

Análise de Estrutura Sob Carga Dinâmica de Explosão com Uso de Ferramenta Computacional

Rafael Costa da Hora¹, Daniel Lemos Mouço²

¹ Universidade Veiga de Almeida / rafaelcostadahora@gmail.com

² Universidade Veiga de Almeida / daniel.mouco@uva.br

Resumo

A ação de forças dinâmicas está presente na grande maioria das construções civis. Seja de origem natural ou causada pelo homem, muitas vezes elas não podem ser ignoradas quando se trata de análise de estruturas. Apesar da pequena incidência de eventos causadores de explosões no território nacional, algumas edificações, principalmente as de interesse estratégico, devem ser projetadas para suportar este tipo de efeito. O presente trabalho aborda conceitos teóricos necessários para o entendimento dos fenômenos de explosão, ondas de choque, seu comportamento físico e sua modelagem. Tendo em vista que não há um regulamento nacional que aborde o tema do trabalho, foi adotado como referência um manual norte americano que visa mitigar potenciais ameaças de bombas terroristas contra edificações. Os parâmetros necessários para a obtenção do carregamento impulsivo oriundo da explosão foram retirados dos registros encontrados no relatório de um atentado terrorista com detonação, contra um edifício federal na cidade de Oklahoma nos Estados Unidos. A análise foi realizada tomando como base uma edificação esquemática em concreto armado, modelada com auxílio da ferramenta computacional SAP2000. Os esforços e deformações gerados na estrutura, e a verificação dos elementos estruturais também foram obtidos com o uso do *software*. Verificou-se os resultados obtidos quanto à satisfação da concepção de estabilidade estrutural.

Palavras-chave

Análise dinâmica; Explosões; Onda de choque; Estruturas de concreto armado.

Introdução

Uma explosão é o resultado de uma liberação súbita de energia (MAGNUSSON, 2007), podendo variar dependendo de sua origem e produtos gerados. Existem diferentes tipos de explosões, podendo ser classificadas segundo sua composição química, quantidade de explosivos, potência, sensibilidade e/ou velocidade de reação. Explosões químicas, segundo SILVA (2007), são explosões oriundas de reações de decomposição química. Se caracterizam pelo aumento quase instantâneo de volume, causado pela rápida e elevada produção de gases gerando um aumento de pressão, normalmente acompanhada de altas temperaturas. É o caso de explosivos químicos como o trinitrotolueno (TNT) ou fuga de gás (hidrocarbonetos). O presente trabalho terá como objeto de estudo apenas explosões químicas, cujo comportamento é apresentado esquematicamente na Figura 1.

Reações químicas em explosivos

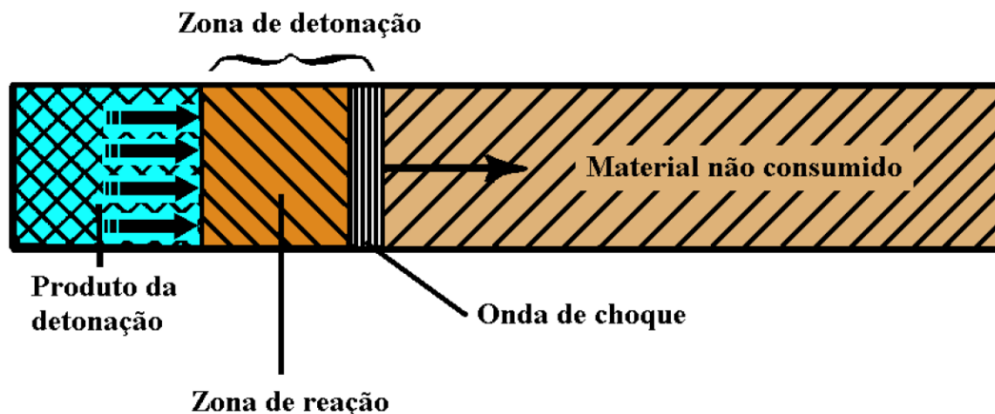


Figura 1 - Esquema de uma detonação, SILVA (2007)

