



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

William Macedo Koeller

**ANÁLISE E VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO SUBMETIDO
À ONDA DE CHOQUE DECORRENTE DE UMA EXPLOSÃO**



UFRJ

William Macedo Koeller

ANÁLISE E VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO SUBMETIDO À
ONDA DE CHOQUE DECORRENTE DE UMA EXPLOSÃO

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

Orientador:

Sérgio Hampshire de Carvalho Santos

Rio de Janeiro

2018

Koeller, William Macedo

Análise e verificação estrutural de um edifício submetido à onda de choque decorrente de uma explosão / William Macedo Koeller – 2018.

89; 30 cm.

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

Orientador: Sergio Hampshire de Carvalho Santos

1. Fenômeno da Explosão, 2. Carregamento Dinâmico, 3. Análise Não Linear. I Santos, Sergio Hampshire de Carvalho II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. III. Título.

ANÁLISE E VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO SUBMETIDO À
ONDA DE CHOQUE DECORRENTE DE UMA EXPLOSÃO

William Macedo Koeller

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

Aprovada pela Banca:

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

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

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

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

Rio de Janeiro
2018

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, amiga e maior incentivadora, Paula Koeller, que muito me apoiou e sempre esteve ao meu lado em todos os momentos mais importantes de minha vida. Mas, principalmente, obrigado pela paciência. Te amo.

À Marinha do Brasil, representada por todos os meus chefes diretos e indiretos da Diretoria de Obras Civis da Marinha – DOCM, pela oportunidade de realizar este Mestrado.

Ao meu orientador, Sergio Hampshire, pela paciência, ensinamentos, pelo tempo gasto, enriquecimento deste trabalho, mas principalmente pelo aprendizado que levarei pelo resto da vida.

À minha amiga, Juliana Anelli, pela parceria durante as aulas do Mestrado e no desenvolvimento desta Dissertação.

Agradeço a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho. E finalmente, aos meus familiares, amigos e colegas por inúmeras vezes compreenderem minhas muitas ausências e tornarem a realização deste trabalho possível.

RESUMO

KOELLER, William Macedo. **Análise e Verificação Estrutural de Um Edifício Submetido à Onda de Choque Decorrente de uma Explosão**. Rio de Janeiro. 2018. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.

Na Engenharia, os estudos relacionados a paióis de munição muitas vezes estão relacionados a estruturas de proteção, onde o foco é conhecer o fenômeno visando projetos com desempenho eficiente na resistência aos efeitos da explosão. Entretanto, na ocorrência de uma explosão de um paiol de munição haverá uma enorme quantidade de energia liberada, que se propagará rapidamente pelo meio, água ou ar, provocando variações de pressão com velocidade superior à do som, chamadas de ondas de choque. Caso essas ondas de choque encontrem uma edificação não projetada para receber tal carga, ela poderá provocar danos na estrutura, bem como causar danos aos humanos no local. O presente trabalho visa verificar a estrutura de uma edificação administrativa hipotética de dois pavimentos de concreto armado, situada no interior do Estado do Rio de Janeiro, projetada apenas para as cargas usuais de uma edificação administrativa, na ocorrência de uma explosão de um paiol de munição. Os efeitos de sobrepressão da onda de choque na fachada voltada ao paiol serão considerados utilizando as prescrições normativas internacionais. O deslocamento global da edificação será avaliado, considerando a não linearidade física do material. É realizada uma análise estática não linear *pushover* e verificada a ductilidade da estrutura a partir do método baseado em deslocamentos. Ao final, será feita uma análise acerca da distância de segurança usualmente utilizada para esse tipo de edificação, com relação aos danos estruturais esperados e a consequência da sobrepressão para a vida humana.

Palavras-chave: Fenômeno da explosão; carregamento dinâmico; análise não linear.

ABSTRACT

KOELLER, Macedo Koeller. **Analysis and Structural Verification of a Building Submitted to the Shock Wave from an Explosion.** Rio de Janeiro. 2018. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.

Studies related to military magazines for ammunition at engineering are often related to protective structures, where the focus is to know the phenomenon for designing buildings with efficient performance in resisting the effects of the explosion. However, in the event of an explosion of an ammunition magazine, a place where elements with high destructive power are often stored, there will be a huge amount of energy released, which will spread rapidly through the environment, water or air, causing pressure variations with speed higher than sound, called shock waves. If this shockwave attains a building not designed to receive such a load, it must cause damage to its structure as well as cause damage to humans on site. The present work aims to verifying the structure of a hypothetical administrative building of two reinforced concrete pavements located in the interior of the State of Rio de Janeiro, designed only for the usual loads of an administrative building (dead loads, accidental loads and wind), on the occurrence of an explosion of an ammunition magazine. The effects of overpressure of the shock wave on the façade facing the magazine will be considered using international normative prescriptions. The overall displacement of the building will also be evaluated considering the physical non-linearity of the material. A non-linear static analysis of the pushover and the verification of the ductility of the structure from the displacement-based method is also done. Finally, a brief analysis will be presented on the safety distance usually used for this type of construction, in relation to the expected structural damages and the consequence of the overpressure for human life.

Keywords: Phenomenon of the explosion; dynamic loading; nonlinear analysis.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Propósito.....	1
1.2	Metodologia.....	2
1.3	Organização do trabalho	2
1.4	Conceitos iniciais.....	3
1.4.1	Fenômeno da explosão	3
1.4.2	Explosivos sólidos	4
1.4.3	Ondas de choque.....	5
1.4.4	Efeito de uma explosão nas estruturas.....	7
1.4.5	Efeito de uma explosão nos humanos.....	9
2	CARREGAMENTOS DEVIDOS À EXPLOSÃO.....	10
2.1	Características do Paiol de Munição	10
2.2	Utilização do BEC	11
2.3	Obtenção das Sobrepressões em Função do Tempo.....	14
3	ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UMA EDIFICAÇÃO SOB A AÇÃO DE UM CARREGAMENTO EXPLOSIVO.....	25
3.1	Descrição da edificação, localização e informações adicionais	25
3.1.1	Forças devidas à ação do vento – NBR 6123	28
3.1.2	Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – NBR 6120 (1980).....	34
3.1.3	Cargas permanentes.....	34
3.1.4	Combinações de projeto	34
3.1.5	Dimensionamento adotado	35

3.2	Modelagem em elementos finitos.....	36
3.2.1	Rótulas plásticas	36
3.2.2	Carregamento devido à explosão de TNT equivalente.....	39
3.2.3	Análise pushover automatizada	44
3.3	Verificação do pré-dimensionamento e dimensionamento	46
3.4	Resultados e análise modal.....	48
3.4.1	Carregamentos das funções de explosão	49
3.4.2	Análise <i>pushover</i> automatizada	52
4	ANÁLISE NO REGIME NÃO LINEAR.....	54
4.1	Avaliação da Resposta ao Carregamento Dinâmico.....	55
4.1.1	Sistemas de um grau de liberdade	55
4.1.2	Extensão da formulação para sistemas elastoplásticos perfeitos.....	57
4.2	Programa para avaliação da resposta ao carregamento dinâmico	58
4.3	Exemplo de Aplicação.....	58
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	66
6	CONCLUSÕES	69
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
8	SÍTIOS DA INTERNET.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ilustração das fases de uma explosão e seus efeitos sobre estruturas alvo (KINNEY e GRAHAM, 1985 apud CASAGRANDE, 2006).	6
Figura 1.2 - Gráfico de pressão em função do tempo para uma onda de choque (AUTORIDAD REGULATORIA NUCLEAR, 1998 apud CASAGRANDE, 2006).	6
Figura 1.3 – Estimativa de danos sobre uma edificação (SILVA, 2007).	8
Figura 1.4 – Distância de segurança contra os efeitos diretos de uma onda de choque sobre o ser humano (SILVA, 2007).	9
Figura 2.1 – Exemplo de um paiol de munição do tipo enterrado (REINFORCED EARTH, 2017)	10
Figura 2.2 – Dados de entrada do programa BEC para o estudo de caso BEC (SWISDAK e WARD, 2000).....	11
Figura 2.3 – Probabilidade de danos nos humanos e quebra de janelas para uma explosão de 80 toneladas de TNT a 100 metros de um paiol de explosão do tipo enterrado (SWISDAK e WARD, 2000).	13
Figura 2.4 – Parâmetros de choque da pressão negativa para explosão esférica de TNT na superfície do solo ao nível do mar, UFC (2008).	14
Figura 2.5 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 100 m.	15
Figura 2.6 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 100 m.	15
Figura 2.7 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 200 m.	16
Figura 2.8 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 200 m.	16
Figura 2.9 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 300 m.	17
Figura 2.10 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 300 m.	17
Figura 2.11 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 400 m.	18
Figura 2.12 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 400 m.	18

Figura 2.13 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 500 m.	19
Figura 2.14 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 500 m.	19
Figura 2.15 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 600 m.	20
Figura 2.16 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 600 m.	20
Figura 2.17 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 700 m.	21
Figura 2.18 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 700 m.	21
Figura 2.19 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 800 m.	22
Figura 2.20 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 800 m.	22
Figura 2.21 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 900 m.	23
Figura 2.22 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 900 m.	23
Figura 2.23 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 1000 m.	24
Figura 2.24 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 1000 m.	24
Figura 3.1 – Vista geral do prédio administrativo e do paiol de munição.	25
Figura 3.2 – Vista lateral longitudinal da edificação, sem escala, dimensões em cm. ...	26
Figura 3.3 – Planta de forma do Pavimento 1, sem escala, dimensões em cm.	27
Figura 3.4 – Vista transversal da edificação da fachada posterior (sem aberturas), sem escala, dimensões em cm.	27
Figura 3.5 – Planta de localização	28
Figura 3.6 – Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s) (NBR 6123, 1988).	29
Figura 3.7 – Coeficiente de pressão externa (VISUAL VENTOS, 2003).	32
Figura 3.8 – Coeficientes de pressão externa (VISUAL VENTOS, 2003).	33
Figura 3.9 – Vista tridimensional do modelo da edificação administrativa (SAP2000, 2016).	36

Figura 3.10 – Definição da rótula plástica para os pilares de 35x35cm (SAP2000, 2016).	37
Figura 3.11 – Definição da rótula plástica para as vigas de 20x40cm (SAP2000, 2016).	38
Figura 3.12 – Funções no tempo inseridas no programa SAP2000 (2016).....	39
Figura 3.13 – Função da explosão de 80 t de TNT a 100 metros (SAP2000, 2016).....	39
Figura 3.14 – Função da explosão de 80 t de TNT a 200 metros (SAP2000, 2016).....	40
Figura 3.15 – Função da explosão de 80 t de TNT a 300 metros (SAP2000, 2016).....	40
Figura 3.16 – Função da explosão de 80 t de TNT a 400 metros (SAP2000, 2016).....	41
Figura 3.17 – Função da explosão de 80 t de TNT a 500 metros (SAP2000, 2016).....	41
Figura 3.18 – Função da explosão de 80 t de TNT a 600 metros (SAP2000, 2016).....	42
Figura 3.19 – Função da explosão de 80 t de TNT a 700 metros (SAP2000, 2016).....	42
Figura 3.20 – Função da explosão de 80 t de TNT a 800 metros (SAP2000, 2016).....	43
Figura 3.21 – Função da explosão de 80 t de TNT a 900 metros (SAP2000, 2016).....	43
Figura 3.22 – Função da explosão de 80 t de TNT a 1000 metros (SAP2000,2016).....	44
Figura 3.23 – Definição do caso de carga <i>pushover</i> para a análise não-linear, SAP2000 (2016).	45
Figura 3.24 – Nó A do modelo tridimensional, SAP2000 (2016).....	45
Figura 3.25 – Controle do carregamento do caso de carga <i>pushover</i> para a análise não- linear, SAP2000 (2016).....	46
Figura 3.26 – Apresentação do momento e cortante da viga de seção 20x40 para a envoltória do ELU e ELS, SAP2000 (2016).	47
Figura 3.27 – Aplicação nodal do carregamento devido à explosão de 80 t de TNT a 100 metros, SAP2000 (2016).	49

Figura 3.28 – Início da formação de rótulas plásticas, SAP2000 (2016).	52
Figura 3.29 – Final da formação de rótulas plásticas, na ruptura, SAP2000 (2016).	53
Figura 3.30 – Gráfico força versus deslocamento, no modelo tridimensional, durante a análise <i>pushover</i>	53
Figura 4.1 – Gráfico de força versus deslocamento, no regime elastoplástico.	54
Figura 4.2 – Sistema de um grau de liberdade e diagrama de corpo-livre.	56
Figura 4.3 – Sistema dinâmico elastoplástico perfeito.	57
Figura 4.4 – Tela de entrada do programa para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 100 metros	60
Figura 4.5 – Deslocamentos para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 100 metros	60
Figura 4.6 – Tela de entrada do programa para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 200 metros	61
Figura 4.7 – Deslocamentos para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 200 metros	61
Figura 4.8 – Tela de entrada do programa para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 300 metros	62
Figura 4.9 – Deslocamentos para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 300 metros	62
Figura 4.10 – Tela de entrada do programa para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 400 metros	63
Figura 4.11 – Deslocamentos para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 400 metros.....	63
Figura 4.12 – Tela de entrada do programa para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 500 metros	64

Figura 4.13 – Deslocamentos para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 500 metros.....	64
Figura 4.14 – Tela de entrada do programa para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 1000 metros	65
Figura 4.15 – Deslocamentos para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 1000 metros.....	65
Figura 5.1 – Deslocamento para diversas situações de carregamento.....	67
Figura 5.2 – Deslocamentos para $R_t = 100.000.000$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 100 metros.....	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela resumo de uma explosão de 80 t de TNT para variadas distâncias, para um paiol do tipo ECM (SWISDAK e WARD, 2000).	12
Tabela 2 – Probabilidade de ruptura dos tímpanos para uma explosão de 80 toneladas de TNT a 100 metros de um paiol de explosão do tipo enterrado, BEC (SWISDAK e WARD, 2000).	13
Tabela 3 – Tabela dos valores S_2 (NBR 6123, 1988).	31
Tabela 4 – Valores mínimos do fator estatístico S_3 (NBR6123, 1988).	31
Tabela 5 – Combinações ELU e ELS.	34
Tabela 6 – Valores mínimos do fator estatístico S_3 (NBR6123, 1988).	35
Tabela 7 – Reações globais na base do modelo tridimensional para as combinações de carregamento ELU e ELS.	47
Tabela 8 – Períodos e frequências modais não lineares.	48
Tabela 9 – Reações globais na base do modelo tridimensional para os carregamentos de 80 t de TNT.	50
Tabela 10 – Deslocamento do nó A do modelo tridimensional devido a uma explosão de 80 toneladas de TNT, variando de 100 até 1000 metros.	51
Tabela 11 – Reação na base do modelo tridimensional na análise <i>pushover</i>	52
Tabela 12 – Deslocamento do nó A do modelo tridimensional na análise <i>pushover</i>	52
Tabela 13 – Comparação de deslocamentos no nó A.	67

1 INTRODUÇÃO

A análise dinâmica tem uma vasta aplicação em projetos de Engenharia Civil. Considerando o fenômeno da explosão, muitas pesquisas ficaram restritas ao âmbito militar devido ao aspecto de segurança do assunto. Entretanto, nos dias atuais, já é possível encontrar alguns estudos que relacionam os efeitos de uma explosão em uma edificação existente, bem como danos em humanos que porventura possam ocorrer. Uma revisão bibliográfica do assunto pode ser vista em ANELLI (2018).

Considerando paióis de munição, o foco na maioria das vezes está relacionado à estrutura de proteção, onde o projeto visa o desempenho eficiente desta na resistência aos efeitos de explosões.

Dentre os principais efeitos da energia de uma explosão a serem considerados na análise de uma estrutura estão a sobrepressão, os fragmentos e os carregamentos de choque, produzidos pelas ondas de choque transmitidas pelo ar ou pelo solo.

A onda de choque, sopro ou “Blast Effect” (SILVA, 2007) é a denominação de uma frente de onda, com elevada pressão dinâmica e velocidade supersônica. Ela pode ocorrer devido à liberação de grande quantidade de energia, que se propaga rapidamente pelo meio, água ou ar, provocando variações de pressão, com velocidade superior à do som.

A sobrepressão da onda de choque é, geralmente, o fator dominante na determinação da resposta estrutural de uma edificação e, por esse motivo, apenas ela será abordada neste trabalho.

O ponto central deste trabalho é a abordagem prática dos efeitos da explosão, tendo a sua teoria apresentada em ANELLI (2018).

1.1 Propósito

Os objetivos deste trabalho são, a partir das curvas de sobrepressão para a fachada frontal de uma edificação, provenientes de uma explosão hipotética em um paiol

de munição, avaliar o desempenho de uma estrutura administrativa dimensionada para cargas usuais de utilização, conforme preconizado pelas normas técnicas vigentes.

1.2 Metodologia

Foram elaboradas curvas de sobrepressão para uma explosão de 80 toneladas de TNT (trinitrotolueno) armazenadas em um paiol de munição do tipo enterrado, para uma fachada voltada para a origem da explosão. Variou-se a distância entre 100 e 1000 metros da edificação ao local da explosão, para avaliação dos efeitos na estrutura. As curvas de sobrepressão foram obtidas conforme exposto em ANELLI (2018), utilizando as tabelas do BEC (SWISDAK e WARD, 2000).

Foi feito um estudo de caso de uma edificação administrativa hipotética construída no interior do Estado do Rio de Janeiro, projetada considerando-se os carregamentos de peso próprio, carga accidental e carga de vento. A edificação foi modelada em um programa de elementos finitos, SAP2000 (2016), para a realização de uma análise estática não linear concentrada *pushover*, onde são determinadas a ductilidade e a resistência da estrutura para cargas horizontais.

Para se avaliar os resultados obtidos, foi efetuada a verificação da ductilidade da estrutura, a partir do método baseado em deslocamentos.

1.3 Organização do trabalho

O Capítulo 2 deste trabalho aborda a geração de funções de sobrepressão para a fachada voltada para a origem da explosão, oriundas da explosão hipotética de um paiol de munição, utilizando as planilhas do BEC (SWISDAK e WARD, 2000) e as orientações do UFC (UNIFIED FACILITIES CRITERIA, 2008), conforme exposto em ANELLI (2018).

O Capítulo 3 do trabalho apresenta a definição de uma edificação administrativa típica modelada em um programa de elementos finitos (SAP2000, 2016), sujeita a carregamentos usuais, conforme as prescrições normativas vigentes (NBR 6118, 2014; NBR 6120, 1980 e NBR 6123, 1988). No mesmo modelo são aplicados carregamentos

devidos à explosão em um paiol de munição com variação da distância para uma mesma carga de TNT e é realizada uma análise automatizada *pushover*.

O Capítulo 4 estuda a solução do problema dinâmico considerando a não linearidade física, problema este consideravelmente mais complexo com relação ao mesmo problema no regime linear. O modelo terá sua solução transformada em um sistema não linear equivalente de um grau de liberdade, com comportamento elasto-plástico.

Ao fim deste trabalho são apresentadas a análise dos resultados, as conclusões, as sugestões para pesquisas futuras e as referências bibliográficas.

1.4 Conceitos iniciais

Conforme dito anteriormente, a parte teórica do presente trabalho foi desenvolvida em ANELLI (2018), sendo expostos neste subcapítulo apenas alguns dos conceitos iniciais básicos.

1.4.1 Fenômeno da explosão

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

Este trabalho trata de explosões Químicas, ocasionadas por reações físico-químicas de combustão, onde a velocidade extremamente alta da reação propicia a liberação repentina de energia, acompanhada de altas pressões e temperatura.

1.4.2 Explosivos sólidos

O TNT é um explosivo sólido do grupo secundário, o que significa que possui baixa sensibilidade ao choque mecânico, calor e atrito. Sua explosão é somente iniciada por um choque de alta intensidade, produzindo grande quantidade de gases.

Os explosivos sólidos podem ser considerados como uma carga concentrada, que vai gerar uma onda de pressão esférica no ar. A partir deste pressuposto, o volume atingido pelos efeitos da explosão no tempo vai depender da distância até o epicentro ao cubo (R^3).

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

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

Onde:

- W é a massa do explosivo equivalente em TNT em quilograma.

Uma regra geral pode ser definida para a distância mínima segura, de forma aproximada (KINNEY e GRAHAM, 1985 apud CASAGRANDE, 2006):

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

Onde:

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

Em se tratando de um prédio administrativo próximo a um paiol de munição, segundo utilizado internacionalmente nesse tema, o valor de referência de segurança para edificações civis e administrativas militares e rotas rodoviárias e ferroviárias principais é aproximado pela equação a seguir:

$$D_q = 22,2 \times Q^{1/3} \quad (1-3)$$

Onde:

- Q é a massa do explosivo equivalente em TNT em quilograma.
- D_q é uma distância radial mínima [m] do local do centro da explosão para garantir a segurança de pessoas e estruturas.

1.4.3 Ondas de choque

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

A Figura 1.1 ilustra as fases da passagem de uma onda de choque sobre um alvo, onde observa-se:

- Fase A: a situação inicial normal;
- Fase B: o pico de sobrepressão, após a detonação do explosivo;
- Fase C: um decréscimo de forma similar à logarítmica até a fase de pressão “negativa”;
- Fase D: a estabilização, como tendência natural, atingindo novamente a pressão atmosférica.

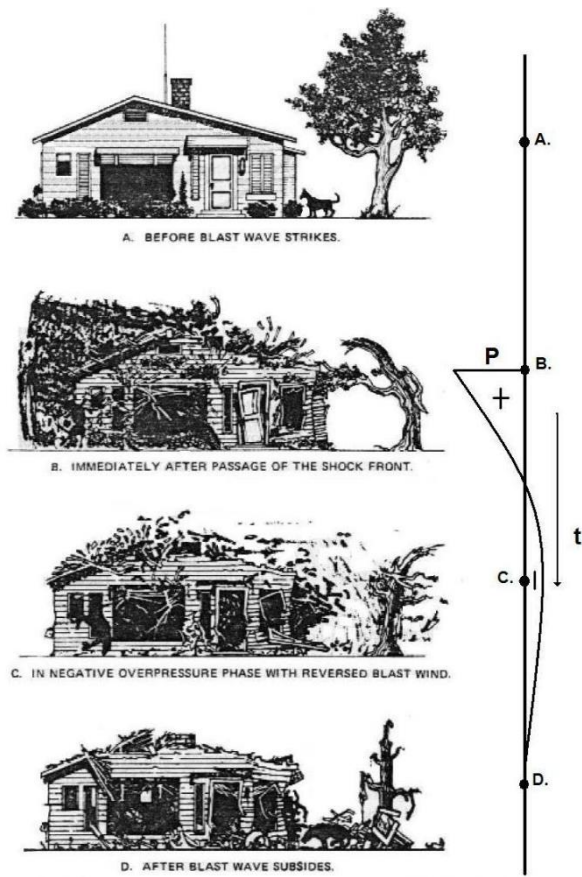


Figura 1.1 – Ilustração das fases de uma explosão e seus efeitos sobre estruturas alvo (KINNEY e GRAHAM, 1985 apud CASAGRANDE, 2006).

O gráfico de pressão em função do tempo para uma onda de choque é apresentado na Figura 1.2, onde definem-se os parâmetros: picos de sobrepressão [P_{so} , P_o]; durações da onda [t_d , t_o ou t_{o+}]; e impulsos por unidade de área [I/A].

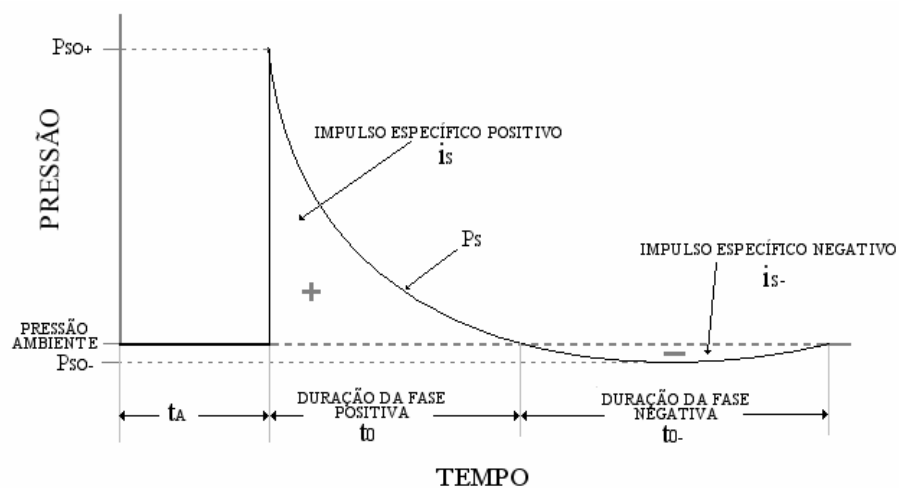


Figura 1.2 - Gráfico de pressão em função do tempo para uma onda de choque (AUTORIDAD REGULATORIA NUCLEAR, 1998 apud CASAGRANDE, 2006).

Na Figura 1.2, t_A é o tempo de chegada da onda de choque. Esse tempo vai depender basicamente da distância (do ponto ao epicentro), da turbulência do ambiente e da velocidade de propagação da onda.

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

O efeito da onda de choque pode causar danos mais sérios em uma instalação industrial e em habitações, por exemplo, do que os originados por fragmentos (TECHNICAL MANUAL No 9-1300-214, 1990 apud LIMA, 2009).

1.4.4 Efeito de uma explosão nas estruturas

A forma com que cada estrutura vai reagir ou resistir à onda explosiva varia conforme suas características: rigidez, período natural, formato, orientação espacial, entre outros fatores.

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

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

Em projetos de estruturas para resistir a explosões externas, a escolha de uma geometria adequada pode minimizar os efeitos provenientes da explosão; uma distribuição mais regular de vigas e pilares mais robustos otimizam essa estrutura na redistribuição de esforços.

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

Em seu trabalho, SILVA (2007) apresenta um gráfico de danos nas estruturas, relacionada à distância do foco e a massa em quilograma do explosivo, conforme reproduzido na Figura 1.3.

