



Análise Operacional e Engenharia Logística: Delineamento de Experimentos

Comparação Entre os Critérios de Projeto de Carga de Vento e Efeito Sopro de uma Detonação – Caso das Torres de Alta Tensão

Comparison between the design criteria for wind load and blast effect – case of high voltage towers

Fausto Batista Mendonça¹, Girum Solomon Urgessa², Koshun Iha¹, José Atilio Fritz Fidel Rocco¹¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil²George Mason University (GMU), Fairfax/VA – USA

Article Info

Article History:

Received 11 November 2020
 Revised 18 March 2021
 Accepted 22 May 2021
 Available online 30 September 2021

Palavras Chave:

Materiais energéticos
Estrutura metálica
Carga dinâmica

Keywords:

Energetic materials
Steel frame
Dynamic load

E-mail addresses:

fausto@ita.br (F.B. Mendonça),
gurgessa@gmu.edu (G.S. Urgessa),
koshun@ita.br (K. Iha),
friz@ita.br (J.A.F.F. Rocco).

Resumo

O comportamento de estruturas de construção civil sob efeitos de cargas dinâmicas é um critério importante para a segurança das edificações. Carregamentos de vento e efeitos de detonação têm sido causas de alguns colapsos observados nos últimos anos, seja por forças da natureza ou ações beligerantes. Confrontando as considerações de normas de cargas de vento com efeitos de detonação notou-se que as cargas oriundas da detonação de materiais energéticos foram muito maiores que as consideradas por normas para efeitos de vento. Os resultados alcançados nessa comparação apontaram a necessidade de se levar em consideração, na fase de projeto, estas cargas para estruturas que tenham significado estratégico ou tático importante para o funcionamento do Estado em um período de conflito, como as estruturas metálicas de torres de alta tensão. Testes de campo com explosivos gerando ondas de choque contra estruturas metálicas foram recomendados, uma vez que os resultados apresentados aqui foram apenas teóricos.

Abstract

Structures behavior under dynamic load have been important design criteria to ensure buildings security. Wind load and blast effect have been responsible to generate some structures collapses in the last years, due to forces of nature or belligerent actions. Comparing the statements of technical standards relating to wind load to predicted blast effects it was possible to notice that blast load were higher than wind load. Results pointed out the need to take in account blast loads during the initial design of the structures. Mainly for buildings with high strategic value for the state during a conflict, like high voltage steel frame towers. Blast field test were recommended in the end of this work, since the results presented were purely theoretical.

I. INTRODUÇÃO

Da observação de uma imponente construção civil erguida, como um edifício com dezenas de andares ou uma ponte de concreto, vislumbra-se quão resistente e sólida elas são. Porém o que tem sido observado pelos noticiários ao redor do globo são ataques com explosivos ou implosões que demonstram que essas estruturas apresentam pontos vulneráveis de falência estrutural. Fatos como estes denotam quão frágeis podem ser, sob determinados critérios pré-estudados e avaliados de estática e dinâmica das estruturas, quando atingidas por carregamento dinâmico. O ataque terrorista às Torres Gêmeas em Nova York em setembro de 2001 é um exemplo deste comportamento.

A gama de materiais que constituem essas estruturas vem aumentando a cada ano, descobertas de materiais poliméricos, uso acentuado de peças estruturais metálicas e armaduras ativas em peças de concreto pretendido são alguns exemplos de materiais que imprimiram mudanças importantes no comportamento dessas edificações diante de efeitos de sopro pela detonação de artefatos bélicos.

Estudos sobre o comportamento de peças estruturais sujeitas a efeitos de sopro, fragmentação e calor, têm sido desenvolvidos há mais de uma década no intuito de mapear a fragilidade dessas estruturas a esses efeitos [1]-[2]-[3]-[4]. Neste trabalho será apresentada uma comparação entre os critérios de projeto adotados para atuação de carga dinâmica por vento em uma estrutura metálica e os efeitos de uma detonação por materiais energéticos nas suas proximidades.

