

MATERIAIS E MÉTODOS

ESTUDO DA COLISÃO DE UM AVIÃO COM A CONTENÇÃO DO REATOR NUCLEAR - DETERMINAÇÃO DA FORÇA IMPULSIVA

Luiz Pinguelli Rosa

COPPE e Instituto de Física da U.F.R.J.

1- INTRODUÇÃO: A IMPORTÂNCIA DA PROTEÇÃO DOS REATORES NUCLEARES

O problema clássico da colisão de projéteis com paredes rígidas ganhou importância para a engenharia nuclear atualmente, tendo em vista a preocupação, surgida em alguns países, de proteger os reatores nucleares contra quedas de aviões. Como se sabe, dentro do reator nuclear em funcionamento, existem toneladas de material altamente radioativo. Caso esse material seja liberado no meio ambiente, as consequências podem chegar, na pior hipótese, a 3 mil mortos e 45.000 casos de câncer em 3 semanas, outros 45.000 casos de câncer e 240.000 nódulos na tireóide em 30 anos, 30.000 defeitos genéticos em 150 anos¹.

Esses defeitos são estimados para uma população de 10 milhões de habitantes residindo dentro de um raio de 500 milhas do local do acidente. Cremos que esses números, embora estimados no caso mais desfavorável e pessimista, dão uma noção da seriedade do problema de reduzir, tanto quanto possível, o risco de liberar esse material radioativo. Nesse sentido, os reatores nucleares são protegidos por um enorme vaso de contenção de concreto, de dimensões muito maiores do que o vaso de aço que contém o combustível nuclear.

Em muitos reatores, como é o caso dos reatores alemães que o Brasil está adquirindo, a contenção tem duas paredes justapostas: a primária e a secundária. A principal finalidade da contenção é confinar o material radioativo caso haja uma explosão, do vaso do reator. Há entretanto explosões, possíveis de ocorrer em acidentes de perda de refrigerante, rompendo a contenção. Para evitá-las os reatores são dotados de complexos e redundantes dispositivos de segurança para desligá-los e para refrigerá-los em caso de emergência.

Esse dispositivo de refrigeração de emergência é naturalmente sujeito a falhas. Há trabalhos que propõem compensar essa vulnerabilidade aumentando a resistência dos prédios de contenção para que resistam à explosão do reator e à fusão do seu núcleo².

Uma razão que levou a aumentar a resistência dos prédios de contenção em vários reatores em construção no mundo, em particular na Alemanha, foi a proteção contra quedas de aviões - assunto que nos concerne aqui. A probabilidade de cair um avião sobre o reator é considerada tão pequena ($p < 10^{-7}$) que é desprezada perante outros eventos mais prováveis de ocorrerem.

Entretanto, já houve casos de queda de aviões nas proximidades de reatores³. Esse assunto tem sido considerado com severidade, merecendo um número integral da revista "Nuclear Engineering and Design" recentemente⁴. Por exemplo, a proximidade de aeroportos agrava a probabilidade de queda de avião no reator. Nos Estados Unidos não há obrigatoriedade de todos os reatores serem capazes de resistir a choque de aviões, embora cada caso seja considerado em separado e o primeiro reator do mundo a ter essa proteção tenha sido norte americano⁵. Na Alemanha, atualmente, todos os projetos de reatores são obrigados a levar em conta o impacto de um avião, tomando-se como padrão um Phantom de 22 ton. a 800 Km/h. Essa especificação obriga a parede de contenção ter uma espessura de 1,80m⁶. Na Suíça, após a queda de um avião comercial na vizinhança de um reator experimental e não muito longe de uma central nuclear de potência, esse tipo de acidente passou a ser incorporado nos requisitos exigidos para licenciar reatores. Tomando como padrão um avião de 90 ton. a 370 Km/h (Boeing 707 em velocidade de aproximação do solo) a espessura do concreto de contenção foi estabelecida em 1,20m³. Outros reatores em outros países têm contenção de espessuras variadas, sendo frequente o valor de 0,60m, embora, mesmo sem norma geral explícita, haja vasos de contenção mais espessos - como no reator italiano de Caorso (1,40m)⁷.

