

# Escoamentos Compressíveis

## Introdução



[www.cienciastermicas.com](http://www.cienciastermicas.com)

# Conteúdo

- \*Apresentação, motivação, objetivos do curso, introdução aos escoamentos compressíveis
- \*Revisão de Termodinâmica: 1ª e 2ª Leis, trabalho, calor, calor específico
- \*Gases ideais: definição, entropia, equações isoentrópicas
- \*Equações governantes na formulação integral: conservação de massa, 2ª Lei de Newton e Conservação de energia
- \*Velocidade do som: definição, equação; velocidade do som em gases; cone de Mach
- \*Escoamento isoentrópico unidimensional
- \*Propriedades de estagnação; propriedades características; equações em função de Mach
- \*Escoamento com variação de área
- \*Choque normal: equações, estados de referência, propriedades antes e depois do choque
- \*Escoamento com adição de calor (Rayleigh)
- \*Escoamento com atrito (Fanno)
- \*Choque Oblíquo
- \*Escoamento hipersônico

## Pré-requisitos

- \* Termodinâmica
- \* Transferência de calor
- \* Fenômenos de transporte

## Objetivos de Aula

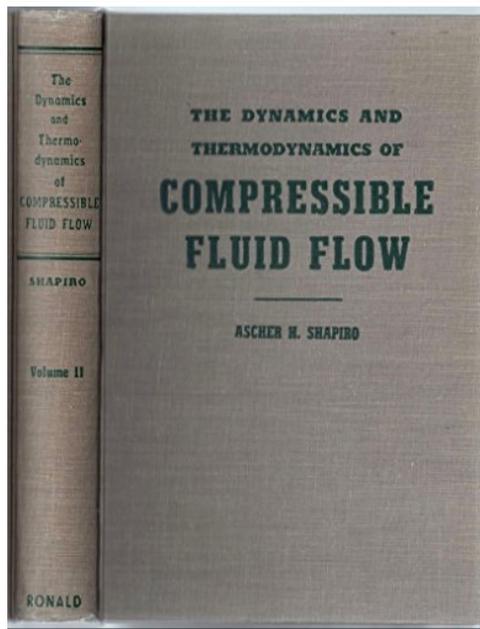
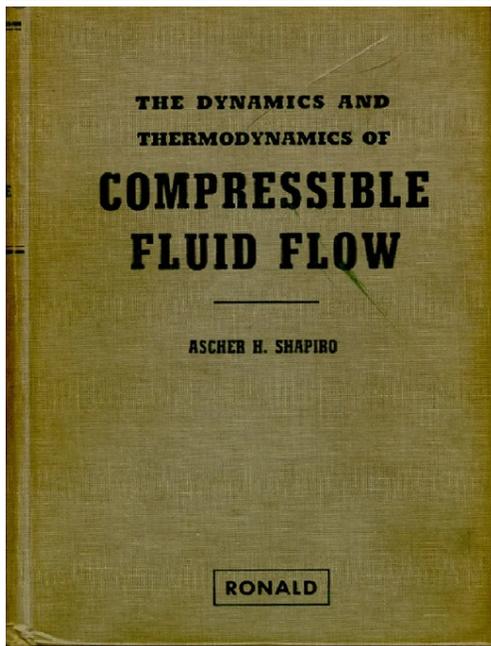
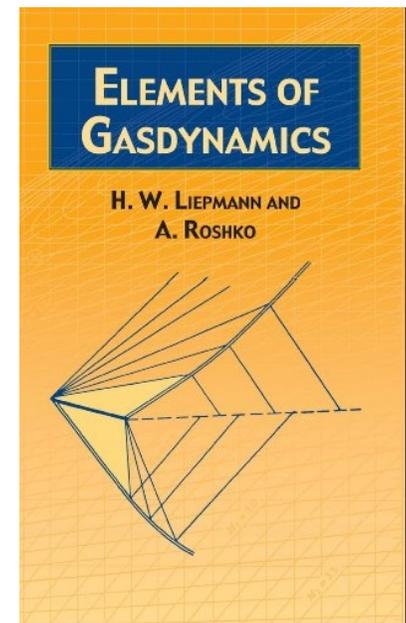
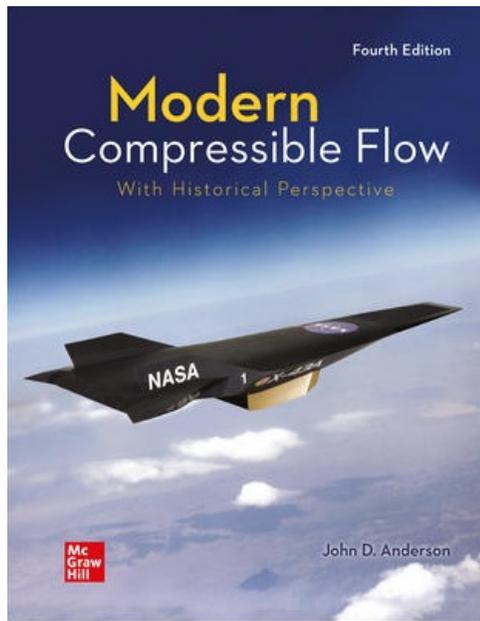
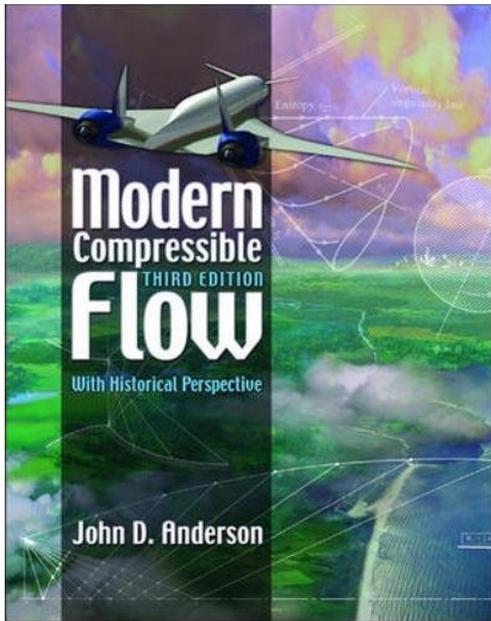
- \*Definição de fluido

- \*Fluidos compressíveis e incompressíveis

- \*Escoamentos compressíveis e incompressíveis

- \*Regimes de escoamento

- \*Histórico e perspectivas



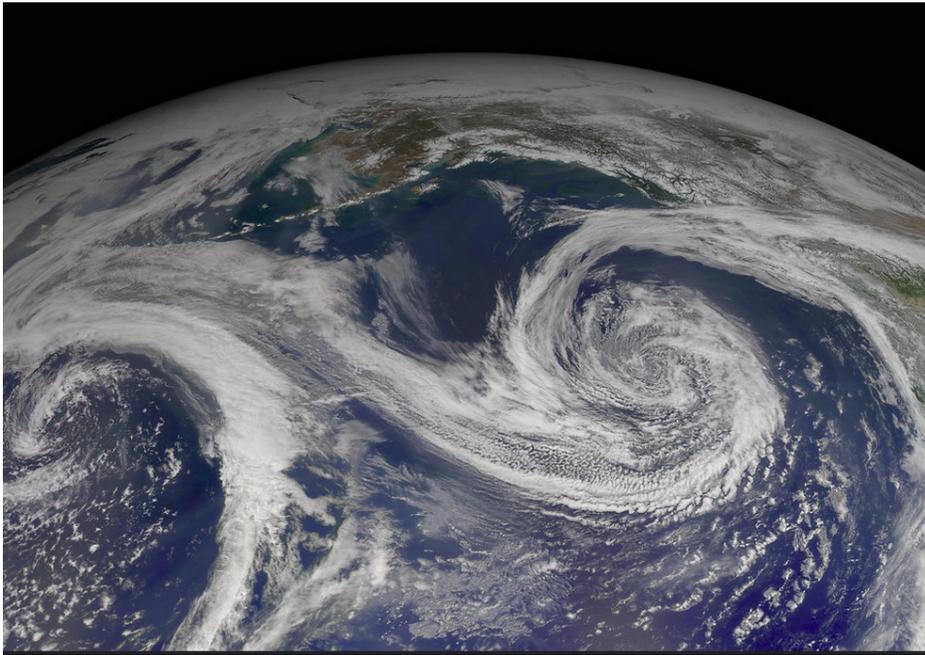
Catalog > Engineering Courses

## Hypersonics – from Shock Waves to Scramjets

Understand flight at speeds greater than Mach 5 and discover how to analyse the performance of a scramjet.



<https://www.edx.org/course/hypersonics-from-shock-waves-to-scramjets-2>



<https://earthobservatory.nasa.gov/images/83754/springtime-in-the-gulf-of-alaska>



- Escoamento

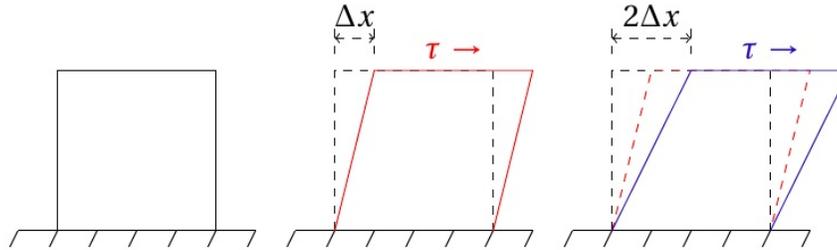
substantivo masculino

1. ato de escoar; escoadura, escoação.
2. plano inclinado por onde as águas escoam.
3. modo de fluir de uma corrente.

Origin ETIM escoar + -mento

# FLUIDO

- O que é um fluido? Qual a diferença para um sólido?
- Como diferenciar líquidos de gases?



Um fluido deforma continuamente quando sujeito à tensão de cisalhamento.