A decomposição química dos explosivos pode ocorrer através de três processos distintos que se diferem basicamente por sua velocidade de reação (SILVA, 2007), são eles:

Combustão: Neste processo a reação química ocorre de maneira lenta (na ordem de centímetros por segundo), onde a energia liberada é propagada por condutividade térmica, o explosivo queima. Como resultado tem-se a produção de gases e consequentemente uma variação de volume e pressão porém, tais variações são desprezadas devido à baixa velocidade da reação.

Deflagração: Reações de decomposição química deste tipo se caracterizam como combustões aceleradas que reagem com o oxigênio intrínseco do explosivo e o oxigênio presente na atmosfera, geralmente com velocidade subsônica de decomposição (na ordem de centenas de metros por segundo). O explosivo deflagra gerando pressão progressiva .

Detonação: É o tipo de decomposição química que possui velocidade de reação supersônica (na ordem de quilômetros por segundo) causando onda de choque, acompanhada de forte estrondo. Tem como resultado uma alta produção de energia e gases, o que gera de maneira quase instantânea uma elevada variação de volume e pressão. Reage apenas com o oxigênio intrínseco no explosivo. A detonação será o tipo de reação a ser considerada para este estudo devido a presença do impacto destrutivo gerado pela onda de choque.

É de fundamental importância o conhecimento do meio de propagação das explosões, já que o fenômeno da onda de choque se dá em função de fatores e propriedades características do mesmo.

Define-se onda de choque como uma perturbação no meio (atmosférico, para o estudo em questão), causada por variação abrupta de pressão, temperatura e densidade, fazendo com que as “camadas” adjacentes de ar sejam comprimidas de maneira violenta devido à expansão esférica da reação (GRAHAM,2010). A figura 2 apresenta o fenômeno, sendo possível verificar a propagação desta onda em forma esférica. O fenômeno ocorre

geralmente quando a velocidade de expansão no meio é supersônica (detonação) podendo variar em função da umidade atmosférica.



Figura 2 - Onda de choque causada por detonação

A figura 3 representa o comportamento da pressão no tempo, causada por uma onda de choque ideal em um determinado ponto situado a uma determinada distância do epicentro de uma explosão em espaço aberto.

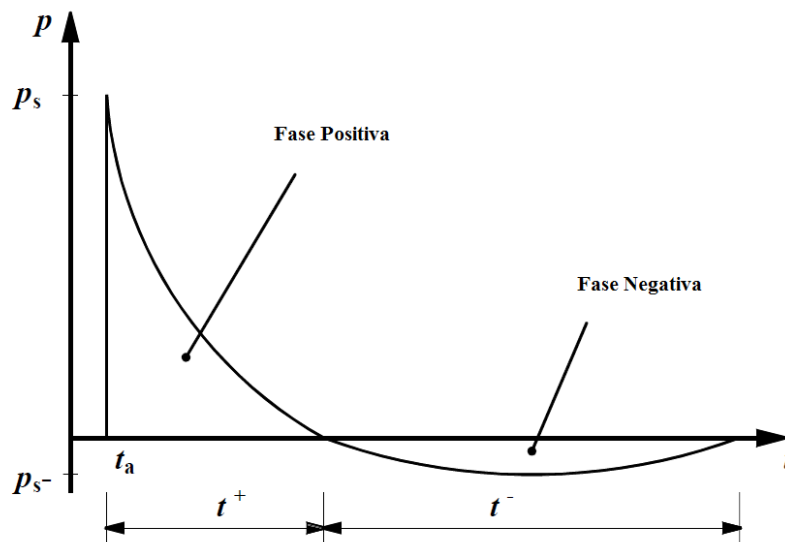


Figura 3 - Gráfico do comportamento ideal de uma onda de choque, MAGNUSSON (2007)

Onde: p_s é a pressão incidente, p_s^- é a pressão incidente negativa, p_0 é a pressão atmosférica; t^+ é a duração da fase positiva, t^- é a duração da fase negativa e t_a é o tempo de chegada da frente da onda de choque.

