

The background image shows a complex industrial facility, likely a rocket engine test cell. A large, dark, conical nozzle is positioned horizontally, and a powerful, bright blue and white jet of fluid is being discharged from its tip. The facility is filled with various pipes, valves, and structural supports, all bathed in the warm, orange light of a sunset or sunrise. The sky in the background is a clear, pale blue.

Clase 4: Diseño de Toberas

Ing. Esteban Jiménez Sánchez



ACC
ASOCIACIÓN COSTARRICENSE DE COHETERÍA

Razón de Áreas de Expansión



Razón entre el área de escape (A_2) y el área de garganta de una tobera (A_t).

$$\epsilon = \frac{A_2}{A_t}$$

Coeficiente de Áreas (K_n)



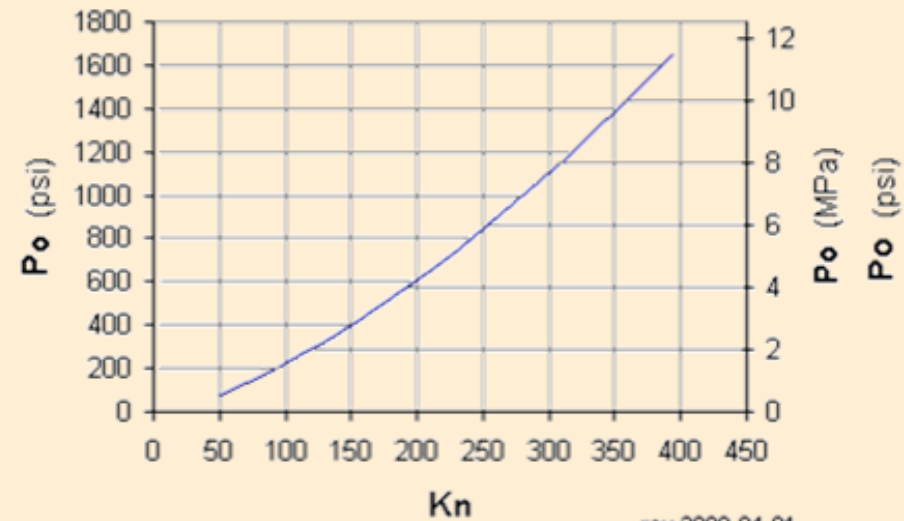
Es la proporción entre el área de quemado y el área de la garganta.

$$K_n = A_b / A_t$$

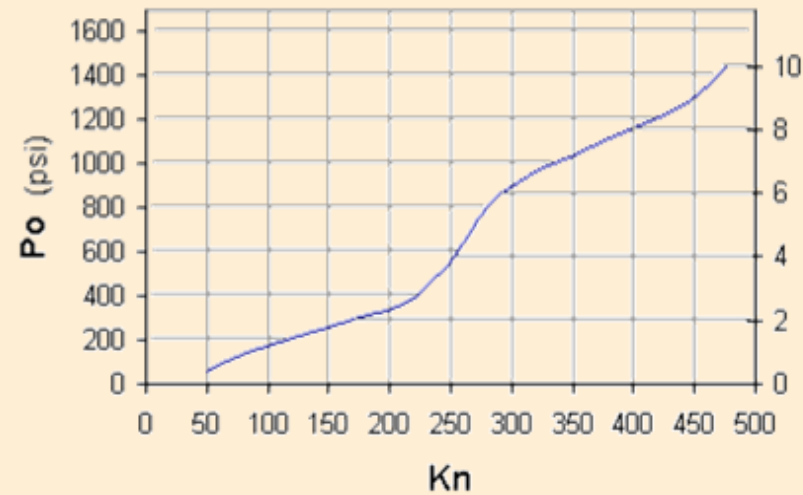
Valores Promedio de Kn



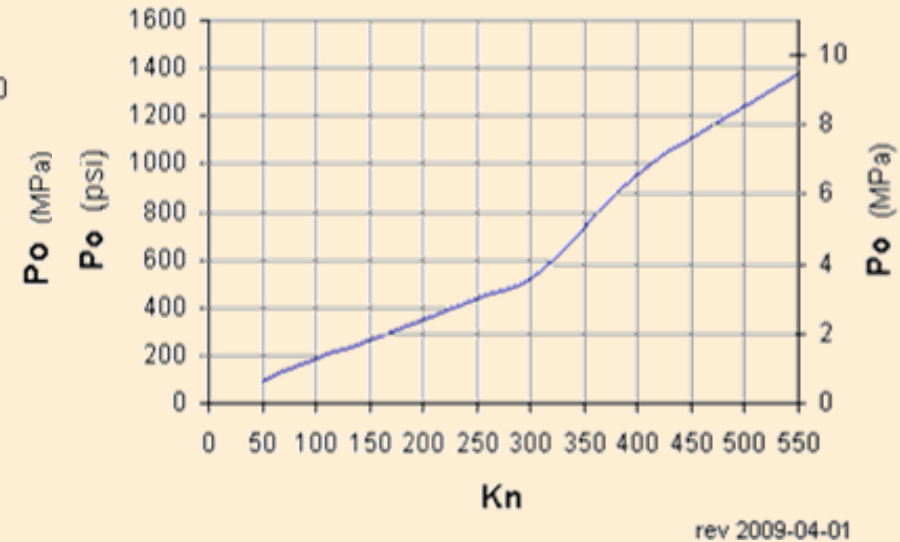
Chamber Pressure v.s. Kn
KNSU



Chamber Pressure v.s. Kn
KNDX



Chamber Pressure v.s. Kn
KNSB fine-grind KNO₃



Coeficiente Canal – Garganta (ψ)



También conocido como el Port-to-Throat ratio, se refiere a la relación entre el área del canal interno y el área de la garganta

$$\psi = \frac{A_p}{A_t}$$

$$\psi > 2$$

Velocidad Característica (c^*)



Medida de la eficiencia de la combustión. Es esencialmente independiente de la geometría final de la pared de la tobera.

$$c^* = \frac{P_1 A_t}{\dot{m}}$$

$$c^* = \sqrt{\frac{R * T_1}{k * \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}} = \frac{c}{C_F}$$

