ESTUDO DA COLISÃO DE UM AVIÃO COM A CONTENÇÃO DO REATOR NUCLEAR - DETERMINAÇÃO DA FORÇA IMPULSIVA - 2a. parte

Luiz Pinguelli Rosa
COPPE e Instituto de Física da U.F.R.J.

4- MODELOS DO CHOQUE CONSIDERANDO O PROJÉTIL COMO UM OBJETO EXTENSO

a) Casos extremos: corpo rígido e corpo macio

Consideremos um corpo rígido, como uma barra de ferro maciça, que atinge uma parede também rígida e resistente. Sejam ainda M, L e V_0 os valores da massa, comprimento e velocidade. Quando a ponta do corpo atingir a parede, uma onda de choque será transmitida através da barra, percorrendo todo seu comprimento L, até sua extremidade posterior, comprimindo-o progressivamente.

Em seguida há a descompressão, refletindo-se uma onda de choque que percorre a barra em sentido contrário ao da primeira, até chegar à parede, quando então o corpo reverte sua quantidade de movimento, afastando-se da parede com velocidade oposta à da chegada. Se o choque é perfeitamente elástico, sendo a parede irremovível, a quantidade de movimento final será igual, mas de sinal contrário à inicial. Logo a variação da impulsão será

$$\int_0^T F dt = 2 M V_0$$

O tempo de duração do choque é o tempo que levou a onda de choque para ir da parede ao fim da barra (compressão) e para vir de volta até a parede (descompressão). A velocidade da onda de choque é igual à do som

$$c = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2} \qquad (14)$$

onde E é o módulo de elasticidade e ρ a densidade. Logo, o tempo de colisão de um corpo rígido é

$$T = \frac{2L}{c} \qquad (15)$$

Se a força desaceleradora for constante, o que é razoável para uma barra homogênea, ela será

$$F = \frac{2\ M\ V_0}{T} = \frac{M\ V_0\ c}{L}$$

É de se esperar que $c \gg V_0$ pois a velocidade do som em um sólido é muito maior do que no ar, a qual já é uma alta velocidade ($\sim$340 m/s) para um corpo macroscópico. Portanto

$$F = \gamma \frac{M\ V_0^2}{L} \tag{16}$$

onde

$$\gamma = \frac{c}{V_0} \gg 1$$

Se o choque for inelástico esse valor se alterará, mas se a parede resistir ao choque a força terá de obedecer a desigualdade acima.

Consideremos agora a colisão de um corpo muito macio, como um longo saco contendo um fluido, a grande velocidade, em que podemos desprezar a onda de choque e considerar que a parede "sente" a carga à medida que a massa chega a ela e se esparrama. Reciprocamente, a retaguarda do corpo não "sente" o choque quando a extremidade da frente atinge a parede. A situação é análoga à de um jato de fluido contra uma parede. Assim, a velocidade V_0 permanece inalterada em cada ponto do corpo, durante a colisão, até que ele próprio atinja a parede e seja desacelerado e levado ao repouso. Isso significa fisicamente que o tempo de desaceleração total de cada elemento constituinte do corpo é muito menor do que o tempo de colisão do corpo todo. O choque é suposto perfeitamente inelástico, de modo que o corpo se colapsa na parede impenetrável e sua quantidade de movimento vai de $M\ V_0$ a zero.

Supondo a força desaceleradora constante durante a colisão, o que novamente é compatível com um corpo homogêneo, ela será

$$F = \frac{M\ V_0}{T} \tag{17}$$

Durante o choque a velocidade permanece constante e igual a V_0 para os elementos constituintes que ainda não tenham atingido a parede, logo

$$T = \frac{L}{V_0} \tag{18}$$

e portanto

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

Esse valor é igual ao obtido com a aproximação do ponto material em desaceleração constante e é menor do que os valores obtidos quando supusemos que a força varia durante a colisão. Por outro lado ele é bem menor do que a força achada no choque elástico de um corpo rígido com força desaceleradora constante.

A variação da força durante a colisão e a estrutura interna do projétil, fatores esses interligados, desempenham papel essencial na determinação da força máxima que a parede deve suportar ou exercer.

