

Transitorios Hidráulicos en Tuberías a Presión

Curso posgrado y educación permanente
2023

Docentes: Dr. Ing. Rodolfo Pienika rpienika@fing.edu.uy
MSc. Ing. Laura Rovira 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.

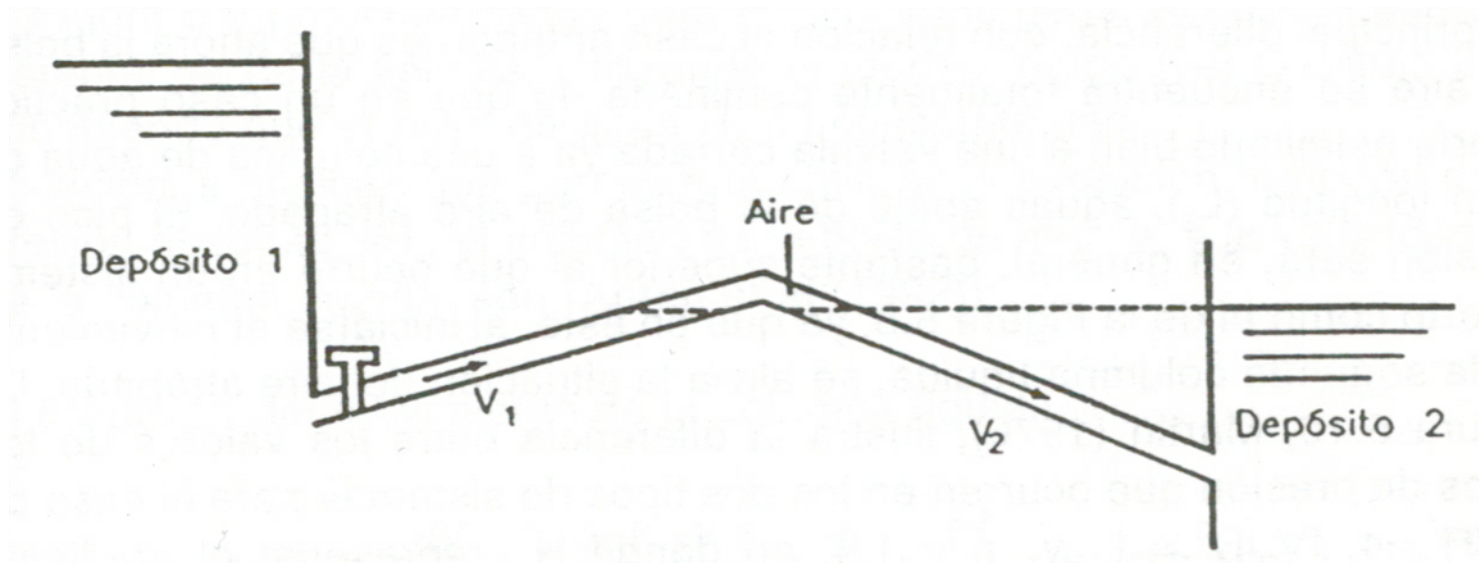
AIRE ATRAPADO



- ❑ 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.

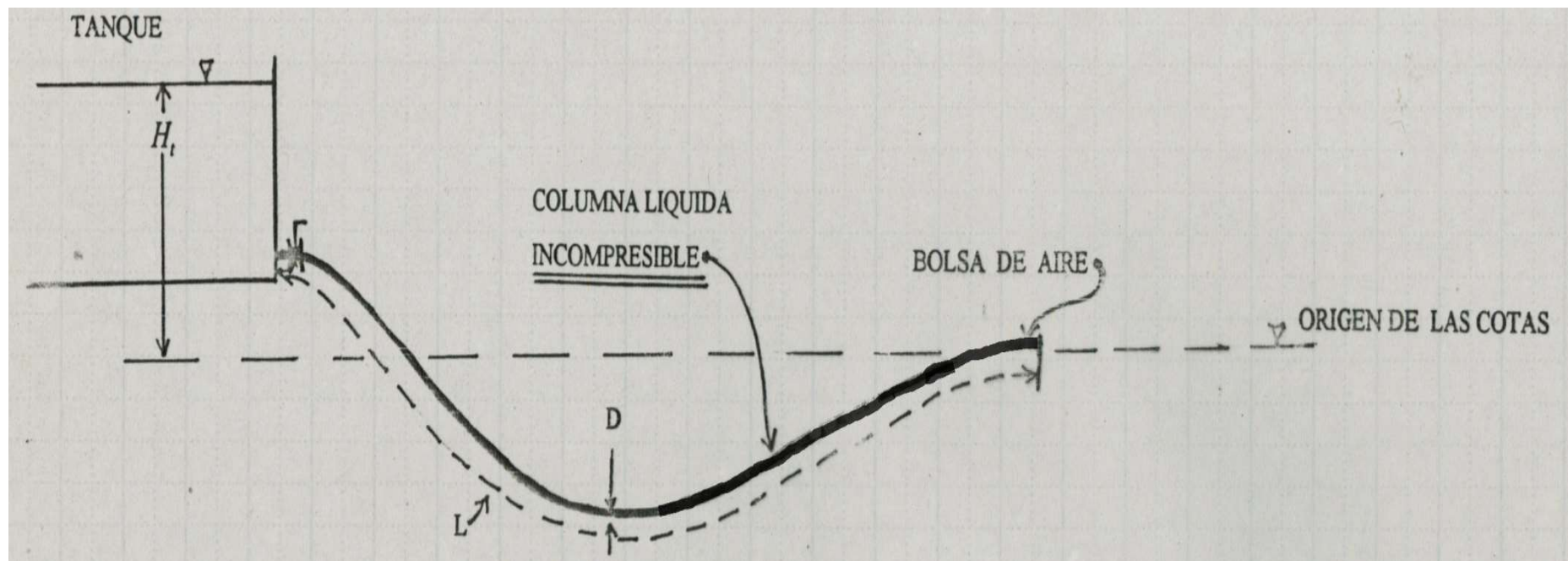


- ⇒ Rápida compresión del aire al acercarse la columna de agua.
- ⇒ Grandes picos de presiones.