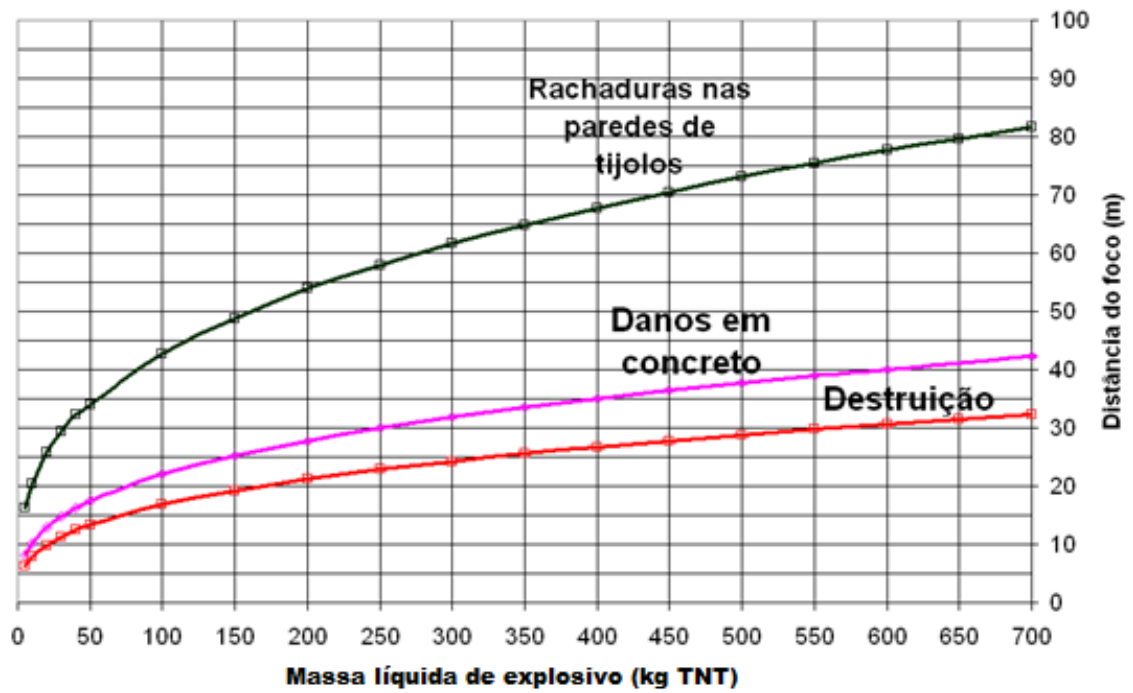


Figura 1.3 – Estimativa de danos sobre uma edificação (SILVA, 2007).

1.4.5 Efeito de uma explosão nos humanos

SILVA (2007) também apresenta um gráfico com a distância de segurança adequada para a proteção dos seres humanos contra os efeitos diretos da onda de choque (sobrepessão), como reproduzido na Figura 1.4.

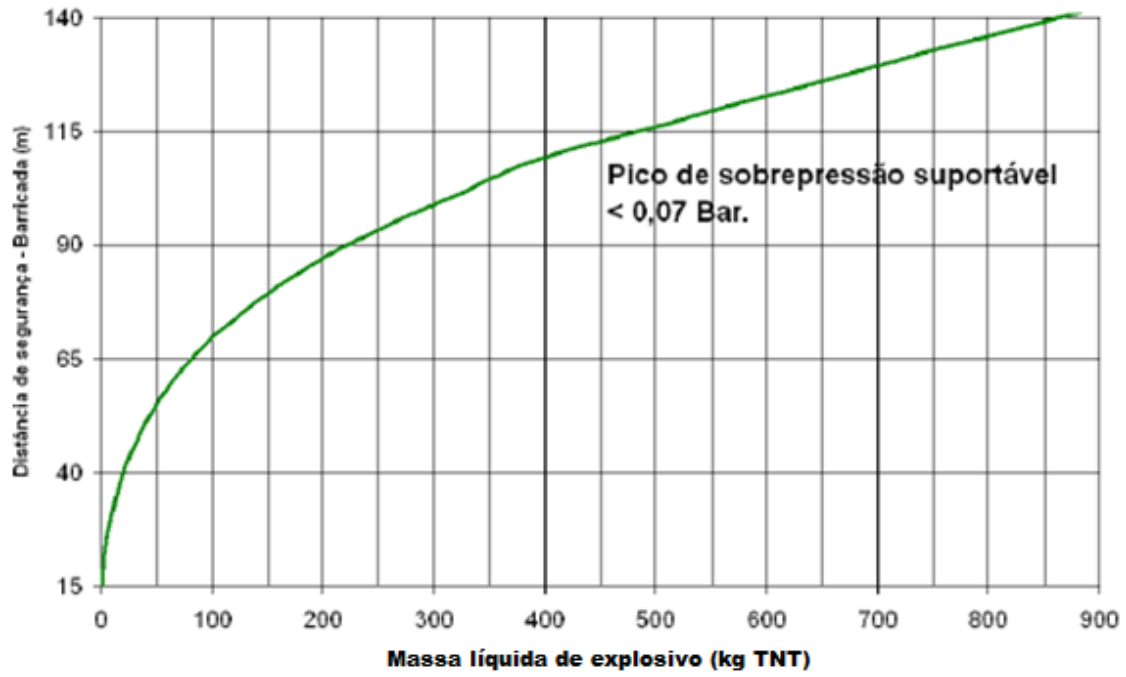


Figura 1.4 – Distância de segurança contra os efeitos diretos de uma onda de choque sobre o ser humano (SILVA, 2007).

Uma pessoa localizada a 115 metros do epicentro de uma explosão de 500 kg de TNT estaria no limite do pico de sobrepressão suportável.

2 CARREGAMENTOS DEVIDOS À EXPLOSÃO

Conforme dito no Capítulo 1, este trabalho é baseado na teoria exposta em ANELLI (2018), que utiliza as orientações para a obtenção de curvas de pressão em função do tempo do manual do UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC, 2008) e do BLAST EFFECT COMPUTER (BEC), version 4 (SWISDAK e WARD, 2000).

2.1 Características do Paiol de Munição

O paiol utilizado no estudo de caso foi o chamado ECM – “Earth Covered Magazine” (Paiol de Munição do Tipo Enterrado), com as seguintes dimensões: 24,38 metros de comprimento, 7,62 metros de largura e 3,05 metros de altura. O paiol encontra-se ao nível do mar, em temperatura ambiente de 25°C. A Figura 2.1 mostra como é este paiol do tipo enterrado.

A escolha do tipo do paiol foi devido a sua maior utilização em comparação aos outros tipos e as suas dimensões foram escolhidas em conformidade ao programado no BEC (SWISDAK e WARD, 2000), para facilitar a obtenção das curvas de pressão na fase positiva.



Figura 2.1 – Exemplo de um paiol de munição do tipo enterrado (REINFORCED EARTH, 2017)

2.2 Utilização do BEC

O programa BEC (SWISDAK e WARD, 2000) fornece os valores da onda de sobrepressão para distâncias localizadas na região em frente ao paiol de munição, já considerando os efeitos da atenuação do próprio paiol, conforme abordado em ANELLI (2018).

As curvas de sobrepressão foram obtidas para uma carga de explosivo TNT equivalente de 80 toneladas (66,7 toneladas de TNT de projeto majorado por um fator de segurança de 20%).

A Figura 2.2 nos mostra a entrada de dados do programa BEC (SWISDAK e WARD, 2000), onde são inseridos:

- Tipo de paiol utilizado: ECM;
- Tipo de munição armazenada: Bulk/light Cased – mesma massa equivalente do TNT;
- Tipo de explosivo: TNT;
- Massa total de TNT: 80 toneladas;
- Alcance: 1000 metros;
- Alcance inicial para tabela resumo: 100 metros;
- Altitude: Nível do mar; e
- Temperatura: 15°C.

INPUT SECTION			
Metric Units (kg, m, kPa, Pa-s, ms)			
Select Potential Explosion Site (PES)	Select Number of Weapons or Total NEO	Enter initial range for Summary Table	Select Atmospheric Description
ECM--Front	Total NEQ (kg)	100	Altitude (meters)
Select Type of Weapon	Enter Total NEQ (kg)		Enter Altitude (m)
Bulk/Light Cased	80.000,0		0,00
Select Type of Explosive	Range (m)		Enter Temperature (°C)
TNT	1.000,0		15,00

Figura 2.2 – Dados de entrada do programa BEC para o estudo de caso BEC (SWISDAK e WARD, 2000)

A Tabela 1 apresenta os valores de tempo de chegada da onda de sobrepressão, pressão incidente, impulso incidente, duração da fase positiva, pressão refletida, impulso refletido e pressão dinâmica, obtidos com o programa BEC (SWISDAK e WARD, 2000).

Tabela 1 – Tabela resumo de uma explosão de 80 t de TNT para variadas distâncias, para um paiol do tipo ECM (SWISDAK e WARD, 2000).

SUMMARY TABLE							
Explosion Site (ES)		ECM--Front		Type of Weapon		MK82 (500 lb Bomb)	
Type of Explosive		TNT		Total NEQ (kg)		80.000,00	
RANGE (meters)	TIME OF ARRIVAL (ms)	INCIDENT PRESSURE (kPa)	INCIDENT IMPULSE (Pa-s)	POSITIVE DURATION (ms)	REFLECTED PRESSURE (kPa)	REFLECTED IMPULSE (Pa-s)	DYNAMIC PRESSURE (kPa)
1.000,0	2620,93	3,61	361,65	222,30	7,35	638,37	0,05
100,0	87,00	265,03	6351,94	99,85	963,15	17030,75	181,17
120,0	122,83	171,94	5178,03	110,85	547,27	13395,85	87,04
140,0	163,48	120,35	4473,44	132,49	346,13	10891,71	46,00
160,0	208,15	88,62	3897,99	146,30	237,12	9061,09	26,22
180,0	256,12	68,21	3422,22	156,10	172,63	7670,35	15,91
200,0	306,70	54,34	3025,34	163,15	131,77	6584,61	10,18
250,0	441,00	34,32	2284,82	173,97	77,73	4716,24	4,02
300,0	581,73	24,13	1786,63	180,32	52,72	3560,65	1,95
400,0	869,98	14,46	1189,84	189,02	30,53	2270,69	0,69
500,0	1160,52	10,05	865,53	195,92	20,86	1609,68	0,34
600,0	1451,96	7,59	672,12	201,84	15,58	1228,52	0,20
700,0	1744,28	6,05	548,23	207,12	12,31	989,63	0,13
800,0	2037,10	4,99	464,35	212,09	10,11	830,39	0,09
900,0	2329,62	4,21	405,05	217,08	8,53	719,09	0,07
1.000,0	2620,93	3,61	361,65	222,30	7,35	638,37	0,05
1.400,0	out of range	2,31	265,62	out of range	out of range	out of range	out of range
1.600,0	out of range	1,98	241,72	out of range	out of range	out of range	out of range
1.800,0	out of range	1,76	228,39	out of range	out of range	out of range	out of range
2.000,0	out of range	1,52	204,21	out of range	out of range	out of range	out of range
2.500,0	out of range	1,11	161,12	out of range	out of range	out of range	out of range
3.000,0	out of range	0,86	132,76	out of range	out of range	out of range	out of range
5.000,0	out of range	0,42	77,17	out of range	out of range	out of range	out of range

O programa BEC (SWISDAK e WARD, 2000) também fornece a probabilidade de ruptura de janelas de vidro temperado para a sobrepressão atuante na distância solicitada, assim como a probabilidade de haver ruptura dos tímpanos e de morte devido a danos nos pulmões dos seres humanos.

Como pode ser observado na Figura 2.3, a probabilidade de ruptura dos tímpanos é maior que zero a 100 metros do paiol de munição. A figura mostra também a probabilidade de haver ruptura em janelas de vidro temperado e morte por danos nos pulmões humanos.

OTHER INFORMATION				
Probability of Window Breakage (percent) at Range (note: dimensions are cm)	Area = 0.186 m ² 30.5 x 61.0 x 0.223 Float annealed	100,0	Area = 1.626 m ² 152.4 x 106.7 x 0.559 Plate annealed	
	Area = 0.372 m ² 61.0 x 61.0 x 0.223 Float annealed	100,0	Area = 2.787 m ² 182.9 x 152.4 x 0.559 Plate annealed	
	Area = 0.975 m ² 106.7 x 91.4 x 0.305 Float annealed	100,0	Area = 4.645 m ² 304.8 x 152.4 x 0.762 Plate annealed	
	Probability of Eardrum Rupture (percent) at Range			
			92,4 (Mercx)	
			100,0 (Eisenberg)	
Probability of lethality due to lung damage (percent) at Range		0,0		

Figura 2.3 – Probabilidade de danos nos humanos e quebra de janelas para uma explosão de 80 toneladas de TNT a 100 metros de um paiol de explosão do tipo enterrado (SWISDAK e WARD, 2000).

A Tabela 2 mostra um resumo da saída das probabilidades de danos do programa BEC (SWISDAK e WARD, 2000) para algumas distâncias.

Tabela 2 – Probabilidade de ruptura dos tímpanos para uma explosão de 80 toneladas de TNT a 100 metros de um paiol de explosão do tipo enterrado, BEC (SWISDAK e WARD, 2000).

Distância (m)	Probabilidade de quebra das janelas para uma explosão de 80t de TNT na distância especificada Janela de 30,5x61,0x0,223cm Área = 0,186 m ² Vidro plano temperado	Probabilidade de ruptura do tímpano (Eisenberg)	Probabilidade de morte devido à ruptura dos pulmões
100	100,0%	100,0%	0,0%
200	100,0%	67,3%	0,0%
300	100,0%	12,0%	0,0%
400	100,0%	2,4%	0,0%
1000	20,0%	0,0%	0,0%

2.3 Obtenção das Sobrepressões em Função do Tempo

A elaboração do gráfico para a obtenção da sobrepressão na fachada do edifício administrativo segue as orientações apresentadas em ANELLI (2018). Além da resposta do BEC (SWISDAK e WARD, 2000), a Figura 2.4 foi utilizada para a obtenção da fase negativa dos gráficos da sobrepressão atuando sobre a fachada posterior da edificação.

Utilizando a distância escalonada Z , equação (1-1), é traçada uma reta vertical até encontrar a curva dos parâmetros de impulso refletido da fase negativa e a pressão refletida da fase negativa. Em seguida, são traçadas retas horizontais até o eixo que marca essas grandezas. Na Figura é mostrada uma representação para uma distância escalonada fictícia.

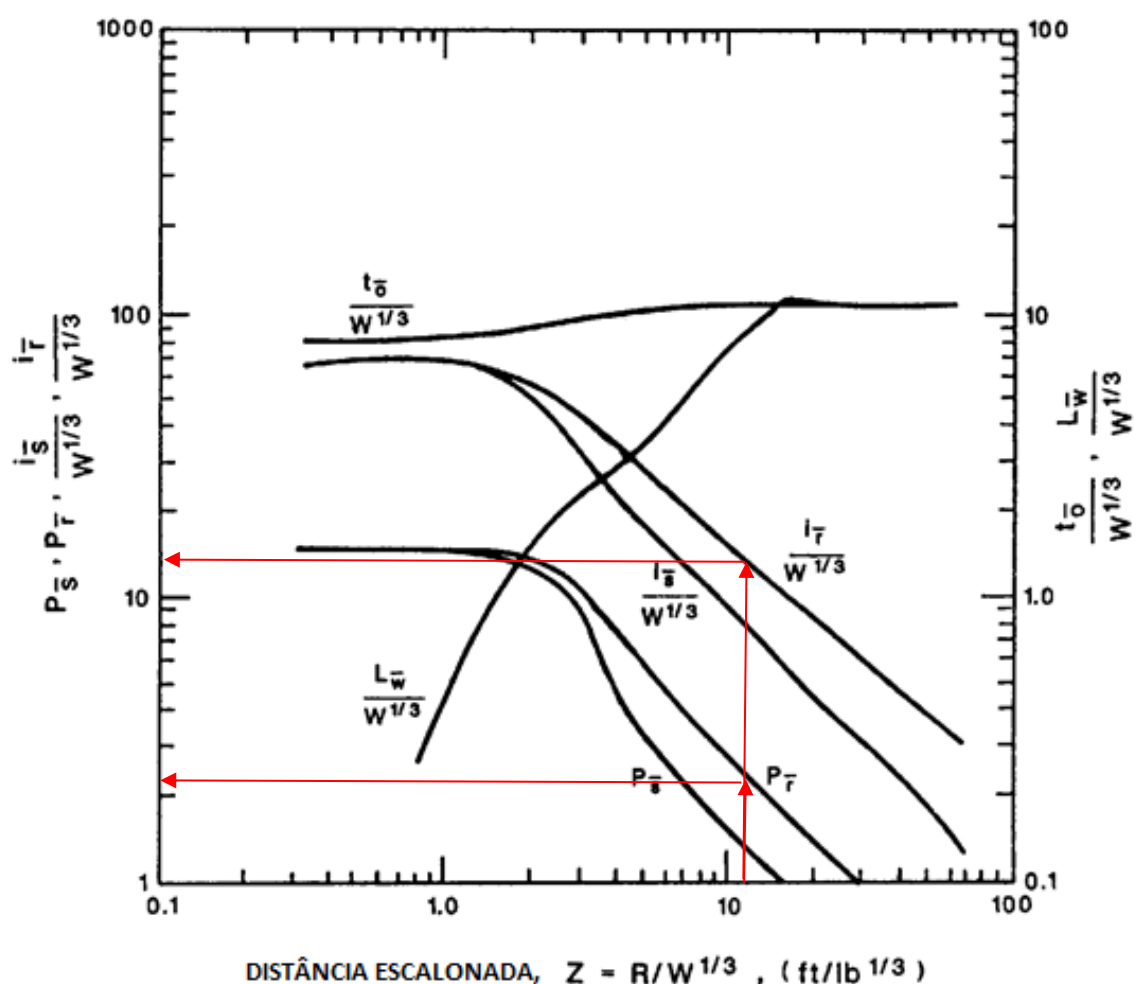


Figura 2.4 – Parâmetros de choque da pressão negativa para explosão esférica de TNT na superfície do solo ao nível do mar, UFC (2008).

A seguir são apresentados os gráficos de sobrepressão e força na fachada da edificação administrativa devido à explosão de 80 toneladas de TNT, variando de 100 até 1.000 metros.

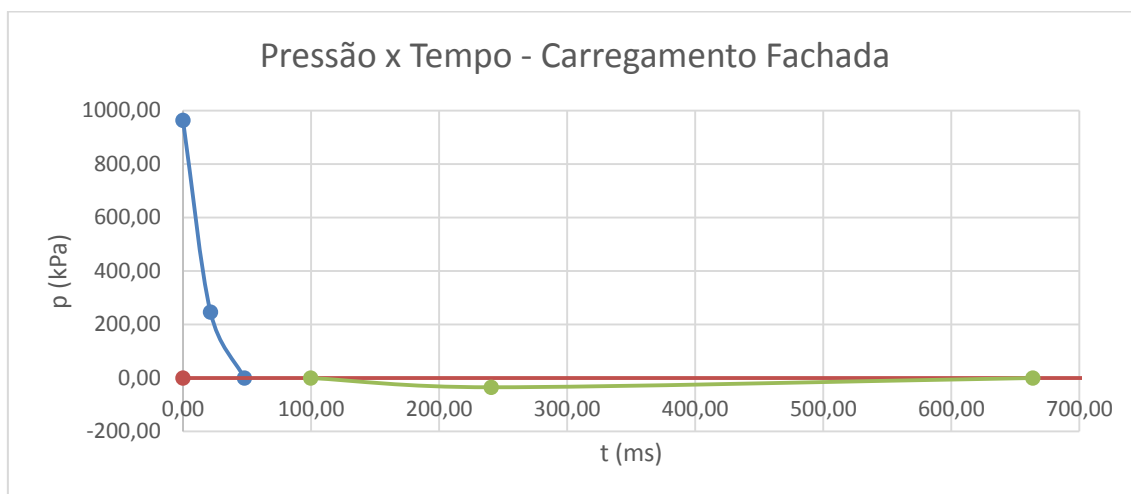


Figura 2.5 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 100 m.

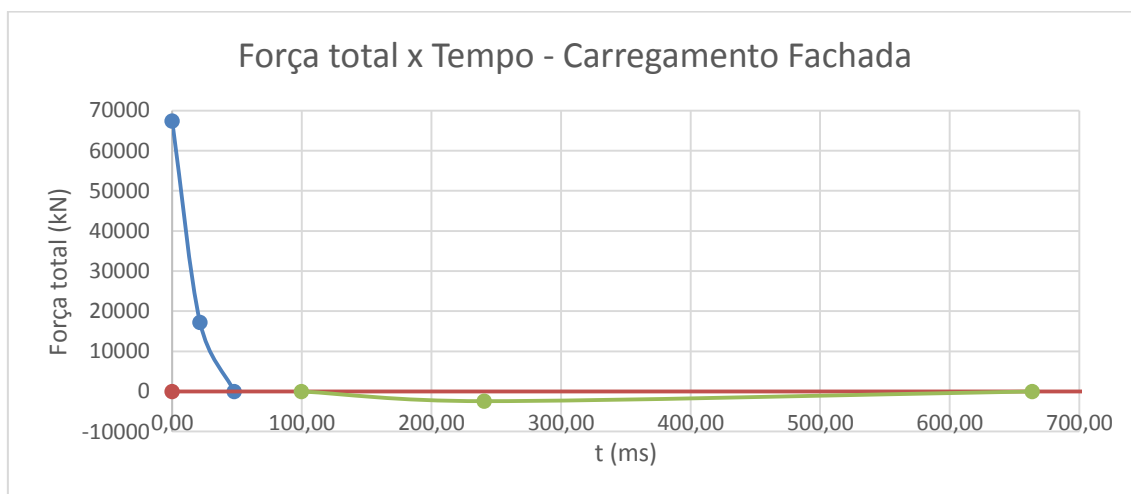


Figura 2.6 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 100 m.

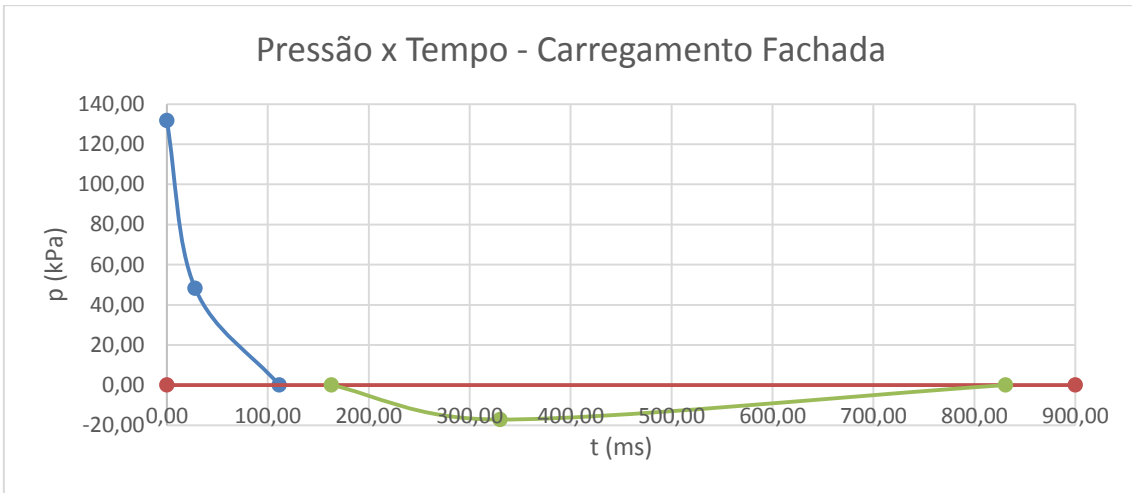


Figura 2.7 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 200 m.

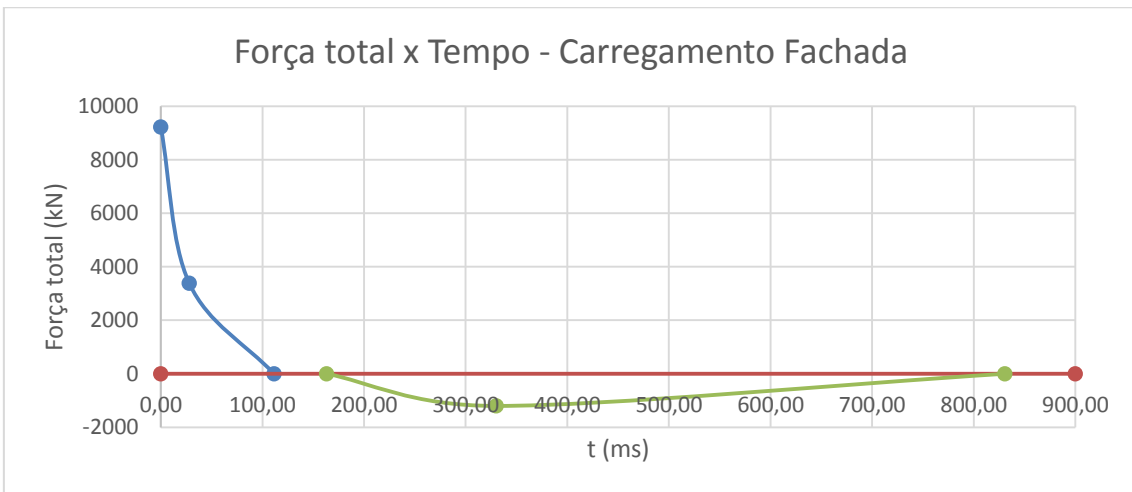


Figura 2.8 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 200 m.

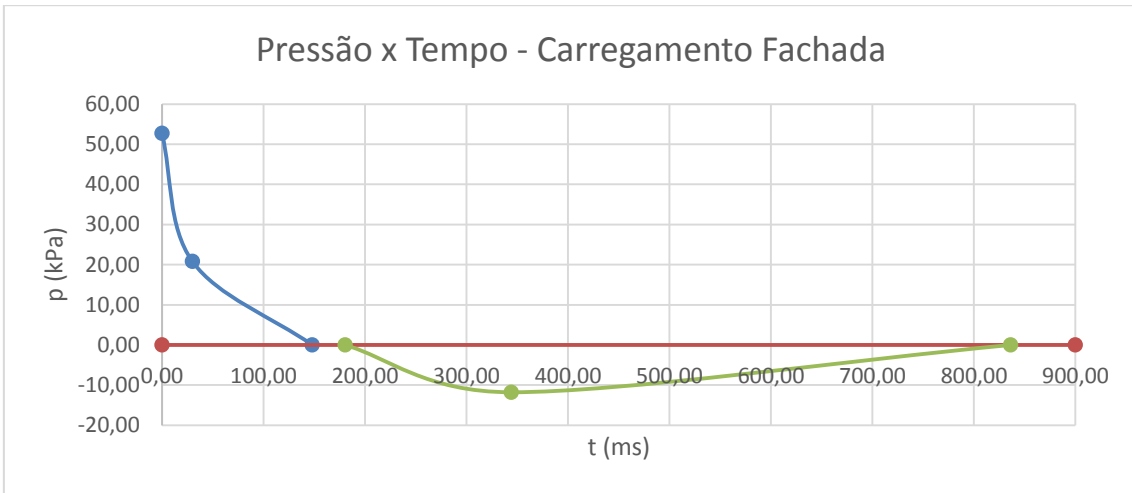


Figura 2.9 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 300 m.

