



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

TALLYS GONÇALVES PEREIRA

**ANÁLISE DOS NÍVEIS DE SOLICITAÇÃO GERADOS POR EXPLOSIVOS
SOBRE OS PILARES DO VIADUTO DA BR-020 EM CAUCAIA, CEARÁ, ALIADA
À VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA E DIMENSIONAMENTO PREVENTIVO.**

FORTALEZA-CE

2019

TALLYS GONÇALVES PEREIRA

ANÁLISE DOS NÍVEIS DE SOLICITAÇÃO GERADOS POR EXPLOSIVOS SOBRE
OS PILARES DO VIADUTO DA BR-020 EM CAUCAIA, CEARÁ, ALIADA À
VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA E DIMENSIONAMENTO PREVENTIVO.

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como exigência parcial para obtenção do grau
de Engenheiro Civil na Universidade Federal
do Ceará. Área de concentração:
Engenharia Estrutural.

Orientadora: Prof.^a Dra. Magnólia
Maria Campêlo Mota.

FORTALEZA-CE

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P496a Pereira, Tallys Gonçalves.

Análise dos Níveis de Solicitação Gerados por Explosivos Sobre os Pilares do Viaduto da BR-020 em Caucaia, Ceará, aliada à Verificação de Segurança e Dimensionamento Preventivo. / Tallys Gonçalves Pereira. – 2019.

90 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.

Orientação: Profa. Dra. Magnólia Maria Campêlo Mota.

1. Explosão. 2. Viaduto. 3. Segurança. 4. Dimensionamento. 5. Concreto Armado. I. Título.

CDD 620

TALLYS GONÇALVES PEREIRA

ANÁLISE DOS NÍVEIS DE SOLICITAÇÃO GERADOS POR EXPLOSIVOS SOBRE
OS PILARES DO VIADUTO DA BR-020 EM CAUCAIA, CEARÁ, ALIADA À
VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA E DIMENSIONAMENTO PREVENTIVO.

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como exigência parcial para obtenção do grau
de Engenheiro Civil na Universidade Federal do
Ceará. Área de concentração: Engenharia
Estrutural.

Aprovada em: 29/11/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Magnólia Maria Campêlo Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque
Universidade Estadual do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Deixar minha família no interior e vir à Fortaleza em busca do meu sonho não foi nada fácil. Foram muitas noites questionando se era realmente isso que me faria feliz, e principalmente se tinha que ser mesmo nessa cidade, que tanto me assustava. As dificuldades começaram já na matrícula, a quem aqui dedico meus agradecimentos iniciais. Obrigado Kátia Góes e Henan Cintra, sem vocês eu não teria sequer me matriculado na UFC.

Acredito que um parágrafo seja pouco para dedicar todo meu amor e gratidão a todos os amigos que a universidade me trouxe. Obrigado Renata, Lívia e Écio pela paciência, amparo e diversão que vocês me proporcionaram desde o quinto semestre. Obrigado Sofia, Bárbara, Leonardo, Thaís, Lara e Vitor. Sem vocês eu ainda estaria no primeiro ano reclamando da vida. Sou grato também ao meu colega de quarto, que desde 2016 me dá exemplos de como ser e de como não ser. Obrigado Bruno Mota por todos os momentos engraçados e de surto.

Impossível não agradecer ao Arthur, ao Racine e ao Bruno Luz. Aprendemos juntos coisas que nenhuma sala de aula seria capaz de ensinar. Nos amparamos mesmo quando as coisas pareciam não ter solução. Choramos, rimos, dançamos e acima de tudo crescemos juntos. Vocês são perfeitos aos olhos de cristo e aos meus. Obrigado.

Nesse último ano ganhei um aliado nas batalhas finais dessa grande guerra que foi a graduação. Obrigado Gleison Holanda por ter sido sempre tão atencioso, paciente e especial. Você foi a luz no fim do túnel.

Obrigado aos professores que fizeram eu me apaixonar pelo curso, em especial à minha orientadora, Prof.^a Dra. Magnólia Maria Campêlo Mota, pela paciência, conselhos e acima de tudo pelos inúmeros ensinamentos.

A Deus, por ter segurado minha mão em todos os momentos, me reerguendo a cada derrota e me dando forças para seguir lutando.

Contudo, absolutamente nada disso teria acontecido sem os meus pais. Gratidão especialmente à minha mãe, por ter feito mais do que o impossível tantas vezes para fazer esse sonho acontecer. Essa vitória é nossa.

RESUMO

No início de 2019, o Ceará foi palco de uma série de atentados criminosos motivados pela postura assumida pela nova gestão de segurança pública do estado. A cidade de Fortaleza foi, contudo, a mais atingida, devido à ocorrência de incêndios, tiroteios e até mesmo explosões. Explosões são fenômenos caracterizados por descargas súbitas de energia, liberadas durante a detonação de artefatos explosivos na forma de pressão, calor e até mesmo radiação, no caso de acidentes nucleares. Dada a recorrência de eventos explosivos nos últimos anos, o presente trabalho foi concebido com o propósito de analisar a explosão ocorrida no viaduto da BR-020 em Caucaia, Ceará, com base em estimativas de massa e posicionamento de um explosivo idealizado. A pesquisa estudou os níveis de solicitação gerados pela ação explosiva, as distâncias requeridas para a segurança de pessoas e edificações, além de propor estratégias de dimensionamento preventivo para os pilares do viaduto em questão. A partir da análise dos níveis de solicitação, foi possível concluir que a situação crítica é atingida quando o explosivo é colocado em um dos taludes laterais do viaduto, visto que a solicitação no tabuleiro chega a ser 5,5 vezes maior que a obtida para a mesma quantidade de explosivo posicionada entre os pilares centrais. No tocante à segurança das edificações vizinhas, foi constatado que estas só sofreriam danos caso a quantidade de explosivos fosse de uma ordem de grandeza muito superior as normalmente utilizadas em explosões improvisadas. Para seres humanos, no entanto, foi observado que para as massas de explosivo estimadas, distâncias de aproximadamente 10 metros poderiam causar ruptura dos tímpanos, podendo levar a morte caso esse afastamento fosse inferior a 2,4 metros. Quanto ao dimensionamento, verificou-se a viabilidade técnica e econômica das soluções propostas, visto o atendimento das normas técnicas existentes no Brasil e o pequeno incremento no custo global da obra, causado pelas implementações preventivas apresentadas por esta pesquisa.

Palavras-Chave: Explosão. Viaduto. Segurança. Dimensionamento. Concreto Armado.

ABSTRACT

In early 2019, Ceará was the scene of a series of criminal attacks motivated by the stance taken by the state's new public security management. The city of Fortaleza was, however, the most affected, due to the occurrence of fires, shootings and even blasts. Blasts are phenomena characterized by sudden discharges of energy, released during the detonation of explosive artifacts in the form of pressure, heat and even radiation, in case of nuclear accidents. Due the recurrence of explosive events in recent years, this work was conceived with the purpose of analyzing the explosion that occurred on the BR-020 viaduct in Caucaia, Ceará, based on estimates of mass and positioning of an idealized explosive. The research studied the levels of demand generated by the explosive action, the distances required for the safety of people and buildings, in addition to proposing preventive design strategies for the viaduct pillars in question. From the analysis of the demand levels, it was possible to conclude that the critical situation is reached when the explosive is placed on the lateral slopes of the viaduct, since the demand on the deck is 5.5 times higher than that obtained for the same amount of explosive placed between the central columns. Regarding the safety of neighboring buildings, it was found that these would only suffer damage if the amount of explosives was of an order of magnitude much higher than those normally used in improvised explosions. For humans, however, it was observed that for the estimated masses of explosives, distances of approximately 10 meters could cause rupture of the eardrums, which could lead to death if this distance was less than 2.4 meters. As for design, the technical and economic feasibility of the proposed solutions was verified, given the compliance with existing technical standards in Brazil and the small increase in the overall cost of the construction, caused by the preventive implementations presented by this research.

Key-Words: Blast. Viaduct. Safety. Design. Reinforced Concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de explosão ao ar livre	15
Figura 2 – Curva pressão versus tempo de uma onda de choque	16
Figura 3 – Ábaco proposto por Baker <i>et al.</i> (1983) para fase positiva da onda explosiva.....	18
Figura 4 – Ábaco proposto por Baker <i>et al.</i> (1983) para reflexão da onda explosiva.....	18
Figura 5 – Ábacos para obtenção de solicitações refletidas	19
Figura 6 – Pressão versus distância do epicentro ao alvo.....	21
Figura 7 – Representação esquemática da reflexão de ondas de choque em uma ponte.....	24
Figura 8 – Localização e vista lateral do viaduto analisado	28
Figura 9 – Planta baixa do tabuleiro do viaduto.....	29
Figura 10 – Corte longitudinal do viaduto.	29
Figura 11 – Delimitação da função no <i>WebPlotDigitizer</i>	32
Figura 12 – Interface da planilha de previsão de ondas explosivas	35
Figura 13 – Representação esquemática da onda incidente e esquema de pontos no pilar.....	40
Figura 14 – Distribuição de solicitações resultantes no pilar	40
Figura 15 – Representação esquemáticas das simulações da hipótese geral.	41
Figura 16 – Efeitos de ondas de choque sobre estruturas.....	42
Figura 17 – Efeitos de ondas de choque sobre seres humanos.....	42
Figura 18 – Comparação da área de risco para as situações de 6 kg e 64 kg de ANFO	62
Figura 19 – Distância das primeiras edificações nas redondezas do viaduto	64
Figura 20 – Comparação de dano entre os pilares P05 e P08.....	65
Figura 21 – Parâmetros para <i>Surface Burst</i> proposto por Kingery-Bulmash (1984)	87
Figura 22 – Pressão dinâmica em função da sobrepressão.....	88
Figura 23 – Coeficiente de Reflexão para a Pressão em função do ângulo (a).	89
Figura 24 – Coeficiente de reflexão para a pressão em função do ângulo (b)	89
Figura 25 – Coeficiente de reflexão para o impulso em função do ângulo (a).....	90
Figura 26 – Coeficiente de reflexão para o impulso em função do ângulo (b)	90

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Pico de Sobrepressão $0,06 < Z \leq 39,21$	33
Gráfico 2 – Pico de sobrepressão para $0,06 < Z \leq 0,28$	33
Gráfico 3 – Pico de sobrepressão para $0,28 < Z \leq 2,37$	34
Gráfico 4 – Pico de sobrepressão para $2,37 < Z \leq 39,21$	34
Gráfico 5 – Curva de pressão no tempo para $R = 3,0$ m e $W = 8$ kg de ANFO	48
Gráfico 6 – Distribuição de pressões resultantes para $R = 3,0$ m e $W = 8$ kg de ANFO	48
Gráfico 7 – Distribuição de impulsos resultantes para $R = 3,0$ m e $W = 8$ kg de ANFO	49
Gráfico 8 – Pressão refletida máxima para várias distâncias.	51
Gráfico 9 – Impulso refletido máximo para várias distâncias	52
Gráfico 10 – Pressão refletida ao longo do pilar para $W = 8$ kg de ANFO e $R = 0,1875$ m.....	54
Gráfico 11 – Impulso refletido ao longo do pilar para $W = 8$ kg de ANFO e $R = 0,1875$ m...	55
Gráfico 12 – Crescimento da pressão refletida para $R = 3,0$ m e massa variável	56
Gráfico 13 – Crescimento do impulso refletido para $R = 3,0$ m e W variável.....	56
Gráfico 14 – Pressão refletida ao longo do pilar para $W = 64$ kg de ANFO e $R = 3,0$ m.....	59
Gráfico 15 – Impulso refletido ao longo do pilar para $W = 64$ kg de ANFO e $R = 3,0$ m.....	59
Gráfico 16 – Pressão refletida ao longo do pilar para $W = 64$ kg de ANFO e $R = 0,375$ m.....	60
Gráfico 17 – Impulso refletido ao longo do pilar para $W = 64$ kg de ANFO e $R = 0,375$ m.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de pressão atmosférica por diferentes métodos.....	30
Tabela 2 – Validação da planilha a partir do European Commission (2013).....	37
Tabela 3 – Validação da planilha a partir do software RC Blast.....	37
Tabela 4 – Níveis de dimensionamento proposto pelo NCHRP (2010).....	43
Tabela 5 – Comprimento e ângulo de dobramento do gancho segundo NCHRP (2010).....	44
Tabela 6 – Valores críticos para os pilares de canto.....	46
Tabela 7 – Valores críticos para os pilares centrais	46
Tabela 8 – Parâmetros da fase positiva para $R = 3,0$ m e $W = 8$ kg de ANFO	47
Tabela 9 – Parâmetros da onda explosiva no tabuleiro para $R = 6,56$ m e várias massas.....	50
Tabela 10 – Parâmetros da onda explosiva no tabuleiro para $R = 3,81$ m e várias massas.....	50
Tabela 11 – Comparação entre as solicitações no tabuleiro	50
Tabela 12 – Proporção entre as solicitações ao longo do pilar.....	52
Tabela 13 – Diferença entre determinações com e sem a consideração do ângulo.....	53
Tabela 14 – Redução de solicitação para aumento de distâncias	53
Tabela 15 – Aumento de solicitação devido aumento de massa de explosivo	57
Tabela 16 – Diferença percentual entre determinações a partir da variação da massa	57
Tabela 17 – Proporção de solicitação para aumento de massa de explosivo	58
Tabela 18 – Níveis de Solicitação para $R = 0,1875$ e massa variável	60
Tabela 19 – Distâncias de segurança contra projéteis para diversas cargas de explosivo.....	61
Tabela 20 – Distâncias críticas relacionadas ao efeito da sobrepressão.....	62
Tabela 21 – Distâncias críticas associadas aos danos em edificações.....	65
Tabela 22 – Distâncias mínimas requeridas pelo método entre o explosivo e o pilar.....	66
Tabela 23 – Verificação da armadura transversal para as massas de explosivo analisadas	67
Tabela 24 – Soluções propostas com base no aumento da taxa de armadura transversal	68
Tabela 25 – Exigências da NBR 6118-2014 para armaduras transversais	68
Tabela 26 – Verificação de armaduras perante a NBR 6118-2014.	69
Tabela 27 – Custos das armaduras referentes as soluções propostas	69
Tabela 28 – Custos das soluções propostas em relação ao custo global da obra	70
Tabela 29 – Equações para sobrepressão (P_{so}).....	80
Tabela 30 – Equações para impulso de sobrepressão (i_s)	80
Tabela 31 – Equações para pressão refletida (P_r).....	80
Tabela 32 – Equações para impulso refletido (i_r).....	80

Tabela 33 – Equações para tempo de alcance (t_a).....	80
Tabela 34 – Equações para tempo de sobrepressão (t_0).....	81
Tabela 35 – Equações para velocidade da onda de choque (U)	81
Tabela 36 – Principais parâmetros obtidos para todas as simulações da hipótese geral	82
Tabela 37 – Análise da pressão refletida com massa fixa e distância variável	83
Tabela 38 – Análise do impulso refletido com massa fixa e distância variável.....	84
Tabela 39 – Análise da pressão refletida com distância fixa e massa variável	85
Tabela 40 – Análise do impulso refletido com distância fixa e massa variável.....	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Caracterização do fenômeno	14
3.2	Lei de escala	16
3.3	Evolução dos estudos	17
4	MÉTODOS	28
4.1	Caracterização do ambiente do estudo de caso	28
4.1.1	<i>Apresentação do local de estudo</i>	28
4.1.2	<i>Descrição das condições ambientais</i>	29
4.1.2.1	<i>Altitude média</i>	30
4.1.2.2	<i>Pressão atmosférica</i>	30
4.1.2.3	<i>Temperatura média</i>	31
4.2	Predição da onda explosiva	31
4.2.1	<i>Conversão dos ábacos</i>	31
4.2.2	<i>Apresentação da planilha eletrônica</i>	34
4.2.3	<i>Validação do método adotado</i>	35
4.2.4	<i>Validação da planilha eletrônica</i>	36
4.3	Modelagem	38
4.3.1	<i>Modelagem da estrutura</i>	38
4.3.2	<i>Modelagem do carregamento</i>	39
4.3.2.1	<i>Caracterização do explosivo</i>	39
4.3.2.2	<i>Forma e distribuição das pressões</i>	39
4.3.3	<i>Definição das Simulações</i>	41
4.4	Determinação das distâncias de segurança	42
4.5	Método de dimensionamento	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	Análise dos níveis de solicitação	45
5.1.1	<i>Análise geral</i>	45

5.1.2	<i>Solicitações na Superestrutura</i>	49
5.1.3	<i>Análise da Variação da Distância</i>	51
5.1.4	<i>Análise da variação da massa</i>	55
5.2	Distância de segurança	61
5.2.1	<i>Distância de segurança para seres humanos</i>	61
5.2.2	<i>Distância de segurança para edificações</i>	63
5.3	Dimensionamento	66
5.3.1	<i>Limitações e premissas adotadas</i>	66
5.3.2	<i>Estratégias de dimensionamento</i>	66
5.3.3	<i>Verificação de viabilidade técnica</i>	68
5.3.4	<i>Verificação de viabilidade financeira</i>	69
5.3.5	<i>Considerações sobre o método adotado</i>	70
5.3.6	<i>Recomendações gerais de dimensionamento</i>	72
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS	73
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICE A – EQUAÇÕES E TABELAS GERADAS	80
	ANEXO A	87

1 INTRODUÇÃO

Com o claro estabelecimento da disputa entre facções criminosas nos últimos anos no Ceará, o assunto tornou-se pauta frequente no tangente à segurança pública e bem-estar social do estado. Em 2017, um dos primeiros atos de grandes proporções abalou a sociedade civil, foram cerca de 20 ônibus incendiados como forma de protesto à transferência de presos de uma facção para outra unidade prisional em uma tentativa de desarticulação e mitigação de conflitos.

Como resposta à postura rígida do estado, as organizações criminosas articularam o maior conjunto de ataques já vivenciados pelo Ceará. Entre 2 de janeiro e 4 de fevereiro de 2019 foram realizados cerca de 280 atentados em 56 municípios cearenses, onde quase metade destes foram registrados em Fortaleza. O ataque de maior magnitude ocorreu em Caucaia, região metropolitana, onde foram detonados explosivos no viaduto da BR-020, afetando um dos pilares da estrutura, deixando sua armadura exposta e interrompendo o tráfego sobre o mesmo.

Diariamente são noticiados casos de atentados terroristas que ocasionam mortes e destruição massiva de edificações em todo o mundo. Esses eventos contam normalmente com os chamados carros-bomba, veículos dotados de grande quantidade de explosivos de alto poder destrutivo, que podem ser detonados através de ataques-suicida ou acionados por dispositivos eletrônicos a distância.

Por outro lado, nem todos os atentados criminosos são dotados de recursos tão sofisticados e potentes de detonação. Muitos deles fazem uso de explosivos improvisados, que na ampla maioria das vezes são detonados manualmente. A produção desse tipo de explosivo foi facilitada devido à popularização da internet, visto que a cada instante são publicados inúmeros tutoriais em vídeo orientando sobre a confecção de artefatos explosivos a partir de materiais encontrados facilmente no mercado.

Segundo Neto (2015), as explosões são fenômenos caracterizados por uma liberação repentina de energia que podem ocasionar grandes danos em edificações e seres humanos. Quando ao ar livre, elas são responsáveis por deslocar um grande volume de gases, além de impor mudanças bruscas de temperatura e pressão. Durante as explosões uma parcela da energia é convertida em ondas de choque e outra fração em um aumento brusco de temperatura, vindo a causar em alguns casos incêndios após a detonação.

Pilares de viadutos são comumente feitos em concreto armado e dimensionados para cargas transversais pequenas comparadas às cargas axiais provenientes do peso próprio da

estrutura. A principal ação lateral considerada é a solicitação oriunda do vento, ação de caráter variável, mas de ocorrência frequente durante toda a vida útil da estrutura. O carregamento gerado por uma detonação sobre um elemento estrutural pode danificá-lo substancialmente, provocando diminuição na área de seção transversal e provável flambagem das armaduras, levando a estruturas para elevados patamares de deformação e em alguns casos à ruína.

O estudo de episódios explosivos pode ser feito sob inúmeras óticas, desde a experimental, que requer medidas de segurança e investimentos significativos, até simulações computadorizadas, que trabalham na predição da magnitude das ondas de choque e dimensionamento de peças resistentes. Atualmente as simulações são utilizadas em estudos com maior grau de refinamento, e quando alimentadas com valores coerentes, podem apresentar estimativas bem próximas da realidade.

Atentados criminosos com uso de explosivos têm se tornado cada vez mais recorrentes nos últimos anos, no entanto, como essa é uma ação de caráter excepcional, a maior parte das estruturas não são dimensionadas para suportar tais carregamentos. Isso se deve sobretudo à imprevisibilidade de ocorrência desses eventos, e ao desconhecimento acerca dos seus mecanismos de funcionamento. Desse modo, acredita-se que as soluções técnicas necessárias para proteger estruturas contra explosões demandam grandes investimentos, além de concepções arquitetônicas que comprometem a estética da edificação.

A inviabilização do uso de um equipamento urbano do porte de um viaduto, afeta instantaneamente todas as esferas locais, recaindo sobre a classe técnica a responsabilidade de dispor de domínio teórico e prático para lidar com situações tão atípicas em um curto intervalo de tempo. Assim sendo, o presente trabalho justifica-se pela necessidade de se avaliar a magnitude desse carregamento frente à capacidade portante da estrutura, de modo a propor estratégias preventivas de dimensionamento viáveis, além de verificar a segurança para seres humanos e edificações vizinhas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estimar os níveis de solicitação geradas por ondas de choque produzidas por explosivos sobre pilares de concreto armado do viaduto da BR-020, em Caucaia, Ceará, atrelado à verificação de segurança para seres humanos e edificações vizinhas, e proposição de estratégias de dimensionamento.

2.2 Objetivos específicos

- a) Estimar os principais parâmetros que caracterizam a onda de choque oriunda da detonação de explosivo sólido à céu aberto nos pilares e na superestrutura do viaduto analisado.
- b) Definir as hipóteses críticas de incidência.
- c) Analisar a influência do ângulo de incidência.
- d) Estimar as distâncias de segurança requeridas para pessoas e edificações.
- e) Apresentar estratégias de dimensionamento preventivo para pilares de concreto armado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Caracterização do fenômeno

Uma explosão é uma liberação brusca de energia em um curto intervalo de tempo na forma de calor e pressão de maneira radial a partir do epicentro de detonação do explosivo. Essa pressão é propagada pelo meio em questão através das chamadas ondas de choque, oscilações que normalmente apresentam geometria semiesférica, que quando atingem obstáculos rígidos causam destruição e até mesmo incêndios em alguns casos, em decorrência do aumento súbito de temperatura gerado no fenômeno.

As explosões possuem diferentes mecanismos de funcionamento, o que as possibilita serem classificadas em três grupos: químicas, mecânicas e nucleares. A explosão química é desencadeada por reações de combustão que liberam grande quantidade de energia, e com isso aumentam significativamente os níveis de temperatura e pressão no ambiente em questão.

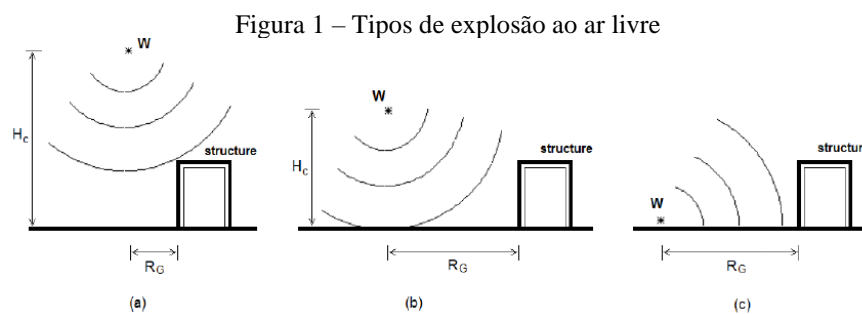
Quando se tem uma súbita descarga de energia proveniente de grandes diferenciais de pressão, geralmente devido ao rompimento de alguma envoltória, tem-se uma explosão mecânica. São exemplos dessa categoria explosões domésticas envolvendo panelas de pressão e ruptura de invólucros que possuem gases comprimidos em seu interior tais como vasos de pressão.

As explosões nucleares ocorrem a partir de mecanismos de fusão ou fissão nuclear, que por sua vez liberam grande quantidade de energia na forma de calor e de radiação. Explosões desse tipo produzem as ondas de choque de maior potencial destrutivo que se tem

conhecimento, sendo seu principal exemplo explosões geradas a partir da detonação de bombas atômicas.

Quanto ao ambiente na qual ocorrem, as explosões podem ser classificadas basicamente em dois grandes grupos, as confinadas e as não confinadas. O primeiro grupo abrange explosões que acontecem no interior das estruturas, esta tem seu efeito amplificado devido as múltiplas reflexões. Sua intensidade está diretamente associada ao número de aberturas disponíveis para dissipação da energia liberada na detonação, assim, explosões em ambientes confinados normalmente produzem mais danos em estruturas.

