ativo na produção de ferramentas, com o auxílio de computadores, para a avaliação dos efeitos de vários tipos de explosão. Em 1978, foi liberada pelo DDESB uma circular com procedimentos de cálculo, denominado de BEC versão 1. Esses procedimentos de cálculo foram desenvolvidos para resolver problemas e prover dados relativos aos alvos potenciais de danos esperados devidos aos efeitos de explosões oriundas de munição ou depósito de explosivos sobre a terra ou enterrados.

Os algoritmos desenvolvidos foram implementados em planilhas EXCEL e em 1997 a primeira versão foi divulgada. As versões 2.0, 3.0 e 4.0 foram divulgadas respectivamente em 1998, 1999 e 2000. Elas foram sendo aprimoradas através da adição de novos algoritmos considerando dados de campo e a incorporação de outras análises, como por exemplo: algoritmos mais precisos para prever a pressão dinâmica e o impulso da pressão dinâmica, algoritmos para prever a probabilidade de ruptura dos tímpanos e a probabilidade de morte devida à ruptura dos pulmões.

A descrição da planilha EXCEL pode ser encontrada em SWISDAK e WARD (2000) e é abaixo reproduzida resumidamente. O programa é utilizado para obtenção dos parâmetros da fase positiva da explosão confinada.

### **5.1 Utilizando o programa**

Os seguintes passos deverão ser seguidos:

- Abrir a planilha em formato EXCEL;
- Selecionar a aba com unidades métricas ou inglesas;
- Entrar com as informações dos dados de entrada (*INPUT SECTION*);
- Usar o menu do *Potencial Explosion Site (PES)* para escolher o tipo de estrutura;

- Usar o menu *Select Type of Explosion* para selecionar o tipo de explosivo;
- Escolher entre número de armas (*Number of Weapons*) ou massa total do explosivo (*Total NEW*);
- Entrar com o alcance para o local exposto (*Exposed Site*);
- Entrar com o alcance inicial para a tabela resumo (*Initial Range for Summary Table*);
- Escolher entre altitude ou pressão barométrica no menu (*Select Atmospheric Description*);

(Obs.: se as correções de altitude não foram requisitadas, esse passo pode ser omitido)

- Entrar com os valores de altitude (*Altitude*) ou pressão barométrica (*Barometric Pressure*);

(Obs.: se as correções de altitude não foram requisitadas, esse passo pode ser omitido)

- Entrar com o valor de temperatura (*Temperature*).

(Obs.: se as correções de altitude não foram requisitadas, esse passo pode ser omitido)

Os valores de saída são fornecidos imediatamente após o preenchimento dos dados de entrada. Uma lista resumo também é gerada.

Após a seleção do PES, do tipo de armamento e tipo de explosivo, os efeitos da explosão ficam dependendo da relação de três tipos de dados: massa de explosivo (ou número de armas), alcance selecionado, e o tipo de efeito da explosão requerido (tempo de chegada, pico de pressão, probabilidade de morte devido à ruptura dos pulmões, entre outros). Caso dois desses três dados sejam conhecidos, o terceiro poderá ser calculado. Quando o *NEW* e o alcance são conhecidos, o programa BEC computa os efeitos utilizando a função busca de objetivo (*Goal Seek*) no menu de ferramentas do EXCEL. Esse procedimento será mostrado a seguir.

The image shows a dialog box titled "GOAL SEEK". It contains three text input fields. The first is labeled "Set Cell:", the second "To Value:", and the third "By Changing Cell:". Below these fields are two buttons: "CANCEL" and "OK".

Figura 5.1 – Caixa de diálogo *Goal Seek* (BEC, 2000).

- Entrar com os valores na célula de referência que se pretende computar (caixa da célula *Set Cell*).
- Entrar com o valor desejado (caixa da célula *To Value*).
- Entrar com a célula de referência que se pretende modificar para chegar a este objetivo (caixa da célula *By Changing Cell*).

Vale ressaltar que o programa gera alguns avisos, caso alguns dos valores de entrada estejam fora do alcance. São eles:

- Estrutura do tipo ECM (*Earth Corvered Magazine*) – a massa total de explosivo deve ser menor que 500.000 libras ou 226.795 kg;
- Estrutura do tipo HAS (*Hardened Aircraft Shelter*) – a massa total de explosivo deve ser menor que 10.000 libras ou 4.536 kg;
- Estrutura do tipo AGS (*Above Ground Structure*) – a massa total de explosivo deve ser menor que 500.000 libras ou 226.795 kg;
- Estrutura do tipo *Ship* – a massa total de explosivo deve ser menor que 200.000 libras ou 907.180 kg;
- Estrutura do tipo HPM (*High Performance Magazine*) – a massa total de explosivo deve ser menor que 60.000 libras ou 27.215 kg.

## 5.2 Exemplo de cálculo

Considerar que vinte e sete toneladas de bomba MK 82 (preenchidas de explosivos Tritonal) serão detonadas dentro de uma barricada, em uma estrutura acima do nível do mar. Serão verificadas as expectativas de efeito de sobrepressão a uma distância de 500 metros do evento. As figuras a seguir mostram a saída da planilha EXCEL do BEC.