Na chegada da onda de choque percebe-se um aumento instantâneo de pressão, atingindo um pico máximo, seguido do decaimento da mesma até atingir novamente a pressão atmosférica (eixo do tempo), esta etapa é denominada fase positiva. A seguir observa-se uma redução na pressão devido ao vácuo gerado pela passagem da onda, atingindo um mínimo negativo, seguida de um aumento na mesma até atingir a pressão atmosférica novamente, esta etapa é denominada fase negativa. Apesar da duração da fase negativa ser maior que a da positiva, considera-se apenas a fase positiva para fins de análise, devido a sua maior pressão incidente e efeitos. Em casos extremos e especiais considera-se a pressão negativa (MAGNUSSON, 2007).

Para o cálculo do pico de pressão em um determinado ponto gerado por uma determinada quantidade de explosivo a um determinado distanciamento, utiliza-se a equação de Newmark e Hansen de 1961, onde W se refere ao peso de TNT em toneladas e R à distância(m) do epicentro da explosão ao ponto de análise. O valor da pressão nesta equação é obtido em bar.

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

Além de pressões máximas, leva-se também em consideração o impulso (i) gerado pela onda de choque durante suas fases, definido por:

$$i = \int_0^t p(t) dt \quad (2)$$

De modo a facilitar os cálculos, considera-se que após o pico na fase positiva, a pressão decresce linearmente até a pressão atmosférica, desde que o impulso correspondente permaneça o mesmo, ou seja, as áreas em questão, do gráfico simplificado e do real devem ter valores iguais. Esta simplificação será esquematizada na figura 4.

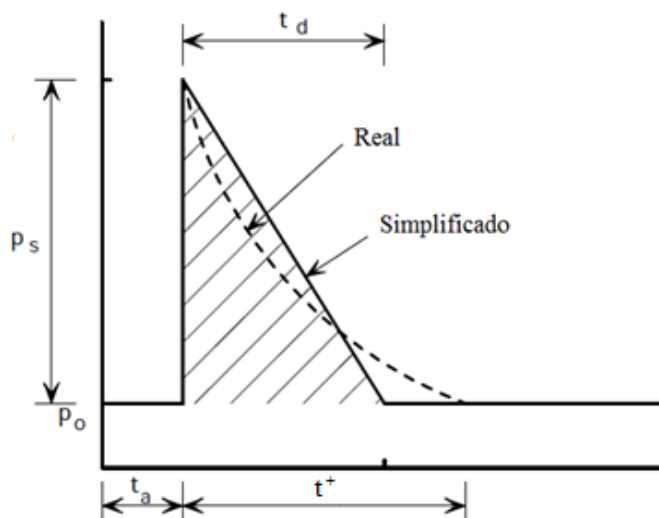


Figura 4 - Esquema simplificado do gráfico do comportamento ideal de uma onda de choque, YANDZIO (1999)

A simplificação acima pode ser matematicamente representada pela equação 3:

$$P(t) = P_s \left(1 - \frac{t}{t_d} \right) \quad (3)$$

Explosões também são classificadas em função de sua zona de ocorrência, neste caso se fará menção apenas às classificadas como não-confinadas em contato com o terreno; a qual se dá em contato direto com o terreno ou a uma altura desprezível, o que gera uma amplificação instantânea da onda de choque devido a fusão dela com a reflexão pelo terreno, gerando um pulso de pressão equivalente ao dobro da massa de explosivo existente, como esquematizado na figura 5 a seguir (YANDZIO, 1999).

