

# Transitorios Hidráulicos en Tuberías a Presión

Curso posgrado y educación permanente  
**2023**

Docentes: Dr. Ing. Rodolfo Pienika [rpienika@fing.edu.uy](mailto:rpienika@fing.edu.uy)  
MSc. Ing. Laura Rovira [lrovira@ose.com.uy](mailto:lrovira@ose.com.uy)

# AIRE ATRAPADO

Transitorios Hidráulicos en Tuberías a Presión 2023

# AIRE ATRAPADO



- ❑ Causas de la presencia de aire en acueductos:
  - Vórtices en la aspiración.
  - Válvulas de aire.
  - Rupturas en la tubería, juntas o uniones en mal estado, donde  $p < 0$ .
  - Liberación de aire disuelto.

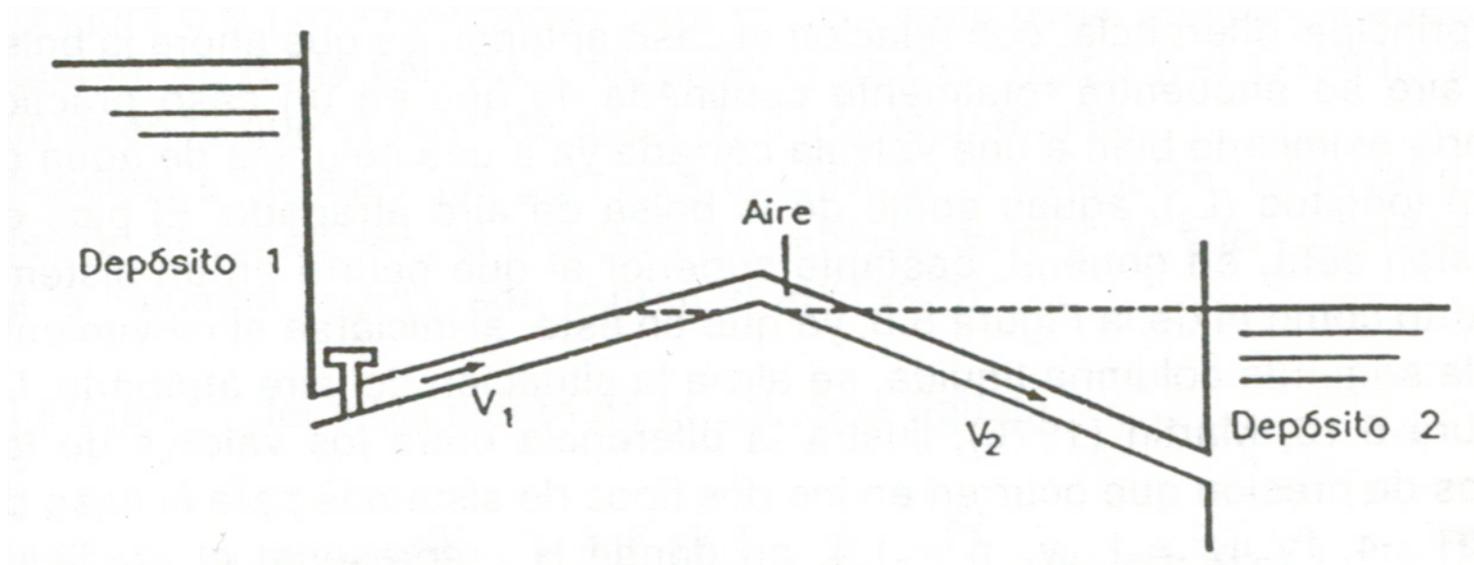
# AIRE ATRAPADO



- ❑ Principales problemas asociados:
  - Corrosión.
  - Reducción de la capacidad de transporte del acueducto.
  - Régimen de operación no estable.
  - Disminución de la eficiencia de la bomba.
  - **Picos de presión, por compresión dinámica.**

# AIRE ATRAPADO

Gran compresibilidad.

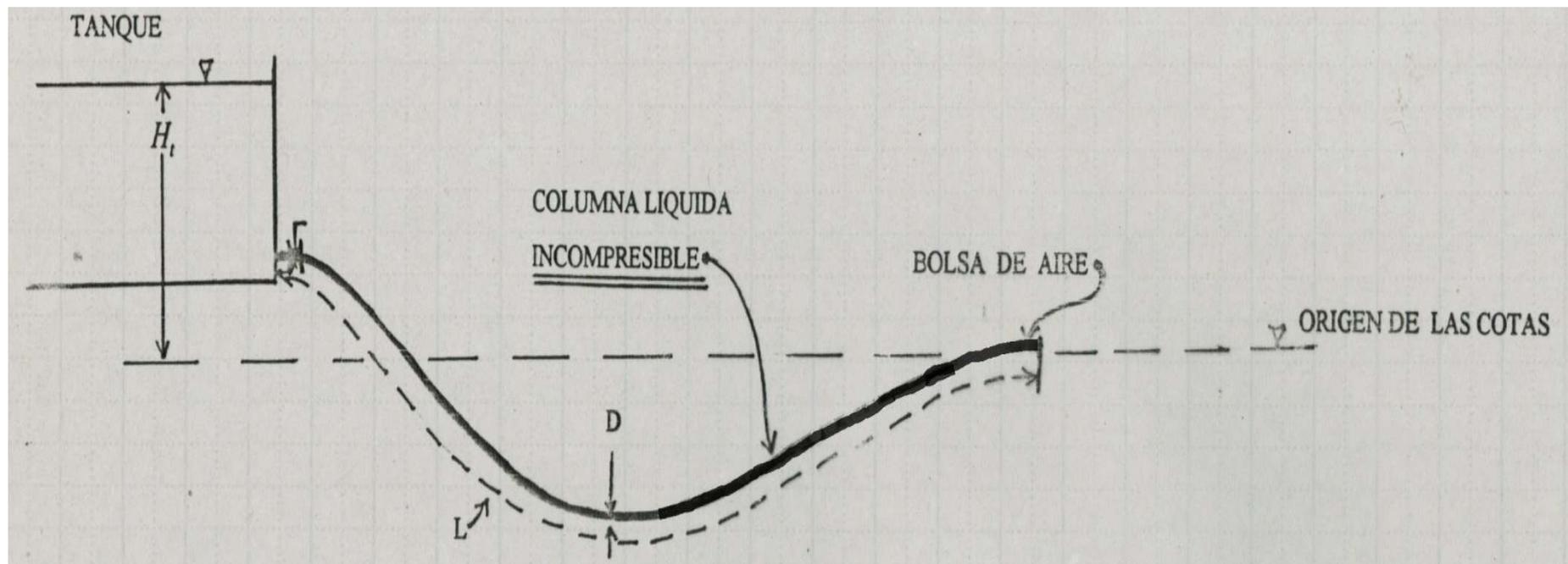


- ⇒ Rápida compresión del aire al acercarse la columna de agua.
- ⇒ Grandes picos de presiones.

# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (MODELO DE MARTIN, 1976)

## Hipótesis:

1. La columna líquida es incompresible.
2. La longitud de la columna líquida no presenta variaciones significativas.
3.  $H_t$  es constante
4. Extremo de la bolsa de aire cerrado.



# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (TEORÍA DE MARTIN, 1976)

## VARIABLES:

$\nabla$ - VOLUMEN OCUPADO POR LA BOLSA DE AIRE ( $m^3$ )

$\nabla_0$ - VOLUMEN INICIAL DE LA BOLSA DE AIRE ( $m^3$ )

$H_g^*$  = CARGA PIEZOMETRICA ABSOLUTA DEL AIRE EN LA BOLSA (m.c.a.)

$H_{g0}^*$  = CARGA PIEZOMETRICA ABSOLUTA INICIAL DE LA BOLSA DE AIRE (m.c.a.)

$H_{gM}^*$  = CARGA PIEZOMETRICA ABSOLUTA MAXIMA DEL AIRE (m.c.a.)

$n$  = COEFICIENTE POLITRÓPICO DE LA EVOLUCIÓN DE LA BOLSA DE AIRE

$f$  = COEFICIENTE DE DARCY-WEISBACH (FRICCIÓN)

$H_t^*$  =  $H_t + 10.33$  m (CARGA PIEZOMETRICA ABSOLUTA EN EL EXTREMO DEL TANQUE (m.c.a.))

$V$  - VELOCIDAD DEL AGUA EN LA TUBERIA (m/s)

$L$  - LONGITUD DE LA TUBERIA (m)

$D$  - DIAMETRO DE LA TUBERIA (m)

$A$  - AREA DE LA TUBERIA ( $m^2$ )

$g$  - ACELERACION DE LA GRAVEDAD ( $m/s^2$ )

$t$  - TIEMPO (s)

# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (TEORÍA DE MARTIN, 1976)

## ECUACIONES BASICAS

\* CONSERVACION DE LA  
CANTIDAD DE MOVIMIENTO

$$g \frac{H_t^* - H_g^*}{L} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| = 0$$

\* CONSERVACION DE LA MASA

$$\frac{d\mathcal{V}}{dt} = -AV$$

\* EVOLUCION POLITROPICA DE  
LA BOLSA DE AIRE

$$\frac{dH_g^*}{dt} = -n \frac{H_g^*}{\mathcal{V}} \frac{d\mathcal{V}}{dt}$$

+ CONDICIONES INICIALES

+ CONDICIONES DE FRONTERA

# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (TEORÍA DE MARTIN, 1976)

## 1- NUMEROS ADIMENSIONALES QUE CONTROLAN EL FENOMENO

$$\pi_1 = \frac{H_t^*}{H_{go}^*} \quad \pi_2 = f \frac{V_o}{D^3} \quad \pi_3 = n$$

## 2- RESULTADO GENERAL

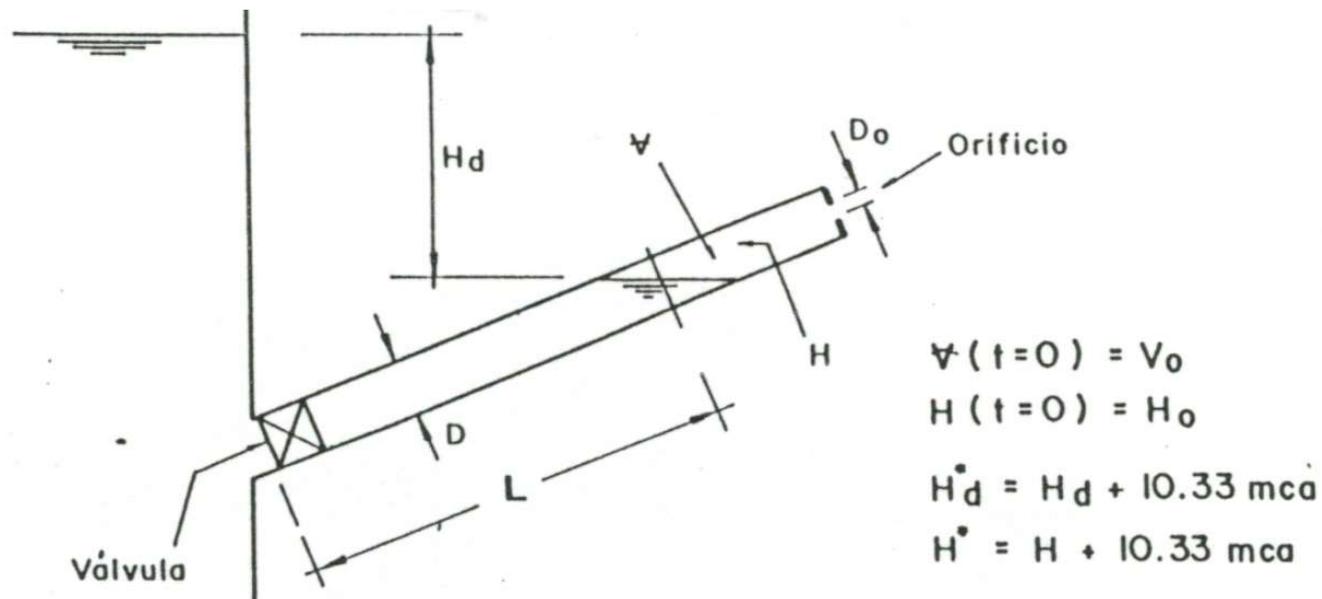
$$\frac{H_{gM}^*}{H_t^*} = F \left( \frac{H_t^*}{H_{go}^*}, \frac{fV_o}{D^3}, n \right)$$

(MARTIN, 1976)



# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (TEORÍA DE MARTIN, 1976)