II. MATERIAL E MÉTODO

O aço da construção civil apresenta vantagens na execução de edificações e na utilização, dependendo do ambiente em que está inserido e das solicitações durante a sua vida útil. Pela ótica de material que compõe um alvo de interesse militar, existem efeitos que um ataque com material energético de alto poder de destruição irão imprimir na estrutura que poderão comprometê-la. Um dos efeitos é o efeito sopro ou *blast*, que será quantificado para um armamento com carga de 500 lb de TNT e comparado com uma elevada carga de vento que é geralmente considerada em projeto de torres metálicas.

A. Características de Alvos Modernos

O avanço das pesquisas por materiais inovadores nas construções modernas vem trazendo resultados vantajosos para a arquitetura das edificações, como vãos maiores sem a presença de pilares intermediários, lajes mais esbeltas e estruturas mais leves com resistência mecânica compatível às mais antigas e robustas. Entretanto, a resistência a efeitos de detonação acaba diminuindo, pois contra o empuxo gerado numa explosão de um HE (alto explosivo) a rigidez da peça é de suma importância para absorver a energia gerada.

B. Estruturas Metálicas

Estruturas metálicas trazem uma vulnerabilidade que as peças de concreto armado são menos suscetíveis, que é o calor causado pela detonação ou por um eventual incêndio. O aço de construção civil traz na sua composição menos de 2% de carbono o que lhe confere fragilidade quando exposto a temperaturas maiores que 400°C, para variação da tensão de escoamento em colunas de aço [5]. No entanto, a temperatura de um incêndio acaba atingindo valores bem acima disso. As estruturas metálicas possuem uma camada de proteção contra incêndios, porém não conseguem evitar por muito tempo a dissipação de calor caso o incêndio persista [6]. Ensaio realizado por L. Choe, et al [7] demonstraram que colunas metálicas perdem capacidade de carga e rigidez quando submetidas a temperaturas entre 500°C e 600°C. O ferro carbono possui uma composição denominada “ferro α ” (ferrita) em temperaturas até 723°C que muda para “ferro γ ” (austenita) ao ultrapassar este valor [8], como pode ser visto no diagrama de fases do ferro fundido na Fig. 1. Esta mudança de fase altera a estrutura molecular modificando assim a capacidade de carga do elemento estrutural. Conforme a temperatura de exposição da estrutura metálica vai aumentando a capacidade da peça de ferro em suportar esforços vai diminuindo. Em estruturas hiperestáticas as cargas vão sendo redistribuídas para os elementos estruturais que ainda suportam mais carga devido ao fator de segurança com que foram projetados, mas conforme o incêndio, ou a causa da elevação da temperatura, vai se disseminando ao longo da estrutura esses elementos estruturais também vão entrando em falência [9]. Desta forma, a partir do momento que a estrutura não consiga mais redistribuir as cargas acontece o colapso de elementos estruturais que, se ainda estiverem fisicamente ligados a outros, acabam colapsando aqueles que não têm inércia suficiente para suportar a tração gerada pela falência. Esse efeito é como observar uma fila de peças de dominó que vão caindo uma após a outra gerado pela queda do primeiro da fila que empurra o segundo e assim sucessivamente, esse tipo de falência estrutural é denominado colapso progressivo. O colapso do World Trade Center nos EUA em setembro de 2001 é um exemplo desse tipo de acidente, conforme descrito na literatura [9].

