

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

Balística e Tiro

Aerodinâmica dos projecteis

Victor Lobo
Baseado no material do
1TEN Baptista Claro (2018/19)
CFR EN-AEL Conceição Palma (2010/2014)

3º ano dos cursos EN-AEL e FZ

1

Movimento no ar

- A resistência do ar pode ser considerada como uma força que actua na direcção oposta ao do movimento do projétil
- Na trajetória no vácuo a componente vertical da velocidade é retardada pela gravidade, enquanto a horizontal se mantém constante
- Na trajetória no ar durante uma parte do trajeto a resistência do ar soma-se ao efeito da gravidade, fazendo com que a componente vertical da velocidade se reduza mais rapidamente, enquanto que a horizontal é afetada unicamente pela resistência do ar

O diagrama ilustra a trajetória de um projétil lançado a partir da origem (0,0) de um sistema de coordenadas cartesianas (x, y). A velocidade inicial V_0 é lançada a um ângulo θ_0 com o eixo x. A trajetória é mostrada como uma curva que se eleva e depois desce. No ponto M, a velocidade instantânea V é decomposta em componentes horizontais V_x e verticais V_y . As forças atuantes são a gravidade mg (seta para baixo) e a resistência do ar D (seta vermelha oposta ao movimento). A resistência do ar é decomposta em componentes D_x e D_y .

2

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

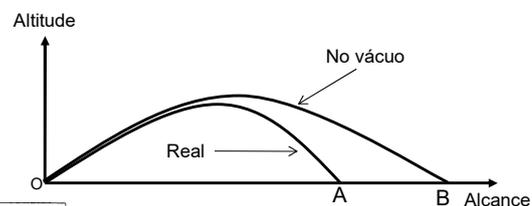
Movimento no ar

- A trajetória é uma curva com concavidade para baixo
- A componente horizontal da velocidade é continuamente decrescente
- Para pontos de igual ordenada quer a velocidade total quer as suas componentes horizontal e vertical são menores no ramo descendente
 - Como consequência: a velocidade de queda é sempre inferior à velocidade inicial
- Para pontos de igual ordenada a inclinação (em valor absoluto) é maior no ramo descendente
 - Como consequência: o ângulo de queda é sempre maior que o ângulo de projecção
- Para pontos de igual ordenada, a abcissa do ramo descendente está mais próximo da vertical do vértice que a do ascendente
 - Como consequência: a vertical do vértice está mais próxima do ponto de queda que da origem

3

Movimento no ar

- O alcance máximo obtém-se para um ângulo de projecção próximo de 45°
 - Nas peças de grande alcance esse ângulo é sensivelmente superior a 45° (até 50°), por se encontrar muito menor densidade do ar nas altas camadas da atmosfera



Type of round	Muzzle Velocity m/s	Maximum Range	
		In-vacuo	In Air
300 mm Mortar	396	16 km	11 km
155 mm FH70	700	49 km	24 km
7.62 mm SLR	840	70 km	4 km

4

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

Resistência aerodinâmica

- A resistência do ar é uma força exercida pelo ar sobre o projétil ao deslocar-se na direção do seu eixo à velocidade V . É função:
 - Da densidade e da temperatura do ar e da sua viscosidade
 - Do tamanho, forma e velocidade do projétil
- Para adaptar a formula à realidade da resistência do ar para um determinado projétil, criou-se o coeficiente de resistência aerodinâmica
 - É a soma dos diversos efeitos (independentes) que o ar exerce sobre o projétil

5

Resistência aerodinâmica

- Força de retardo (*Drag*) **pode** ser aproximada por:

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D$$

- ρ - é a densidade do ar
- V - é a velocidade do projétil
- A - é a secção do projétil
- C_D - é o coeficiente de resistência aerodinâmica (0 a 2)