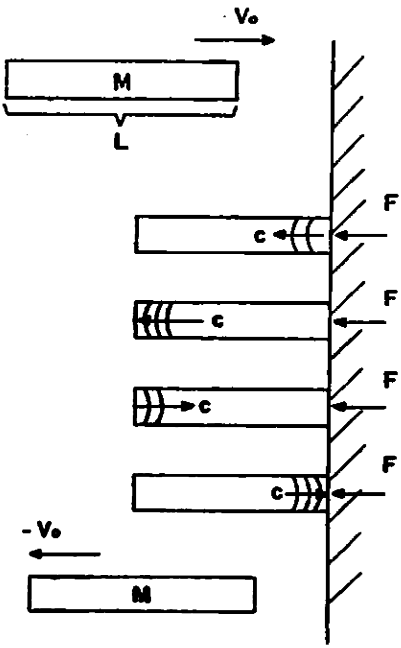


Fig. 6

Choque perfeitamente elástico de um corpo rígido contra uma parede impenetrável

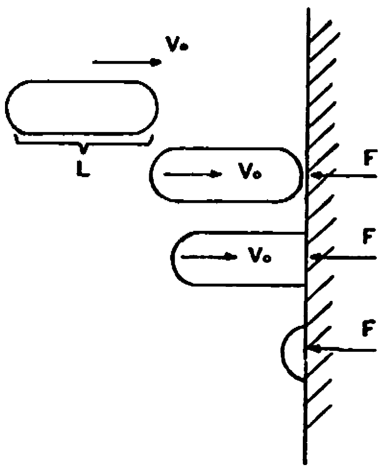


Fig. 7

Choque perfeitamente inelástico de um corpo macio contra uma parede impenetrável

b) *Colisão do avião considerado como objeto extenso com distribuição de massa não uniforme*

Certamente a colisão de um avião com uma parede não pode ser exatamente reduzida a nenhum dos casos anteriores. Certamente ela tem um pouco de cada caso. O avião, como um todo, é um objeto macio, mas possui partes muito rígidas. Globalmente a colisão deverá ser quase perfeitamente inelástica, pois o avião se colapsa ao bater na parede e perde toda sua quantidade de movimento. Entretanto, partes do avião se desprenderão dele e sofrerão provavelmente colisões quase elásticas com a parede.

Vamos supor que a massa do avião seja máxima na metade do seu comprimento e que decresça a zero nas extremidades. Essa hipótese não é absurda e é até mesmo bastante próxima da realidade em vários aviões existentes.

A distribuição de massa ao longo do comprimento do avião

$$m(x) = \frac{dM}{dx} \tag{20}$$

obedecerá uma distribuição triangular (figura 8) com as condições

$$m(0) = M(L) = 0$$

$$m(L/2) = m_{max}$$

$$\int_0^L m(x)\, dx = \frac{m_{max}\, L}{2} = M$$

ou seja

$$m_{max} = \frac{2\, M}{L} \tag{21}$$

Admitamos que a colisão seja análoga à do corpo macio, perfeitamente inelástica. Logo, à medida que a frente do avião se colapsa na parede, a parte de trás continua a avançar com a mesma velocidade que possuia antes da colisão. Podemos definir que a massa dinâmica que chega à parede no tempo t é

$$m(t) = \frac{dM}{dx}\,\frac{dx}{dt} = m(x)\; V_0 \tag{22}$$

cuja distribuição será também triangular, com máximo na metade do tem po de colisão $t = \frac{T}{2}$, sendo nula a $t=0$ e $t=T$.

É portanto razoável supor de a força que a parede exercerá para desacelerar o avião varie também triangularmente, como a massa dinâmica que a atinge ao decorrer do tempo de colisão. Logo,

$$F(0) = F(T) = 0$$

$$F\left(\frac{T}{2}\right) = F_m$$

A impulsão deve ser igual à quantidade de movimento inicial, pois a final é nula

$$\int_0^T F\,dt = \frac{1}{2} F_m T = M V_0 \tag{23}$$

e

$$F_m = 2 \frac{M V_0}{T} \tag{24}$$

O tempo de colisão, já que a velocidade permanece constante durante o choque até que cada ponto do avião colapse na parede, será novamente dado pela fórmula (18).