Velocidad de Escape Efectiva (c)



$$c = v_2 + \frac{(P_2 - P_3)A_2}{\dot{m}}$$

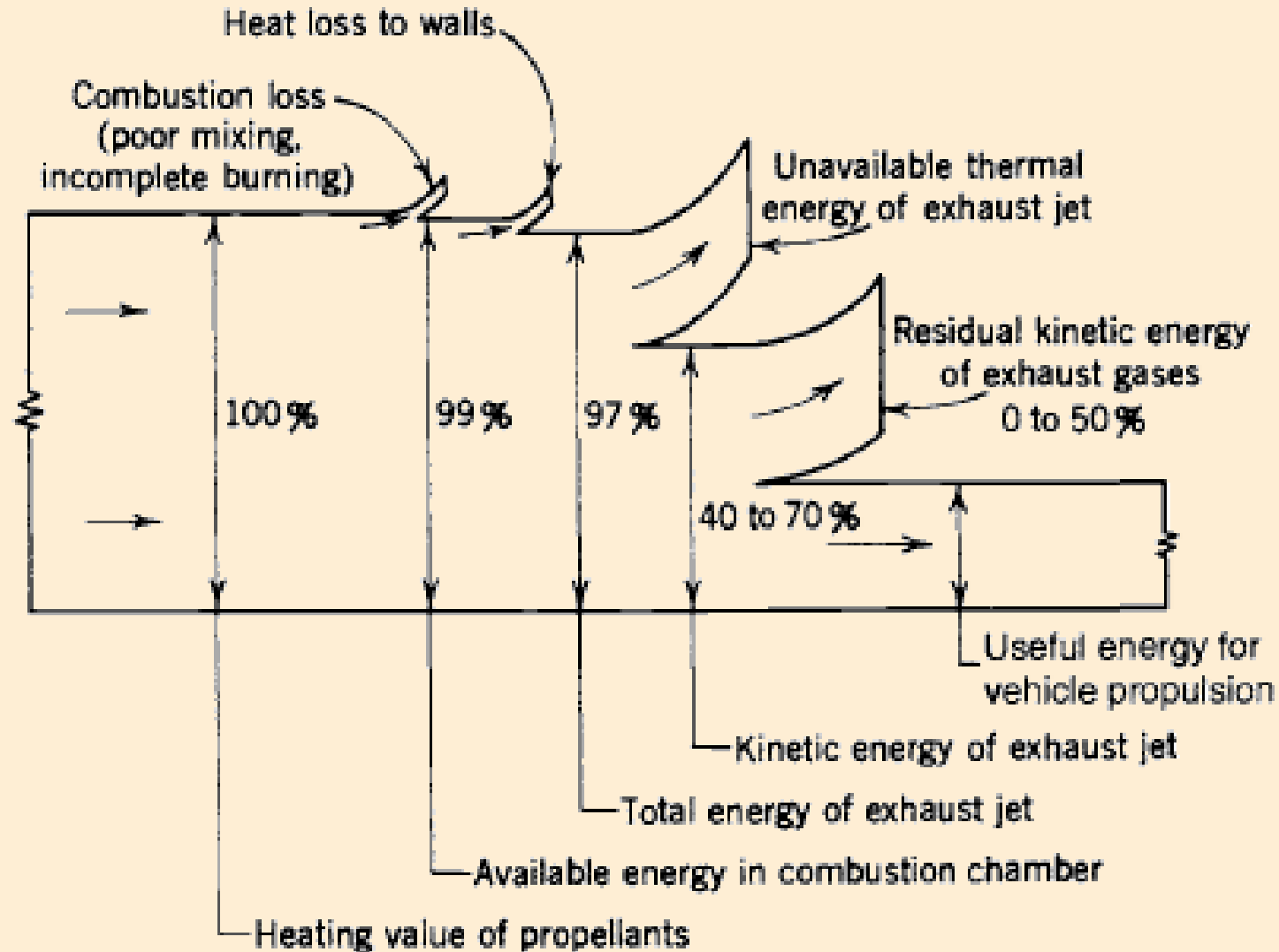
Coeficiente de Empuje



Relación entre el empuje real del cohete, y el empuje si no se diese la expansión en la sección divergente de la tobera. Una medida de la eficiencia de la expansión.