No Brasil, o reator de Angra I possui contenção de 0,60m, de acordo com a norma norte-americana. Os projetos dos reatores Angra II e III dão a espessura de contenção de 0,60m⁸ e não de 1,80m - que é a espessura atualmente usada nos projetos alemães de reatores idênticos aos nossos.

Dadas as condições brasileiras de tráfego aéreo serem distintas daquelas da Alemanha - onde há voos rasantes frequentes de aviões militares em treinamento - é de se esperar que o risco de acidente aéreo grave sobre um reator seja menor no Brasil.

De qualquer forma, toda decisão relativa à segurança de reatores e à proteção da população deve ser claramente divulgada ao público⁹, com todas as implicações que ela traz.

As informações disponíveis, liberadas de forma não sistemática

ca, são incompletas e não muito claras, dando, por exemplo, a entender que os reatores de Angra são capazes de resistir a um jumbo e são seriam vulneráveis a choques de aviões com velocidades supersônicas¹⁰. Segundo nossos resultados, dentro dos limites de validade dos nossos cálculos, isso não é correto.

2- O PROBLEMA DA COLISÃO DE UM AVIÃO COM UMA PAREDE DURA

Por essas razões realizamos cálculos simples e compreensíveis, para quem tenha formação básica de Física, da força na colisão de diversos tipos de aviões com uma parede dura. Há trabalhos publicados sobre o assunto^{11/14} com cálculos mais elaborados e precisos, mas que utilizam métodos mais complicados, obrigando em geral a solução numérica em computador. Nossas fórmulas, conduzem a resultados compatíveis com esses trabalhos, nos casos em que há comparação, e permitem com muita facilidade fazer previsões em uma grande variedade de situações. Além de formular e testar alguns modelos de fácil aplicação, incluímos o efeito das turbinas de maneira específica para diversos tipos de aviões comerciais.

Estaremos restritos ao cálculo do esforço que a parede deve exercer para suportar o choque, isto é, para desacelerar o avião até o repouso, desprezando o esforço para destruí-lo.

O primeiro trabalho sobre o impacto de avião em reatores foi feito por Riera¹¹ e até hoje serve de referência básica para os que se seguiram. Yang e Godfre¹², como Riera, consideraram a colisão de um Boeing 707 a cerca de 400 Km/h com uma parede dura. Em ambos os trabalhos é determinado o valor máximo da força, que atinge 90000KN¹¹, quando se usa a distribuição de massa real do avião. Em outro trabalho¹³ esse valor é reduzido para 50000KN, usando-se uma distribuição de massa hipotética simplificada. A justificativa dada é que há várias incertezas nos dados sobre o avião e na maneira como ocorre o choque, sendo preferível usar valores médios simplificados. Entretanto, a recomendação usada na referência³ é de 90000KN para esse mesmo caso.

Drittler e Gruner¹⁴ calcularam a força total sobre uma parede rígida em caso de impacto de projéteis usando o método de diferenças finitas e realizaram aplicação ao choque de um Phantom a 800 Km/h. O valor máximo da força foi calculado em 110000KN. Hammel considerou a influência da elasticidade da parede¹⁵, concluindo que é muito pequena, permitindo considerá-la como rígida na determinação da força máxima no impacto do avião.

Estudos realizados na Inglaterra baseados na mesma carga usada por Riera levaram à conclusão que a espessura da contenção deve estar entre 1,40m e 2,00m¹⁶.

Em todos esses casos o efeito das turbinas é incorporado ao efeito global do avião. Entretanto, o método de Dröttler e Gruner foi também aplicado ao caso de uma turbina, isoladamente¹⁷.