<b>INPUT SECTION</b>			
<b>Metric Units (kg, m, kPa, Pa-s, ms)</b>			
Select Potential Explosion Site (PES)	Select Number of Weapons or Total NEQ	Enter initial range for Summary Table	Select Atmospheric Description
AGS	Total NEQ (kg)	100	Altitude (meters)
Select Type of Weapon	Enter Total NEQ (kg)		Enter Altitude (m)
MK82 (500 lb Bomb)	27,000.0		1,000.00
Select Type of Explosive	Range (m)		Enter Temperature (°C)
Tritonal	500.0		15.00
<b>OUTPUT SECTION</b>			
EXPLOSIVE PARAMETERS		ATMOSPHERE PARAMETERS	
Total NEQ (kg)	27,000.0	Pressure (mbar)	897.4
NEW per weapon (kg)	87.090	Temperature (°C)	15.00
TNT Equivalence	1.07	Pressure (S <sub>p</sub> )	0.8857
Equivalent Hemispherical Weight (kg)	19,332.2	Distance (S <sub>d</sub> )	1.0413
Effective Yield (kg)	28,890.0	Time (S)	1.0413
(N.B.: Both Weight and Yield are in kg of TNT)		Impulse (S <sub>i</sub> )	0.9223
<b>AIRBLAST PARAMETERS</b>			
	SEA LEVEL	ALTITUDE (meters)	
		1000	
Range (m)	500.0	442.9	
Time of Arrival at Range (msec)	1230.88	1281.7	
Over-Pressure at Range (kPa)	6.67	5.9	
Reflected Press. at Range (kPa)	13.63	12.1	
Positive Phase Duration at Range (ms)	156.4	162.9	
Positive Phase Impulse at Range (Pa-s)	456.9	421.4	
Reflected Impulse at Range (Pa-s)	829.1	764.6	
Dynamic Overpressure at Range (kPa)	0.2	0.14	
Dynamic Overpressure Impulse at Range (Pa-s)	9.3	8.6	
<b>OTHER INFORMATION</b>			
Probability of Window Breakage (percent) at Range (note: dimensions are cm)	Area = 0.186 m <sup>2</sup> 30.5 x 61.0 x 0.223 Float annealed	67.5	Area = 1.626 m <sup>2</sup> 152.4 x 106.7 x 0.559 Plate annealed 100.0
	Area = 0.372 m <sup>2</sup> 61.0 x 61.0 x 0.223 Float annealed	100.0	Area = 2.787 m <sup>2</sup> 182.9 x 152.4 x 0.559 Plate annealed 100.0
	Area = 0.975 m <sup>2</sup> 106.7 x 91.4 x 0.305 Float annealed	100.0	Area = 4.645 m <sup>2</sup> 304.8 x 152.4 x 0.762 Plate annealed 100.0
Probability of Eardrum Rupture (percent) at Range	0.0	(Marx)	
Probability of lethality due to lung damage (percent) at Range	0.0	(Eisenberg)	

Figura 5.2 – Exemplo de cálculo – Saída e Entrada (BEC, 2000).

Tabela 5.1 – Saída da tabela resumo (BEC, 2000).

**SUMMARY TABLE**

<b>Explosion Site (ES)</b>		<b>AGS</b>		<b>Type of Weapon</b>		<b>MK82 (500 lb Bomb)</b>	
<b>Type of Explosive</b>		<b>Tritonal</b>		<b>Total NEQ (kg)</b>		<b>27.000,00</b>	
<b>RANGE</b> <b>(meters)</b>	<b>TIME OF</b> <b>ARRIVAL</b> <b>(ms)</b>	<b>INCIDENT</b> <b>PRESSURE</b> <b>(kPa)</b>	<b>INCIDENT</b> <b>IMPULSE</b> <b>(Pa-s)</b>	<b>POSITIVE</b> <b>DURATION</b> <b>(ms)</b>	<b>REFLECTED</b> <b>PRESSURE</b> <b>(kPa)</b>	<b>REFLECTED</b> <b>IMPULSE</b> <b>(Pa-s)</b>	<b>DYNAMIC</b> <b>PRESSURE</b> <b>(kPa)</b>
500,0	1230,88	6,67	456,90	156,41	13,63	829,08	0,16
100,0	148,20	60,35	1683,80	84,05	149,17	3713,82	12,53
120,0	192,79	46,91	1555,01	93,48	111,02	3324,60	7,59
140,0	240,10	37,82	1430,47	101,09	86,73	2983,93	4,90
160,0	289,49	31,36	1315,26	107,43	70,29	2689,43	3,34
180,0	340,47	26,59	1210,86	112,84	58,59	2435,52	2,38
200,0	392,67	22,96	1117,21	117,58	49,94	2216,26	1,76
250,0	526,82	16,87	924,61	127,38	35,92	1786,08	0,94
300,0	664,32	13,17	779,14	135,27	27,67	1476,52	0,57
400,0	945,05	8,97	580,98	147,44	18,52	1072,63	0,27
500,0	1230,88	6,67	456,90	156,41	13,63	829,08	0,16
600,0	1520,20	5,23	374,39	163,37	10,60	670,97	0,10
700,0	1811,30	4,23	316,82	169,20	8,56	562,54	0,07
800,0	2102,26	3,48	275,12	174,54	7,10	485,02	0,04
900,0	2391,12	2,95	243,49	179,86	6,00	427,80	0,03
1.000,0	2676,20	2,55	218,69	185,46	5,15	384,51	0,02
1.400,0	out of range	1,66	163,90	out of range	out of range	out of range	out of range
1.600,0	out of range	1,44	150,76	out of range	out of range	out of range	out of range
1.800,0	out of range	1,24	137,53	out of range	out of range	out of range	out of range
2.000,0	out of range	1,07	122,97	out of range	out of range	out of range	out of range
2.500,0	out of range	0,78	97,03	out of range	out of range	out of range	out of range
3.000,0	out of range	0,61	79,95	out of range	out of range	out of range	out of range
5.000,0	out of range	0,30	out of range	out of range	out of range	out of range	out of range