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:

∇ - VOLUMEN OCUPADO POR LA BOLSA DE AIRE (m^3)

∇_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

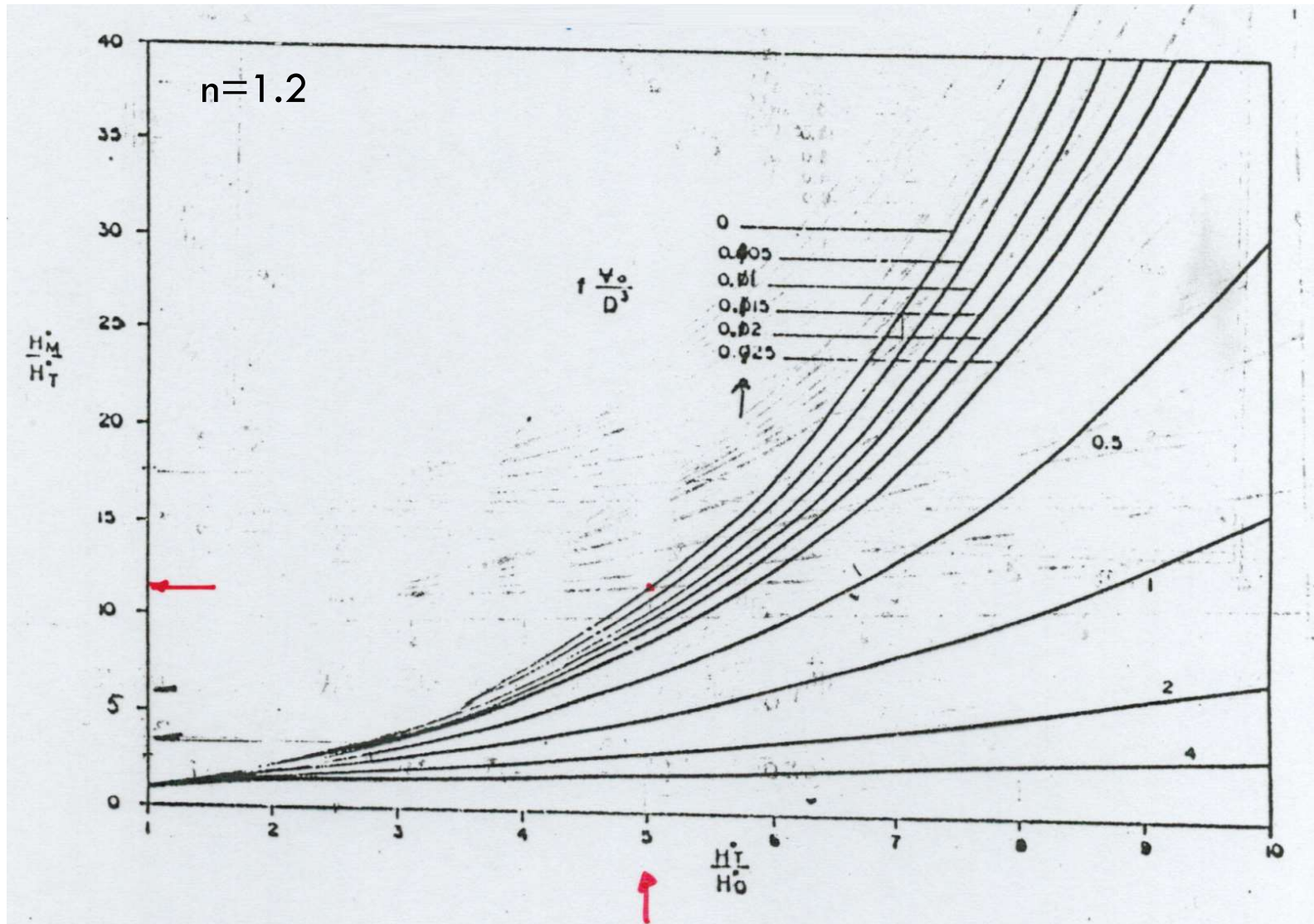
$$\pi_1 = \frac{H_t^*}{H_{go}^*} \quad \pi_2 = f \frac{V_o}{D^3} \quad \pi_3 = n$$

2- RESULTADO GENERAL

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

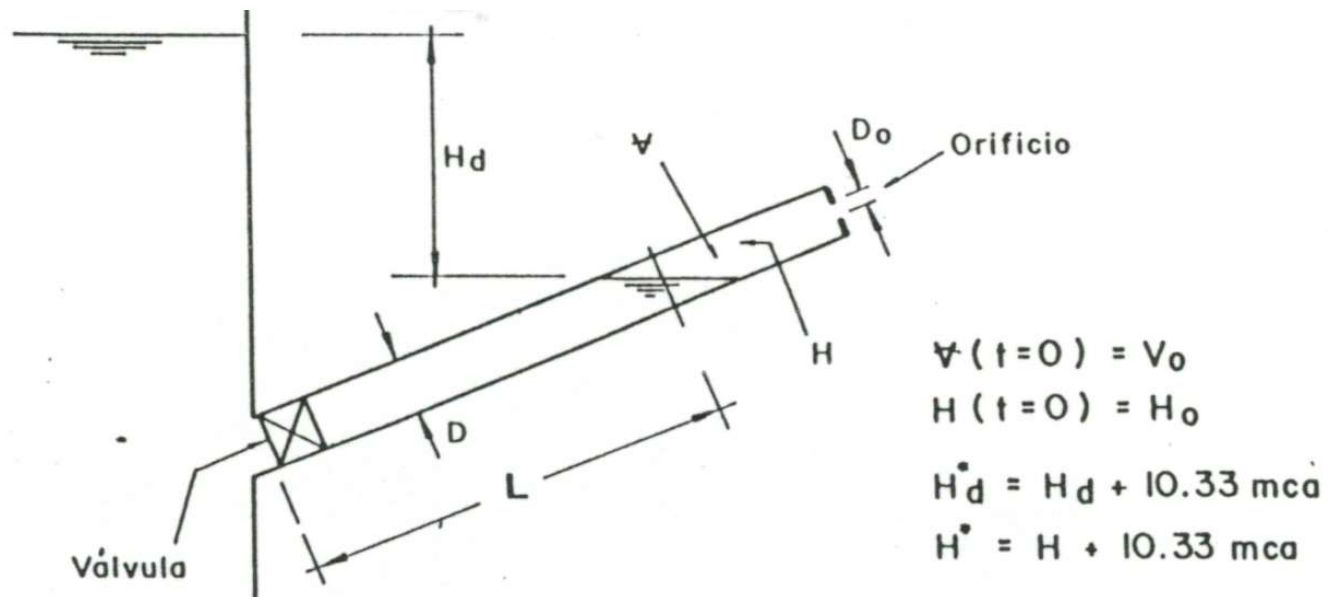
(MARTIN, 1976)