Portanto

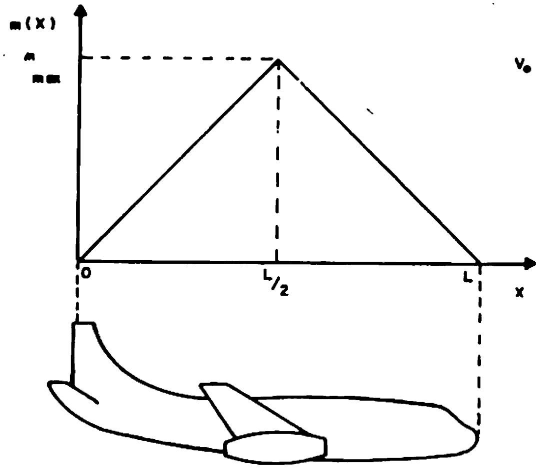
$$F_m = 2 \frac{M V_0^2}{L} \tag{25}$$

valor esse exatamente igual ao da aproximação do ponto material desacelerado por uma força harmônica.

Em verdade, a hipótese de tomar V_0 constante durante o choque, ou seja, de tratar o avião como um corpo muito macio, tal qual um saco com fluido, é exagerada. Há partes rígidas que podem tornar o valor máximo da força maior do que o calculado.

Em compensação, a variação da massa ao longo do comprimento do avião pode ser um pouco mais branda do que o modelo triangular usado, o que contribuiria para abaixar o valor de F_m. Otimistamente, um erro pode compensar o outro, mas, em princípio, podemos tentar introduzir a correção devida ao efeito das turbinas.

Uma crítica mais substancial é a de que a força não deve ser necessariamente proporcional à massa dinâmica por uma constante, ou seja, a força pode ter uma variação temporal diversa da triangular. Apesar disso, cremos que a fórmula obtida forneça uma ordem de magni



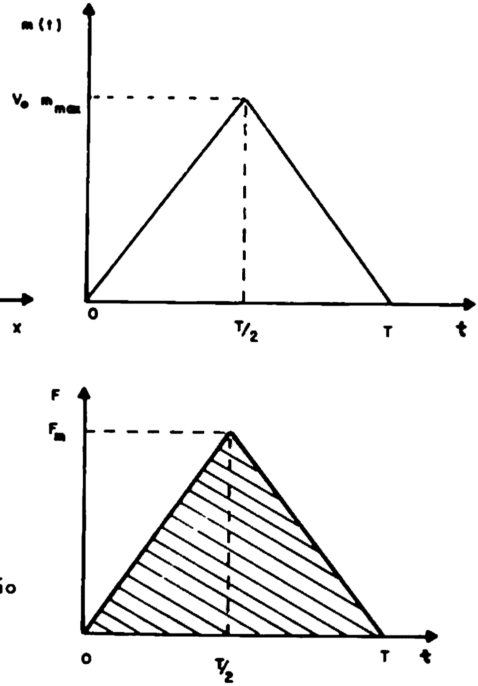


FIG. 8 (a) - Efeito da distribuição de massa.

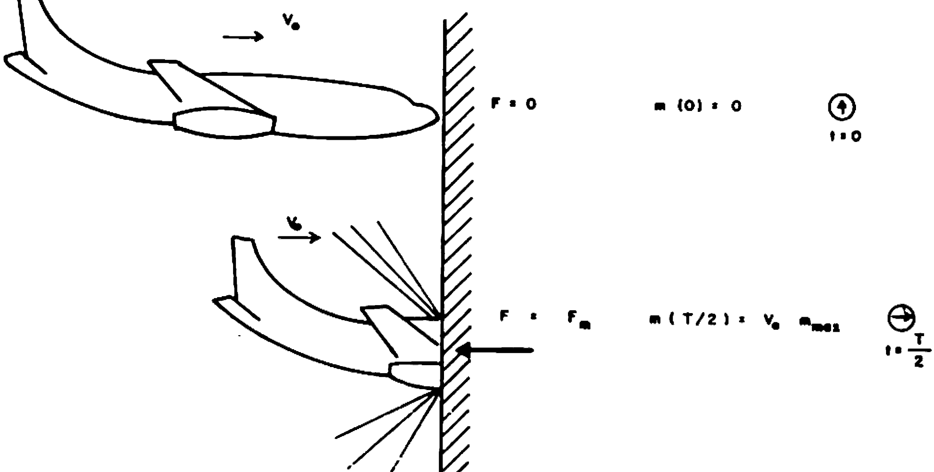


FIG 8 (b) - Colisão inelástica do avião "macio" com força desaceleradora triangular.