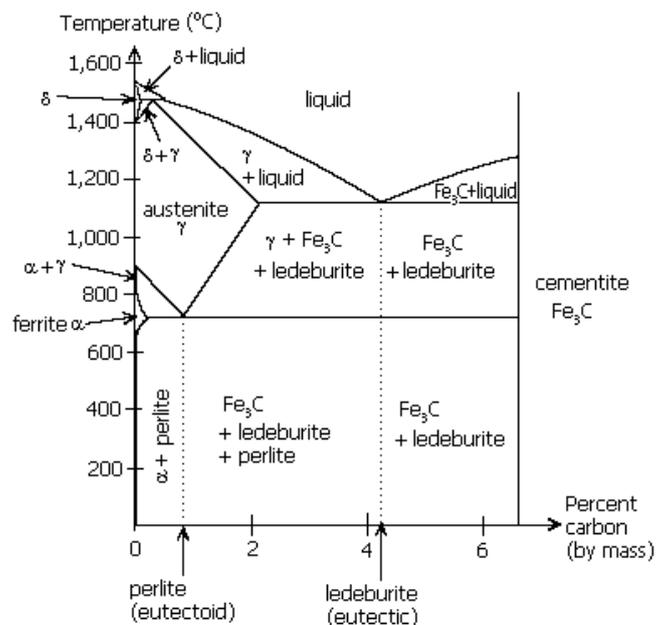


Fig. 1. Diagrama de fases do ferro fundido [8].

Outro fator importante ao observar o diagrama de fases da Fig. 1 é que para o ferro com menos de 2% de carbono já existe a possibilidade de entrar na fase líquida nas temperaturas em torno de 1100°C. O aço utilizado para construções de grande porte como pontes e viadutos apresenta uma composição de 0,3% (MASSA/MASSA) de carbono, o que lhe confere maior capacidade de suportar altas temperaturas conforme observado na faixa mais à esquerda do diagrama de fases, porém acima de 1450°C já começa a entrar na fase líquida. Conforme a temperatura vai se elevando os rearranjos moleculares vão acontecendo, diminuindo assim a capacidade de carga dos elementos estruturais após a transição de “ferro α ” para “ferro γ ”.

Torres de alta tensão são alvos de estruturas metálicas que podem estar isolados em regiões de menor importância em um Teatro de Operações (TO), porém, podem fornecer energia para regiões de extrema importância estratégica ou tática. Na Fig. 2 observa-se uma torre de alta tensão que foi a colapso por carga de vento em torno de 28 m/s em 2010, próximo à cidade de Campo Grande – MS [10]. É possível notar que alguns cabos não se romperam, porém em função de risco de curto circuito na rede a energia precisa ser desligada. Outros relatos de torres que vieram a colapso por simples carga de vento no Brasil são descritos por K. de S. Sing [11].

As subestações e usinas geradoras de energia elétrica são alvos de elevado valor que costumam estar guardados por artilharia antiaérea (AAAe), porém torres isoladas podem estar vulneráveis a ataque aéreo. Desta forma, imprimir sobre uma estrutura metálica uma carga de vento com a dimensão de uma onda de choque – frente de onda supersônica da região com pressão elevada que se forma imediatamente após a detonação e se desloca radialmente ao epicentro [1] – associado a um jato de altíssima temperatura, acabaria gerando o colapso da torre transformando-a em ferro retorcido e comprometendo a sustentação dos cabos, impedindo assim a transmissão de energia elétrica para áreas importantes do TO.



Fig. 2. Torre de alta tensão danificada por carga de vento [10].

Torres metálicas de link de comunicação (Fig. 3) também apresentam a mesma vulnerabilidade e poderiam comprometer as comunicações de forças inimigas se fossem atingidas por uma onda de choque resultado de detonação de alto explosivo.



Fig. 3. Base de uma torre metálica de link de comunicação (arquivo pessoal).

C. Cálculo das Cargas de Vento

A norma NBR 6123 [12] traz o cálculo da pressão dinâmica (q) exercida por uma carga de vento sobre uma determinada estrutura conforme as (1-2).

$$q = 0,613v_k^2 \quad (1)$$

Onde v_k é a velocidade característica dada por:

$$v_k = v_0 S_1 S_2 S_3 \quad (2)$$

Onde v_0 é a velocidade básica de vento que varia em função da localidade dentro da região do país considerado, S_1 é o fator topográfico e varia em função da área em que a estrutura está inserida, S_2 é o fator que considera a combinação dos efeitos da rugosidade do terreno, variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte dela e S_3 que leva em consideração o grau de segurança requerido e o tempo de vida útil da estrutura.

A força de arrasto (F_a), que age sobre torres reticuladas [12], é dada por (3).

$$F_a = C_a q A_0 \quad (3)$$

Onde C_a e A_0 são fatores que dependem de geometria e forma da estrutura, logo não irão influenciar numa comparação com a carga gerada pela onda de choque da detonação.