$$C_F = \frac{F}{A_t P_1}$$

Perdidas de Energía



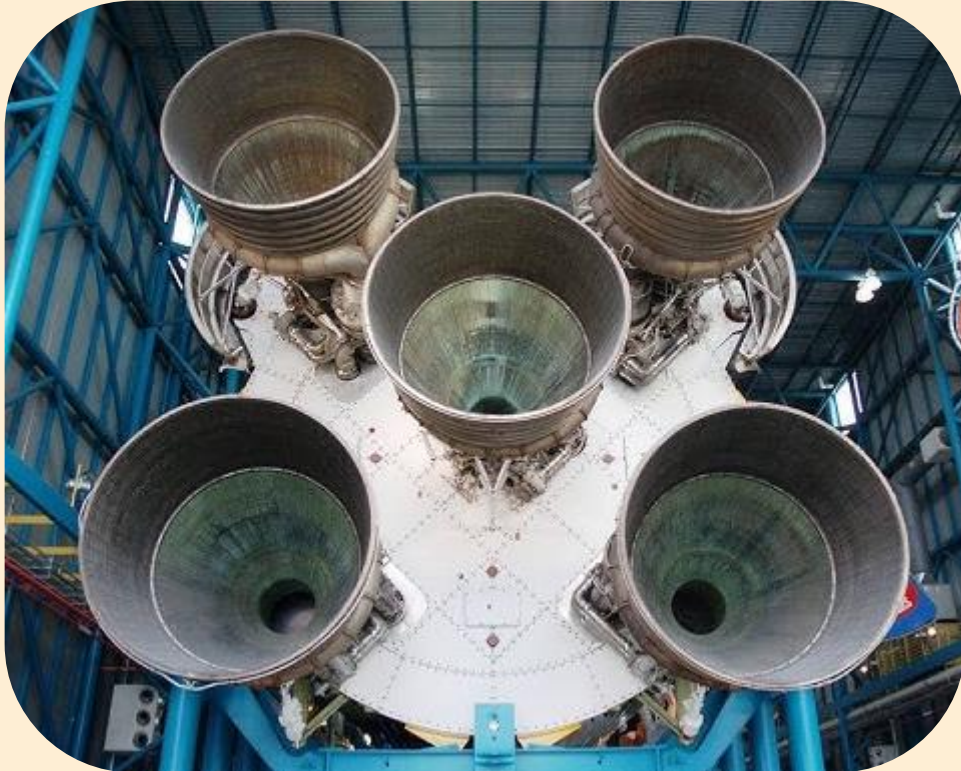
Resumen de Toberas



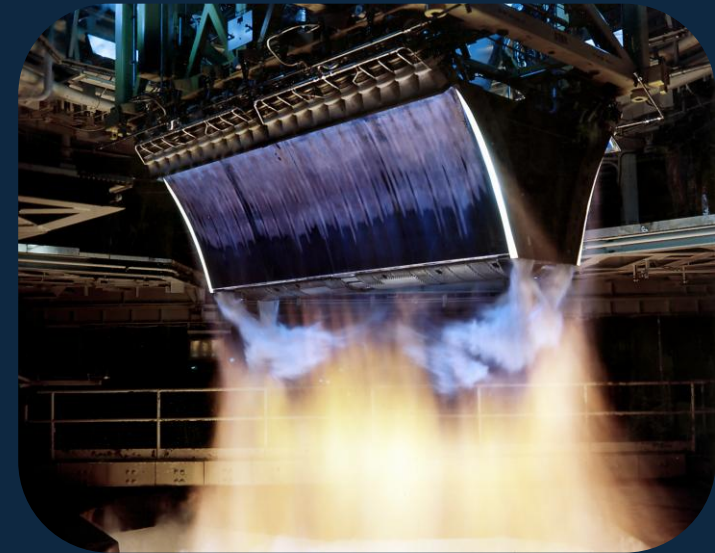
	Subsonic	Sonic	Supersonic
Throat velocity	$v_t < a_t$	$v_t = a_t$	$v_t = a_t$
Exit velocity	$v_2 < a_2$	$v_2 = v_t$	$v_2 > v_t$
Mach number	$M_2 < 1$	$M_2 = M_t = 1.0$	$M_2 > 1$
Pressure ratio	$\frac{p_1}{p_2} < \left(\frac{k+1}{2}\right)^{k/(k-1)}$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{p_1}{p_t} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{k/(k-1)}$	$\frac{p_1}{p_2} > \left(\frac{k+1}{2}\right)^{k/(k-1)}$
Shape			

Toberas

De Laval



Aerospike



Aerospike



- Las toberas aerospike pueden modificar el grado de expansión de los gases con respecto a la presión atmosférica a la que están expuestas.
- Esto les permite ajustar su grado de expansión de acuerdo a la altitud a la que se encuentran, manteniendo un alto nivel de eficiencia a través de diferentes niveles de altitud.