## Instalación de estudio:



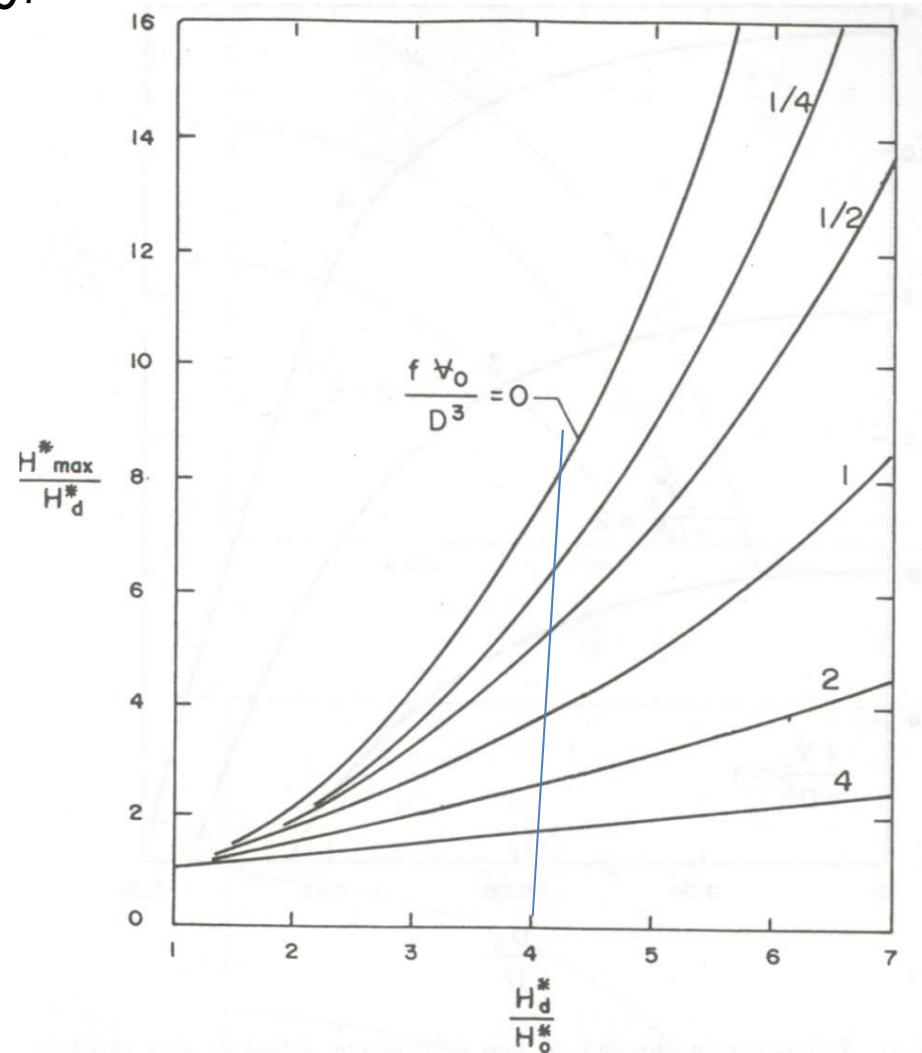
Caso a): extremo cerrado ( $D_o=0$ )

Caso b): orificio en el extremo.

# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (TEORÍA DE MARTIN, 1976)

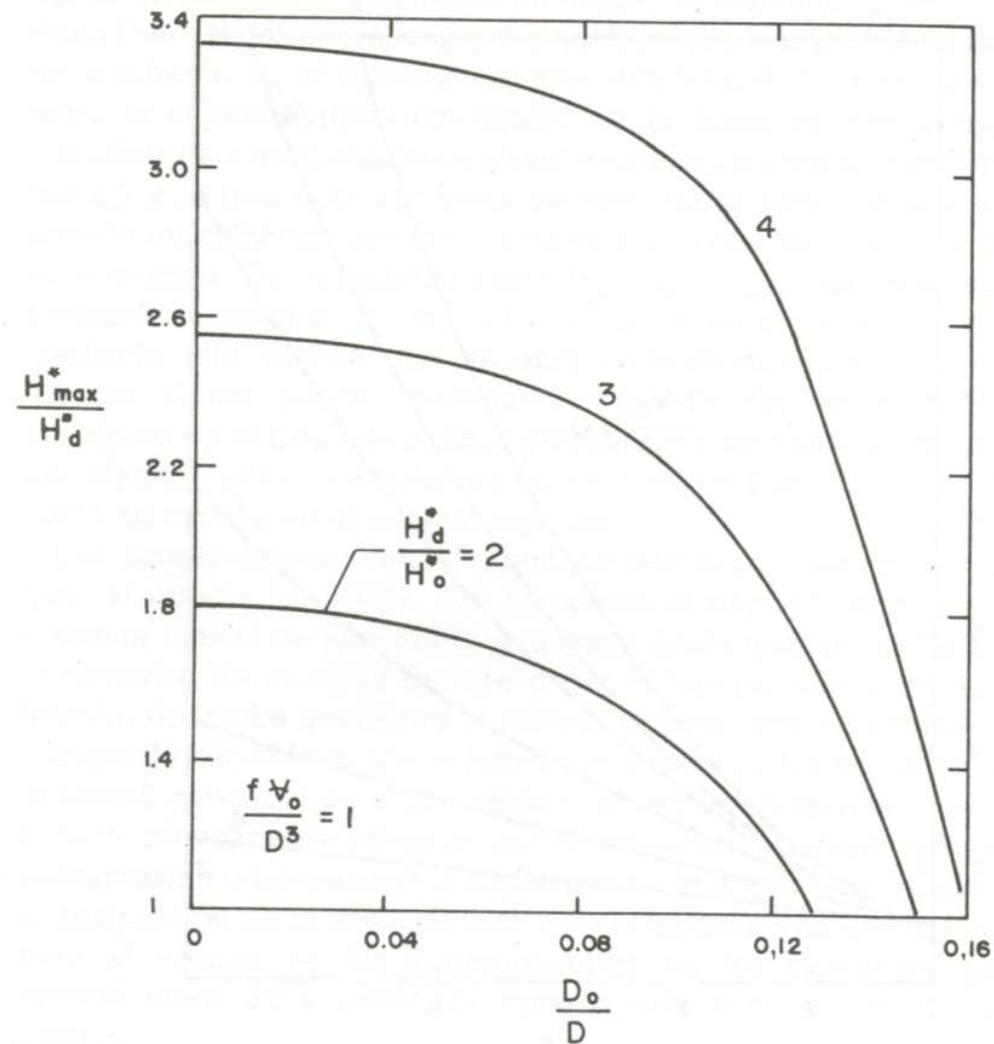
Caso a): extremo cerrado ( $D_0=0$ )

$n=1.2$



# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (TEORÍA DE MARTIN, 1976)