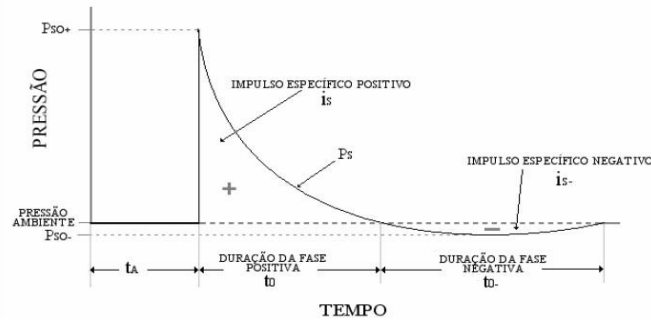
O segundo grupo é caracterizado por explosões ao ar livre as quais dividem-se em *Free-Air Bursts*, *Air Bursts* e *Surface Bursts*. As chamadas *Free-Air Bursts* (Figura 01-a) são caracterizadas pela detonação de explosivos no ar, de modo que a onda explosiva assume formato esférico e atinge o alvo sem contato anterior com obstáculos ou solo. Já as do tipo *Air Bursts* (Figura 01-b) também acontecem no ar, contudo, entram em contato com o solo antes de interagirem com a estrutura considerada alvo. Por fim, as *Surface Bursts* (Figura 01-c) são explosões ocasionadas por artefatos detonados muito próximos ou diretamente sobre solo, gerando uma onda semiesférica que ao atingir o alvo possui uma parcela de energia referente a onda incidente e outra associada à onda refletida pelo solo.



Fonte: *European Commission* (2013).

As ondas de choque geradas por uma detonação apresentam basicamente duas fases de ocorrência, a positiva e a negativa. Na primeira fase, a estrutura é comprimida pelo diferencial de pressão existente entre onda de choque e a pressão atmosférica, a chamada sobrepressão, que inicialmente atinge seu valor máximo (P_{so}) e posteriormente decai até valores de pressão negativos. Após a fase positiva tem início a fase negativa, caracterizada por solicitações de sucção sobre o alvo, que vai reduzindo sua magnitude até o fim da ocorrência do fenômeno, quando a pressão atmosférica é reestabelecida, como apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Curva pressão versus tempo de uma onda de choque



Fonte: Autoridad Regulatoria Nuclear (1998).

Outro mecanismo relevante no estudo de explosões é a reflexão das ondas de choque, fenômeno que ocorre quando a frente de onda colide com alguma superfície rígida amplificando o valor da pressão incidente. A solicitação refletida depende basicamente do ângulo de incidência da onda choque com o alvo e do valor de sobrepressão incidente. Convencionalmente, as estruturas são dimensionadas com base nos valores da onda refletida, dada sua maior magnitude e consequentes riscos de danos associados.

3.2 Lei de escala

A ampla maioria dos métodos simplificados utilizados na predição de ondas de choque faz uso do conceito de distância em escala (01), relação proposta inicialmente por Hopkinson-Cranz (1926) *apud* Smith (1994) que relaciona a distância entre o epicentro de detonação do explosivo e o alvo, com a massa do explosivo em unidades equivalentes de TNT, ou com a energia do mesmo em Joules.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (01)$$

Onde:

Z: distância em escala

R: distância ao alvo

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

A distância em escala é um parâmetro imprescindível, visto que é graças a ela que é possível estabelecer comparações a nível de efeitos causados por uma dada explosão. Isso acontece pois para situações distintas, em termos de quantidade de explosivo e distância do

epicentro de detonação, que possuem os mesmos valores de distância em escala, os danos decorrentes são similares.

3.3 Evolução dos estudos

O uso de explosivos como ferramenta de destruição em massa tem sido utilizado pelo homem há muitos anos. Acredita-se que no século I os chineses tenham inventado a pólvora acidentalmente ao tentar produzir o “elixir da longa vida” misturando carvão, enxofre e nitrato de potássio, gerando um pó que quando colocado em contato com o fogo produzia explosões. A princípio a pólvora foi usada apenas como matéria prima para fogos de artifício, e foi somente no século X que teve seu uso pensado para fins militares.

Na primeira metade do século XIX graças aos avanços da ciência, foi sintetizada pela primeira vez a Nitroglicerina, um líquido oleoso bastante reativo que adquire potencial detonador com uma simples variação de temperatura ou atrito. A segunda metade do século foi marcado pelo desenvolvimento do TNT (Trinitrotolueno) e da Dinamite. O TNT é obtido através da nitração total do tolueno, originando um explosivo bem menos reativo que a nitroglicerina, podendo ser armazenado por muito tempo e aplicado para uma gama maior de fins. Contudo, foi em 1867 quando Alfred Nobel aliou a nitroglicerina ao dióxido de silício envolvidos em embalagens de parafina, que o mundo conheceu a dinamite, um explosivo de potencial energético maior que o TNT, que logo se popularizou e se tornou o mais usado em demolições escavações atualmente.

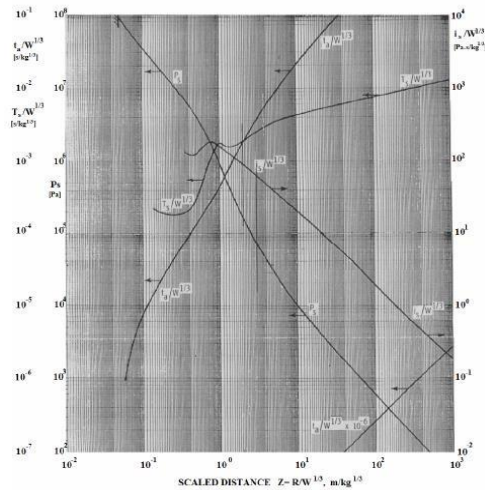
Em 1950 Samuel Glasstone e Philip J. Dolan publicaram sua primeira versão do livro *The Effects of Nuclear Weapons*, fazendo uma densa análise de explosões devido fissões nucleares que geravam liberação de energia da ordem de milhares de toneladas de TNT. Anos depois, em 1957, os mesmos autores abordaram o fenômeno sob a ótica da fusão nuclear, que gerava liberações de energia muito maiores, da ordem de milhões de toneladas de TNT.

Em sua versão mais completa, Glasstone *et al.* (1977), reuniu uma vasta gama de conhecimentos na área de explosões até então, sendo um dos primeiros a abordar os conceitos de nuvem radioativa e ondas de choque por pulso eletromagnético. A realização de testes atmosféricos e simulações em altas altitudes aliadas a condições meteorológicas e consideração dos efeitos do terreno em situações de explosão, fizeram dessa publicação um marco nos estudos de detonação nuclear.

Um dos métodos mais amplamente utilizado mundialmente para predição de ondas de choque causadas por explosões, foi proposto por Baker *et al.* (1983) para situações de

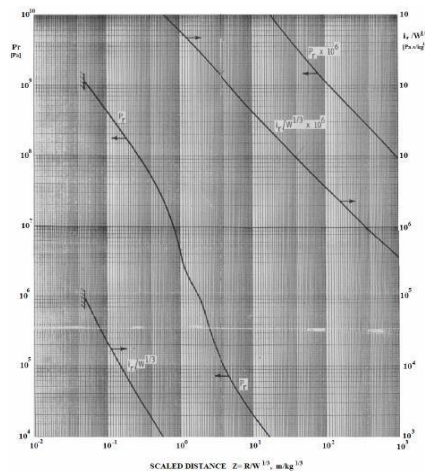
detonação de explosivos sólidos no ar. Este método faz uso de uma solução gráfica na qual um único ábaco apresenta os principais parâmetros que caracterizam a fase incidente (Figura 3) e a fase refletida da onda de choque (Figura 4). Mesmo sendo um método desenvolvido no século passado, o mesmo demonstra sua relevância através de seus resultados consideravelmente satisfatórios perante análises numéricas computadorizadas utilizadas atualmente em potentes softwares de elementos finitos.

Figura 3 – Ábaco proposto por Baker *et al.* (1983) para fase positiva da onda explosiva



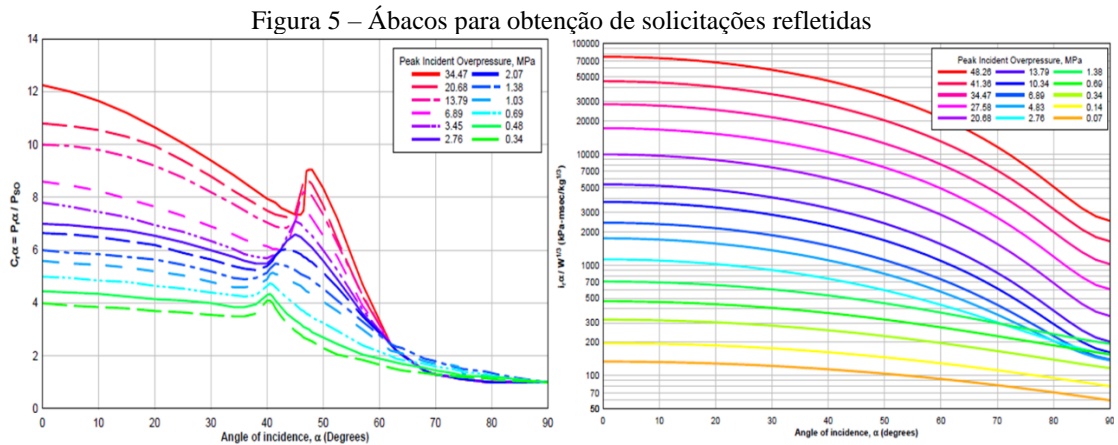
Fonte: Baker *et al.* (1983).

Figura 4 – Ábaco proposto por Baker *et al.* (1983) para reflexão da onda explosiva



Fonte: Baker *et al.* (1983).

Kingery & Bulmash (1984) propuseram um método gráfico similar ao apresentado por Baker et al. (1983), porém estratificado para as situações de explosão no ar e no solo. Essa pesquisa apresentou ainda curvas de sobrepressão associadas a ângulos de incidência que proporcionam a obtenção da pressão refletida e do impulso refletido, como apresentado na Figura 05.



Fonte: Baker *et al.* (1983).

Tomando partido do conceito de distância em escala proposto por Hopkinson-Cranz (1926), décadas mais tarde Kinney & Graham (1985) apresentaram as seguintes equações para estimar parâmetros de explosões químicas incidentes no ar:

$$P_{so} = 808 \frac{\left[1 + \frac{Z^2}{4,5^2}\right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z^2}{0,048^2}\right)} \sqrt{1 + \left(\frac{Z^2}{0,32^2}\right)} \sqrt{1 + \left(\frac{Z^2}{1,35^2}\right)}} \quad (02)$$

$$t_a = \frac{1}{ax} \int_{r_c}^r \left[\frac{1}{1 + \frac{6P_{so}}{7Pa}} \right]^{1/2} dr \quad (03)$$

$$t_s = W^{1/3} \frac{980 \left[1 + \left(\frac{Z}{0,54}\right)^{10}\right]}{\left[1 + \left(\frac{Z}{0,02}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{Z}{0,74}\right)^6\right] \left[1 + \left(\frac{Z}{6,9}\right)^2\right]} \quad (04)$$

$$\frac{I}{A} = \frac{0,067 \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,23}\right)^4}}{Z^2 \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{55q0}\right)^3}} \quad (05)$$

Onde:

Pso: pico de sobrepressão

Pa: pressão absoluta

ta: tempo de chegada ao alvo

ts: duração da fase positiva

I: impulso específico

A: área efetiva de contato

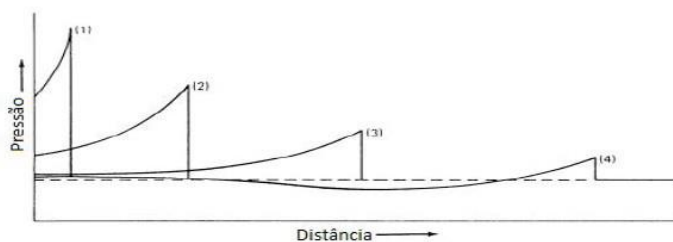
Os mesmos autores apresentaram na mesma publicação uma variação das fórmulas mostradas anteriormente para situações em que ocorram explosões nucleares no ar, tendo elas a seguinte configuração:

$$Pso = Pa(3,2 \times 10^6)Z^{-3} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{87}\right)^2} \left[1 + \frac{Z}{800}\right] \quad (06)$$

$$ts = W^{1/3} \frac{180 \left[1 + \left(\frac{Z}{100}\right)^3\right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{40}\right)^6} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{285}\right)^5} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{50000}\right)}} \quad (07)$$

Segundo Kinney & Graham (1985) a parcela de energia liberada na detonação vai sendo perdida à medida que a distância do epicentro aumenta, podendo ser representada graficamente em um gráfico da pressão na onda choque versus a distância do epicentro para tempos sucessivos, como indicado na Figura 6.

Figura 6 – Pressão versus distância do epicentro ao alvo



Kinney & Graham (1985)

Um dos maiores e mais completos trabalhos sobre o fenômeno da explosão produzido pelo Departments of the Army, the Navy, and the Air Force (1990), discorre tópicos como criação de escudos e barreiras de proteção, limites de tolerância aceitável para o homem e para os equipamentos de uma edificação, resposta estrutural e princípios de análise dinâmica. Seu enfoque é completamente direcionado para o design de peças de concreto armado para responder de maneira eficaz a esse tipo de solicitação excepcional, levando em consideração os efeitos da ação dinâmica nas características mecânicas do concreto e do aço, tais como tensões de ruptura, escoamento, módulos de elasticidade e deformações.

A publicação aborda ainda direcionamentos acerca de coeficientes e considerações necessárias ao dimensionamento do Estado Limite Ultimo com base nas normas norte-americanas, finalizando com exemplos completos de detalhamento de estruturas novas e técnicas de reforço em estruturas já existentes.

Soares (1991) desenvolveu uma análise dinâmica não-linear em lajes retangulares de concreto armado sob ações impulsivas oriundas de ondas de choque geradas por explosões. Esse trabalho se propôs a levar em consideração os efeitos da escolha dos tipos de apoio nos bordos da laje e o não-amortecimento dessa carga dinâmica pelo elemento de placa do tipo laje.

Brode apud Smith (1994) acrescentou uma equação bastante relevante na cronologia dos estudos de eventos explosivos ao estabelecer uma fórmula (08) para sobrepressão (ΔP) baseada em análises experimentais que considera situações na qual a distância em escala (Z) é muito menor que 1, e sobrepressões maiores que 10 bar o que se configura espacialmente como detonações muito próximas dos alvos.

$$\Delta P = 1 + \frac{6,7}{Z^3} \quad (08)$$

Para as demais situações com sobrepressões (ΔP) menores que 10 bar, e conseqüentemente para maiores distâncias entre o epicentro e o alvo, a equação proposta por Brode é a explicitada a seguir:

$$\Delta P = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019 \text{ bar} \quad (09)$$

A partir das equações apresentadas nessa revisão e das outras presentes na literatura para as inúmeras possibilidades de ocorrência de explosão é possível se obter a curva de pressão no tempo através da equação proposta por Smith & Hetherington (1994).

$$\Delta P = P_{so} \left[1 - \frac{t}{T_s} \right] \exp \left\{ -\frac{bt}{T_s} \right\} \quad (10)$$

Onde:

b: parâmetro de forma da onda de choque, dependente da distância em escala

t: tempo [s]

Ts: tempo de duração da fase positiva da onda [s]

Mays & Smith (1995) apresentaram uma conceituação sobre o fenômeno explosão visando a minimização de danos sobre pessoas e edificações a partir do uso de técnicas simplificadas que contribuem para o aumento da capacidade de proteção da obra em questão. Em seu texto, são apresentados os personagens envolvidos nesse tipo de projeto, e sua importância na obtenção do objetivo final. O arquiteto detém a função de propor layouts que não contribuam para o aumento de reflexão de ondas de choque, além de evitar o uso de materiais que possam gerar muitos fragmentos quando atingidos pelas ondas de choque.

É abordado ainda formas de obtenção dos parâmetros de ondas de choque e sua adequada transformação em carregamentos atuantes na estrutura, com comentários sobre fatores de segurança apropriados para cada situação e adaptação de propriedades dos materiais

para a hipótese dinâmica, não usualmente adotada em dimensionamentos de edificações residenciais ou comerciais.

Seguindo com o desenvolvimento de equações que pudessem representar ondas de choque, Ramajeyathilagam *et al.* (2000) apresentou formulações para uma abordagem de explosões dentro da água, a partir das equações mostradas a seguir.

$$P_{so} = \frac{52,16 \times 10^6}{Z^{1/3}} \quad (11)$$

$$\theta = 92,5 \times W^{1/3} \times Z^{0,22} \quad (12)$$

$$P(t) = P_{so} \times e^{-\frac{t-t_d}{\theta}}, \quad 0 \leq t \leq \theta \quad (13)$$

Onde:

θ : constante de decaimento [μ s]

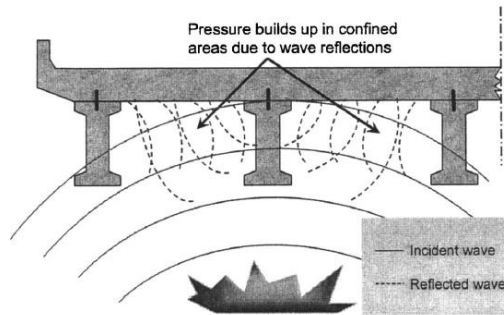
t: tempo [s]

t_d : tempo de duração da onda de choque [s]

Winget *et al.* (2005) utilizou o *BlastX*, software de uso exclusivo do governo americano para fins militares, na qual foi possível realizar simulações para carregamentos explosivos acima e abaixo do tabuleiro de uma ponte, levando em consideração os efeitos da reflexão de ondas em zonas confinadas da estrutura e sua influência em vigas, pilares e no tabuleiro.

Uma particularidade desse estudo foi a análise do comportamento de elementos protendidos em situações envolvendo carregamentos oriundos de explosões, a partir da determinação de deflexões e rotações nos elementos estruturais. Algumas das medidas preventivas recomendadas nesse trabalho são associadas ao aumento da redundância estrutural e implementação de pequenos dispositivos de restrição de movimento, tais como dobradiças na interface entre vigas e lajes, e uso de amarrações em pilares. Na Figura 7 é apresentada uma ilustração da propagação da onda de choque nos vazios entre as vigas e a laje do tabuleiro.

Figura 7 – Representação esquemática da reflexão de ondas de choque em uma ponte



Fonte: Winget *et al.* (2005)

Segundo Casagrande (2006) o método do TNT Equivalente, é baseado na associação entre um dado explosivo em termos energéticos e sua respectiva quantidade equivalente em termos de TNT, explosivo universalmente conhecido que já teve seu comportamento estudado e desse modo já possui representações matemáticas que auxiliam na obtenção de inúmeros parâmetros de ondas de choque.

$$W_{\text{TNT}} = \frac{\eta M E_c}{E_{\text{TNT}}} \quad (14)$$

Onde:

η : eficiência de explosão empírica

M : massa do hidrocarboneto [kg]

E_c : calor de combustão do gás inflamável [kJ/kg]

E_{TNT} : calor de combustão do TNT [4437-4765

kJ/kg]

Com a obtenção do equivalente de TNT é possível se obter a distância em escala (Z), parâmetro necessário para utilização da equação proposta por Lees (1996) apud AIChE/CCPS (2000).

$$\log_{10} \Phi = \sum_{i=0}^n c_i (a + b \cdot \log_{10} Z)^i \quad (15)$$

Onde:

ϕ : variável que se pretende encontrar (P_s , i_s , t_d , t_a)

a, b, c: constantes tabeladas para cada combinação de Z e ϕ

Em sua dissertação, Casagrande (2006) utilizou em uma das suas situações problema um algoritmo desenvolvido pelo mesmo executado em formato de planilha no Excel para fazer buscas automáticas nos ábacos propostos por Baker *et al.* (1983) e com isso obter os principais parâmetros de onda de choque incidente e refletida de maneira aproximada.

Em *UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (2008) são apresentadas informações acerca do dimensionamento preventivo de estruturas contra eventos explosivos sob aspectos de projeto e as requeridas técnicas construtivas associadas. Esse guia é uma adaptação do anteriormente mencionado *Structures to resist the effects of accidental explosions* (1990) apresentando exemplos ilustrativos e ábacos com maior apuro gráfico, e conseqüente melhor visualização.

Com a não mais rara ocorrência de atentados terroristas envolvendo explosivos em grandes centros urbanos, Anil K. Agrawal *et al.* (2009) desenvolveu uma análise direcionada para analisar o comportamento de pontes de concreto armado, que até então não haviam sido profundamente analisadas sob ação do fenômeno da explosão. A ideia dessa publicação foi propor a utilização de um software de fundamentação semi-empírica para geração das ondas de choque, o ConWep, diferente dos programas normalmente utilizados tais como LS-Dyna e Autodyn.

Na publicação *Blast-Resistant Highway Bridges: Design and Detailing Guidelines* (2010) são apresentados direcionamentos voltados ao estudo de pilares de viadutos e pontes submetidos a descargas explosivas. Essa pesquisa foi desenvolvida com base em uma série de testes experimentais e simulações analíticas, que ajudaram a construir um guia de dimensionamento simplificado com proposição de taxa de armadura mínima, comprimento de emendas acima do solo, e comprimento e ângulo necessários para os ganchos dos estribos. Esse material aborda também a viabilidade do uso de sistemas de um grau de liberdade em substituição a elementos lineares para determinação de ductilidade e rotação da peça analisada.

Graham (2010) *apud* Neto (2015) relacionou parâmetros ambientais como temperatura, massa específica do meio, pressão e velocidade de propagação através das equações de conservação de e massa, quantidade de movimento e energia propostas por Rankine-Hugoniot, mostrando uma nova abordagem para predição de parâmetros de explosão amplamente discutidos na literatura de ondas de choque.

$$p(U - u) = \rho_0 U \quad (16)$$

$$P - P_0 = \rho_0 U u \quad (17)$$

$$P = (Y - 1) P e \quad (18)$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2} (P + P_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \quad (19)$$

Onde:

P_0 : pressão em condições ambientes

P : pressão atrás da onda de choque

ρ_0 : massa específica do gás em condições ambientes

ρ : massa específica do gás atrás da onda de choque

u : velocidade material (velocidade do fluido)

U : velocidade de deslocamento da onda de choque

E : energia atrás da onda de choque

E_0 : energia em condições ambientes

Y : razão entre o calor específico a uma pressão constante e o calor específico a um volume constante.

A partir dessas relações básicas entre as propriedades num contexto de explosão é possível determinar parâmetros que efetivamente serão utilizados na caracterização das ondas de choque, como explicitado nas fórmulas a seguir.

$$\Delta P = P - P_0 \quad (20)$$

$$C_0 = \sqrt{\frac{P_0 Y}{\rho_0}} \quad (21)$$

$$U = C_0 \sqrt{1 + \frac{(Y + 1)\Delta P}{2YP_0}} \quad (22)$$

$$\mathbf{u} = \frac{\Delta P}{\rho_0 U} \quad (23)$$

$$\mathbf{q} = \frac{\Delta P^2}{2P_0 Y + (Y - 1)\Delta P} \quad (24)$$

$$\Delta P_r = 2\Delta P \left(\frac{7 + 4 \frac{\Delta P}{P_0}}{7 + \frac{\Delta P}{P_0}} \right) \quad (25)$$

Onde:

ΔP : sobrepressão gerada pela onda de choque

C_0 : velocidade do som no ambiente

q : pressão dinâmica gerada pela onda de choque

ΔP_r : sobrepressão refletida na frente da onda de choque

Abdelalim (2013) propôs a utilização de VSS (*Vented Suppressive Shields*), escudos ventilados supressivos em tradução livre, uma estrutura que atenua os efeitos de uma explosão em seu interior, dimensionada a partir de códigos de fluidodinâmica computacional. Foram feitas simulações com as versões 3D e 2D do *Autodyn* para diversos arranjos geométricos dos escudos e estes valores quando comparados com valores experimentais obtidos anteriormente se mostraram coerentes.

Neto (2015) fez uso fluidodinâmica computacional através do software *Autodyn* para realizar inúmeras simulações, dentre elas, pressões incidentes sobre um pilar de concreto armado, sobrepressões em ambiente sujeito a reflexões, efeito de canalização, efeito da temperatura, explosão acidental de um cilindro comercial de propano dentre outros. Essas simulações foram validadas a partir de formulações empíricas registradas na literatura referente a explosões.

Qureshi *et al.* (2017) realizou simulações computacionais variando massas de explosivos sólidos e distancia ao alvo, um edifício comercial simétrico e reticulado de múltiplos pavimentos. Foram comparadas duas soluções, uma baseada na adoção de paredes de cisalhamento em forma de “L” nos cantos da edificação, e outra hipótese considerando tirantes metálicos em forma de “X” ligando um pavimento a outro. Com base na geração computacional

de uma onda de choque foram obtidos deslocamentos lineares e angulares e assim foram obtidos menores deslocamentos quando se fez uso da estrutura travada pelos tirantes.

4 MÉTODOS

4.1 Caracterização do ambiente do estudo de caso

Para fins de delimitação do estudo a ser realizado, serão descritas a seguir as características e especificidades do viaduto da BR-020, não sendo garantida a validade dos resultados obtidos nesse estudo de caso para outras estruturas similares.

4.1.1 Apresentação do local de estudo

Localizado na Caucaia, região Metropolitana de Fortaleza, o viaduto analisado neste trabalho faz parte da BR-020, estando situado sobre a rodovia do 4º Anel Viário (Figura 8).

Figura 8 – Localização e vista lateral do viaduto analisado



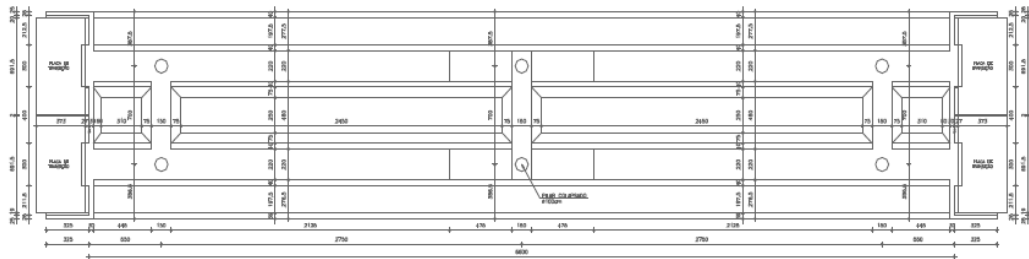
Fonte: Google Maps.