## 6 CARREGAMENTO DE EXPLOSÃO PARA ANÁLISE DE ESTRUTURA RETANGULAR SEM ABERTURAS ACIMA DO SOLO

---

Será apresentado a seguir o cálculo do carregamento de explosão para a fachada frontal de uma estrutura retangular sem aberturas, situada acima do solo, submetida a uma onda de choque, como ilustrado na Figura 6.1.

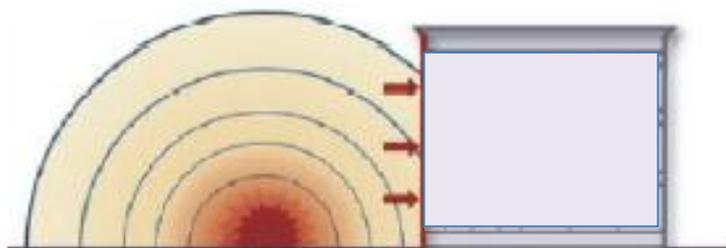


Figura 6.1 – Onda de choque incidindo na fachada frontal da estrutura

Conforme apresentado no Capítulo 5, o BEC (2000) constitui uma importante e prática ferramenta computacional para a obtenção dos parâmetros da fase positiva de uma explosão confinada (pressão incidente, impulso incidente, duração da fase positiva, pressão refletida, impulso refletido e pressão dinâmica). O Capítulo 4 mostrou como se obter os parâmetros através de ábacos para a explosão não confinada. Uma vez determinados os parâmetros, é possível calcular o carregamento de explosão para a fachada frontal de uma estrutura retangular sem aberturas, conforme descrito no item 4.8.2.

Para fins de projeto, é necessário ainda se estabelecer a variação da pressão no tempo, conforme apresentado nos itens 4.8.1 e 4.8.2 e ilustrado na Figura 4.19, uma vez que os efeitos sobre a estrutura vão depender do histórico completo do carregamento de explosão.

É possível montar esse gráfico em uma planilha Excel para desenhar a função da curva, da seguinte forma. Primeiramente faz-se o gráfico da fase positiva, uma vez conhecidos os valores da pressão incidente, pressão refletida, tempo de duração fictícia da fase positiva e o tempo de dissipação ou duração da pressão refletida (o menor valor

entre os dois, conforme explicado no item 4.8.2). Utiliza-se este último para definir uma reta vertical e determinar o ponto de interseção, ponto em que a curva apresentará outra variação (devido à pressão refletida), como mostrado na Figura 6.6.

Em seguida constrói-se a curva da fase negativa, utilizando o valor da duração da fase positiva (este é um ponto de descontinuidade do gráfico, uma vez que este valor é maior que o tempo de duração fictícia da fase positiva, que é uma aproximação do gráfico para fins de projeto, apresentada no item 4.8.2), o pico de pressão negativa e a duração fictícia da fase negativa, exemplificado na Figura 6.7. Outras curvas de pressão são apresentadas em KOELLER (2018) para fins de projeto de uma edificação.

### 6.1 Exemplo de cálculo

Construir a curva do carregamento imposto por uma explosão superficial (considerando apenas o efeito da sobrepressão) na fachada frontal de uma estrutura retangular sem aberturas, acima do solo, com os dados que seguem:

Tabela 6.1 – Dados do exemplo

Massa explosivo TNT (W)		5000,00 kg	11023,20 lb
Distância até o epicentro R		190,00 m	623,36 ft
Edifício	Largura	8,00 m	26,25 ft
	Comprimento	20,00 m	65,62 ft
	Altura	8,00 m	26,25 ft

\*1kg = 2,20461lb

1m = 3,28084ft

A) Cálculo da distância escalonada Z (Equação 2-1)

$$Z = R/W^{(1/3)} = 28,01 \text{ ft/lb}^{0,33}$$

B) Determinação dos parâmetros de explosão para fase Positiva (Figura 4.15)