tude e não pretendemos mais que isso.

c) *O efeito das turbinas nos grandes aviões*

Na colisão de grandes aviões, comerciais ou de igual porte, as turbinas constituem um problema a parte, pois são muito mais compactas e rígidas do que o restante do avião. Logo, elas podem produzir efeitos específicos no choque, sendo útil destacá-las do tratamento anterior, em que o avião foi considerado um corpo macio, colidindo inelasticamente com uma parede.

Uma maneira elementar de levar em conta o efeito das turbinas é decompor o avião em n+1 partes: as suas n turbinas mais o restante do seu corpo.

É razoável considerar cada turbina como um corpo homogêneo, com massa uniformemente distribuida ao longo do seu comprimento, de modo que vamos tomar a força desaceleradora constante para elas.

Para o resto do corpo do avião, excluidas as turbinas, vamos manter a hipótese de distribuição triangular de massa com o comprimento, com máximo no meio do avião. Embora tenhamos subtraido as turbinas, ao decompormos teoricamente o aparelho, a distribuição triangular permanece razoável pois as asas e os tanques de combustível ficam em geral no meio do avião, os quais contribuem muito para a massa total.

Dessa forma, a força máxima desaceleradora, suposta proporcional à massa dinâmica que atinge a parede na unidade de tempo será

$$F = 2\,\frac{(M - nm)\,V_0^2}{L} + n'\,f \tag{26}$$

onde $\underline{n}$ é o número de turbinas, $\underline{m}$ a massa de cada uma delas e $\underline{n'}$ o número de turbinas situadas no meio do avião, onde ocorre o valor máximo da carga, por hipótese.

Supomos que cada turbina contribua para uma força extremamente concentrada em um intervalo de tempo $\mathcal{T} \ll T$, quase como um pulso que se superpõe à força desaceleradora do resto do avião.

Para um avião com turbinas no meio e atrás, a situação que imaginamos é mostrada na figura 9.

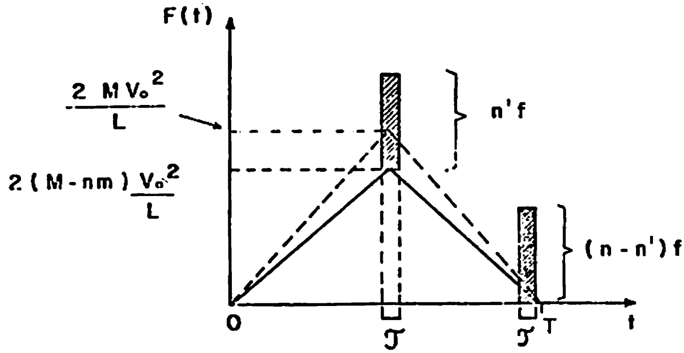


Fig. 9 Efeito das turbinas na força desaceleradora

O problema agora é usar um modelo aceitável que nos permita calcular f .

Se tomarmos a turbina como um corpo rígido constituído de alumínio essencialmente (módulo de Young $E = 7.10^{10} N/m^2$, densidade $\rho = 2700 kg/m^3$) e calcularmos o tempo de colisão usando a velocidade da onda de choque ($c = 5000 m/s$) obtemos $\mathcal{T} = \mathcal{T}_e = 0,002 s$ para uma turbina de comprimento $l = 5m$.

Esse tempo é pequeno demais e dará valores exagerados para a força, na aproximação quase elástica, em que o momentum varia de $2\ m\ V_0$ aproximadamente (f pode atingir a 180.000 KN para $m = 1,8 ton$ e $V_0 = 400$ km/h).