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



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

Instalación de estudio:



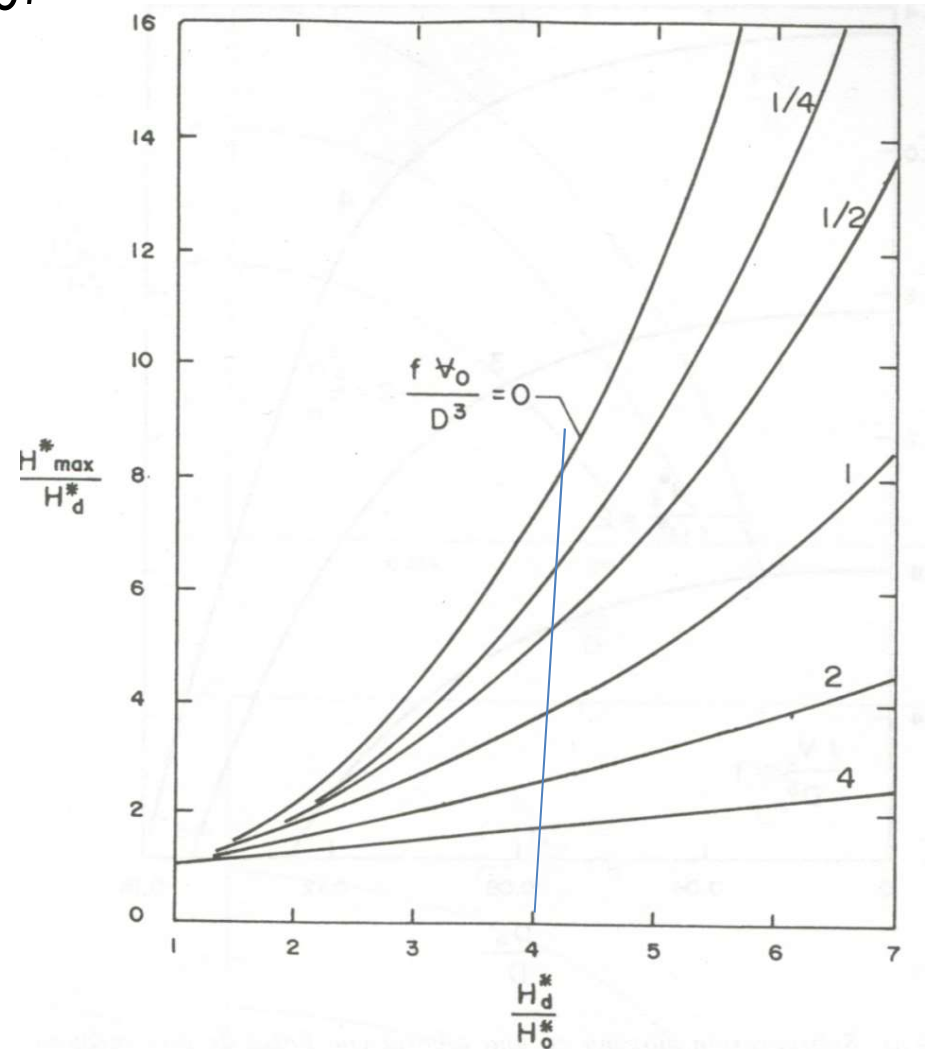
Caso a): extremo cerrado ($D_o=0$)

Caso b): orificio en el extremo.

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

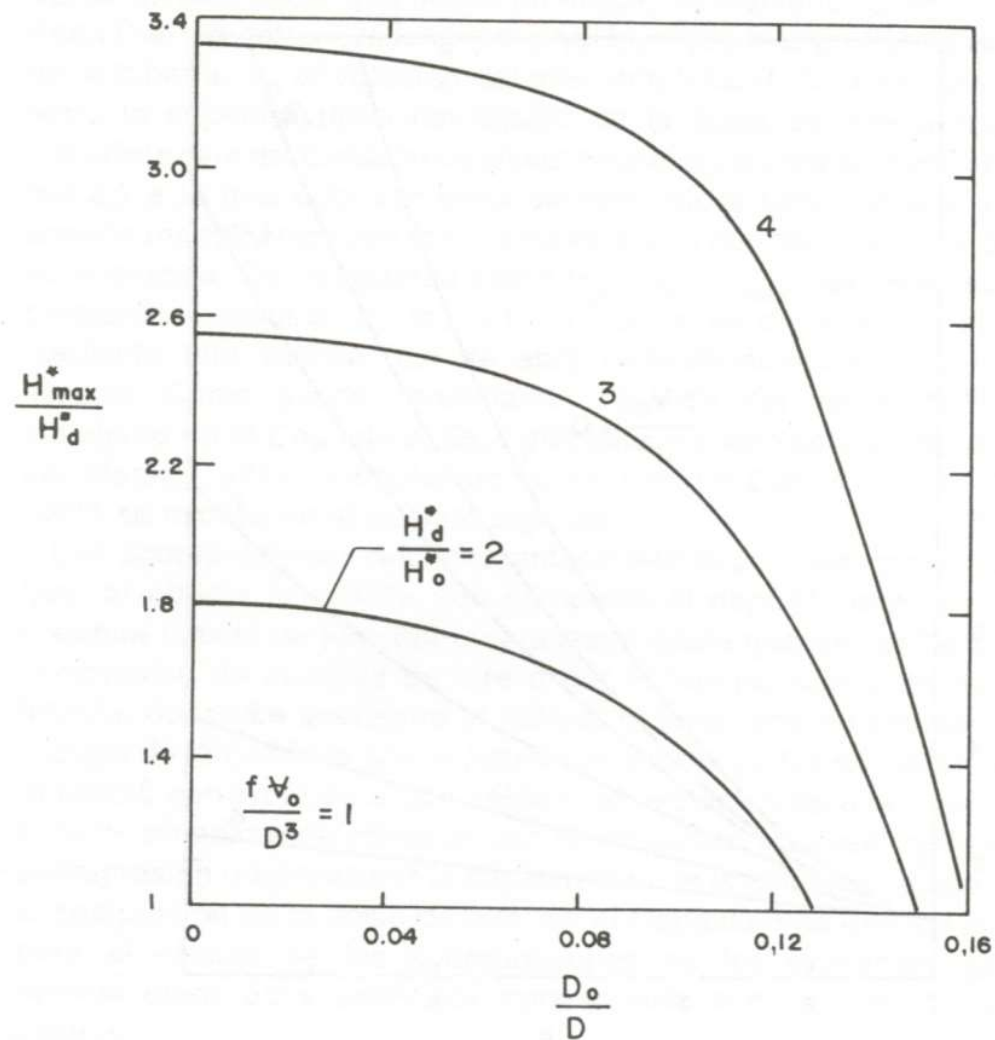
Caso a): extremo cerrado ($D_0=0$)