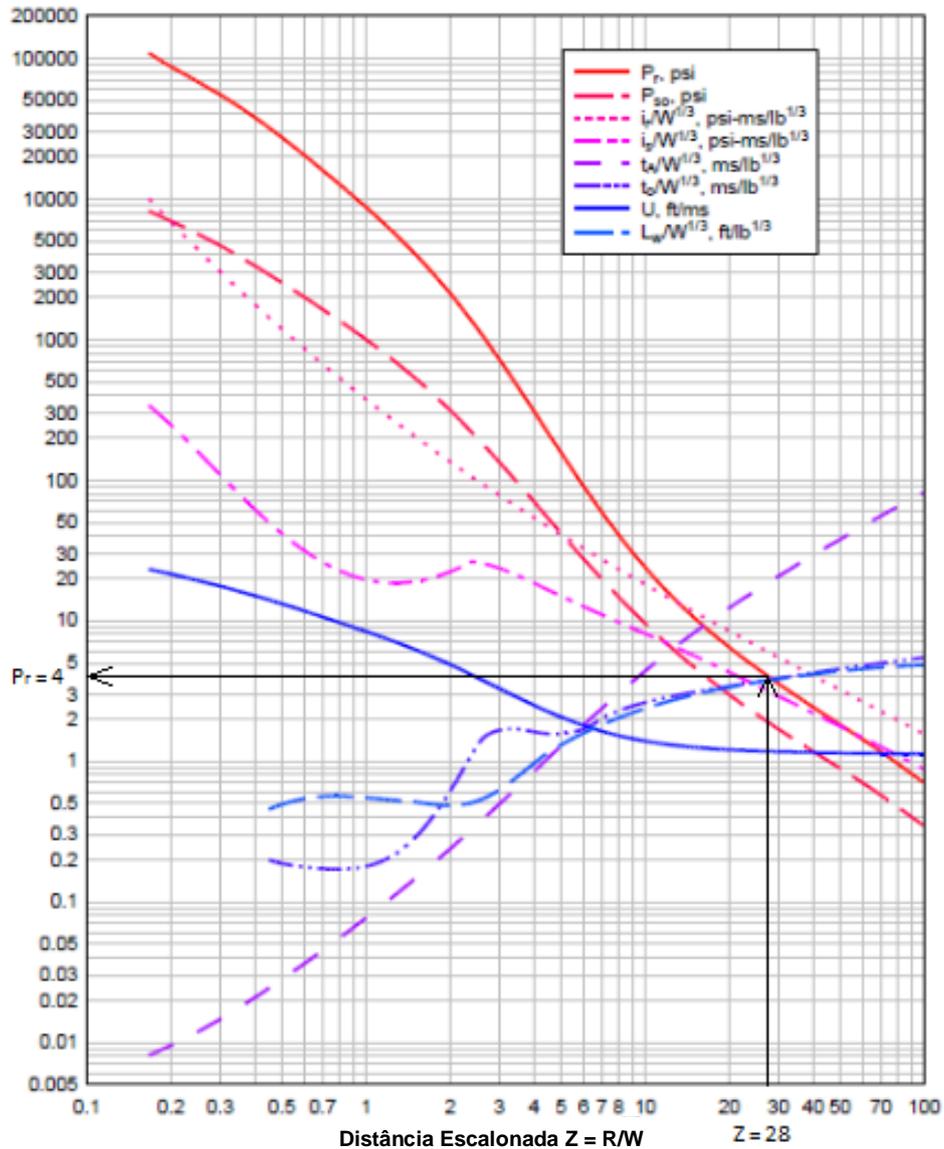


Figura 6.2 – Exemplo de retirada do parâmetro “Pressão Refletida” do gráfico da Figura 4.15, modificado do UFC (2008).

Na Figura 6.2 é apresentado como obter a Pressão refletida  $P_r$  entrando com o valor da Distância escalonada  $Z$ . Os demais parâmetros são retirados do gráfico de forma análoga, com as respectivas unidades indicadas na legenda do gráfico.

$$\begin{aligned}
 P_r &= 4,00 \\
 P_{so} &= 1,90 \\
 i_r/W^{(1/3)} &= 6 \\
 i_s/W^{(1/3)} &= 3,2 \\
 t_A/W^{(1/3)} &= 19 \\
 t_o/W^{(1/3)} &= 3,8
 \end{aligned}$$

Logo:

Pr = 4,00 psi  
Pso = 1,95 psi  
ir = 133,53 psi-ms  
is = 71,22 psi-ms  
tA = 422,85 psi-ms  
to = 84,57 psi-ms

C) Determinação dos parâmetros de explosão para fase Negativa (Figura 4.16)

pr(-) = 1,05  
ir/W<sup>0,33</sup>(-) = 6,55

Logo:

pr(-) = 1,05 psi  
ir(-) = 145,77 psi-ms

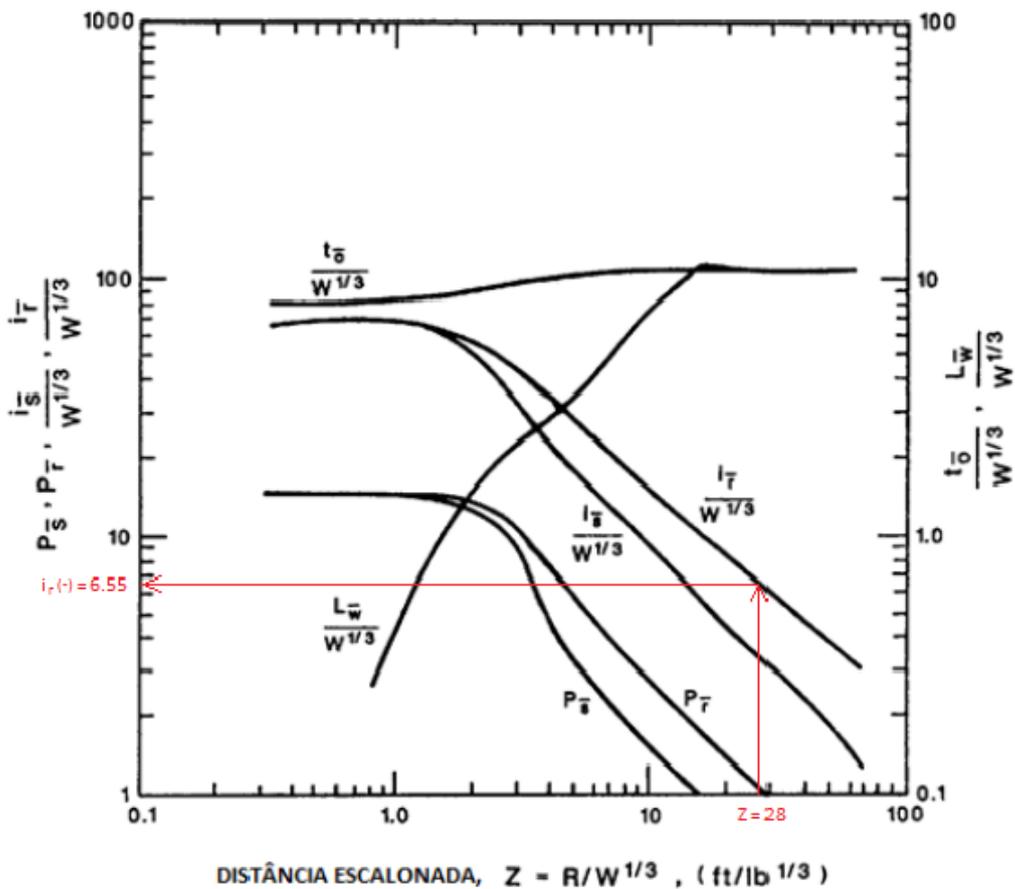


Figura 6.3 – Exemplo de retirada do parâmetro “Impulso Refletido” do gráfico da Figura 4.16, modificado do UFC (2008).

D) Determinação da fase positiva do carregamento na fachada frontal

D.1) Cálculo da duração fictícia da fase positiva (Equação 4-1)

$$t_{of} = 2i/Ps_0 = 73,04 \text{ ms}$$

D.2) Cálculo do tempo de dissipação  $t_c$  (Equação 4-3):

$$C_r = 1,15 \text{ ft/ms} \quad (\text{Figura 4.20})$$

$$S = \text{menor}(\text{altura}; \text{largura}/2) = 13,12 \text{ ft}$$

$$G = \text{maior}(\text{altura}; \text{largura}/2) = 26,25 \text{ ft}$$

$$R = S/G = 0,50 \text{ ft}$$

$$t_c = 4S/[(1+R).C_r] = 30,43 \text{ ms}$$

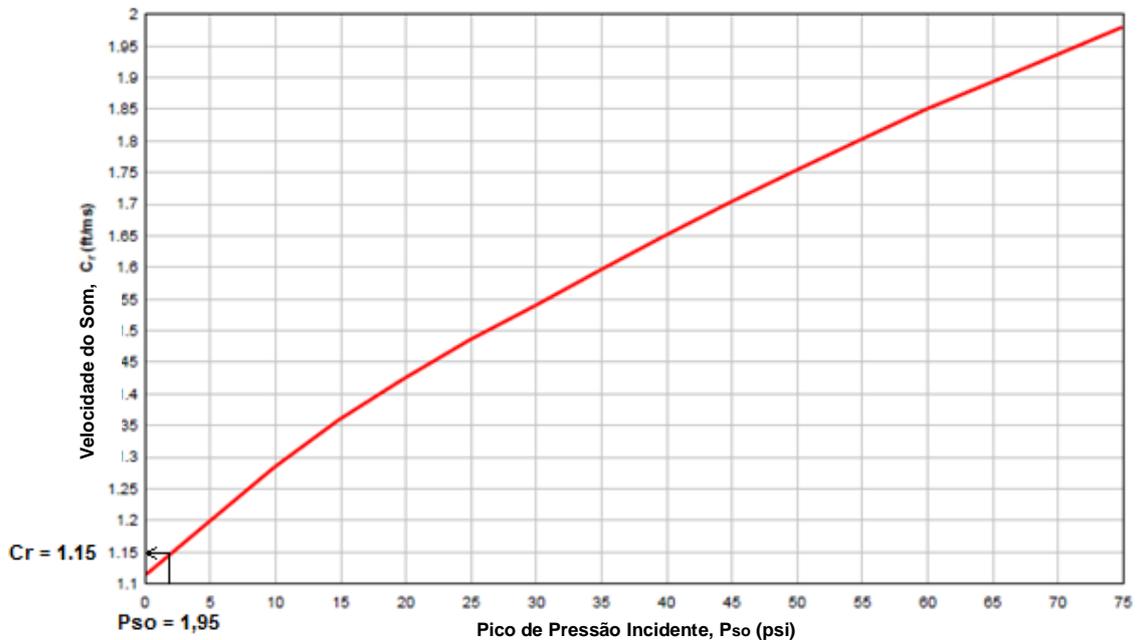


Figura 6.4 – Exemplo de retirada da “Velocidade do som” do gráfico da Figura 4.20, modificado do UFC (2008).