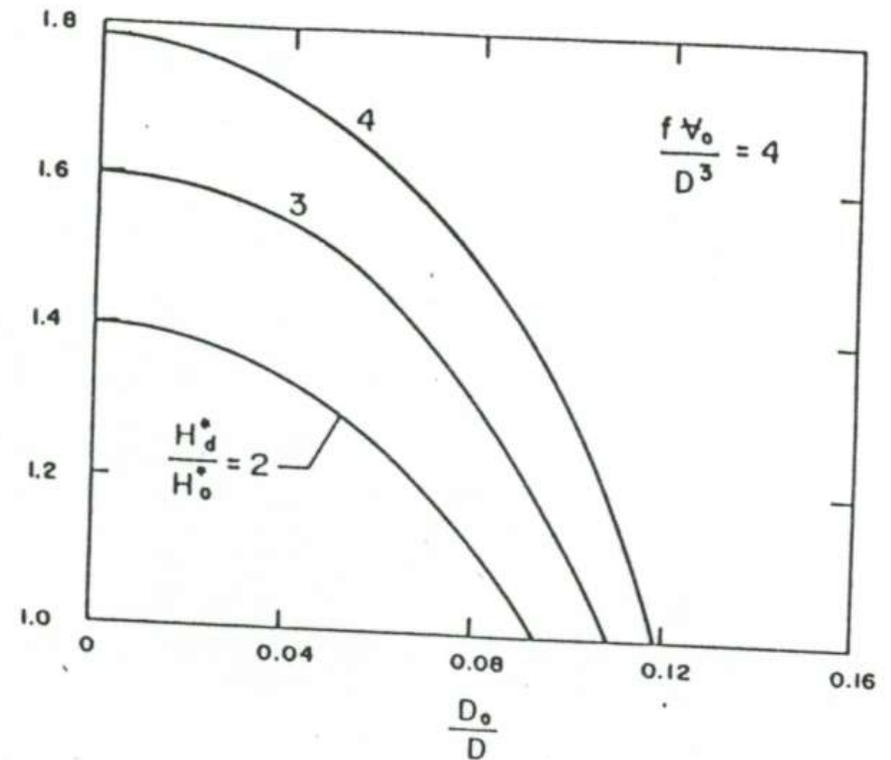
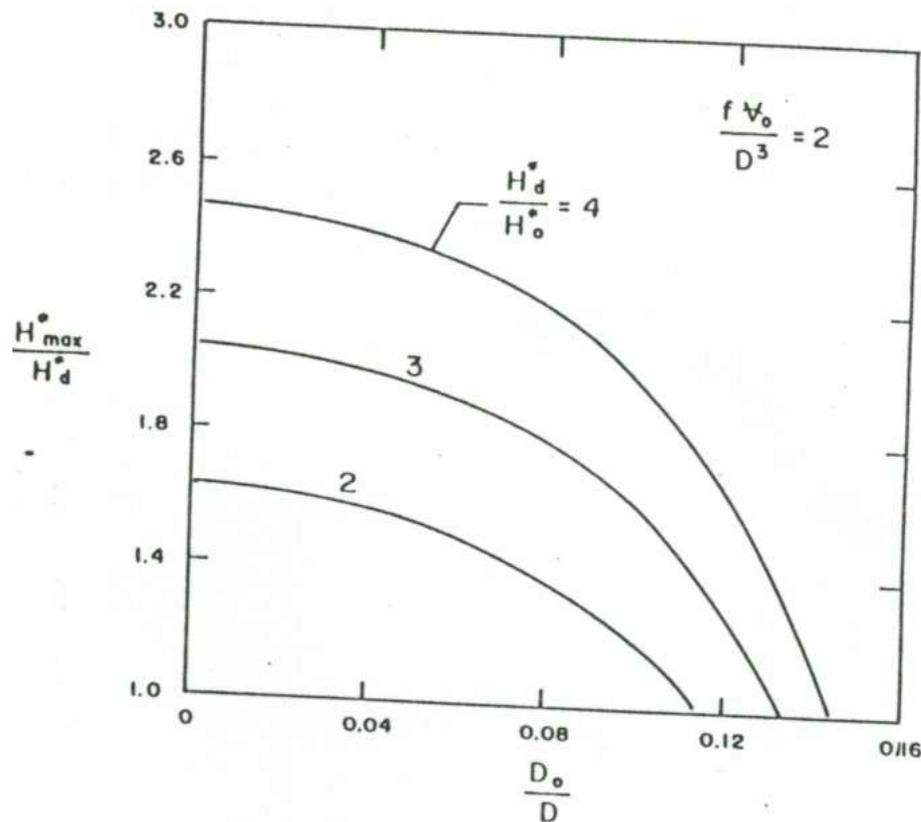
Caso b): extremo abierto  
 $n=1.2$



# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (TEORÍA DE MARTIN, 1976)

Caso b): extremo abierto

$n=1.2$



# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (TEORÍA DE MARTIN, 1976)

- Observaciones sobre el resultado obtenido:

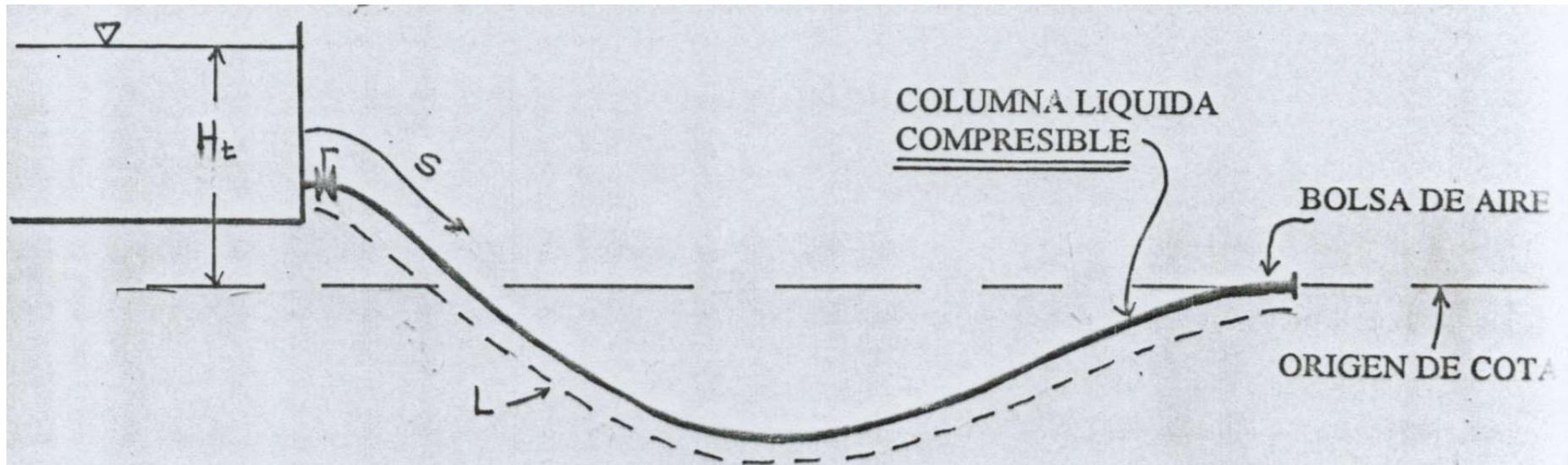
- DADO  $H_t^*/H_{go}^*$  (PRESION ABSOLUTA EN EL EXTREMO DEL TANQUE / PRESION INICIAL DE LA BOLSA DE AIRE), LA MAYOR SOBREPRESION POSIBLE OCURRE PARA  $fV_o/D^3 \rightarrow 0$ .
- ¿PUEDEN ENTONCES MINUSCULOS  $v_o$  (VOLUMEN DE LA BOLSA DE AIRE CAUSAR GRANDES SOBREPRESIONES?

No es lo que se observa en la realidad.

# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (MODELO DE GUARGA, 1996)

## Hipótesis:

- Columna líquida compresible, tubería elástica.
- La longitud de la columna líquida no presenta variaciones significativas.
- Extremo de la bolsa de aire cerrado.
- $H_t$  es constante.



# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (GUARGA, 1996)

**VARIABLES:**

$V$	-	VOLUMEN OCUPADO POR LA BOLSA DE AIRE ( $m^3$ )
$V_0$	-	VOLUMEN INICIAL DE LA BOLSA DE AIRE ( $m^3$ )
$H_g^*$	=	CARGA PIEZOMETRICA ABSOLUTA DEL AIRE EN LA BOLSA (m.c.a)
$H_{g0}^*$	=	CARGA PIEZOMETRICA ABSOLUTA INICIAL DE LA BOLSA DE AIRE (m.c.a)
$H_{gM}^*$	=	CARGA PIEZOMETRICA ABSOLUTA MAXIMA DEL AIRE (m.c.a)
$n$	=	COEFICIENTE POLITRÓPICO DE LA EVOLUCIÓN DE LA BOLSA DE AIRE
$f$	=	COEFICIENTE DE DARCY-WEISBACH (FRICCIÓN)
$H_t^*$	=	$H_t + 10.33 \text{ m}$ (CARGA PIEZOMETRICA ABSOLUTA EN EL EXTREMO DEL TANQUE (m.c.a))
$V$	-	VELOCIDAD DEL AGUA EN LA TUBERÍA ( $m/s$ )
$L$	-	LONGITUD DE LA TUBERÍA (m)
$D$	-	DIAMETRO DE LA TUBERIA (m)
$A$	-	Area de la tubería ( $m^2$ )
$g$	-	ACELERACION DE LA GRAVEDAD ( $m/s^2$ )
$t$	-	TIEMPO (s)
$s$	-	COORDENADA SOBRE EL EJE DE LA TUBERIA (m)
$H^*(s, t)$	-	CARGA PIEZOMETRICA ABSOLUTA EN EL PUNTO $s$ Y EL INSTANTE $t$
$a$	-	VELOCIDAD DE LAS ONDAS ACUSTICAS A LO LARGO DE LA TUBERIA (m/s)

# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (GUARGA, 1996)

ECUACIONES BASICAS

- \* CONSERVACION DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO 
$$g \frac{\partial H^*}{\partial s} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f}{2D} V|V| = 0$$
- \* CONSERVACION DE LA MASA 
$$\frac{\partial H^*}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = 0$$
$$\frac{dV}{dt} = -AV(L,t)$$
- \* EVOLUCION POLITROPICA DE LA BOLSA DE AIRE 
$$\frac{dH_g^*}{dt} = -n \frac{H_g^*}{V} \frac{dV}{dt}$$

+ CONDICIONES INICIALES

+ CONDICIONES DE FRONTERA

# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (GUARGA, 1996)

## \* CONDICIONES INICIALES ( $t = 0$ )

VOLUMEN  $v(0) = v_0$

VELOCIDAD  $v(s, 0) = 0$

CARGAS PIEZOMETRICAS	BOLSA DE AIRE	$H_g^*(0) = H_{g0}^*$
	TUBERIA	$H^*(s, 0) = H_{g0}^*$
	TANQUE	$H^*(0, 0) = H_i^*$

## \* CONDICIONES DE FRONTERA

$H^*(0, t) = H_i^*$  EXTREMO DEL TANQUE ( $t > 0$ )

$H^*(L, t) = H_g^*$  EXTREMO DE LA BOLSA DE AIRE ( $t > 0$ )

# AIRE ATRAPADO – SOBREPRESIÓN POR COMPRESIÓN DINÁMICA (GUARGA, 1996)

## 1- NUMEROS ADIMENSIONALES QUE CONTROLAN AL FENOMENO

$$\pi_1 = \frac{H_t^*}{H_{g0}^*} \quad \pi_2 = f \frac{V_o}{D_3} \quad \pi_3 = n \quad \pi_4 = \frac{a^2 V_o}{Lg \Delta H^* D^2}$$

SIENDO  $\Delta H^* = H_t^* - H_{g0}^*$

## 2- RESULTADO GENERAL

$$\frac{H_{gM}^*}{H_t^*} = G \left( \frac{H_t^*}{H_{g0}^*}, \frac{V_o}{D^3}, n, \delta \right)$$

SIENDO  $\delta = \frac{a^2 V_o}{Lg \Delta H^* D^2}$

# COMPARACIÓN DE AMBOS MODELOS

## SOBREPRESIONES MAXIMAS

$$\frac{H_{gM}^*}{H_t^*} = F\left(\frac{H_t^*}{H_{go}^*}, \frac{fN_o}{D^3}, n\right) \quad (\text{MARTIN, 1976})$$

$$\frac{H_{gM}^*}{H_t^*} = G\left(\frac{H_t^*}{H_{go}^*}, \frac{fN_o}{D^3}, n, \delta\right) \quad (\text{GUARGA ET AL, 1996})$$

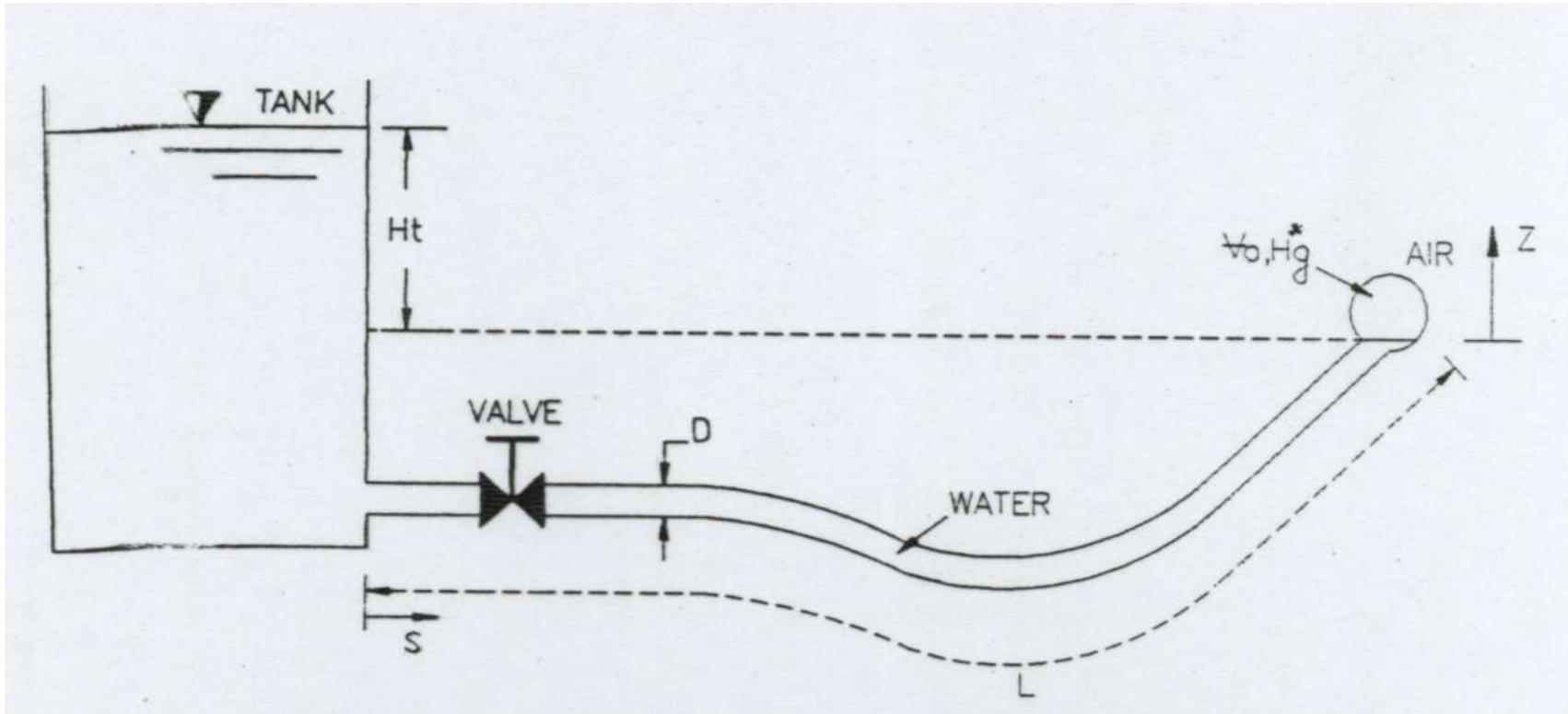
NOTESE QUE PARA  $n \rightarrow +\infty$  (COLUMNA LIQUIDA INCOMPRESIBLE)  $\delta \rightarrow +\infty$