6

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

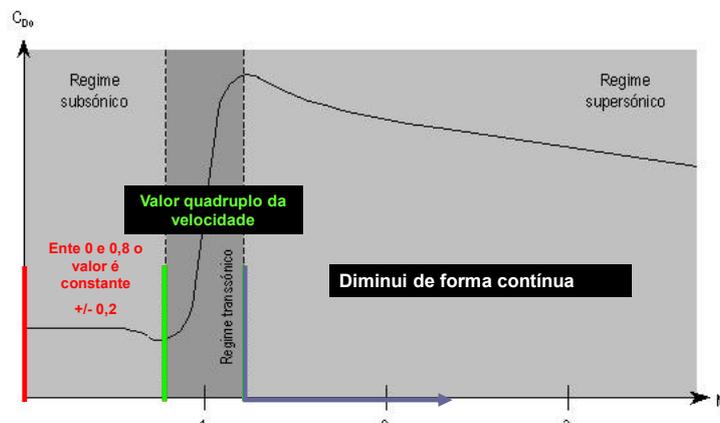
Coeficiente de resistência aerodinâmica

- É o parâmetro mais útil e mais usado para calcular a resistência da atmosfera
- É a resultante do *efeito* de várias forças
 - O Centro de Pressão (CP) é o ponto de aplicação da resultante dessas forças

7

Coeficiente de resistência aerodinâmica

- Variação do coeficiente de resistência aerodinâmica (não é constante)!



8

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

Coeficiente balístico

- Coeficiente balístico é a razão de decréscimo da velocidade sendo uma medida de penetração na atmosfera

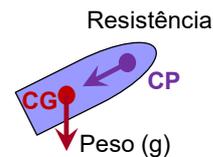
$$C_o = \frac{W}{K\sigma d^2}$$

- W - é o peso do projétil em libras
- Kσ - é o Índice de Forma e Estabilidade
- d - é o calibre em polegadas

9

Força e aceleração devida à atmosfera

- Centro de Pressão não é necessariamente igual ao centro de gravidade
 - Geram-se binários que fazem rodar o projétil



- $A_{resistencia} = \frac{F}{m} = \frac{\rho v^2 S C_d}{2m} = \frac{\rho v^2 (\frac{\pi d^2}{4}) C_d}{2m}$

- $A_{gravidade} = \frac{F}{m} = \frac{mg}{m} = g$

10

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

Exemplo



- Pequeno calibre, alta velocidade (NATO 5.56)

- $m = 0.004 \text{ kg}$
- $d = 0.00556 \text{ m}$
- $v = 940 \text{ m/s}$
- $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
- $C_d = 0.3$
- $F_{\text{resistencia}} = 3.9 \text{ N}$
- $F_{\text{gravidade}} = 0,039 \text{ N}$
- Resistência = 100x Gravidade



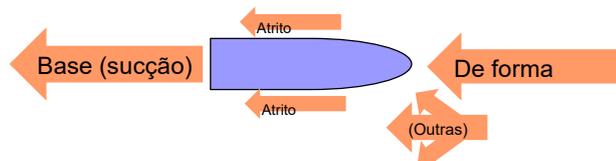
- Grande calibre, baixa velocidade (bomba aero-transp.)

- $m = 480 \text{ kg}$
- $d = 0.400 \text{ m}$
- $v = 161 \text{ m/s}$ (580km/h)
- $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
- $C_d = 0.2$
- $F_{\text{resistencia}} = 400 \text{ N}$
- $F_{\text{gravidade}} = 4000 \text{ N}$
- Resistência = 1/10 x Gravidade

11

Resistência aerodinâmica

- Componentes de resistência aerodinâmica



- Resistência da ogiva (de forma ou de onda) que surge com a criação de ondas de choque (**forbody drag**)
- Resistência de base, originada pela depressão na base (**base drag**)
- Resistência viscosa (ou de fricção) (**skin friction**)
- Resistências adicionais (cintas de forçamento, efeito giroscópico, etc.)

12

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

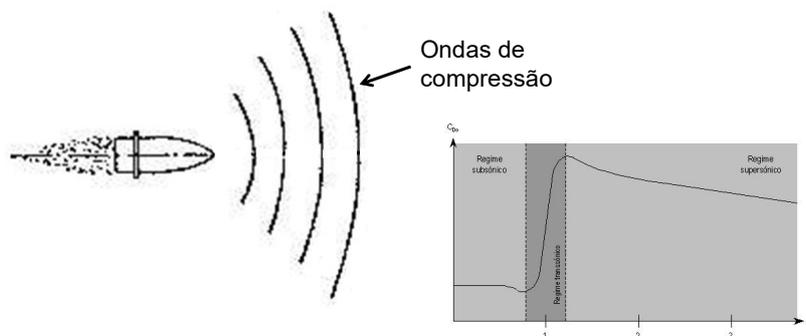
Resistência de forma (*Forebody drag*)