D.3) Cálculo da pressão de pico P (Equação 4-4)

$$q = 0,10 \text{ psi} \quad (\text{Figura 4.3})$$

$$C_d = 1,00 \quad (\text{Recomendação UFC})$$

$$P = P_{so} + C_d.q_0 = 2,05 \text{ psi}$$

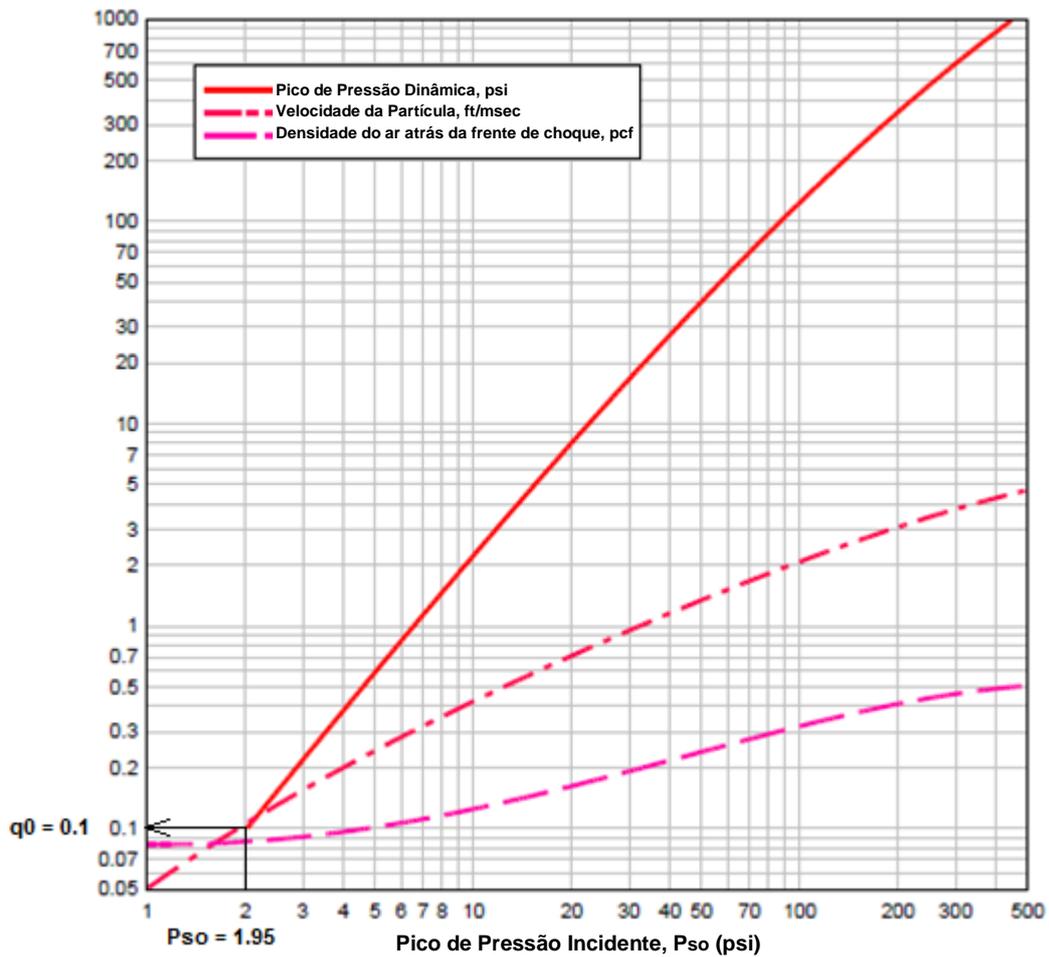


Figura 6.5 – Exemplo de retirada da “Pressão Dinâmica” do gráfico da Figura 4.3, modificado do UFC (2008).

D.4) Cálculo da duração da pressão refletida  $tr_f$  (Equação 4-5)

$$\alpha = 0^\circ$$

(Reflexão Normal)

$$tr_f = 2ir/pr = 66,77 \text{ ms}$$

Como  $t_c < tr_f$ , usa-se  $t_c$ .