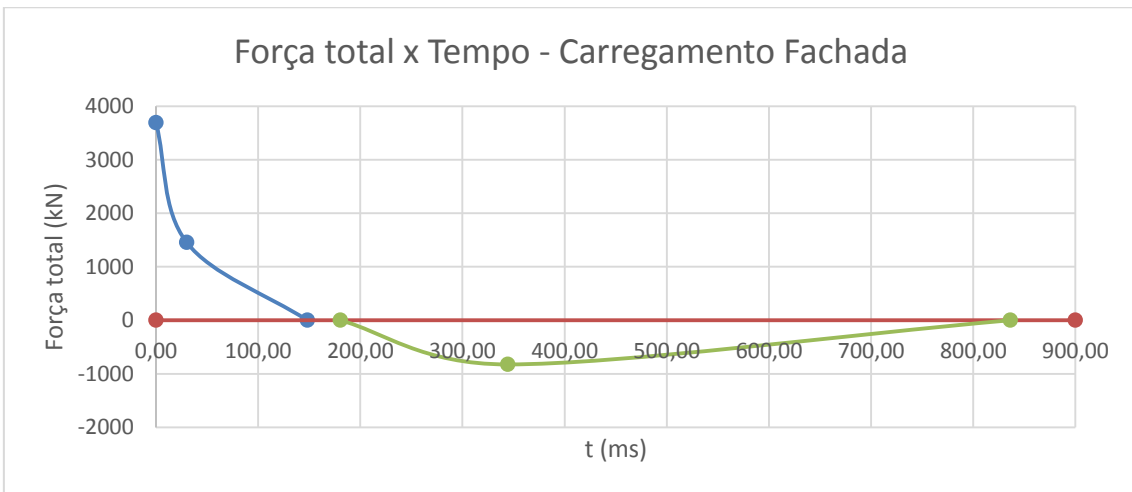


Figura 2.10 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 300 m.

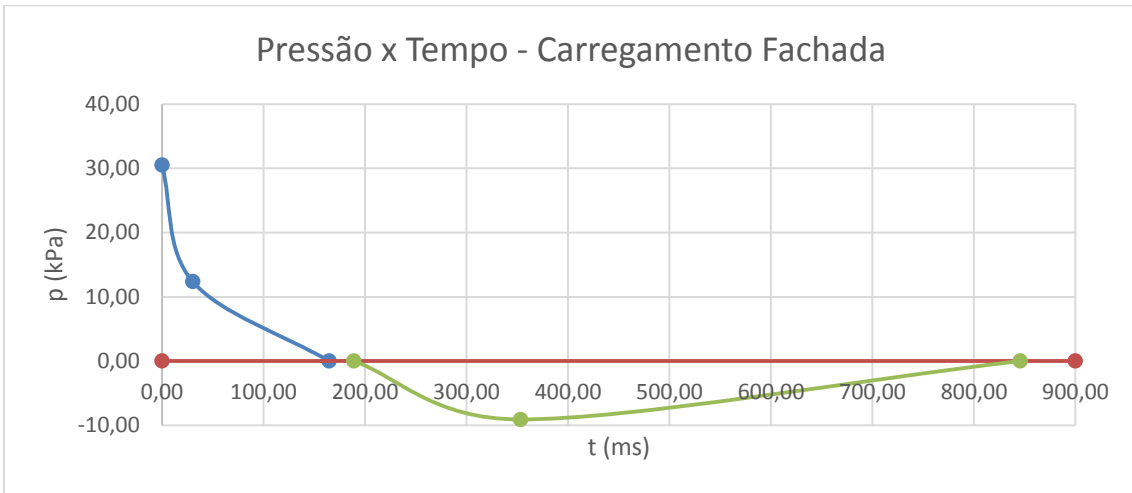


Figura 2.11 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 400 m.

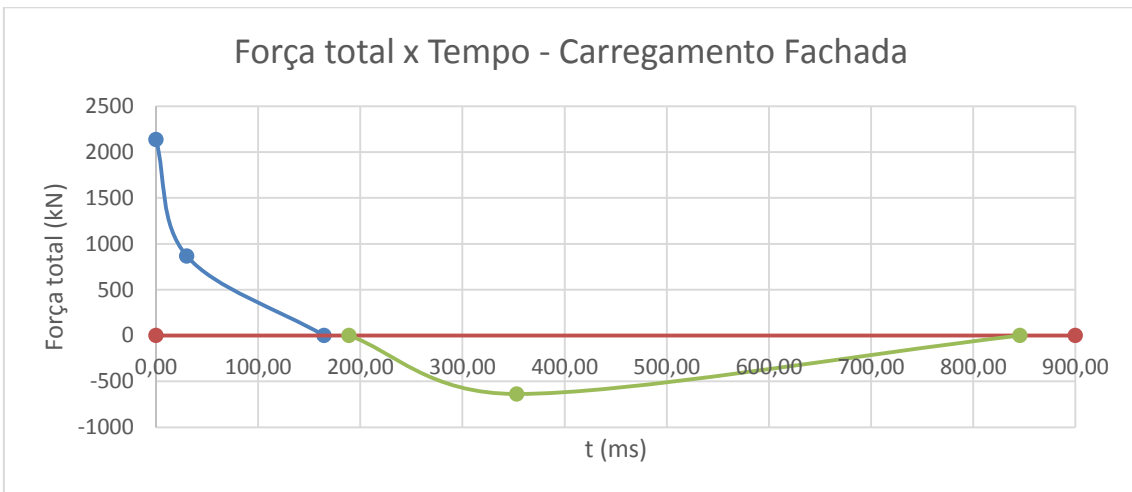


Figura 2.12 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 400 m.

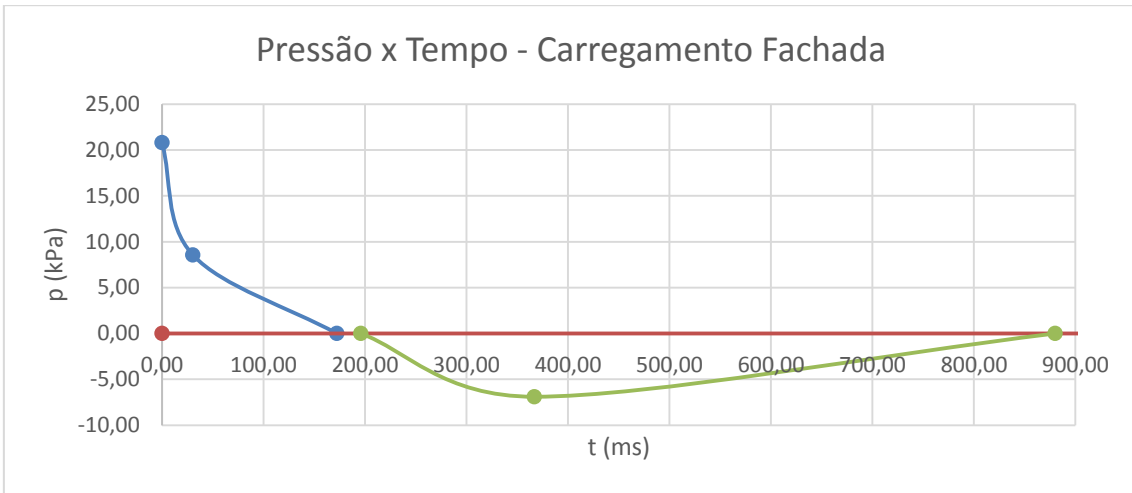


Figura 2.13 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 500 m.

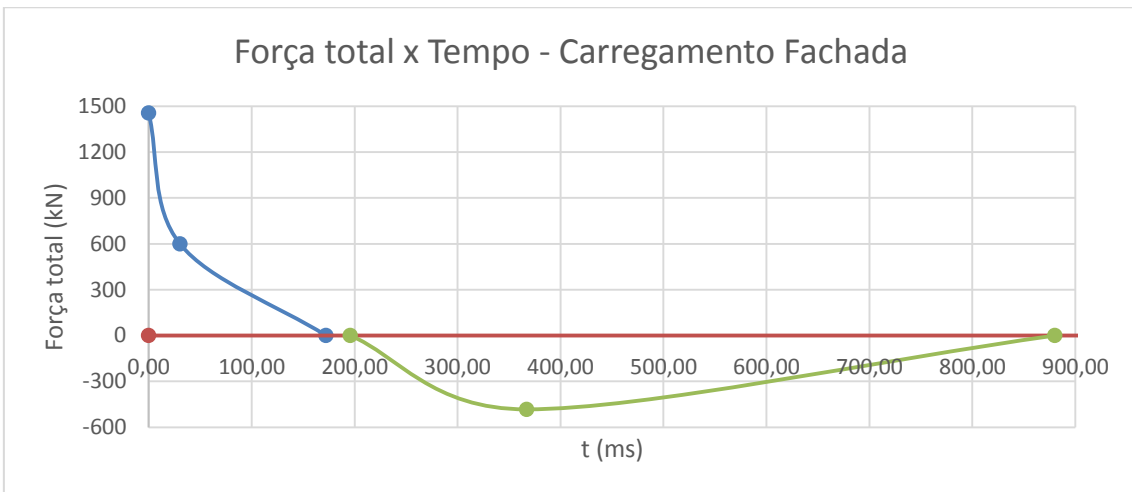


Figura 2.14 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 500 m.

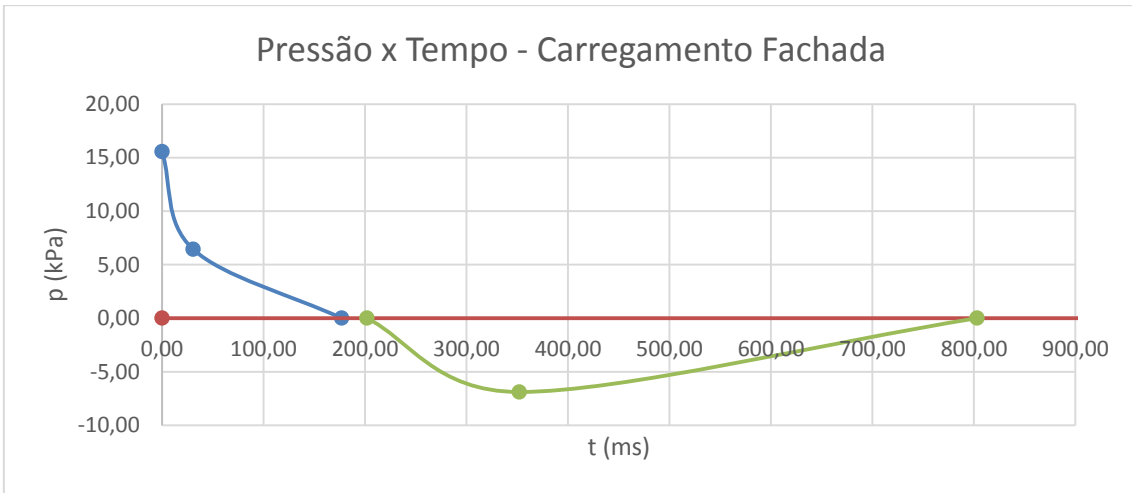


Figura 2.15 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 600 m.

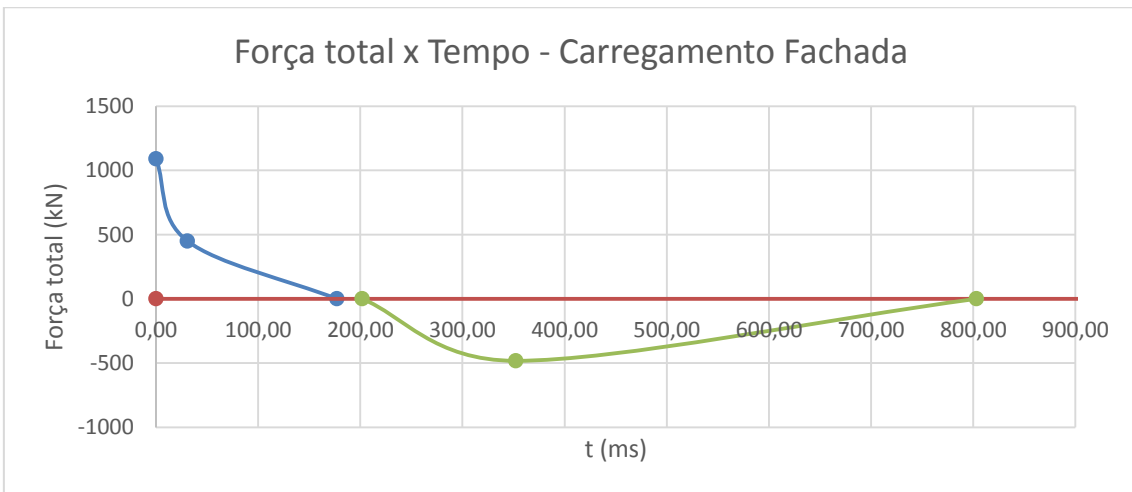


Figura 2.16 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 600 m.

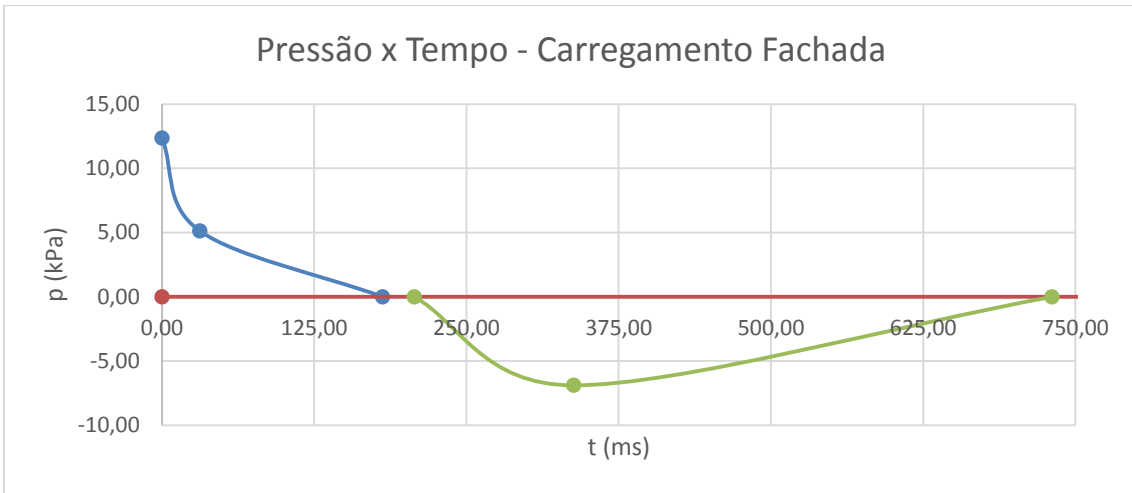


Figura 2.17 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 700 m.

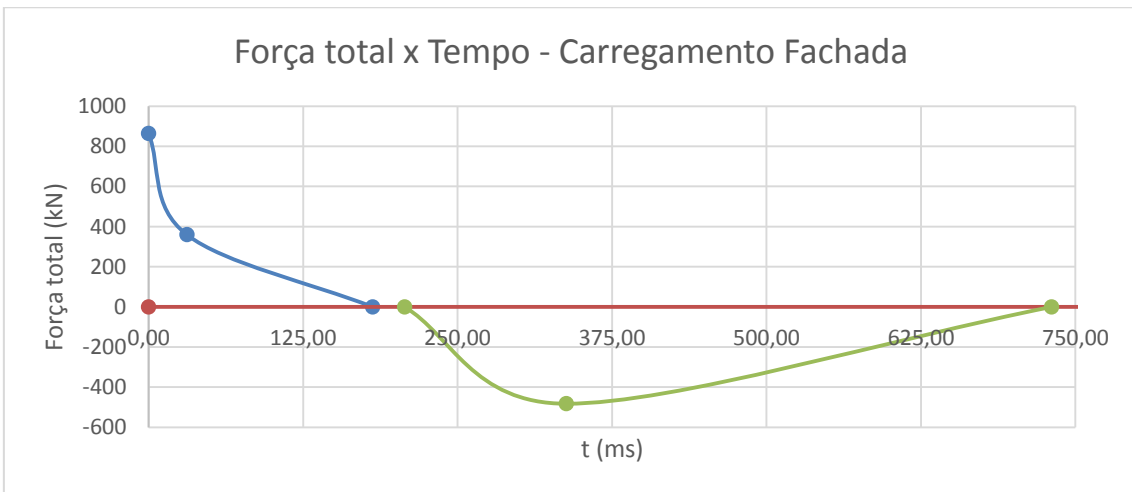


Figura 2.18 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 700 m.

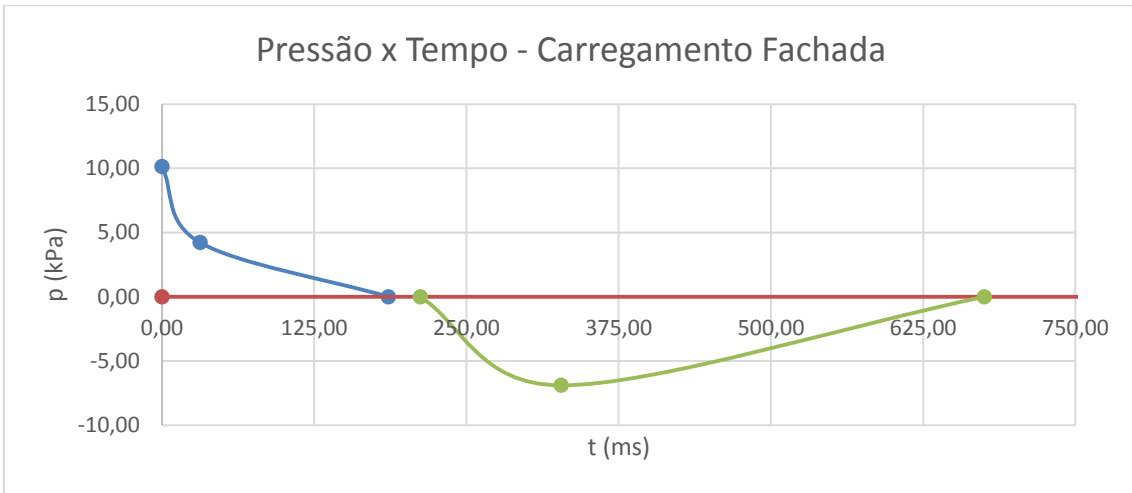


Figura 2.19 –Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 800 m.

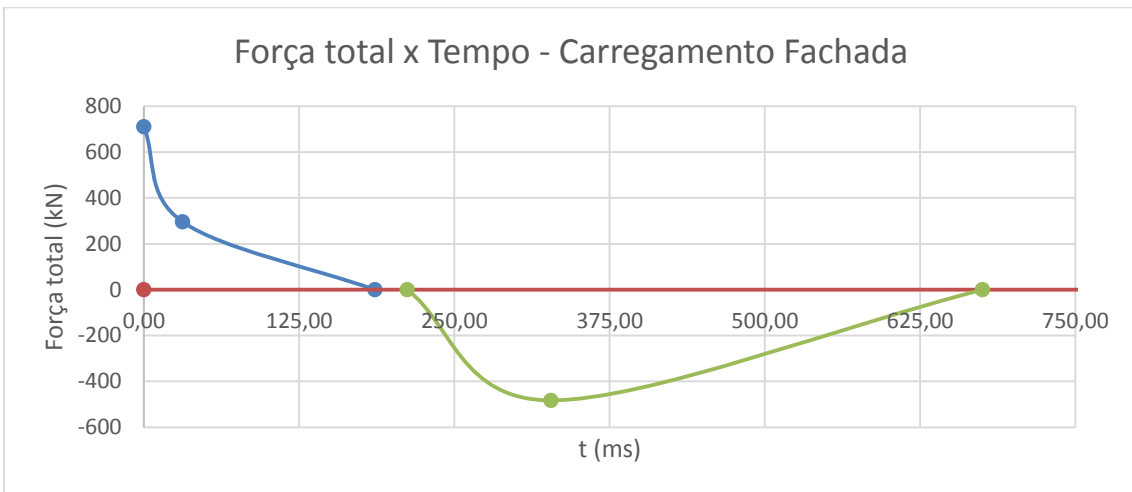


Figura 2.20 –Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 800 m.

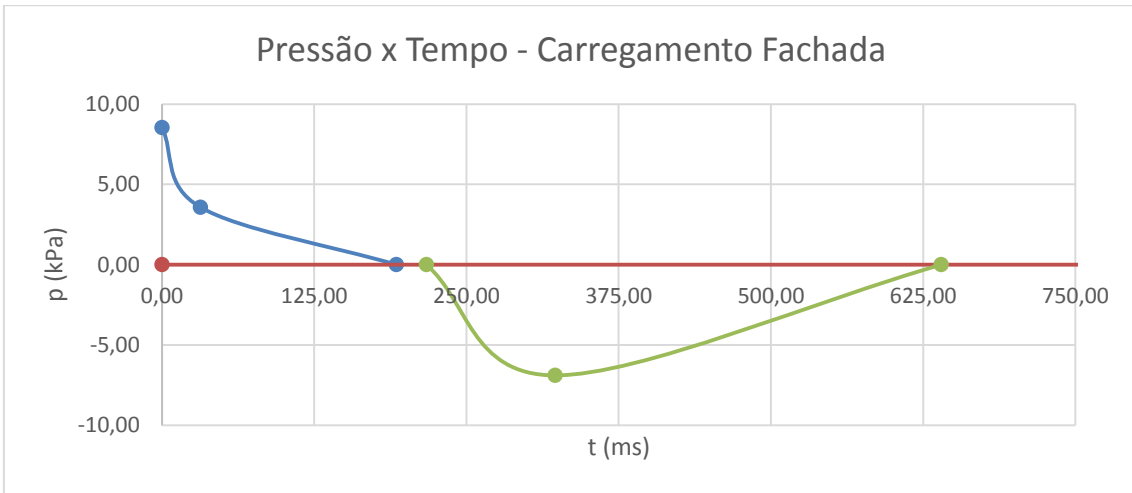


Figura 2.21 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 900 m.

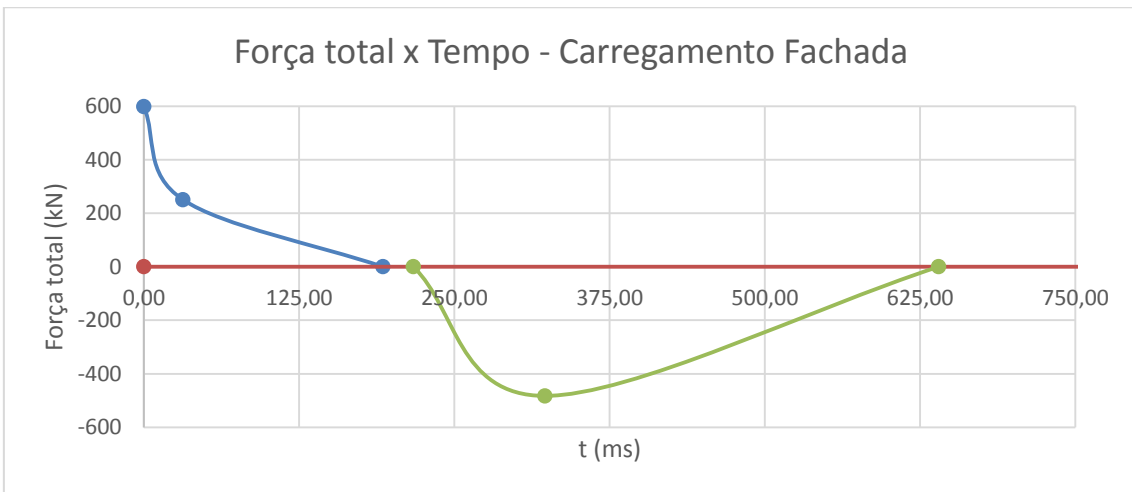


Figura 2.22 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 900 m.

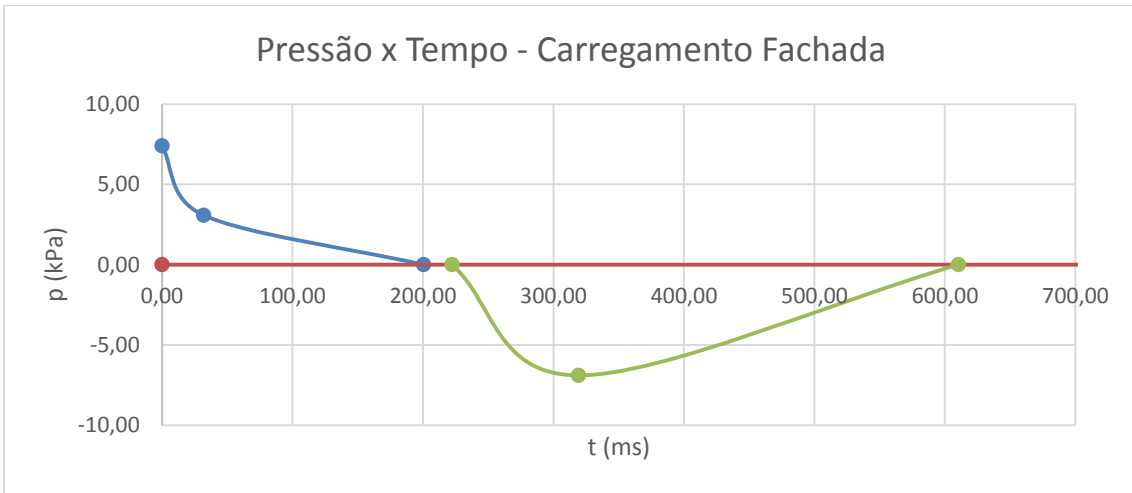


Figura 2.23 – Gráfico de sobrepressão x tempo – 80 t de TNT a 1000 m.

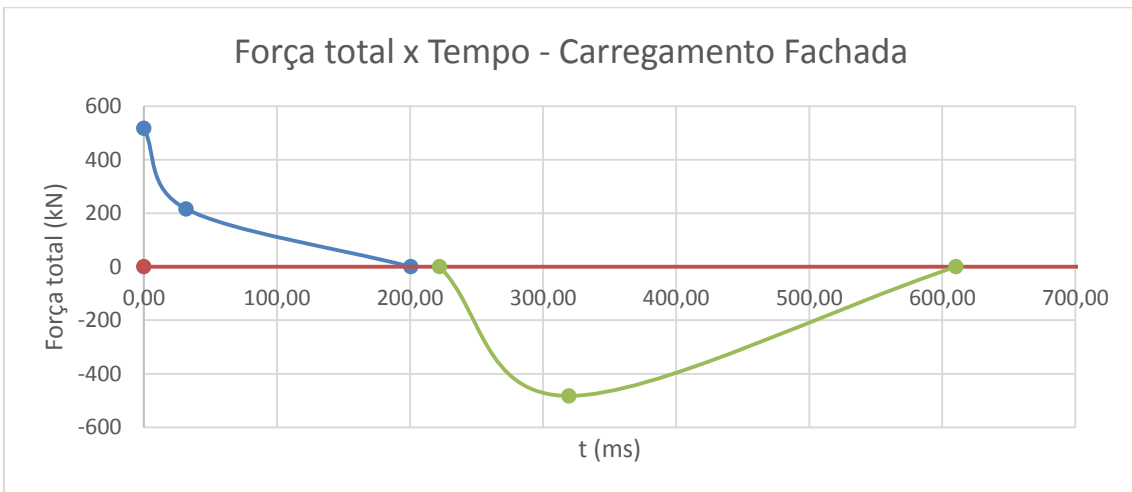


Figura 2.24 – Gráfico de força total x tempo – 80 t de TNT a 1000 m.

3 ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UMA EDIFICAÇÃO SOB A AÇÃO DE UM CARREGAMENTO EXPLOSIVO

Neste Capítulo é efetuada a modelagem, análise e dimensionamento de uma edificação administrativa hipotética localizada no interior do Estado do Rio de Janeiro. O objetivo desta etapa é efetuar a análise do deslocamento global da estrutura quando sujeita ao carregamento devido a uma explosão acidental em um paiol de munição.