Efetivamente, a turbina, embora mais rígida que o avião, não é perfeitamente rígida e nem o choque é perfeitamente elástico. Chamando de $\mathcal{T}$ o tempo de colisão, sendo e o coeficiente de restituição ($0 \leq e \leq 1$) temos

$$f\,\mathcal{T} = (1 + e)\ m\ V_0 \tag{27}$$

Para $e=1$ o choque é elástico e para $e=0$ é perfeitamente inelástico, caso esse em que já obtivemos uma expressão para o tempo de colisão

$$\mathcal{T}_i = \frac{l}{V_0} \tag{28}$$

Esperamos que $\mathcal{T}_e < \mathcal{T} < \mathcal{T}_i$. Usando a expressão acima, com $l=5m$

e $V_0 = 400$ km/h , obtemos $\mathcal{T}_i = 0{,}05\,s = 25\,\mathcal{T}_e$, logo

$$\mathcal{T} = \frac{\mathcal{T}_i}{\lambda} \tag{29}$$

com $25 > \lambda > 1$.

Temos então que

$$f = \lambda\ (1+e)\ \frac{m\ V_0^2}{l} \tag{30}$$

Por exemplo, para valores arbitrados: $\lambda=2$, $e=0{,}5$ teremos

$$\beta = \lambda\ (1+e) = 3 \tag{31}$$

Voltando à expressão geral da força, com a colisão das turbinas tratadas desse modo, teremos

$$F = 2\ \frac{M\ V_0^2}{L}\ (1+\delta)$$

com

$$\delta = \frac{n\,m}{M} \left(\frac{\beta}{2}\ \frac{n'}{n}\ \frac{L}{l} - 1 \right) \tag{32}$$

Para $n\,m/M = 1/10$, $n' = n$, $\beta = 3$, $L/l = 8$ o valor de δ é quase 1 , logo

$$F = 4\ \frac{M\ V_0^2}{L} \tag{33}$$

isto é, o efeito das turbinas dobraria o valor da força, segundo nossas hipóteses. Tal efeito será tão mais importante quanto maiores forem as razões $n\,m/M$, L/l e n'/n . Além desse efeito global, deve-se ter em conta os efeitos locais da turbina no ponto de impacto, que dependerão da pressão que ela exercerá

$$p = \frac{f}{s_0} = \frac{\beta\ m\ V_0^2}{\pi\ r^2\ l} \tag{34}$$

sendo s_0 a área transversal e r o raio da turbina.

5 - APLICAÇÕES E COMPARAÇÕES

Antes de mais nada comparemos os resultados obtidos para a força máxima que a parede deve ser capaz de suportar e para o tempo de duração da colisão, em cada um dos casos estudados. É possível resumir todos os resultados nas fórmulas já vistas

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

$$T = \alpha \frac{L}{V_0} \tag{35}$$

variando γ e α conforme o modelo, sendo o primeiro sempre maior que 1 e o segundo sempre menor que 1 (v. Tabela 1). Embora no caso de choque elástico de um corpo extenso, rígido e compacto γ possa atingir valores muito maiores do que 1 (e α, muito menores que 1) essa hipótese está muito afastada do choque de um avião, que não é rígido nem compacto, especialmente os aviões comerciais de grande porte. Os valores mais frequentes são $\gamma = 2$ e $\alpha = 1$, restringindo-nos aos casos vistos. Vamos usá-los para calcular F e T para alguns aviões reais. Além dessas grandezas é relevante a pressão que a parede sofre

$$P = \frac{F}{S} \tag{36}$$

sendo S a secção reta do impacto do avião, que em primeira aproximação pode ser tomada como igual à área transversal S_0 do aparelho antes do choque.

Esses valores são importantes para determinar a espessura e a resistência do concreto da parede para que ela resista ao choque. Essa parte do problema, que envolve cálculos de engenharia civil e de resistência dos materiais foge ao nosso objetivo, mas há dados disponíveis em publicações especializadas[11/14].