FIG-1
PRIOR ART

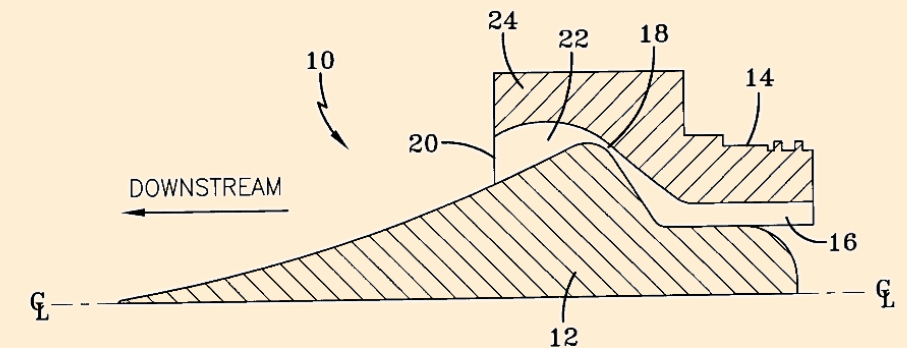
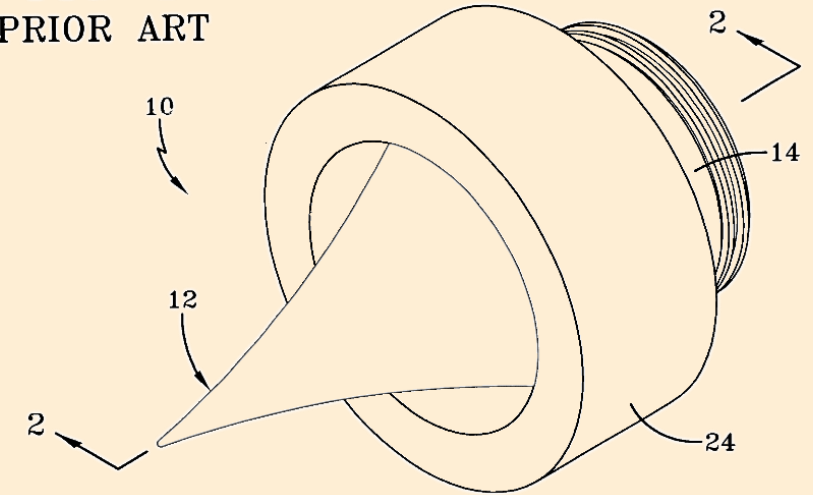
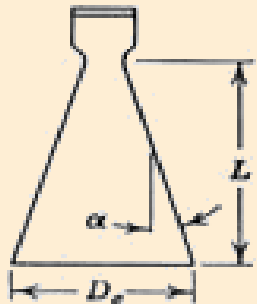
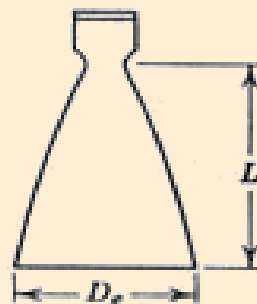
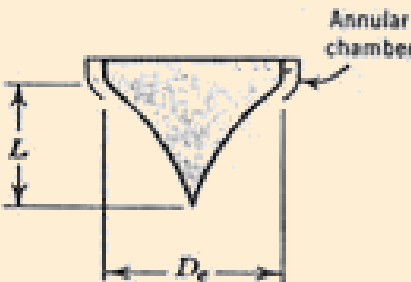
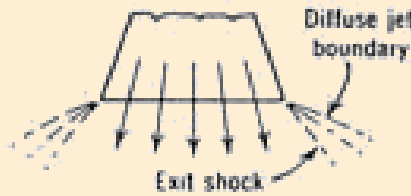
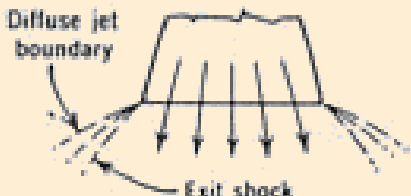
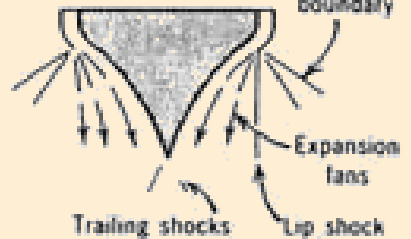
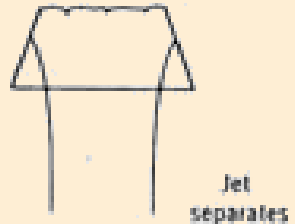
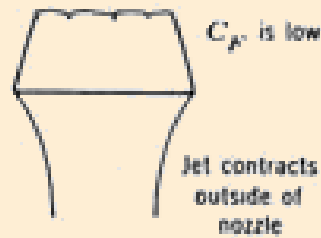
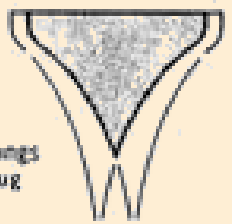
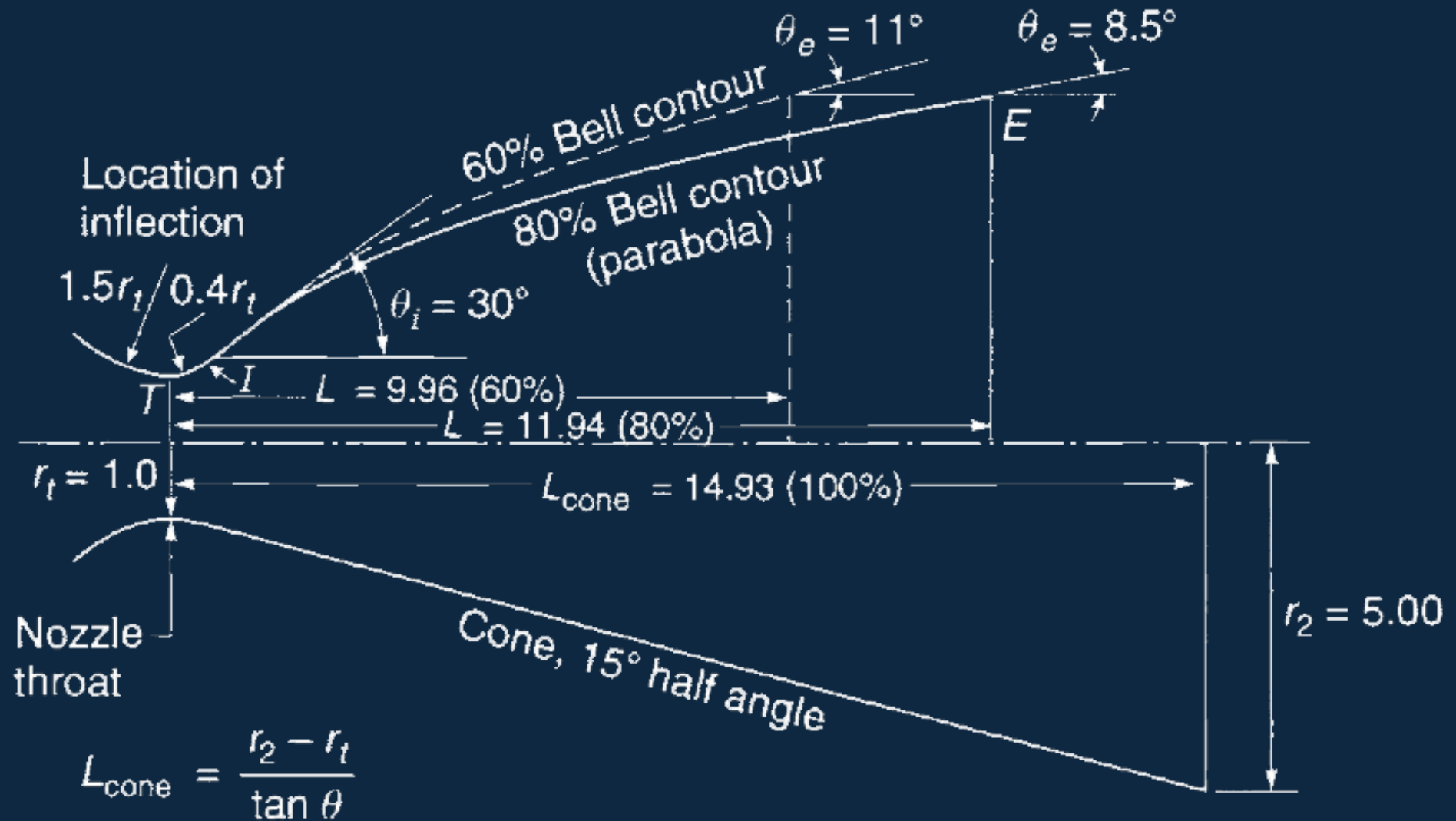


FIG-2
PRIOR ART



	Cone	Contoured or Bell-Shaped	Plug
Shape			
Flow with underexpansion, altitude			
Flow with overexpansion, (Sea level)			
Mass flow distribution at exit			