A edificação foi dimensionada conforme as prescrições normativas vigentes (NBR6118, 2014; NBR6120, 1980 e NBR6123, 1988). Os carregamentos provocados por explosivos do Capítulo anterior serão aplicados à estrutura. A modelagem e análise da edificação foram executadas no programa SAP2000 (2016). Por fim, uma análise não linear estática *pushover* é executada, também no programa SAP2000 (2016) e os resultados obtidos serão avaliados.

3.1 Descrição da edificação, localização e informações adicionais

A edificação administrativa hipotética utilizada como estudo de caso neste trabalho localizar-se-ia no Estado do Rio de Janeiro, em uma área rural, próximo ao bairro de Campo Grande. A Figura 3.1 apresenta um esquema da área descrita.

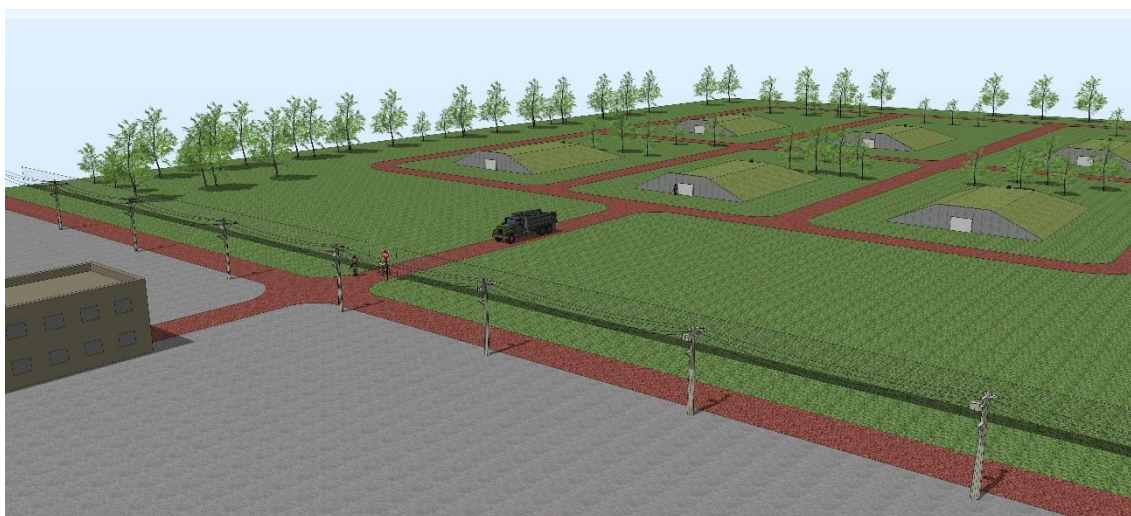


Figura 3.1 – Vista geral do prédio administrativo e do paiol de munição.

A edificação em questão possui 20 metros de comprimento, 10 metros de largura e 7 metros de altura. O prédio tem dois pavimentos, cada um com 3,50 metros de pé direito.

A estrutura é em concreto armado, com resistência característica à compressão do concreto, f_{ck} , de 25 MPa. Os pórticos estão distribuídos a cada 5 metros. As lajes do primeiro pavimento e da cobertura possuem 15 centímetros de espessura. O edifício não possui aberturas na sua fachada posterior (fachada voltada para o local da explosão).

As fundações são compostas por fundação profunda e foram consideradas como engastadas na modelagem. Os pilares possuem seção quadrada com 35x35cm. As vigas de fundação (cintas) possuem seção de 15x30cm. As vigas de contorno do primeiro pavimento possuem seção de 30x50cm e as do interior possuem seção de 20x50cm. As vigas da cobertura possuem seção de 20x40cm.

As Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 mostram, respectivamente, uma vista lateral da edificação, uma planta de forma do 1º pavimento, uma vista transversal da edificação e uma planta de localização.

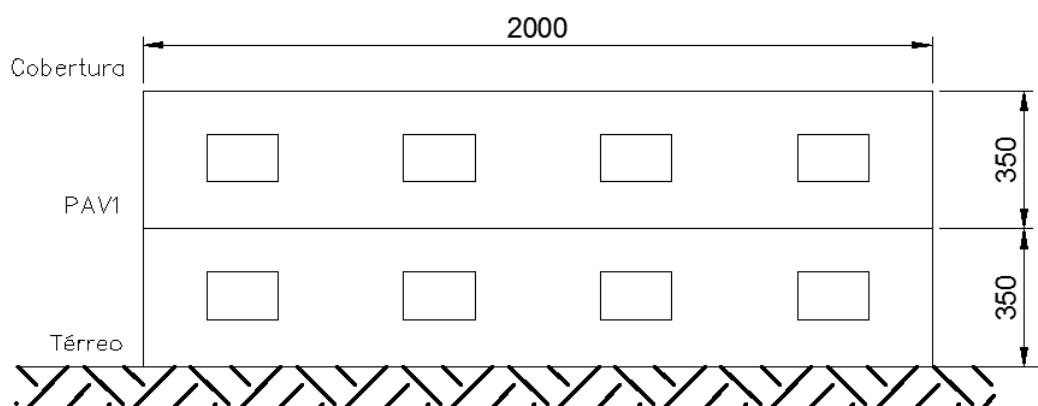


Figura 3.2 – Vista lateral longitudinal da edificação, sem escala, dimensões em cm.

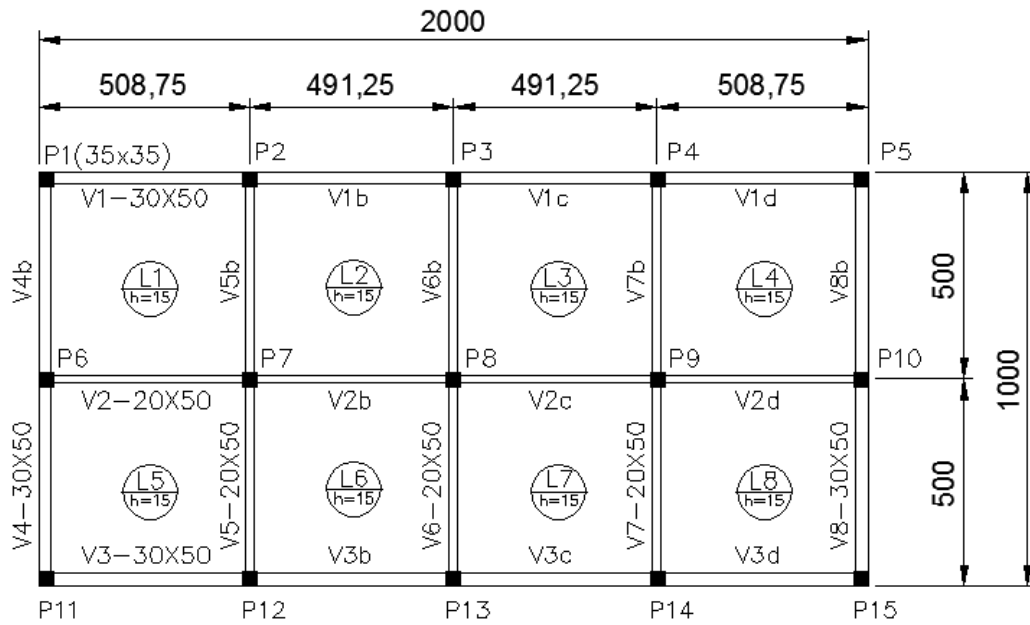


Figura 3.3 – Planta de forma do Pavimento 1, sem escala, dimensões em cm.

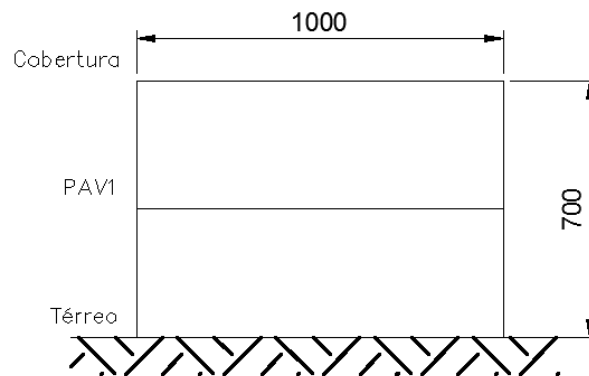


Figura 3.4 – Vista transversal da edificação da fachada posterior (sem aberturas), sem escala, dimensões em cm.

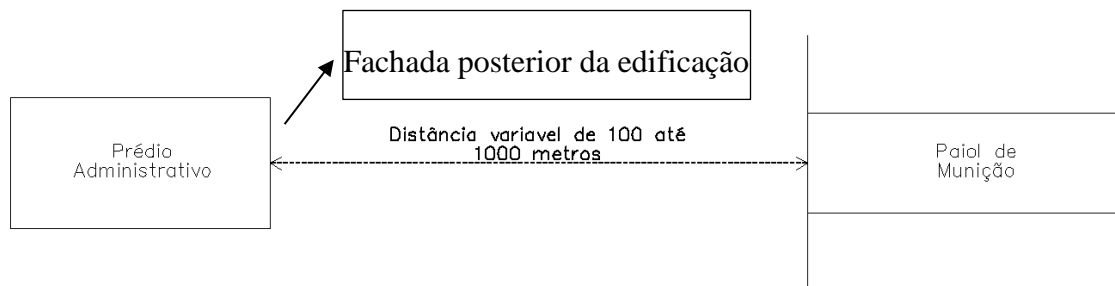


Figura 3.5 – Planta de localização

3.1.1 Forças devidas à ação do vento – NBR 6123

Para a determinação da pressão dinâmica (q) devida à ação do vento com a equação (3-1), é necessário determinar a velocidade característica de vento V_k .

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (3-1)$$

A velocidade característica do vento V_k , que é determinada pela equação (3-2), depende da velocidade básica de vento retirada da Figura 3.6. Nela está representado o mapa das isopletas do território brasileiro, considerando uma rajada de 3 segundos, a 10 metros acima do solo em campo aberto e plano, para um período de retorno de 50 anos.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (\text{m/s}) \quad (3-2)$$

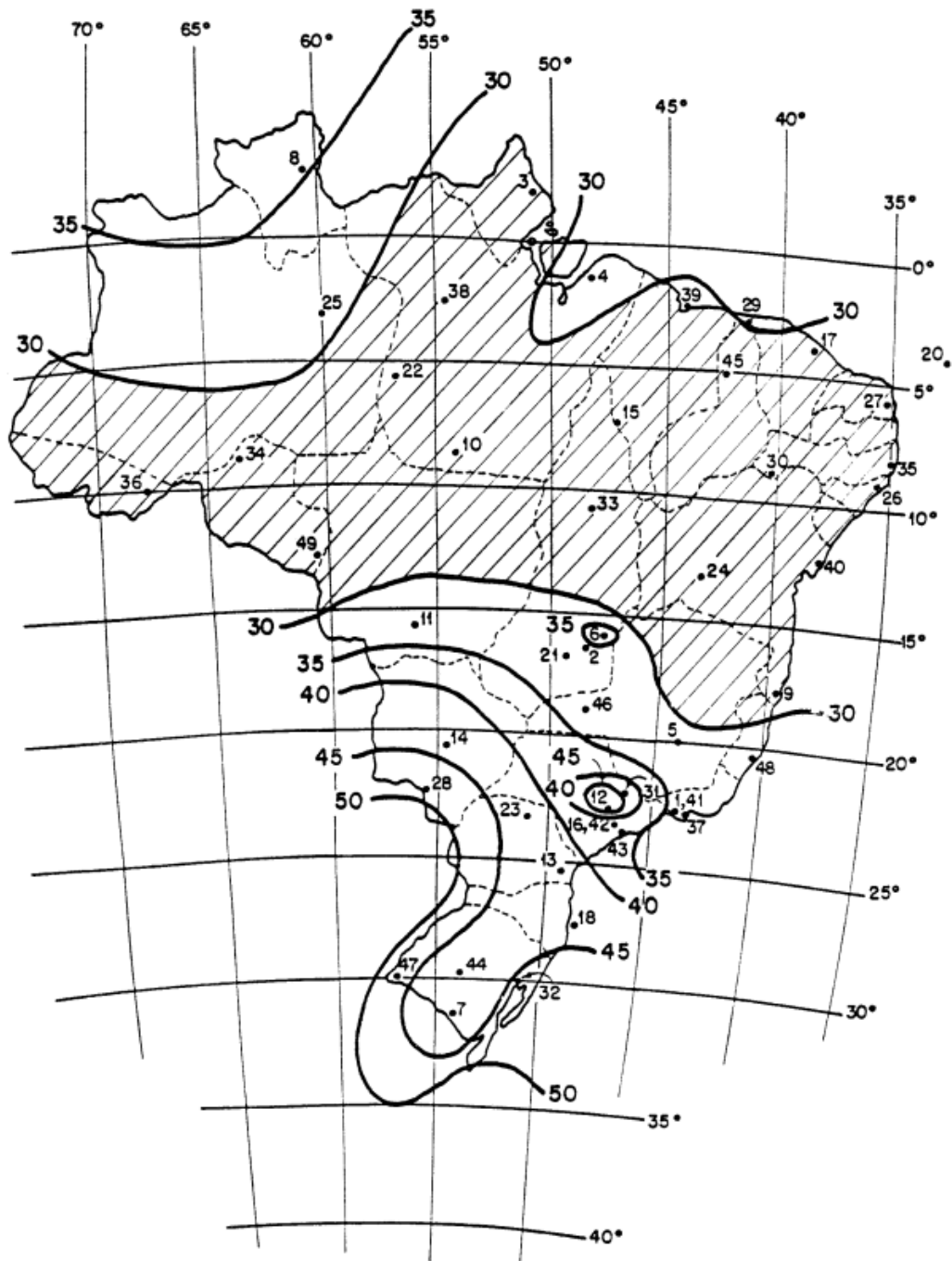


Figura 3.6 – Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s) (NBR 6123, 1988).

Valor adotado neste estudo, $V_0 = 35\text{m/s}$.

O fator topográfico S_1 leva em consideração as variações do relevo do terreno. Para terreno plano ou fracamente acidentado, é recomendado que S_1 seja considerado como igual a 1,00.

O fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou da parte da edificação em consideração.

Para fins da NBR 6123, a rugosidade do terreno é definida em cinco categorias e as edificações são divididas em três classes, A, B e C, com dimensões máximas inferiores a 20 metros, entre 20 e 50 metros e acima de 50 metros, respectivamente. Considerou-se a categoria II e a classe A para a edificação analisada.

Os parâmetros para S_2 , definidos pela NBR 6123 (1988) são apresentados na Tabela 3.

Interpolando-se para Classe II, Categoria A e altura de 7 metros, obtém-se o valor de S_2 igual a 0,97.

O fator estatístico S_3 é baseado em um nível de probabilidade de 63% de que a velocidade básica de projeto seja igualada ou excedida em um período de retorno de 50 anos (vida útil de 50 anos). A Tabela 4 fornecida pela NBR 6123 (1988) indica valores mínimos do fator S_3 . É adotado o valor $S_3 = 1,00$.

Tabela 3 – Tabela dos valores S_2 (NBR 6123, 1988).

Tabela 2 - Fator S_2															
z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

Tabela 4 – Valores mínimos do fator estatístico S_3 (NBR6123, 1988).

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Para a aplicação da pressão dinâmica de vento na estrutura, devem ser levados em consideração os fatores de forma, que dependem da geometria da estrutura. Para auxiliar nos cálculos e na obtenção dos valores, foi utilizado o programa VISUAL VENTOS (2003) que avalia automaticamente estes fatores.

A Figura 3.7 nos fornece os coeficientes de pressão externa na estrutura.

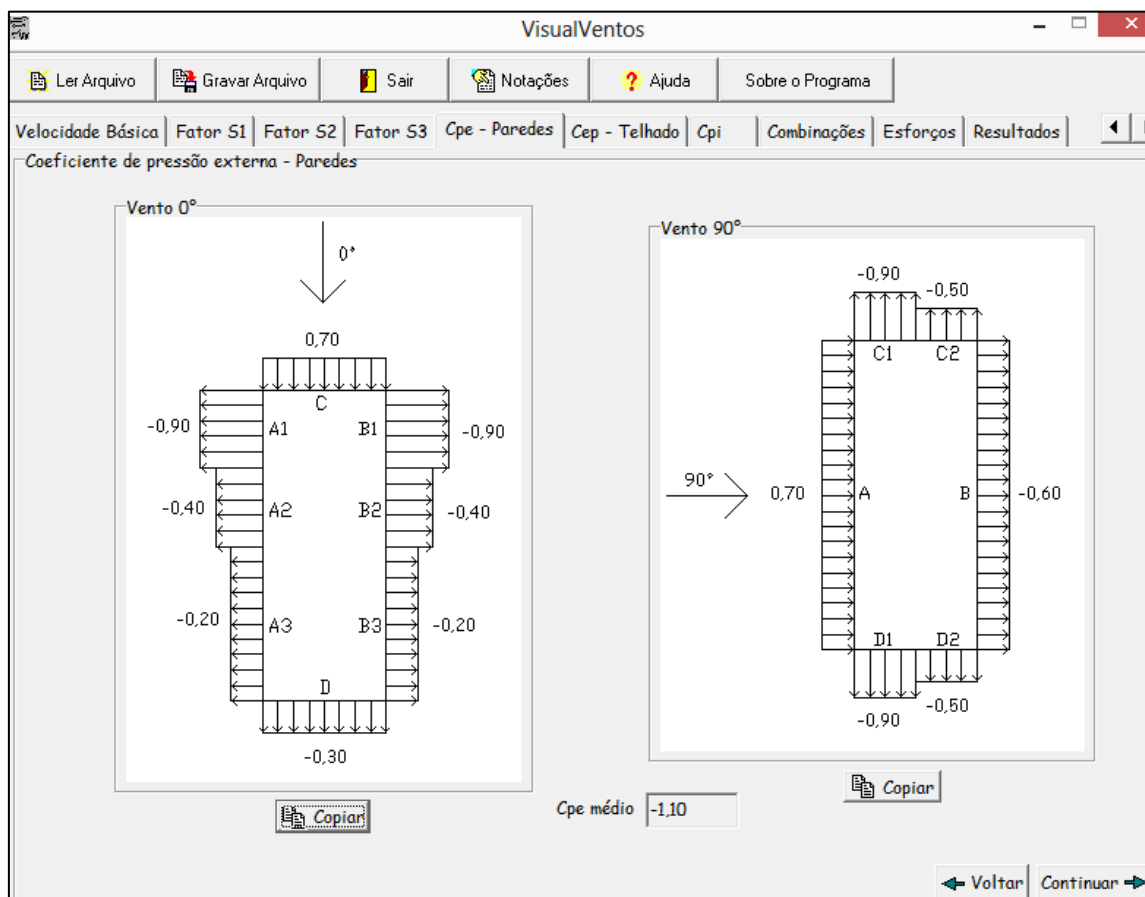


Figura 3.7 – Coeficiente de pressão externa (VISUAL VENTOS, 2003)

Obtêm-se, desta forma, os esforços resultantes considerando que a edificação é efetivamente estanque e com janelas fixas com probabilidade desprezável de serem rompidas por acidente (Figura 3.8).

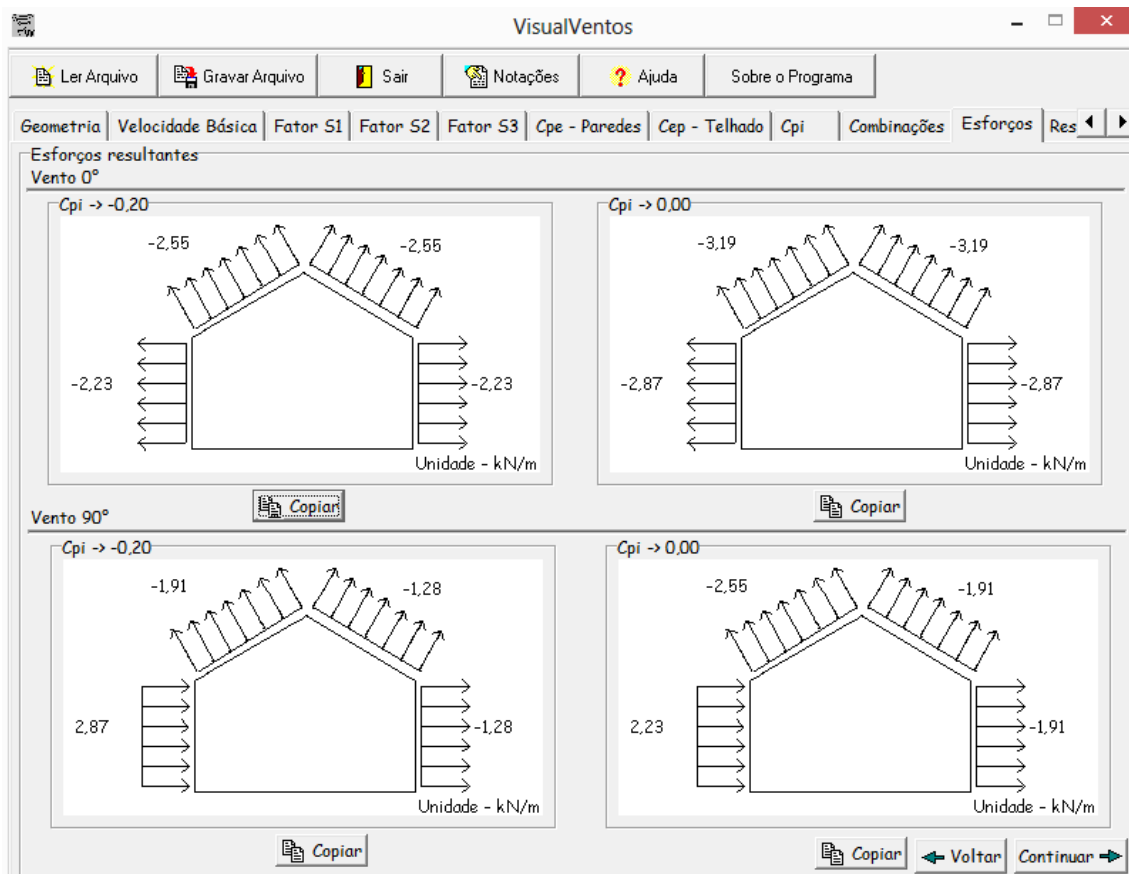


Figura 3.8 – Coeficientes de pressão externa (VISUAL VENTOS, 2003).

Os valores resultantes aplicados no modelo para o vento direção 0°, fachada com as dimensões de 10x7 metros, foram:

- Sobrepressão: 4,55 kN/m; e
- Sucção: -1,95 kN/m.

Os valores resultantes aplicados no modelo para o vento direção 90°, fachada lateral com as dimensões de 20x7 metros, foram:

- Sobrepressão: 9,1 kN/m; e
- Sucção: -7,8 kN/m.

3.1.2 Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – NBR 6120 (1980)

As cargas acidentais utilizadas na edificação, em função do seu uso (pessoas, móveis, materiais diversos, entre outros) foram:

- Para o 1º pavimento – 3,0 kN/m²; e
- Para a cobertura, inacessível às pessoas – 0,5 kN/m².

3.1.3 Cargas permanentes

As cargas permanentes utilizadas na edificação foram aplicadas diretamente na modelagem da edificação pelo programa SAP2000 (2016). O carregamento de 1,5 kN/m², referente ao revestimento foi aplicado aos pisos do 1º pavimento e da cobertura, como carga permanente.

3.1.4 Combinações de projeto

Para o dimensionamento da estrutura em situações de Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS) foram utilizadas as combinações da Tabela 5, conforme a ABNT NBR 6118 (2014). Além das combinações apresentadas na Tabela 5, foram utilizadas 13 (treze) combinações automáticas geradas pelo programa SAP2000 (2016).

Tabela 5 – Combinações ELU e ELS.

ELU	
COMB1	1,4PP + 1,4AC
COMB2	1,0PP + 1,4V0 + 0,7AC
COMB3	1,0PP + 1,4AC + 0,84V0
COMB4	1,0PP + 1,4V90 + 0,7AC
COMB5	1,0PP + 1,4AC + 0,84V90
COMB6 - Carga Excepcional	1,0PP + 1,00EXP
ELS	
COMB 6 - ELS/CQP	PP + 0,4AC
COMB 7 - ELS/CF	PP + 0,6V0 + 0,4AC
COMB 8 - ELS/CF	PP + 0,6V90 + 0,4AC

Nomenclatura adotada:

- PP - Carga Peso Próprio;
- AC - Carga Acidental;
- V0 - Carga Vento direção X;
- V90 - Carga Vento direção Y;
- EXP - Carga Explosão;
- CQP - Combinação Quase Permanente; e
- CF - Combinação Frequente.

As combinações excepcionais foram analisadas para os carregamentos específicos de explosão do paiol de munição, para 80 t de TNT, variando a distância.

3.1.5 Dimensionamento adotado

As vigas foram dimensionadas com armadura dupla de mesmo valor, de forma que ela suporta momentos positivos e negativos iguais. A Tabela 6 apresenta as armaduras adotadas para as vigas.

Tabela 6 – Valores mínimos do fator estatístico S_3 (NBR6123, 1988).

Seção	As = As' (cm ²)	Armadura Total Adotada
15x30	0,68	4 ϕ 8mm
20x40	11,91	8 ϕ 20mm
20x50	20,68	14 ϕ 20mm
30x50	13,83	10 ϕ 20mm

Pilares com seção de 35x35cm, armadura longitudinal com 12 ϕ 16 e estribos de 6,3c10.

3.2 Modelagem em elementos finitos

A modelagem tridimensional da edificação e a análise do carregamento resultante de uma explosão hipotética de um paiol de munição foram desenvolvidas no programa SAP2000 (2016). A fundação foi suposta como engastada. As vigas e os pilares foram modelados como elementos de barra. As lajes foram modeladas como elementos de casca. A Figura 3.9 mostra uma vista tridimensional do modelo.



Figura 3.9 – Vista tridimensional do modelo da edificação administrativa (SAP2000, 2016).

3.2.1 Rótulas plásticas

De acordo com as seções e as armaduras de vigas e pilares, foram definidas as rótulas plásticas no modelo para a análise estática não-linear. A Figura 3.10 mostra a definição dos pilares e a Figura 3.11 mostra a definição das rótulas plásticas de uma das vigas (a de seção 20x40cm).

As armaduras dos pilares são simétricas. As vigas foram consideradas com armaduras duplas, para suportar momentos positivos e negativos com mesma intensidade.