E) Construção curva da fase positiva

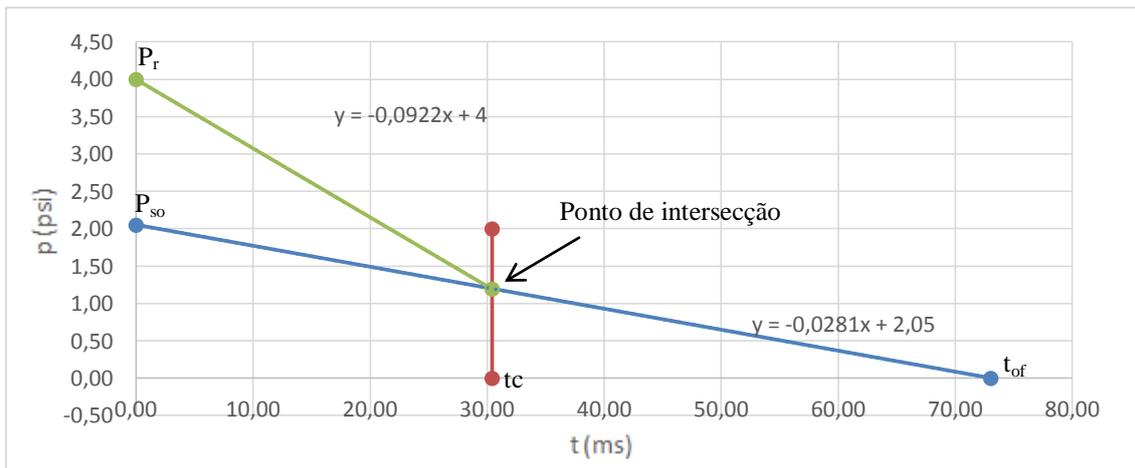


Figura 6.6 – Exemplo do gráfico da fase positiva de um histórico de pressão.

F) Determinação da fase negativa do carregamento na fachada frontal

F.1) Cálculo duração fictícia negativa:

$$\text{trf}(-) = 2i_r(-)/p_r(-) = 277,66 \text{ ms}$$

F.2) Determinação do pico da fase negativa

$$0,25 \text{ trf}(-) = 69,42 \text{ ms}$$

G) Construção da Curva do Carregamento de Explosão

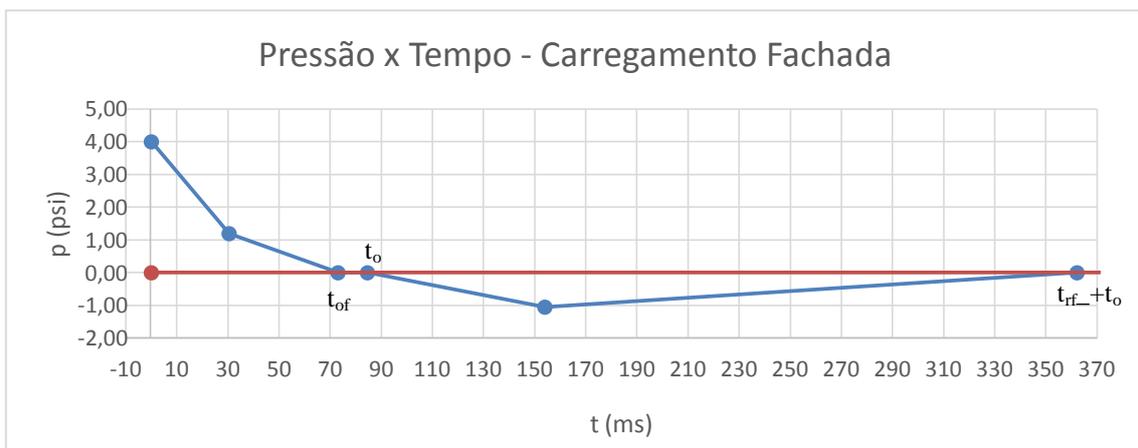


Figura 6.7 – Exemplo do gráfico completo de um histórico de pressão

## 7 CONCLUSÃO

---

Nesta Dissertação foi estudado o fenômeno de explosão, visando à aplicação em estruturas que possam resistir a explosões acidentais.

Existem poucos trabalhos que abordam o cálculo de um carregamento de explosão incidente na estrutura. No Brasil, usualmente, utilizam-se estruturas padrões para distâncias de segurança conhecidas. Desta forma, este trabalho constitui-se em um instrumento para nortear o cálculo e determinar o carregamento de explosão (considerando apenas o efeito da sobrepressão) na fachada frontal de uma estrutura retangular sem aberturas, causada por alto explosivo.

Uma explanação do “estado da arte” mais atual sobre o assunto foi apresentada, visando registrar todas as informações e referências básicas necessárias para o projeto de estruturas resistentes a explosões.

Informações necessárias para a determinação do carregamento atuante utilizado no projeto de estruturas resistentes a explosões foram disponibilizadas, através de fórmulas e ábacos. Foi apresentada ainda uma planilha Excel que automatiza os passos para a obtenção dos parâmetros de explosão confinada para a fase positiva, necessários para o projeto, com um exemplo básico da utilização da mesma.