O viaduto é composto por duas estruturas alinhadas, onde cada uma dispõe de uma superestrutura que longitudinalmente possui um comprimento total de 66 metros possuindo dois balanços extremos de 5,50 metros e dois vãos internos de 27,50 metros, como indicado na Figura 9. O tabuleiro é constituído por uma laje que se apoia em duas vigas “chatas” protendidas, enquanto a mesoestrutura é composta por pares de pilares circulares com diâmetro de 1 metro em cada alinhamento. A infraestrutura é constituída por tubulões curtos com base alargada encravada em solo de alteração de rocha.

Em termos de propriedades dos materiais empregados, foi utilizado concreto com fck igual a 30 MPa na superestrutura com protensão, e fck de 20 MPa nos pilares. No tocante ao aço utilizado nas armaduras longitudinais e transversais de todos os elementos, observou-se

que foi empregado o aço do tipo CA-50, com tensão de escoamento de aproximadamente 500 MPa.

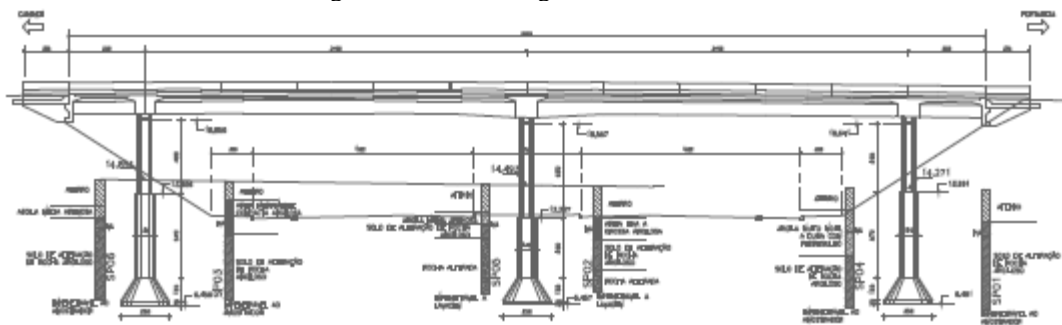
Figura 9 – Planta baixa do tabuleiro do viaduto



Fonte: Hugo A. Mota Consultoria e Engenharia de Projetos.

Para este trabalho foram consideradas as duas estruturas de modo integrado, fazendo com que fossem analisados ao todo 12 pilares, sendo os maiores os posicionados no canteiro central do viaduto, possuindo cada um, aproximadamente 6,30 metros de altura, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Corte longitudinal do viaduto.



Fonte: Hugo A. Mota Consultoria e Engenharia de Projetos.

O viaduto está localizado a um raio de aproximadamente 200 metros das primeiras casas e indústrias da região, tendo seu perímetro imediato circundado por grandes áreas de vegetação rasteira e árvores de pequeno porte.

4.1.2 Descrição das condições ambientais

Para aplicação de qualquer um dos métodos analíticos de base empírica apresentados anteriormente, é de fundamental importância o conhecimento dos parâmetros ambientais que circundam o ambiente estudado. Alguns métodos de previsão de ondas

explosivas fazem uso explícito desses parâmetros em suas formulações, já outros, como é o caso dos ábacos propostos por Kingery-Bulmash (1984), pressupõem condições normais de pressão e temperatura para sua aplicação, fazendo uma exigência implícita da necessidade de conhecimento dessas variáveis.

4.1.2.1 *Altitude média*

O Ceará apresenta relevo que varia de 0 a 1154 metros em relação ao nível do mar, variando entre depressões sertanejas, planícies litorâneas e planaltos. Na literatura são apontados valores distintos para altitude média de Fortaleza, variando de 15 a 27 metros.

Para fins de obtenção de parâmetros de onda explosiva foi considerada o menor valor de altitude, 15 metros, pois este conduz a pressão atmosférica a seu valor mínimo e por consequência ao valor máximo de sobrepressão.

4.1.2.2 *Pressão atmosférica*

A pressão atmosférica pode ser determinada de maneira aproximada a partir de formulações analíticas que exigem como parâmetro de entrada apenas a altitude do ambiente em questão. Neste trabalho foram utilizadas as formulações propostas por três trabalhos diferentes, admitindo o valor da altitude média em fortaleza de 15 metros, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de pressão atmosférica por diferentes métodos

JENSEN et al. (1990)		
P atm	101,1198449	[kPa]
BURMAN e POCHOP (1994)		
P atm	101,45825	[kPa]
DOORENBOS e PRUITT (1992)		
P atm	101,1273224	[kPa]

Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguindo a linha de raciocínio do subitem anterior, foi adotada a menor pressão atmosférica estimada dentre os métodos apresentados, sendo ela 101,11 kPa.

4.1.2.3 *Temperatura média*

A temperatura não é um parâmetro de influência direta nos métodos preditivos de ondas explosivas, sendo sua determinação útil apenas para verificação da garantia de condições normais do ambiente. Desse modo, foram utilizadas temperaturas médias mensais em 2019, disponibilizadas pelo National Centers for Environmental Information, na qual foram obtidos valores em torno de 23° para dias mais frios e 31° para dias mais quentes, valores que não configuram condições climáticas extremas.

4.2 **Predição da onda explosiva**

Para analisar os efeitos de uma carga oriunda de uma explosão sobre uma estrutura é preciso obter os parâmetros que caracterizam uma onda explosiva a partir de um método específico, seja ele empírico ou analítico. É a partir desses parâmetros que um carregamento pode ser modelado, aplicado em uma estrutura e verificado seus efeitos sobre a mesma.

4.2.1 *Conversão dos ábacos*

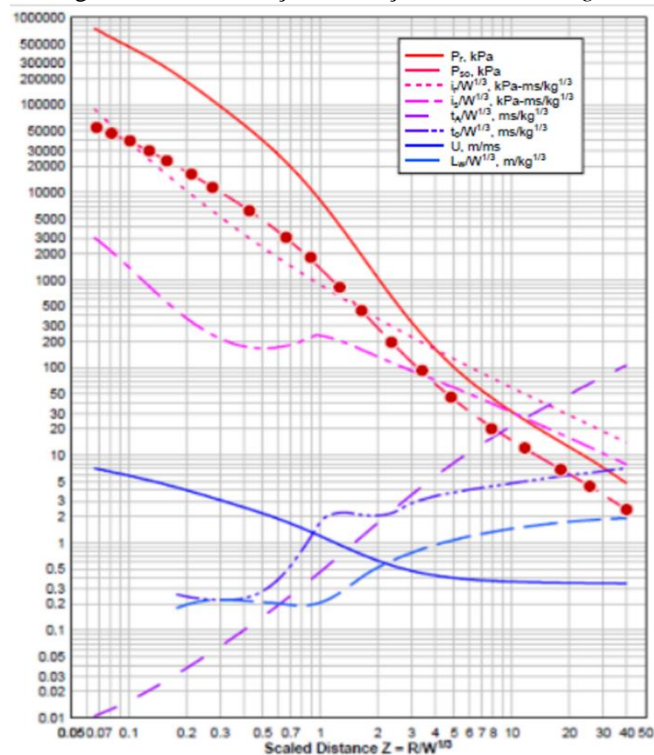
Os estudos na área de explosões podem ser feitos por meio de quatro abordagens principais: Empíricas, numéricas, analíticas oriundas de experimentos, ou como é mais frequente uma combinação desses métodos. Neste trabalho será utilizada a solução gráfica baseada nas curvas propostas por Kingery-Bulmash (1984) que apresenta resultados para explosões no ar e no solo para valores de distância escalada entre 0,05 m/kg^{1/3} e 40 m/kg^{1/3}.

As curvas foram feitas de modo a se agrupar muitas variáveis em um único gráfico, utilizando um único eixo vertical escalado em configuração logarítmica atrelado a uma escala horizontal comum a todos os parâmetros, referente a distância escalada Z . Essa distância escalada foi proposta por Hopkinson-Cranz (1926) e como descrito na seção de revisão bibliográfica garante a padronização e conseqüente comparação de incidentes explosivos através da razão entre a distância ao alvo e a massa do explosivo em unidades equivalentes de TNT.

Neste trabalho foi realizada uma conversão dessas curvas para uma planilha em Excel de modo que a obtenção dos parâmetros fosse automatizada, rápida e o mais precisa possível. Para isso, foi utilizado o site *WebPlotDigitizer* onde foi carregado o ábaco em formato de imagem, foram estabelecidos os limites dos seus eixos, e por fim foram inseridos

manualmente pontos em cima das curvas originais, para que se pudesse obter uma função com comportamento mais aproximado da curva original possível, como mostrado na Figura 09.

Figura 11 – Delimitação da função no *WebPlotDigitizer*



Fonte: Elaborado pelo autor.

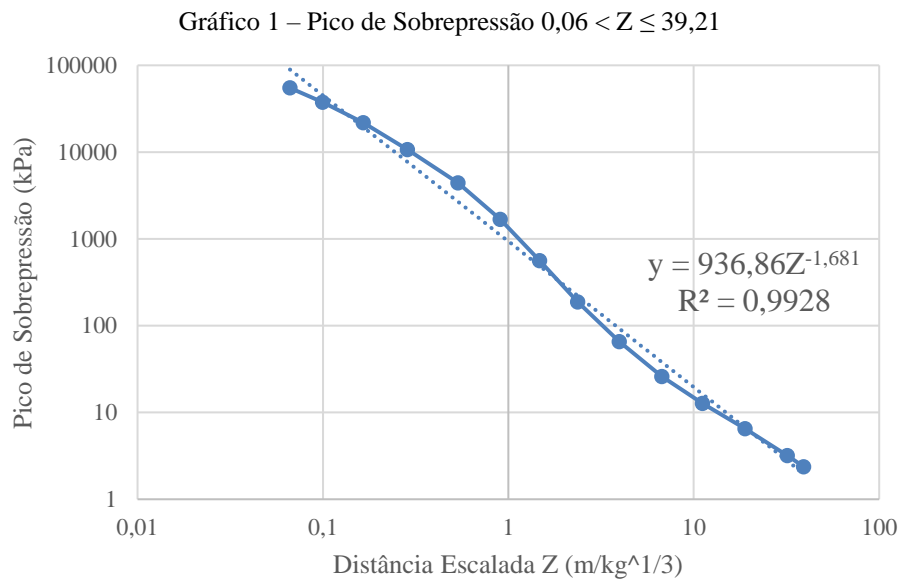
A partir da colocação dos pontos o site gerou uma serie de dados em Excel e com isso foi possível definir linhas de tendência que descrevem seu comportamento em todo seu domínio. Como estratégia de garantia de precisão foi utilizado o coeficiente de determinação R^2 , um parâmetro que indica o grau de proximidade de uma série de pontos em relação à uma dada função.

É conveniente considerar que quanto mais próximo de 1,0 mais fiel é a representação proposta pela equação, no entanto para este trabalho foi analisada cada situação em particular, e foi visto que em algumas funções mesmo com coeficiente alto alguns intervalos do domínio não condiziam com a linha de tendência gerada, como é o caso do Gráfico 1, para valores de Z menores que 1.

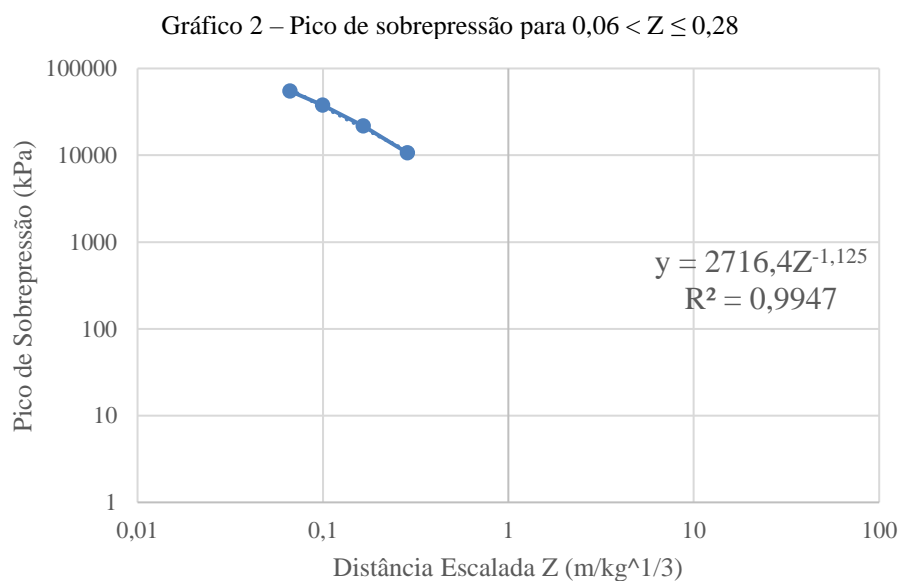
Esse preciosismo se faz necessário porque a escala dos eixos é logarítmica, isso significa que uma diferença que visualmente pareça minúscula, seja na verdade de dezenas ou até mesmo centenas de unidades, um erro que para fins de dimensionamento de elementos estruturais, pode inviabilizar o projeto. Desse modo para cada parâmetro foram analisados os

pontos nas quais o comportamento da função se altera, e assim as mesmas foram subdivididas em intervalos cada vez menores, como mostrado nos Gráficos 2 e 3.

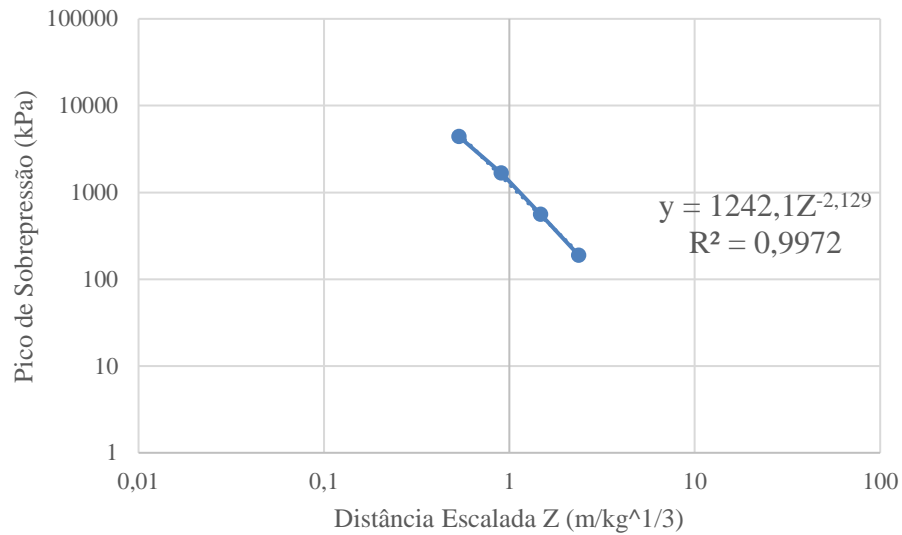
Assim, para todos os parâmetros da onda explosiva replicou-se o mesmo procedimento, de modo que ao final foi possível representar o ábaco em sua totalidade por equações e seus respectivos intervalos de validade, estando essas funções apresentadas no Apêndice A.



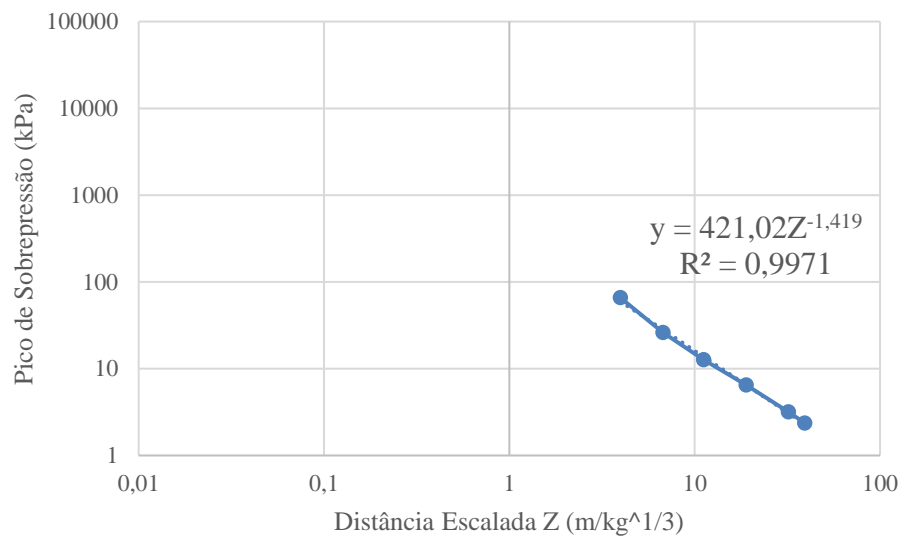
Fonte: Elaborado pelo autor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 – Pico de sobrepressão para $0,28 < Z \leq 2,37$ 

Fonte: Elaborado pelo Autor.

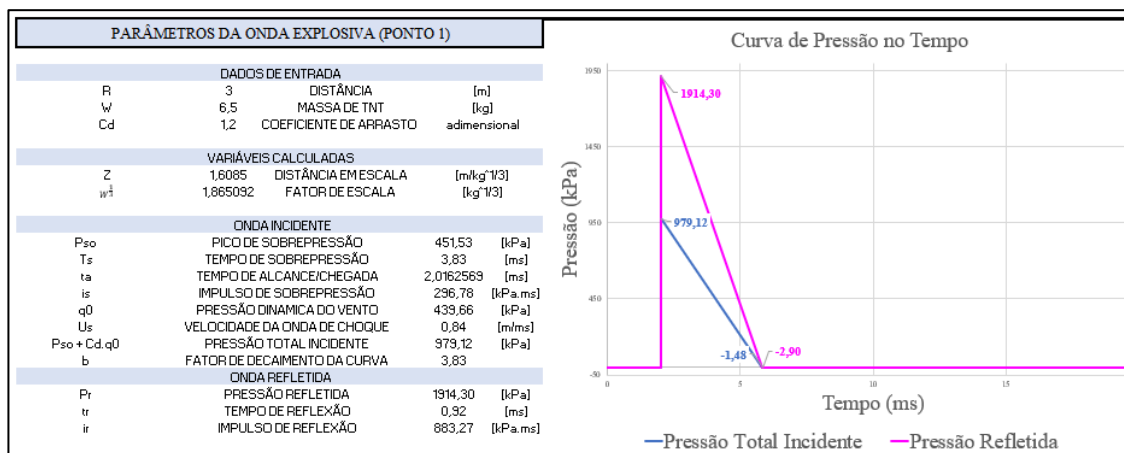
Gráfico 4 – Pico de sobrepressão para $2,37 < Z \leq 39,21$ 

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2.2 Apresentação da planilha eletrônica

Foi construída uma planilha eletrônica (Figura 12) que a partir da inserção da distância ao alvo, massa do explosivo em unidades equivalentes de TNT e do coeficiente de arrasto que calcula automaticamente todos os parâmetros da onda explosiva incidente e refletida, mostrando ainda as curvas de pressão tempo que caracterizam uma explosão.

Figura 12 – Interface da planilha de predição de ondas explosivas



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2.3 Validação do método adotado

No presente trabalho foi adotado o método gráfico proposto por Kingery-Bulmash (1984) devido sua facilidade de obtenção dos parâmetros da onda explosiva além deste ser o método gráfico mais amplamente utilizado em determinações simplificadas em todo o mundo. Em Shin *et al.* (2014b, 2014c) é realizada uma comparação entre os resultados fornecidos pelas curvas de Kingery-Bulmash (1984) com os valores obtidos através da modelagem numérica gerada pelo software *Autodyn*, programa que tem como princípio a fluidodinâmica computacional, a ferramenta mais moderna na análise de explosões disponível atualmente.

Em termos de pico de sobrepressão incidente (P_{so}) foi percebido que para valores de distância escalada (Z) entre 0,08 e 40 m/kg^{1/3} o software e o ábaco não produzem resultados destoantes, sendo essa diferença insignificativa. Por outro lado, para valores de Z entre 0,08 e 0,0567 m/kg^{1/3} o AUTODYN fornece valores cerca de 10% maiores que os obtidos com o ábaco, chegando a valores de 1 ordem de magnitude superior pra valores de Z inferiores a 0,0567 m/kg^{1/3}.

Quanto ao impulso incidente (is) foi percebido que para valores de Z entre 0,1 e 40 m/kg^{1/3} a diferença percentual entre os resultados variou de 10 a 25% com o método gráfico fornecendo valores maiores. Em contrapartida, verificou-se que para valores de Z inferiores a 0,1 m/kg^{1/3} o AUTODYN propôs valores 20% maiores que os fornecidos pelas curvas, podendo ser até 3,5 vezes maior para o caso de Z igual a 0,0553 m/kg^{1/3}.

Para a variável pressão refletida (Pr) foi observado que para valores de Z entre 0,4 e 40 m/kg^{1/3} as diferenças são muito pequenas, passando a ser de 10% apenas para valores de Z

inferiores a $0,3 \text{ m/kg}^{1/3}$, sendo os maiores valores obtidos com o *Autodyn*. Por fim para o impulso refletido (ir) foi notado que as determinações apresentam soluções muito próximas para todo o domínio de Z presente no ábaco proposto por Kingery-Bulmash (1984).

De maneira geral pode se observar que é possível fazer determinações razoavelmente precisas para valores de pressão incidente, pressão refletida e impulso refletido para valores de distância escalada de até $0,08 \text{ m/kg}^{1/3}$, visto que até esse valor a diferença percentual entre a análise gráfica e a análise numérica é de no máximo 10%.

4.2.4 Validação da planilha eletrônica

Para que a planilha buscasse os valores dos parâmetros nos intervalos corretos e retornasse os valores em unidades absolutas, muitas funções condicionantes do próprio Excel foram utilizadas. Esse procedimento abre margem para a ocorrência de erros oriundos da inserção manual das equações, sendo necessária a verificação dos valores de saída da planilha a partir da comparação desses resultados com os obtidos em trabalhos similares.

Desse modo, foram utilizados para fins de validação duas estratégias distintas, o uso de um estudo de caso presente em um importante manual sobre explosões e um software gratuito disponível na internet. O exemplo utilizado nessa validação foi retirado da pesquisa feita pelo *European Laboratory for Structural Assessment* (2013) que fez a obtenção dos parâmetros de onda explosiva por meio da extração manual dos valores no ábaco para uma situação hipotética. O software utilizado foi o *RC Blast*, programa fundamentado nos métodos de predição para situações com explosivos colocados sobre o solo, mesma hipótese adotada no ábaco proposto por Kingery-Bulmash (1984).

Na situação fictícia presente na página 39, do *European Laboratory for Structural Assessment* (2013) são calculados os parâmetros da onda incidente produzida pela detonação de um explosivo sólido com massa equivalente a 100 kg de TNT colocado sobre o solo a uma distância horizontal de 20 m do alvo. Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos no trabalho original e os obtidos a partir da planilha eletrônica apresentada no presente trabalho (Pereira 2019), sendo possível perceber a grande proximidade entre as determinações dada a diferença percentual média inferior a 10%. É importante ressaltar ainda que nesse estudo de caso so foram apresentados os valores referentes a onda incidente, sendo apenas estes, os alvos da validação nesta etapa.

Tabela 2 – Validação da planilha a partir do European Commission (2013).

Parâmetros	European Comission (2013)	Pereira (2019)	Diferença (%)
Pso	56	52,86	5,61
is	310,51	295,98	4,68
ta	30,59	22,71	25,76
to	16,45	16,14	1,88
U	0,41	0,42	2,20
Diferença (%) Média			8,03
Desvio Padrão Médio			7,09

Fonte: Elaborado pelo Autor.

No tangente a validação pelo Software *RC Blast* foram realizadas quatro simulações hipotéticas com a mesma massa de explosivo variando apenas as distancias ao alvo. Esse software fornece exclusivamente os valores referentes a porção refletida da onda explosiva não mostrando as determinações relativas à fase incidente. Na Tabela 3 é apresentada a comparação entre os resultados obtidos pelo software (*RC Blast*) e pela planilha eletrônica (Pereira 2019) tornando possível perceber que as diferenças percentuais entre as duas determinações são praticamente irrisórias, sendo seu valor máximo de 9,6%, o que garante a validade da ferramenta desenvolvida no presente trabalho.

Tabela 3 – Validação da planilha a partir do software *RC Blast*

Massa (kg de TNT)	10	Distância (m)	0,5
	RC Blast	Pereira (2019)	Diferença (%)
Pr	147286,00	153546,67	4,25
Ir	17474,90	18310,92	4,78
ts	0,50	0,50	0,93
Diferença Média (%)			3,32
Massa (kg de TNT)	10	Distância (m)	5
	RC Blast	Pereira (2019)	Diferença (%)
Pr	679,4	676,34	0,45
Ir	653,6	675,61	3,37
ts	4,7	4,92	4,67
Diferença Média (%)			2,83
Massa (kg de TNT)	10	Distância (m)	10
	RC Blast	Pereira (2019)	Diferença (%)
Pr	117,20	109,80	6,31
Ir	293,40	310,84	5,95
ts	7,90	7,80	1,28
Diferença Média (%)			4,51
Massa (kg de TNT)	10	Distância (m)	20

Diferença Média (%)		4,51	
Massa (kg de TNT)	10	Distância (m)	20
	RC Blast	Pereira (2019)	Diferença (%)
Pr	35,2	38,58	9,60
Ir	138,1	143,02	3,56
ts	10,1	9,93	1,70
Diferença Média (%)		4,96	

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Modelagem

Para que se possa estimar os efeitos de uma ação sobre uma estrutura se faz necessária uma idealização e simplificação do problema, além de um claro estabelecimento das considerações a serem feitas tanto na idealização da estrutura quanto do carregamento em questão.