Tomemos inicialmente o avião militar Phantom, usado como base de cálculo nas normas de segurança dos reatores alemães, cujos prédios de contenção são agora projetados para resistir a um choque de um desses aviões com velocidade $V_0 = 800$ km/h = 200 m/s. Suas características são:

$M = 22$ ton $\qquad\qquad L = 15$ m

Usando (i) $\gamma = 2$ e $\alpha = 1$, (ii) $\gamma = \frac{3}{2}$ e $\alpha = \frac{3}{4}$ respectivamente obtemos

(i) $F = 117 \times 10^3$ KN $\qquad\qquad T = 0{,}075$ s

$$(ii)\ F = 88 \times 10^3\ KN \qquad T = 0{,}056\ s$$

A força que é considerada nas normas alemãs é 110.000 KN[6,13]. Esse valor pode ser calculado partindo da distribuição de massa verdadeira[14] (fig. 10) e aplicando um modelo mais complicado para calcular a força em função do tempo de colisão[14] (fig. 11).

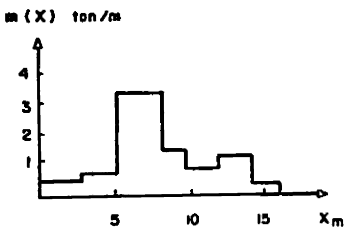


FIG. 10 – Distribuição de mosso do Phantom

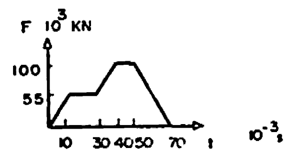


FIG 11 – Força desaceleradora

A composição dos nossos resultados com o da referência [6] favorece a hipótese (i).

Consideremos agora um avião comercial típico, o Boeing 707, com $M=90$ ton, $L=45$ m em dois casos: $V_0=800$ km/h e $V_0=400$ km/h, a primeira um pouco menor de que a velocidade de cruzeiro e a segunda maior do que a de pouso. Velocidades fora desse intervalo são irrelevantes pois o avião se desintegraria para velocidades muito altas e não se sustentaria em voo para velocidades muito baixas. Usando os parâmetros (i) com $V_0=800$ km/h:

$$F = 160 \times 10^3\ KN \qquad T = 0{,}2\ s$$

e com $V_0=400$ km/h:

$$F = 40 \times 10^3\ KN \qquad T = 0{,}4\ s$$

O valor de F para o caso em que V_0=400 km/h é dado na referência [13] como 50.000 KN, não muito diferente do nosso.

Entretanto, outro trabalho[3] dá o valor de F=90.000 KN para o mesmo avião, B-707, chocando-se a 370 km/h , isto é, à velocidade praticamente igual à que usamos.

A discrepância deve-se obviamente a diferenças nos modelos usados. O modelo da referência [13] usa uma distribuição hipotética da massa, semelhante à nossa, enquanto na referência [3] é usada a distribuição verdadeira da massa do avião antes do choque.

No nosso cálculo podemos incluir o efeito das turbinas, cujo choque é mais próximo do elástico. Usando nossas fórmulas (31) e (32) para levar em conta as turbinas, ainda que de uma maneira muito aproximada, obtemos para o Boeing 707

$$\delta \approx 1,0$$

logo,

$$F' = 2\ F$$

onde

$$F = 40 \times 10^3\ KN$$

é o valor achado sem considerar as turbinas.

Com essa correção

$$F' = 80 \times 10^3\ KN$$

é mais próximo da referência [3] .

Nossos cálculos dão, portanto, um limite inferior, otimista, $F = 40 \times 10^3$ KN e um limite superior, menos otimista, $F' = 80 \times 10^3$ KN, sendo a diferença entre eles originada da forma de considerar o efeito das turbinas.

Vejamos agora o caso extremo: o Boeing 747-Jumbo, com

$$M = 200\ ton \qquad\qquad L = 70\ m$$

Levando em conta as turbinas identicamente ao caso anterior, obtemos então os resultados:

$$\delta \simeq 1{,}3$$

$$V_0 = 800 \text{ km/h}$$

$$F = 228 \times 10^3 \text{ KN} \qquad T = 0{,}35 \text{ s}$$

$$F' = 2{,}3\, F = 524 \times 10^3 \text{ KN}$$

$$V_0 = 400 \text{ km/h}$$

$$F = 57 \times 10^3 \text{ KN} \qquad T = 0{,}70 \text{ s}$$

$$F' = 2{,}3\, F = 131 \times 10^3 \text{ KN}$$

Embora a força aumente muito no caso do Jumbo, a pressão não é tão grande devido à sua enorme área transversal. Deve-se lembrar que a força é tão significativa quanto a pressão, pois o efeito global sobre a estrutura do alvo depende fortemente do valor da força.