Fluido: não resiste à tensão de cisalhamento

Sólido: resiste à tensão de cisalhamento:

ideal: não deforma

elástica

plástica

↳ VISCOSIDADE AUMENTA

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1.1)$$

Fluidos não-newtonianos são representados, de maneira genérica, por:

$$\tau = k \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \quad (1.2)$$

ou através da viscosidade aparente  $\eta$ :

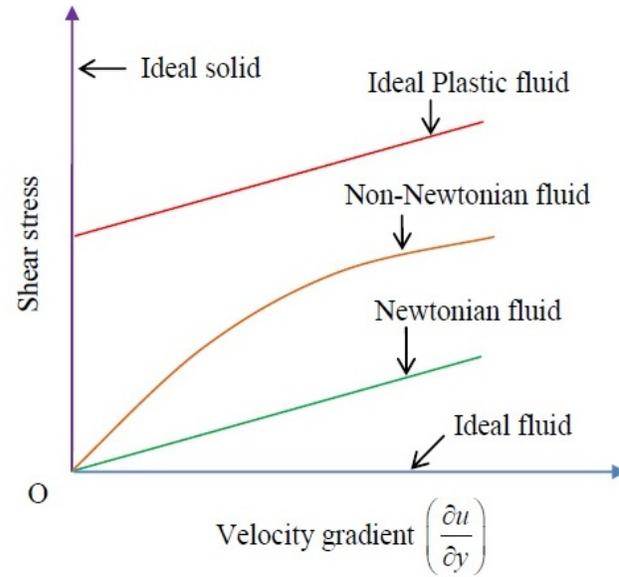
$$\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1.3)$$

Os fluidos não-newtonianos podem ser classificados em:

- Pseudoplásticos: viscosidade aparente diminui com aumento da taxa de deformação;
- Dilatantes: viscosidade aparente aumenta com aumento da taxa de deformação;
- Plástico de Bingham: se comporta como sólido até determinado limite e após possui relação linear entre tensão cisalhante e taxa de deformação;
- Tixotrópico: a viscosidade aparente reduz com o tempo;
- Reopético: viscosidade aparente aumenta com o tempo;
- Viscoelásticos: retornam em parte à sua forma original.



<https://maxi-miser.com/what-is-viscosity/>

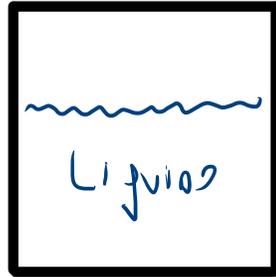


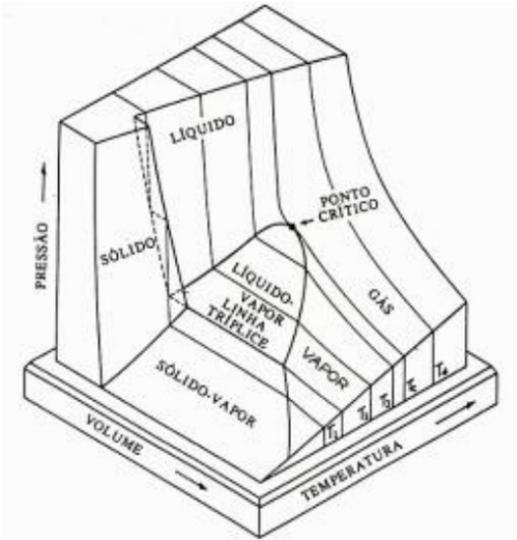
### Stress- Strain Graphs of Different Types of Fluid

<https://mechanicalnotes.com/fluid-definition-fluid-mechanics-classification-properties-and-difference/>

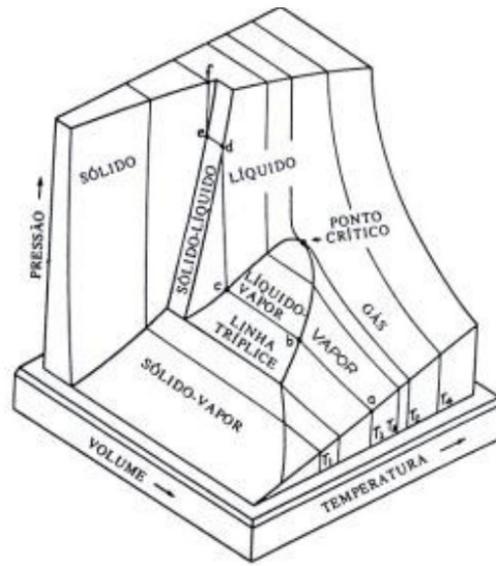
fluids } liquids  
          } gases

# Como diferenciar líquidos de gases ?





(a) Superfície P-v-T de uma substância que se contrai ao solidificar.



(b) Superfície P-v-T de uma substância que se expande ao solidificar.

Líquidos: incompressíveis - grandes pressões resultam em variações do volume desprezíveis

$$\kappa = \frac{1}{\beta} \Rightarrow \Delta v ; \Delta \rho$$

Gases: compressíveis - moderadas pressões resultam em variações significativas do volume

GASES  $\Rightarrow$  SÃO COMPRESSÍVEIS  
 moderadas pressões resultam em variações significativas do volume

ESCOAMENTOS COMPRESSÍVEIS  
OU  
ESCOAMENTOS DE FLUIDOS COMPRESSÍVEIS

gases

# ESCOAMENTOS COMPRESSÍVEIS OU ESCOAMENTOS DE FLUIDOS COMPRESSIVEIS

Escoamentos de fluidos compressíveis = escoamentos de gases

# ESCOAMENTOS COMPRESSÍVEIS OU ESCOAMENTOS DE FLUIDOS COMPRESSÍVEIS

Escoamentos de fluidos compressíveis = escoamentos de gases

Escoamentos compressíveis: escoamentos em que os efeitos da compressibilidade são importantes.

# ESCOAMENTOS COMPRESSÍVEIS OU ESCOAMENTOS DE FLUIDOS COMPRESSÍVEIS

Escoamentos de fluidos compressíveis = escoamentos de gases

Escoamentos compressíveis: escoamentos em que os efeitos da compressibilidade são importantes.

Podemos ter escoamentos de gases em que as variações de volume específico são pequenas !!!

Escoamento de gás pode ser tratado como escoamento incompressível

## Escoamento Compressível

- \* regime de escoamento
- \* posso ter escoamento de fluido compressível tratado como escoamento incompressível

# escoamentos em que a variação do volume é significativa

### É importante salientar que:

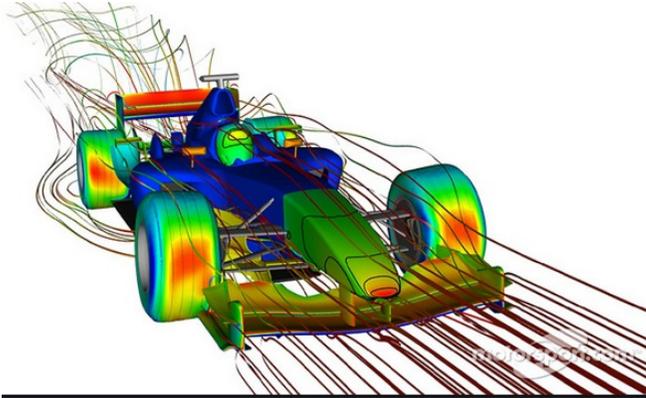
- \*todo escoamento é compressível
- \*em condições em que a variação de volume é pequena, podemos tratar satisfatoriamente o escoamento como incompressível
  - as variações de volume podem ser desprezadas.

# CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL

1.  $M < 0,3$ : escoamento subsônico incompressível.

$$M = \frac{V}{C} \quad C = \sqrt{\gamma R \cdot T}$$

(pl gases)



<https://www.motorsport.com/f1/photos/albert-the-new-supercomputer-for-cfd-calculations-at-2/212193/>

Record-breaking production vehicles

Year	Make and model	Top speed of production car	
2005	Bugatti Veyron EB 16.4	408.47 km/h (253.81 mph)	~ 0,32
2007	SSC Ultimate Aero TT	412.28 km/h (256.18 mph)	~ 0,33
2010	Bugatti Veyron 16.4 Super Sport	431.072 km/h (267.856 mph)	~ 0,34
2017	Koenigsegg Agera RS	447.19 km/h (277.87 mph)	~ 0,36

14 more rows

[en.wikipedia.org > wiki > Production\\_car\\_speed\\_record](https://en.wikipedia.org/wiki/Production_car_speed_record)

[Production car speed record - Wikipedia](#)

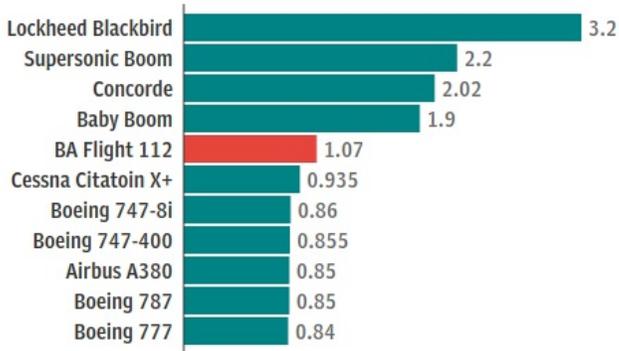
About Featured Snippets Feedback

$T = 300k \Rightarrow C \approx 347 \text{ m/s}$

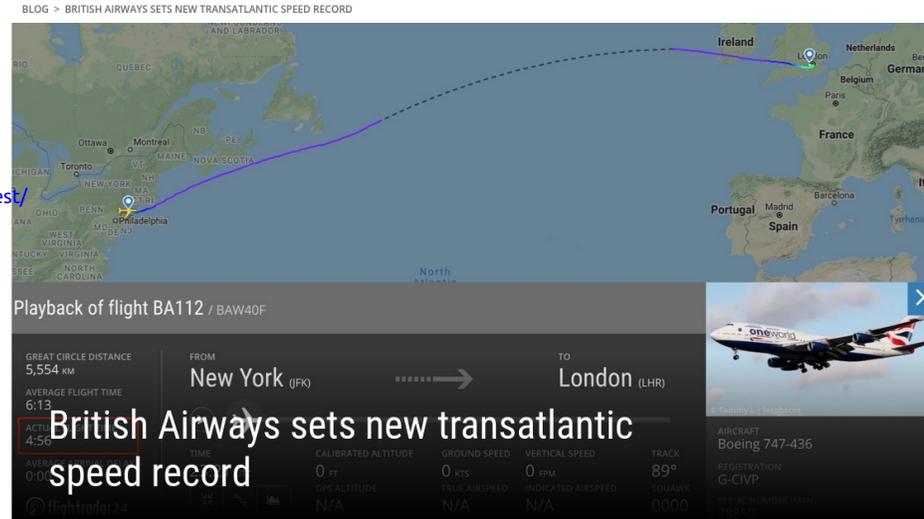
## 2. $0,3 < M < 0,8$ : escoamento subsônico compressível