4.3.1 Modelagem da Estrutura

Como o enfoque deste trabalho é a análise dos níveis de solicitação gerados por explosão nos pilares do viaduto, estes foram considerados como elementos isolados, afastando a necessidade de estudo aprofundado dos demais elementos como vigas e laje do tabuleiro.

Para fins de estimativa do nível de solicitação nos demais elementos do viaduto, foi feita a consideração de que as vigas faixas protendidas e a laje do tabuleiro funcionam como um único elemento, aqui chamado de superestrutura. Esse tipo de simplificação se faz necessária pois em métodos que não utilizam a tecnologia dos elementos finitos se torna praticamente impossível estimar as múltiplas reflexões que ocorrem nos espaços entre as vigas e a parte inferior do tabuleiro.

Além do mais, a consideração desses elementos como partes isoladas corre a favor da segurança da estrutura, visto que a desconsideração da presença da carga axial de compressão nos pilares, oriunda do peso próprio e das cargas dos veículos, garante que todas as hipóteses de predição e dimensionamento sirvam para uma situação na qual o pilar não encontra-se comprimido e conseqüentemente confinado. Essas situações são favoráveis para uma melhor resposta da capacidade portante da estrutura, pois a tendência de uma onda explosiva é desagregar o concreto anteriormente confinado, facilitando seu colapso.

4.3.2 Modelagem do Carregamento

Dada a necessidade de se prever a intensidade e a forma da solicitação oriunda da detonação de explosivo sólido sobre uma estrutura, é de fundamental importância o conhecimento do explosivo utilizado, seu respectivo equivalente de TNT e a idealização desse fenômeno.

4.3.2.1 Caracterização do explosivo

Como não foi possível ter acesso ao laudo gerado pelo DNIT, e conseqüentemente ao tipo de explosivo específico utilizado, foi necessário fazer uso de estimativas a partir dos indícios do atentado. A partir de vídeos e imagens de apreensões de materiais explosivos publicados na mídia durante as ondas de ataque em Fortaleza foi possível perceber que boa parte desses eram materiais que apresentavam em suas embalagens a sigla ANFO (Ammonium Nitrate / Fuel Oil) um tipo de material pertencente ao grupo dos altos explosivos, família de detonadores com capacidade de liberação energética muito próxima ao TNT, um dos mais potentes disponíveis no mercado.

O ANFO é normalmente apresentado em forma de material granular de coloração amarelada em sacos de até 25 kg, liberando em média 4,9 MJ de energia de detonação por kg. Para aplicação desse tipo de explosivo na planilha de predição se faz necessária uma conversão do mesmo para uma massa equivalente de TNT, explosivo padrão na qual todos os métodos preditivos se baseiam.

Foi, portanto, utilizada uma calculadora de equivalências de TNT desenvolvida pelo IME (Institute of Makers of Explosives) que a partir da massa de ANFO em kg fornece a massa equivalente em kg de TNT com base no calor de combustão liberado durante a detonação, sendo esse valor para o ANFO aproximadamente 0,88 kcal/g.

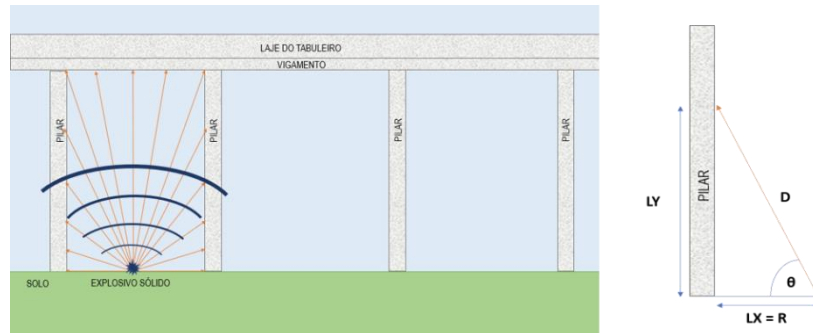
4.3.2.2 Forma e distribuição das pressões

Os parâmetros obtidos na planilha de predição de ondas explosivas são aplicáveis para um ponto da estrutura em questão, no entanto devido as dimensões consideráveis dos elementos estruturais do viaduto foi estabelecido um procedimento de análise a partir da delimitação de pelo menos três pontos ao longo de seu comprimento.

Tomando como exemplo um elemento do tipo pilar, foi estabelecida uma distância horizontal (L_x) entre ele e o ponto de detonação e foi calculado para cada um dos três pontos

ao longo de sua altura, a distância inclinada (D), a altura do ponto (L_y) e o respectivo ângulo de inclinação (θ) como indicado na Figura 13.

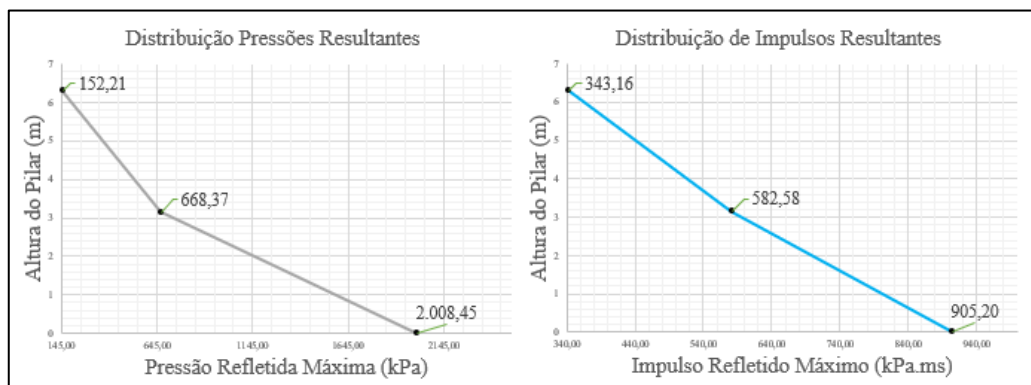
Figura 13 – Representação esquemática da onda incidente e esquema de pontos no pilar



Fonte: Elaborado pelo autor.

Desse modo, foram obtidos os valores de sollicitação considerando o método simplificado proposto Kingery-Bulmash (1984) para um ângulo de incidência igual a zero, para a situação considerando a influência do ângulo entre o vetor normal à estrutura e o vetor normal à frente da onda. Assim, para cada um dos três pontos do pilar foram obtidos dois valores de sollicitação, sendo o carregamento final montado a partir dos valores máximos obtidos para cada ponto, de modo a se obter os cenários mais desfavoráveis para cada situação. Na figura 14 são apresentados os gráficos resultantes obtidos, fornecidos pela planilha eletrônica para uma situação fictícia.

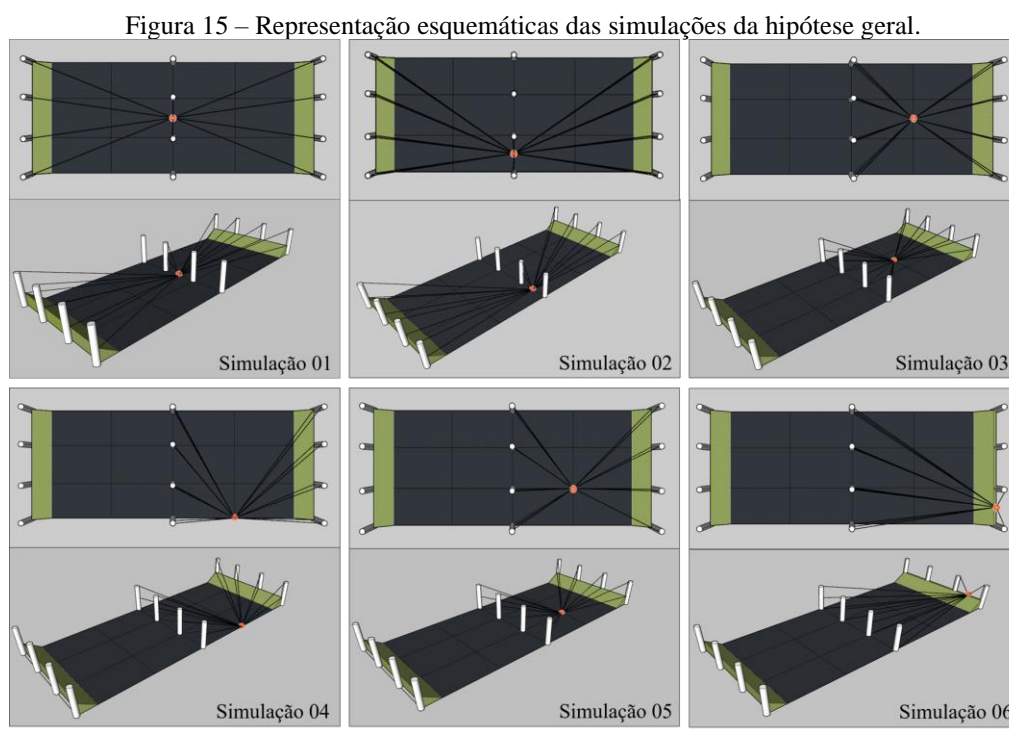
Figura 14 – Distribuição de sollicitações resultantes no pilar



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.3.3 Definição das Simulações

Inicialmente foi realizada a chamada hipótese geral de incidência, na qual variou-se a posição do explosivo por entre os alinhamentos dos pilares de modo a se obter a posição que garantisse os maiores níveis de sollicitação tanto para os pilares centrais quanto para os de canto, estando as simulações realizadas apresentadas esquematicamente na Figura 15.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A partir das situações críticas obtidas na hipótese geral foram realizadas outras duas análises posteriormente. Na primeira foi fixada a massa do explosivo e reduzida a distância do explosivo ao alvo sucessivamente pela metade. Na segunda foi realizado o processo inverso, foi fixada a distância enquanto que a massa de explosivo foi sucessivamente duplicada. Por fim foi realizada a simulação e obtenção de parâmetros para a junção das situações críticas, com mínima distância e máxima massa de explosivo simultaneamente.

Dado o fato de que as explosões provenientes de eventos criminosos possuem variáveis desconhecidas, se faz necessária a fixação de um intervalo de valores para se analisar o fenômeno. Este é o caso da massa de explosivo, que pode assumir qualquer valor, sendo necessário portanto estimar seus valores para diversos cenários explosivos. No presente trabalho foi, portanto, admitido um intervalo de valores de massa de explosivo entre 1 kg e 64

kg de ANFO, sendo idealizado que na situação real essa massa foi da ordem de 8 kg de ANFO, equivalente a 6,5 kg de TNT.

4.4 Determinação das distâncias de segurança

Para o estudo das distâncias de segurança referentes a atentados explosivos, foram utilizados os valores de sobrepressão associados a efeitos em seres humanos (Figura 16) e danos em edificações (Figura 17) propostos por Kinney & Graham (1985). Esses danos estão associados aos chamados efeitos primários da explosão, diretamente ligados à variação brusca de pressão durante a detonação dos explosivos.

A planilha Eletrônica apresentada em 3.2.2 foi desenvolvida para que o usuário preencha os campos referentes à massa e distância do explosivo, sendo assim obtida a sobrepressão associada. Desse modo, a partir das equações presentes na planilha foi realizado o cálculo inverso e foram obtidas todas as distâncias limites associadas aos níveis de sobrepressão indicados nas figuras 16 e 17.

Figura 16 – Efeitos de ondas de choque sobre estruturas

DANO	Variação de Pressão (P _{so})	
	Bar	psi
Quebra de vidraças	0,01 - 0,015	0,15 - 0,22
Danos mínimos em construções	0,035 - 0,075	0,52 - 1,12
Danos em painéis metálicos	0,075 - 0,125	1,12 - 1,87
Falha de painéis de madeira (construções)	0,075 - 0,15	1,12 - 2,25
Falha em paredes de tijolos	0,125 - 0,2	1,87 - 3
Rompimento de tanques de refinarias	0,2 - 0,3	3 - 4,5
Danos em edifícios (estruturas metálicas)	0,3 - 0,5	4,5 - 7,5
Danos em estruturas concretadas	0,4 - 0,6	6,0 - 9,0
Provável destruição total da maioria das construções	0,7 - 0,8	10,5 - 12

Fonte: Silva (2015) *apud* Kinney & Graham (1985).

Figura 17 – Efeitos de ondas de choque sobre seres humanos

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

Fonte: Silva (2015) *apud* Kinney & Graham (1985).

Foi também utilizada a Equação 26, proposta por Lenz *apud* Silva (2015), que fornece a partir da massa do explosivo em unidades equivalentes de TNT (W), uma noção

prática do valor de distância de segurança requerido (R_{seg}) para neutralização de artefatos explosivos, sendo inclusive um indicativo de segurança para medidas de evacuação de seres humanos. Essa distância está associada ao risco de seres humanos serem atingidos por fragmentos do explosivo, da estrutura danificada ou outros objetos que estejam no caminho da onda de choque.

$$R_{seg} = 120W^{1/3} \quad (26)$$

4.5 Método de dimensionamento.

O dimensionamento feito nessa pesquisa foi realizado com base no guia proposto pela pesquisa *Blast-Resistant Highway Bridges: Design and Detailing Guidelines* (2010), que propõe taxas de armaduras transversais mínimas para pilares de pontes e viadutos com base na distância escalada Z . Esse método é fundamentado em simulações numéricas e experimentais e oferece dentre outros parâmetros a taxa de armadura mínima necessária para a solicitação, o comprimento que o gancho do estribo deve possuir, e seu respectivo ângulo de dobramento.

Na Tabela 04 são mostrados os intervalos e as respectivas classificações, de modo que a Categoria A representa um incidente explosivo mais brando e a Categoria C, a situação mais crítica permitida por esse dimensionamento. Para valores de Z menores que 0,198 o dimensionamento não é recomendado pois as solicitações em termos de pressão e impulso podem chegar a valores extremos, exigindo uma análise mais individualizada.

Tabela 4 – Níveis de dimensionamento proposto pelo NCHRP (2010)

Categoria A	$Z >$	1,190
Categoria B	$1,190 \geq Z >$	0,595
Categoria C	$Z \leq$	0,595
Não Recomendado	$Z \leq$	0,198

Fonte: Adaptado de NCHRP (2010).

Com base nessa classificação é possível portanto apurar a segurança do elemento estrutural a partir de suas propriedades geométricas e de seus materiais. Na Equação 27 é apresentada a fórmula para cálculo da taxa de armadura volumétrica, associada aos estribos pilar, enquanto as equações 28, 29 e 30 apresentam as taxas mínimas de armadura que o elemento estrutural deve possuir para as categorias A, B e C respectivamente.

$$\rho_s(\%) = \frac{4A_v}{s(D - 2c)} \quad (27)$$

$$\rho_{\text{mín}}(\%) = 0,45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y} \quad (28)$$

$$\rho_{\text{mín}}(\%) = 0,12 \frac{f_{ck}}{f_y} \quad (29)$$

$$\rho_{\text{mín}}(\%) = 1,5 \left(0,12 \frac{f_{ck}}{f_y} \right) \quad (30)$$

Onde:

ρ_s : Taxa de armadura transversal existente

A_v : Área da seção transversal da barra do estribo

S : Espaçamento entre os estribos

D : Diâmetro da coluna

c : Espessura da camada de cobrimento do concreto

$\rho_{\text{mín}}$: Taxa mínima de armadura transversal requerida

A_g : Área da seção bruta do pilar

A_c : Área de cobrimento do pilar

f_{ck} : Resistência característica do concreto à compressão.

f_y : Tensão de escoamento do aço adotado.

Desse modo, caso a taxa de armadura transversal existente (ρ_s) seja menor que a taxa mínima necessária ($\rho_{\text{mín}}$) para um dado nível de risco, é necessário fazer alterações nas quantidades, ou nas propriedades do aço da armadura transversal. Esse método propõe ainda valores referentes ao comprimento e ângulo do gancho do estribo de acordo com a categoria referente a distância escalada Z , como apresentados na Tabela 5, onde d_b é o diâmetro da barra utilizada no estribo.

Tabela 5 – Comprimento e ângulo de dobramento do gancho segundo NCHRP (2010)

	Comprimento do Gancho (mm)	Ângulo de Dobramento (°)
Categoria A	$6d_b$	90
Categoria B	$15d_b$	135
Categoria C	$20d_b$	135

Fonte: NCHRP (2010).

Este método recomenda que para dimensionamentos na categoria C seja realizada ainda uma verificação de ductilidade e rotação do elemento, o que não foi realizado neste trabalho por decorrência de limitações burocráticas associadas a obtenção das planilhas que efetuam estes cálculos, na qual seu uso é condicionado pelo Exército Americano. Assim, foram calculadas as taxas de armaduras necessárias para os pilares do viaduto analisado e foi admitido que elas servem como indicativo da taxa de armadura transversal necessária, ficando esta verificação a cargo de trabalhos futuros.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise dos níveis de solicitação

Nesta seção serão apresentados os valores da solicitação explosiva em termos de pressão refletida e impulso refletido ao longo do pilar, a partir das simulações apresentadas em 4.3.3.

5.1.1 Análise geral

Para as seis simulações realizadas foram determinados os parâmetros que caracterizam a explosão em três pontos ao longo da altura dos pilares, estando eles localizados na base, no centro e no topo. Cada simulação foi feita considerando uma massa de explosivo do tipo ANFO de 8 kg em diferentes posições em planta do viaduto estudado.

A definição dos cenários com solicitações mais extremas foi realizada tomando como parâmetro as simulações que apresentaram valores críticos de pressão refletida, impulso refletido, tempo de sobrepressão e pressão total negativa. Essas variáveis foram escolhidas porque são os elementos fundamentais para que se realize uma caracterização coerente do carregamento oriundo de uma explosão.

Como em algumas das simulações o explosivo foi posicionado muito próximo de alguns pilares e razoavelmente distante dos demais, foi tomada a precaução de separar os pilares em dois grupos distintos, os centrais (P2, P5, P8 e P11) e os de canto (P1, P3, P4, P6, P7, P9, P10 e P12) para que valores médios que caracterizam cada simulação fossem substancialmente representativos.

Na Tabela 6 são apresentados os valores críticos obtidos para os pilares de canto e a respectiva simulação a qual este valor está associado, sendo possível perceber que o valor de pressão refletida máxima na qual o elemento será submetido é 1914,30 kPa e o valor de impulso

refletido máximo é de 883,27 kPa.ms, sendo ambos valores referentes a simulação 06, onde o explosivo está posicionado no meio do vão existente entre os pilares 8 e 11.

Já os máximos valores de pressão total negativa acontecem em outras duas simulações, na qual o explosivo encontra-se no meio do vão entre os pilares centrais e os de canto. Contudo, esse valor é muito inferior a pressão refletida obtida, e, portanto, não configura risco a estrutura visto que para essa situação a estrutura seria dimensionada com base no valor crítico de 1914,30 kPa.

Tabela 6 – Valores críticos para os pilares de canto

Parâmetros da Explosão	Pilares de Canto	Simulação
Pressão Refletida Máxima Média (kPa)	1914,30	S06
Pressão Refletida Máxima (kPa)	1914,30	S06
Impulso Refletido Máximo Médio (kPa.ms)	883,27	S06
Impulso Refletido Máximo (kPa.ms)	883,27	S06
Tempo de Sobrepressão Mínimo (ms)	3,83	S06
Pressão Total Negativa Média (kPa)	10,81	S03
Pressão Total Negativa Máxima (kPa)	11,14	S04

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para os pilares centrais (Tabela 7) a situação crítica é similar ao caso dos pilares de canto mencionados no item anterior, onde desta vez o explosivo está localizado no centro do vão entre os pilares 9 e 12 (Simulação 02), apresentando inclusive os mesmos valores pressão e impulso refletido máximos. Por outro lado, ao se analisar os pilares centrais percebe-se que é durante a simulação 01 que eles experimentam um tempo de sobrepressão ligeiramente menor, o que é justificável visto que para esta distância está associado um domínio de distância escalada Z na qual a função de sobrepressão diminui com o afastamento do explosivo em relação ao alvo.

Tabela 7 – Valores críticos para os pilares centrais

Parâmetros da Explosão	Pilares Centrais	Simulação
Pressão Refletida Máxima Média (kPa)	1914,30	S02
Pressão Refletida Máxima (kPa)	1914,30	S02
Impulso Refletido Máximo Médio (kPa.ms)	883,27	S02
Impulso Refletido Máximo (kPa.ms)	883,27	S02
Tempo de Sobrepressão Mínimo (ms)	3,47	S01
Pressão Total Negativa Média (kPa)	12,22	S03
Pressão Total Negativa Máxima (kPa)	12,47	S03

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Tabela 8 são apresentados todos os parâmetros que caracterizam a fase positiva da onda de choque proveniente de um incidente explosivo para três pontos ao longo da altura do pilar, com suas respectivas unidades, para a hipótese de utilização de 8 kg de explosivo sólido do tipo ANFO posicionado no meio do vão entre os pilares 08 e 11.

Tabela 8 – Parâmetros da fase positiva para R = 3,0 m e W = 8 kg de ANFO

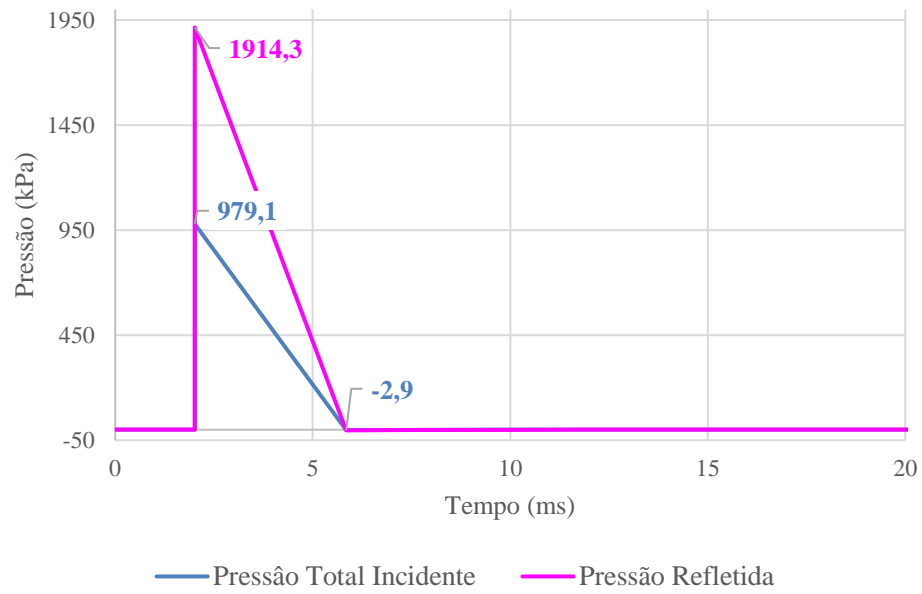
Parâmetros		Ponto 01 (Base)	Ponto 02 (Centro)	Ponto 03 (Topo)
Distância	M	3,00	4,35	6,98
Massa de TNT	kg ^(1/3)	6,50	6,50	6,50
Coefficiente de Arrasto		1,20	1,20	1,20
Distância Em Escala	m/kg ^(1/3)	1,61	2,33	3,74
Fator de Escala	kg ^{1/3}	1,87	1,87	1,87
Pico de Sobrepressão	kPa	451,53	204,71	64,74
Tempo de Sobrepressão	Ms	3,83	4,28	5,98
Tempo de Alcance/Chegada	Ms	2,02	3,56	7,35
Impulso de Sobrepressão	kPa.ms	296,78	210,46	135,94
Pressão Dinâmica do Vento	kPa	439,66	114,81	13,56
Velocidade da Onda de Choque	m/ms	0,84	0,55	0,43
Pressão Total Incidente	kPa	979,12	342,48	81,02
Fator de Decaimento da Curva		3,83	2,50	1,01
Pressão Refletida	kPa	1914,30	668,37	152,21
Tempo de Reflexão	Ms	0,92	1,74	4,51
Impulso de Reflexão	kPa.ms	883,27	582,58	343,16

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Vale ressaltar ainda que devido a simetria da estrutura, uma situação com valores equivalentes seria obtida se o mesmo explosivo fosse posicionado entre os pilares 02 e 04, visto que estes são espaçados do mesmo valor de 6,0 metros.

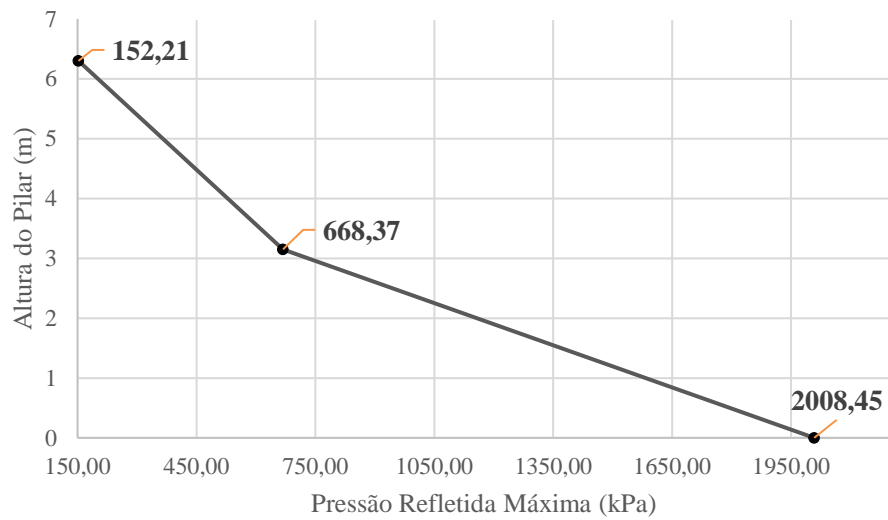
A seguir é apresentada a curva de pressão no tempo para um ponto situado na base do pilar (Gráfico 5) e as distribuições de pressão refletida e impulso refletido ao longo da altura do pilar nos gráficos 6 e 7, respectivamente, para uma massa de 8 kg de ANFO distante 3,0 metros da base do pilar.