$n=1.2$



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

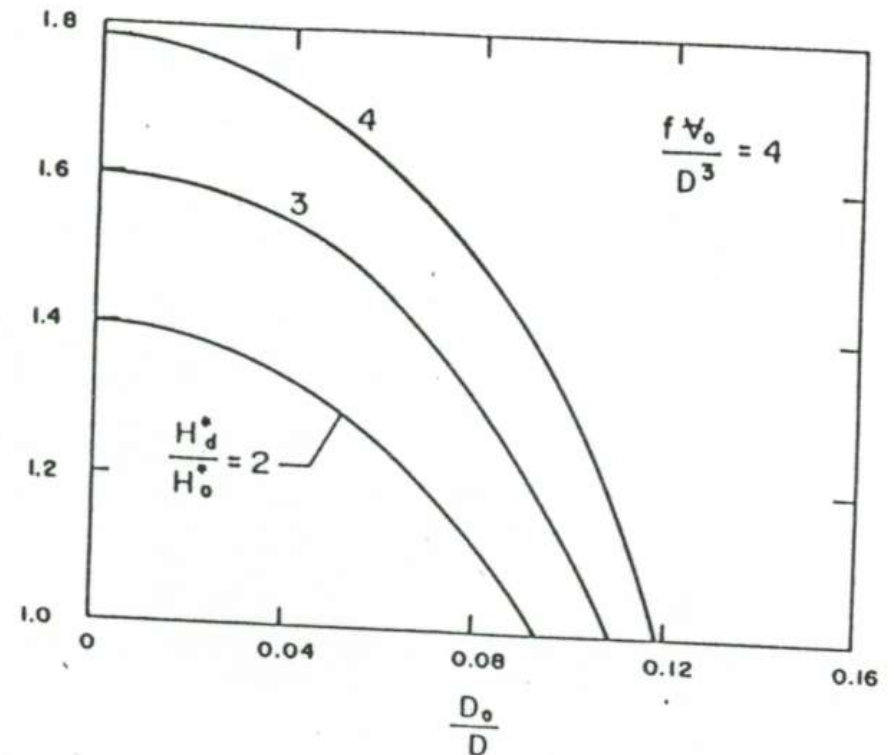
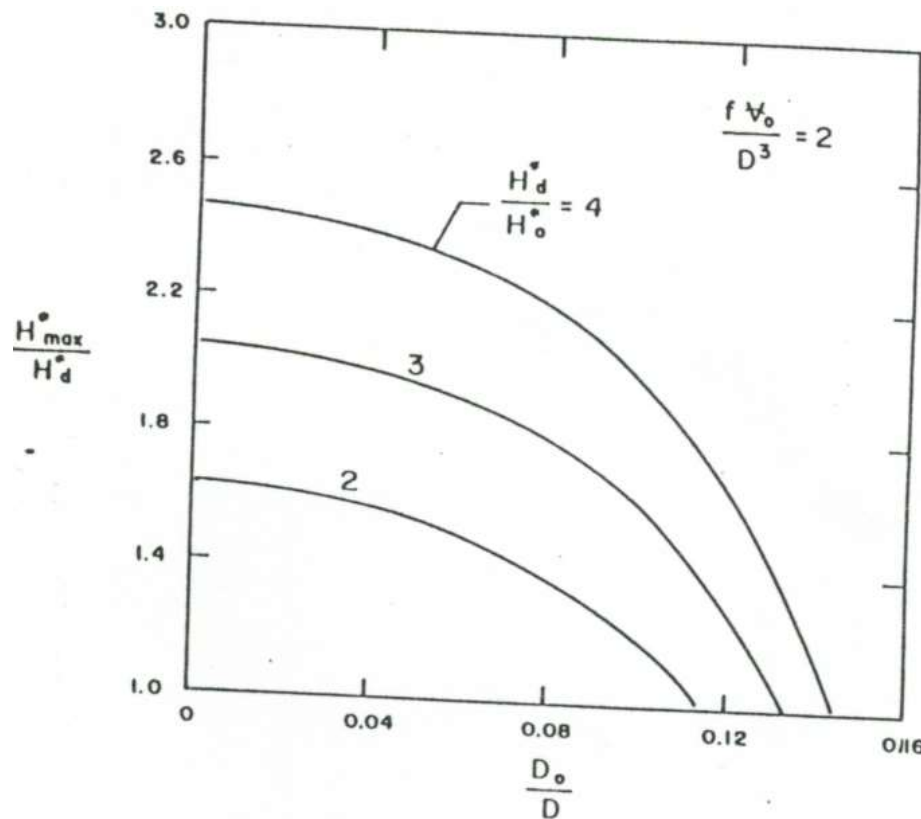
Caso b): extremo abierto
 $n=1.2$



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:

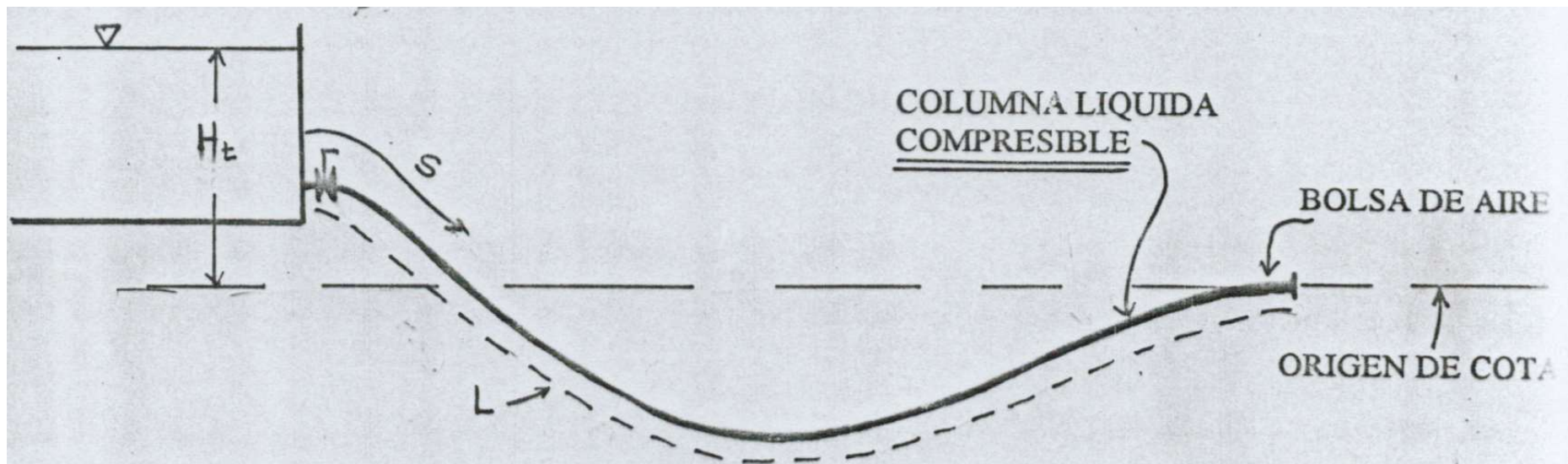
- DADO H_t^*/H_{go}^* (PRESION ABSOLUTA EN EL EXTREMO DEL TANQUE / PRESION INICIAL DE LA BOLSA DE AIRE), LA MAYOR SOBREPRESION POSIBLE OCURRE PARA $fV_o/D^3 \rightarrow 0$.
- ¿PUEDEN ENTONCES MINUSCULOS v_o (VOLUMEN DE LA BOLSA DE AIRE CAUSAR GRANDES SOBREPRESIONES?

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

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

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

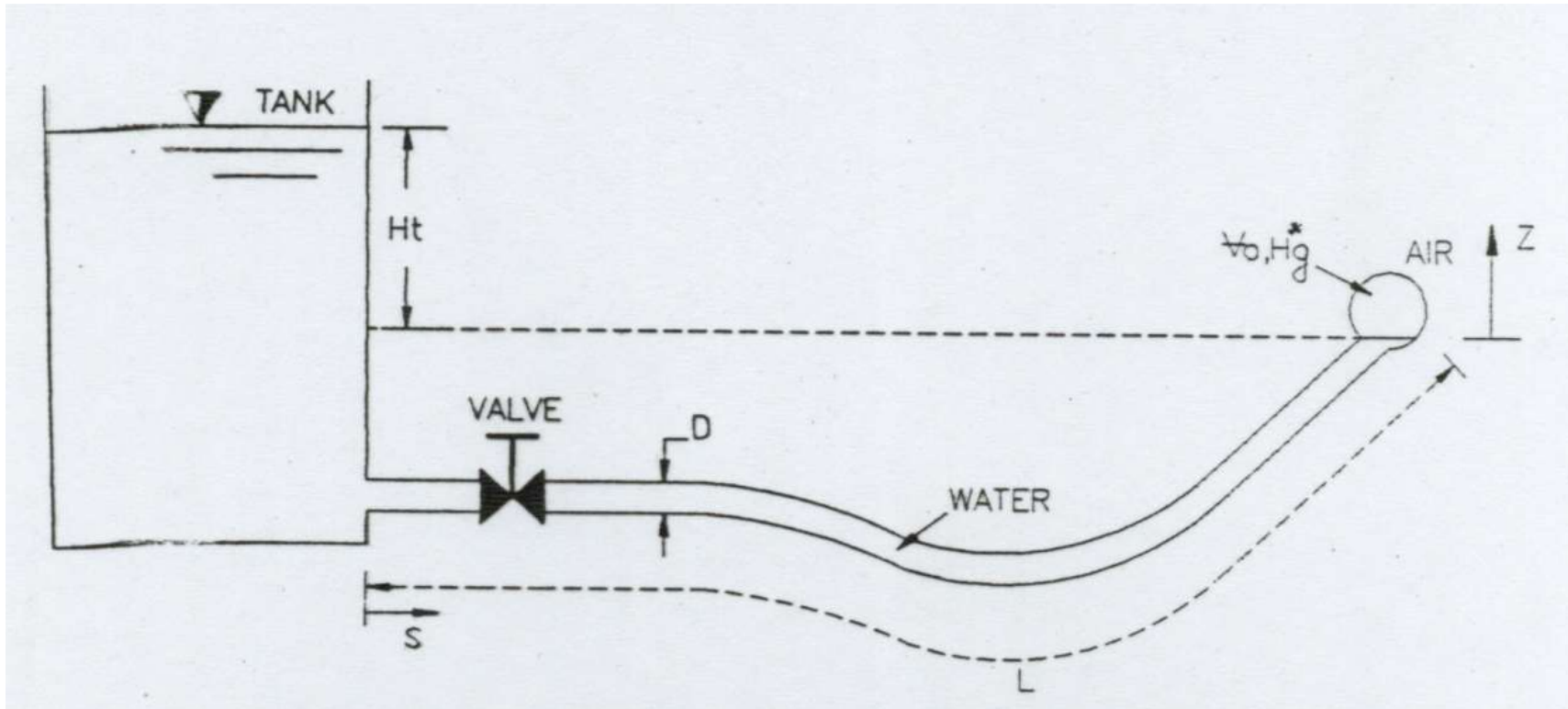
NOTESE QUE PARA $n \rightarrow +\infty$ (COLUMNA LIQUIDA INCOMPRESIBLE) $\delta \rightarrow +\infty$