### Supersonic speeds: how fast do planes fly?

*Speeds equivalent to Mach, the measure of the speed of sound*



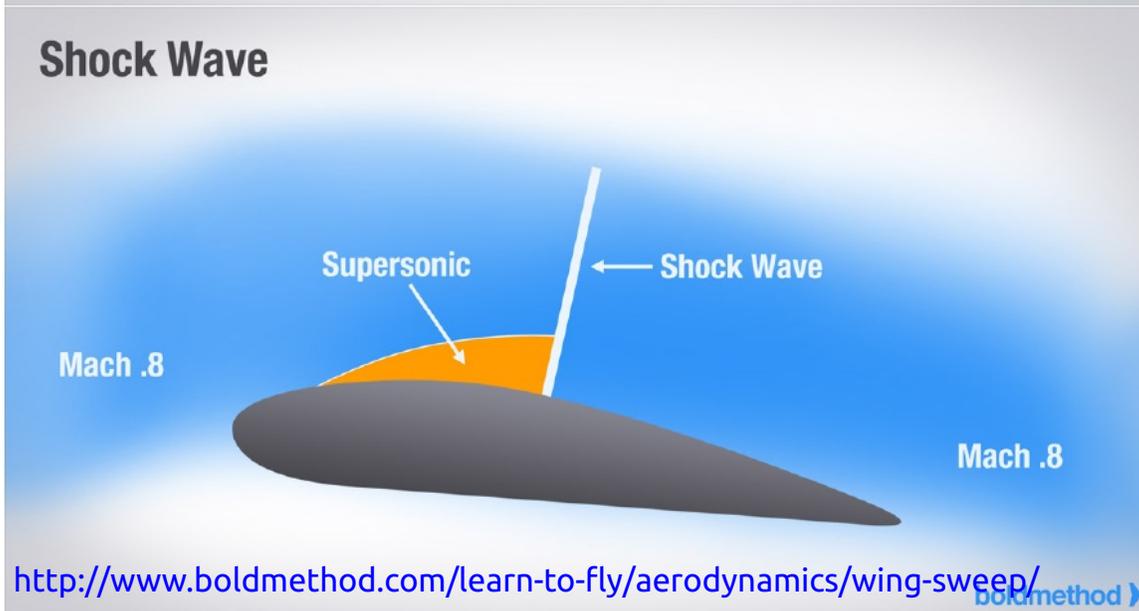
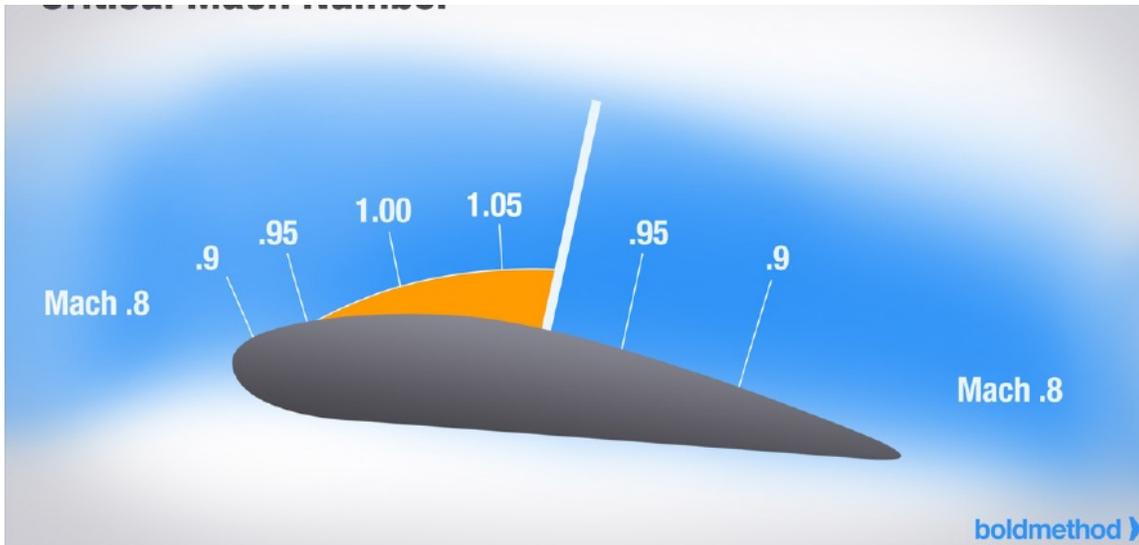
<https://www.telegraph.co.uk/travel/travel-truths/which-passenger-jet-plane-flies-the-fastest/>



British Airways set a new New York–London subsonic commercial aircraft speed record on 9 February with the BA112 landing in London 4 hours 56 minutes after departing New York. Accomplished with a Boeing 747-400, the flight took advantage of a well-placed and strong jet stream to reach London in under 5 hours.

By Ian Petchenik  
2020-02-09

### 3. $0.8 < M < 1.0$ : escoamento transônico



### 3. $0.8 < M < 1.0$ : escoamento transônico



<https://www.christography.com/aviation>

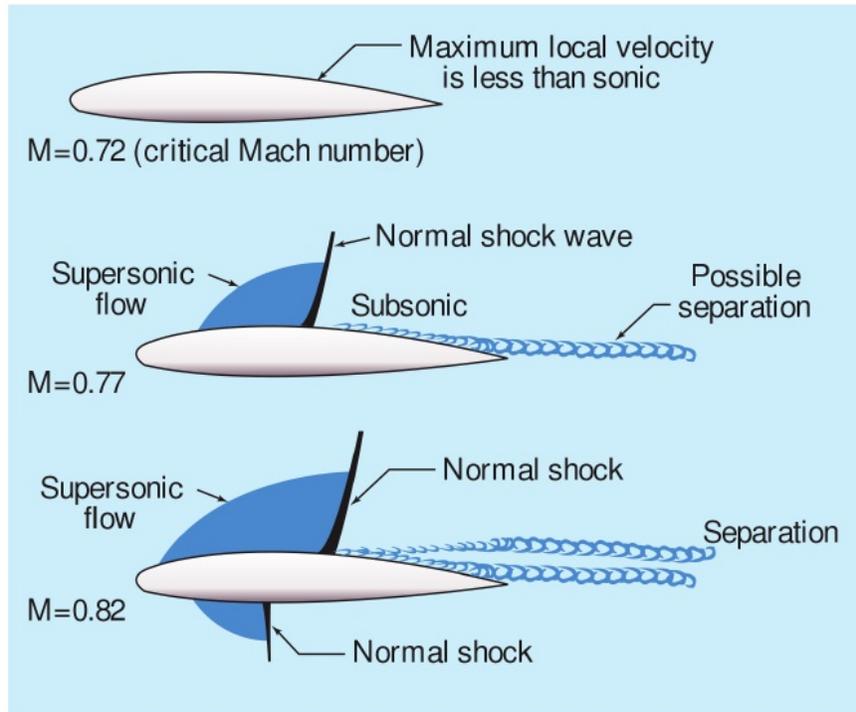


<http://kenshostudio.blogspot.com.br/2012/07/air-show-transonic-flow-patterns.html>

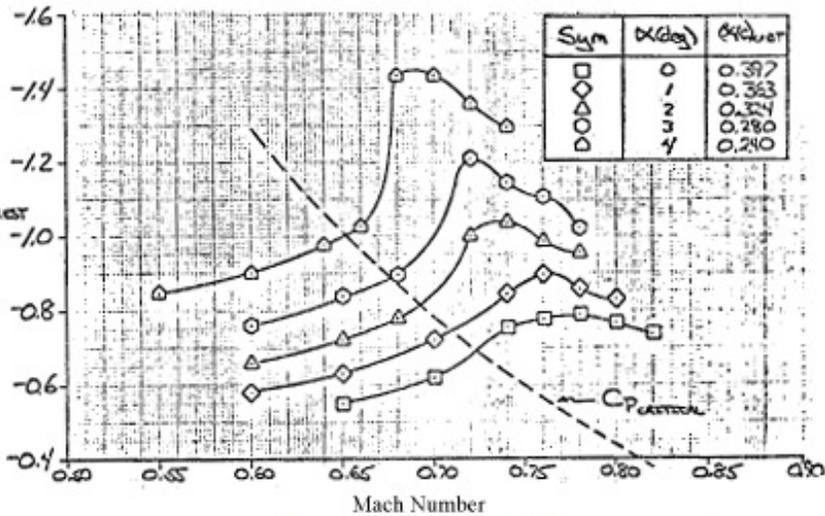


[Video: Schlieren...](#)

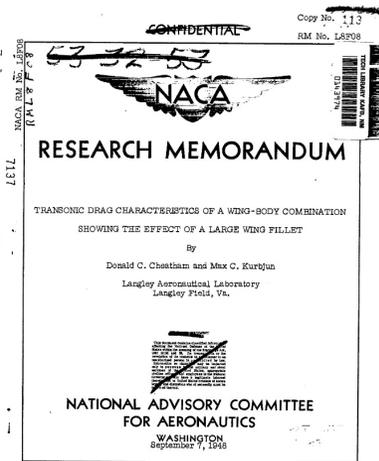
### 3. $0.8 < M < 1.0$ : escoamento transônico