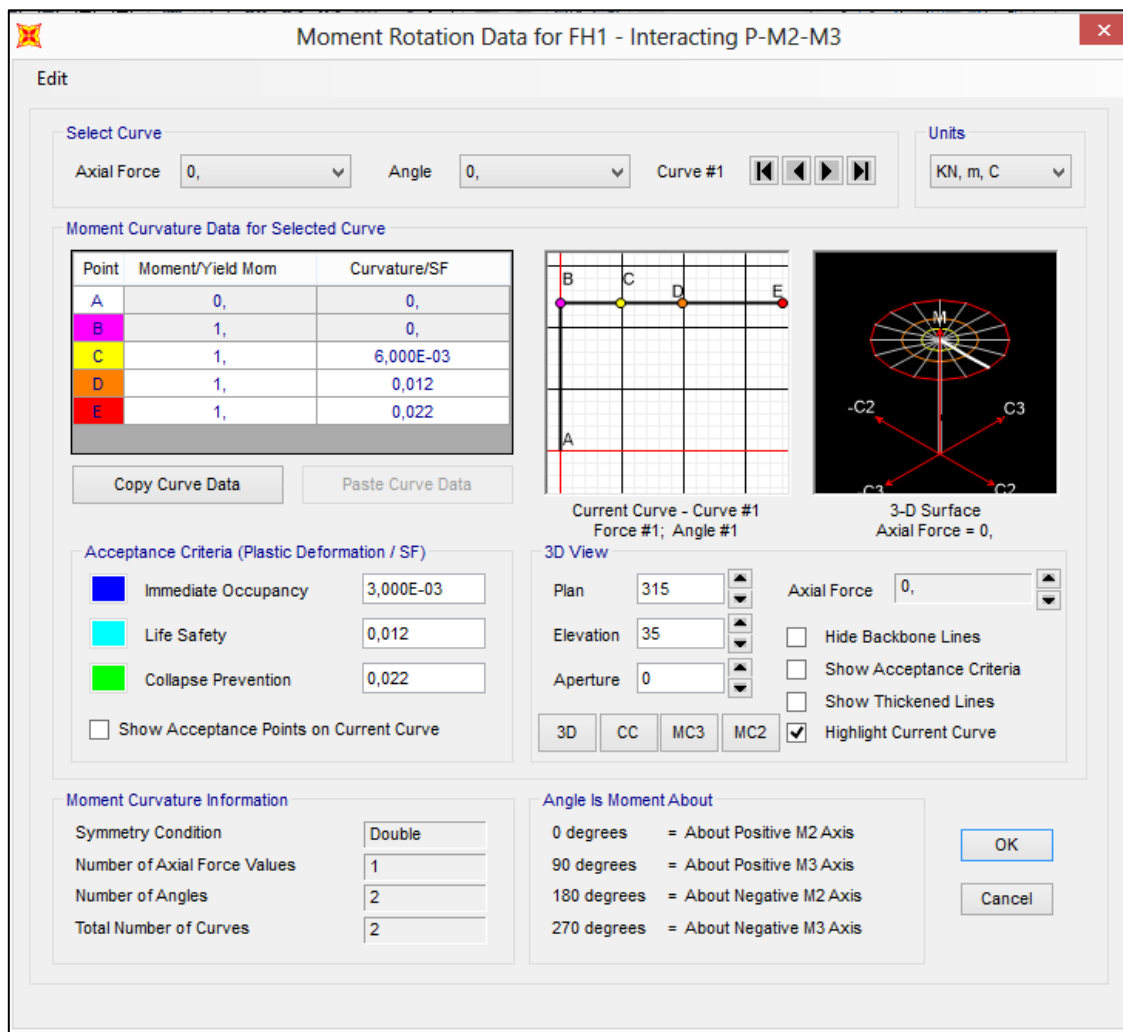


Figura 3.10 – Definição da rótula plástica para os pilares de 35x35cm (SAP2000, 2016).

Para os pilares, o programa SAP2000 (2016) permite ao usuário entrar com o fator entre momento resistente e momento solicitante, relacionando o raio máximo de curvatura, definida de acordo com a seção do pilar. Os valores da deformação plástica pelo fator de segurança são para definir as cores que aparecerão no modelo quando a rótula plástica for acionada.

Para as vigas, o programa SAP2000 (2016) permite ao usuário informar o momento máximo que a viga suporta e o comprimento do raio de curvatura para o momento máximo.

Assim como na definição de rótulas plásticas para os pilares, o usuário fornece a relação entre momento solicitado e momento máximo, com o seu correspondente raio de curvatura.

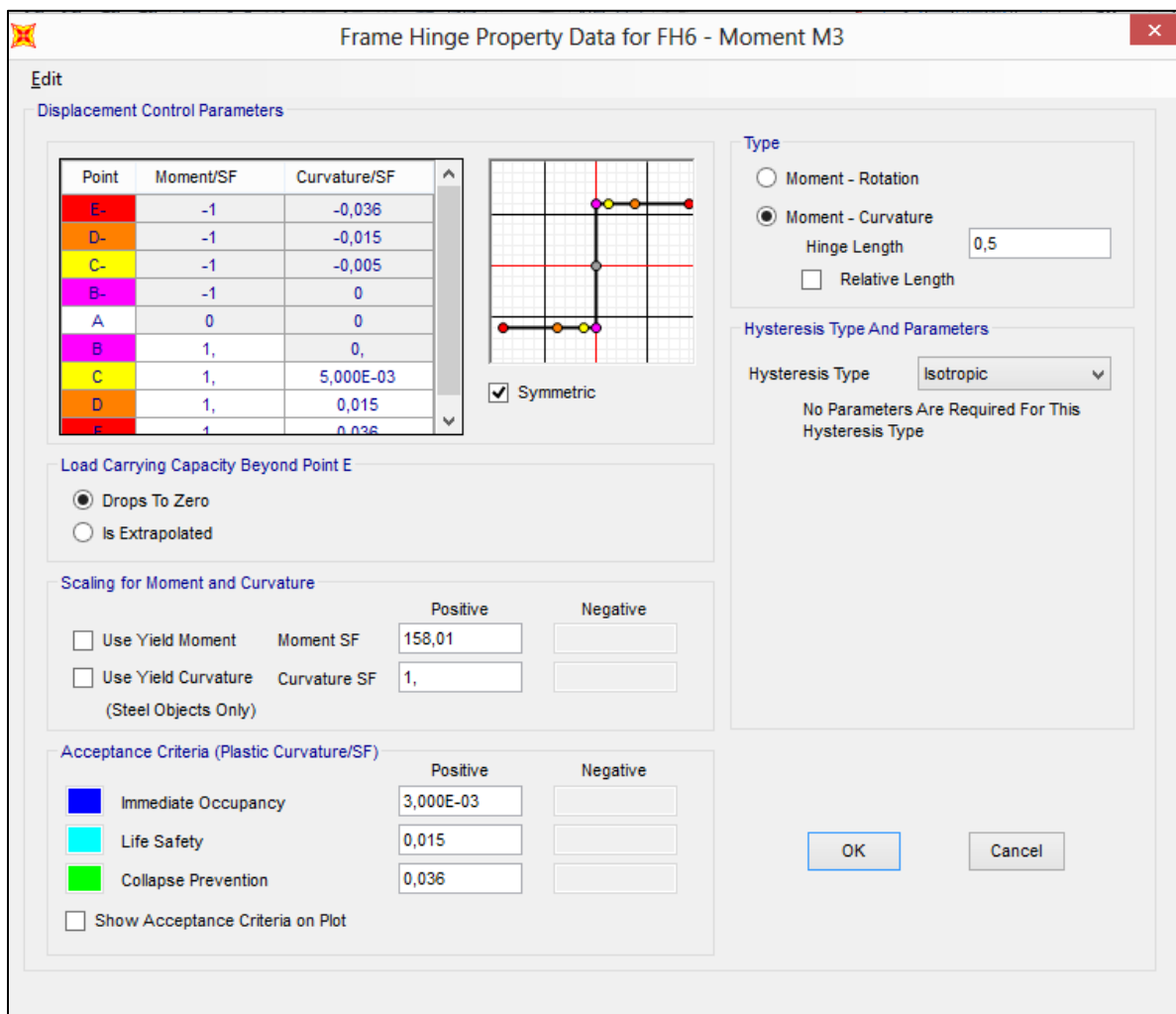


Figura 3.11 – Definição da rótula plástica para as vigas de 20x40cm (SAP2000, 2016).

3.2.2 Carregamento devido à explosão de TNT equivalente

Os carregamentos devidos à explosão de um paiol de munição hipotético foram inseridos no programa SAP2000 (2016) como funções no tempo, pressão (kN/m²) x tempo (s). A Figura 3.12 mostra a janela com a definição das funções aplicadas e as Figuras de 3.13 até 3.22 mostram as funções de explosão de 100 metros até 1000 metros inseridas no SAP2000.

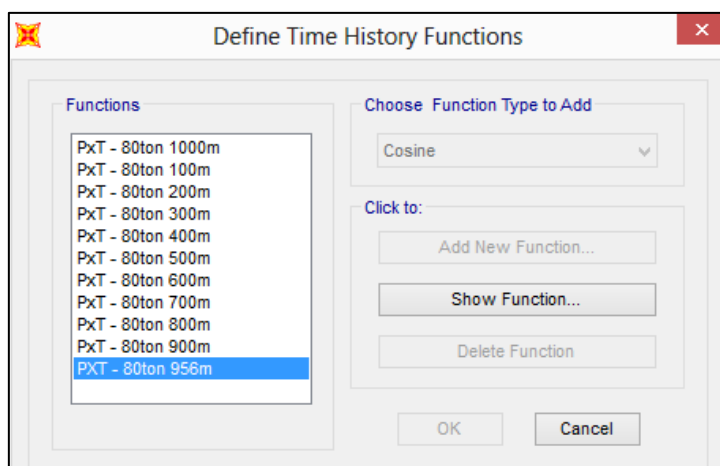


Figura 3.12 – Funções no tempo inseridas no programa SAP2000 (2016)

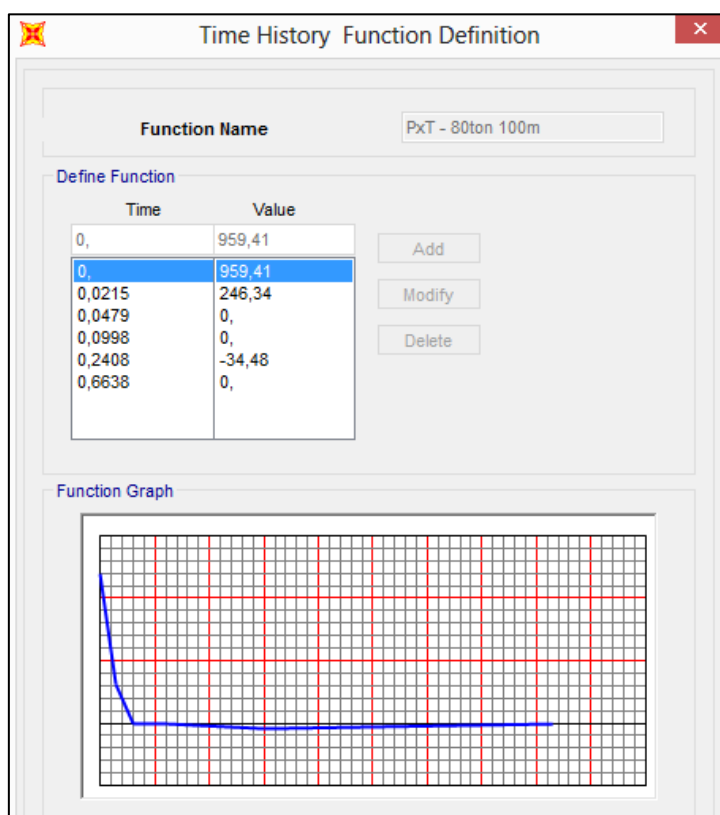


Figura 3.13 – Função da explosão de 80 t de TNT a 100 metros (SAP2000, 2016).

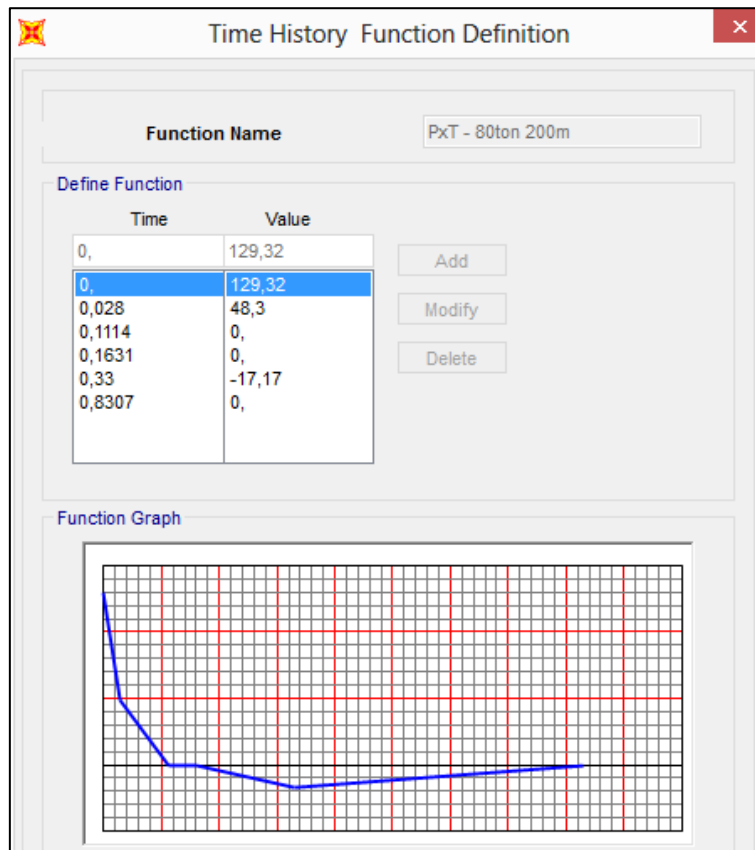


Figura 3.14 – Função da explosão de 80 t de TNT a 200 metros (SAP2000, 2016)

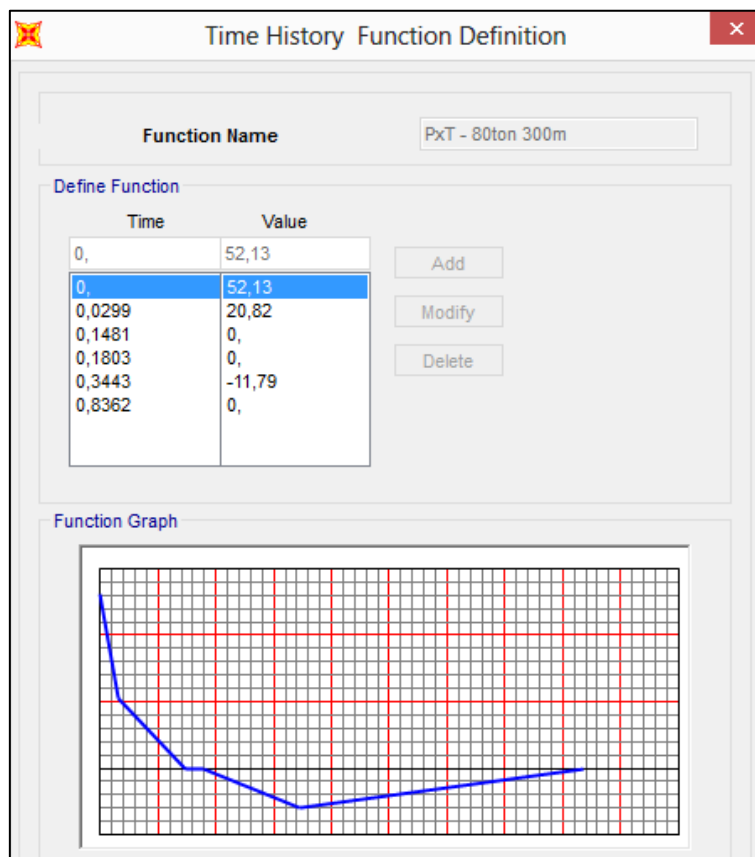


Figura 3.15 – Função da explosão de 80 t de TNT a 300 metros (SAP2000, 2016)

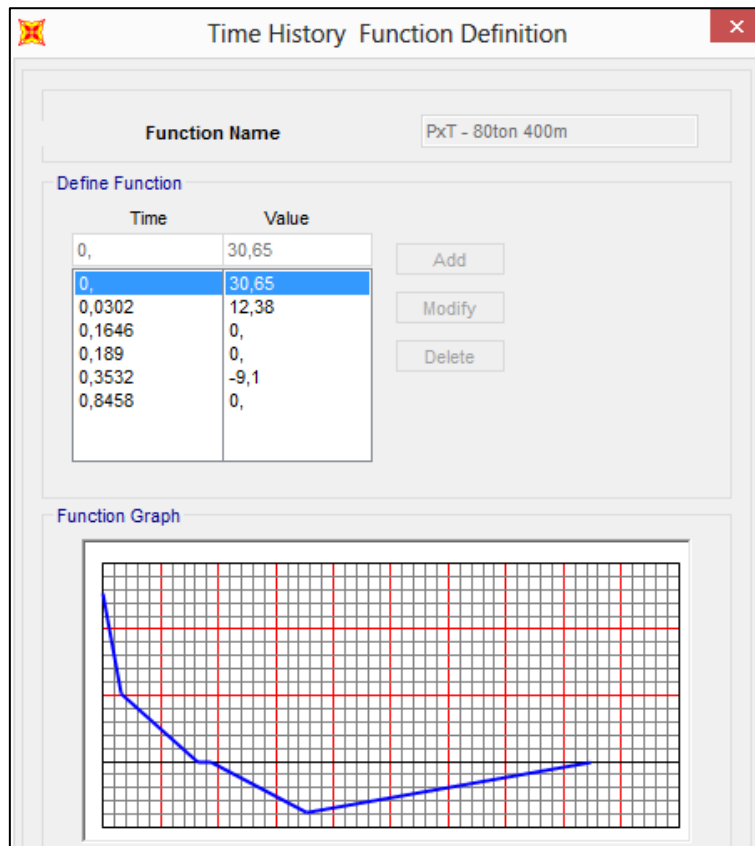


Figura 3.16 – Função da explosão de 80 t de TNT a 400 metros (SAP2000, 2016)

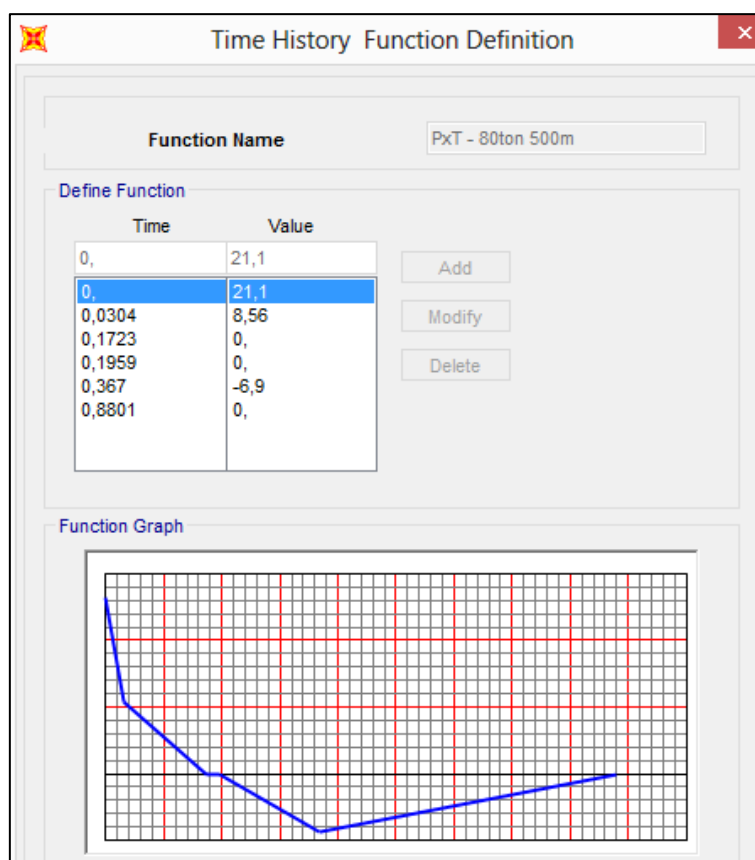


Figura 3.17 – Função da explosão de 80 t de TNT a 500 metros (SAP2000, 2016)

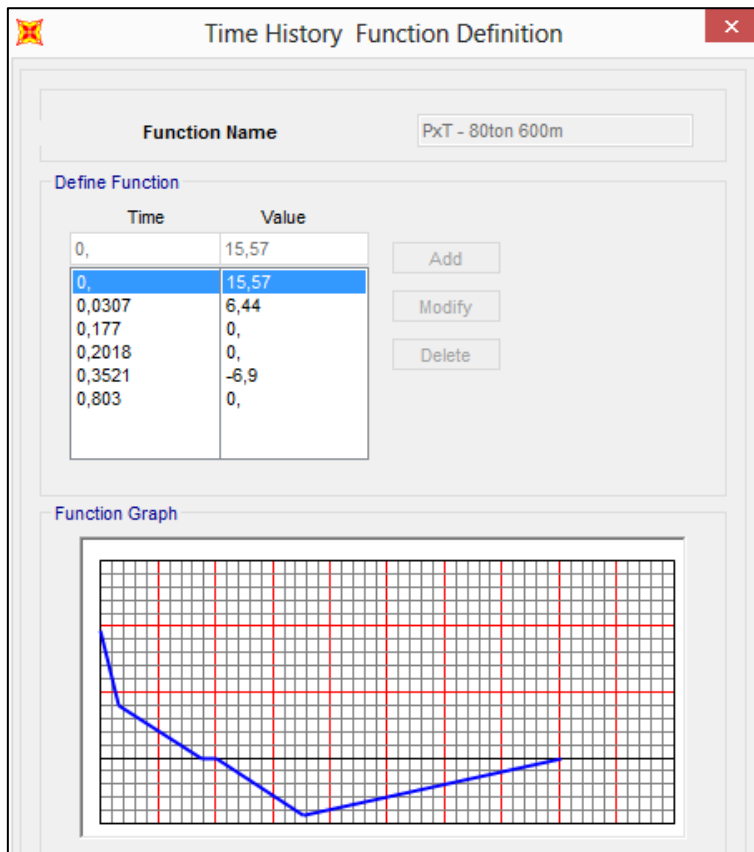


Figura 3.18 – Função da explosão de 80 t de TNT a 600 metros (SAP2000, 2016).

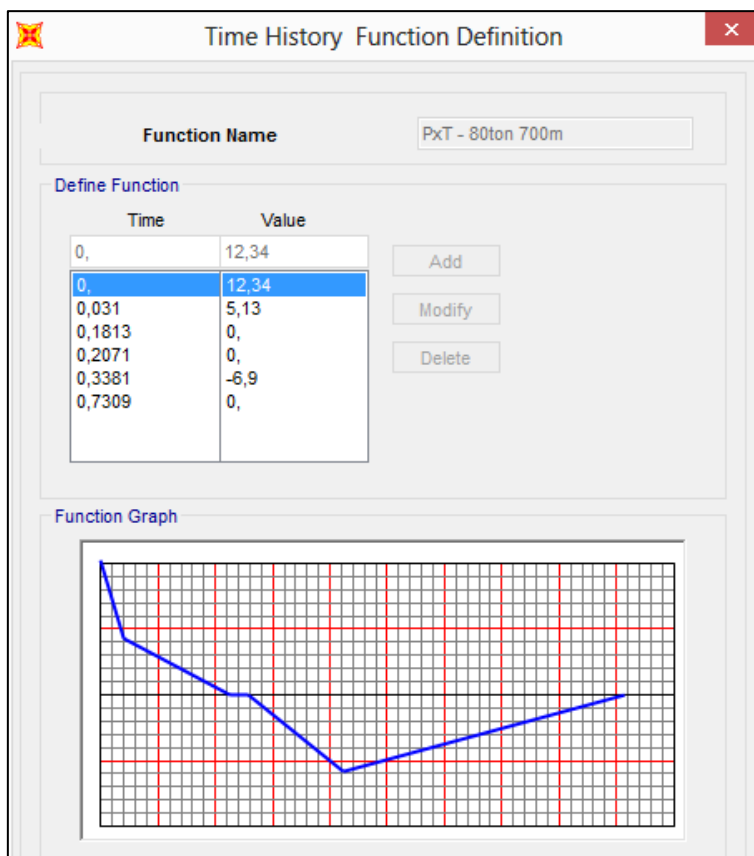


Figura 3.19 – Função da explosão de 80 t de TNT a 700 metros (SAP2000, 2016)

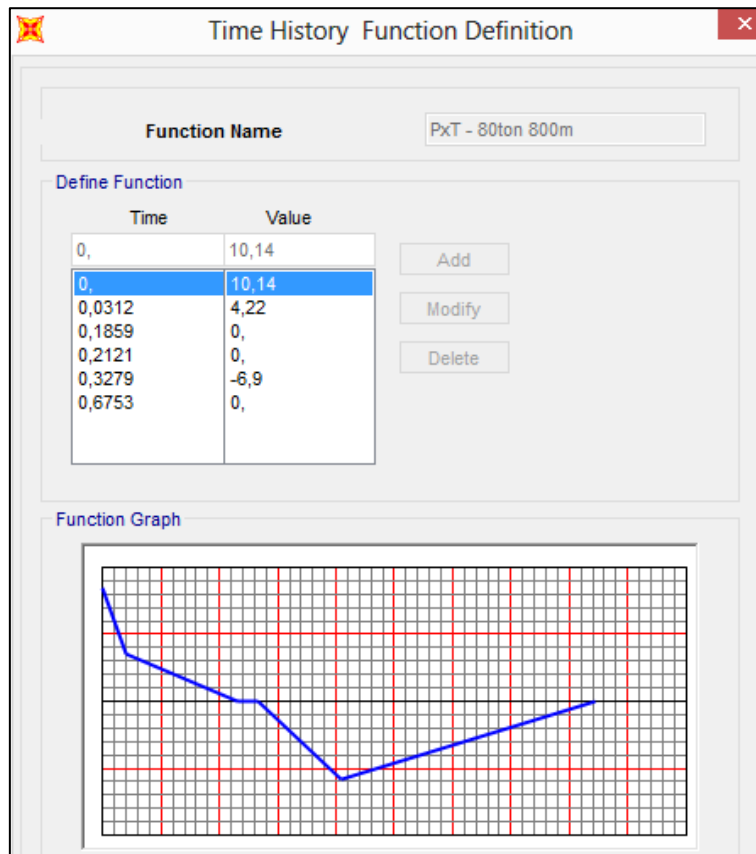


Figura 3.20 – Função da explosão de 80 t de TNT a 800 metros (SAP2000, 2016).

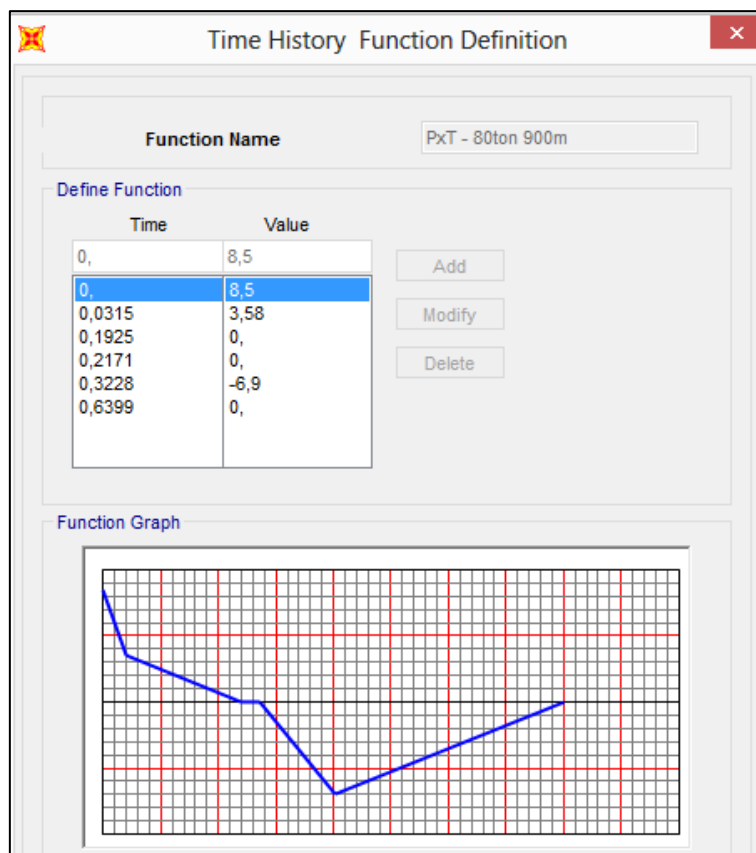


Figura 3.21 – Função da explosão de 80 t de TNT a 900 metros (SAP2000, 2016).