- Quando um projétil penetra a atmosfera, provoca o deslocamento do ar.
- A energia necessária para deslocar o ar provoca uma redução na energia cinética inicial do projétil.
- Essa perda de energia é chamada de “*drag*” e causa uma perda contínua de velocidade no projétil.
- A compressão do ar que ocorre no nariz do projétil é transmitida ao ar em volta do mesmo sob a forma de ondas de compressão que vão causar turbulência.
- As ondas de compressão propagam-se no ar à velocidade do som (340 m/s).

13

Resistência de forma (*Forebody drag*)

- Quando um projétil se desloca a uma velocidade inferior à velocidade do som (subsônico) a turbulência move-se mais rapidamente do que ele.



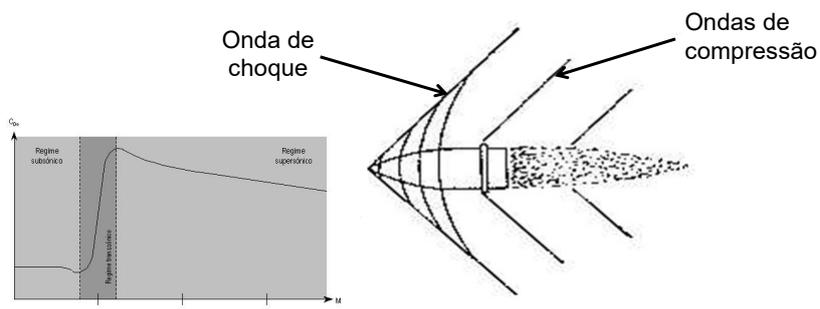
14

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

Resistência de forma (*Forebody drag*)

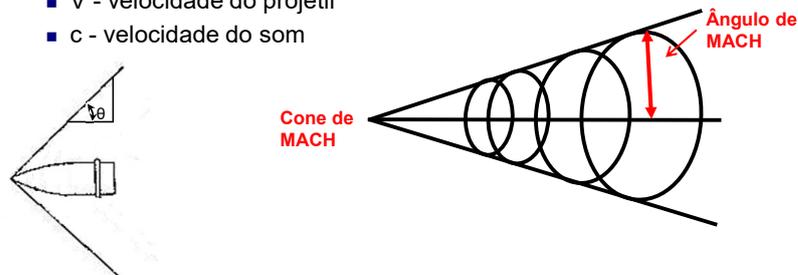
- Quando um projétil se desloca a uma velocidade superior à velocidade do som (supersónico) nenhuma turbulência escapa ao projétil uma vez que este se move mais rapidamente do que as ondas de compressão.
- Como resultado deste juntar de ondas de compressão vamos ter uma onda de choque criada no nariz do projétil.



15

Resistência de forma (*Forebody drag*)

- Onda de choque
 - Dum modo geral, é gerada uma onda de choque cónica com um ângulo θ em que $\sin\theta = 1/M$, onde M é o número de Mach definido como $M=V/c$.
 - V - velocidade do projétil
 - c - velocidade do som



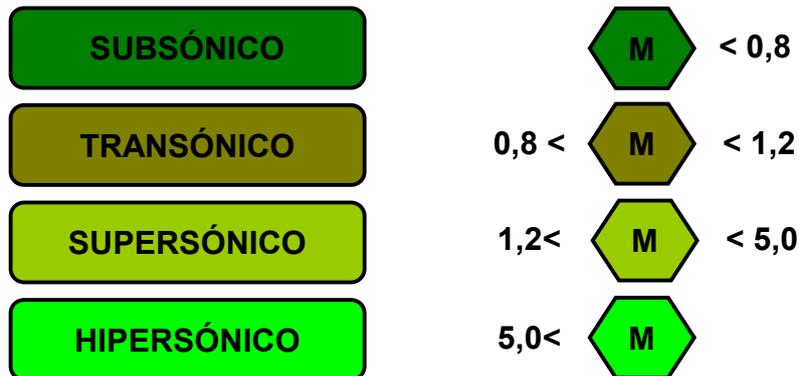
16

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

Resistência de forma (*Forebody drag*)

■ Regimes de voo



17

Resistência de forma (*Forebody drag*)

■ Alguns valores típicos

M	1	1,5	2	3	10
θ (graus)	90	42	30	19	<6

- À medida que aumenta o número de Mach o ângulo do cone de Mach diminui.
- Para velocidades hipersónicas ($M > 5$) a onda de choque praticamente segue a forma do projétil.