EN CONSECUENCIA, DEBE RESULTAR QUE

$$G\left(\frac{H_t^*}{H_{go}^*}, \frac{fN_o}{D^3}, n, \delta\right) \rightarrow F\left(\frac{H_t^*}{H_{go}^*}, \frac{fN_o}{D^3}, n\right)$$

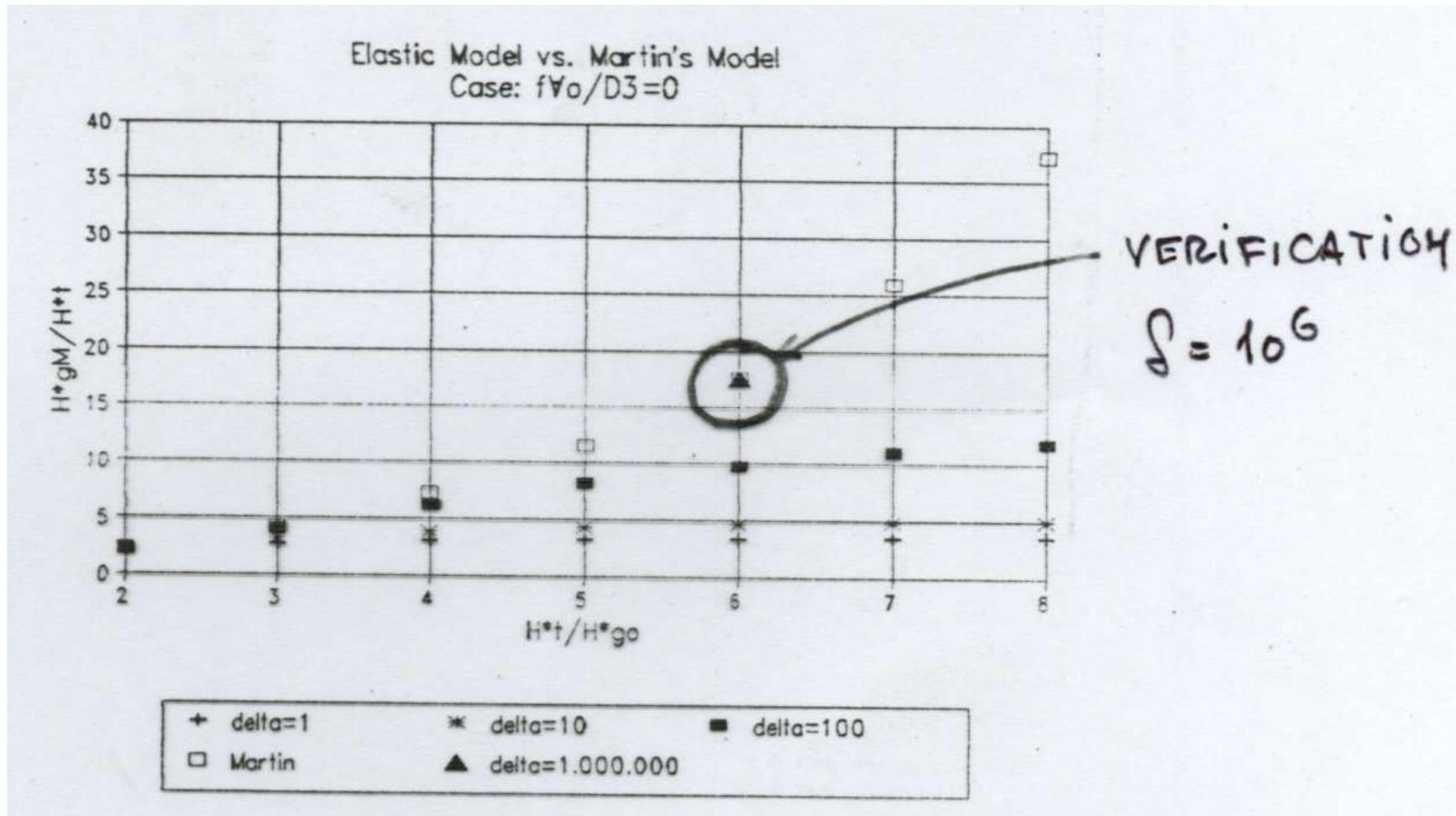
PARA  $\delta \rightarrow +\infty$

# COMPARACIÓN DE AMBOS MODELOS



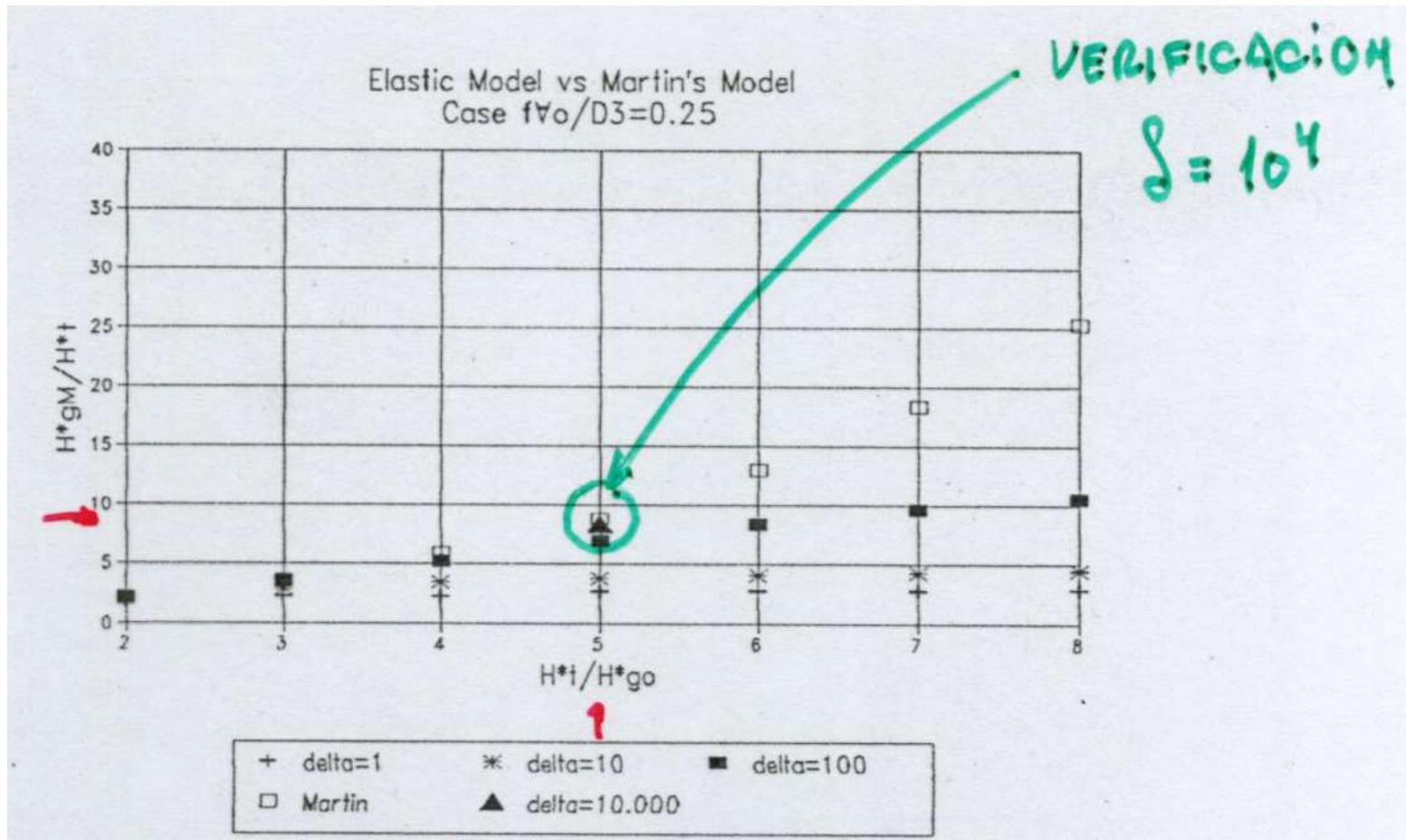