Gráfico 5 – Curva de pressão no tempo para R = 3,0 m e W = 8 kg de ANFO



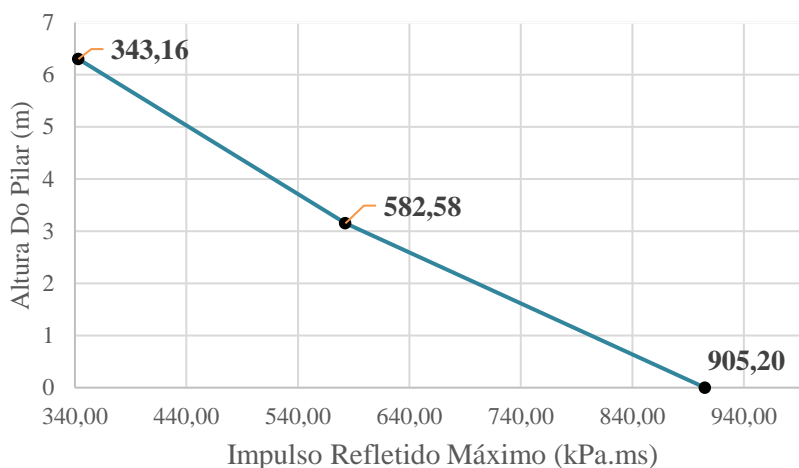
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Gráfico 6 – Distribuição de pressões resultantes para R = 3,0 m e W = 8 kg de ANFO



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Gráfico 7 – Distribuição de impulsos resultantes para $R = 3,0$ m e $W = 8$ kg de ANFO



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.1.2 Solicitações na Superestrutura

Foram obtidos os níveis máximos de solicitação na superestrutura do viaduto estudado com base nos dois níveis de terreno que possivelmente possam ser posicionados explosivos. Para explosivos colocados nos vãos entre os pilares centrais foi considerada que a distância até a parte inferior do tabuleiro até o nível do terreno equivale a 6,56 metros. No que tange aos pilares de canto foi percebido que as distâncias entre o nível do terreno e a parte inferior do tabuleiro varia de 3,81 m no canto direito (P03, P06, P09 e P12) a 4,03 m no canto esquerdo (P01, P04, P07 e P10) sendo considerada aqui a menor distância vertical, 3,81 metros.

Para diversas quantidades de explosivos foram obtidos níveis de solicitação e estes são apresentados na Tabela 9. Com estes resultados é possível perceber que para a situação idealizada com uma massa de explosivo de 8 kg de ANFO posicionada no vão entre os pilares centrais, o tabuleiro do viaduto será submetido a uma solicitação máxima ascendente de 89,92 kPa em termos de pressão e 143,93 kPa.ms em termos de impulso incidente.

Contudo, essa mesma estrutura é submetida a solicitações ainda maiores durante o fenômeno de reflexão da onda, onde surgirão solicitações descendentes de aproximadamente 167,07 kPa em termos de pressão refletida, e um impulso refletido de 367,73 kPa.ms.

Tabela 9 – Parâmetros da onda explosiva no tabuleiro para R = 6,56 m e várias massas

Distância (m)	6,56						
W ANFO (Kg)	1	2	4	8	16	32	64
W TNT (Kg)	0,8	1,6	3,2	6,5	12,9	25,8	51,7
Pressão Total (Kpa)	29,08	41,79	60,67	89,92	133,25	392,04	754,66
Impulso Incidente (Kpa.Ms)	37,58	58,60	91,38	143,93	223,34	348,28	543,79
Pressão Refletida (Kpa)	58,31	82,60	117,02	167,07	398,54	766,23	1475,84
Impulso Refletido (Kpa.Ms)	83,80	136,69	222,98	367,73	596,60	973,19	1589,67

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Foram estimados ainda estes mesmos parâmetros para a situação em que um explosivo de mesma massa fosse colocado em algum dos vãos entre os pilares do canto esquerdo, estando os resultados obtidos apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros da onda explosiva no tabuleiro para R = 3,81 m e várias massas

Distância (m)	3,81						
W ANFO (Kg)	1	2	4	8	16	32	64
W TNT (Kg)	0,8	1,6	3,2	6,5	12,9	25,8	51,7
Pressão Total (Kpa)	69,43	102,45	153,18	497,19	949,73	1813,65	3395,46
Impulso Incidente (Kpa.Ms)	62,12	96,87	151,06	237,91	369,18	575,71	898,91
Pressão Refletida (Kpa)	132,38	187,53	498,65	972,83	1856,79	4368,32	7314,40
Impulso Refletido (Kpa.Ms)	154,00	251,22	409,79	675,82	1096,42	1788,52	2921,48

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Tabela 11 é mostrada a variação percentual que essa mudança de posição do explosivo implica, sendo possível observar a ocorrência de um aumento de solicitação de no mínimo 65,30 % no valor de impulso incidente podendo chegar até a 482,29 % para o valor de pressão refletida.

Tabela 11 – Comparação entre as solicitações no tabuleiro

Massa (kg de ANFO)	8		
Distância (m)	6,56	3,81	Aumento (%)
Pressão Total (kPa)	89,92	497,19	452,94
Impulso Incidente (kPa.ms)	143,93	237,91	65,30
Pressão Refletida (kPa)	167,07	972,83	482,29
Impulso Refletido (kPa.ms)	367,73	675,82	83,78

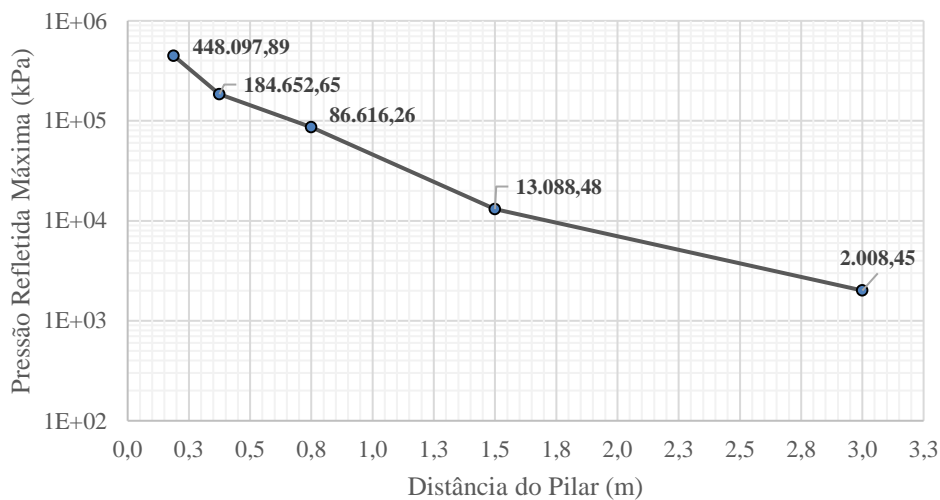
Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.1.3 Análise da Variação da Distância

Partindo da hipótese crítica geral foi realizada uma análise posterior fixando a massa do explosivo em 8 kg e agora foram estimados os valores de pressão refletida e impulso refletido na base do pilar a partir da distância de 3 metros, correspondente ao centro vão, reduzindo esse valor sucessivamente pela metade até uma distância mínima de cerca de 18,75 centímetros.

A partir do Gráfico 8 é possível perceber que em uma situação na qual o explosivo esteja posicionado a cerca de 18 cm da face do pilar o nível de pressão refletida pode ser de aproximadamente 448.094,89 kPa. Nota-se ainda que a redução de distâncias para valores de até 0,75 metros implica em um aumento de pressão de aproximadamente 6 vezes entre um ponto e outro. Por outro lado, essa variação diminui para determinações com distâncias inferiores a 0,75 metros, onde se percebe uma variação do aumento menos significativa, da ordem de 2 vezes de um ponto mais distante para um ponto mais próximo.

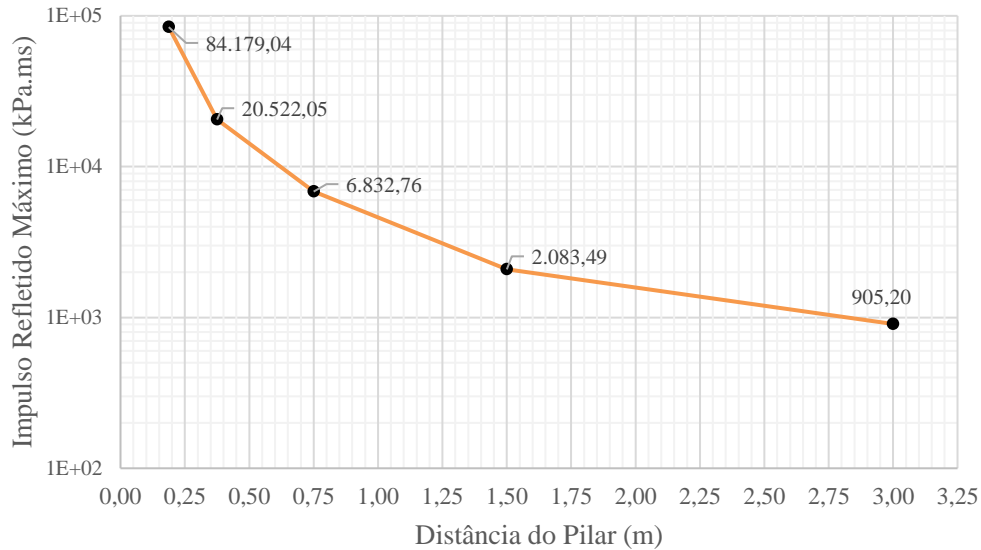
Gráfico 8 – Pressão refletida máxima para várias distâncias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No que tange ao parâmetro impulso refletido, percebe-se no Gráfico 9 que na situação crítica com distância do explosivo ao pilar em torno de 18,75 centímetros, esse valor pode ser da ordem de 80.000 kPa.ms. Já quanto a sua taxa de aumento, percebe-se que ocorre uma variação não uniforme, possuindo pontos em que o valor é duplicado em relação ao anterior, e pontos em que esse valor pode até quadruplicar.

Gráfico 9 – Impulso refletido máximo para várias distâncias



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos níveis de solicitação obtidos para os três pontos ao longo da altura do pilar foi verificada a diferença entre carregamentos entre os pontos localizados na base, no centro e no topo do pilar. Na Tabela 12 são apresentados valores que indicam quantas vezes um determinado parâmetro determinado na base do pilar é maior que o valor obtido para os outros dois pontos, sendo possível constatar que para o valor de pressão o valor na base pode chegar a ser mais de 6 mil vezes maior que o valor estimado para um ponto situado no topo do pilar, quando o explosivo está praticamente junto a superfície do mesmo.

Contudo, percebe-se que o impulso refletido apresenta um diferencial de magnitude muito inferior, sendo o valor na base cerca de 560 vezes maior que o valor no topo, mas ainda assim uma diferença muito significativa. Esses diferenciais tornam evidentes que quanto mais próximo estiver o explosivo da base do pilar mais significativos serão os danos causados na base dos mesmos quando comparados a outros pontos ao longo da peça.

Tabela 12 – Proporção entre as solicitações ao longo do pilar

Distância (m)	Pressão Refletida		Pressão Refletida (Ângulo)	
	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
3	2,86	12,58	3,82	19,06
0,1875	270,11	2525,01	1047,49	6846,64
Distância (m)	Impulso Refletido		Impulso Refletido (Ângulo)	
	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
3	1,52	2,57	2,04	5,41
0,1875	84,73	183,89	283,57	560,67

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 13 são mostrados os valores de diferenças percentuais médias obtidas para pressão refletida e impulso refletido na base de um pilar para distâncias de até 18,8 centímetros, sendo possível perceber que a redução gradual da distância implica em um aumento da diferença percentual entre as duas determinações, chegando a variações de até 154,21% no caso da pressão refletida e 117,76% para o impulso refletido.

Tabela 13 – Diferença entre determinações com e sem a consideração do ângulo

Distância (m)	Diferença (%) Média entre Pr e Pr α	Diferença (%) Média entre Ir e Ir α
3	25,40	46,32
1,5	89,41	70,77
0,75	144,48	82,16
0,375	151,15	102,72
0,1875	154,21	117,76

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nas Tabelas presentes no Apêndice A é possível visualizar ainda que no geral, para maiores distâncias as determinações levando em consideração o ângulo apresentam níveis de solicitação maior do que quando o ângulo de incidência da onda não é considerado, tanto para valores de pressão refletida quanto para impulso refletido.

Na Tabela 14 são apresentados os níveis de redução de danos com base no aumento da distância entre o explosivo e a superfície do pilar por incremento de barreiras físicas no perímetro do mesmo, sendo possível observar que essas intervenções construtivas podem reduzir em quase 33 vezes a pressão refletida e o impulso refletido, quando comparados a situação na qual o explosivo fica a 20 cm da face do pilar.

Tabela 14 – Redução de solicitação para aumento de distâncias

Redução da Distância (m)	Redução da Solicitação (vezes)	
	Pressão Refletida	Impulso Refletido
De 0,2 para 0,3	1,68	2,06
De 0,2 para 0,4	2,43	3,45
De 0,2 para 0,5	2,85	5,13
De 0,2 para 0,6	4,28	7,11
De 0,2 para 0,7	6,03	9,36
De 0,2 para 0,8	8,12	11,88
De 0,2 para 0,9	10,56	14,65
De 0,2 para 1,0	13,35	20,85
De 0,2 para 1,1	16,51	23,20
De 0,2 para 1,2	20,04	25,57

Tabela 14 – Redução de sollicitação para aumento de distâncias

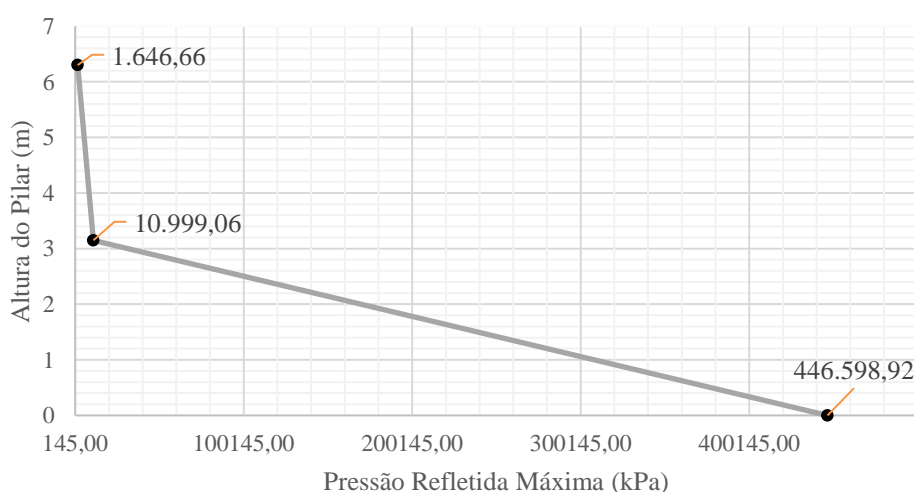
Redução da Distância (m)	Redução da Sollicitação (vezes)	
	Pressão Refletida	Impulso Refletido
De 0,2 para 1,3	23,95	27,97
De 0,2 para 1,4	28,24	30,39
De 0,2 para 1,5	32,93	32,83

Fonte: Elaborado pelo Autor.

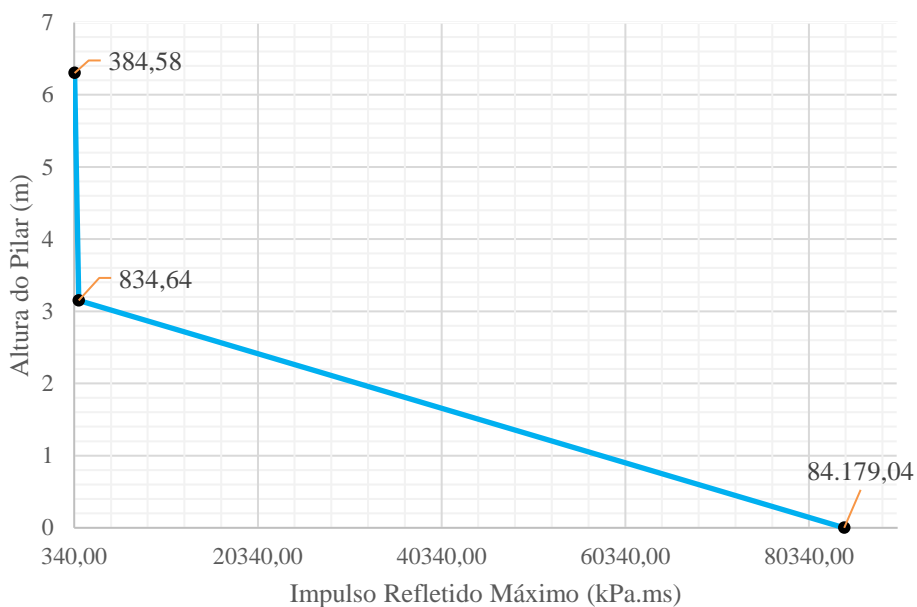
É válido ressaltar que em incidentes reais o explosivo é comumente posicionado junto a face do pilar, o que configuraria uma situação com distância igual a zero, o que não é possível neste trabalho em decorrência da limitação do método adotado. Foi adotada, portanto, como distância inicial o valor de 20 cm para uma massa de explosivo de aproximadamente 8 kg de ANFO, o que corresponde a uma distância escalada de aproximadamente $0,10 \text{ m/kg}^{1/3}$.

Essa precaução foi tomada pois o valor de distância escalada de $0,10 \text{ m/kg}^{1/3}$ está contido no intervalo de valores que apresentou resultados consideravelmente precisos quando comparados com a análise numérica do software *Autodyn*, como apresentado em 4.2.3 na seção de validação do método.

A seguir são apresentadas as distribuições de carregamento máximo ao longo da altura do pilar em termos de pressão refletida (Gráfico 10) e em termos de impulso refletido (Gráfico 11) para uma massa de explosivo de 8 kg de ANFO posicionada a 0,1875 metros da base do pilar, configurando a hipótese crítica para esta análise.

Gráfico 10 – Pressão refletida ao longo do pilar para $W=8 \text{ kg}$ de ANFO e $R=0,1875 \text{ m}$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 11 – Impulso refletido ao longo do pilar para $W = 8$ kg de ANFO e $R = 0,1875$ m

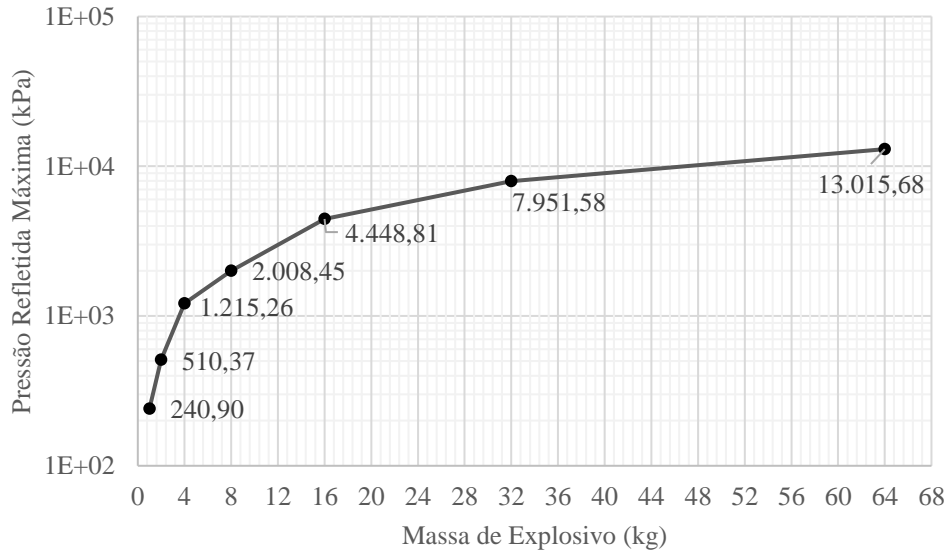
Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.1.4 Análise da variação da massa

A partir da fixação da distância em 3,0 metros foi realizado um aumento gradativo da massa de explosivo através da sua sucessiva duplicação, sendo obtidos os níveis de pressão refletida e impulso refletido máximos na base do pilar para uma massa de até 64 kg de ANFO.

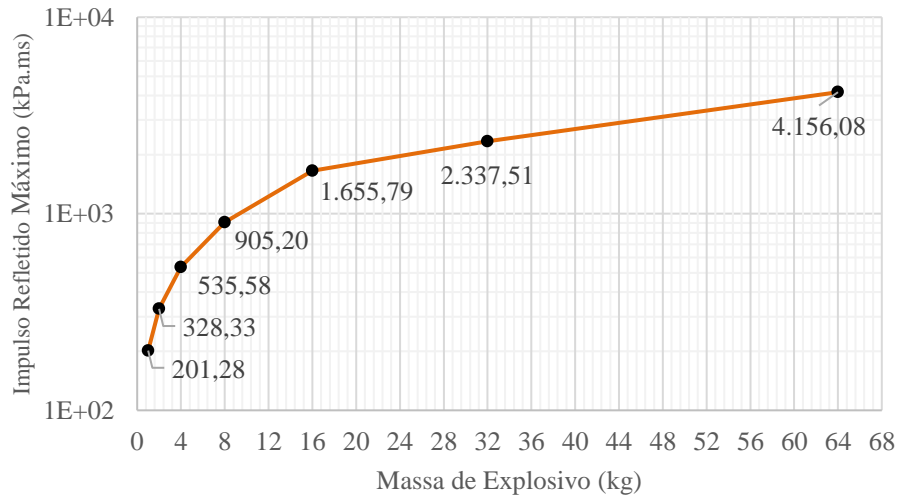
Os resultados apresentados nos gráficos 12 e 13 evidenciam que essas solicitações crescem progressivamente com o aumento da massa chegando ao valor de 13.015,68 kPa em termos de pressão refletida e 4.156,08 kPa.ms em termos de impulso refletido, para o valor máximo de massa considerado nessa análise, 64 kg de ANFO, equivalente a 51,7 kg de TNT.

Gráfico 12 – Crescimento da pressão refletida para R = 3,0 m e massa variável



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Gráfico 13 – Crescimento do impulso refletido para R= 3,0 m e W variável



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Tabela 15 são apresentadas as magnitudes de aumento das variáveis apresentadas nos gráficos anteriores, sendo possível observar que para a pressão refletida o aumento mais significativo acontece quando a massa é aumentada de 2 kg para 4 kg, enquanto que para o impulso refletido o acréscimo mais significativo acontece quando a massa do explosivo é duplicada de 8 kg para 16 kg.

Tabela 15 – Aumento de solicitação devido aumento de massa de explosivo

Variação de Massa (kg)	Aumento (vezes)	
	Pressão Refletida	Impulso Refletido
de 1 para 2	2,12	1,63
de 2 para 4	2,38	1,63
de 4 para 8	1,65	1,69
de 8 para 16	2,22	1,83
de 16 para 32	1,79	1,41
de 32 para 64	1,64	1,78

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as diversas quantidades de explosivo foi verificada diferença percentual entre as determinações dos parâmetros sem a consideração do ângulo de incidência da onda de choque e com a sua consideração, estando os resultados obtidos apresentados na Tabela 16. A partir desses resultados foi possível observar que a maior diferença percentual obtida entre as duas determinações aconteceu para a massa de 16 kg na análise de pressões refletidas, sendo este valor de 63,42 %. Já para a comparação entre os impulsos refletidos o valor máximo foi de 62,91%, referente a massa de 2 kg.

Tabela 16 – Diferença percentual entre determinações a partir da variação da massa

Massa de Explosivo (kg de ANFO)	Diferença (%) Média	Diferença (%) Média
	entre Pr e Pr α	entre Ir e Ir α
1	17,41	25,80
2	26,73	62,91
4	31,49	41,60
8	25,40	46,32
16	63,42	57,61
32	57,91	42,95
64	55,51	54,14

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com base nas Tabelas 39 e 40 presentes no Apêndice A é possível constatar que para a faixa de massas analisada, compreendida entre 1 kg e 64 kg, o valor de pressão refletida na base é maior para a determinação considerando o ângulo de incidência para a maioria das quantidades de explosivo analisadas. Por outro lado, no que tange ao impulso refletido, percebe-se um predomínio do valor obtido a partir da determinação desconsiderando a angulosidade,

apresentando apenas alguns pontos nas quais a consideração do ângulo gera solicitações maiores.

De maneira geral, para a situação com distância fixada em 3,0 metros e massa variável, percebe-se que a diminuição da massa implica na diminuição dessa diferença percentual entre as duas determinações, fazendo com que se torne quase indiferente a escolha de uma determinação em detrimento a outra.

Na Tabela 17 são apresentados os diferenciais de solicitação ao longo da altura do pilar para as diversas quantidades de explosivo estudadas, sendo possível observar as situações mais extremas em termos de proporção de cargas atuantes. Para a variável pressão refletida, observa-se que para uma massa de 16 kg a pressão obtida na base será 31,56 vezes maior que a obtida em um ponto situada em seu topo, enquanto que para o impulso refletido a situação extrema acontece quando a massa de explosivo for igual a 64 kg onde a solicitação na base do elemento estrutural é 5,91 vezes maior que o valor referente ao topo.