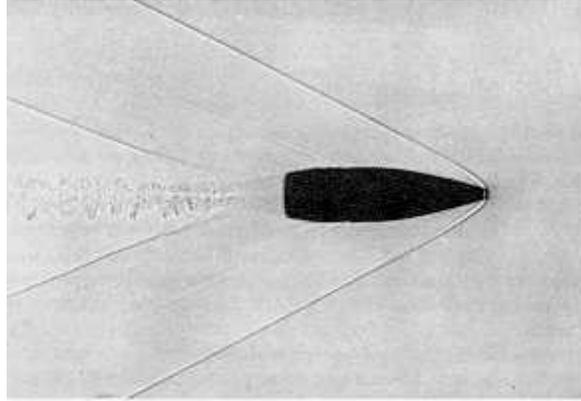
18

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

Resistência de forma (*Forebody drag*)

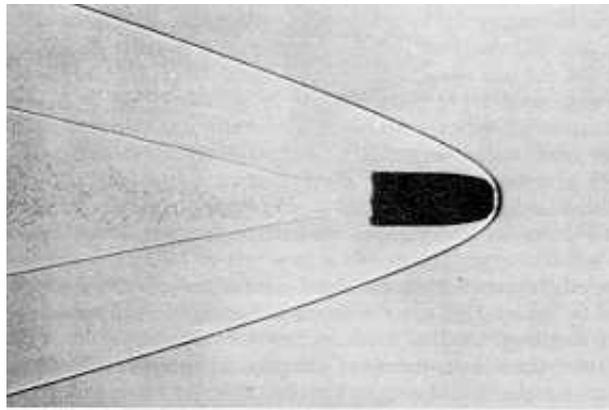
- Projétil de 7,62 mm



19

Resistência de forma (*Forebody drag*)

- Projétil de ponta romba



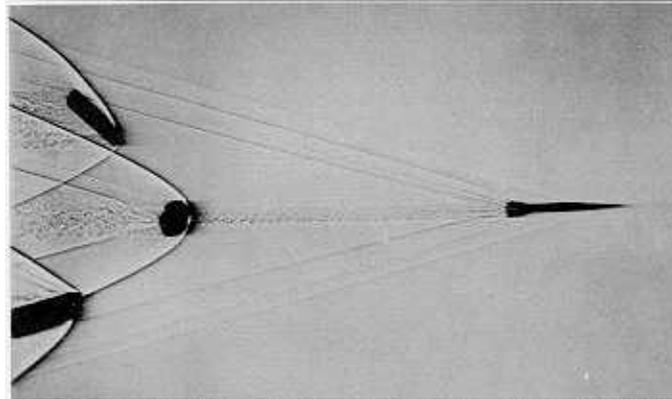
20

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

Resistência de forma (*Forebody drag*)

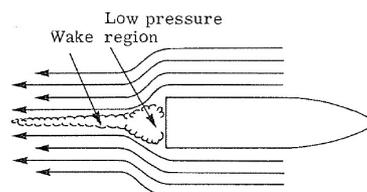
■ Projétil cinético



21

Resistência de base (*Base Drag*)

- Quando um projétil se movimenta na atmosfera provoca turbulência na sua retaguarda. Esta turbulência chamada corrente de esteira provoca alguma resistência ao avanço do projétil, a que se chama resistência de base.
- É provocada por uma região de baixa pressão imediatamente atrás do projétil, devido ao facto do fluxo de ar não retornar suficientemente rápido de modo a preencher esse espaço.
- Como resultado temos uma zona de vácuo (ou um efeito de sucção) que surge como uma resistência adicional ao avanço do projétil