Além disso, foi mostrado um passo a passo através de um exemplo prático de determinação do carregamento de explosão a partir da metodologia de cálculo do Manual UFC e a construção de uma curva de pressões, a ser considerada na Dissertação que acompanha e dá seguimento a este trabalho (KOELLER, 2018). Nessa Dissertação, uma análise completa e o dimensionamento de uma estrutura típica, submetida ao carregamento de explosão, calculado conforme aqui apresentado, foi realizada.

Diante disso, pode-se afirmar que o propósito deste trabalho foi alcançado.

Para trabalhos futuros, sugere-se estender a determinação do carregamento de explosão para a fachada frontal de estruturas com aberturas, podendo ainda ser objeto de estudo a avaliação da pressão incidente no teto, nas fachadas laterais e posteriores à frente de onda de choque.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (ATC), “**Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks**”, Federal Emergency Management Agency (FEMA), United States, 2003.

CASAGRANDE, A. S., “**Estudo de Cargas Impulsivas com Ênfase em Explosões: Estratégias de Análises Utilizando Métodos Numéricos**”, Dissertação de Mestrado, PROMEC-UFRGS, Porto Alegre. 2006.

DEPARTMENT OF DEFENSE, “**DoD Ammunition and Explosives Safety Standards: General Explosives Safety Information and Requirements**” Manual Number 6055.09-M, Volume 1 (2010)

DEPARTMENT OF DEFENSE EXPLOSIVES SAFETY BOARD (DDESB), “**The New DDESB Blast Effect Computer**”. Alexandria, Virginia, 1998.

DEPARTMENT OF DEFENSE EXPLOSIVES SAFETY BOARD (DDESB), “**DDESB Risk-Based Explosives Safety Analysis**”. Alexandria, Virginia, 2000.

KOCCAZ, Z.; SUTCU, F.; TORUNBALCI, N., “**Architectural and Structural Design for Blast Resistant Buildings**”, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China. 2008.

KOELLER, W. M., “**Análise e verificação estrutural de um edifício submetido à onda de choque decorrente de uma explosão**”, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2018.

LIMA, R. L. L., “**Impactos causados pela explosão de uma fábrica de munição numa área que será utilizada para a construção de uma Vila Olímpica**”, Monografia (Pós Graduação – QSMS), FUNCEFET, Fundação de Apoio ao CEFET, Rio de Janeiro, 2009.

NETO, M. L. C., “**Um Estudo do Fenômeno Explosão e das Ondas de Choque Utilizando a Fluidodinâmica Computacional**”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Brasília. 2015.

NGO, T.; MENDIS, P.; GUPTA, A.; RAMSAY, J., “**Blast Loading and Blast Effects on Structures**”, Electronic Journal of Structural Engineering, EJSE Special Issue: Loading on Structures (2007).

SILVA, W.C.L, “**Blast - Efeitos da onda de choque no ser humano e nas estruturas**”, Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, São Paulo. 2007.

SWISDAK, M. M.; WARD, J. M., “**The DDESB Blast Effects Computer—Version 4.0**” – (BECv4)”, Minutes of the 29<sup>th</sup> DoD Explosives Safety Seminar (2000).

TECHNICAL MANUAL N° 9-1300-214. “**Military Explosives**”, Departments of The Army and The Air Force. Washington, USA, 1990.

UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC), “**UFC 3-340-02: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions**”. Defense Department of the United States of America (2008).

## 9 SÍTIOS DA INTERNET

---

BLOG DO GIL, *1958 - Explosão em Deodoro*, Notícia de 01/05/2012, 15h18. Disponível em: <<http://pavaonoblog.blogspot.com.br/2012/05/1958-explosao-em-deodoro-01052012-1518.html>>. Acesso em: 24 de mai. 2016, 14:21:00.

FOLHA DE SÃO PAULO, *Acidente em paióis gerou pânico em 95 no Rio*. Notícia de 17/06/2004, 02h33. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u95800.shtml>>. Acesso em: 24 de mai. 2016, 14:17:00.

JORNAL O GLOBO, *Paiol da Imbel, fábrica de material bélico, explode em Juiz de Fora*. Notícia de 17/08/2016, 10h26. Disponível em: <<http://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/2016/08/paiol-de-fabrica-de-material-belico-em-mg-explode.html>>. Acesso em: 01 de fev. 2018, 13:47:00

MARINHA DO BRASIL, *CMASM homenageia mortos em acidente ocorrido no antigo Centro de Armamento da Marinha*. Notícia de 02/05/2016. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/node/1168>>. Acesso em: 15 de mar. 2017, 17:44:00.

REUTERS BRASIL, *Explosão em paiol de munição mata 7 militares nos Estados Unidos*. Notícia de 19/03/2013, 17h21. Disponível em: <<http://br.reuters.com/article/idBRSPE92I07C20130319>>. Acesso em: 24 de mai. 2016, 14:15:00

SILVA, W.C.L.; IHA, K. & FERREIRA, P.C.M., *Dimensionamento explosivos em cabeça de guerra para o efeito de sopro*. Artigo. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA – São José dos Campos- SP. Disponível em <[http://www.sige.ita.br/IX\\_SIGE/Artigos/AA\\_01.pdf](http://www.sige.ita.br/IX_SIGE/Artigos/AA_01.pdf)>. Acesso em: 14 de mar. 2017, 19:40:00.