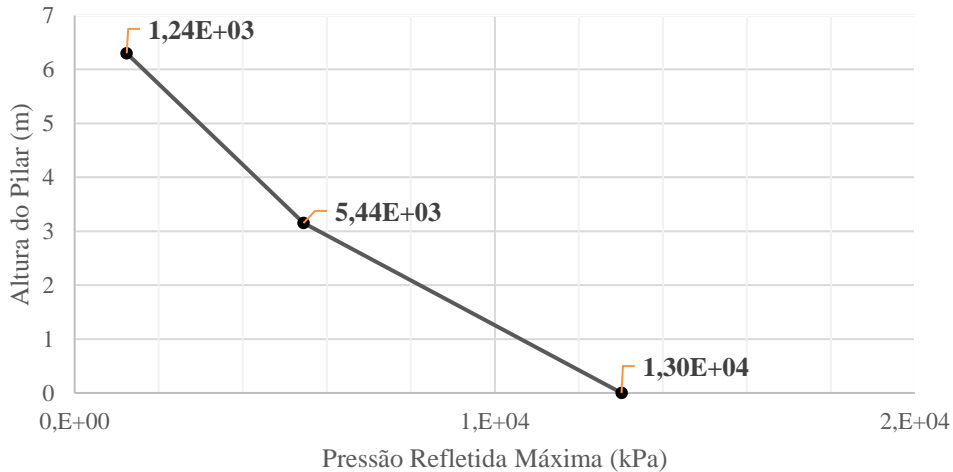
Tabela 17 – Proporção de solicitação para aumento de massa de explosivo

Massa de Explosivo (kg de ANFO)	Pressão Refletida		Pressão Refletida (Ângulo)	
	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
1	1,75	3,57	1,61	4,38
2	3,32	6,78	1,61	4,38
4	2,86	9,2	4,75	16,12
8	2,86	12,58	3,82	19,06
16	3,49	13,3	4,11	31,56
32	3,03	11,56	3,84	30,76
64	2,29	10,05	3,28	23,64
Massa de Explosivo (kg de ANFO)	Impulso Refletido		Impulso Refletido (Ângulo)	
	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
1	1,52	2,57	1,85	3,19
2	1,52	2,57	1,85	3,19
4	1,52	2,57	2,14	3,66
8	1,52	2,57	2,04	5,41
16	1,52	2,57	2,97	5,64
32	1,52	2,57	2,08	3,74
64	1,52	2,57	2,36	5,91

Fonte: Elaborado pelo autor.

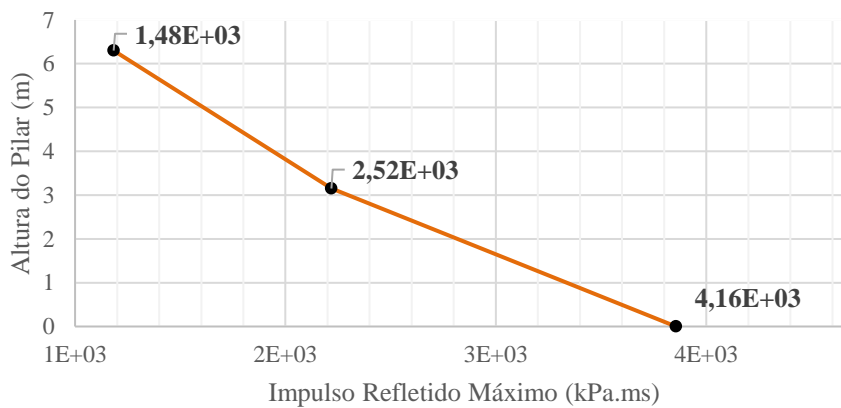
A seguir são apresentadas as distribuições de carregamento máximo ao longo da altura do pilar em termos de pressão refletida (Gráfico 14) e em termos de impulso refletido (Gráfico 15) para uma massa de explosivo de 64 kg de ANFO posicionada a 3,0 metros da base do pilar, configurando a hipótese crítica para esta análise.

Gráfico 14 – Pressão refletida ao longo do pilar para $W= 64$ kg de ANFO e $R= 3,0$ m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 15 – Impulso refletido ao longo do pilar para $W= 64$ kg de ANFO e $R= 3,0$ m



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Tabela 18 são apresentados os níveis de solicitação para a distância crítica mínima de 0,1875 metros para diversas quantidades de explosivo, sendo observado que para a situação extrema a pressão refletida pode chegar a cerca de 448.000 kPa, enquanto o impulso refletido pode chegar a valores da ordem de 70.000 kPa.

Tabela 18 – Níveis de Solicitação para R= 0,1875 e massa variável

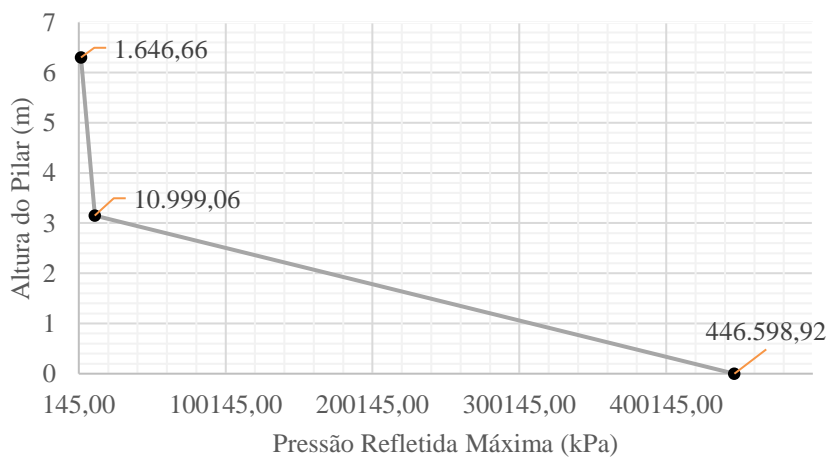
	Distância (m)			
	0,1875			
Massa de ANFO (kg)	1	2	4	8
Pressão Refletida (kPa)	1,84E+05	2,47E+05	3,31E+05	4,48E+05
Impulso Refletido (kPa.ms)	1,01E+04	1,93E+04	3,67E+04	7,07E+04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para obter-se a situação hipotética extrema com massa de explosivo máxima (64 kg) e distância mínima (0,1875 m) seria obtida uma distância escalar Z de 0,0503 m/kg^{1/3}, o que tornaria a determinação muito imprecisa, como já mencionado em seções anteriores. Desse modo para que fosse possível obter uma distância escalada que oferecesse acurácia razoável foi considerada a mesma massa de 64 kg, porém distante 0,375 m da face do pilar, posição correspondente a distância escalada de 0,10 m/kg^{1/3}.

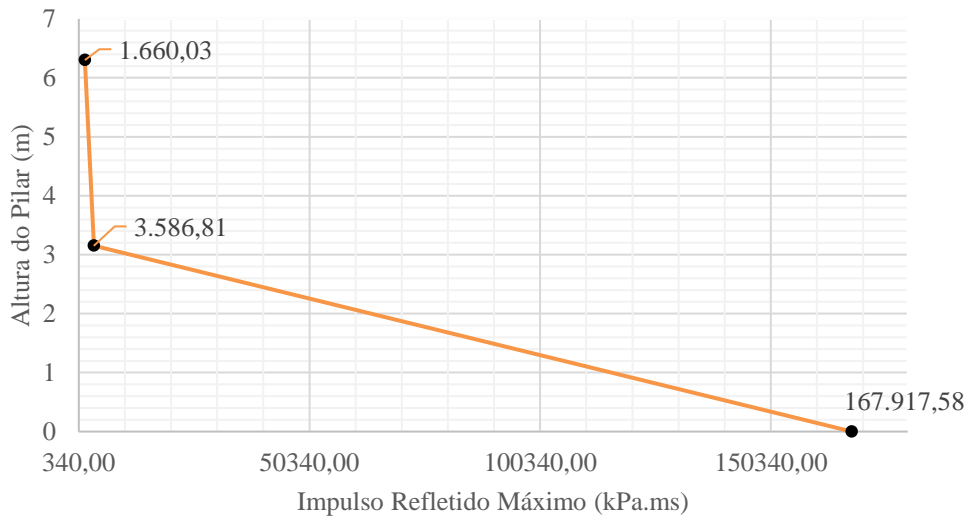
Nos gráficos 16 e 17 são apresentadas, respectivamente, as distribuições de pressão refletida e impulso refletido para uma massa de 64 kg de explosivo sólido do tipo ANFO com epicentro de detonação a aproximadamente 37,5 centímetros da superfície externa do pilar.

Gráfico 16 – Pressão refletida ao longo do pilar para W= 64kg de ANFO e R= 0,375 m



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 17 – Impulso refletido ao longo do pilar para W= 64kg de ANFO e R= 0,375 m



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Distância de segurança

5.2.1 Distância de segurança para seres humanos

A garantia de segurança para seres humanos em eventos explosivos visa assegurar que os mesmos não sejam alvo da descarga de pressão proveniente da detonação e muito menos dos projéteis formados por detritos no caminho da onda ou derivados dos escombros da estrutura danificada.

A partir das diversas quantidades de massa analisadas foram calculadas as distâncias de segurança (Tabela 19), valores de afastamento que asseguram que seres humanos não sejam atingidos por projéteis oriundos da explosão. Para a situação idealizada considerando a utilização de 8 kg de explosivo do tipo ANFO observou-se que é necessária uma distância radial a partir do epicentro de detonação de no mínimo 223,95 metros, enquanto que para a quantidade extrema considerada nessa análise, 64 kg, é necessário um afastamento duas vezes maior, de 447,04 metros.

Tabela 19 – Distâncias de segurança contra projéteis para diversas cargas de explosivo

Massa de ANFO (kg)	1	2	4	8	16	32	64
Massa de TNT (kg)	0,8	1,6	3,2	6,5	12,9	25,8	51,7
Distância de Segurança (m)	111,40	140,35	176,83	223,95	281,43	354,59	447,04

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Segundo Silva (2007) essas distâncias são adequadas para situações nas quais não existem barreiras físicas que garantam a absorção dessa descarga de energia e projéteis, podendo a mesma ser reduzida para situações com obstáculos que isolem a região da explosão das redondezas, não podendo essa distância ser inferior a 90 m.

Na figura 18 é apresentada a área de influência estimada para situação idealizada com 8 kg de explosivo sólido no nível dos pilares do viaduto comparada com a situação extrema de 64 kg de explosivo. É importante ressaltar que no presente trabalho foi considerada a hipótese com explosivos sob viaduto, o que faz com que as ondas se propaguem apenas no sentido da avenida do anel viário, como indicado pelas setas em vermelho na Figura 18, pois no sentido da BR-020 a propagação provavelmente seria contida pelos taludes laterais.

Figura 18 – Comparação da área de risco para as situações de 6 kg e 64 kg de ANFO



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos valores de sobrepressão propostos por Kinney & Graham (1985) atrelados a danos nos seres humanos, foram estimados os valores de distâncias associadas a esses prejuízos para a quantidade de massa idealizada para a situação real, 8 kg de ANFO, e para a situação extrema considerada neste trabalho, 64 kg de ANFO, estando os resultados obtidos apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Distâncias críticas relacionadas ao efeito da sobrepressão

Efeito	Distância Crítica (m)	
	W = 8 kg de ANFO	W = 64 kg de ANFO
Suportável (não causa danos)	20561,38	47324,04
Queda	32,70	65,27
Ruptura do Tímpano	10,52	21,00
Lesões nos Pulmões	4,33	8,65
Morte	2,40	4,80

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 20 é possível perceber que para a situação idealizada com 8 kg de ANFO, pessoas trafegando sob o viaduto a distâncias inferiores a 10,52 m do explosivo, correm sérios riscos de sofrerem algum dano, podendo ocorrer mortes caso essa distância seja inferior a 2,40 m. Para a situação extrema com 64 kg de ANFO, o raio de alcance que gera danos nos seres humanos duplica, e mortes podem acontecer para distâncias inferiores a 4,8 m.

Os valores apresentados na Tabela 20 funcionam como indicativos de risco, visto que em incidentes explosivos reais existem muitos fatores que podem alterar a intensidade da sobrepressão gerada por uma onda de choque. A distância que teoricamente garantiria a completa ausência de riscos sobre seres humanos é demasiadamente conservadora, visto que ela está associada a um valor de sobrepressão de aproximadamente 0,01 kPa, intensidade cerca de quarenta vezes menor que a referente a ação do vento que normalmente atua sobre pessoas e edificações em condições normais.

Silva (2007) afirma que seres humanos conseguem suportar mudanças bruscas de pressão associadas a sobrepressões de até 7 kPa, o que indica que para 8 kg de ANFO seria seguro para seres humanos manter uma distância de no mínimo 33,48 m. No tocante a situação máxima analisada neste trabalho, 64 kg de ANFO, verifica-se que seria prudente manter um afastamento de no mínimo 66,83 m, o dobro da distância requerida para uma massa oito vezes menor.

É importante destacar que o valor de sobrepressão equivalente a 7,0 kPa admitido por Silva (2007) foi obtido a partir do nível de dano imediatamente superior ao intervalo de sobrepressões associado a possibilidade de queda proposto por Kinney & Graham (1985). Essa distância é um indicativo apenas para danos ocasionados por diferenciais de pressão gerados por uma detonação, não garantindo segurança quanto ao voo de estilhaços do explosivo ou fragmentos da estrutura danificada.

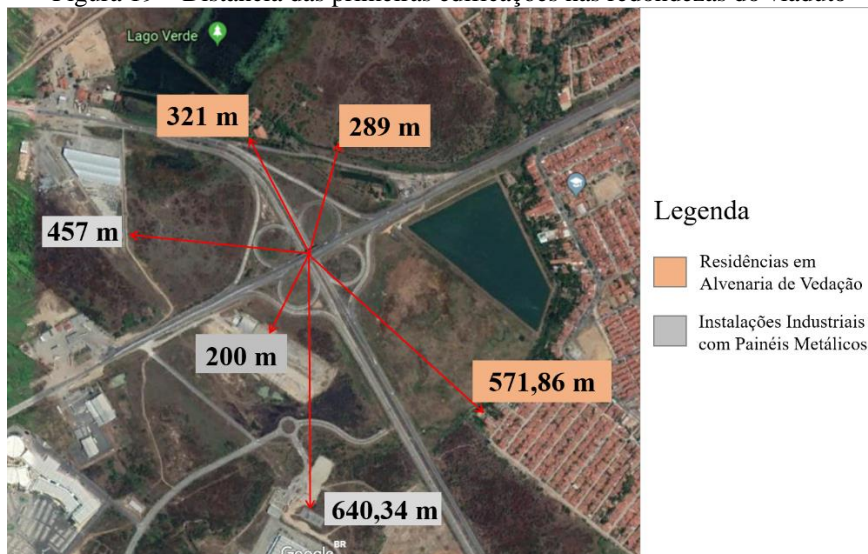
5.2.2 Distância de segurança para edificações

Como apresentado em seções anteriores, eventos explosivos geram solicitações bastante significativas nas estruturas. Desse modo, passada a análise dessas solicitações no viaduto analisado, é importante analisar o impacto desses fenômenos nas edificações que circundam a estrutura estudada neste trabalho.

Na Figura 19 é apresentado um mapa que indica a que distâncias estão situadas as edificações mais próximas, levando em consideração as estruturas mais propícias a sofrerem

danos com base no critério de maior distanciamento dos taludes laterais, que teoricamente bloqueariam a propagação da onda.

Figura 19 – Distância das primeiras edificações nas redondezas do viaduto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 21 são apresentadas as distâncias críticas a partir das quais acontecem danos em edificações, sendo possível perceber que para a situação idealizada com 8 kg de ANFO não aconteceriam danos em nenhuma das estruturas do entorno indicadas na Figura 19. A partir dos valores de distância crítica apresentados na Tabela 21 foi realizado o cálculo inverso a partir da planilha eletrônica apresentada em 4.2.2 e foram obtidos valores de massa de explosivo que seriam danosos para os dois tipos de estruturas identificados nas redondezas, as residenciais e as industriais.

Foi constatado, portanto, que seriam necessários cerca de 2.250,00 kg de ANFO para que a edificação com painéis metálicos mais próxima, a 200 m do viaduto, sofresse algum dano em sua estrutura. No tangente a primeira edificação residencial formada por alvenarias de vedação, distante 289 m do centro viaduto, foi observado que a mesma só sofreria algum dano em suas paredes caso a massa do explosivo utilizada fosse de aproximadamente 19.375,00 kg de ANFO, ambos valores consideravelmente elevados e fora da realidade de eventos explosivos que não contam com carros-bomba e demais infraestruturas de detonação sofisticadas.

Tabela 21 – Distâncias críticas associadas aos danos em edificações

Dano	Distância Crítica (m)	
	W= 8 kg de ANFO	W= 64 kg de ANFO
Quebra de vidros	128,84	257,19
Danos mínimos em construções	53,65	107,10
Danos em painéis metálicos	31,24	62,37
Falhas em painéis de madeira (Construções)	31,24	62,37
Falhas em paredes de tijolos	21,77	43,46
Danos em estruturas metálicas	11,72	23,40
Danos em estruturas de concreto armado	9,57	19,11
Provável destruição da maioria das construções	6,45	12,88

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 21 mostra ainda que para uma massa de 8 kg de ANFO estruturas de concreto a distâncias inferiores a 9,57 m sofreriam danos, o que não foi evidenciado na situação real visto que o único elemento danificado foi o pilar central P08 (Figura 20), dando indícios que a massa real utilizada foi bem menor. A partir da hipótese com explosivo posicionado no alinhamento dos pilares centrais a uma distância de 0,1875 m do pilar mais próximo e conseqüentemente a 5,81 metros do outro pilar central foi possível obter a massa aproximada de explosivo.

Com base em um valor de sobrepressão de no mínimo 41,37 kPa, valor referente a danos em estruturas de concreto segundo Kinney & Graham (1985), foi efetuado o cálculo inverso a partir da planilha apresentada em 4.2.2 e foi obtido um valor de massa de aproximadamente 1,82 kg de ANFO, equivalente a 1,45 kg de TNT, valor quatro vezes menor que idealizado neste trabalho.

Figura 20 – Comparação de dano entre os pilares P05 e P08



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Dimensionamento

5.3.1 Limitações e premissas adotadas

Com base nas hipóteses críticas estabelecidas anteriormente, foi utilizado o dimensionamento proposto pelo National Cooperative Highway Research Program (2010) para pilares em concreto armado de pontes e viadutos tanto para as massas de 8 kg e 64 kg de ANFO, quanto para a massa obtida pelo cálculo inverso apresentado em 5.2.2 de 1,81 kg de ANFO. Este dimensionamento propõe uma solução em termos de armadura transversal para o pilar a partir da distância escalada Z , o que faz com que a peça seja dimensionada não diretamente pela solicitação, mas sim pela quantidade de explosivo e distância deste ao elemento estrutural.

O método utilizado, contudo, possui uma limitação em termos de distância escalada Z , de modo que o mesmo só é recomendado para valores de Z superiores a $0,20 \text{ m/kg}^{1/3}$. Isso faz com que as massas utilizadas nessa análise precisem ser posicionadas a distâncias maiores do que a distância mínima de $0,1875 \text{ m}$ adotada na seção 6.3 o que significa que a validade das soluções apresentadas a seguir só é garantida caso existam barreiras físicas que forcem a ocorrência das distâncias apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 – Distâncias mínimas requeridas pelo método entre o explosivo e o pilar

W (kg de ANFO)	R (m)	Z ($\text{m/kg}^{1/3}$)
1,8	0,23	0,2
8	0,37	0,2
64	0,75	0,2

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Essas barreiras podem ser produzidas na forma de paredes envoltórias de concreto, alvenaria, chapas metálicas ou na forma de qualquer outro tipo de obstáculo arquitetônico disposto em torno do pilar. É importante ressaltar que essas barreiras não possuem função estrutural, seu único objetivo é impor uma maior distância entre o explosivo e a face lateral do pilar, visto que essa é a forma mais eficaz de minorar os danos de uma explosão sobre uma estrutura.

5.3.2 Estratégias de dimensionamento

O guia de dimensionamento proposto pela publicação *Blast-Resistant Highway Bridges: Design and Detailing Guidelines* (2010) permite realizar uma verificação nas taxas de

armadura transversal existentes na estrutura de modo a constatar se a taxa de aço empregada atende as taxas mínimas referentes a explosões e além disso propõe soluções a partir da alteração de parâmetros do projeto estrutural.

A partir da análise da planta de detalhamento das armaduras transversais referente aos pilares, foi possível observar que os doze pilares possuem estribos de 8 mm de diâmetro espaçados a cada 200 mm, com ganchos de 175 mm de comprimento em cada extremidade do estribo. Na Tabela 23 são apresentadas as informações sobre as armaduras transversais existentes nos pilares do viaduto para os três cenários explosivos apresentados na Tabela 21, e a respectiva verificação de armaduras.

Tabela 23 – Verificação da armadura transversal para as massas de explosivo analisadas

Variáveis da Explosão			Armadura Transversal Existente			Verificação do Projeto
W (kg de ANFO)	R (m)	Z (m/kg ^{1/3})	Bitola (mm)	Espaçamento (mm)	Comprimento do Gancho (mm)	
1,8	0,23	0,2	8	200	175	Armadura Insuficiente
8	0,37	0,2	8	200	175	Armadura Insuficiente
64	0,75	0,2	8	200	175	Armadura Insuficiente

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado a armadura transversal existente não é adequada para receber solicitações explosivas provenientes de nenhuma das situações analisadas, desse modo foram testados inicialmente dois tipos de alterações, a primeira nas propriedades do aço e a segunda na quantidade de armaduras transversais.

Foi percebido que caso fosse feita uma alteração apenas nas propriedades do aço empregado seria necessário que este possuísse uma tensão de escoamento de aproximadamente 3300 MPa, valor 6,6 vezes maior que a tensão oferecida pelo Aço CA-50, empregado na ampla maioria das estruturas em concreto armado, e inclusive no viaduto em questão. É sabido que aços com resistências superiores a 600 MPa não devem ser utilizados em concreto armado, pois esse tipo de estrutura exige o comportamento conjunto entre o aço e o concreto o que não é conseguido para aços de alta resistência.

Isso porquê, o patamar de escoamento do aço só é atingido para níveis de deformação superiores aos limites máximos estabelecidos para o concreto, de 3,5 mm/m na compressão e 10 mm/m na tração. Assim, percebe-se que essa não seria uma estratégia inteligente, visto que não seria possível aproveitar toda capacidade destes aços, o que tornaria essa decisão antieconômica.

Em seguida foi mantida a tensão de escoamento original de 500 MPa e foram alteradas as taxas de armaduras existentes a fim de obter atendimento aos critérios de armadura transversal para explosões a partir de duas soluções: Na primeira foi aumentada a bitola do estribo e mantido o espaçamento original, enquanto na segunda foram implementadas alterações nos dois parâmetros simultaneamente.

Na Tabela 24 são apresentadas as duas soluções encontradas em termos de bitolas, espaçamento, comprimento do gancho necessário e o respectivo ângulo de dobramento. Estas soluções garantem a resistência ao esforço cortante oriundo da solicitação explosiva, aumentam no grau de confinamento do concreto, além de diminuir a probabilidade de ocorrência da abertura dos estribos.

Tabela 24 – Soluções propostas com base no aumento da taxa de armadura transversal

	Bitola (mm)	Espaçamento (mm)	Ângulo do Gancho (°)	Comprimento do Gancho (mm)
Solução 01	25	200	135	500
Solução 02	16	100	135	320

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.3 Verificação de viabilidade técnica

O critério adotado para a verificação da viabilidade técnica dessas soluções foi a concordância com os critérios exigidos pela NBR 6118-2014 para elementos de pilares, seção 18.4 e demais elementos lineares armados para solicitações cisalhantes significativas, seção 18.3. Como ambas as soluções apresentadas na Tabela 24 aumentam a bitola do estribo, se fez necessária uma verificação a respeito dos novos espaçamentos existentes entre as barras longitudinais, além de claro, acerca da armadura transversal proposta. As exigências da referida norma para os valores de projeto do viaduto em questão são apresentadas na Tabela 25.

Tabela 25 – Exigências da NBR 6118-2014 para armaduras transversais

Espaçamento Mínimo entre Barras Longitudinais (mm)	20
Bitola mínima do Estribo (mm)	5
Bitola máxima do Estribo (mm)	100
Espaçamento Máximo entre Estribos (mm)	200

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 26 é apresentada, portanto, a verificação das soluções propostas com base nos critérios da NBR 6118-2014, sendo possível perceber que ambas as soluções são viáveis tecnicamente sob a ótica da norma vigente brasileira.

Tabela 26 – Verificação de armaduras perante a NBR 6118-2014.