Para exemplificar esta situação, uma torre situada numa região que v_0 apresenta o valor de 50 m/s em um terreno pouco acidentado, o valor de S_1 , S_2 e S_3 são dados pela NBR 6123 [12] como 1,0; 1,08 e 1,10 respectivamente, o que apresenta $q = 2162,9$ N/m² ou 0,314 psi.

Pressões entre 7 e 10 psi são capazes de levar estruturas metálicas e de concreto a falência [2].

D. Velocidade da Onda de Choque

No trabalho desenvolvido por W. W. Berning [3] observa-se resultados de ensaios mostrando que uma carga de alto explosivo de 500 lb proporciona cerca de 360 m/s de velocidade de propagação da onda de choque a uma distância de 30 metros da detonação. Os resultados destes testes podem ser observados no gráfico da Fig. 4.

Nota-se que a detonação gera velocidades supersônicas próximas ao epicentro e que vai decaindo conforme se afasta. Este fato também é relatado por W. C. L. Silva [1].

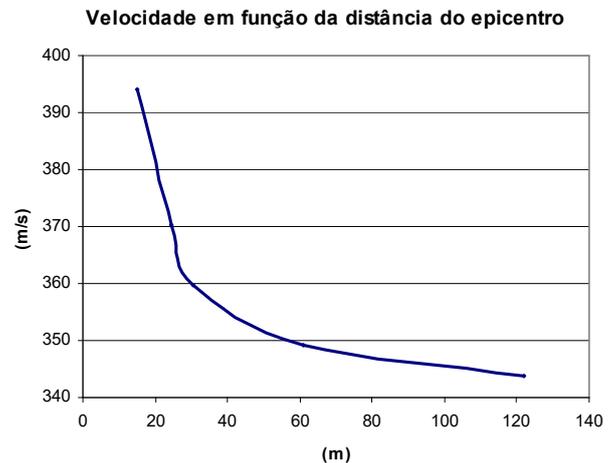


Fig. 4. Resultado de medição de velocidade (eixo y) da onda de choque de detonação de bomba de 500 lb em função da distância do epicentro (eixo x). Adaptado de [3].

E. Efeitos da Detonação em Estruturas Metálicas

Onda de choque e calor são alguns efeitos causados por detonação de HE, e podem causar danos a estruturas metálicas. A velocidade de detonação de um HE é superior a 6000 m/s no epicentro [2], porém vai perdendo energia para o meio ao se propagar no ar atmosférico. Entretanto, como visto na Fig. 4, a onda de choque ainda traz uma velocidade alta para estruturas convencionais construídas pelo homem que não têm capacidade de absorver tal efeito, pois as normas de cargas de vento levam em consideração velocidades que não se aproximam da velocidade do som. Na definição dos esforços que uma estrutura é capaz de suportar [13], ainda na fase de projeto, são levadas em considerações cargas: permanente (como peso próprio) e acidental (como trânsito de pessoas, veículos, equipes de manutenção e carga de vento); cargas de efeito *blast* e fragmentação, em geral, não são consideradas para edificações comuns como pontes, torres metálicas, viadutos e prédios.

F. Esforços Oriundos da Detonação de HE

O mecanismo de dissipação de energia após a detonação de um HE pode ser caracterizado pelo gráfico da Fig. 5 [1]-[2]-[4].

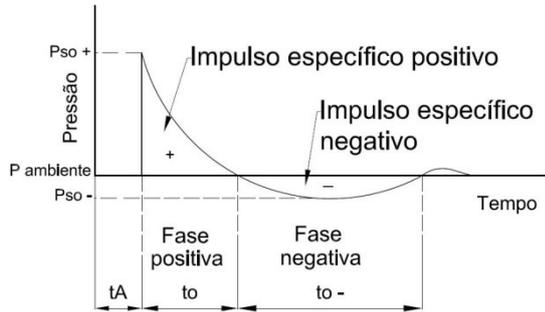


Fig. 5. Curva genérica da pressão no tempo gerada por uma detonação de HE.