<https://teamuv.org/tag/hypersonic/>



<http://aerodesign.stanford.edu/aircraftdesign/drag/mdiv.html>



20

NACA RM No. L8F08

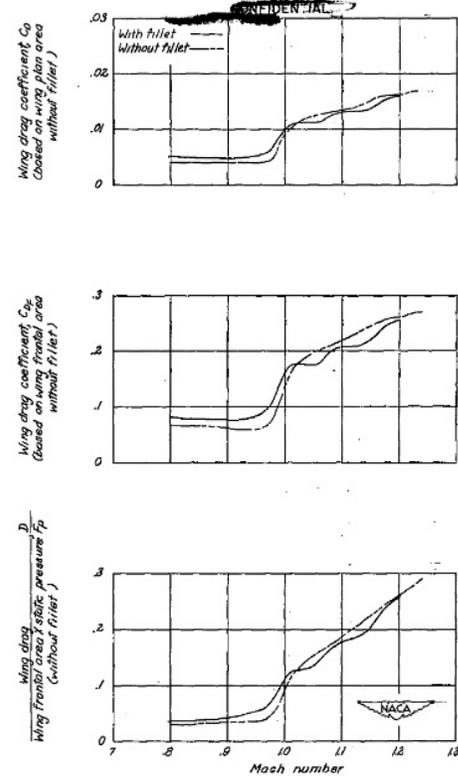
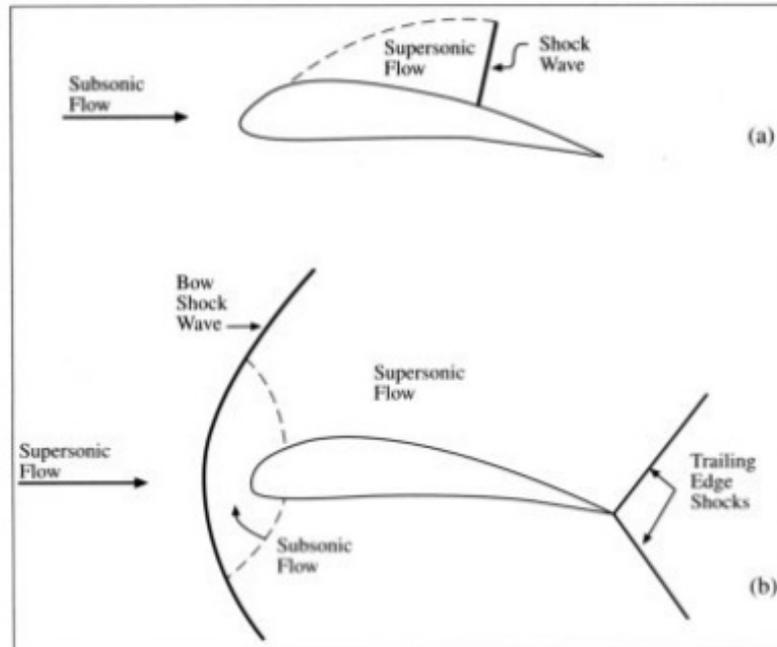


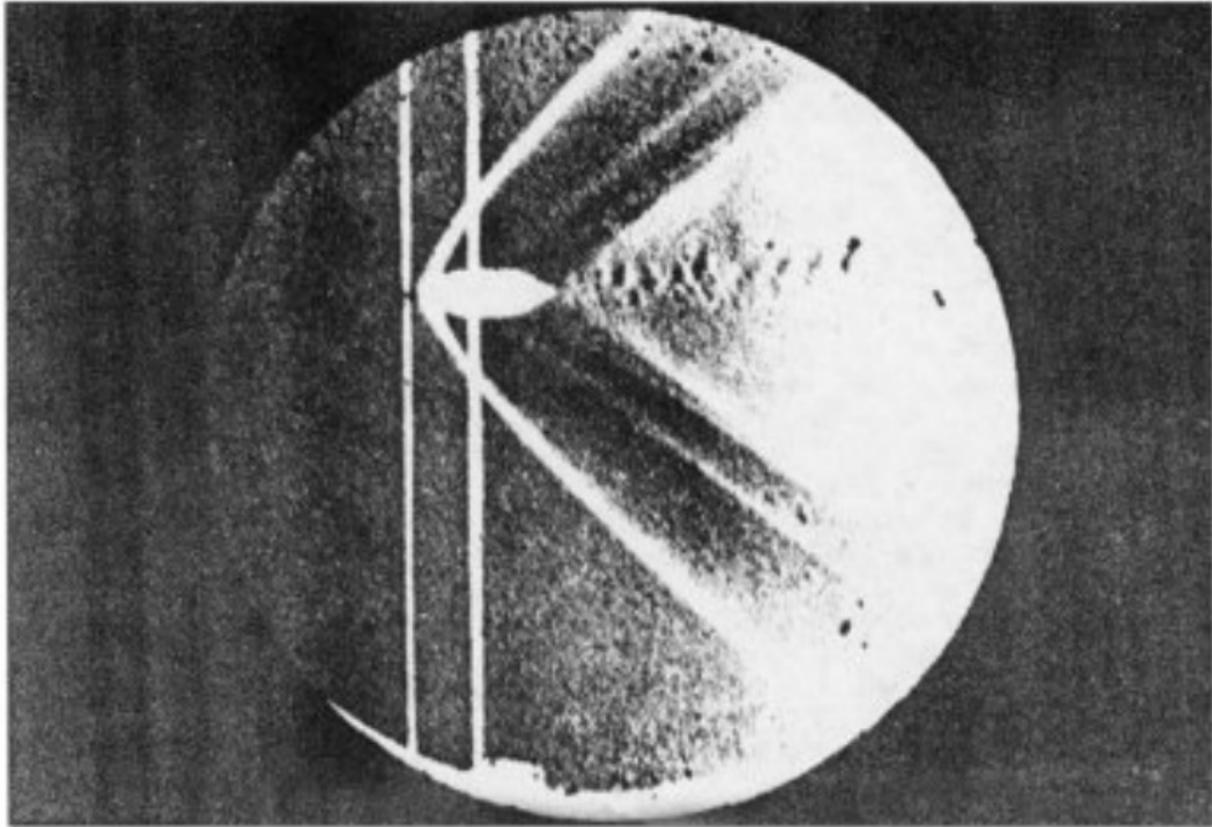
Figure 8.- Comparative variations with Mach numbers of drag coefficients and  $D/F_p$  for the wing of the wing-body configuration with wing fillet and without wing fillet.

## $M > 1$ : escoamento supersônico



<https://history.nasa.gov/SP-4219/Chapter3.html>

$M > 1$ : escoamento supersônico



1.10 – Fotografia de uma bala em vôo supersônico, publicada por Ernst Mach em 1887.  
fonte: <https://history.nasa.gov/SP-4219/Chapter3.html>