	Bitola do Estribo (mm)	Espaçamento entre Estribos (mm)	Espaçamento entre Barras Longitudinais (mm)	Verificação NBR 6118-2014
Solução 01	25	200	46,93	Adequado
Solução 02	16	100	48,41	Adequado

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.4 Verificação de viabilidade financeira

A partir das duas soluções apresentadas na Tabela 24 foi verificado o impacto dessas alterações de armadura nos custos de materiais e serviços do viaduto. Desse modo, foram calculados os custos referentes exclusivamente as armaduras transversais utilizadas nos pilares a partir dos quadro-resumo presentes nas plantas do projeto e com base nos custos informados pela tabela da SEINFRA para cada bitola utilizada, conforme apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 – Custos das armaduras referentes as soluções propostas

Situação	Bitola (mm)	Quantidade de Estribos	Comprimento Unitário dos Estribos (cm)	Massa Total (kg)	Custo (R\$)	Aumento do Custo (vezes)
Original	8,0	300	324,00	388,80	R\$3.207,60	-
Solução 01	25,0	300	389,03	4493,26	R\$40.843,75	12,7
Solução 02	16,0	588	353,03	3279,76	R\$29.813,04	9,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 27 é possível perceber que o aumento na quantidade de estribos proposto pela solução 02 impacta menos no custo que o aumento da bitola com mesmo número de estribos indicado pela solução 01. O aumento da bitola da armadura aumenta a massa nominal da barra, além disso o comprimento necessário para o gancho torna-se maior, fazendo com que a solução 01 seja 12,7 vezes mais onerosa que a situação original de projeto. Desse modo, percebe-se que a solução mais viável financeiramente é a proposta pela solução 02, pois ela oferece um aumento no custo inferior, cerca de 9,3 vezes maior que a situação do projeto.

Mesmo a solução 02 sendo a mais viável economicamente, um aumento de quase dez vezes no custo de determinado material em um projeto pode inviabilizar sua execução.

Contudo, as comparações apresentadas na Tabela 27 foram feitas a partir de uma análise restrita ao custo referente as armaduras transversais dos elementos de pilares, uma fração do custo global da obra.

Em vista disso, foi feita uma aferição do preço global da estrutura em termos de materiais e serviços, a partir de uma regra da prática de projetos de viadutos que estima um custo de R\$ 4.000,00 por metro quadrado do tabuleiro. Desse modo foi estimado que o viaduto analisado no presente trabalho custou aproximadamente R\$7.782.720,00 e com esse valor foi possível verificar o impacto das soluções propostas anteriormente a nível de custo total da obra, estando os resultados obtidos apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Custos das soluções propostas em relação ao custo global da obra

Situação	Custo Total da Obra	Aumento em Relação ao Custo Original
Original	R\$7.782.720,00	-
Solução 01	R\$7.820.356,15	0,48%
Solução 02	R\$7.809.325,44	0,34%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na Tabela 28 é possível perceber que a nível global ambas as soluções representam acréscimos muito pequenos no custo total da obra, fazendo com que seja notória a viabilidade de execução das duas propostas, porém com pequena vantagem na adoção da solução 02. Por outro lado, vale ressaltar que a implementação eficaz dessas propostas está atrelada a simultânea instalação de barreiras físicas que garantam o distanciamento do explosivo da face do elemento estrutural. Essa exigência faz com que advenham custos adicionais referentes a instalação dessas barreiras, fazendo com que o impacto dessas soluções seja maior do que o calculado considerando somente o incremento nas armaduras, a depender do tipo de material adotado para a construção destes obstáculos.

5.3.5 Considerações sobre o método adotado

O método proposto pelo National Cooperative Highway Research Program (2010) recomenda ainda que seja realizada uma verificação da ductilidade e da rotação máxima que ocorre ao longo do elemento. No presente trabalho essas análises não foram efetuadas pois estes cálculos são normalmente realizados com auxílio de planilhas pertencentes ao exército americano, na qual o acesso só é permitido após uma série de verificações de segurança, que inviabilizaram o seu uso nesta pesquisa.

Quando são obtidos valores de ductilidade que extrapolam os limites máximos, é recomendado que a taxa de armadura longitudinal existente no pilar seja aumentada, sem que para isso seja necessário alterar a solução de armadura transversal como as propostas na Tabela 24. Por outro lado, quando a verificação de rotação não é atendida se faz necessário efetuar um aumento da seção do pilar, o que faz com que a taxa de armadura transversal existente assumira um valor inferior ao calculado inicialmente, invalidando as soluções de armadura transversal propostas na Tabela 24.

É válido ressaltar, contudo, que para todas as situações críticas estimadas, os pilares adjacentes possuem condições para resistir a essas solicitações com base nas armaduras transversais propostas nas soluções 01 e 02. Isso porque ao se aproximar um explosivo da face de um pilar, a distância da carga até o pilar adjacente mais próximo aumenta, gerando um valor de distância escalada Z maior, que por sua vez exige uma quantidade de armadura inferior a proposta pelas soluções 01 e 02, além de dispensar as verificações referentes à ductilidade e rotação.

É importante destacar ainda, que esse método de dimensionamento é feito de maneira indireta em função de intervalos de distância escalada Z , e não em termos de pressão ou impulso refletido referentes ao valor exato de Z . Isso faz com que seja obtida a mesma solução para pontos com níveis de solicitação até 7 vezes maiores que outros, pois pertencem ao mesmo intervalo de distância escalada.

Mesmo não tendo sido utilizados diretamente, os valores de pressão e impulso refletidos obtidos a partir seção 6.1, tem sua utilidade na etapa final do método de dimensionamento. Isso porque na análise de um grau de liberdade proposta pelo método, para a verificação de ductilidade e rotação, é feita uma equivalência do pilar em um sistema massa-mola, sendo necessário portanto o conhecimento da intensidade desse carregamento explosivo na forma de pressão e impulso.

Ora correndo contra e ora correndo a favor da segurança, percebe-se que esse método apresenta muitas limitações, contudo, o mesmo oferece uma razoável noção de ordem de grandeza da quantidade de armadura transversal necessária para suportar solicitações explosivas. Sua simplificada e rápida forma de diagnóstico atrelada ao grande nível de incerteza associado a eventos explosivos, corrobora para que esse método funcione como um indicativo de segurança a explosão, podendo ser útil em situações nas quais não se dispõe de recursos sofisticados para o dimensionamento.

Além disso, esse método é provavelmente o único guia existente para cálculo de elementos esbeltos como pilares de pontes e viadutos de maneira simplificada, que pode

fornecer bons resultados, visto que o mesmo foi produzido por um consagrado órgão americano e foi fundamentado por diversas simulações numéricas e experimentais. Caso seja avaliado que uma dada estrutura de viaduto ou ponte possui risco de ser alvo de atentados criminosos como explosões, as planilhas do exército americano podem ser solicitadas com antecedência e a análise completa pode ser realizada de maneira gratuita em um curto intervalo de tempo.

5.3.6 Recomendações gerais de dimensionamento

De modo geral existem na literatura recomendações de dimensionamento que aumentam as chances de sobrevivência de um elemento estrutural sujeito à ação explosiva, por meio de soluções relacionadas a arquitetura geometria, propriedade dos materiais

Winget *et. al.* (2005) propõe medidas de segurança a partir de vigilância policial e monitoramento remoto por câmeras de segurança, em caso de pontes e viadutos com elevado grau de importância, inseridas em regiões propensas à eventos terroristas. O projeto paisagístico também pode contribuir para que as distâncias dos explosivos aos pilares sejam reduzidas a partir do uso de barreiras 360° produzidas por cercas e vegetações em torno dos pilares. Em termos de reforço estrutural essa publicação propõe medidas como aumento da redundância estrutural a partir do aumento da quantidade de pilares e emprego de dispositivos de restrição de movimento das conexões entre vigas e pilares.

Em *Blast-Resistant Highway Bridges: Design and Detailing Guidelines* (2010) são feitas recomendações acerca da geometria da peça, sendo recomendado o uso de pilares de seção circular em detrimento aos de seção quadrada. Essa orientação é baseada no fato de que a superfície curva gera ângulos de incidência maiores que zero, como ocorrem em seções quadradas, fazendo com que as solicitações refletidas sejam menos intensas, e se dissipem com maior facilidade. Essa mesma publicação recomenda ainda, que pilares dimensionados para suportar carregamentos explosivos devem possuir diâmetro de no mínimo 30 polegadas, o equivalente a 76,2 cm.

São feitas ainda algumas recomendações quanto à presença de emendas nas barras longitudinais dos pilares, visto que estas configuram regiões susceptíveis a falhas localizadas em eventos explosivos. Desse modo, recomenda-se que o comprimento dessas junções de barras se prolongue até uma distância de no mínimo 12 pés, cerca de 3,65 m acima do solo.

Em termos de armadura transversal é recomendado sempre que possível o uso de estribos do tipo espiral, visto que estes aumentam o grau de confinamento do núcleo de concreto do pilar, reduzindo as chances de perda de área de seção transversal. No tangente à camada de

cobrimento do concreto, essa publicação recomenda o uso de camadas de sacrifício, de modo a aumentar a sobrevida do cobrimento original frente as descargas explosivas.

O relatório TM 5-1300 (1990) do exército americano faz recomendações acerca das características dos materiais a serem adotados em estruturas resistentes à explosão. Recomenda-se o uso aços da série 60, na nomenclatura americana, cuja tensão de escoamento equivale a 420 MPa, resistência inferior ao aço CA-50, comumente utilizado no Brasil, com resistência de 500 MPa. No tocante ao concreto recomenda-se aqueles com resistência à compressão superior a 4000 psi, correspondente a aproximadamente 27,6 MPa.

No viaduto analisado neste trabalho foi utilizado um aço do tipo CA-50, que possui tensão de escoamento adequada perante esse guia de dimensionamento, por outro lado, o concreto utilizado nos pilares possui resistência à compressão de 20 MPa, valor inferior ao recomendado pelo TM 5-1300 (1990).

A falha de um elemento estrutural sujeito a ação explosiva é majoritariamente controlada pela quantidade de armadura transversal, dado o caráter cisalhante dessa solicitação. Contudo, o outro mecanismo de falha está associado à ruptura do cobrimento do concreto por tração, durante a ocorrência da reflexão da onda sobre o elemento.

Desse modo, recomenda-se ainda o emprego de fibras poliméricas no concreto, visto que estas aumentam a resistência a grandes impactos e conferem aumento de resistência à tração durante a reflexão da onda. Esse incremento de resistência à tração aumenta a probabilidade de sobrevivência da camada de cobrimento e conseqüentemente do núcleo de concreto confinado, contribuindo para a conservação da seção transversal e evitando a flambagem das armaduras longitudinais.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

A partir da análise geral foi possível constatar que as situações extremas de solicitação tanto nos pilares centrais quanto nos de canto acontecem quando os explosivos são posicionados nos pontos médios dos vãos de 3,0 metros gerando pressões e impulsos refletidos iguais nas bases dos pilares para as duas hipóteses críticas, sendo estes valores estimados em cerca de 2008,45 kPa e 905,20 kPa.ms respectivamente.

Mesmo sabendo que os níveis de solicitação nos pilares são iguais para as duas simulações mais críticas, como os dois tipos de pilares encontram-se em níveis do terreno diferentes, a magnitude da solicitação gerada na superestrutura para a situação com explosivos

colocados entre os pilares de canto pode ser até 5,5 vezes maior que o valor obtido para a mesma quantidade de explosivo colocado entre os pilares centrais.

Além disso, Segundo Winget *et. al.* (2005) as regiões onde os pilares de canto estão posicionados contribuem ainda mais para o aumento do dano na estrutura de modo geral, visto que a própria geometria inclinada dos taludes atua como elemento amplificador das ondas de choque, fazendo com que os valores de solicitações apresentados nos parágrafos anteriores possam se tornar ainda mais elevados devido as múltiplas reflexões sucessivas que podem surgir nessa área.

Posteriormente a essas constatações buscou se tornar as hipóteses ainda mais críticas através da variação de parâmetros como distância de detonação do explosivo e massa do mesmo, sendo possível observar que a junção das situações críticas de massa e distância geraram uma pressão refletida da ordem de 400 mil kPa e impulsos da ordem de 160 mil de kPa.ms. Foi mostrado ainda que caso seja viável a execução de barreiras físicas no perímetro dos pilares a redução de solicitação pode chegar até 32,93 vezes em termos de impulso refletido, para a situação na qual seja criada uma barreira disposta a 1,30 m da face do pilar, podendo essa redução ser tão maior quanto maior seja esse afastamento imposto.

Quanto a comparação entre as determinações com e sem a consideração do ângulo de incidência foi possível perceber que não existe um domínio de valores de massa ou de distância que indique predominância de uma outra determinação, sendo necessário portanto, efetuar as duas determinações e se utilizar o maior valor obtido entre as duas. Observou-se ainda que para menores distâncias a diferença percentual entre as duas determinações alcança valores de até 154,21 %, enquanto que para massas menores essa diferença tende a reduzir substancialmente contribuindo para a quase equivalência entre as duas determinações.

Foi verificado ainda que a distância de segurança mínima para seres humanos contra fragmentos da explosão, para a quantidade de explosivo idealizada, é de aproximadamente 224 m. No tangente a riscos oriundos da pressão gerada sobre o homem, constatou-se que para 8 kg de ANFO, pessoas a distancias inferiores que 2,40 m correm risco de vida, sendo esse valor duplicado para a massa de 64 kg de ANFO. Para as edificações presentes nas redondezas, foi verificado que as mesmas estão dispostas a distâncias razoáveis, o que assegura as suas integridades em eventos explosivos improvisados, sendo necessárias cargas muito maiores que as utilizadas convencionalmente para que tanto as estruturas metálicas quanto as em alvenaria fossem danificadas.

Uma observação pertinente à seção de distância de segurança, é que a partir do cálculo inverso, partindo da solicitação e se chegando na massa de explosivo, foi possível

perceber que existe uma grande possibilidade de que a massa de fato utilizada no atentado ter sido cerca de 4 vezes menor que a estimada por este trabalho inicialmente. Isso é positivo, visto que o método de obtenção de parâmetros explosivos utilizados neste trabalho foi fundamentado para uma situação idealizada a céu aberto, o que não acontece de fato na situação em questão, dada a presença do tabuleiro do viaduto.

Espera-se que a presença do tabuleiro amplifique a magnitude das ondas incidentes, o que conseqüentemente gera solicitações maiores nos elementos estruturais, incluindo os pilares. Contudo, estudar o impacto da presença do tabuleiro na reflexão de ondas nos pilares só é possível com o auxílio de softwares de modelagem numérica mais sofisticados. Para Biggs (1964) o emprego de métodos muito refinados de predição e dimensionamento para explosões, pode ser um desperdício de tempo e dinheiro, dado o alto grau de incerteza associado aos parâmetros de entrada nesses softwares, como por exemplo o tipo e a massa do explosivo utilizada.

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho pode se concluir que para as condições de projeto encontradas, a magnitude das cargas explosivas utilizadas em incidentes de caráter improvisado, corrobora para que as medidas preventivas aqui propostas funcionem à luz da viabilidade técnica e financeira, visto que as medidas sugeridas não representam aumentos significativos no custo global da obra.

Contudo, para a execução de medidas preventivas de combate a explosões de maior magnitude, como as verificadas em países com histórico de eventos explosivos, é necessária a realização de um estudo de risco de ocorrência levando em consideração aspectos como frequência de episódios nos últimos anos, regiões com maiores taxas de incidências e até mesmo a conjuntura política local. A partir desse estudo é possível estimar a probabilidade de ocorrências futuras e assim avaliar o custo-benefício dessas implementações.

Vale salientar, que ocorrências que utilizam-se de carros-bomba, podem conter valores de massa de explosivo até 8 vezes superiores a máxima adotada neste trabalho, o que faz perceber que o nível de solicitação gerado sobre uma estrutura pode chegar a valores desconhecidos, exigindo estruturas ainda mais robustas, e conseqüentemente com custos mais significativos.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se a execução de uma modelagem de situação explosiva em um software de elementos finitos para fins de comparação com os resultados obtidos neste trabalho, estudando o efeito da presença do tabuleiro e dos Taludes laterais nas reflexões de onda. Poderia ainda ser feito um estudo de otimização das barreiras

físicas mencionadas neste trabalho, para que elas funcionassem não apenas como uma imposição de distância, mas como um elemento resistente a solicitações explosivas.

REFERÊNCIAS

ABDELALIM, O. **Blast hazard mitigation through vented suppressive shields**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Carleton University, Ottawa, 2013.

ANIL K. AGRAWAL et al. **High precision analysis of blast Events on highway bridges**. New York: University Transportation Research Center City College of New York, 2009.

BAKER et al. **Explosion hazards and evaluation – fundamental studies in engineering 5**. Amsterdam-Oxford: Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.

CASAGRANDE, A. S. **Estudo de Cargas Impulsivas com Ênfase em Explosões: Estratégias de Análises Utilizando Métodos Numéricos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY OF THE AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEER. **Chemical process quantitative risk analysis**. New York, 2000.

DEPARTMENTS OF THE ARMY, THE NAVY, AND THE AIR FORCE. **Structures to resist the effects of accidental explosions**, Headquarters departments of the Army, the Navy and the Air Force. Washington, 1990.

EUROPEAN COMMISSION. Joint Research Centre. Institute for the Protection and Security of the Citizen. **Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components**. Varese, 2013.

GLASSTONE, S., DOLAN, P. J. The effects of nuclear weapons, 4. ed. Washington: United States Department of Defense, 1977. GRAHAM, R. A. **Shock wave and high-pressure phenomena**. Berlin, 2010.

IME TNT Equivalence Calculator. Institute of Makers of Explosives. Disponível em: <https://www.ime.org/content/tnt_calculator>. Acesso em: 12 set. 2019.

KINGERY, C. N.; BULMASH, G. **Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst**. Report ARBRL-TR-02555, US Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen, 1984.

KINNEY, G. F., GRAHAM, K. J. **Explosive shocks in air**, 2. ed. New York: Springer Science+Business Media, 1985.

MAYS, G. C., SMITH, P. D. **Blast effects on buildings**. London: Thomas Telford, 1995.

NETO, M. L. C. **Um estudo do fenômeno explosão e das ondas de choque utilizando a fluidodinâmica computacional**. 2015. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2015.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. Transportation Research Board. **Blast-Resistant Highway Bridges: Design and Detailing Guidelines**. Washington, 2010.

QURESHI et al. **Structural Analysis of Blast Resistant Buildings**. International research journal of engineering and technology (IRJET), Bengaluru, v. 04, n. 08, p. 1310-1316, ago. 2017.

RAMAJEYATHILAGAM et al. **Non-linear transient dynamic response of rectangular plates under shock loading**. International Journal of Impact Engineering, Pergamon v. 24, p. 999-1015, 2000.

SHIN, J.; CORMIE, D.; WHITTAKER, A.; WILLFORD, M. **Design charts and polynomials for air-blast parameters**. In: International Conference on Protective Structures (ICPS3), 3., 2015, Newcastle. Artigo, M.G. Stewart & M.D. Netherton, 2015. p. 1-8.

SILVA. W. C. L. **BLAST - Efeitos da Onda de Choque no Ser Humano e nas Estruturas**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2007.

SMITH, P. D., HETHERINGTON, J. G. **Blast and ballistic loading of structures**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1994.

SOARES, W. A. **Análise dinâmica não-linear de lajes em concreto armado sob ação de cargas impulsivas provenientes de explosão**. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1991.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, NAVAL FACILITIES ENGINEERING COMMAND, AIR FORCE CIVIL ENGINEER SUPPORT AGENCY. Unified Facilities Criteria. **UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions**. Virginia, 2008.

WINGET et al. **Analysis and Design of Critical Bridges Subjected to Blast Loads**. Journal of Structural Engineering, v. 131, p. 1243-1255, ago.2005.

APÊNDICE A – EQUAÇÕES E TABELAS GERADAS

Tabela 29 – Equações para sobrepressão (Pso)

Z (m/kg ^{1/3})		Pso (kPa)	R ²
0,05	0,28	$P_{so} = 2716,4 * Z^{(-1,125)}$	0,99
0,28	2,37	$P_{so} = 1242,1 * Z^{(-2,129)}$	0,99
2,37	40	$P_{so} = 421,02 * Z^{(-1,419)}$	0,99

Tabela 30 – Equações para impulso de sobrepressão (is)

Z (m/kg ^{1/3})		is (kPa.ms)	R ²
0,05	0,31	$is = (25,766 * Z^{(-1,731)}) * W^{1/3}$	0,99
0,32	0,68	$is = (195,89 * Z^{(0,2185)}) * W^{1/3}$	1
0,69	0,92	$is = (251,63 * Z^{(1,0381)}) * W^{1/3}$	1
0,93	40	$is = (246,99 * Z^{(-0,925)}) * W^{1/3}$	0,99

Tabela 31 – Equações para pressão refletida (Pr)

Z (m/kg ^{1/3})		Pr (kPa)	R ²
0,05	0,23	$Pr = 23731 * Z^{(-1,279)}$	0,99
0,24	1,33	$Pr = 7712,4 * Z^{(-2,227)}$	0,99
1,34	40	$Pr = 1114,6 * Z^{(-1,509)}$	0,99

Tabela 32 – Equações para impulso refletido (ir)

Z (m/kg ^{1/3})		ir (kPa.ms)	R ²
0,05	0,53	$ir = (628,01 * Z^{(-1,785)}) * W^{1/3}$	0,99
0,54	40	$ir = (806,46 * Z^{(-1,12)}) * W^{1/3}$	0,99

Tabela 33 – Equações para tempo de alcance (ta)

Z (m/kg ^{1/3})		ta (ms)	R ²
0,05	40	$ta = (0,522 * Z^{(1,5317)}) * W^{1/3}$	0,99

Tabela 34 – Equações para tempo de sobrepressão (t₀)

Z (m/kg ^{1/3})		t ₀ (ms)	R ²
0,17	1,05	$t_0 = (1,5787*Z^3 + 0,6996*Z^2 - 1,0209*Z + 0,414)*W^{1/3}$	0,99
1,06	1,62	$t_0 = (33,539*Z^4 - 184,12*Z^3 + 375,28*Z^2 - 336,66*Z + 114,35)*W^{1/3}$	1
1,63	9,69	$t_0 = (0,0051*Z^3 - 0,135*Z^2 + 1,3239*Z - 0,1254)*W^{1/3}$	0,99
9,7	40	$t_0 = (-0,0021*Z^2 + 0,185*Z + 3,0519)*W^{1/3}$	0,99

Tabela 35 – Equações para velocidade da onda de choque (U)

Z (m/kg ^{1/3})		U (m/ms)	R ²
0,05	1,63	$U = 1,1758*Z^{-0,703}$	0,98
1,64	9,3	$U = 0,0007*Z^4 - 0,0167*Z^3 + 0,153*Z^2 - 0,6241*Z + 1,3623$	0,99
9,4	40	$U = 0,00003*Z^2 - 0,0023*Z + 0,3816$	0,99

Tabela 36 – Principais parâmetros obtidos para todas as simulações da hipótese geral

PARÂMETROS	S01		S02		S03		S04		S05		S06	
	CANTO	CENTRO	CANTO	CENTRO	CANTO	CENTRO	CANTO	CENTRO	CANTO	CENTRO	CANTO	CENTRO
PRESSÃO TOTAL MÁXIMA MÉDIA NOS PILARES (kPa)	9,23	701,11	8,90	979,12	19,96	27,17	17,19	22,89	19,61	26,68	979,12	8,95
PRESSÃO DINÂMICA MÁXIMA MÉDIA NOS PILARES (kPa)	0,33	349,72	0,31	527,59	1,44	2,55	1,15	2,03	1,40	2,51	527,59	0,32
PRESSÃO TOTAL MÁXIMA (kPa)	9,67	701,11	9,69	979,12	22,65	32,38	23,80	35,16	23,80	35,16	979,12	9,75
PRESSÃO DINÂMICA MÁXIMA NOS PILARES (kPa)	0,36	349,72	0,36	527,59	1,79	3,42	1,96	3,95	1,96	3,95	527,59	0,37
VELOCIDADE MÉDIA MÁXIMA NOS PILARES (m/ms)	0,35	0,64	0,35	0,84	0,43	0,47	0,43	0,40	0,49	0,42	0,84	0,35
VELOCIDADE MÁXIMA (m/ms)	0,35	0,64	0,35	0,84	0,50	0,51	0,54	0,45	0,56	0,46	0,84	0,35
PRESSÃO REFLETIDA MÁXIMA MÉDIA NOS PILARES (kPa)	18,45	1371,34	17,76	1914,30	40,25	54,48	34,60	45,87	39,53	53,49	1914,30	17,87
PRESSÃO REFLETIDA MÁXIMA (kPa)	19,35	1371,34	19,40	1914,30	45,64	64,71	47,93	70,05	47,93	70,05	1914,30	19,51
IMPULSO REFLETIDO MÁXIMO MÉDIO NOS PILARES (kPa.ms)	71,65	774,11	69,59	883,27	127,64	159,54	113,20	138,64	125,77	157,02	883,27	69,92
IMPULSO REFLETIDO MÁXIMO (kPa.ms)	74,23	774,11	74,38	883,27	140,36	181,88	145,55	192,91	145,55	192,91	883,27	74,70
TEMPO DE SOBREPRESSÃO MÁXIMO (ms)	10,13	3,47	10,53	3,83	8,73	8,40	9,79	9,54	9,09	8,75	3,83	10,51
TEMPO DE SOBREPRESSÃO MÍNIMO (ms)	9,91	3,47	9,91	3,83	8,36	7,83	8,29	7,69	8,29	7,69	3,83	9,89
TEMPO DE SOBREPRESSÃO MÉDIO (ms)	10,02	3,47	10,12	3,83	8,55	8,11	8,92	8,51	8,60	8,16	3,83	10,11
PRESSÃO TOTAL NEGATIVA MÁXIMA EM MÓDULO (kPa)	8,27	1,31	8,28	1,48	11,09	12,47	11,14	12,47	11,14	12,47	0,68	8,31
PRESSÃO TOTAL NEGATIVA MÉDIA (kPa)	8,03	1,31	7,81	1,48	10,81	12,22	10,14	11,39	10,72	12,10	0,68	7,84