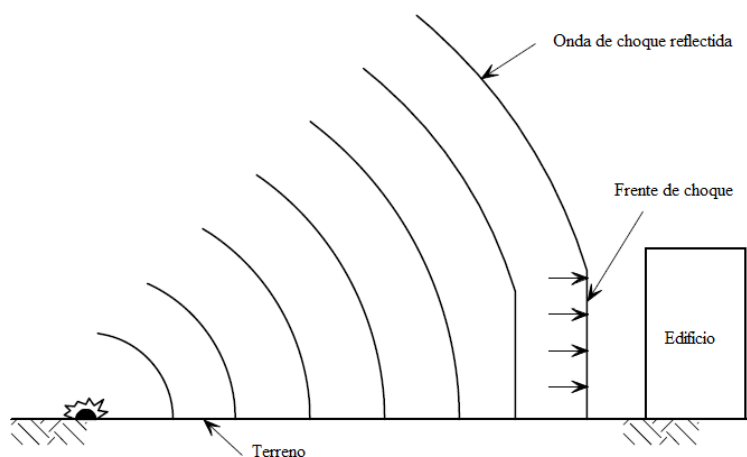


Figura 5 - Esquema de explosão em contato com o terreno, YANDZIO (1999)

Segundo o *Department of Homeland Security* (2011), no seu manual sobre mitigação de ataques terroristas, a pressão de uma explosão diminui em função de sua distância da fonte; e os efeitos destrutivos mais severos ocorrem em proximidades da detonação. Logo, a face de uma edificação voltada para a explosão sofrerá danos mais severos que sua oposta. A maneira em que edificações são dispostas ao redor em ambientes urbanos afetam diretamente o padrão de reflexão.

A duração do evento de explosão é relativamente curta, é medida em milissegundos comparada com a duração de sismos e tornados os quais são medidos em segundos. Diferentemente dos terremotos, por exemplo, onde a resposta da estrutura tende a ser de ressonância devido à frequência da carga dinâmica; no fenômeno de explosão isso não ocorre. A carga dinâmica da explosão já haverá passado, antes do movimento de resposta da estrutura.

Estudo de caso

A abordagem deste trabalho consiste no desenvolvimento, análise estática e dinâmica de uma edificação esquemática sujeita a um carregamento dinâmico de explosão. O estudo terá como base a teoria abordada ao longo deste trabalho. A análise foi realizada com o auxílio da ferramenta computacional SAP2000, um programa de análise estrutural que utiliza o método dos elementos finitos para obtenção de resultados (*CSI - Computers & Structures Inc*, 2011).

Trata-se de uma edificação típica esquemática em concreto armado de cinco pavimentos (inclusive cobertura); altura total de 15m, comprimento lateral de 20m com distanciamento de 5m entre pilares. Composta por pilares de 0,5m x 0,5m e vigas de 0,4m x 0,15m. Adotou-se como dado de entrada para o amortecimento da estrutura, 7% do amortecimento crítico.

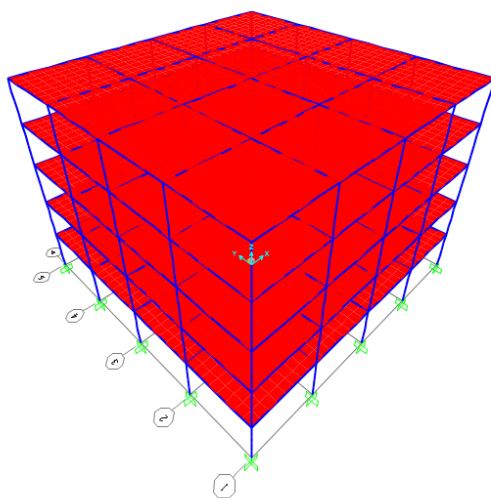


Figura 6 - Modelo esquemático de edificação no SAP2000

Foi atribuído às lajes da edificação um carregamento distribuído uniforme total (permanente + acidental) $g + q$ de 10 KN/m²; para fins de dimensionamento dos

elementos estruturais da edificação, o qual foi realizado pelo *software* em questão através do *Eurocode 2 - 2004*. Sendo assim se obteve para os pilares uma armadura de 1% e para as vigas uma armadura de 0,3%.