# COMPARACIÓN DE AMBOS MODELOS

n=1.2



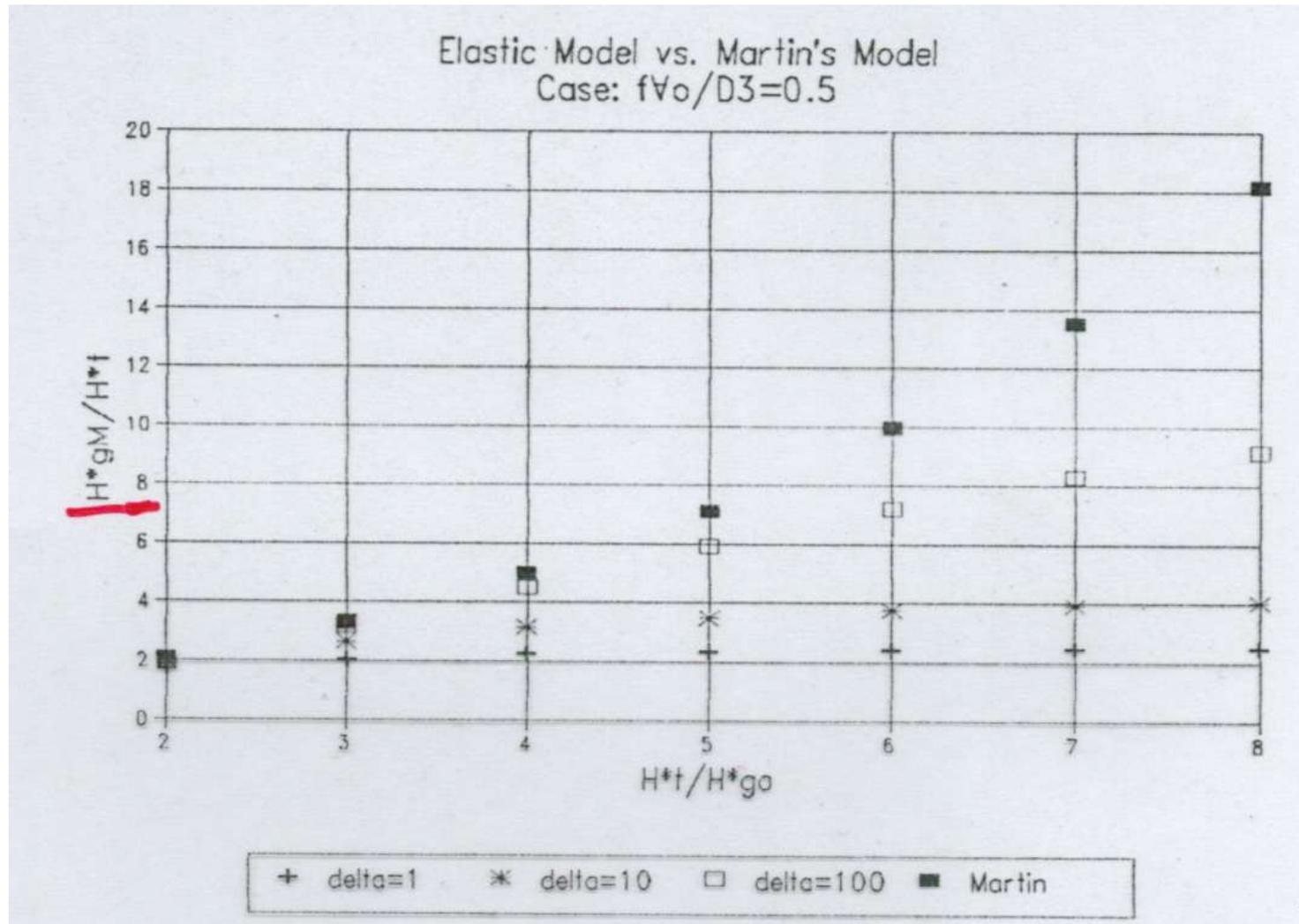
# COMPARACIÓN DE AMBOS MODELOS

n=1.2



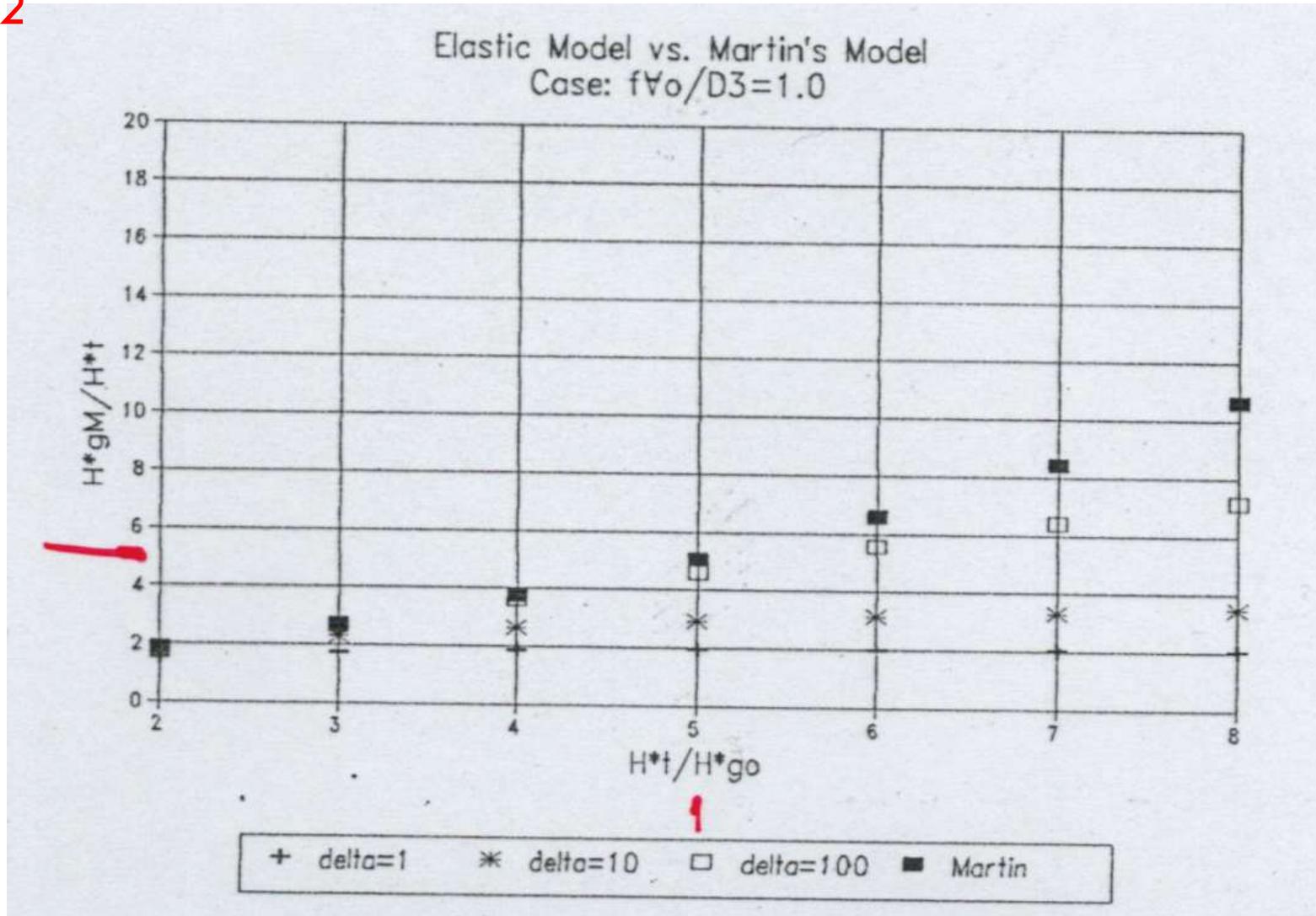
# COMPARACIÓN DE AMBOS MODELOS

$n=1.2$

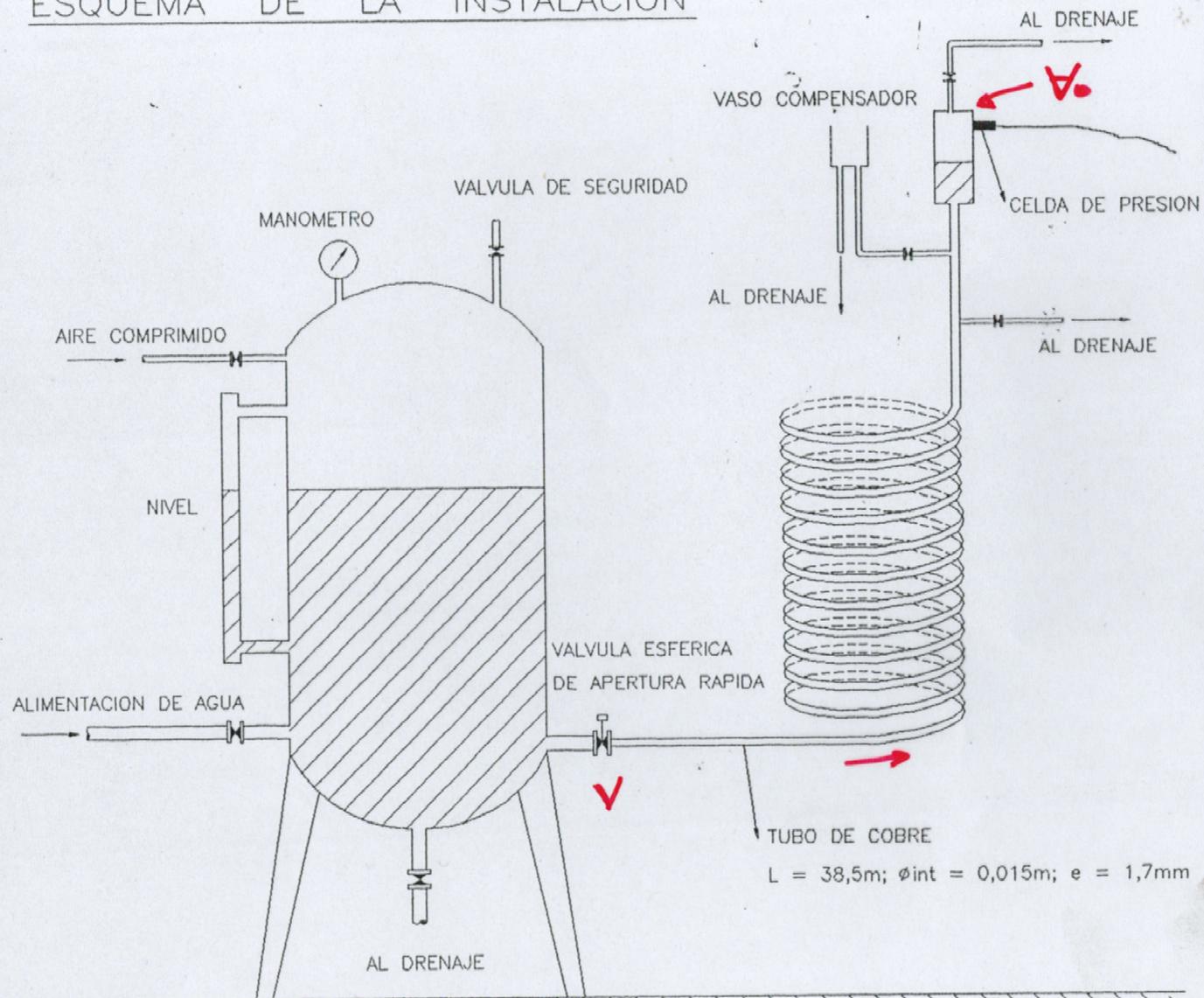


# COMPARACIÓN DE AMBOS MODELOS

n=1.2



# ESQUEMA DE LA INSTALACION



TUBO DE COBRE  
 $L = 38,5m$ ;  $\phi_{int} = 0,015m$ ;  $e = 1,7mm$

## ❑ Conclusión:

- Considerar el modelo de ondas da lugar a una reducción, que puede ser considerable, en los valores de las sobrepresiones máximas estimadas por compresión dinámica del aire.