Tabela 37 – Análise da pressão refletida com massa fixa e distância variável

R	3 m	pontos	Pr	Pr α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
		1	1914,300	2008,448	0,00	4,69	25,40	2008,447886	Pr α	2,86	12,58	3,82	19,06
		2	668,368	525,887	3,15	27,09		668,3681239	Pr				
		3	152,206	105,395	6,30	44,41		152,2061679	Pr				
	1,5 m	pontos	Pr	Pr α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
		1	12528,052	13088,483	0,00	4,28	89,41	13088,48269	Pr α	10,04	73,54	23,64	183,22
		2	1248,302	553,605	3,15	125,49		1248,301613	Pr				
		3	170,346	71,434	6,30	138,47		170,346186	Pr				
	0,75 m	pontos	Pr	Pr α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
		1	58651,26	86616,26	0	32,29	144,48	86616,26388	Pr α	38,04	333,80	186,90	1323,12
		2	1542,03	463,43	3,15	232,74		1542,028503	Pr				
		3	175,71	65,46	6,3	168,40		175,7071158	Pr				
	0,375 m	pontos	Pr	Pr α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
		1	184652,6467	180519,9819	0	2,29	151,15	184652,6467	Pr	112,98	1042,59	417,38	2785,39
2		1634,359398	432,5103271	3,15	277,88	1634,359398		Pr					
3		177,1094538	64,8096164	6,3	173,28	177,1094538		Pr					
0,1875 m	pontos	Pr	Pr α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3	
	1	448097,8925	445929,1886	0	0,49	154,21	448097,8925	Pr	270,11	2525,01	1047,49	6846,64	
	2	1658,925218	425,7106332	3,15	289,68		1658,925218	Pr					
	3	177,4641184	65,13105427	6,3	172,47		177,4641184	Pr					

Tabela 38 – Análise do impulso refletido com massa fixa e distância variável

R	3 m	pontos	Ir	Ir α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
		1,0	883,266	905,204	0,0	2,42	46,32	905,2035189	Ir α	1,52	2,57	2,04	5,41
		2,0	582,585	443,043	3,15	31,50		582,5848369	Ir				
		3,0	343,163	167,376	6,3	105,03		343,163328	Ir				
	1,5 m	pontos	Ir	Ir α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
		1	1919,751	2083,494	0,00	7,86	70,77	2083,493738	Ir α	2,57	5,15	5,91	10,77
		2	745,855	352,412	3,15	111,64		745,8551042	Ir				
		3	373,074	193,501	6,30	92,80		373,0742083	Ir				
	0,75 m	pontos	Ir	Ir α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
		1	5955,00	6832,76	0	12,85	82,16	6832,762788	Ir α	7,34	15,60	17,57	40,30
		2	810,87	388,98	3,15	108,46		810,865497	Ir				
		3	381,75	169,53	6,3	125,18		381,7536023	Ir				
	0,375 m	pontos	Ir	Ir α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
		1	20522,04605	18537,51765	0	10,71	102,72	20522,04605	Ir	24,73	53,44	56,40	118,28
2		829,7298971	328,7040687	3,15	152,42	829,7298971		Ir					
3		384,0126729	156,7227301	6,3	145,03	384,0126729		Ir					
0,1875 m	pontos	Ir	Ir α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3	
	1	70722,75986	84179,04072	0	15,99	117,76	84179,04072	Ir α	84,73	183,89	283,57	560,67	
	2	834,6399186	296,8563997	3,15	181,16		834,6399186	Ir					
	3	384,5832816	150,1399801	6,3	156,15		384,5832816	Ir					

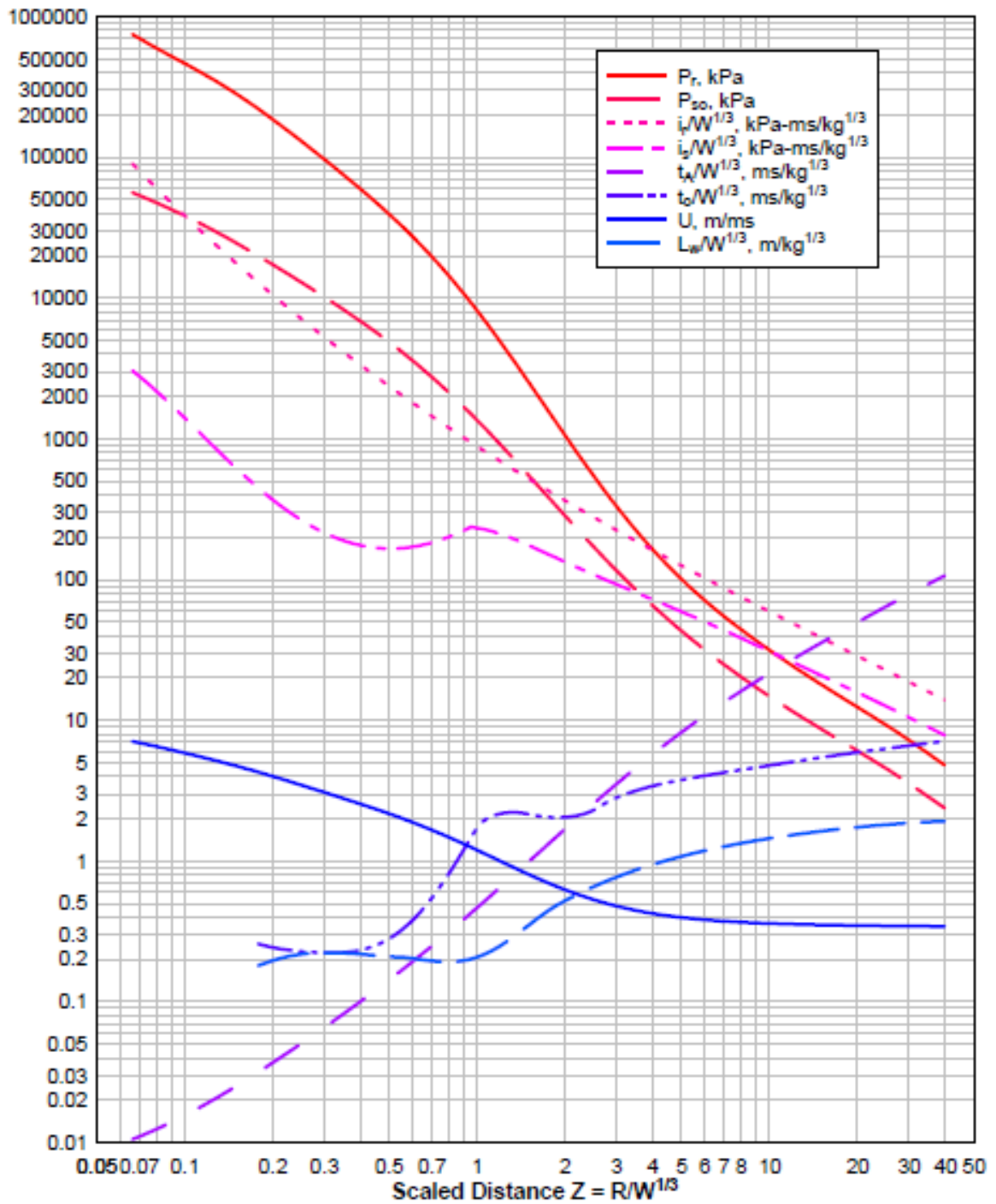
Tabela 39 – Análise da pressão refletida com distância fixa e massa variável

		pontos	Pr	Pr α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
W	1	pontos	Pr	Pr α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
		1	189,86551	240,90254	0,00	21,19	17,41	240,9025396	Pr α	1,75	3,57	1,61	4,38
		2	108,37816	149,87161	3,15	27,69		149,8716122	Pr α				
		3	53,118859	54,970669	6,30	3,37		54,97066903	Pr α				
	2	pontos	Pr	Pr α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
		1	510,36827	334,26136	0,00	52,69	26,73	510,3682715	Pr	3,32	6,78	1,61	4,38
		2	153,53537	207,95252	3,15	26,17		207,9525163	Pr α				
		3	75,251543	76,273877	6,30	1,34		76,27387723	Pr α				
	4	pontos	Pr	Pr α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3
		1	981,23224	1215,261	0,00	19,26	31,49	1215,261014	Pr α	2,86	9,20	4,75	16,12
		2	342,59232	255,95983	3,15	33,85		342,5923245	Pr				
		3	106,60611	75,403851	6,30	41,38		106,6061053	Pr				
8	pontos	Pr	Pr α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3	
	1	1914,2996	2008,4479	0,00	4,69	25,40	2008,447886	Pr α	2,86	12,58	3,82	19,06	
	2	668,36812	525,8873	3,15	27,09		668,3681239	Pr					
	3	152,20617	105,39501	6,30	44,41		152,2061679	Pr					
16	pontos	Pr	Pr α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3	
	1	4448,8099	4131,1611	0,00	7,69	63,42	4448,80987	Pr	3,49	13,30	4,11	31,56	
	2	1275,6784	1005,0324	3,15	26,93		1275,678396	Pr					
	3	334,60163	130,89143	6,30	155,63		334,6016325	Pr					
32	pontos	Pr	Pr α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3	
	1	7438,4934	7951,5812	0,00	6,45	57,91	7951,581223	Pr α	3,03	11,56	3,84	30,76	
	2	2452,6148	2071,3229	3,15	18,41		2452,614797	Pr					
	3	643,30392	258,49849	6,30	148,86		643,3039219	Pr					
64	pontos	Pr	Pr α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3	
	1	12455,171	13015,682	0,00	4,31	55,51	13015,6824	Pr α	2,29	10,05	3,28	23,64	
	2	5444,8151	3969,6394	3,15	37,16		5444,815099	Pr					
	3	1239,0742	550,52624	6,30	125,07		1239,074169	Pr					

Tabela 40 – Análise do impulso refletido com distância fixa e massa variável

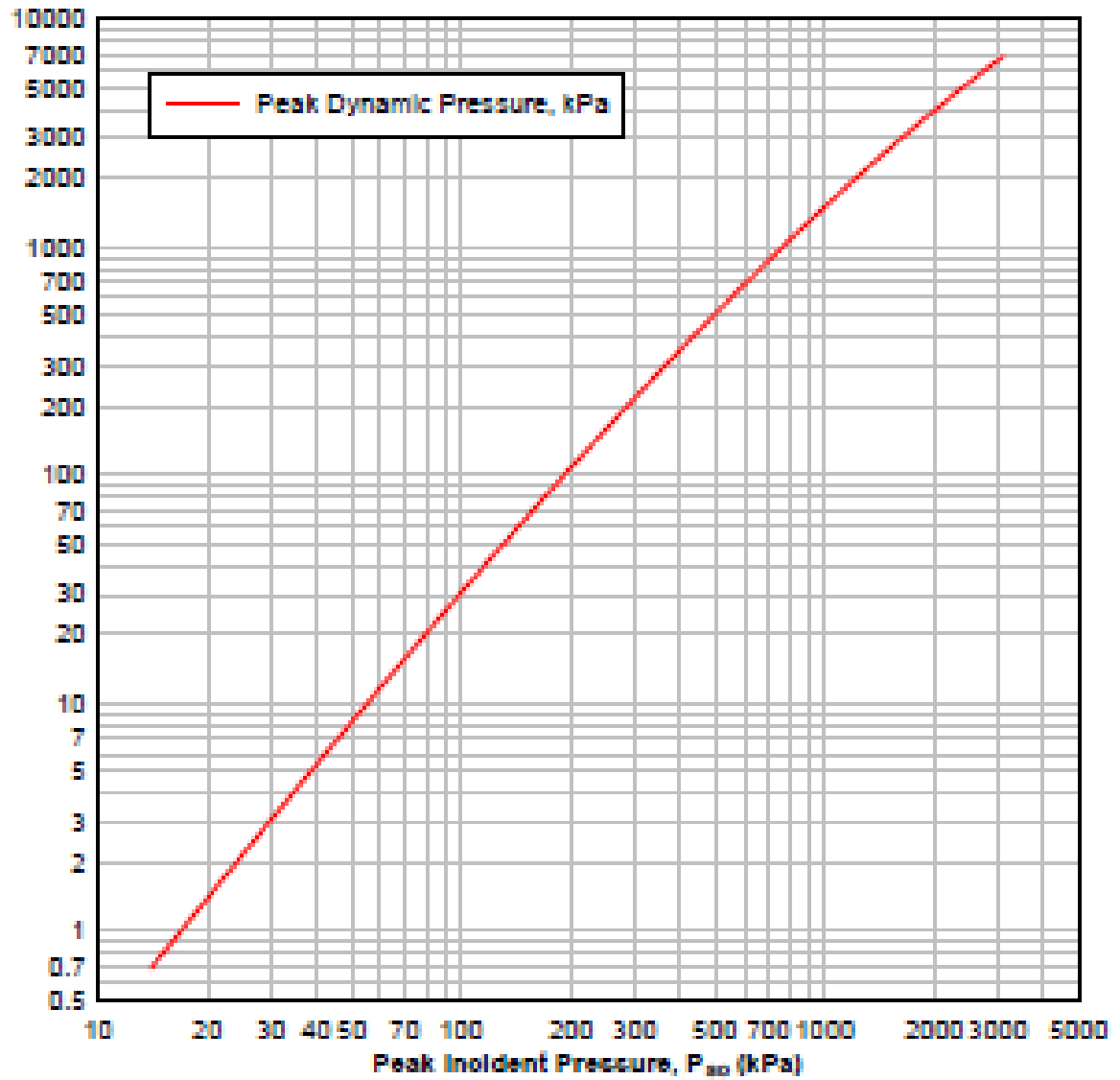
		pontos	Ir	Ir α	Altura	Diferença (%) Pr e Pr α	Diferença (%) Méd	Maior	Tipo	P1 > P2	P1 > P3	P1 > P2	P1 > P3	
W	1													
		1	201,2762	184,41476	0,0	9,14	25,80	201,2762041	Ir	1,52	2,57	1,85	3,19	
		2	132,75787	99,909268	3,15	32,88		132,7578685	Ir					
	3	78,199138	57,762889	6,3	35,38	78,19913785		Ir						
	2													
		1	328,32773	232,29436	0,00	41,34	62,91	328,3277339	Ir	1,52	2,57	1,85	3,19	
		2	216,55859	125,84871	3,15	72,08		216,5585858	Ir					
	3	127,56076	72,759866	6,30	75,32	127,5607608		Ir						
	4													
		1	535,57797	483,59948	0	10,75	41,60	535,5779701	Ir	1,52	2,57	2,14	3,66	
		2	353,25681	225,49865	3,15	56,66		353,2568096	Ir					
	3	208,08091	132,19265	6,3	57,41	208,080909		Ir						
8														
	1	883,26565	905,20352	0	2,42	46,32	905,2035189	Ir α	1,52	2,57	2,04	5,41		
	2	582,58484	443,04292	3,15	31,50		582,5848369	Ir						
3	343,16333	167,37574	6,3	105,03	343,163328		Ir							
16														
	1	1432,9761	1655,7934	0	13,46	57,61	1655,793422	Ir α	1,52	2,57	2,97	5,64		
	2	945,16314	556,63694	3,15	69,80		945,1631381	Ir						
3	556,73493	293,66692	6,3	89,58	556,7349293		Ir							
32														
	1	2337,5132	2085,687	0	12,07	42,95	2337,51321	Ir	1,52	2,57	2,08	3,74		
	2	1541,7782	1001,49	3,15	53,95		1541,778238	Ir						
3	908,16258	557,72529	6,3	62,83	908,1625844		Ir							
64														
	1	3818,2364	4156,0848	0	8,13	54,14	4156,084823	Ir α	1,52	2,57	2,36	5,91		
	2	2518,4344	1757,8768	3,15	43,27		2518,434427	Ir						
3	1483,448	702,98058	6,3	111,02	1483,448048		Ir							

ANEXO A

Figura 21 – Parâmetros para *Surface Burst* proposto por Kingery-Bulmash (1984)

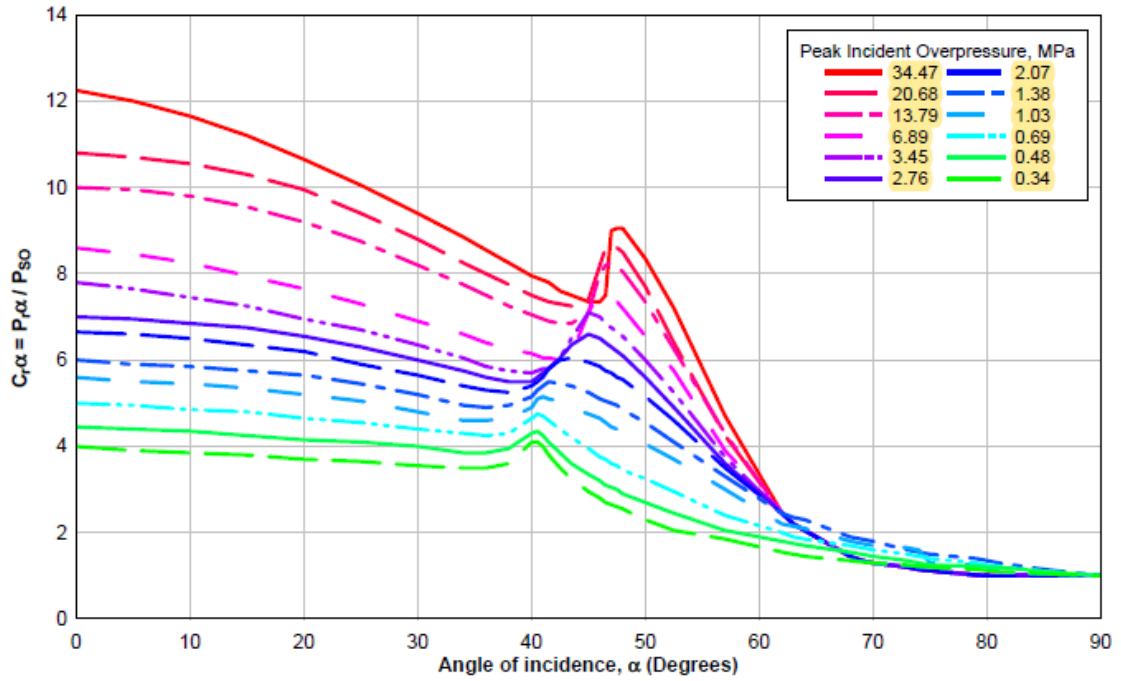
Fonte: European Commission (2013) adaptado de Unified Facilities Criteria (2008).

Figura 22 – Pressão dinâmica em função da sobrepressão



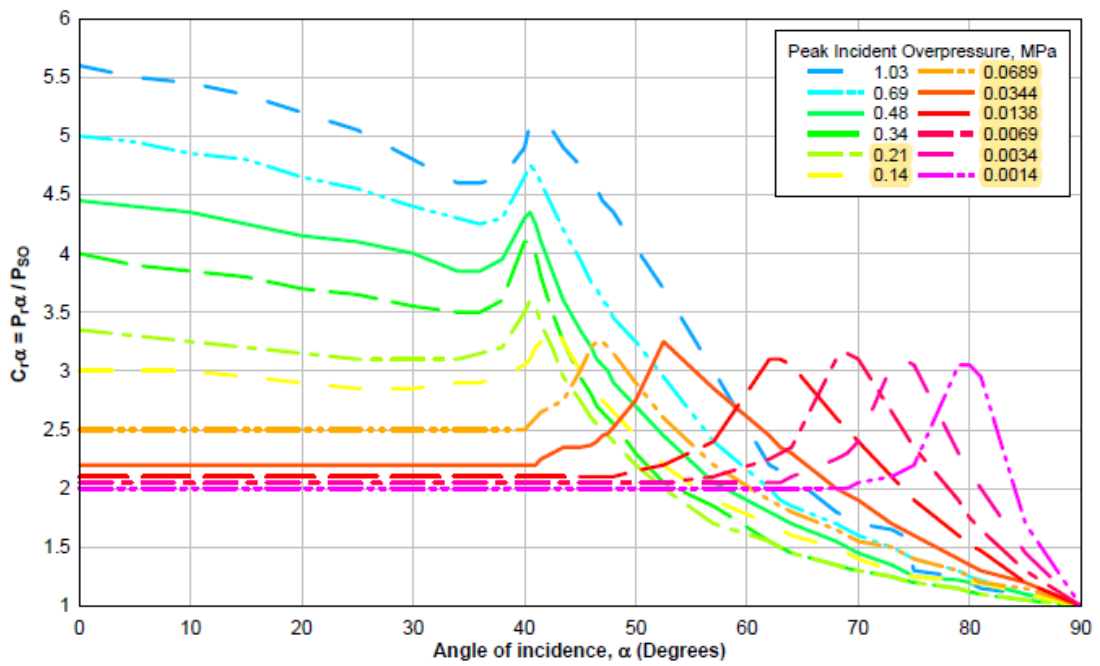
Fonte: European Commission (2013) adaptado de Unified Facilities Criteria (2008).

Figura 23 – Coeficiente de Reflexão para a Pressão em função do ângulo (a).



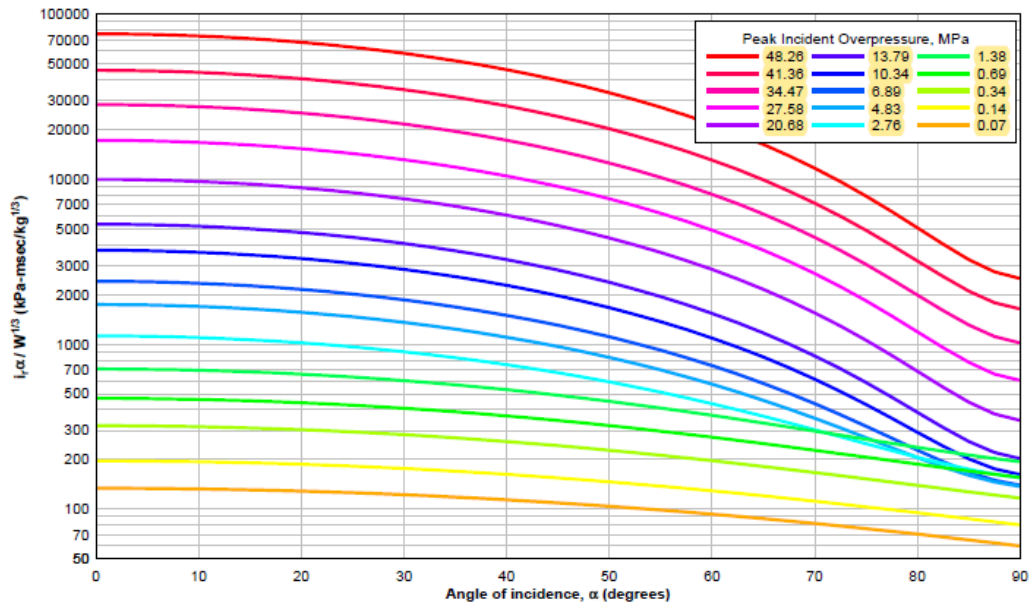
Fonte: European Commission (2013) adaptado de Unified Facilities Criteria (2008).

Figura 24 – Coeficiente de reflexão para a pressão em função do ângulo (b)



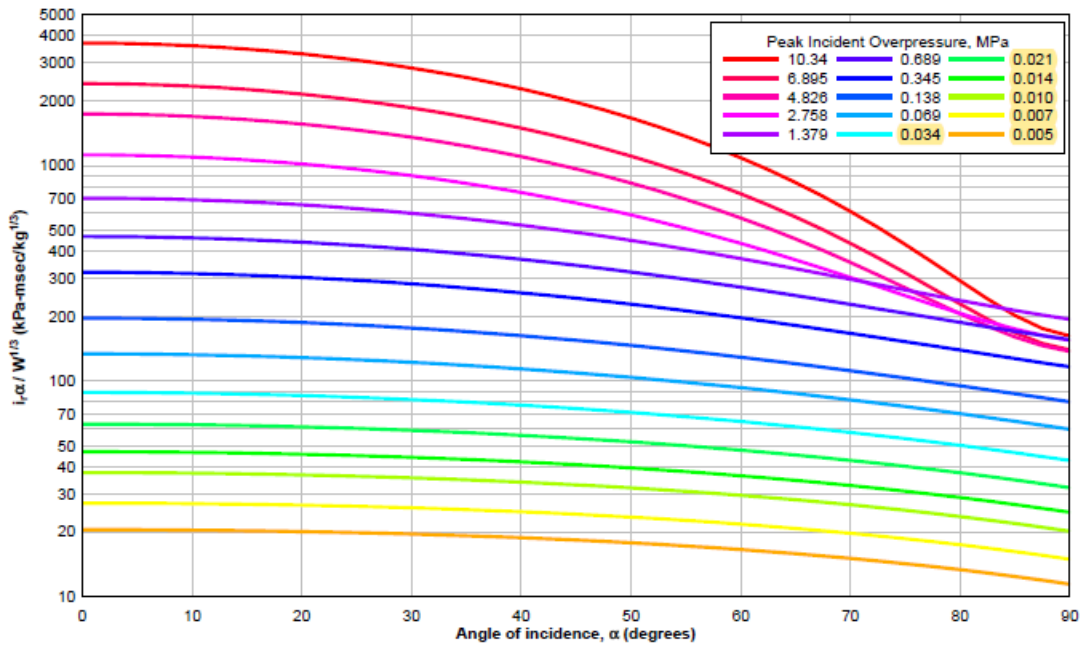
Fonte: European Commission (2013) adaptado de Unified Facilities Criteria (2008).

Figura 25 – Coeficiente de reflexão para o impulso em função do ângulo (a)



Fonte: European Commission (2013) adaptado de Unified Facilities Criteria (2008).

Figura 26 – Coeficiente de reflexão para o impulso em função do ângulo (b)



Fonte: European Commission (2013) adaptado de Unified Facilities Criteria (2008).