A Figura 7 apresenta a deformada da estrutura quando sujeita ao carregamento permanente. Nesta imagem, é possível ver também a malha de elementos finitos utilizada para as lajes e das vigas. No caso de pilares, foram utilizados 3 elementos por lance de pilar.

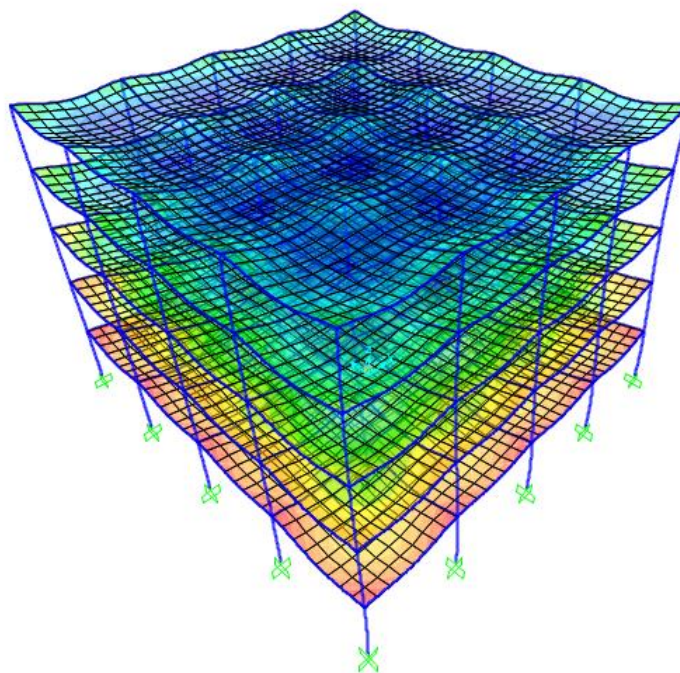


Figura 7 – Deformada da malha de elementos finitos para carregamento permanente

Os parâmetros necessários para a obtenção do carregamento impulsivo oriundo da explosão foram retirados dos registros encontrados no relatório de um atentado terrorista com detonação, contra um edifício federal na cidade de Oklahoma nos Estados Unidos (*American Society of Civil Engineers*, 1996).

A explosão modelada ocorreu numa distância de 11.2m do alvo, com a detonação de aproximadamente nove toneladas de TNT. Gerando um pico de pressão inicial máximo de 4,1MPa decrescente ao longo do tempo. A fase positiva deste evento teve duração de 15 ms. A figura 8 apresenta o comportamento da pressão em função do tempo.

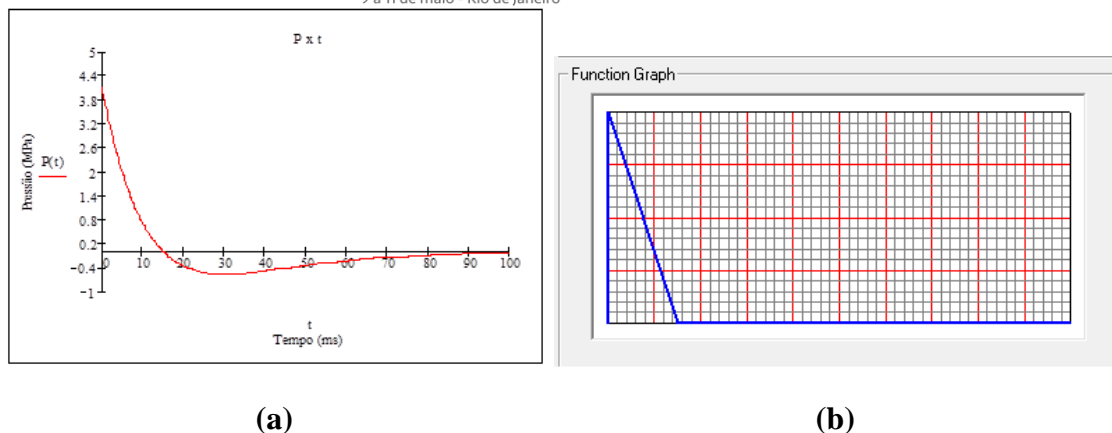


Figura 8 – Comportamento da pressão no tempo: (a) carga real; (b) carga simplificada