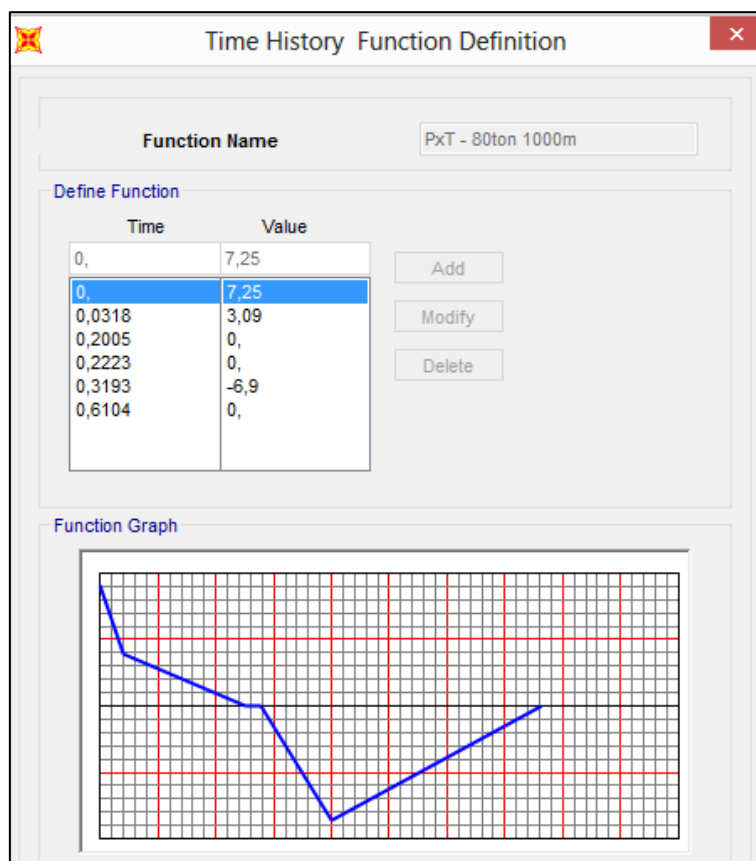


Figura 3.22 – Função da explosão de 80 t de TNT a 1000 metros (SAP2000,2016)

3.2.3 Análise pushover automatizada

A análise *pushover* automatizada foi executada com o auxílio do programa SAP2000 (2016). O caso de carga do *pushover* foi criado a partir da tela de comando mostrada na Figura 3.23, como uma análise estática não linear.

A consideração dos esforços globais de 2ª ordem foi dispensada conforme o item 15.5 da NBR 6118 (2014), podendo a estrutura ser considerada como sendo de nós fixos. Os efeitos locais de 2ª ordem também não foram considerados, visto que de acordo com as prescrições do item 15.8.2 da NBR 6118 (2014), estes efeitos locais de 2ª ordem também podem ser desprezados (o índice de esbeltez do pilar é menor que 35).

A condição inicial para a análise foi o peso próprio da estrutura, definido como *DEAD*. As cargas acidentais foram aplicadas nos elementos de área. As cargas de vento para a análise foram aplicadas nos nós da estrutura, considerando o perfil de vento oriundo da Norma Brasileira de Vento, a NBR 6123 (1988).

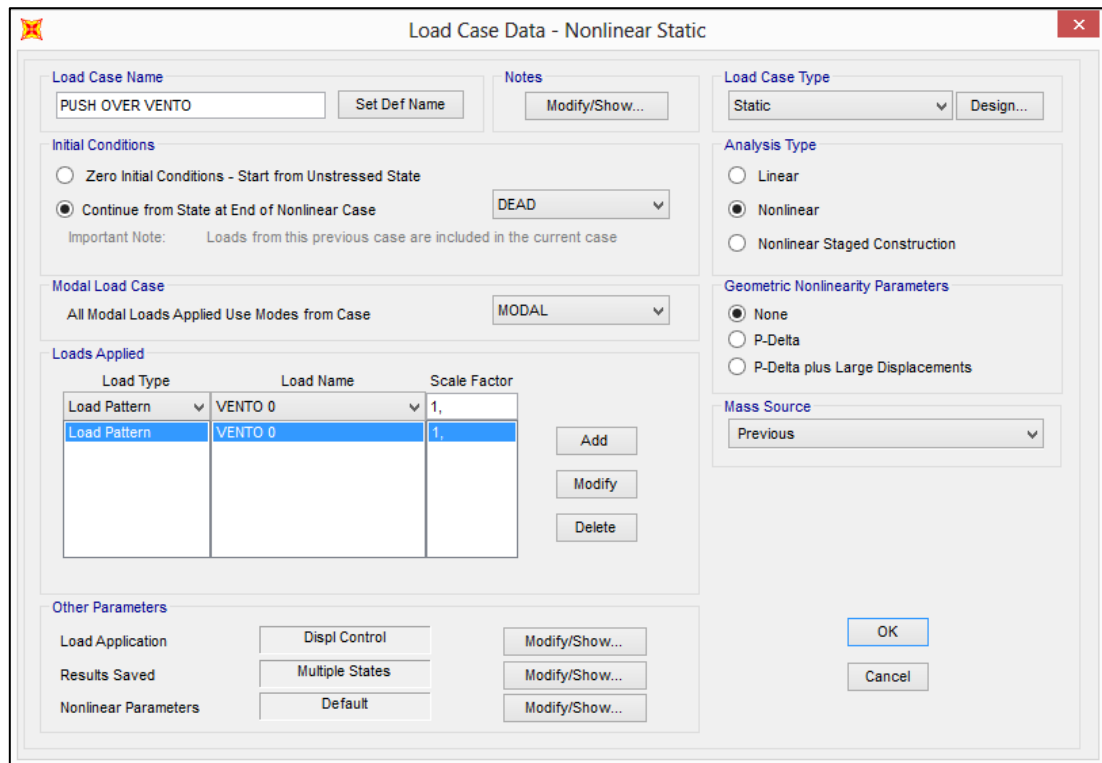


Figura 3.23 – Definição do caso de carga *pushover* para a análise não-linear, SAP2000 (2016).

O tipo de controle realizado foi o de controle de deslocamentos, com os deslocamentos monitorados no nó 133, identificado como nó A (ver Figura 3.24), na direção longitudinal da edificação (direção U1 ou direção X), ver Figura 3.25.

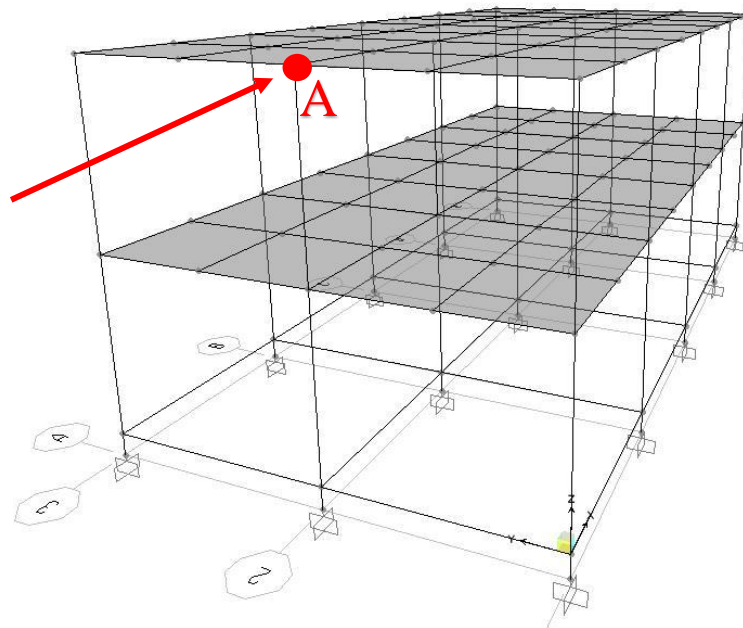


Figura 3.24 – Nó A do modelo tridimensional, SAP2000 (2016).

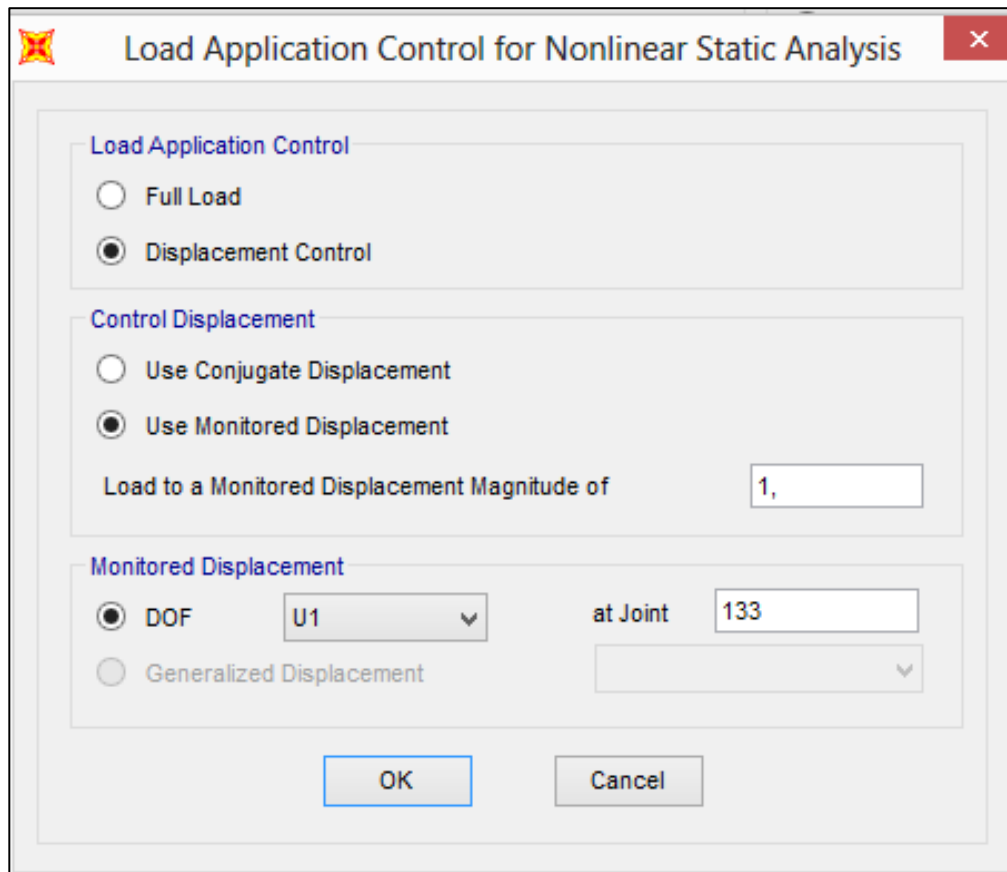


Figura 3.25 – Controle do carregamento do caso de carga *pushover* para a análise não-linear, SAP2000 (2016).

3.3 Verificação do pré-dimensionamento e dimensionamento

Após o processamento da estrutura no programa SAP2000 (2016), a estrutura foi verificada conforme as prescrições da NBR6118 (2014) para os carregamentos nos Estados Limites Últimos (ELU) e nos Estados Limites de Serviço (ELS), para o carregamento normal de operação (para forças normais, forças cortantes, momentos fletores e momentos torsões), sem considerar a explosão do paiol de munição.

A Tabela 7 apresenta as reações globais na base do modelo para as combinações de carregamento aplicadas no modelo.

Tabela 7 – Reações globais na base do modelo tridimensional para as combinações de carregamento ELU e ELS.

Caso	Global FX	Global FY	Global FZ
Combinação	kN	kN	kN
ELU - 1,4PP+1,4AC	2,029E-12	2,577E-11	10440,937
ELU - 1,0PP+1,4V0+0,7AC	-51,842	2,456E-11	6670,312
ELU - 1,0PP+1,4AC+0,84V0	-31,105	2,961E-11	8507,812
ELU - 1,0PP+1,4V90+0,7AC	3,313E-11	-78,277	6670,312
ELU - 1,0PP+1,4AC+0,84V90	1,982E-11	-46,966	8507,812
ELS/CQP - PP+0,4AC	2,111E-12	1,064E-11	5882,812
ELS/CF - PP+0,6V0+0,4AC	-22,218	1,494E-11	5882,812
ELS/CF - PP+0,6V90+0,4AC	1,555E-11	-33,547	5882,812

A Figura 3.26 mostra a saída do programa SAP2000 (2016) para uma viga de cobertura com seção de 20x40. Se comparado com o valor máximo de momento que a viga suporta de 158,0 kNm, apresentado na Figura 3.11, o valor solicitante da viga é menor, 57,2 kNm.

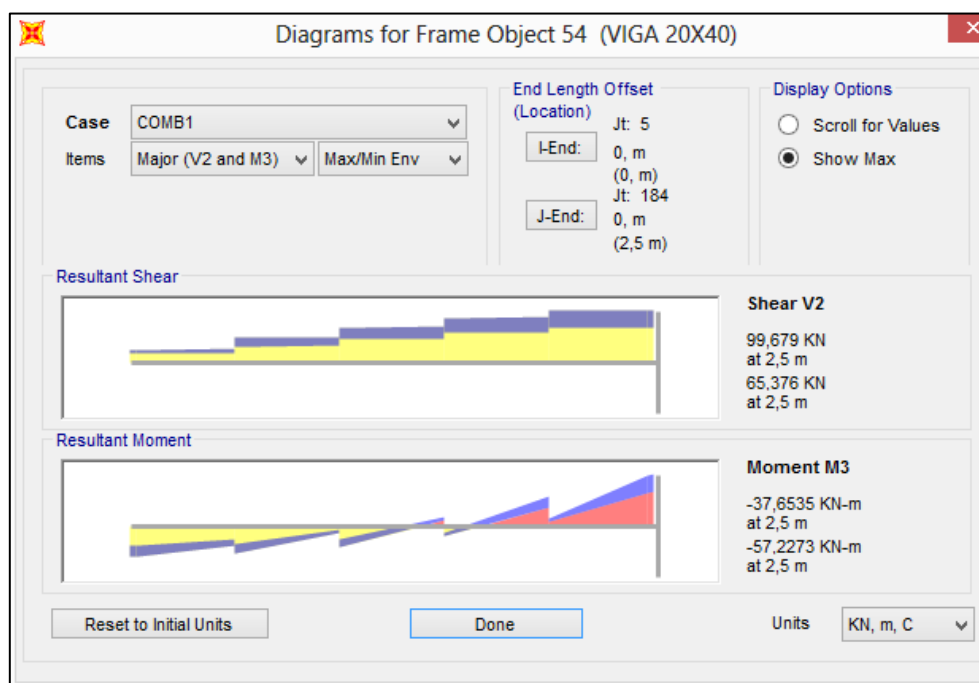


Figura 3.26 – Apresentação do momento e cortante da viga de seção 20x40 para a envoltória do ELU e ELS, SAP2000 (2016).

Entretanto, deve-se levar em conta para o dimensionamento das vigas a combinação de momentos, cortantes e forças normais aplicadas nas vigas.

Considerando esses fatores, a edificação administrativa resiste aos esforços no ELU e ELS.

3.4 Resultados e análise modal

O modelo tridimensional tem como peso próprio 4833 kN.

A Tabela 8 apresenta os modos de vibração da estrutura. O segundo módulo de vibração corresponde ao movimento global do modelo tridimensional na direção X a de interesse nesta análise, que tem a maior porcentagem de participação modal da massa.

Tabela 8 – Períodos e frequências modais não lineares.

Nº modo	Período	Frequência	Porcentagem participação modal da massa
	Seg.	Ciclo/seg.	UX (sem unidade)
1	0,3601	2,7768	1,07E-20
2	0,3517	2,8434	0,83677
3	0,2971	3,3653	1,425E-20
4	0,1336	7,4841	1,771E-14
5	0,1323	7,5611	0,05944
6	0,1133	8,8273	3,592E-14
7	0,0677	14,7802	2,205E-15
8	0,0665	15,0377	1,444E-05
9	0,0660	15,1478	2,426E-18
10	0,0651	15,3728	1,852E-14
11	0,0631	15,8376	3,711E-15
12	0,0622	16,0731	1,257E-07

3.4.1 Carregamentos das funções de explosão

Os resultados apresentados neste subitem foram obtidos carregando o modelo tridimensional com as funções inseridas no SAP2000 (2016) obtidas no item 3.2.2. Os carregamentos foram inseridos nos nós da fachada do modelo tridimensional, na direção X (Figura 3.27).

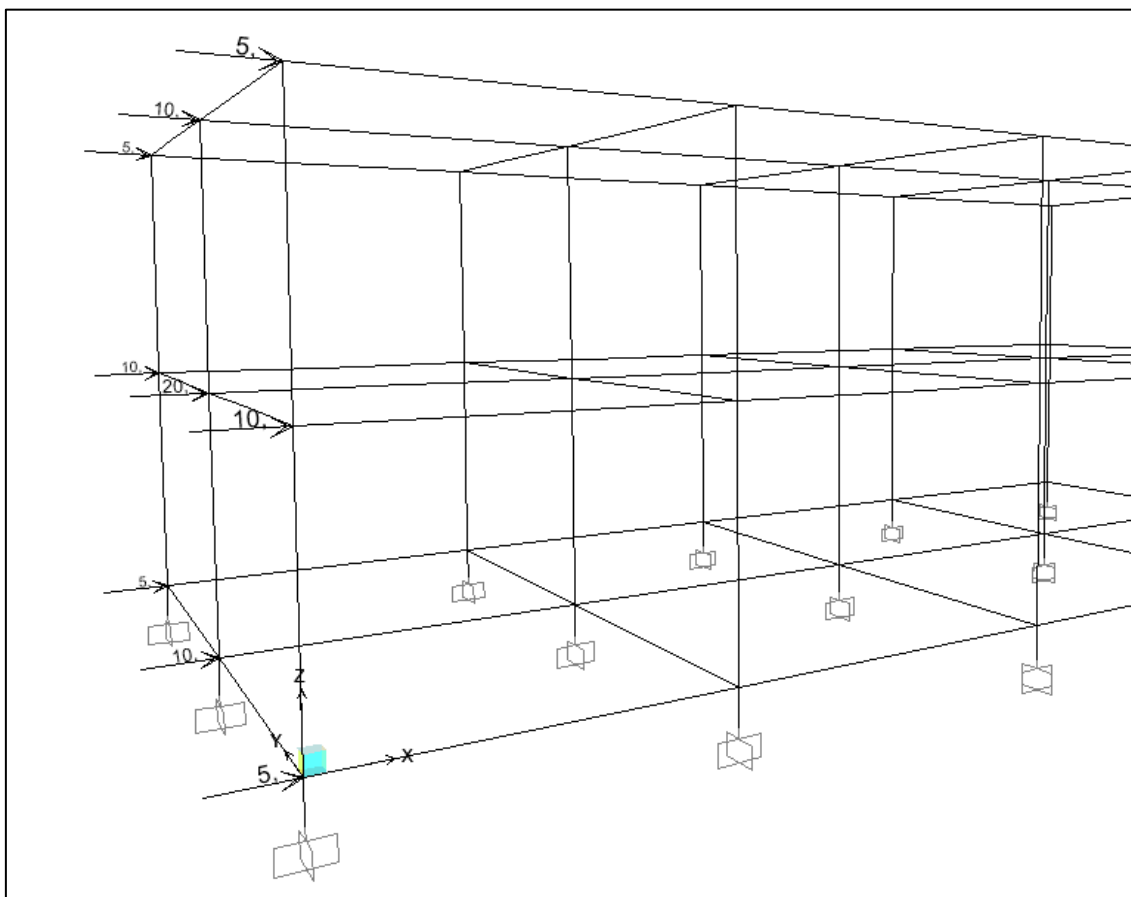


Figura 3.27 – Aplicação nodal do carregamento devido à explosão de 80 t de TNT a 100 metros, SAP2000 (2016).

Na Tabela 9 são apresentadas as reações na base do modelo tridimensional para a explosão de 80 toneladas de TNT em um paiol de munição, variando de 100 até 1000 metros. Para cada caso serão apresentados os valores máximos e mínimos obtidos.

Tabela 9 – Reações globais na base do modelo tridimensional para os carregamentos de 80 t de TNT.

Caso	Carregamento	Global Fx	Global Fy	Global Fz
		kN	kN	kN
80ton 100metros	Max	13668,711	0,005	2,191
80ton 100metros	Min	-12534,095	-0,004	-1,833
80ton 200metros	Max	2994,013	0,000	0,183
80ton 200metros	Min	-2728,582	0,000	-0,104
80ton 300metros	Max	1462,788	0,000	0,091
80ton 300metros	Min	-1277,383	0,000	-0,035
80ton 400metros	Max	890,61	0,000	0,056
80ton 400metros	Min	-775,022	0,000	-0,022
80ton 500metros	Max	603,156	0,000	0,039
80ton 500metros	Min	-540,468	0,000	-0,018
80ton 600metros	Max	503,826	0,000	0,029
80ton 600metros	Min	-407,162	0,000	-0,015
80ton 700metros	Max	514,867	0,000	0,024
80ton 700metros	Min	-326,017	0,000	-0,015
80ton 800metros	Max	516,111	0,000	0,02
80ton 800metros	Min	-269,62	0,000	-0,016
80ton 900metros	Max	512,819	0,000	0,017
80ton 900metros	Min	-229,657	0,000	-0,016
80ton 1000metros	Max	506,799	0,000	0,015
80ton 1000metros	Min	-199,11	0,000	-0,015

Na Tabela 10 serão apresentados os deslocamentos para o nó A devido aos carregamentos a explosão de 80 toneladas de TNT no paiol de munição, variando de 100 até 1000 metros. Para cada caso serão apresentados os valores máximos e mínimos obtidos.

Tabela 10 – Deslocamento do nó A do modelo tridimensional devido a uma explosão de 80 toneladas de TNT, variando de 100 até 1000 metros.

Caso	Carregamento	U1 (X)	U2 (Y)	U3 (Z)
		m	m	m
80ton 100metros	Max	0,2264	0,0000	0,0018
80ton 100metros	Min	-0,2129	0,0000	-0,0016
80ton 200metros	Max	0,0516	0,0000	0,0004
80ton 200metros	Min	-0,0528	0,0000	-0,0004
80ton 300metros	Max	0,0229	0,0000	0,0002
80ton 300metros	Min	-0,0250	0,0000	-0,0002
80ton 400metros	Max	0,0137	0,0000	0,0001
80ton 400metros	Min	-0,0152	0,0000	-0,0001
80ton 500metros	Max	0,0095	0,0000	0,0001
80ton 500metros	Min	-0,0103	0,0000	-0,0001
80ton 600metros	Max	0,0071	0,0000	0,0000
80ton 600metros	Min	-0,0080	0,0000	-0,0001
80ton 700metros	Max	0,0057	0,0000	0,0000
80ton 700metros	Min	-0,0075	0,0000	0,0000
80ton 800metros	Max	0,0047	0,0000	0,0000
80ton 800metros	Min	-0,0078	0,0000	0,0000
80ton 900metros	Max	0,0040	0,0000	0,0000
80ton 900metros	Min	-0,0079	0,0000	0,0000
80ton 1000metros	Max	0,0034	0,0000	0,0000
80ton 1000metros	Min	-0,0079	0,0000	-0,0001

3.4.2 Análise *pushover* automatizada

A Tabela 11 apresenta os valores de reação da base do modelo tridimensional para o caso da análise *pushover*.

Tabela 11 – Reação na base do modelo tridimensional na análise *pushover*.

Caso	Carregamento	Global F _x	Global F _y	Global F _z
		kN	kN	kN
PUSH OVER VENTO	Max	0,000	0,000	4832,81
PUSH OVER VENTO	Min	-2185,368	0,000	4832,81

A Tabela 12 apresenta os valores máximo e mínimo do deslocamento do nó A para o caso da análise *pushover*.

Tabela 12 – Deslocamento do nó A do modelo tridimensional na análise *pushover*.

Caso	Carregamento	U1 (X)	U2 (Y)	U3 (Z)
		m	m	m
PUSH OVER VENTO	Max	0,0422	0,0000	0,0002
PUSH OVER VENTO	Min	0,0000	0,0000	-0,0005

Nas Figuras 3.28 e 3.29 são apresentadas imagens da formação inicial da rótula plástica e na ruptura, respectivamente.

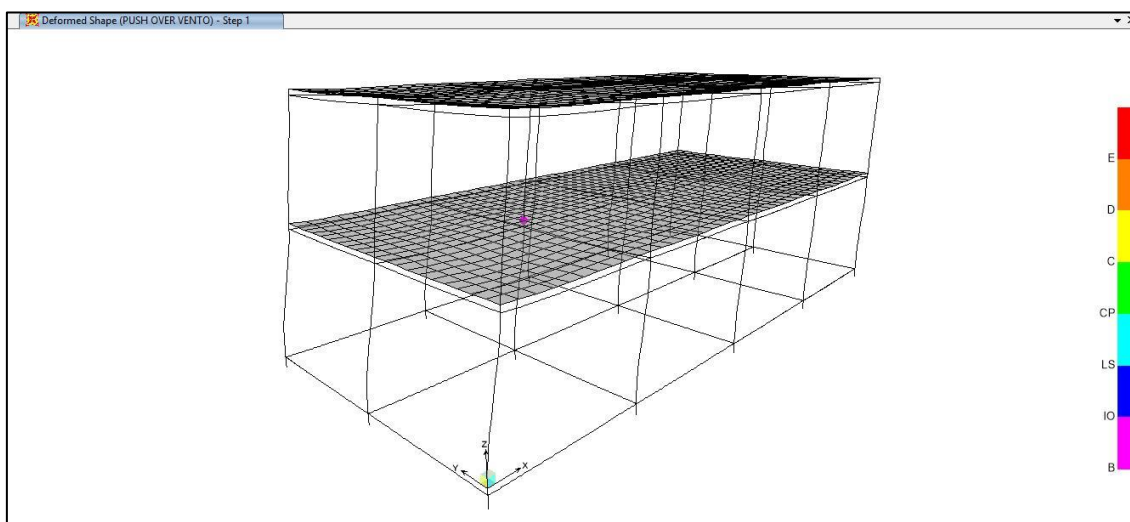


Figura 3.28 – Início da formação de rótulas plásticas, SAP2000 (2016).