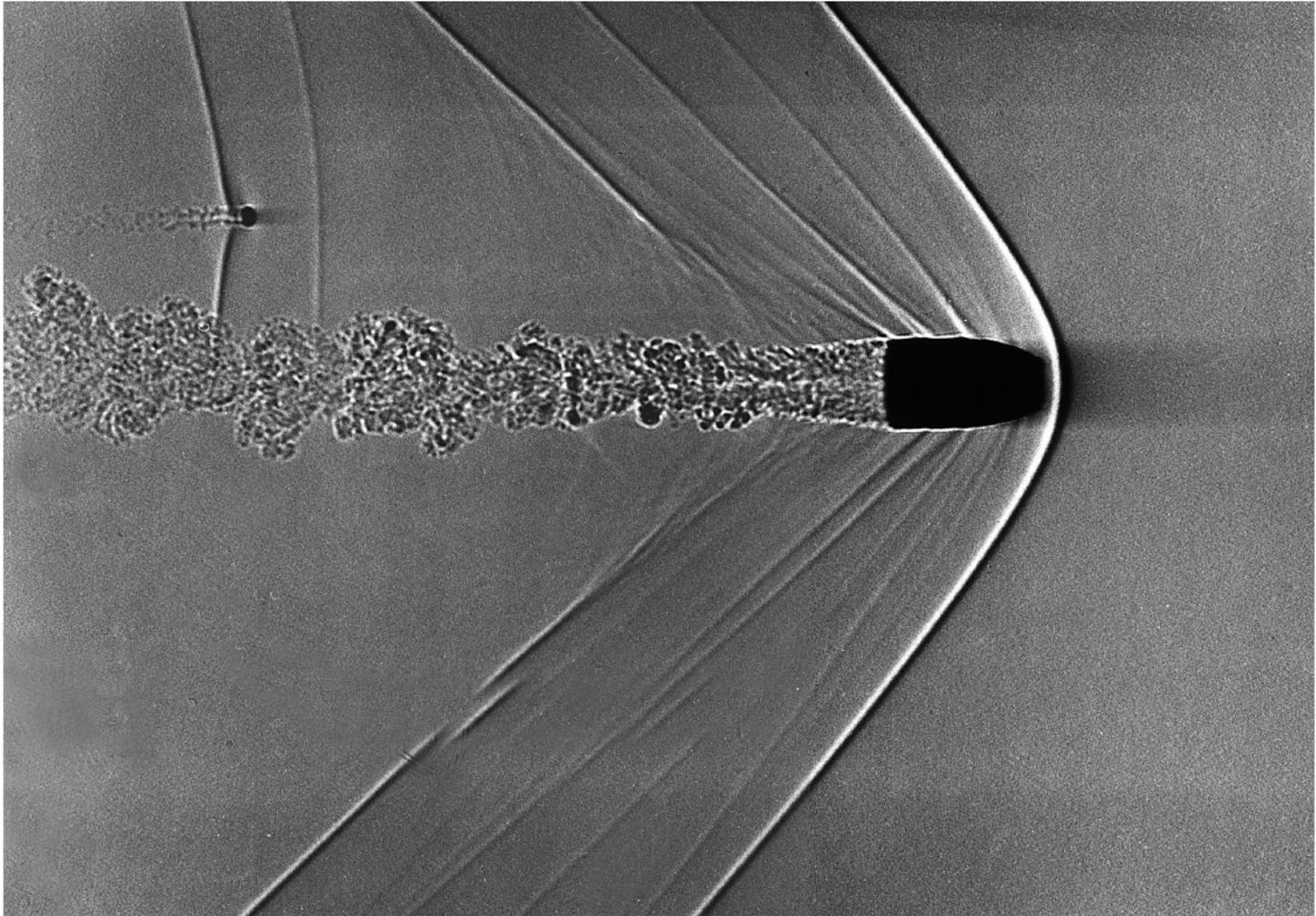
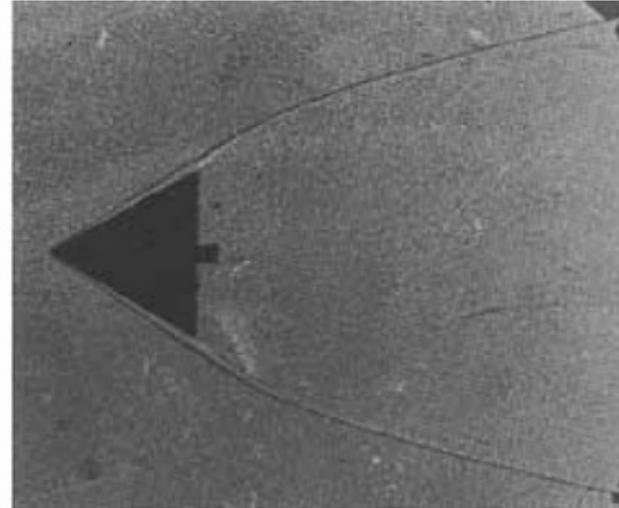
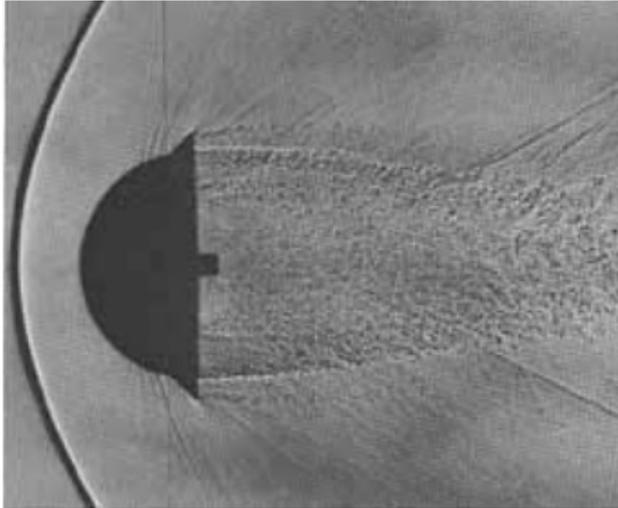
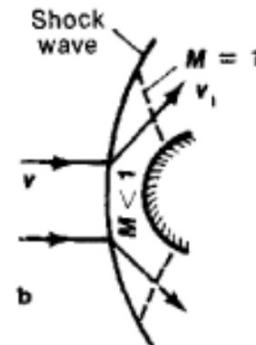
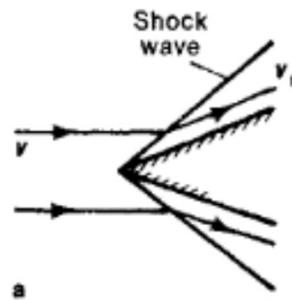


Figura 1.16 – Uma bala em vôo com  $M = 1,5$ , capturada por um instrumento denominado shadowgraph. fonte: <[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/galex/20070815/](https://www.nasa.gov/mission_pages/galex/20070815/)>

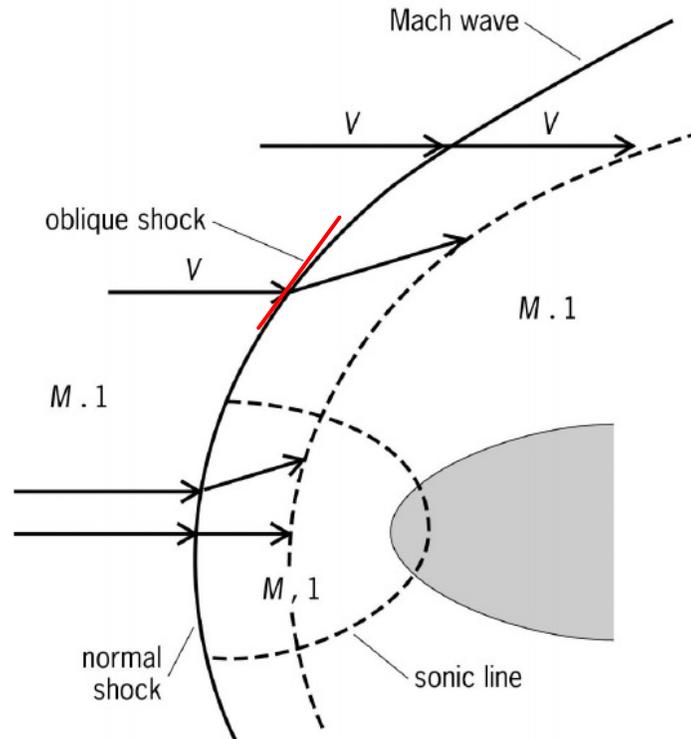
$M > 1$ : escoamento supersônico



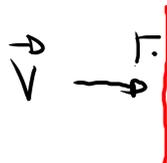
12 – Choques Normal e Oblíquo. Fonte: <https://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/SP-440/ch6-2.htm>



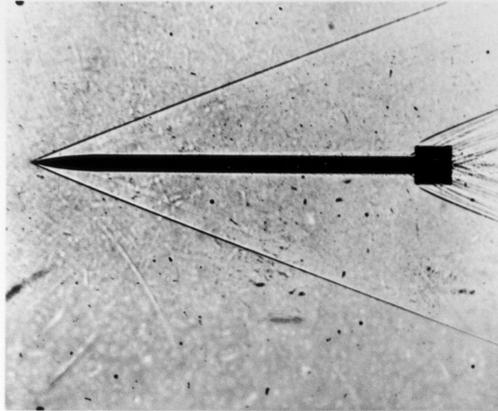
# $M > 1$ : escoamento supersônico



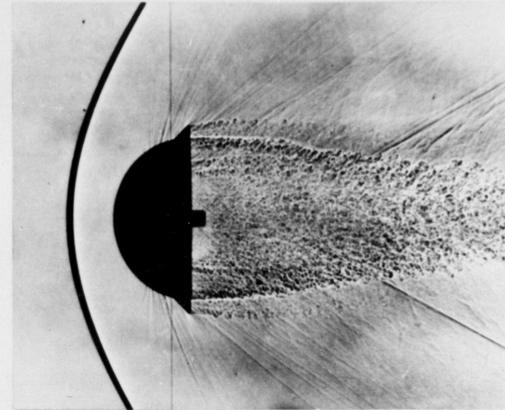
McGraw-Hill Concise Encyclopedia of Physics. © 2002 by The McGraw-Hill Companies, Inc.



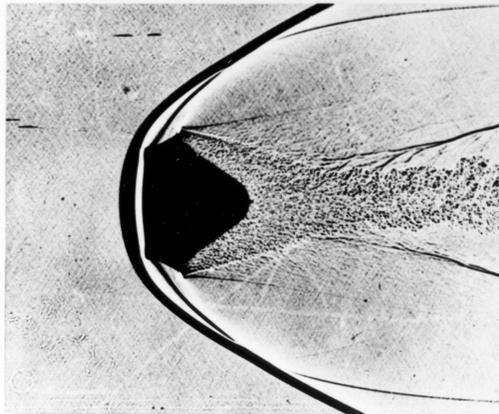
# RESEARCH CONTRIBUTING TO PROJECT MERCURY



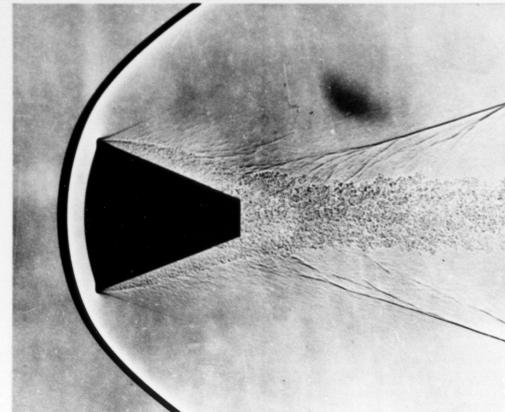
**INITIAL CONCEPT**



**BLUNT BODY CONCEPT 1953**



**MISSILE NOSE CONES 1953-1957**



**MANNED CAPSULE CONCEPT 1957**

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shadowgraph\\_Images\\_of\\_Re-entry\\_Vehicles\\_-\\_GPN-2000-001938.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shadowgraph_Images_of_Re-entry_Vehicles_-_GPN-2000-001938.jpg)



Boeing B-29 or B-50 Superfortress aircraft



\*14/10/1947: Bell X-1 primeira aeronave a voar mais rápido do que o som Deserto de Mohave: 1127 km/hr Mach 1.06 13000m\*