O resultado obtido é surpreendente: a força máxima para uma turbina a 400 Km/h pode atingir 80000KN.

Consideremos um avião de massa M , comprimento L , seção reta S , que atinge uma parede supostamente rígida, - do vaso de contenção de um reator nuclear - com velocidade V_0 . O ângulo de incidência é tomado 90°. Interessa-nos determinar o esforço que essa parede suportará devido ao choque. Esse choque é complexo porque o avião possui uma estrutura extremamente heterogênea, como uma fuselagem relativamente pouco densa e muito macia, mas com partes bastante maciças e rígidas, como são as turbinas.

A distribuição de massa ao longo do comprimento do avião varia fortemente. Durante o choque, o avião certamente se desintegrará e haverá fragmentos que sofrerão colisões quase elásticas com a parede, enquanto que a parte que permanecer solidária ao bojo do aparelho até atingir a parede, sofrerá um choque quase perfeitamente inelástico.

Trata-se portanto, de um problema físico complicado, cuja solução dependerá do modelo que imaginarmos para descrever a colisão. É possível, felizmente, com hipóteses razoáveis, idealizarmos modelos bastante simples, que nos permitam obter a ordem de magnitude da força que a parede sofrerá ou terá que exercer sobre o avião. Para isso bastará mobilizar conhecimentos elementares da mecânica clássica, um pouco de bom senso e imaginação.

3- MODELOS DE CHOQUE COMO DESACELERAÇÃO DE UM PONTO MATERIAL

a) Força desaceleradora constante

Consideremos que o choque seja equivalente à desaceleração de um ponto material de massa igual à do avião, situado no seu centro de gravidade, e que deverá chegar ao repouso em uma distância $X = L/2$. Essa hipótese é razoável, se tomamos o C.G. situado na metade do avião e consideramos que este começa a se desacelerar a partir do instante em que o bico do avião toca a parede, devendo chegar ao repouso quando a metade do aparelho já tiver atingido a parede. Embora

muito rudimentar, essa imagem é tão simplificadora que não custa ver o resultado a que conduz. Supondo ainda, que a aceleração (negativa) seja constante, podemos obtê-la e o tempo de colisão pelas fórmulas cinemáticas

$$V^2 = V_0^2 - 2 a x \quad (1)$$

$$V = V_0 - a t$$

com $V = 0$ e $x = \frac{L}{2}$

Temos então

$$a = \frac{V_0^2}{L}$$

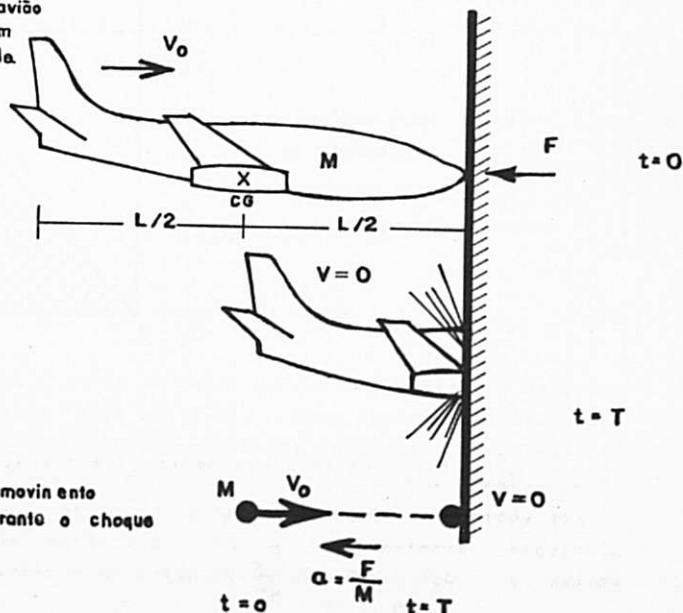
$$t = T = \frac{V_0}{a} = \frac{L}{V_0} \quad (2)$$

Portanto, a força que desacelerará o avião será

$$F = Ma = \frac{M V_0^2}{L}$$

Essa é a força que a parede deverá exercer para levar o avião ao repouso. Para resistir ao choque, a parede terá de ser capaz de prover essa força desaceleradora e mais a força de destruição do avião, que esperamos ser pequena em face da primeira.