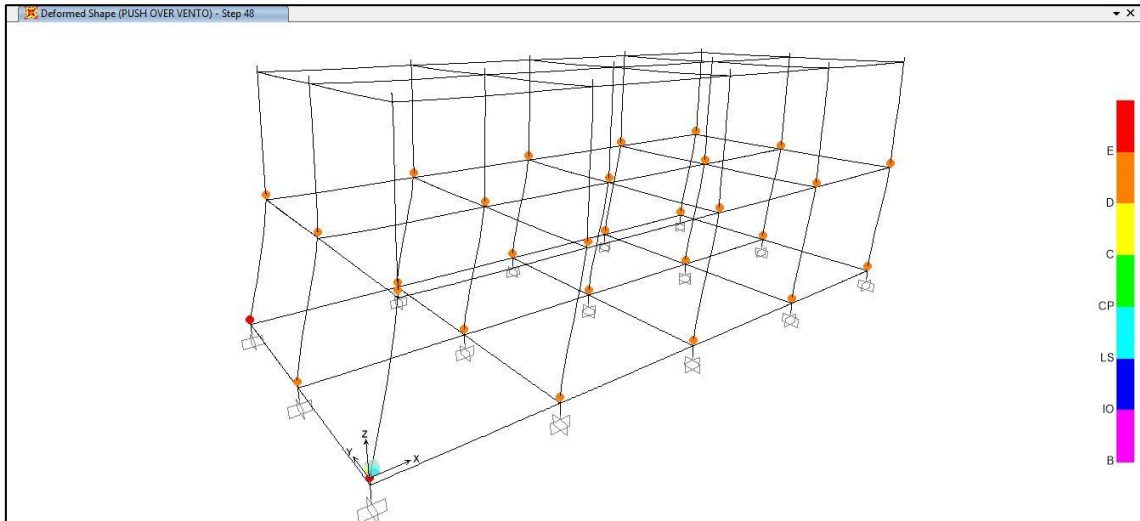


Figura 3.29 – Final da formação de rótulas plásticas, na ruptura, SAP2000 (2016).

A Figura 3.30 mostra o resultado em forma de gráfico do modelo tridimensional na análise *pushover*. O modelo reage elasticamente até a força de 1982 kN, com o deslocamento de 21,26mm. A estrutura deforma até o deslocamento de 42,2 mm, com a força de 2285 kN, quando ocorre a ruptura.

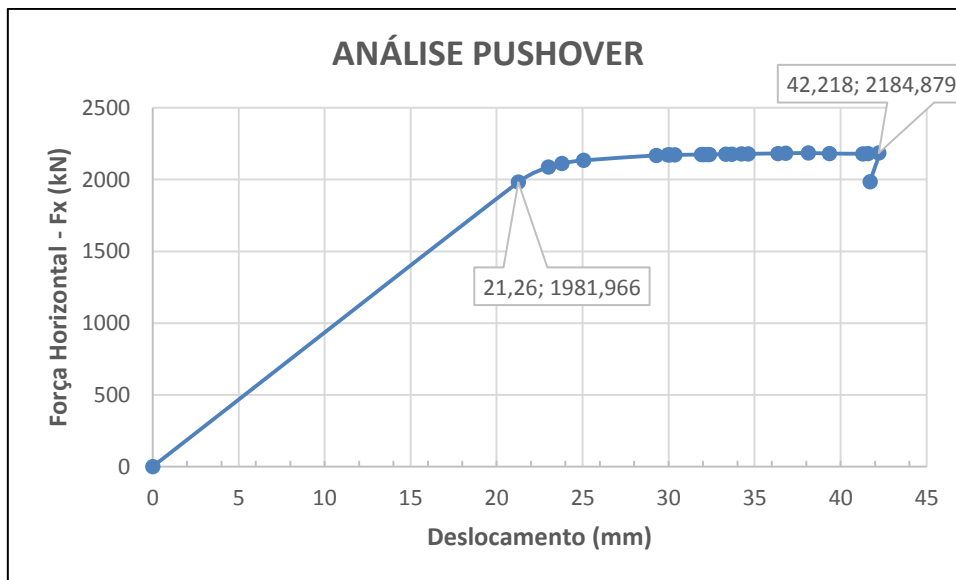


Figura 3.30 – Gráfico força versus deslocamento, no modelo tridimensional, durante a análise *pushover*.

A ductilidade do sistema é calculada dividindo-se o deslocamento plástico pelo deslocamento elástico. O valor obtido é de 1,99.

4 ANÁLISE NO REGIME NÃO LINEAR

Aplicando-se para os projetos de estruturas resistentes à explosão a mesma metodologia utilizada para projetos de estruturas resistentes a sismos, o dimensionamento considerando o comportamento elástico dos materiais também neste caso não se apresenta econômico.

Assim, considera-se o comportamento não-linear das estruturas associado às deformações geradas pelo carregamento a elas aplicados. Dessa forma, as estruturas deverão deformar além do seu regime elástico, dissipando, assim, uma grande quantidade de energia antes da ruptura final, fazendo com que toda a sua capacidade resistente seja utilizada.

De uma forma simplificada, as normas de sismo introduzem coeficientes de comportamento chamados de Coeficientes de Modificação de Resposta (R), que possibilitam uma análise elástica linear equivalente, uma vez que é mais conveniente e cômodo que a análise continue sendo feita com a hipótese de comportamento elástico.

A Figura 4.1 apresenta as definições necessárias para a análise não-linear aproximada para um sistema elastoplástico perfeito.

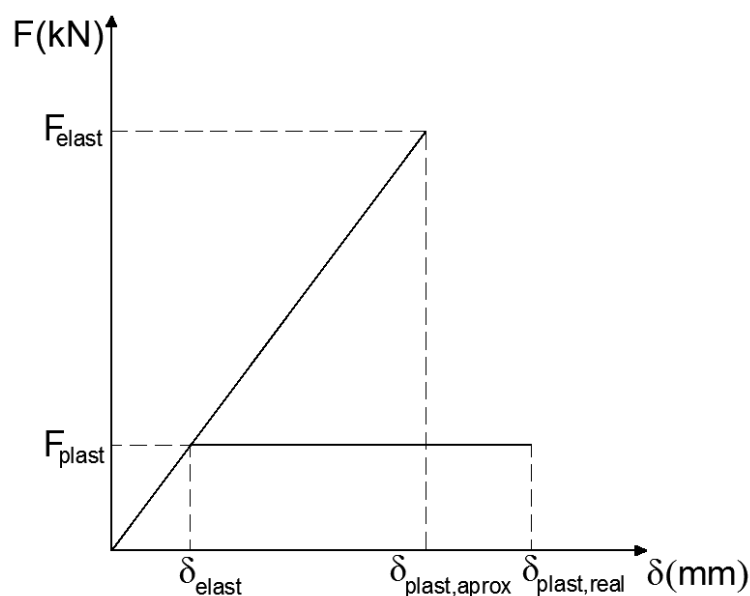


Figura 4.1 – Gráfico de força versus deslocamento, no regime elastoplástico.

O sistema não-linear real possui um valor máximo definido para a força a ser absorvida pelo o sistema, denominada F_{plast} . A análise dinâmica não linear determina o valor máximo do deslocamento real, $\delta_{\text{plast,real}}$. O deslocamento máximo para o qual o sistema ainda possui comportamento linear ou elástico é chamado de δ_{elast} . Realizando a análise deste sistema como elástico linear, com as mesmas propriedades dinâmicas, mas sem a limitação de F_{plast} , é obtida a força elástica máxima, F_{elast} , e o deslocamento máximo, $\delta_{\text{plast,aprox}}$.

As normas de projeto muitas vezes definem para a análise não-linear aproximada a hipótese do “mesmo deslocamento”, ou em outras palavras, que as estruturas com as mesmas propriedades dinâmicas apresentam o mesmo deslocamento quando analisadas como sistemas não-lineares ou lineares ($\delta_{\text{plast,real}} = \delta_{\text{plast,aprox}}$).

Logo, pode-se definir o Coeficiente de Modificação de Resposta (R) como a relação entre a força elástica e a força plástica ($R = F_{\text{elast}}/F_{\text{plast}}$). A ductilidade efetivamente requerida pelo sistema não linear é definida em função do deslocamento plástico real ($\mu = \delta_{\text{plast, real}}/\delta_{\text{elast}}$). Então, a hipótese do mesmo deslocamento nos conduz a $R = \mu$ ($\delta_{\text{plast, real}} = \delta_{\text{plast, aprox}}$).

É necessária a solução do problema de análise dinâmica dos sistemas elastoplásticos perfeitos para a avaliação da adequação desta hipótese.

4.1 Avaliação da Resposta ao Carregamento Dinâmico

4.1.1 Sistemas de um grau de liberdade

Considere-se um sistema massa-mola de um grau de liberdade ilustrado no esquema da Figura 4.2, onde podem ser visualizadas as forças atuantes, as forças resistentes e o diagrama de corpo livre. Escrevendo-se a equação de equilíbrio para a massa m , obtém-se a equação diferencial do movimento, na forma da Equação (4-1), em que k é a rigidez, c a constante de amortecimento, $p(t)$ a força excitadora e \ddot{u} , \dot{u} e u são, respectivamente, a aceleração, a velocidade e o deslocamento da massa.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (4-1)$$

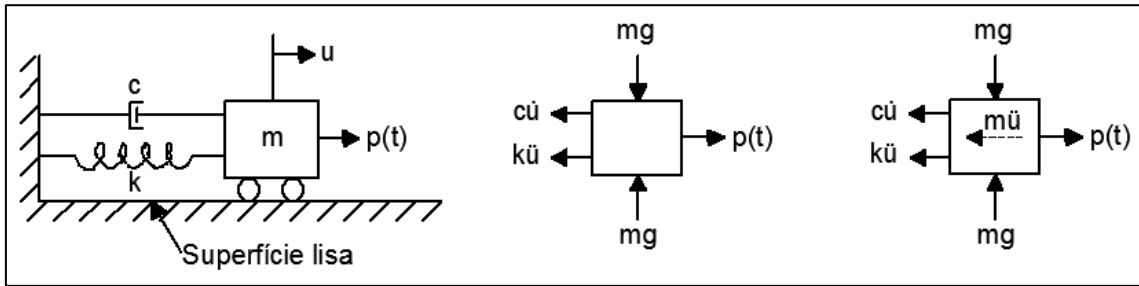


Figura 4.2 – Sistema de um grau de liberdade e diagrama de corpo-livre.

Um sistema físico pode ser considerado com de um grau de liberdade quando é possível descrevê-lo através de uma única função deslocamento x tempo de um único ponto do sistema físico. Ou seja, quando apenas uma coordenada é suficiente para descrever o movimento do sistema mecânico, ele é chamado de sistema de um grau de liberdade.

São grandezas associadas ao sistema de um grau de liberdade dinâmico:

- ω – frequência circular;
- f – frequência natural;
- T – período de vibração;
- ξ – fração de amortecimento.

As equações a seguir as relacionam:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4-2)$$

$$f = \frac{\omega}{2 \times \pi} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4-3)$$

$$T = \frac{1}{f} = 2 \times \pi \times \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4-4)$$

$$\xi = \frac{c}{2 \times m \times \omega} = \frac{c}{2 \times \sqrt{m \times k}} \quad (4-5)$$

O programa “Espectro de Resposta”, desenvolvido por TELES (2010) para a avaliação da resposta ao carregamento dinâmico, descrito neste trabalho no item 4.2, resolve numericamente o problema formulado na equação (4-1) para um carregamento genérico.

4.1.2 Extensão da formulação para sistemas elastoplásticos perfeitos

Seja um sistema que suporte uma força de valor máximo R_t . Em cada passo do processo de integração numérica é verificado se o módulo da força interna resistente ultrapassou R_t . Quando isso acontece, a força é mantida constante com seu valor $\pm R_t$.

Após o deslocamento atingir o seu valor máximo (δ_{plast}), a redução do valor do deslocamento segue um ciclo histerético, como mostrado na Figura 4.3.

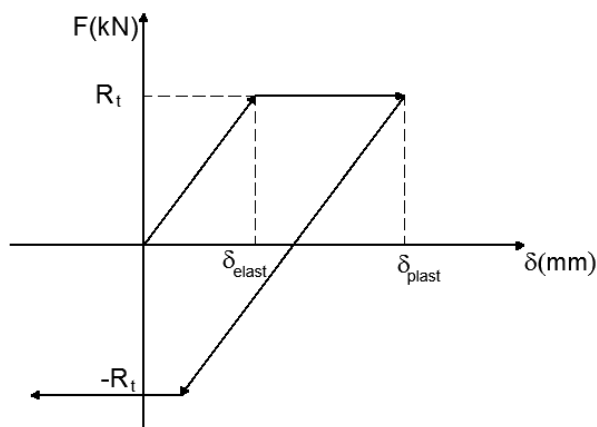


Figura 4.3 – Sistema dinâmico elastoplástico perfeito.

A resposta desejada será o deslocamento máximo (δ_{plast}), para que se possa calcular a ductilidade requerida pelo sistema ($\mu = \delta_{plast} / \delta_{elast}$).

O programa “Espectro de Resposta”, para a avaliação da resposta ao carregamento dinâmico, descrito no item a seguir, também resolve numericamente o problema do carregamento genérico aplicado a um sistema de um grau de liberdade, com comportamento elastoplástico perfeito. Para sistemas de múltiplos graus de liberdade deverão ser utilizadas outras soluções.

4.2 Programa para avaliação da resposta ao carregamento dinâmico

O programa “Espectro de Resposta”, desenvolvido por TELES (2010) apresenta a solução para sistemas de um grau de liberdade com comportamento elastoplástico, utilizando um compilador em ambiente *Delphi*. Devem ser fornecidos como dados de entrada ao programa, na tela principal, as seguintes informações:

- Função do carregamento;
- Discretização no tempo, Δt ;
- Frequência do sistema, f ;
- Valor da fração de amortecimento crítico, ξ ;
- Constante elástica, k ;
- Valor da capacidade de força resistente, R_t .

Como saída, o programa mostra os gráficos dos deslocamentos para o carregamento aplicado.

4.3 Exemplo de Aplicação

A função de carregamento utilizada foi a de uma explosão de 80 toneladas de TNT a uma distância variando de 100 até 1000 metros da edificação. Os valores de pressão utilizados foram multiplicados por 70,0 m², referente à área da fachada posterior, para a obtenção das forças totais aplicadas.

O intervalo de tempo de integração considerado no exemplo foi de 0,001 segundos.

A frequência própria considerada foi de 2,84 Hz, equivalente ao segundo módulo de vibração da estrutura, que mobiliza a estrutura na direção X.

A fração de amortecimento crítico utilizada foi de 0,02, valor utilizado para estruturas de edifícios de concreto sob carregamento dinâmico devido a sismo (SOUZA LIMA e SANTOS, 2014).

A constante elástica utilizada foi obtida com a equação 4.3, chegando-se então ao valor $K = 1981,966\text{kN} / 0,02126\text{m} = 93225 \text{ kN/m}$. Estes valores foram obtidos na análise *pushover*, com o modelo tridimensional do SAP2000 (2016), ver Figura 3.30, na região elástica.

Utilizando-se novamente a equação 4.3, é possível se calcular a massa do sistema equivalente, como igual a 292,08 toneladas. Essa massa representa 60% da massa total do sistema modelado no SAP2000 (2016).

A força máxima R_t utilizada foi a força máxima resistida pelo sistema na passagem da fase elástica para a plástica igual a 1981,966 kN.

As Figuras 4.4 a 4.15 mostram os dados de entrada no programa para a análise elastoplástica e os gráficos de saída com os deslocamentos em função do tempo.

As curvas de força x tempo para cada variação da distância foram obtidas dos gráficos apresentados no Capítulo 2 (Figuras 2.5 a 2.24).

Os gráficos de saída com os deslocamentos apresentam nos eixos:

- Eixo x: Tempo (em segundos);
- Eixo y: Deslocamento variando no tempo (em metros).

Espectro de Resposta

Arquivo Ajuda

Entre com os instantes de tempo e suas forças correspondentes:

t	p(t)
0.0000	0.0000
0.0010	67420.4000
0.0225	17244.0000

Entre com o amortecimento crítico:

$\varepsilon =$

Entre com a constante elástica:

k =

Entre com o R_t :

$R_t =$

Entre com o intervalo de tempo:

$\Delta t =$

Entre com a frequência:

f =

Resposta:

t	p(t)	u(t)	v(t)	Fs	Fp	Fl	a(t)	Dp
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	67
0.0010	67420.4000	0.0000	0.1154	3.5851	24.0802	67392.7347	230.7362	-2
0.0020	65086.6140	0.0003	0.3420	24.9677	71.3823	64990.2640	222.5108	-2
0.0030	62752.8275	0.0007	0.5604	67.0929	116.9607	62568.7743	214.2202	-2
0.0040	60419.0419	0.0014	0.7704	129.1878	160.8021	60129.0519	205.8672	-2
0.0050	58085.2558	0.0023	0.9721	210.4738	202.8938	57671.8882	197.4544	-2
0.0060	55751.4698	0.0033	1.1653	310.1666	243.2237	55198.0795	188.9847	-2
0.0070	53417.6837	0.0045	1.3500	427.4707	281.7000	52700.4371	180.4500	-2

Figura 4.4 – Tela de entrada do programa para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 100 metros

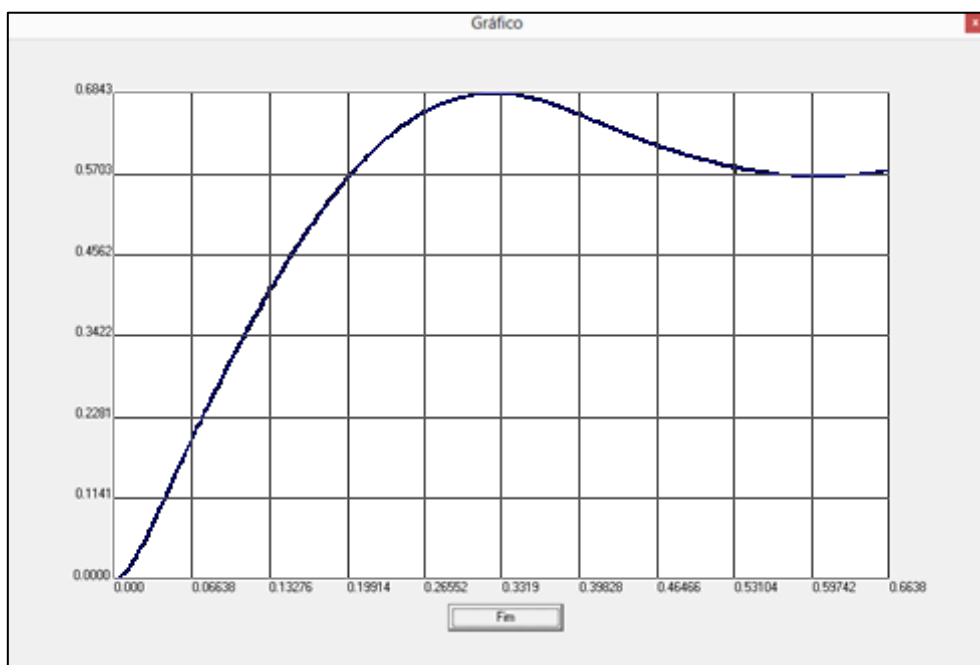


Figura 4.5 – Deslocamentos para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 100 metros

Espectro de Resposta

Arquivo Ajuda

Entre com os instantes de tempo e suas forças correspondentes:

t	p(t)
0.0000	0.0000
0.0010	9223.3800
0.0290	3380.9100

Entre com o amortecimento crítico:
 $\xi =$

Entre com a constante elástica:
 $k =$

Entre com o intervalo de tempo:
 $\Delta t =$

Entre com a frequência:
 $f =$

Entre com o R_t :
 $R_t =$

Resposta:

t	p(t)	u(t)	v(t)	Fs	Fp	Fl	a(t)	Dp
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.2256
0.0010	9223.3800	0.0000	0.0158	0.4905	3.2943	9219.5953	31.5656	-2
0.0020	9014.7204	0.0000	0.0470	3.4216	9.8049	9001.4939	30.8189	-2
0.0030	8806.0607	0.0001	0.0774	9.2256	16.1587	8780.6764	30.0629	-2
0.0040	8597.4011	0.0002	0.1071	17.8322	22.3537	8557.2152	29.2978	-2
0.0050	8388.7414	0.0003	0.1360	29.1698	28.3881	8331.1834	28.5239	-2
0.0060	8180.0818	0.0005	0.1641	43.1666	34.2602	8102.6551	27.7415	-2
0.0070	7971.4221	0.0006	0.1915	59.7403	39.0000	7871.7640	26.9590	-2

Figura 4.6 – Tela de entrada do programa para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 200 metros

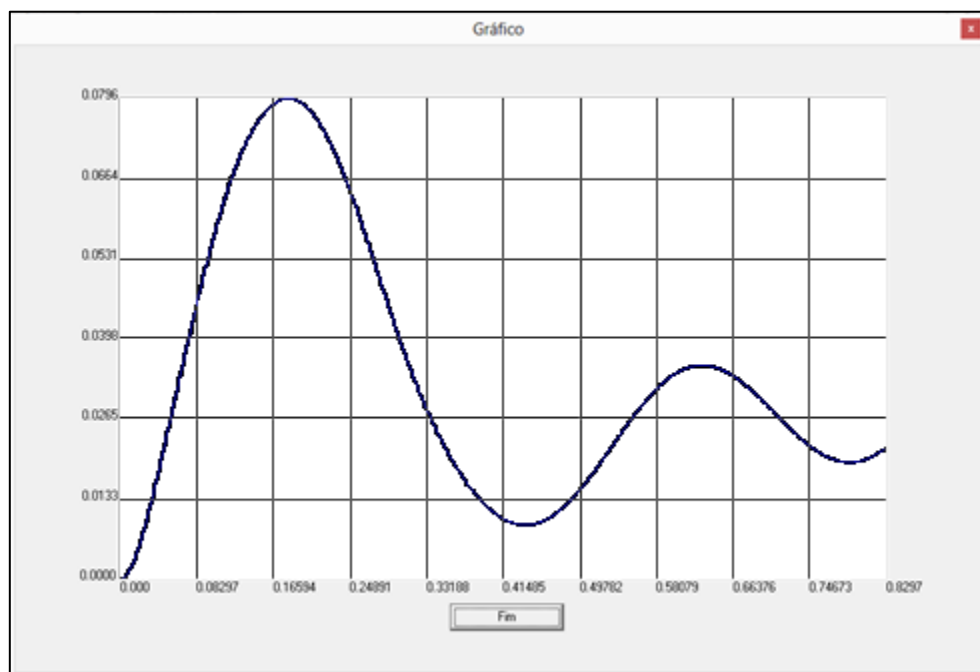


Figura 4.7 – Deslocamentos para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 200 metros

Espectro de Resposta

Arquivo Ajuda

Entre com os instantes de tempo e suas forças correspondentes:

t	p(t)
0.0000	0.0000
0.0010	3691.1100
0.0309	1457.4900

Entre com o amortecimento crítico:
 $\varepsilon =$

Entre com a constante elástica:
 $k =$

Entre com o intervalo de tempo:
 $Dt =$

Entre com a frequência:
 $f =$

Entre com o R_t :
 $R_t =$

Resposta:

t	p(t)	u(t)	v(t)	Fs	Fp	Fl	a(t)	Dp
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3
0.0010	3691.1100	0.0000	0.0063	0.1963	1.3183	3689.5954	12.6323	...
0.0020	3616.4070	0.0000	0.0188	1.3697	3.9270	3611.1103	12.3636	...
0.0030	3541.7040	0.0000	0.0310	3.6957	6.4791	3531.5291	12.0911	...
0.0040	3467.0010	0.0001	0.0430	7.1489	8.9740	3450.8781	11.8150	...
0.0050	3392.2980	0.0001	0.0547	11.7034	11.4109	3369.1836	11.5353	...
0.0060	3317.5949	0.0002	0.0661	17.3333	13.7891	3286.4726	11.2521	...
0.0070	3242.8918	0.0003	0.0773	24.0131	16.1077	3203.7701	10.9655	...

Figura 4.8 – Tela de entrada do programa para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 300 metros

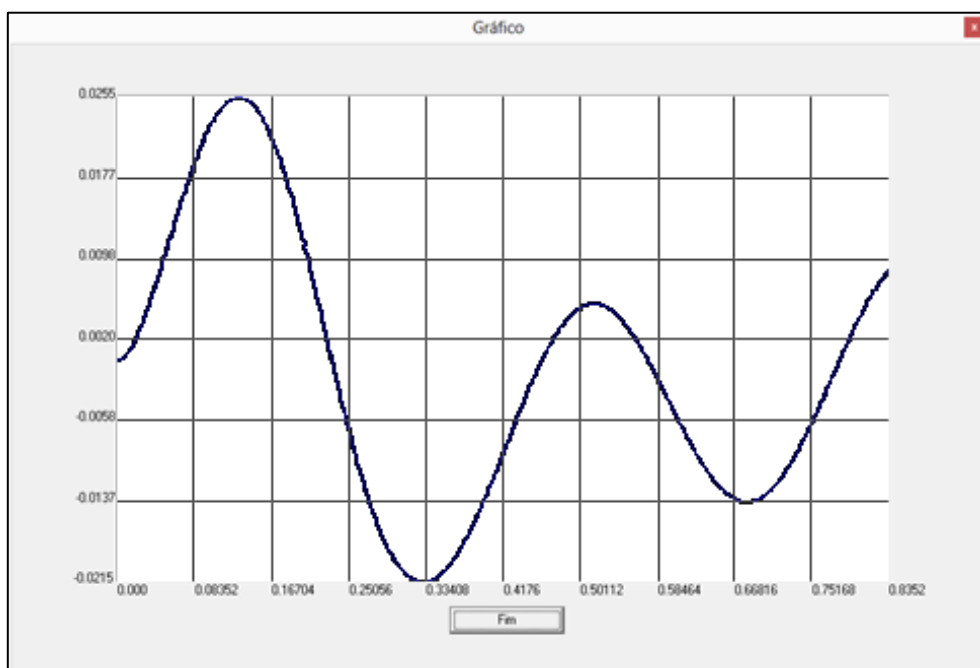


Figura 4.9 – Deslocamentos para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 300 metros

Espectro de Resposta

Arquivo Ajuda

Entre com os instantes de tempo e suas forças correspondentes:

t	p(t)
0.0000	0.0000
0.0010	2136.6400
0.0312	866.6740

Entre com o amortecimento crítico:

$\xi =$

Entre com a constante elástica:

k =

Entre com o intervalo de tempo:

Dt =

Entre com a frequência:

f =

Entre com o R_t :

$R_t =$

Resposta:

t	p(t)	u(t)	v(t)	Fs	Fp	Fl	a(t)	Dp
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2
0.0010	2136.6400	0.0000	0.0037	0.1136	0.7631	2135.7633	7.3123	..
0.0020	2094.5881	0.0000	0.0109	0.7930	2.2736	2091.5216	7.1609	..
0.0030	2052.5363	0.0000	0.0180	2.1398	3.7522	2046.6442	7.0072	..
0.0040	2010.4844	0.0000	0.0249	4.1399	5.1985	2001.1460	6.8514	..
0.0050	1968.4326	0.0001	0.0317	6.7787	6.6121	1955.0417	6.6936	..
0.0060	1926.3807	0.0001	0.0383	10.0415	7.9926	1908.3467	6.5337	..
0.0070	1884.3289	0.0001	0.0447	13.0122	9.2394	1861.0761	6.3710	..