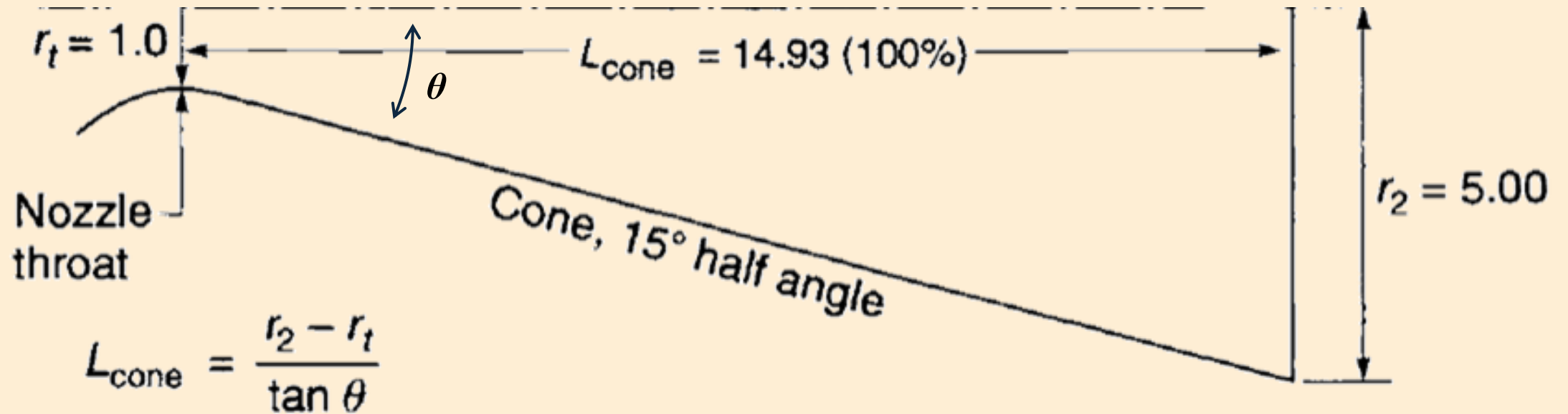
Diseño de Sección Divergente



Toberas Cónicas



$\theta: 12^\circ - 15^\circ$



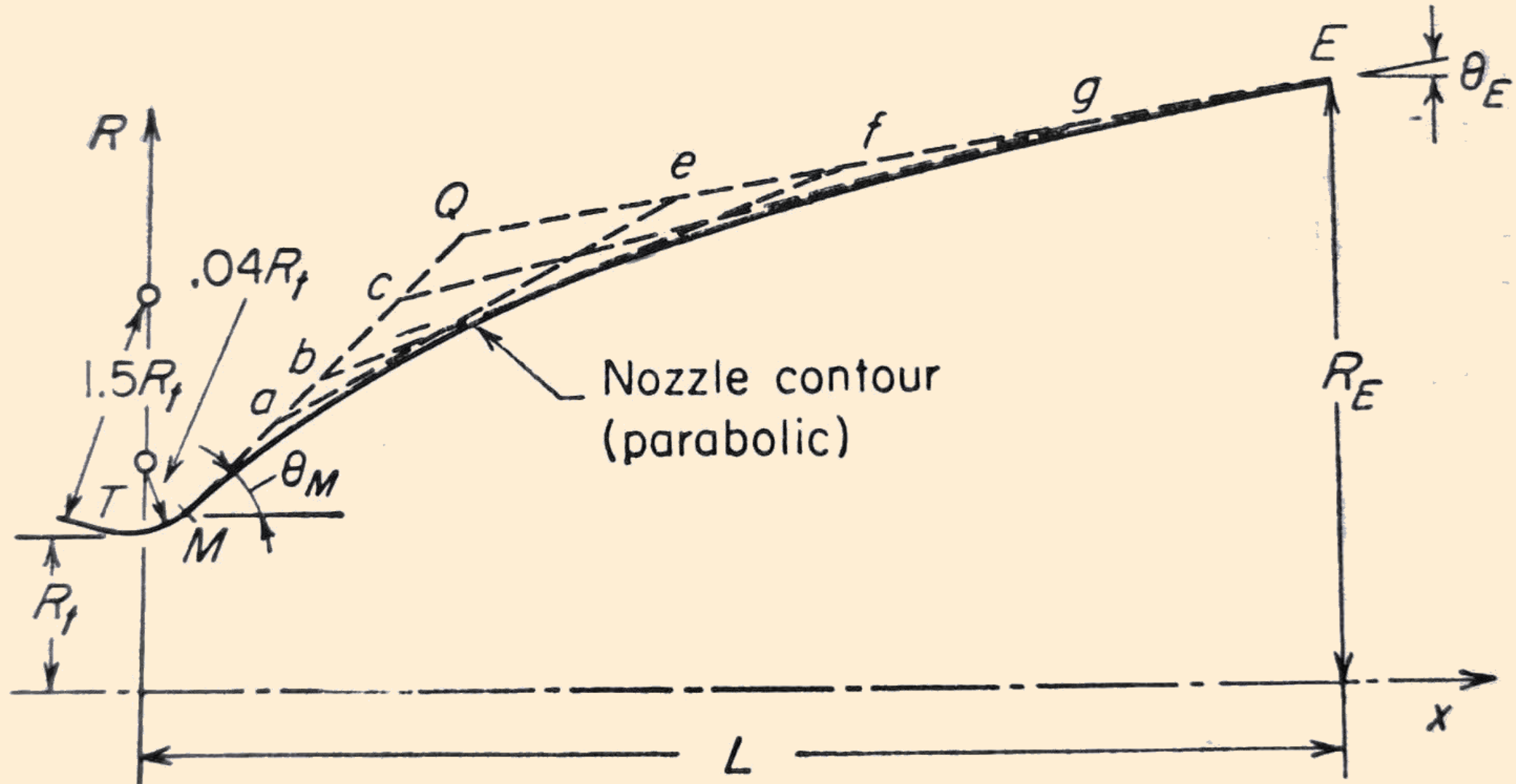
Corrección de Eficiencia



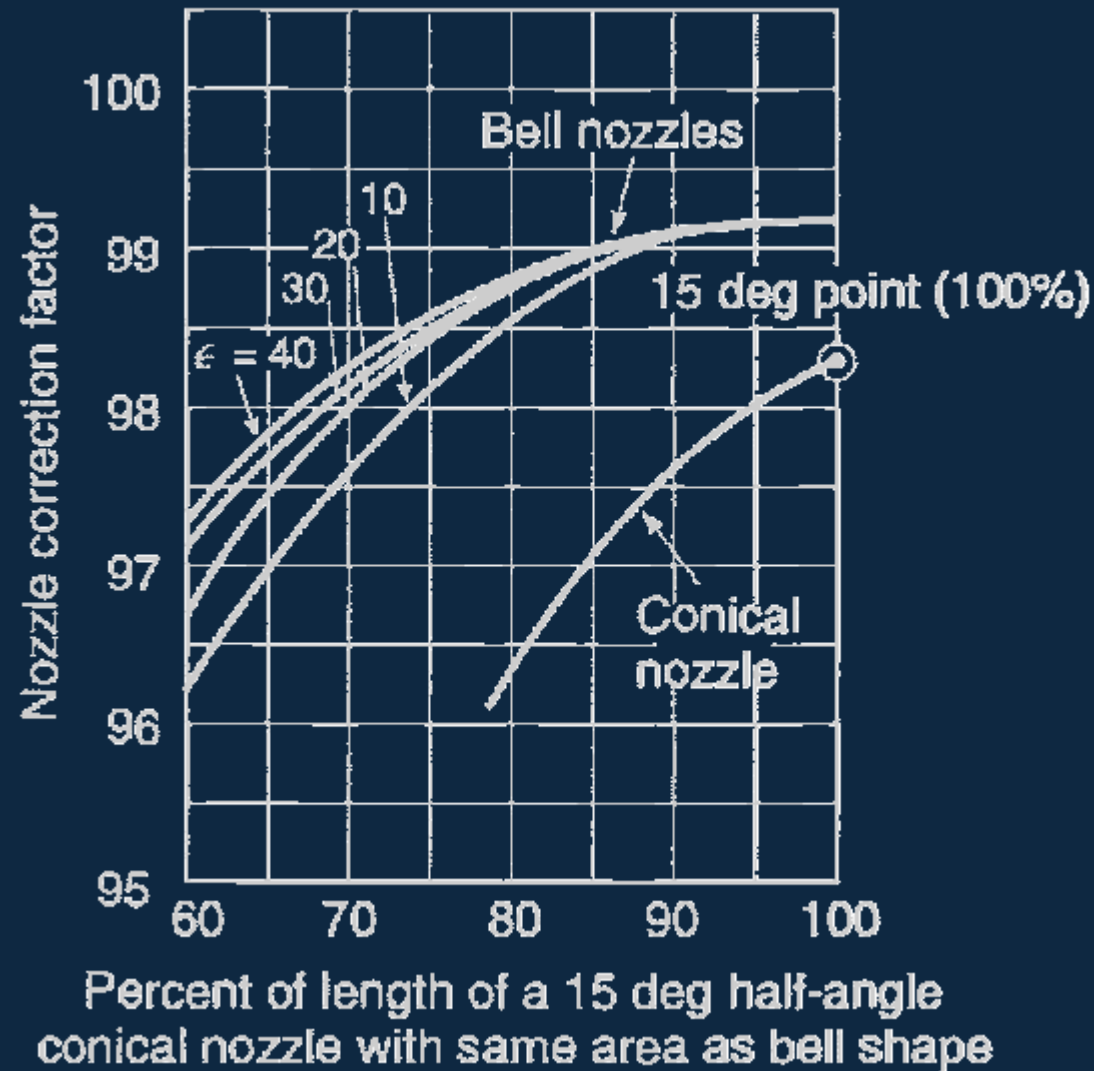
TABLE 3–3. Nozzle Angle Correction Factor for Conical Nozzles

Nozzle Cone Divergence Half Angle, α (deg)	Correction Factor, λ
0	1.0000
2	0.9997
4	0.9988
6	0.9972
8	0.9951
10	0.9924
12	0.9890
14	0.9851
15	0.9830
16	0.9806
18	0.9755
20	0.9698
22	0.9636
24	0.9567