A fase tA refere-se a distância em que a frente da onda de choque demora a percorrer para atingir o alvo. Pso+ é o valor da sobrepressão que atua no alvo ao ser atingido pela frente de onda, dando início à fase positiva (to) de pressão que vai decaindo com o tempo até entrar na fase negativa (to-). A fase negativa gera arrasto no alvo, o que é prejudicial para estruturas elevadas como torres [1]. A sobrepressão (Pso) para a detonação de uma bomba de 500 lb apresenta valores em torno de 7000 psi [2] sendo assim, o valor da pressão dinâmica de sua frente de onda é dado por (4), onde P_a é a pressão ambiente:

$$q = \frac{5p_{so}^2}{2(p_{so} + 7p_a)} \quad (4)$$

A velocidade da frente de onda é dada por (5) [4], onde a_0 é a velocidade do som no ar considerando a pressão atmosférica:

$$v = \sqrt{\frac{6P_{so} + 7P_a}{7P_{so}}} a_0 \quad (5)$$

Para a bomba considerada $q = 17246,5$ psi e $v = 315$ m/s. Esse valor de v não consta no gráfico da Fig. 4, o que infere que a distância em que a Pso considerada está do epicentro é maior que 120 m.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observa-se que a pressão dinâmica gerada na detonação de uma bomba de 500 lb é quase 55.000 vezes o valor da pressão dinâmica de projeto aplicando carga de vento conforme [12]. Outro fator relevante para as estruturas metálicas é o calor dissipado por uma detonação, entretanto esse calor decai muito rapidamente perdendo energia para o meio. Como a perda de calor para o meio é muito rápida e possui valor mais elevado a alguns metros do epicentro, a área vulnerável ao calor de uma torre metálica não será maior que alguns metros, porém carece de ensaios para determinar a dissipação do calor em volta do epicentro. O uso de armamento guiado garantiria o sucesso de um ataque a uma torre de transmissão, por exemplo. Como é um alvo que pode estar isolado em uma região do TO, sem cobertura de AAAe, justificaria o uso desse tipo de armamento. Não obstante a isso, a distância em que a pressão dinâmica gerada pela

frente de onda causaria algum dano à torre seria um ponto de impacto em trono de 120 m, porém quanto mais perto da torre maior a garantia de que a estrutura seria completamente danificada. Isso fornece uma área vulnerável vantajosa para planejar um ataque a uma torre de alta tensão.

Considerando a força de arrasto " F_a " diretamente proporcional à pressão dinâmica " q " é possível perceber que a força de arrasto que agirá na estrutura será muito maior que a estabelecida em projeto.

Em função de acontecimentos recentes, como ataques terroristas e conflitos armados, que trouxeram prejuízos econômicos e humanos, tanto o Eurocode, quando trata de dados básicos para projeto estrutural, como o Departamento de Defesa Americano (DOD) revisaram seus parâmetros de carregamento de estruturas, passando assim a considerar cargas por efeitos de explosões e impactos em projetos estruturais [2].

Interromper a utilização de uma torre de alta tensão na transmissão de energia para uma determinada área do TO pode ser um objetivo de suma importância em uma campanha. Dependendo de sua prioridade e do interesse do Comando, poderia justificar a utilização de armamento guiado, pois a proximidade do epicentro ($R < 120$ m) da explosão de uma bomba de 500 lb resulta em uma onda de choque e um fluxo de calor com grande probabilidade de colapsar uma torre metálica. Entretanto, esta lógica necessita ser comprovada experimentalmente e sugere alguns ensaios de campo para que não se coloque em risco os tripulantes treinados que são essenciais para a continuidade da campanha. Esses ensaios forneceriam subsídios para os planejadores de ataque, entregando às equipagens probabilidades de sucesso da missão mais acertadas com base em resultados reais. Se o impacto do armamento fosse distante o suficiente para não transmitir calor na estrutura poderá ainda sim causar algum dano à torre, devido ao impacto da pressão dinâmica da frente de onda que ainda seria letal para o alvo considerado. É possível inferir, com os resultados obtidos nesse trabalho, que a área vulnerável de uma torre metálica, em relação a um material energético de 500 lb, apresenta-se como um círculo em torno do alvo com raio de cerca de 100 metros, levando em consideração apenas o impacto da pressão dinâmica. Para estruturas que possuem elevado valor estratégico ou tático em um TO é essencial que seja levado em consideração, como critério de projeto, os efeitos da detonação de um HE. A implantação de barras extras de contraventamento, na estrutura, poderia ser estudada para uma posterior avaliação da capacidade de absorver os esforços imprimidos pela onda de choque em torres metálicas. Já em relação ao calor próximo ao epicentro, muretas de concreto armado junto às bases das torres poderiam evitar que o calor oriundo de uma detonação ao lado da mesma chegasse às partes metálicas. Os cálculos aqui apresentados podem ser considerados tanto para torres de alta tensão elétrica como de link de comunicação, pois a característica estrutural dos alvos é semelhante.