Fig. 2 Choque de um avião de massa M com uma parede rígida.



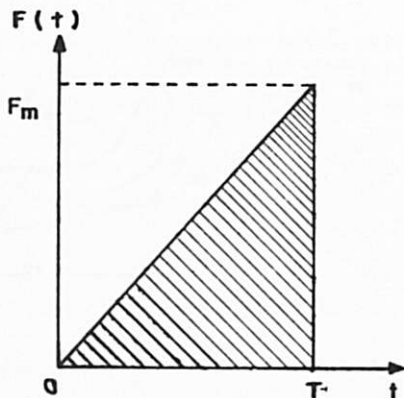
Ponto representativo do movimento desacelerado do avião durante o choque

Podemos considerar que a fórmula que acabamos de obter dê o valor médio da força desaceleradora, mas não é razoável supor que a força real seja constante durante a colisão. Entre outros fatores a distribuição de massa do avião está longe de ser uniforme. Interessá-nos saber o valor máximo que a força atinge durante o choque, pois o prédio deverá estar apto a suportá-la, e esse valor pode ser bem maior que o valor médio da força. Procuremos, portanto, levar em conta a variação da força durante o tempo de colisão.

b) *Força desaceleradora variando linearmente com o tempo de colisão*

Vamos modificar o modelo, supondo que a força cresça linearmente com o tempo, sendo nula no início do choque ($t=0$) e atingindo seu valor máximo ao fim do choque ($t=T$). Essa hipótese não é muito aceitável fisicamente pois espera-se que a força caia a zero progressivamente e não abruptamente. Torna-a um pouco menos irreal, entretanto, o fato de a massa estar concentrada no meio do avião, pois estamos supondo que o mesmo atinge o repouso quando a metade dele colapsou-se na parede.

Fig. 3 Força variável de desaceleração do avião no choque (linear)



Se a força varia linearmente, a aceleração será também linear

$$a = -\alpha t$$

$$\alpha = \frac{F_m}{MT}$$

(4)

Logo a velocidade e a posição serão respectivamente

$$\begin{aligned} V &= V_0 - \frac{\alpha t^2}{2} \\ x &= V_0 t - \frac{\alpha t^3}{6} \end{aligned} \quad (5)$$

Quando o ponto material chegar ao repouso ($V=0$)

$$t^2 = T^2 = \frac{2 V_0}{\alpha} \quad (6)$$

a distância x percorrida por ele é dada por

$$x^2 = \frac{8}{9} \frac{V_0^3}{\alpha}$$

e o tempo de colisão será

$$T = \frac{3}{2} \frac{x}{V_0} = \frac{3}{4} \frac{L}{V_0} \quad (7)$$

que é menor do que no modelo anterior.

Se o choque é perfeitamente elástico, a impulsão da força, da pela área do triângulo da figura 3, será igual à quantidade de movimento inicial

$$\int_0^T F(t) dt = \frac{F_m T}{2} = M V_0$$

O valor máximo da força desaceleradora será

$$|F_m| = 2 \frac{M V_0}{T} = \frac{8}{3} \frac{M V_0^2}{L} \quad (8)$$

Esse valor já é cerca do dobro do que foi calculado anteriormente, quando tomamos a força constante. Isso implica em maior exigência na especificação do prédio do reator para suportar o impacto.