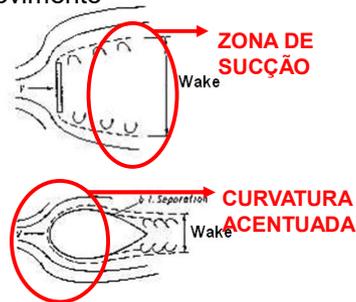
22

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

Resistência de base (*Base Drag*)

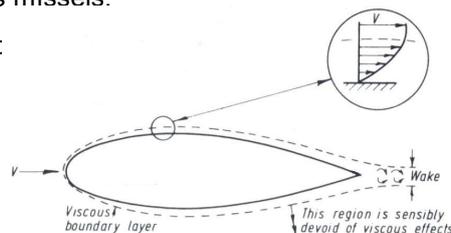
- Num corpo em movimento a pressão estática é superior à frente que na retaguarda
- A força resultante é de sinal oposto ao movimento
- Forma ideal é a gota de água, mas...
- Tem como desvantagens:
 - Instabilidade no voo
 - Volume interno para carga explosiva
 - Deficiente obturação de gases



23

Resistência de atrito (*Skin Friction*)

- A resistência de atrito na parede lateral é causada pela aderência do ar à superfície do projétil.
- O ar à superfície do projétil move-se à mesma velocidade que este, na camada seguinte move-se um bocado mais lentamente e assim sucessivamente.
- Tem pouco significado nos projéteis pequenos mas começa a ter mais importância nos grandes mísseis.
- Produzida em função da viscosidade do material do projétil



24

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

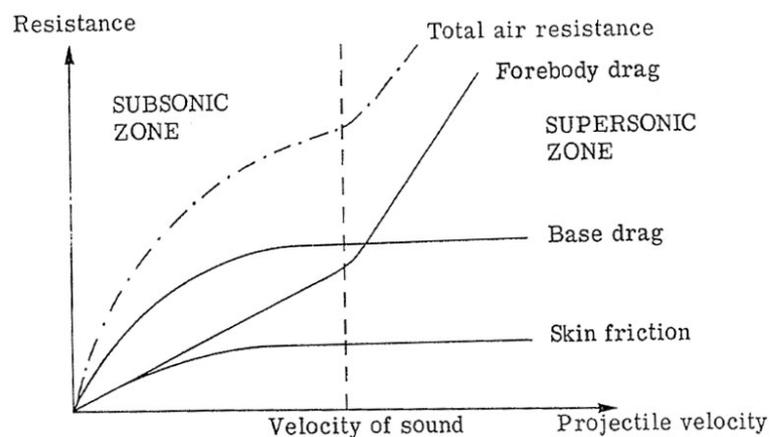
Resistências adicionais (*Excrescence Drag*)

- Resultam de protuberâncias do projétil
 - Resistência das cintas de forçamento e aletas
 - Influência do ângulo de ataque e da rotação do projétil
- Pode ser reduzida pela eliminação de todos os elementos que não sejam

25

Resistência aerodinâmica total

- Projétil convencional



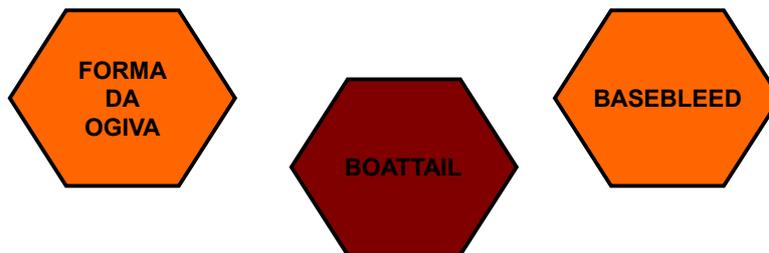
26

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

Formas de minimizar a resistência aerodinâmica

- A resistência ao ar sofrida por um projétil depende fundamentalmente da sua forma, com particular importância para a forma da base e do nariz

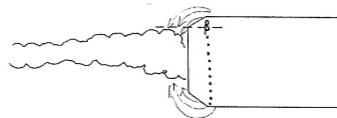


27

Formas de minimizar a resistência aerodinâmica

■ *Boattailing*

- Para velocidades inferiores à velocidade do som a resistência de base e de forma são as mais importantes.
- Para reduzir a resistência de base usa-se a técnica de “boat-tailing”, que consiste em alterar a forma da base do projétil
- Varia de $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ do calibre
- O valor ótimo de $\beta=7,5^\circ$