\*US Air Force Capt. Charles E. "Chuck" Yeager

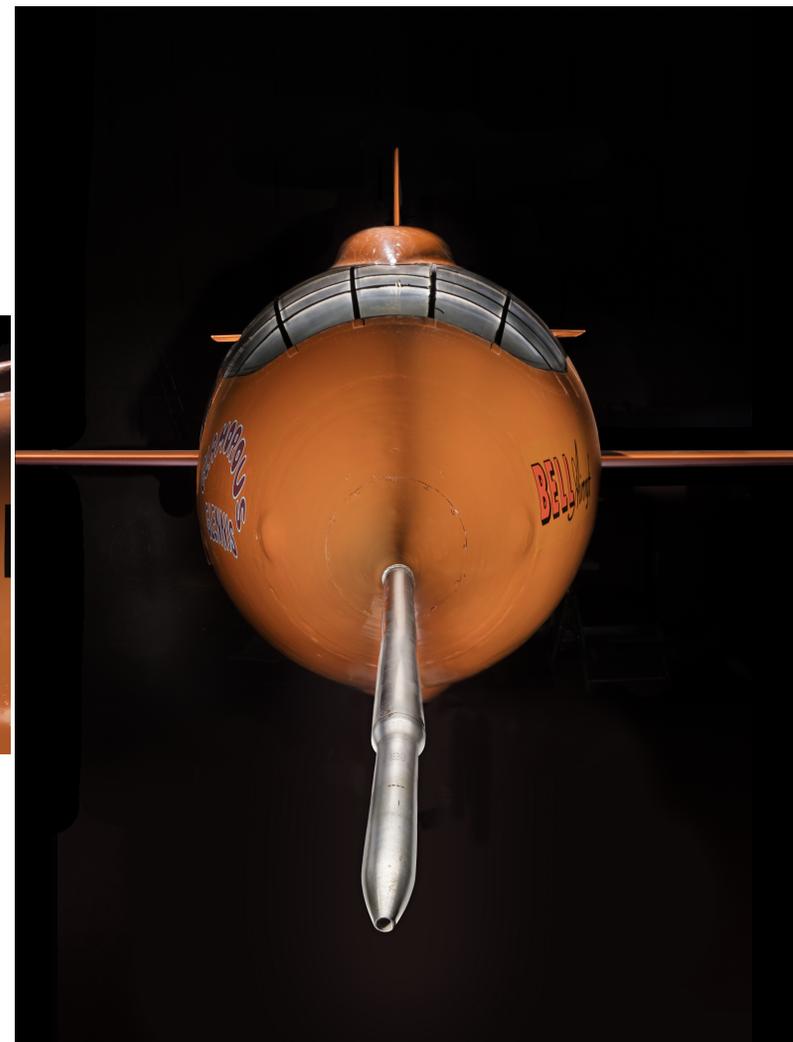
\*26/03/1948: Velocidade máxima: Mach 1.45 40130 pés

<https://airandspace.si.edu/collection-objects/bell-x-1-glamorous-glennis-nasm/bell-x-1-glamorous-glennis>





- \*Programa da National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) e Força aérea dos Estados Unidos
- \*Contrato com a Bell Aircraft Corporation em 16/03/1945: 3 aeronaves transônicas e supersônicas
- \*XS-1 - Experimental Sonic-i

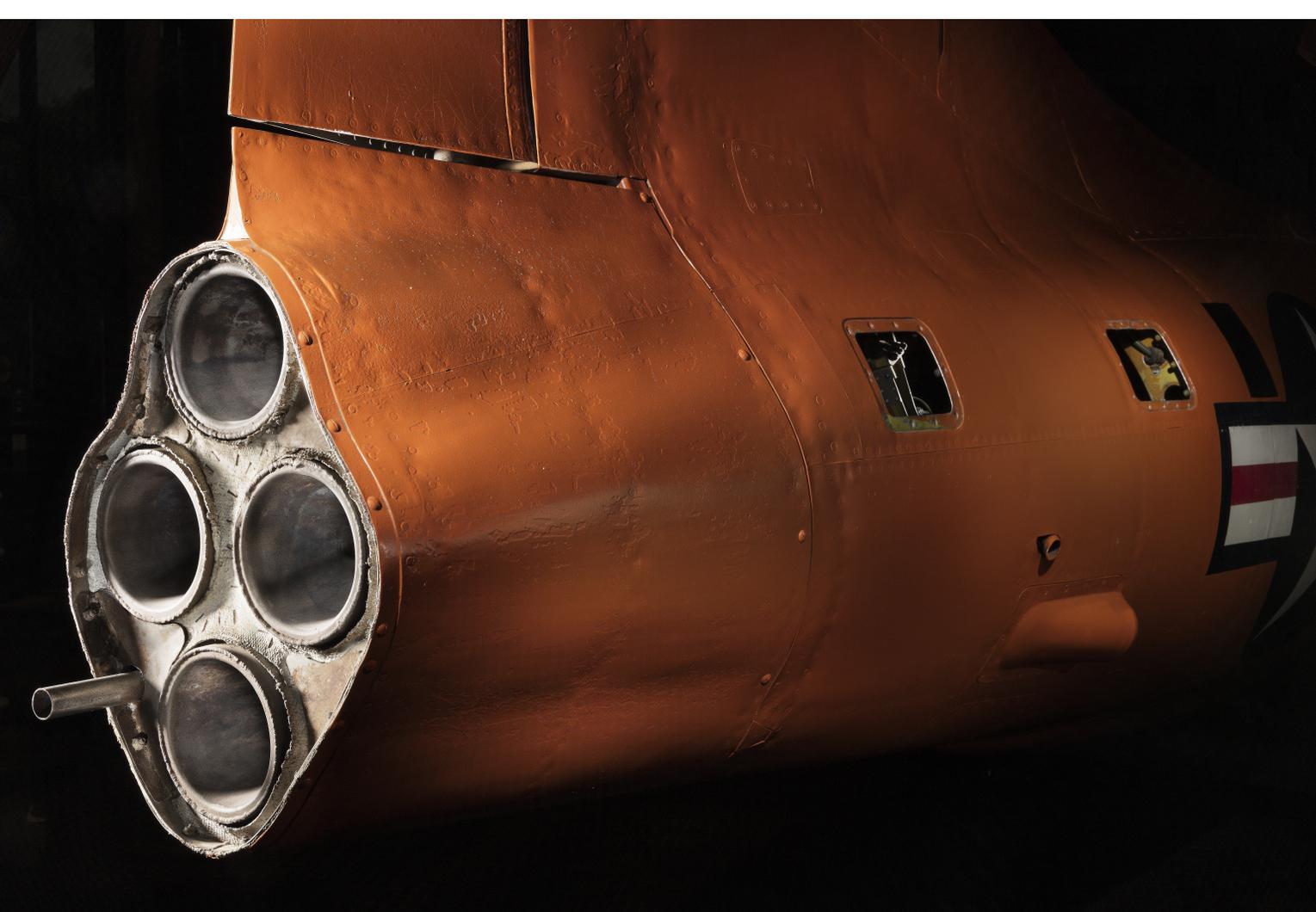


\*Alumínio com tanques em aço.

\*Contornos padrão de uma bala calibre 0.5

\*2 tanques de propelente

\*12 esferas de nitrogênio para combustível e pressurização da cabine

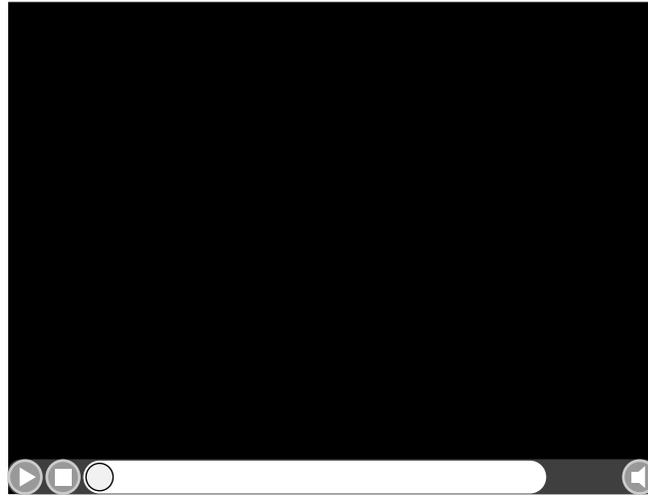
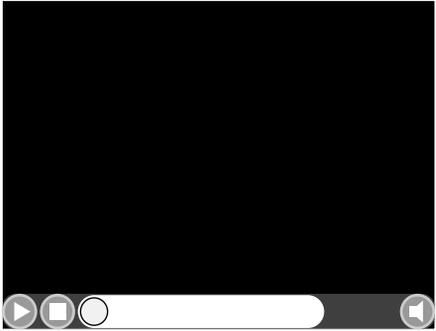


**Motor: foguete com 6000 Libras de Empuxo (26690 KN)  
#1 e #2 Pressurização direta do nitrogênio  
#3 Utilizou turbo bomba para alimentação do combustível**



- \*Mais de 500 lbm (~227Kg) de instrumentos de voo
- \*Trem de pousos retrátil
- \*Projetado originalmente para decolagem convencional
- X-1 #1 "Glamorous Glennis" The National Air and Space Museum
- \*X-1E em exibição NASA Flight Research Center
- \*X-1-3 Queenie explodiu no solo em 1951
  
- \*3 aeronaves adicionais foram construídas X-1A, X-1B e X-1D
- \*\*X1A e X-1D explosão do sistema de propulsão

Loading ...