EN CONSECUENCIA, DEBE RESULTAR QUE

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

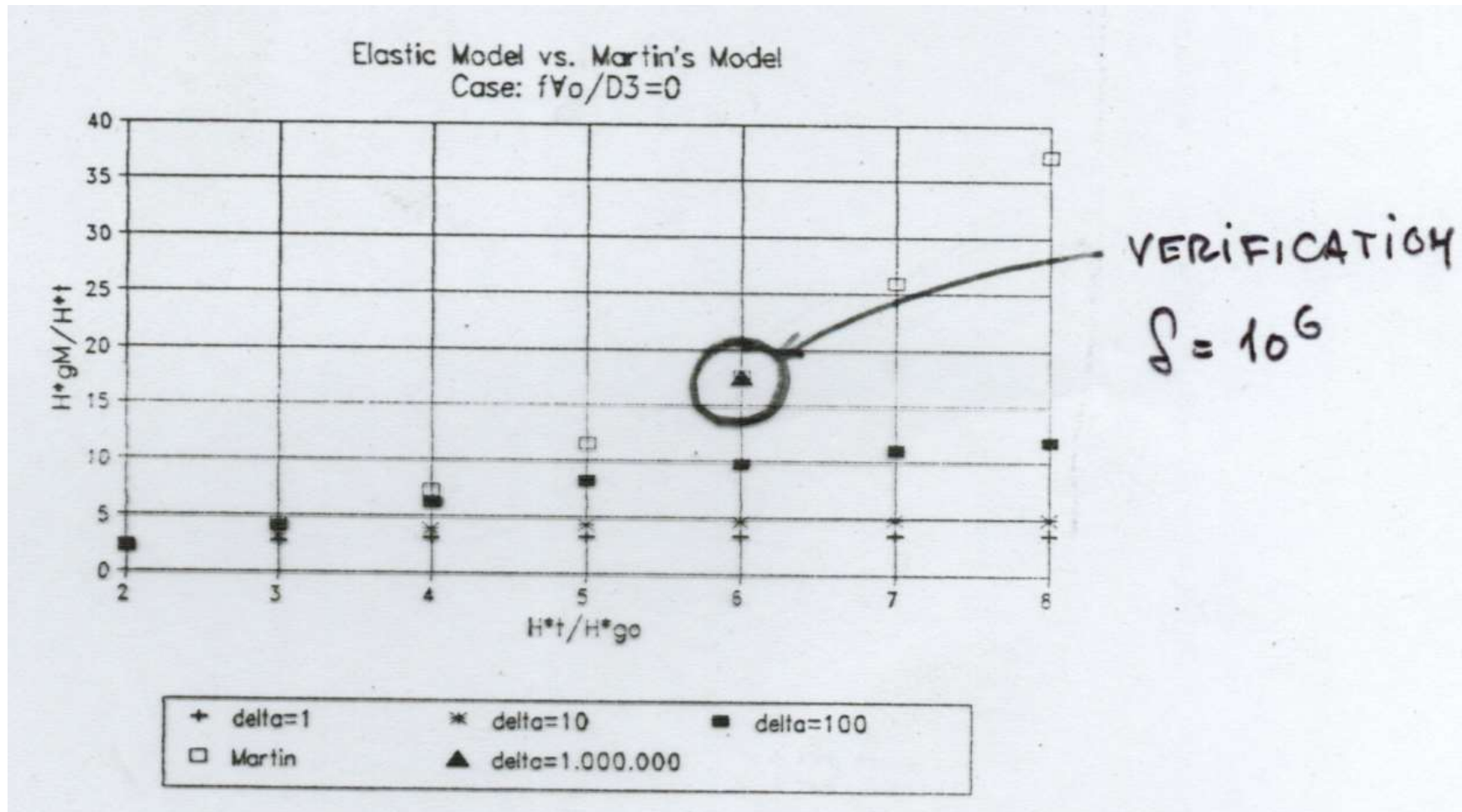
PARA $\delta \rightarrow +\infty$

COMPARACIÓN DE AMBOS MODELOS