Figura 4.10 – Tela de entrada do programa para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 400 metros

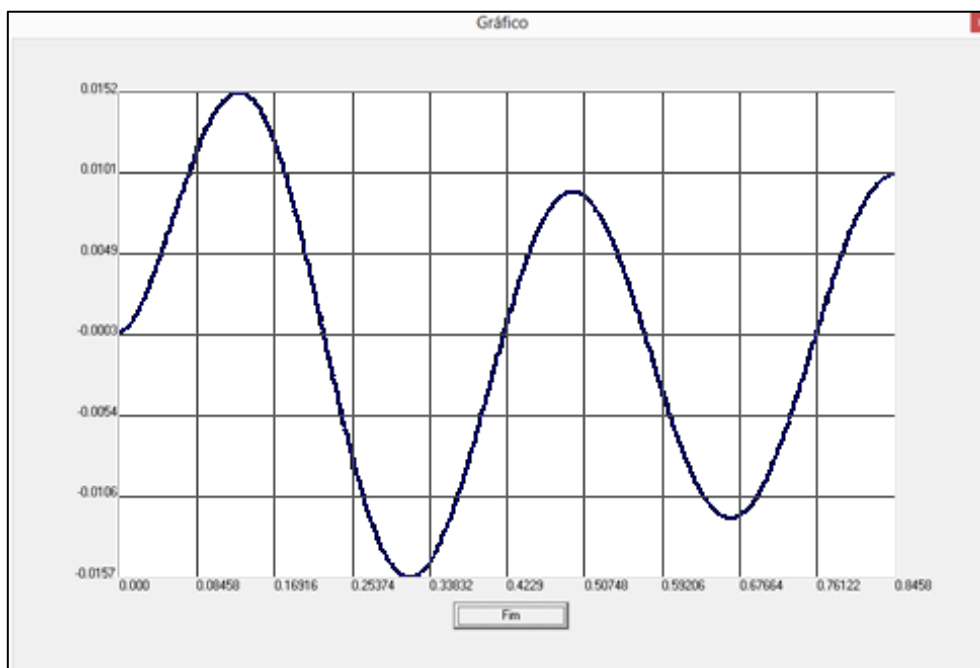


Figura 4.11 – Deslocamentos para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 400 metros

Espectro de Resposta

Arquivo Ajuda

Entre com os instantes de tempo e suas forças correspondentes:

t	p(t)
0.0000	0.0000
0.0010	1455.7500
0.0314	599.1860

Entre com o amortecimento crítico:

$\xi =$

Entre com a constante elástica:

$k =$

Entre com o R_t :

$R_t =$

Entre com o intervalo de tempo:

$\Delta t =$

Entre com a frequência:

$f =$

Resposta:

t	p(t)	u(t)	v(t)	Fs	Fp	Fl	a(t)	Dp
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
0.0010	1455.7500	0.0000	0.0025	0.0774	0.5199	1455.1526	4.9821	0.9999
0.0020	1427.5736	0.0000	0.0074	0.5403	1.5492	1425.4840	4.8805	0.9998
0.0030	1399.3971	0.0000	0.0123	1.4581	2.5572	1395.3818	4.7774	0.9997
0.0040	1371.2207	0.0000	0.0170	2.8213	3.5434	1364.8559	4.6729	0.9996
0.0050	1343.0442	0.0000	0.0216	4.6201	4.5077	1333.9163	4.5670	0.9995
0.0060	1314.8678	0.0001	0.0261	6.8447	5.4498	1302.5733	4.4597	0.9994
0.0070	1286.6913	0.0001	0.0305	9.4650	6.2999	1270.9271	4.3510	0.9993

Figura 4.12 – Tela de entrada do programa para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 500 metros

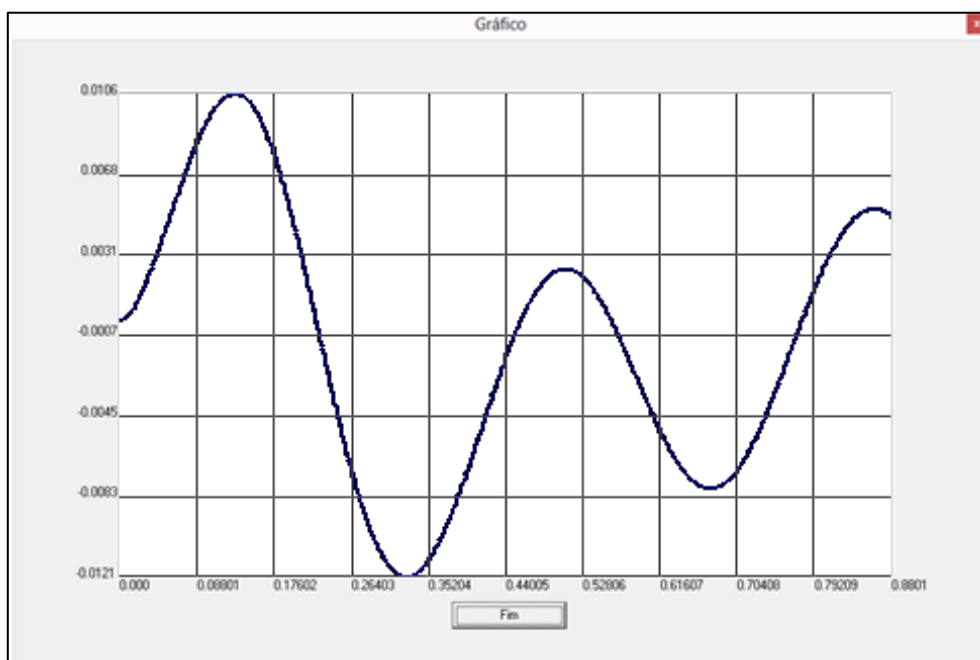


Figura 4.13 – Deslocamentos para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 500 metros

Espectro de Resposta

Arquivo Ajuda

Entre com os instantes de tempo e suas forças correspondentes:

t	p(t)
0.0000	0.0000
0.0010	517.6440
0.0328	215.9780

Entre com o amortecimento crítico:
 $\xi =$

Entre com a constante elástica:
 $k =$

Entre com o Rt:
 $R_t =$

Entre com o intervalo de tempo:
 $\Delta t =$

Entre com a frequência:
 $f =$

Resposta:

t	p(t)	u(t)	v(t)	Fs	Fp	Fl	a(t)	Dp
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0010	517.6440	0.0000	0.0009	0.0275	0.1849	517.4316	1.7716	...
0.0020	508.1576	0.0000	0.0026	0.1921	0.5511	507.4144	1.7373	...
0.0030	498.6713	0.0000	0.0044	0.5187	0.9101	497.2425	1.7024	...
0.0040	489.1849	0.0000	0.0060	1.0040	1.2617	486.9193	1.6671	...
0.0050	479.6986	0.0000	0.0077	1.6447	1.6059	476.4480	1.6312	...
0.0060	470.2122	0.0000	0.0093	2.4374	1.9426	465.8322	1.5949	...
0.0070	460.7258	0.0000	0.0109	3.2700	2.2717	455.0754	1.5501	...

Figura 4.14 – Tela de entrada do programa para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 1000 metros

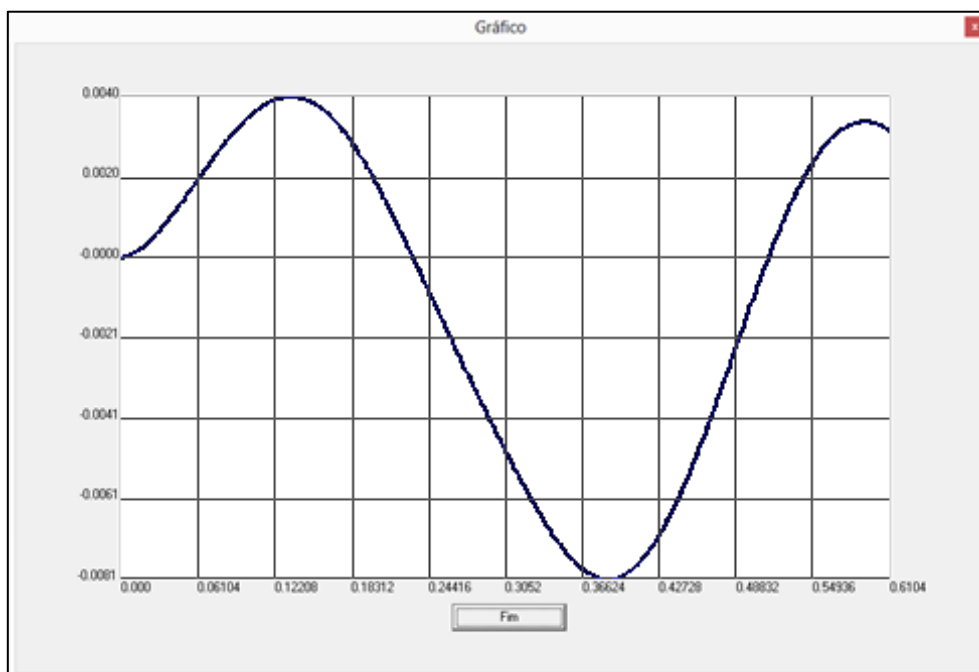


Figura 4.15 – Deslocamentos para $R_t = 1981,966$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 1000 metros

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando-se a edificação administrativa submetida a uma explosão hipotética de 80 toneladas de TNT (66,7 toneladas de TNT multiplicado por um fator de segurança de 1,20) de um paiol de munição do tipo enterrado, verificamos que, variando a distância do referido paiol para a edificação, é notório que, conforme a edificação se aproxima da estrutura a sobrepressão atuante, e conseqüentemente o pico da força oriunda da explosão, aumenta.

Realizando-se a análise automatizada *pushover* na estrutura, foi possível levá-la ao máximo do seu deslocamento no regime plástico, até a ruptura. Com isso, pode ser definido o deslocamento de 42,22 mm como o limite do deslocamento da estrutura antes da ruptura e o deslocamento de 21,26 mm como o limite para a estrutura permanecer no regime elástico.

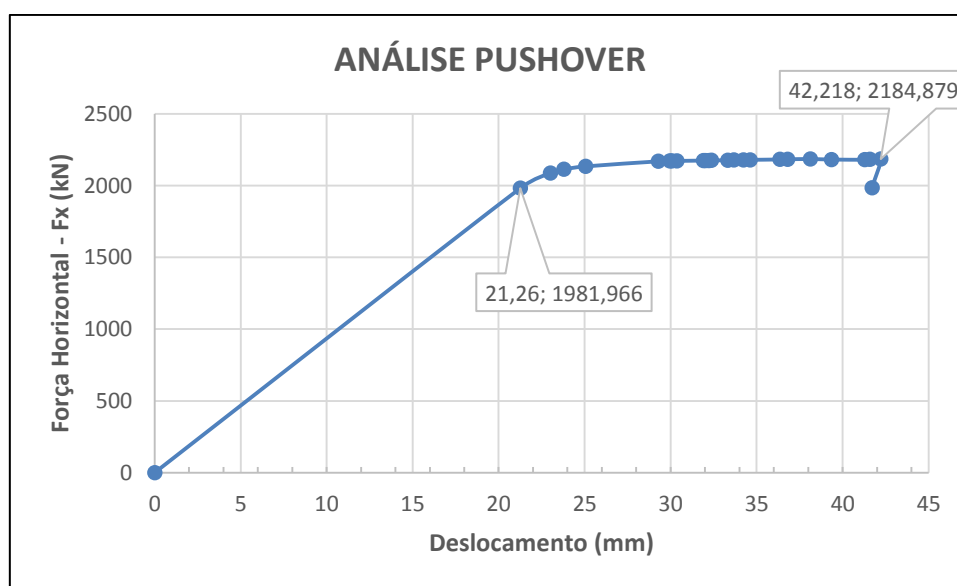


Figura 3.30 – Gráfico força versus deslocamento, no modelo tridimensional, durante a análise *pushover*

Definidos os limites de deslocamento na Figura 3.30 e inserindo-se os deslocamentos obtidos na análise em regime não linear, podem ser comparados os deslocamentos para cada função da força resultante da explosão do paiol de munição na Figura 5.1.

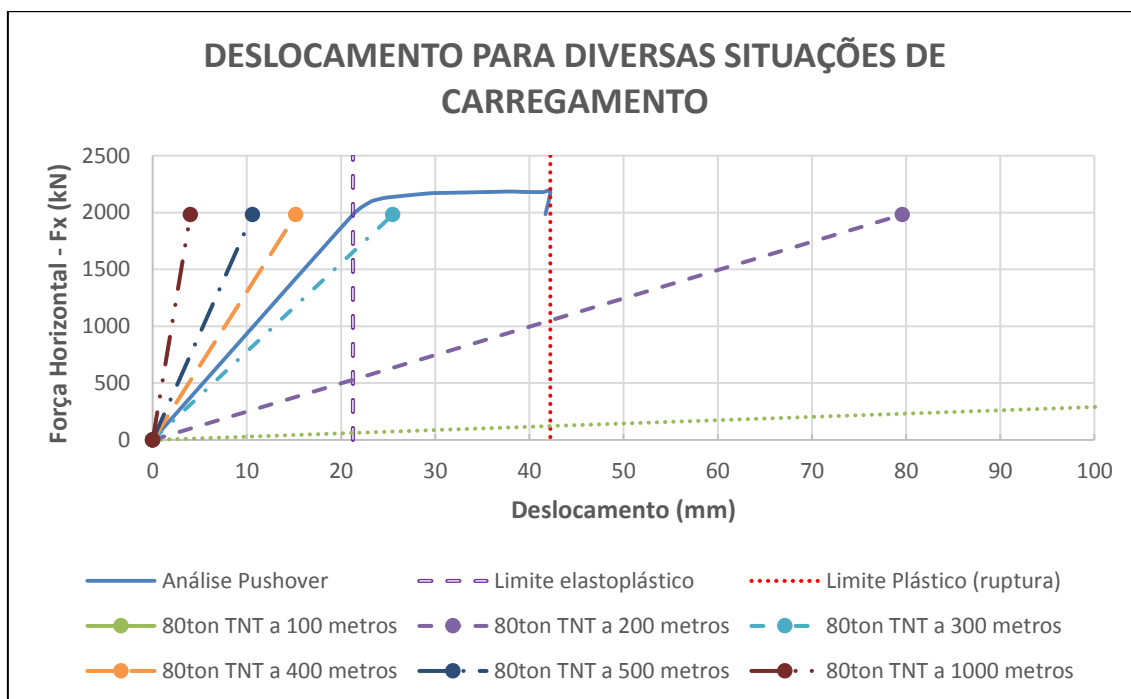


Figura 5.1 – Deslocamento para diversas situações de carregamento.

O valor do carregamento de 80 toneladas de TNT a 100 metros teve sua representação truncada no gráfico para melhor apresentar os deslocamentos da estrutura até 100 mm.

Os deslocamentos máximos obtidos por meio do SAP2000 (2016) e pelo sistema de um grau de liberdade (S1GL) podem ser observados na Tabela 13.

Tabela 13 – Comparação de deslocamentos no nó A.

Caso	NEGATIVO			POSITIVO		
	SAP2000	S1GL	MÓDULO	SAP2000	S1GL	MÓDULO
	U1 (m)	U1 (m)	SAP/S1GL	U1 (m)	U1 (m)	SAP/S1GL
80ton 100metros	-0,2129	0,6843	0,31	0,2264	0,6843	0,33
80ton 200metros	-0,0528	0,0796	0,66	0,0516	0,0796	0,65
80ton 300metros	-0,0250	-0,0215	1,16	0,0229	0,0255	0,90
80ton 400metros	-0,0152	-0,0157	0,97	0,0137	0,0152	0,90
80ton 500metros	-0,0103	-0,0121	0,85	0,0095	0,0106	0,90
80ton 1000metros	-0,0079	-0,0081	0,98	0,0034	0,0040	0,85

Os resultados dos deslocamentos obtidos com o modelo em elementos finitos e com o sistema equivalente de um grau de liberdade são muito próximos para distâncias a partir de 300 metros. Os valores de deslocamentos para as explosões a 100 e a 200 metros divergem de 0,31 a 0,66, sendo o deslocamento para o sistema de um grau de liberdade muito maior que o obtido por meio do modelo em elementos finitos.

Isso leva à conclusão de que o esquema de rótulas plásticas não teve bom comportamento no programa SAP 2000 (2016) no caso dinâmico, já que está apresentando resultados praticamente no regime elástico. Isso pode ser comprovado através de uma rodada adicional do programa “Espectro de Resposta”, para a distância de 100m, mas agora sem a limitação do sistema elastoplástico. Foi para isso considerado um valor elevado para R_t (igual a 100.000.000 kN).

O deslocamento máximo obtido foi de 0,2162m (ver Figura 5.2), com uma diferença de apenas 4% do obtido pelo SAP 2000 (2016), igual a 0,2264m.

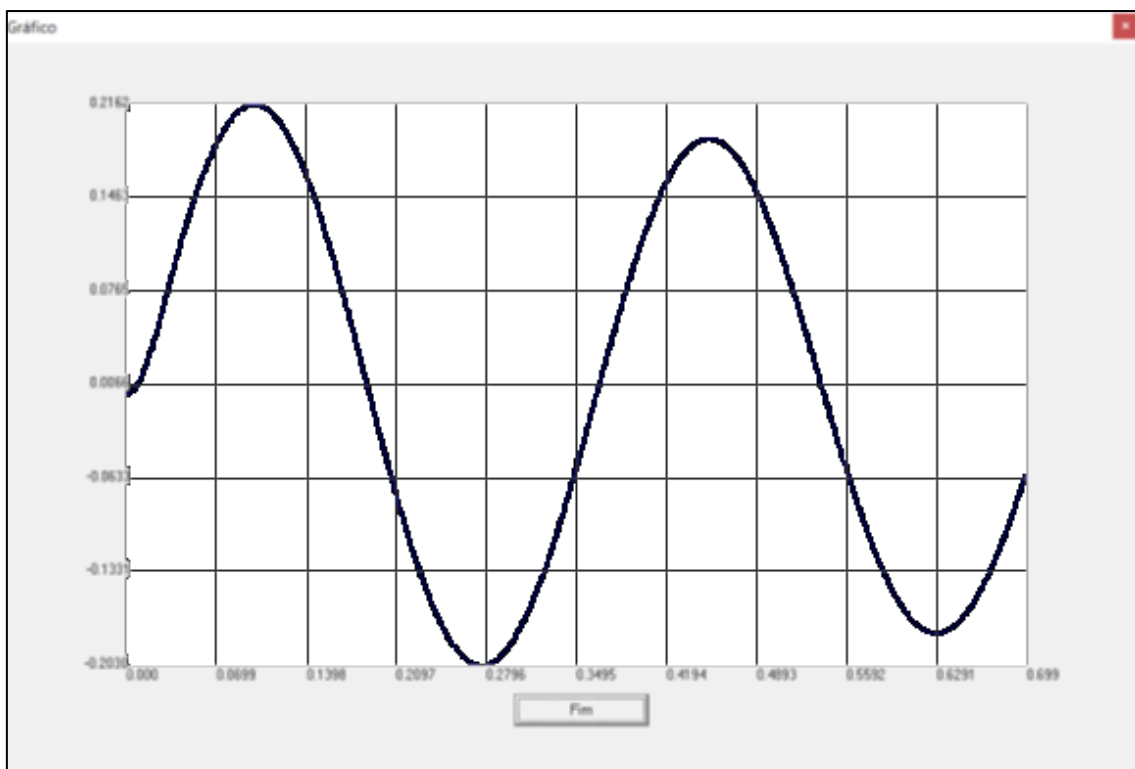


Figura 5.2 – Deslocamentos para $R_t = 100.000.000$ kN, função carregamento de 80 t de TNT a 100 metros

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada a análise e a verificação do desempenho dinâmico de um prédio administrativo hipotético de dois pavimentos localizado no interior do Estado do Rio de Janeiro, em área próxima a um paiol de munição também hipotético, do tipo enterrado, na ocorrência de uma explosão de 66,7 toneladas de TNT. Para o desenvolvimento dos cálculos foi considerado o valor de 80 toneladas de TNT para a obtenção das curvas de sobrepressão, considerando o fator de segurança de 1,20.

O objetivo principal do trabalho foi verificar até que distância o paiol poderia estar próximo da edificação sem causar o seu colapso em caso de explosão, realizando uma análise estática não linear *pushover* e verificando a ductilidade da estrutura a partir do método baseado em deslocamentos. Vale ressaltar novamente que o prédio administrativo foi dimensionado conforme as prescrições normativas vigentes, sem considerar o carregamento de uma explosão.

Para diversas distâncias do paiol de munição para a edificação, foram feitas curvas de forças em função do tempo para a fachada do prédio e estas foram aplicadas na estrutura no programa SAP2000 (2016). A análise automatizada *pushover*, para avaliação dos resultados obtidos através do método baseado em deslocamentos, é a que apresenta resultados mais próximos do comportamento real da edificação.

Com a disponibilização do Programa de Análise Dinâmica não Linear de Sistemas Elastoplásticos Perfeitos (Programa “Espectro de Resposta”), foi possível aferir a metodologia corrente existente nas normas de projeto (critério do “mesmo deslocamento”). As conclusões após a execução dessas análises e verificações serão discutidas a seguir.

Ao se afastar o prédio administrativo do paiol de munição, o carregamento total e o pico da sobrepressão diminuem de tal forma que ficam abaixo da força de resistência horizontal da estrutura (força cisalhante resistente dos pilares, igual a 1981,966 kN), fazendo com que a estrutura não entre no regime plástico.

Considerando o deslocamento máximo obtido na análise automatizada *pushover*, realizada no programa SAP2000 (2016), o valor de 0,042m considerado como limite, é

inferior a 2% da altura da edificação (0,14m), critério adequado para limitar os danos físicos às construções (SOUZA LIMA e SANTOS, 2014).

Os deslocamentos obtidos com as curvas de forças de sobrepressão x tempo no SAP2000 (2016) e com o Programa “Espectro de Resposta” mostram que os resultados podem diferir bastante, tendo o SAP2000 (2016) apresentado valores menores de deslocamentos, muito próximos aos obtidos por análises puramente elásticas. Isso indica uma maior necessidade de se estudar a aplicação do programa SAP 2000 (2016) na análise dinâmica em regime elastoplástico.

Segundo informações internacionais nesse tema, o valor de referência de distância de segurança para edificações administrativas civis e militares e rotas rodoviárias e ferroviárias principais é de $D_q = 22,2 \times Q^{1/3}$, ver equação (1-3). Dessa forma, a distância de segurança para a edificação seria de 956 metros. Utilizando-se a regra geral definida para a distância mínima segura, utilizando os mesmos fundamentos de KINNEY e GRAHAM (1985 apud CASAGRANDE, 2006), a distância de segurança para as pessoas e estruturas seria algo em torno de 5.000 metros.

Considerando a capacidade de deformação da estrutura, para o carregamento da fachada mais próxima ao local da explosão, e desconsiderando os carregamentos nas demais fachadas e no interior da estrutura, que são menores em relação os da fachada principal, conforme visto no Capítulo 5, a estrutura não sofreria danos irreversíveis (fase elástica) a partir da distância de 400 metros. Sairia da fase elástica para a distância de 300 metros, com a possibilidade de alguns danos irreversíveis ocorrerem. A estrutura iria sofrer danos significativos, com seu provável colapso, nas distâncias de 100 e 200 metros.

Considerando-se apenas a capacidade de carga da estrutura e a probabilidade de ruptura dos tímpanos do ser humano, a distância de segurança poderia ser diminuída para 400 metros. Entretanto, as prescrições normativas internacionais levam também em consideração outros fatores que foram desconsiderados nesta análise, como por exemplo, os fragmentos e os efeitos secundários da explosão.

Deve-se levar em consideração que esse tipo de análise deve ser visto caso a caso, pois uma alteração na geometria ou no posicionamento da edificação irá alterar as condições de carregamento, modificando as forças agindo na estrutura e consequentemente a sua resposta.

Conclui-se então que, apenas considerando os fatores analisados neste trabalho, a vida humana seria o fator determinante nas distâncias de segurança utilizadas internacionalmente. A estrutura da edificação aqui estudada, tendo sido corretamente dimensionada pelas normas brasileiras para o ELU e o ELS, suportaria carregamentos de explosão superiores aos limites especificados para as vidas humanas.

Para trabalhos futuros sugere-se repetir o processo feito neste trabalho para o carregamento de todas as fachadas da edificação, considerando adicionalmente os carregamentos de fragmentos oriundos da explosão do paiol de munição. Desta forma, uma avaliação mais criteriosa com relação às distâncias de segurança poderia ser definida. Sugere-se também que sejam aprofundados os estudos sobre a aplicação do programa SAP 2000 (2016) na análise dinâmica em regime elastoplástico.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANELLI, J.S. de A., “**Determinação do carregamento em um prédio submetido à onda de choque decorrente de uma explosão**”, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “**NBR-6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**”. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “**NBR-6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**”. Rio de Janeiro, ABNT, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “**NBR-6123: Forças devidas ao vento em edificações**”. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “**NBR-15421: Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento**”. Rio de Janeiro, ABNT, 2006.

AUTORIDAD REGULATORIA NUCLEAR, “**Efectos de Explosiones y Acciones Mitigantes Aplicables a Estructuras, Sistemas y Componentes de Instalaciones Civiles**”, Buenos Aires, Argentina, 1998.

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

CSI COMPUTERS & STRUCTURES, INC., “**SAP2000, Integrated Software for Structural Analysis & Design, Version 18**”. CSI Inc., Berkeley, California, USA, 2016.

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

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

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

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

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

SOUZA LIMA, S. e SANTOS, S.H.C., “**Notas de Aula da Disciplina de Análise Sísmica**”. Mestrado Profissional, Programa de Projeto de Estruturas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2014.

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

TELES L. D. V., “**Considerações sobre a Redução das Forças Sísmicas Devido aos Efeitos de Não Linearidade Física nas Estruturas de Concreto Armado**”, Projeto de Graduação, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

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

VISUAL VENTOS, “**Programa para cálculo de esforço devido ao vento de edificações com planta retangular e telhado de duas águas, segundo NBR 6123/1988, Versão 1.0.2.**”. FEAR, Universidade de Passo Fundo, 2003.

8 SÍTIOS DA INTERNET

REINFORCED EARTH, “**Fort Lee Munitions Storage Magazine**”. Disponível em: <http://www.reinforcedearth.com/project/fort-lee-munitions-storage-magazine.html>.

Acesso em 29 de dezembro de 2017, 14:30:00.

SILVA, W. C. L.; IHA, K. e FERREIRA, P. C. M., “**Dimensionamento explosivos em cabeça de guerra para o efeito de sopro**”. Artigo. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos. Disponível em <http://www.sige.ita.br/IX_SIGE/Artigos/AA_01.pdf>. Acesso em: 14 de mar. 2017, 19:40:00.