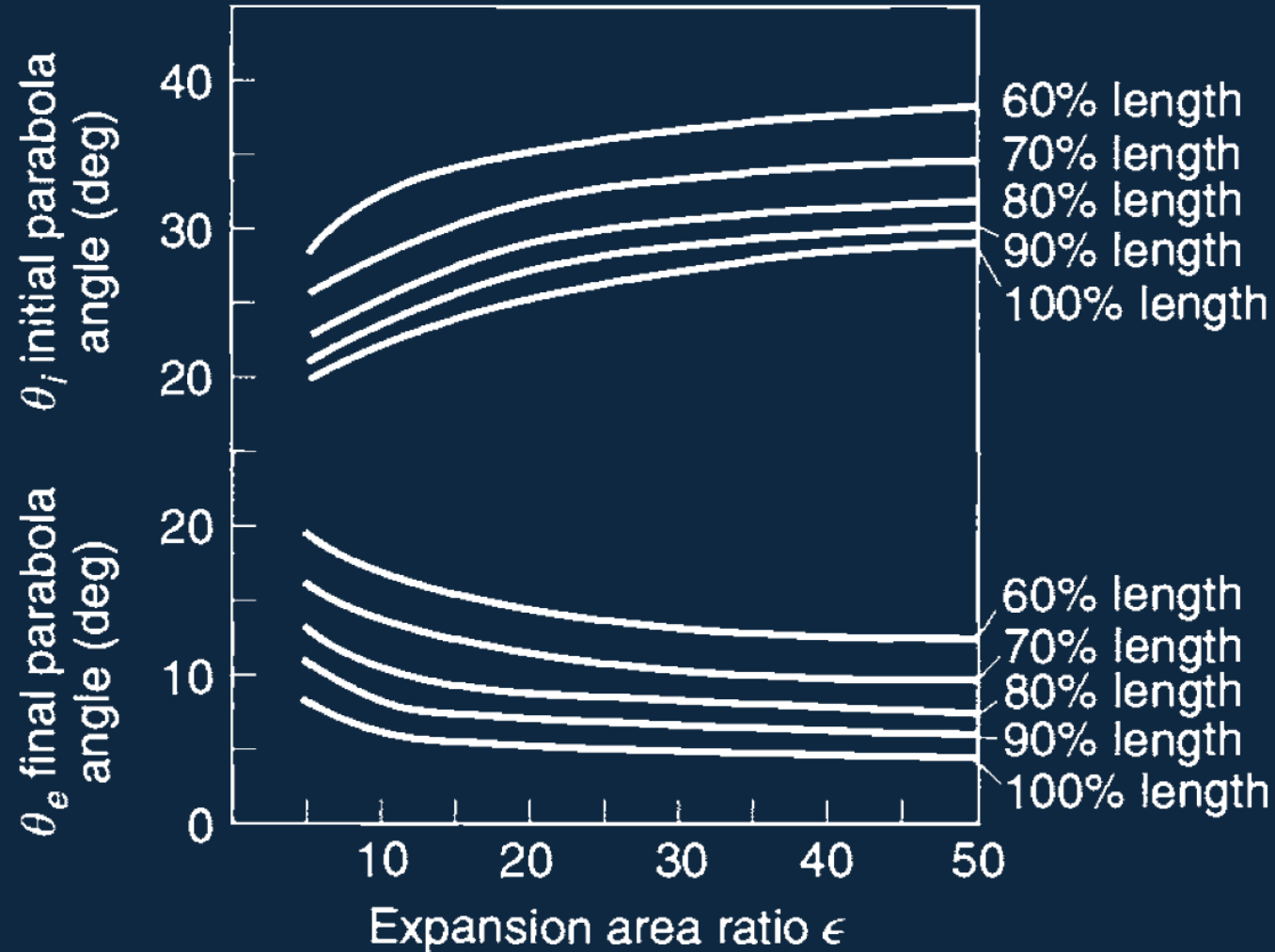
Toberas de Campana



Corrección de Eficiencia



Ángulos de Curva



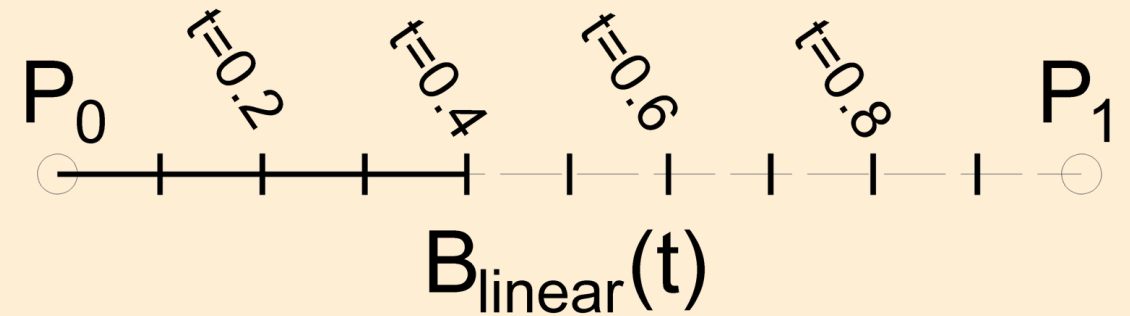
Curvas de Bézier



Una curva de Bézier es una función paramétrica dependiente de una serie de puntos de control

Dependen de una variable general (t en este caso) con valores en el rango entre 0 y 1.

Para cada punto de la curva se realizan interpolaciones entre los puntos de control



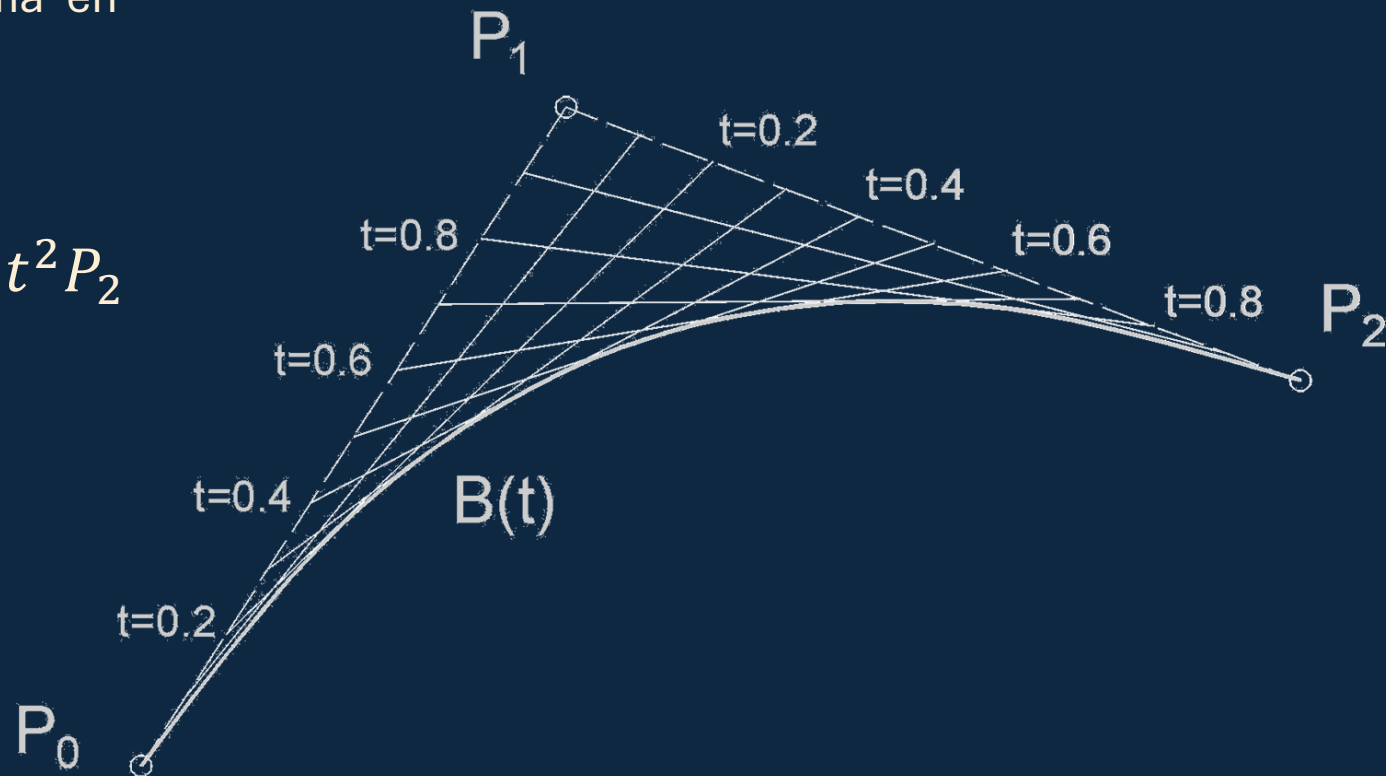
$$B_{linear}(t) = (1 - t) * P_0 + t * P_1$$