A figura 8a representa o comportamento da onda de choque no tempo, tendo como base os parâmetros mencionados acima. A figura 8b representa a simplificação física e matemática do seu histórico no tempo. A função da segunda figura (8b) foi utilizada como um dos dados de entrada para o programa SAP2000.

A pressão gerada pela explosão foi aplicada como carga linear nos elementos estruturais primários da fachada atingida. Para isso foi levado em conta o decaimento exponencial sofrido pela pressão atuante ao longo da altura da edificação devido à expansão radial da mesma ao longo da face da edificação. A Figura 9 apresenta o carregamento distribuído na edificação. Verifica-se que o ponto de maior aplicação de carga é próximo ao pilar do eixo 3, no primeiro andar. Neste ponto, localiza-se o Nó 14, cuja resposta dinâmica será analisada.

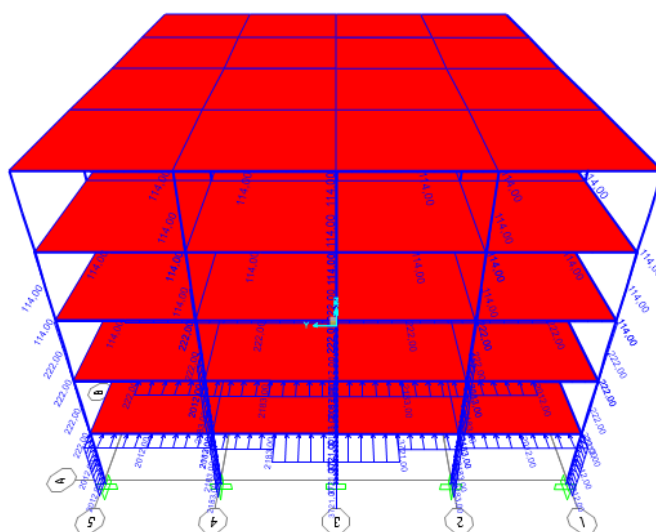


Figura 9 - Carregamento da explosão aplicado na estrutura

Após aplicar o carregamento de explosão durante o tempo de duração da fase positiva da detonação, a estrutura tende a se deslocar em oscilação livre, cujo comportamento pode ser graficamente descrito através um movimento oscilatório cuja amplitude de movimento decresce ao longo do tempo.

A Figura 10 apresenta o gráfico de tempo x deslocamento do Nó 14, localizado no primeiro andar da edificação.