Como crítica a ambos os modelos vistos, devemos lembrar que, à medida que a massa do avião se colapsa na parede, a posição do C. G., relativa ao avião, se altera. Logo, o ponto material escolhido para descrever o movimento do avião deixa de ser o C.G., à medida

em que avança em direção à parede durante o choque. Na maioria dos casos é razoável a hipótese de que a massa está concentrada no meio do avião, onde pusemos o C.G., tornando o erro menos grave. De qualquer maneira, é muito limitado descrever a colisão de um projétil, tão complexo e heterogêneo quanto um avião, através da desaceleração linear de um ponto material.

Para melhorarmos os modelos devemos cogitar de levar melhor em conta a estrutura interna do avião.

c) Força desaceleradora harmônica

Uma maneira de levar em conta o efeito de resistência da estrutura do avião no choque é simular a compressão que o seu corpo deve sofrer por uma "mola" que se interpõe entre o ponto material e a parede. Em resumo, substituímos a força linear no tempo, arbitrada no modelo anterior, por uma força linear na dimensão espacial x , que dá o deslocamento do ponto material, durante a colisão, relativamente à posição que ele ocupava no início da colisão. Assim, x variará de zero até $L/2$.

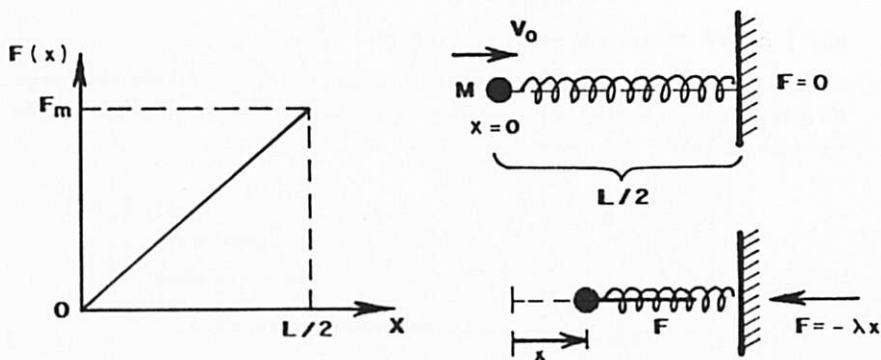


Fig. 4

No final da colisão, a mola estaria totalmente comprimida, portanto com energia potencial máxima armazenada e o ponto material teria alcançado a parede com velocidade nula. Em um oscilador harmônico real, o ponto material reverteria o sentido do movimento, mas no nosso caso não, pois estamos supondo que a estrutura do avião (cuja

resistência é representada pela mola) se colapsa na parede. Logo,

$$F = - \lambda x \quad (9)$$

e a lei de Newton nos dá a equação harmônica

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + w^2 x = 0$$

com $w^2 = \frac{\lambda}{M}$, cuja solução é

$$x(t) = A \sin w t$$

As condições iniciais são

$$x(0) = 0$$

$$\frac{dx}{dt}(0) = V_0$$

dando

$$A = \frac{V_0}{W} \quad (10)$$

e as condições finais são

$$x(T) = \frac{V_0}{W} \sin w T = \frac{L}{2}$$

$$\frac{dx}{dt}(T) = V_0 \cos w T = 0$$

logo,

$$\frac{L}{2} = \frac{V_0}{W}$$

$$T = \frac{\pi}{2W} = \frac{\pi}{4} \frac{L}{V_0} \quad (11)$$

O tempo de duração da colisão é, nesse caso, ligeiramente superior ao do modelo anterior.

O valor máximo da força ocorrerá também para $t=T$

$$|F_m| = M w^2 \frac{V_0}{w} \sin w T = 2 \frac{M V_0^2}{L} \quad (12)$$

Esse valor, agora, é o dobro do que obtivemos no primeiro modelo.