Video Bell X-1



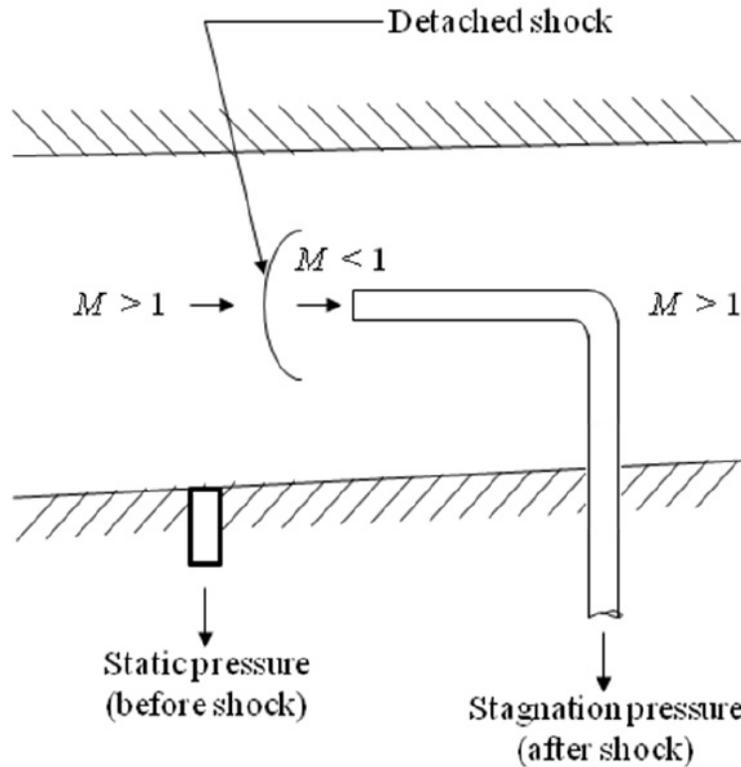
Figura 1.11 – Aeronave SR-71 atingia Mach 3.5. Fonte: <<https://www.nasa.gov/centers/dryden/multimedia/imagegallery/SR-71/>>

---

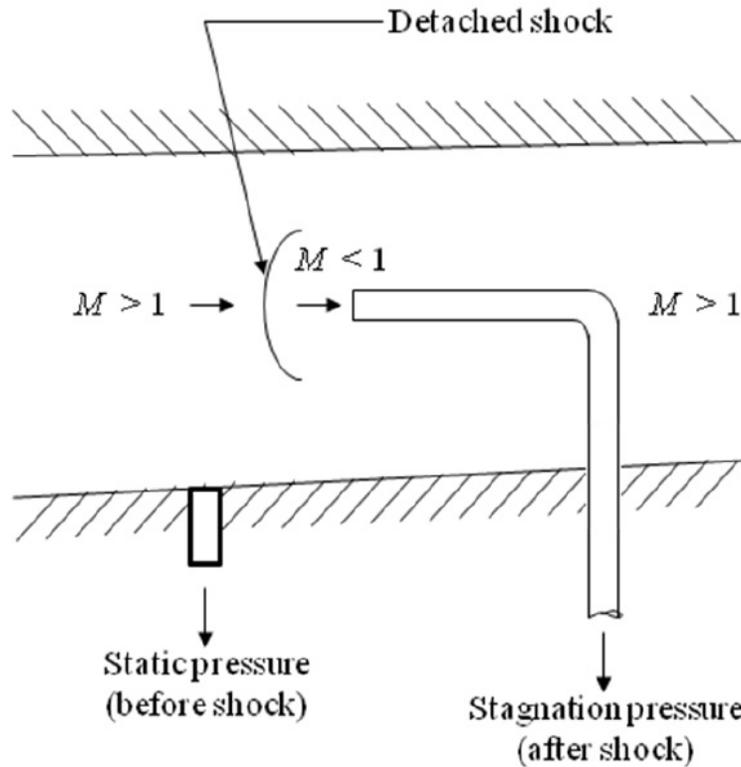


[https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/o-dia-que-forca-aerea-brasileira-interceptou-o-concorde-voando-acima-da-velocidade-do-som\\_4148.html](https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/o-dia-que-forca-aerea-brasileira-interceptou-o-concorde-voando-acima-da-velocidade-do-som_4148.html)





- A onda de choque também pode ocorrer quando se insere um medidor, como o tubo de Pitot, no escoamento supersônico. O efeito da onda de choque deve ser levado em consideração para se medir adequadamente a velocidade do escoamento. fonte: <http://nptel.ac.in/courses/101103004/module7/lec6/4.html>

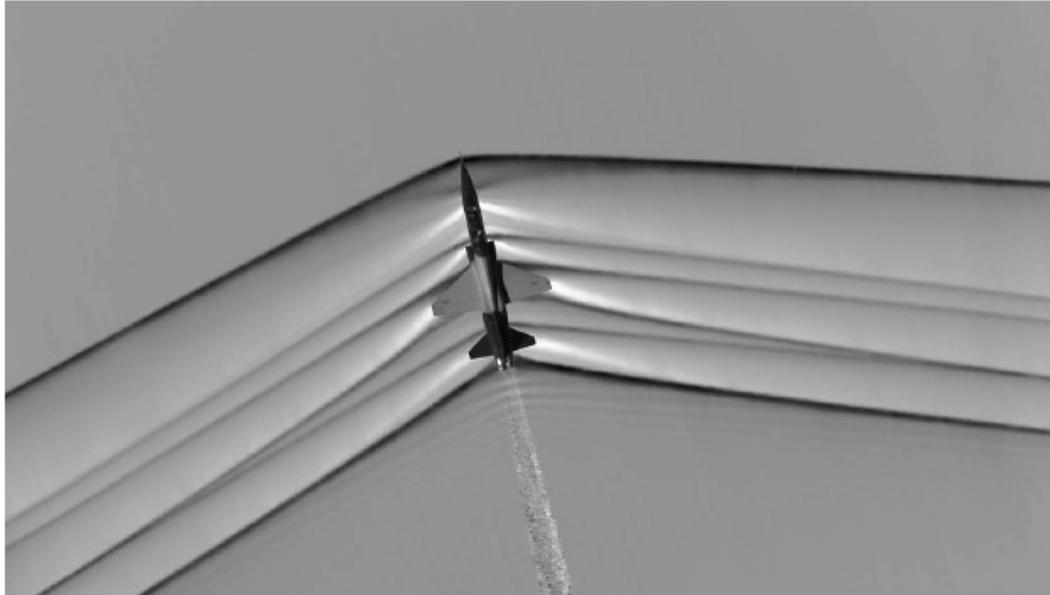


- A onda de choque também pode ocorrer quando se insere um medidor, como o tubo de Pitot, no escoamento supersônico. O efeito da onda de choque deve ser levado em consideração para se medir adequadamente a velocidade do escoamento. fonte: <http://nptel.ac.in/courses/101103004/module7/lec6/4.html>



Uma imagem da vizinhança da estrela OB HD77581 e (não visível opticamente) Vela X-1, obtida com o telescópio Dinamarquês em La Silla. Claramente mostra a presença de uma onda em arco, confirmando que o sistema se encontra em movimento. É uma das ondas em arco em formato parabólico mais perfeitas já observadas em volta de uma estrela em movimento OB. Fonte: <<https://www.eso.org/public/brazil/images/eso9702a/?lang>>

Fora da região central e em escoamentos sobre corpos "pontudos" a onda de choque será oblíqua.



– Choque Oblíquo. Fonte: <https://www.nasa.gov/image-feature/stark-beauty-of-supersonic-shock-waves>