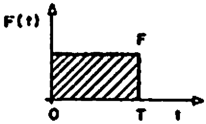
******

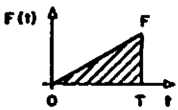
Na tabela 2 são dadas algumas características dos aviões comerciais mais comuns e na tabela 3 são mostrados os valores da carga que o prédio deve suportar caso sofra colisão desses diversos tipos de aviões, segundo nossas hipóteses. Deve-se ter em conta a posição das turbinas, que no B-727 são localizadas atrás e no DC-10 uma delas é atrás. Tomamos todas as turbinas como idênticas, o que é uma aproximação e serve apenas para indicar a magnitude dos seus efeitos.

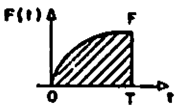
TABELA 1

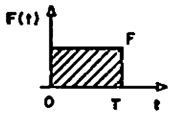
Força desaceleradora e tempo de colisão segundo diversos modelos

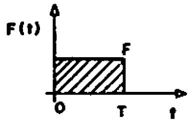
MODELOS	FORÇA $F = \gamma \frac{M V_0^2}{L}$ (Máx)	TEMPO $T = \alpha \frac{L}{V_0}$
Ponto Material:		
Força constante	$\gamma = 1$	$\alpha = 1$
Força linear	$\gamma = \frac{8}{3}$	$\alpha = \frac{3}{4}$
Força harmônica	$\gamma = 2$	$\alpha = \frac{\pi}{4}$
Corpo Extenso:		
Rígido-elástico Força constante	$\gamma >> 1$	$\alpha << 1$
Macio-inelástico Força constante	$\gamma = 1$	$\alpha = 1$
Macio-inelástico Força triangular	$\gamma = 2$	$\alpha = 1$
Macio-inelástico com partes duras Força triangular com pulsos	$\gamma = 2(1+\delta)$ $\delta > 0$	$\alpha = 1$

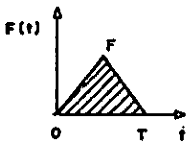












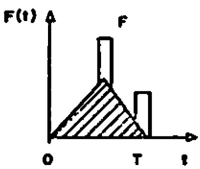


TABELA 2

Características aproximadas de alguns aviões

Avião	Peso Máximo Decolagem (ton)	Peso Vazio (ton)	Largura (m)	Comprimento (m)	Altura (m)	Motor	Peso do Motor (ton)	Diâmetro do motor (m)	Comp. do motor (m)	Número de turbinas		
										asa	atrás	total
B747-200	350	120	60	70	-	PWJT9D7	4,7	3	7,5	4	0	4
DC10-30	250	120	50	55	17	GECF650	4,7	3	7,5	2	1	3
B707-320C	150	70	44	45	13	PWJT3D	2,3	1,5	5,5	4	0	4
B727-100	75	43	33	40	10	PWJT8D	1,8	1,3	5,0	0	3	3
B737-200	50	29	28	30	11	PWJT8D	1,8	1,3	5,0	2	0	2
Electra II	50	28	30	32	10	GM Allison	-	1,0	2,0	4	0	4

T A B E L A 3

Força desaceleradora máxima para diversos aviões em diversos casos

Tipo	Velocidade (Km/h)	Peso Máximo (ton)	Força (10^3 KN)		Peso Reduzido (ton)	Força (10^3 KN)	
			s/ turbina	c/ turbina		s/ turbina	c/ turbina
B747	800 400	350	400 100	680 170	200	228 57	524 13:
DC10	800 400	250	360 90	486 121	180	261 65	384 96
B707	800 400	150	266 66	420 105	90	160 40	320 80
B727	800 400	75	152 38	152 38	60	120 30	120 30
B737	800 400	50	124 31	196 49	40	108 27	184 46

5- SUMÁRIO E CONCLUSÕES

Calculamos o valor de pico da força na colisão de aviões com uma parede fixa e perfeitamente rígida, utilizando um formalismo simples, mas que pode indicar ordens de magnitude e servir para comparações dos efeitos de diferentes tipos de avião.