28

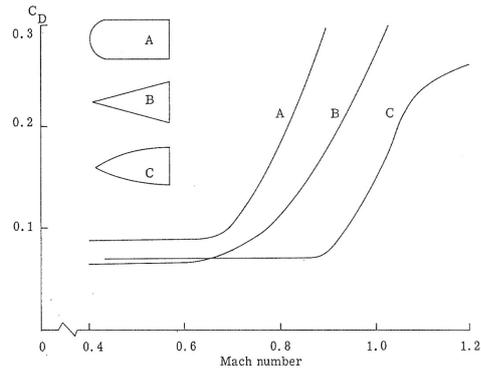
Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

Formas de minimizar a resistência aerodinâmica

■ Forma da ogiva

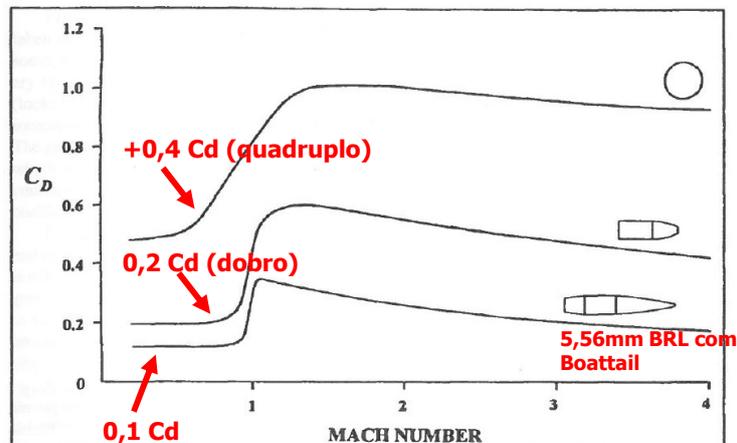
- Para velocidades inferiores à velocidade do som a resistência de forma pode ser significativamente reduzida através da forma da ogiva



29

Formas de minimizar a resistência aerodinâmica

■ Forma da ogiva



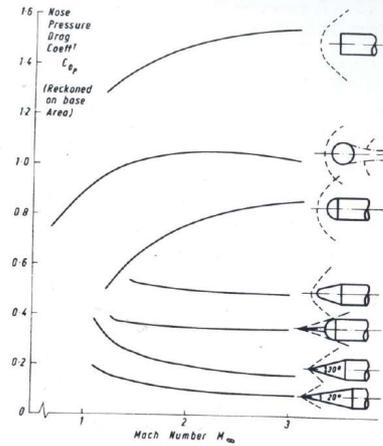
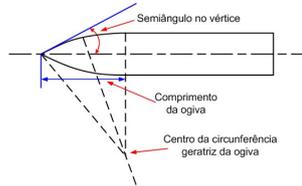
30

Balística e Tiro (parte 3)

3ºAno EN-AEL e FZ
V 0.1 V.Lobo, EN 2020

Formas de minimizar a resistência aerodinâmica

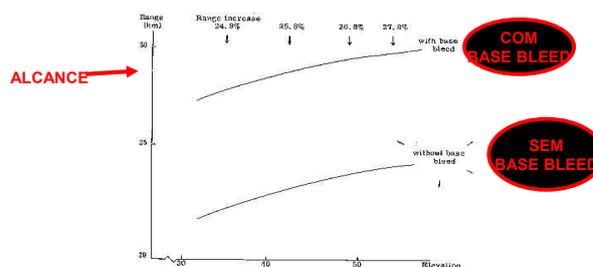
- A resistência no nariz depende essencialmente do seu formato em função da velocidade.
- Quanto mais pontiagudo, menor é a resistência do ar
- Porém, o comprimento do projétil será entre 4.5 a 6 calibres, dos quais 2,7 a 4 são para a ogiva
- Nunca se devem exceder os 5 calibres de comprimento total



31

Formas de minimizar a resistência aerodinâmica

- Base bleed
 - Consiste em adicionar um propulsor à base do projétil de modo a diminuir a turbulência
 - Esta técnica pode reduzir até 50% a resistência de base



32