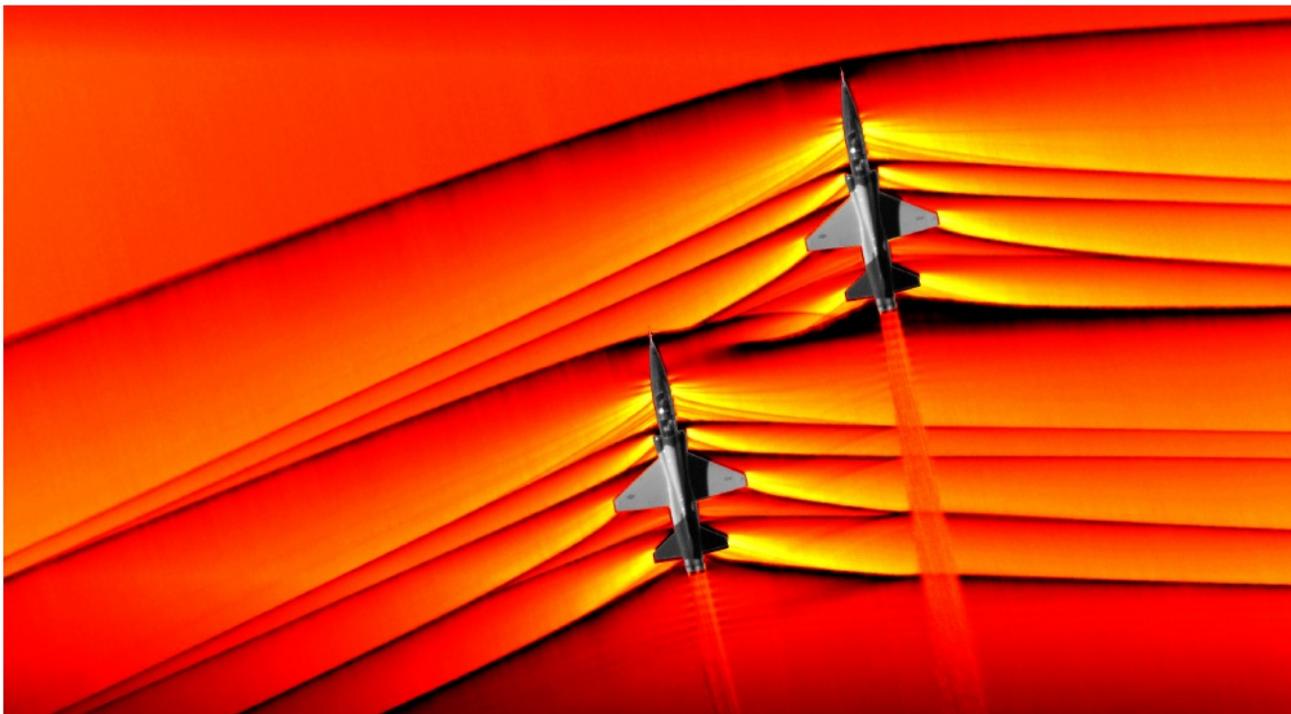
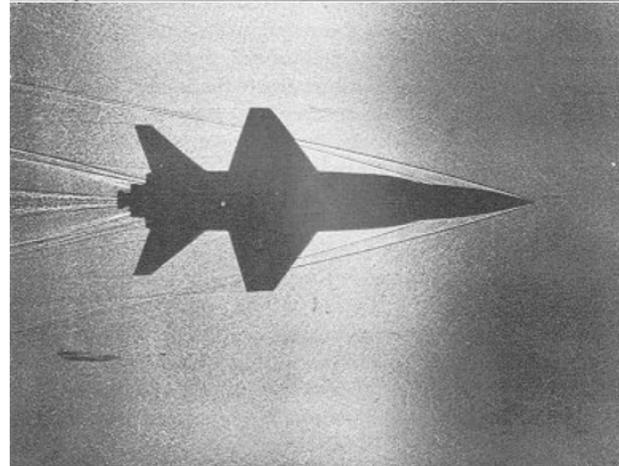
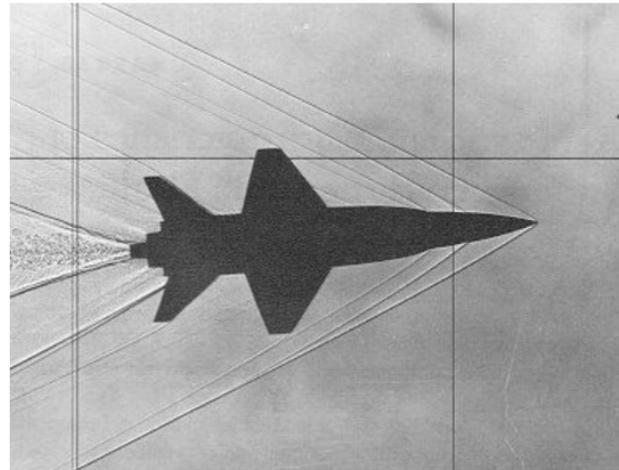
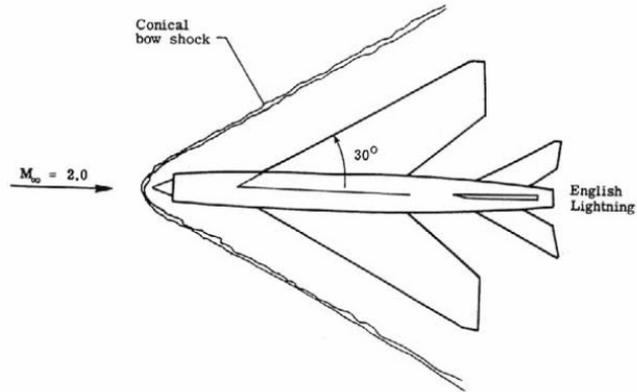
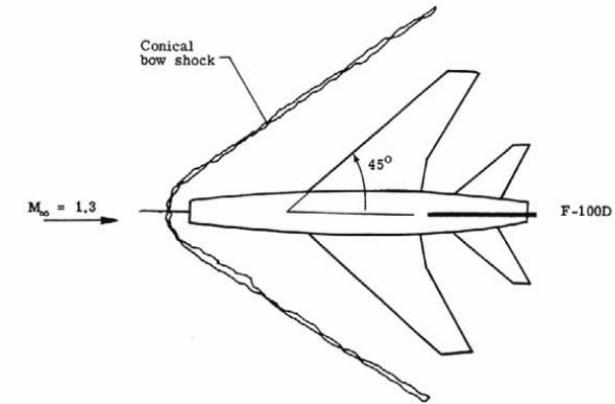


Figura 1.20 – Interação de ondas de choque em aeronaves T-38, voando em velocidade supersônica em formação, aproximadamente 30pés de distância uma da outra, utilizando a técnica fotográfica schlieren. As ondas são tipicamente ouvidas em solo como o boom sônico Fonte: <<https://www.flickr.com/photos/nasacommons/33433414158>>



- Para velocidades maiores o escoamento se aproxima da fuselagem. fonte: <https://history.nasa.gov/SP-367/f99.htm>

- Modelo x-15 em túnel de vento a Mach 3.5 (acima) e Mach 6 (abaixo). Fonte: <https://history.nasa.gov/SP-60/ch-5.html>



[https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/flying\\_004\\_0.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/flying_004_0.jpg)

$M > 5$ : escoamento hipersônico

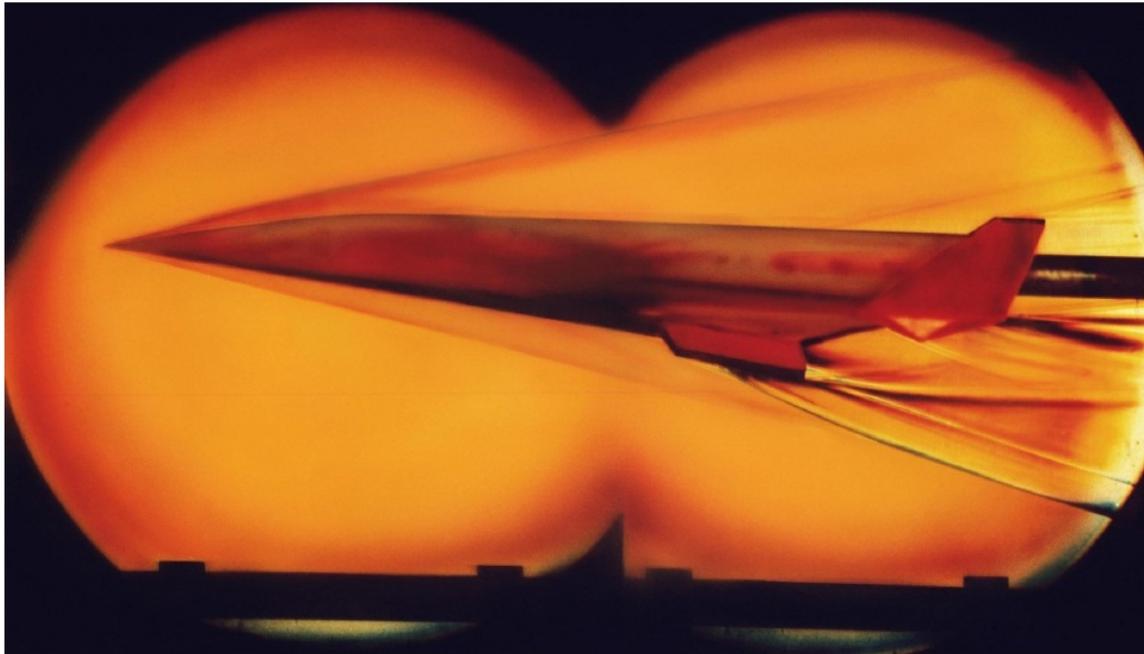


Figura 1.14 – Fonte: <https://teamuv.org/tag/hypersonic/>



Figura 1.15 – Fonte: <https://www.nasa.gov/centers/dryden/multimedia/imagegallery/X-43A/EC04-0325-23.html>



Russian Tsirkon (Zircon) hypersonic missile (Picture source: The Center News)

<https://www.airrecognition.com/index.php/focus-analysis-photo-report-aviation-defence-industry/aviation-defence-industry-technology/6053-russia-has-to-maintain-leadership-in-hypersonic-technologies.html>

### 3M22 Zircon

Propellant	Liquid - "Decilin-M" ( <b>Russian</b> : Децилин-М)
Operational range	>500 km (270 nmi; 310 mi)
Maximum <b>speed</b>	Mach 8–Mach 9 (6,090–6,851 mph; 9,800–11,025 km/h; 2,722.3–3,062.6 m/s)
Launch platform	Submarine, Surface ship

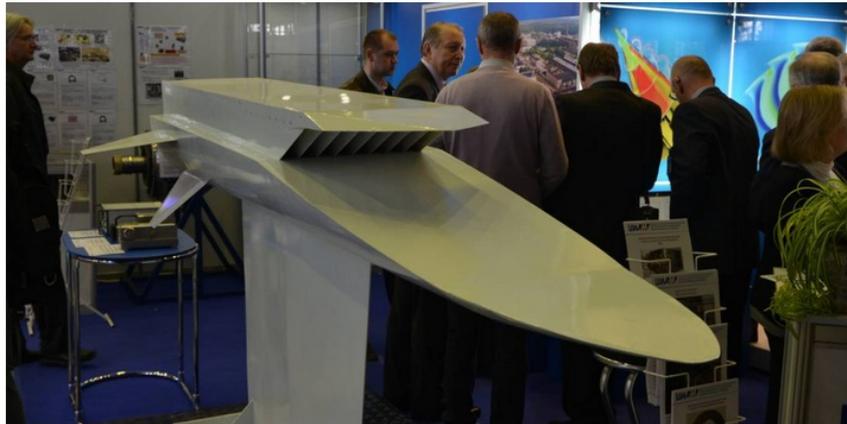
[14 more rows](#)

[en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/3M22_Zircon) › [wiki](#) ▼

[3M22 Zircon - Wikipedia](#)

## Putin Reveals Zircon Mach 9 Missile Specification

by Vladimir Karnozov - February 22, 2019, 8:44 AM



*Could this be a forerunner of Zircon? This model of an experimental hypersonic missile was displayed in 2016 by TsIAM. (Photo: Vladimir Karnozov)*

<https://www.ainonline.com/aviation-news/defense/2019-02-22/putin-reveals-zircon-mach-9-missile-specification>



*Hypersonic missile - Boeing X-51. Source: US Air Force*

<https://www.defenceiq.com/defence-technology/articles/hypersonic-missiles-what-are-they-and-can-they-be-stopped>

## Proximas aulas

Revisão de termodinâmica

Equação dos gases ideais

Equações Governantes:

conservação de massa

quantidade de movimento

conservação de energia