Testamos diversos modelos dinâmicos a começar do mais trivial, complicando-o progressivamente, iniciando com o avião como um ponto material sujeito a três diferentes forças no choque: (A) constante, (B) linear, (C) harmônica.

Em seguida consideramos o avião de um modo mais realista, como um corpo macio sofrendo um choque perfeitamente inelástico, com a força variando no tempo, de forma triangular (D). Nesse caso o pico da força é maior do que no caso (A), mas concorda bem com a dos casos (B) e (C). Alternativamente levamos em conta separadamente o efeito das turbinas, decompondo o avião em um corpo macio e inelástico com as turbinas mais duras e semi-elásticas (E). Essa decomposição só é aplicável aos aviões comerciais, de grande porte. Os parâmetros usados para descrever o choque das turbinas são arbitrários: coeficiente de restituição de 50% e tempo de colisão igual à metade de seu valor no caso perfeitamente inelástico. Variando esses parâmetros o efeito das turbinas muda fortemente, mostrando ser limitada a validade do resultado, que serve só como uma indicação do tipo do efeito que deve ser esperado nos diferentes casos, conforme estejam as turbinas situadas nas asas ou atrás.

Comparamos nossos resultados com outros já publicados e as discrepâncias não são grandes. Para o Phantom (22 ton) cuja forma compacta não comporta destacar o efeito das turbinas, nosso cálculo, usando o caso (D), com 800 km/h, deu um valor de 117×10^3 KN para a força, pouco maior do que 110×10^3 KN, obtido na referência [14] e usado como padrão no projeto dos reatores alemães.

O mesmo tipo de cálculo (D) deu para o Boeing 707 (90 ton) a 400 km/h uma força de 40×10^3 KN, cerca de 20% menor do que 50×10^3 KN, dada na referência [13], mas muito menor do que 90×10^3 KN, obtida em [11] e usada como padrão para projetos de reatores na Suiça. Introduzindo o efeito das turbinas, ao nosso modo (E), a força passa a 80×10^3 KN, mais de acordo com a referência [11]. As diferenças entre esses números dão a faixa de incerteza em que nos situamos.

Aplicamos os métodos (D) e (E) a diversos aviões comerciais, especialmente ao maior deles, o Boeing 747 (Jumbo, 200 ton), também a 400 km/h, obtendo respectivamente 57×10^3 KN e 131×10^3 KN.

Esses valores são relevantes tendo em vista discutir a resistência de prédios de contenção de reatores a choques de aviões.

A tabela 4 (a e b) dá uma visão geral da situação, incluindo a especificação da espessura do concreto da contenção do reator, que deve ser de 1,80m para resistir a um Phanton com 800 km/h (força de 110×10^3 KN) e de 1,20m para resistir a um Boeing 707 com 400 km/h (90×10^3 KN).

A espessura da contenção dos reatores em construção no Brasil é 0,60m, logo é bem inferior àquela necessária para resistir a choques do tipo acima, e, com mais forte razão, não resiste a um Jumbo com velocidade de 400 km/h (131×10^3 KN).

TABELA 4

a) Comparação da força no choque do avião em diferentes casos

Avião e Velocidade	Resultados Publicados (10^3 KN)	Nossos Resultados (10^3 KN)
Phantom a 800 km/h	110 [14]	117 (D)
Boeing 707 a 400 km/h	90 [11] 50 [13]	80 (E) 40 (D)
Boeing 747 a 400 km/h	- -	131 (E) 57 (D)

b) Espessura de concreto da contenção de reatores em diversas especificações

Espessura (m)	Especificação
1,80 [6]	Projetos de reatores alemães especificados para resistirem a um Phantom a 800 km/h (110×10^3 KN).
1,20 [3]	Padronização de reatores, segundo os estudos realizados na Suiça, para resistirem a um Boeing 707 a 400 km/h (90×10^3 KN).
1,40 - 2,00 [16]	Estudos realizados na Inglaterra partindo da mesma carga usada por Riera (caso acima).
1,40 [7]	Espessura média da contenão do reator de Caorso na Itália.
0,60 [8]	Espessura da contenção de muitos reatores, inclusive os brasileiros.