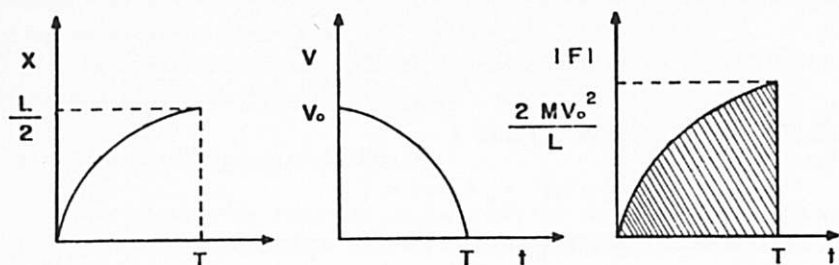


Fig. 5 Posição, velocidade e força harmônica

A área sob a curva de $F(t)$ dá a impulsão, que tem de ser igual à variação da quantidade de movimento

$$\int_0^T F dt = -M w V_0 \int_0^T \sin w t = M V_0$$

Muitos outros modelos poderiam ser usados ainda dentro da aproximação da desaceleração do ponto material para descrever o choque do avião. Um deles, que naturalmente se seguiria na nossa sequência, seria o movimento harmônico amortecido. Entretanto, pouco teríamos a ganhar em compreensão do processo ou em precisão do resultado. O passo seguinte, será, pois, detalhar a estrutura do avião e ver seu efeito no choque.

(o artigo continuará no próximo número).

REFERÊNCIAS

1. Nuclear Energy - Issues and Choices, Ford Foundation and MITRE Corporation, U.S.A. (1977).
2. J.D. STEVENSON - Summary of International Extreme Load Design Requirements for Nuclear Power Plant Facilities, Proceedings of the Conference on Structural Analysis, Design and Construction in Nuclear Power Plants, P. Alegre (1978) 499.
3. P. DEGEN, H. FURRER, J. JEMIELEWSKI - Structural Analysis and Design of a Nuclear Power Plant Building for Aircraft Crash Effects, Nuclear Engineering and Design, 37 (1976) 249.
4. Nuclear Engineering and Design, 37 (1976).
5. O reator foi o de Harrisburg em 1969, ver ref. 2.
6. G. EICKE - Extreme Load Design of PWR Building - idem ref. 2, (1978) 189.
7. R. TASSELLI - Qualificazione delle Structure Industriali Impregnate nell' allestimento di una Centrale Nucleare, in Il Controllo Sociale dell' Energia Nucleare in Italia, a cura di S. Garriba e S. Vaccà (Franco Angeli Editore) Milano (1978) 82.
8. B. ERNANI DIAZ, F. COSTA REIS, H. ROTTINGER - Loading Determination and Structural Analysis of the Concrete Containment Shell of a Reactor Building - idem ref. 2 (1978).
9. Boletim Especial da Sociedade Brasileira de Física - Relatório do Grupo de Trabalho Sobre a Poluição Nuclear (1977).
10. Jornal do Brasil 12/10/78, 13/10/78, O Globo 13/10/78.
11. J.D. RIERA - On the Stress Analysis of Structures Subjected to Aircraft Impact Forces, Nuc. Eng. Des. 8 (1968) 415.
12. M.T. YANG e D.A. GODFREY - Structural Analysis of Aircraft Impact on a Nuclear Containment Vessel, Nucl. Eng. Design 11 (1970) 295.
13. A.K. KAR - Design of Aircraft Impact - idem ref. 2 (1978).

14. K. DRITTLER e P. GRUNER - Calculation of the Total Force Acting Upon a Rigid Wall by Projectiles, Nuc. Eng. Des. 37 (1976) 231.
15. J. HAMMEL - Aircraft Impact on a Spherical Shell, Nuc. Eng. Des. 37 (1976) 205.
16. D. CARLTON e A. BEDI - Theoretical Study of Aircraft Impact on Reactor Containment Structures. Nuc. Eng. Des. 45 (1978) 197.
17. K. DRITTLER e P. GRUNER - The Force Resulting from Impact of Fast Flying Military Aircraft Upon a Rigid Wall, Nuc. Eng. Des. 37 (1976) 245.