IV. OBSERVAÇÕES FINAIS

Foram comparados os resultados de pressão dinâmica de projeto com pressão dinâmica gerada por detonação de alto explosivo, agindo contra torres metálicas de alta tensão.

Os fatores considerados para o dimensionamento dos esforços gerados por carga de vento foram os mesmos estabelecidos em normas brasileiras. Para estimar a pressão dinâmica da detonação de HE foram utilizados resultados divulgados na literatura de ensaio de campo com carga explosiva de cerca de 500 lb de TNT. Os resultados apontaram que a pressão dinâmica prevista em projeto de torres metálicas não dimensiona a estrutura para suportar efeitos de pressão dinâmica, causada por detonação do alto explosivo considerado a distâncias menores que 120 metros. Como o trabalho apresenta resultados teóricos, ensaios destrutivos de campo seriam necessários para confirmar os comportamentos da estrutura aqui relatados.

REFERÊNCIAS

- [1] W. C. L. Silva. (2007). Blast – Efeito da onda de choque no ser humano e nas estruturas. Tese de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 107p.
- [2] W. Mamrak. (2013). Blast wave propagation in the air and action on rigid obstacles. Master's Thesis. Faculty of Civil and Environmental Engineering – Poznan University of Technology, Poznan, 106p.
- [3] W. W. Berning. (1948). "Investigation of the propagation of blast waves over relatively large distance and the damaging possibilities of such propagation." Ballistic Research Laboratories. Report n° 675. 50p.
- [4] Abdelahad F. A. (2008). Analysis of blast/explosion resistant reinforced concrete solid slab and T-beam bridges. Master Science Thesis. Florida Atlantic University. 132p.
- [5] N. Toric, A. Harapin, I. Boko. "Experimental verification of a newly developed implicit creep model for steel structures exposed to fire." *Engineering Structures*. 57, 2013, p. 116-124.
- [6] D. K. Banerjee. "Uncertainties in steel temperatures under fire." *Fire Safety Journal*. 61, 2013, p. 65-71.
- [7] L. Choe, A. H. Varma, A. Agarwal, A. Surovek. "Fundamental behavior of steel beam-columns and columns under fire loading: experimental evaluation." *Journal of Structural Engineering – ASCE*. 137, 2011, p. 954-966.
- [8] Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Austenita>. Acessado em 14 de maio de 2014, às 15:30h.
- [9] A. Agarwal, A. H. Varma. "Fire induced progressive collapse of steel building structures: The role of interior gravity columns." *Engineering Structures*. 58, 2014, p. 129-140.
- [10] Disponível em: <http://www.msrecord.com.br/noticia/ver/41335/chuva-e-vendaval-derruba-9-torres-de-transmissao-de-energia-da-eletrosul>. Acessado em 26 de maio de 2014, às 16:00h.
- [11] K. de S. Sing. (2009). Análise estática de torres metálicas treliçadas autoportantes para linhas de transmissão. Dissertação de Mestrado. UnB, Brasília, 110p.
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, "NBR 6123: Forças devido ao vento em edificações", Rio de Janeiro, 1988.
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, "NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações", Rio de Janeiro, 1980.