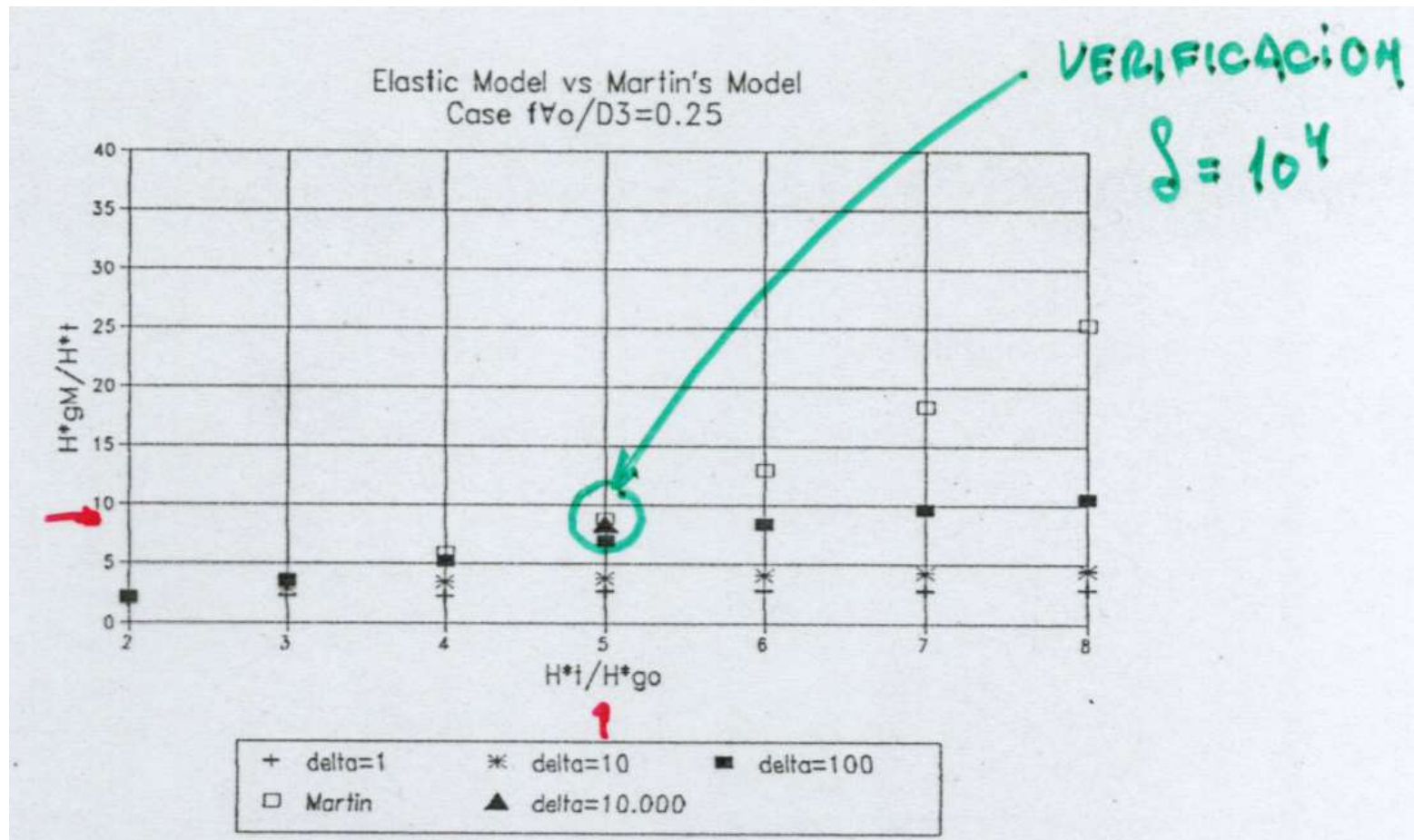
COMPARACIÓN DE AMBOS MODELOS

n=1.2



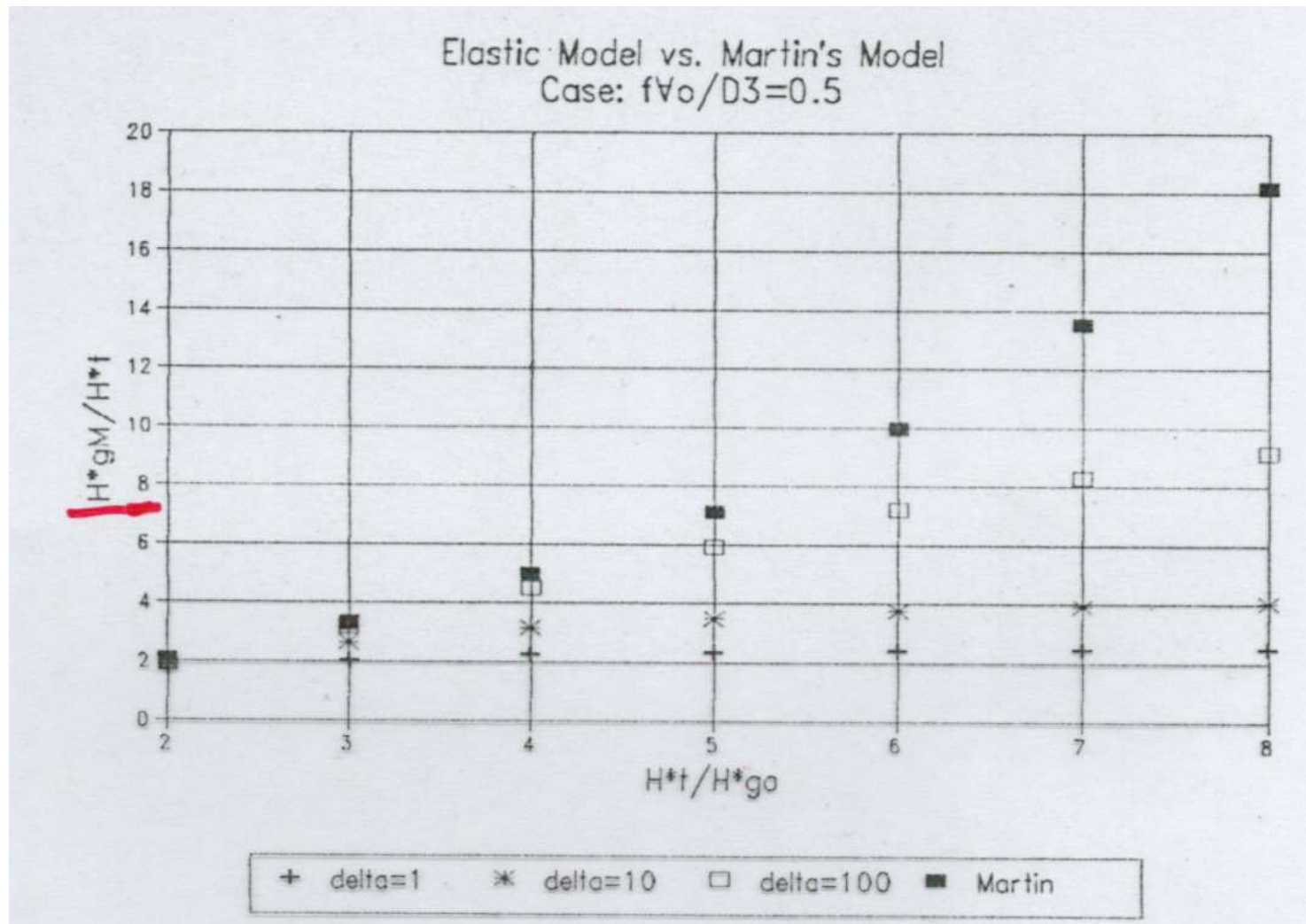
COMPARACIÓN DE AMBOS MODELOS

$n=1.2$



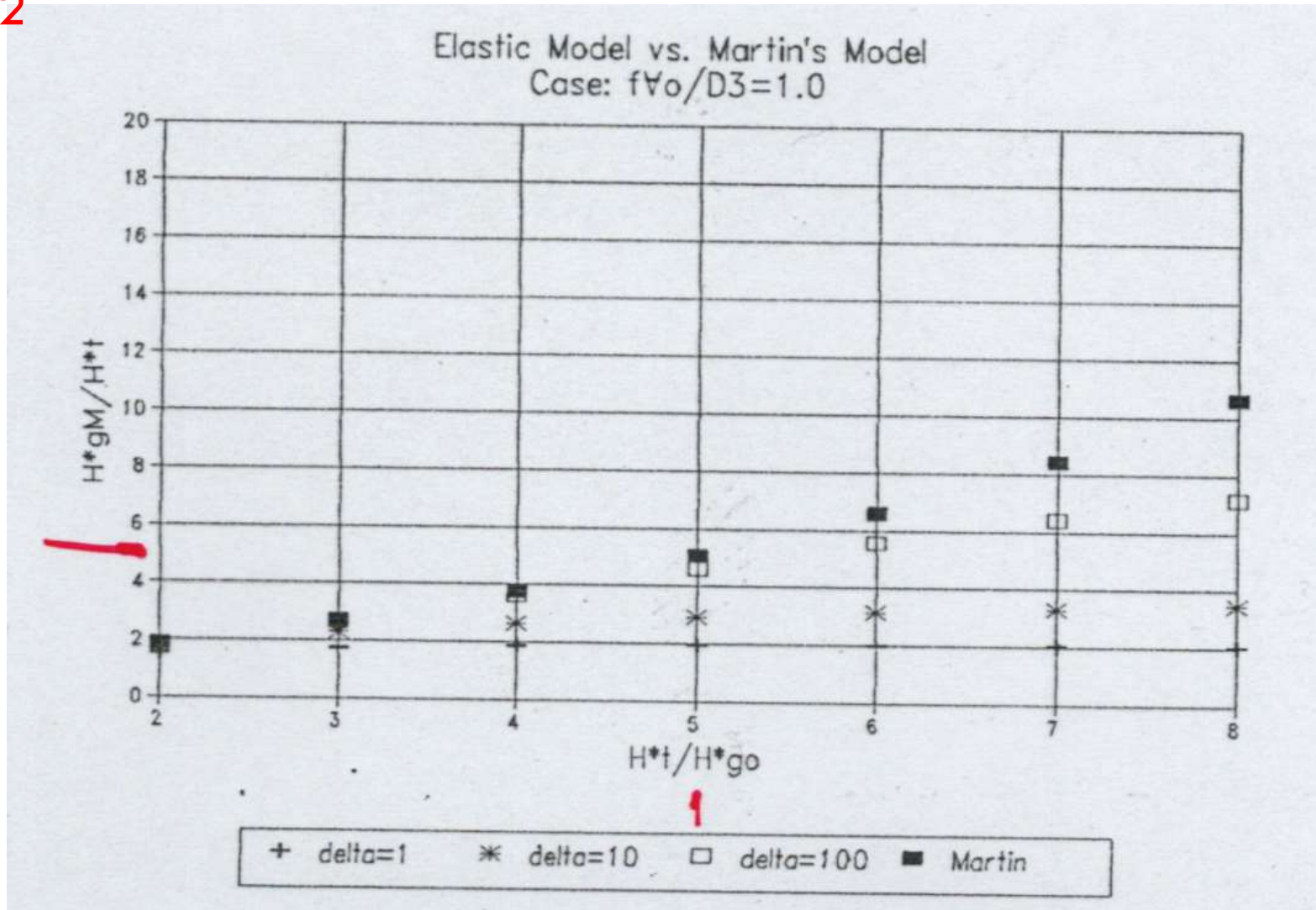