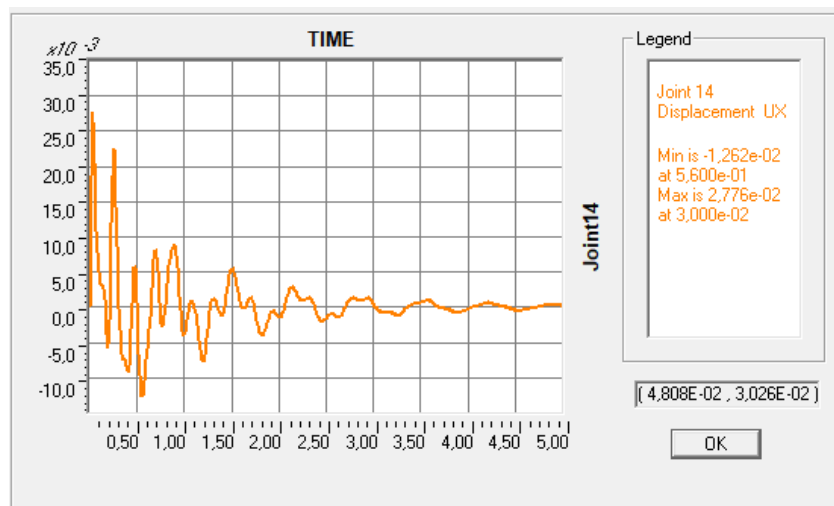


Figura 10 - Deslocamento da estrutura em função do tempo

Analisando o comportamento do gráfico da figura 10 e considerando que a estrutura permanecesse no regime elástico, verifica-se que a deflexão dinâmica máxima na horizontal que a mesma sofreria teria um valor de 0,028 m. Tomou-se para análise do deslocamento o nó central do primeiro pavimento da fachada atingida.

Com base na análise estrutural do programa observa-se nos resultados que diversos elementos estruturais primários não suportaram os esforços e atingiram a falha devido a limitações mecânicas e normativas.

Conclusões

A ação de esforços dinâmicos sobre estruturas civis é um fato que não pode ser negligenciado, ainda que não seja comum na maioria do território brasileiro. Registros de ações sísmicas ou atentados envolvendo detonações têm sido mais frequentes ao passar dos anos.

Tendo em vista a falta de códigos normativos sobre o tema, tomou-se como base o manual norte americano contra potenciais ataques terroristas a edificações. Para a obtenção de parâmetros referentes à explosão, optou-se por utilizar como base de dados os registros contidos no relatório do bombardeio de Oklahoma.

Sabe-se que as ações dinâmicas descritas neste trabalho possuem alto poder de destruição e mínima probabilidade de ocorrência. Sendo assim é recomendável como alternativa ao custo, a utilização de estruturas dúcteis capazes de absorver parte da

energia através da deflexão. Deve-se levar em consideração a ductilidade da estrutura de maneira global; ou seja, elementos estruturais e suas ligações devem funcionar de maneira mais homogênea possível.

A estrutura analisada sob esforços dinâmicos e estáticos deste projeto, foi considerada integralmente em regime elástico. Ao assumir o mencionado como premissa, aceita-se que os resultados obtidos podem não coincidir totalmente com a realidade; já que para fins de deflexão, uma estrutura real em concreto armado atuaria também em seu regime plástico. Grande parte da presente dissertação foi desenvolvida com o auxílio da ferramenta computacional SAP2000.

A análise gerou respostas compatíveis em ordem de grandeza com os registros do atentado ocorrido no bombardeio de Oklahoma. Os resultados mostraram que a estrutura não suportaria um evento de tal magnitude. Os elementos estruturais não foram capazes de absorver a energia da detonação, resultando em uma deflexão dinâmica excessiva que os levou à falha. Sendo assim, não houve satisfação quanto à concepção de estabilidade estrutural.

Referências

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS ASCE. The Oklahoma city bombing: Improving building performance through multi-hazard mitigation. FEMA 277. U.S.A., p. 116, 1996.
- CSI - COMPUTERS & STRUCTURES INC. Introductory Tutorial for SAP2000. Berkeley, CSI. p. 62, 2011.
- DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY. Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings. U.S, 2nd. ed.: FEMA-426 / BIPS-06 / , 2011.
- GRAHAM, A. R. Shock Wave and High Pressure Phenomena. USA, 2010.
- MAGNUSSON, J. Structural Concrete Elements Subject to Air Blast Loading. England. KTH, School of Architecture and the Built Environment (ABE), 2007.
- SILVA, W. C. L. Blast – efeitos da onda de choque no ser humano e nas estruturas. São José dos Campos. Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA, 2007.
- YANDZIO, G. Protection of Buildings Against Explosions. United Kingdom. Steel Construction Institute, 1999.