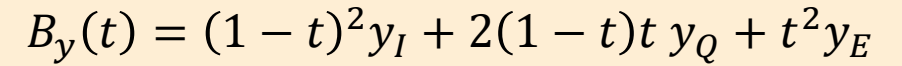
Curvas de Bézier



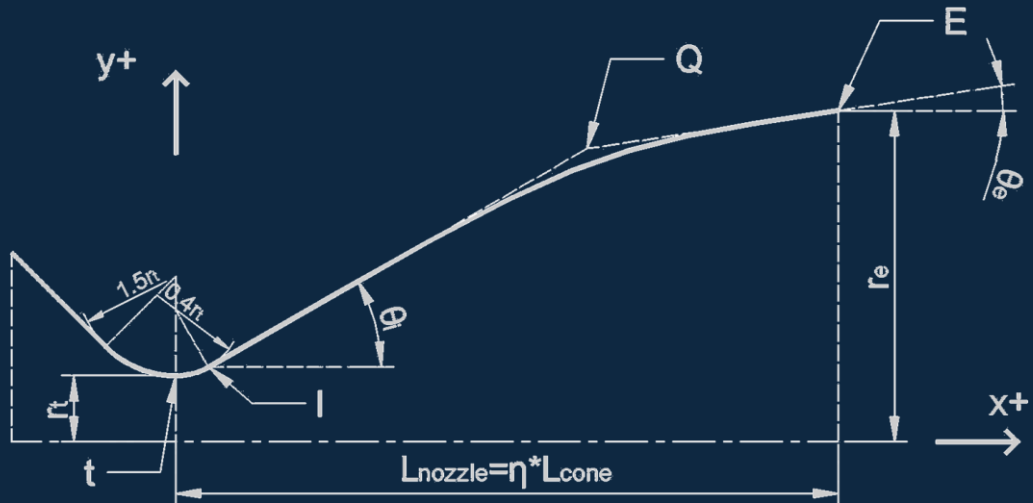
Aplicando el mismo concepto a una curva con 3 puntos de control, la ecuación se transforma en una cuadrática.

$$B(t) = (1 - t)^2 P_0 + 2(1 - t)tP_1 + t^2 P_2$$





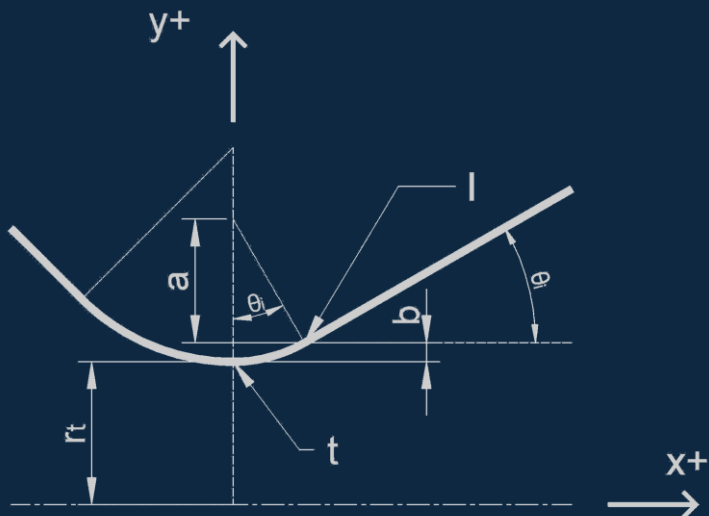
Determinación del Punto Q



Se deben determinar las rectas IQ y QE. Estas están definidas por los puntos I y E, y los ángulos θ_i y θ_e

$$x_Q = \frac{b_{QE} - b_{IQ}}{m_{IQ} - m_{QE}}$$

$$y_Q = m_{IQ}x_Q + b_{IQ}$$



$$m = \tan(90^\circ - \theta)$$

$$b_{IQ} = y_I - m_{IQ} * x_I$$

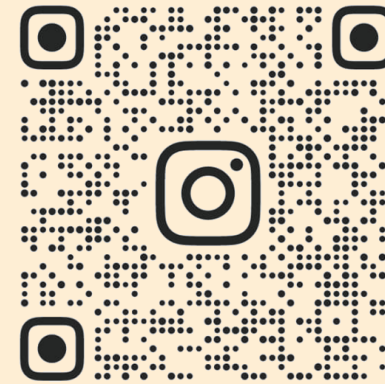
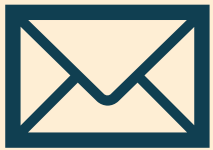
$$b_{QE} = y_E - m_{QE} * x_E$$

Pasos de Diseño



1. Partiendo de los radios de garganta y escape, calcular la razón de expansión de la sección divergente.
2. Seleccionar la razón de longitud de la tobera.
3. Identificar el ángulo inicial y final de la tobera.
4. De dichos ángulos, determinar la pendiente de las rectas IQ y QE.
5. Calcular las coordenadas para los puntos I, Q, y E.
6. Aplicar la curva de Bézier cuadrática.

iTrabajemos Juntos!



@COHETERIACR



@EJIMENEZS_93