COMPARACIÓN DE AMBOS MODELOS

$n=1.2$

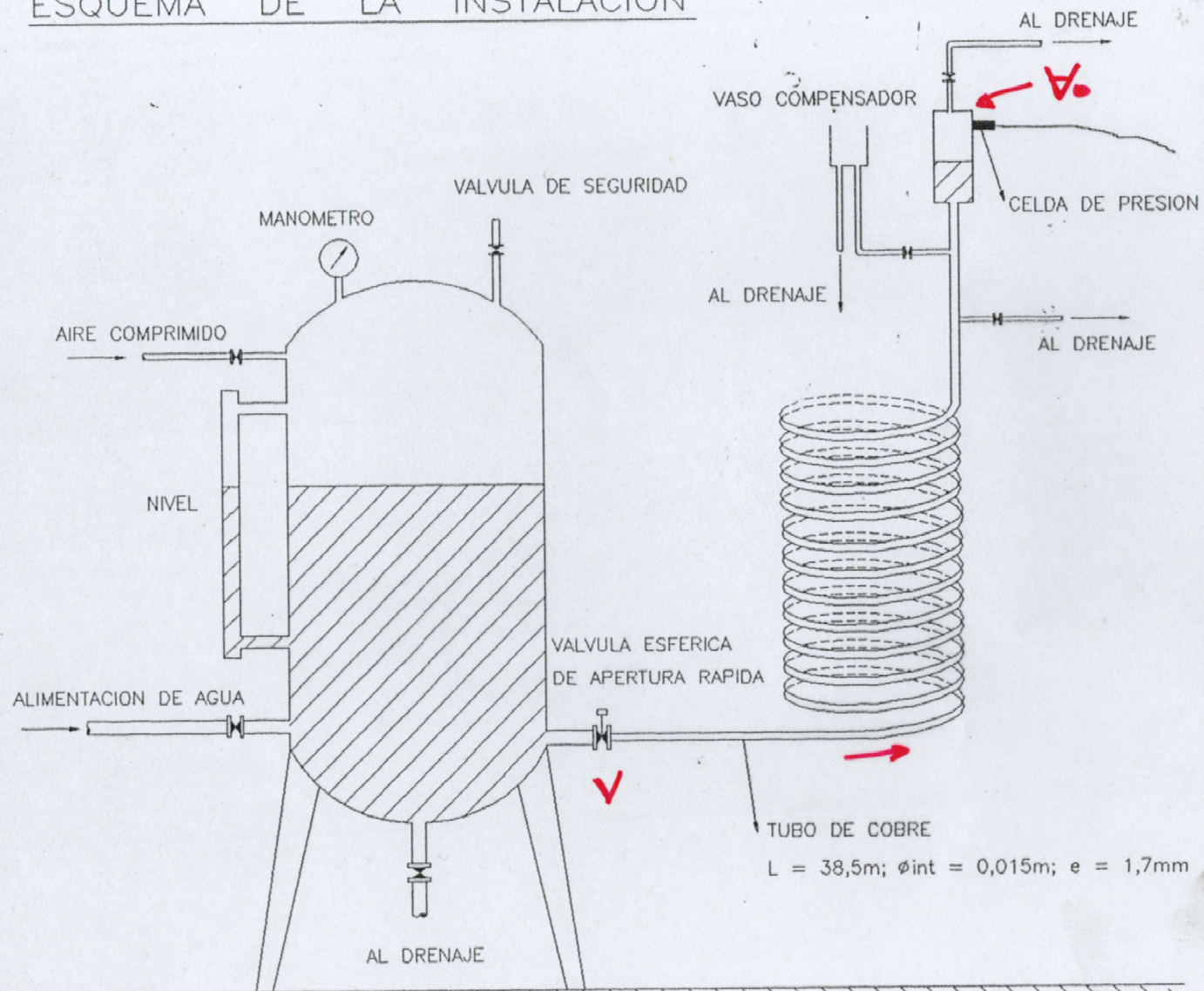


COMPARACIÓN DE AMBOS MODELOS

$n=1.2$



ESQUEMA DE LA INSTALACION



❑ 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.