



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

ANÁLISIS DE LAS TENSIONES GENERADAS EN INSTALACIONES HIDRÁULICAS POR GOLPE DE ARIETE.

Provenzano, Pablo Gabriel *¹

*¹ Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas –
Universidad Nacional de La Matanza.
Florencio Varela 1903 – San Justo- Pcia. de Buenos Aires – Argentina.
pprovenzano@ing.unlam.edu .ar

RESUMEN

El golpe de ariete es un fenómeno fluidodinámico caracterizado por bruscas oscilaciones de la presión del fluido. Es causado mayoritariamente por apertura y cierre de válvulas y arranque y parada de sistemas de impulsión de fluido. El interés en su estudio radica en las consecuencias negativas que produce en instalaciones fluidodinámicas, que van desde ruidos y vibraciones hasta deformación de cañerías, pérdida de rendimiento, ruptura y colapso del sistema.

Los picos de sobrepresión generan tensiones en cañerías, básicamente radiales y axiales, causantes de los efectos negativos arriba citados. La producción bibliográfica, sin embargo, muestra que el análisis de tensiones en la estructura confinante ha sido objeto de menor interés y que la investigación se ha focalizado masivamente en el estudio de las oscilaciones de presión y caudal en el fluido durante el transitorio.

Se desarrolló un algoritmo analítico para la resolución del modelo de golpe de ariete mediante aplicación de la *Transformada de Laplace* y resolución por integración en el *Campo Complejo*, empleando los postulados del *Teorema de Cauchy* y operación en términos de *Series de Laurent*, para obtener la solución que permite describir la presión oscilatoria.

Se introdujeron los fundamentos teóricos del análisis de *esfuerzos radiales en anillos circulares delgados*, que postulan que la tensión radial depende de la presión, del diámetro del conducto y del espesor de pared, encontrando que, aplicados al algoritmo desarrollado, proporcionan una herramienta adecuada para la estimación de las tensiones radiales generadas sobre la cañería.

Este análisis, practicado en tres sistemas hidráulicos simples de diferente material, permitió calcular las tensiones producidas por cierre de válvula y predecir si superaban el *límite elástico de Hooke* para ese material de la conducción en las condiciones operativas de cada experiencia, logrando determinar la posibilidad de riesgo de deformación en cada caso.

Palabras Claves: TENSIÓN – RADIAL – SOBREPRESIÓN – DEFORMACIÓN



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de golpe de ariete se conoce desde hace tiempo. Se caracteriza por oscilaciones de presión, que se van atenuando progresivamente en un tiempo relativamente pequeño y someten al material de la estructura a un tren de sollicitaciones rápido. Su descripción ha sido motivo investigación y de formulación de modelos que describen con mayor o menor aproximación las oscilaciones de presión y velocidad del fluido. Los primeros modelos, formulados desde las primeras décadas del siglo XX, no incluían el efecto de atenuación progresivo de la amplitud de la onda transiente y, en general, se obtenían resultados por exceso en el valor de los picos de presión [1]. Hacia mediados de ese siglo, el advenimiento del computador permitió la realización de cálculos iterativos en tiempos razonablemente menores, posibilitando la aplicación de diversos *Métodos Numéricos* en la resolución del modelo, que permitió la inclusión de efectos disipativos (causantes de la atenuación progresiva del transiente hasta su extinción) en su descripción, determinando que los esfuerzos en investigación se orientaran masivamente durante los últimos cuarenta años a este aspecto

[1-5]. Otro aspecto determinante, como la respuesta de la estructura confinante al tren de presiones, han sido menos abordado, mostrando un volumen de producción bibliográfica sensiblemente menor. Estas presiones generan tensiones en la conducción de carácter radial y axial básicamente. Se deriva, de esto, la vinculación entre el fenómeno analizado y los efectos producidos por las tensiones en sistemas de conducción de fluidos. Por otra parte, la magnitud de los esfuerzos desarrollados depende fuertemente del *Módulo de Elasticidad*, es decir, del material de la estructura confinante, por lo tanto es fundamental abordar el análisis del transitorio (y de los efectos colaterales que produce) desde la estructura en conjunto con el fluido y sus características [6].

Estas tensiones ocasionan una pérdida paulatina de capacidad estructural y disminución de la eficiencia en servicio del sistema afectado, con distinto grado de severidad. Aún si los esfuerzos no superaran el límite de elasticidad en ningún caso, la exposición periódica a tensiones puede devenir en una disminución progresiva de propiedades del material (ductilidad, maleabilidad, elasticidad) conocida como fatiga del material, generando las condiciones adecuadas para la pérdida de las capacidades mencionadas [7].

Bajo el *límite de proporcionalidad*, la deformación (ξ) (estiramiento o compresión unitario de la estructura según la dirección y sentido de la fuerza resultante) es temporal y directamente proporcional a la fuerza resultante. Este enunciado se conoce como *Ley de Hooke* y ha sido aplicado en el presente trabajo para desarrollar una formulación que permite describir las tensiones radiales que aparecen con el primer pico de presión transiente (que constituye el valor de pico más elevado) y los picos sucesivos de presión durante el fenómeno.



1.1 Objetivos

Desarrollar una herramienta analítica que permita evaluar las tensiones radiales generadas por golpe de ariete en la zona de la conducción aledaña a la válvula, y determinar la clase de deformación que ocasiona en la misma.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó el análisis de las tensiones radiales generadas por golpe de ariete en un sistema simple formado por un tanque conectado en la base a una conducción simple, cilíndrica, sin cambio de característica, y una válvula en el extremo del conducto.

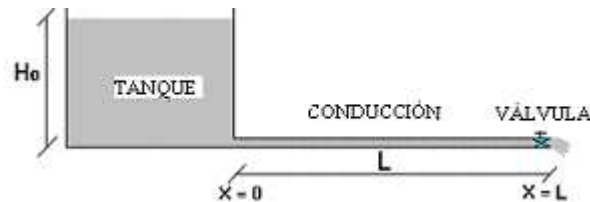


Figura 1: Sistema simple tanque - conducción simple- válvula.

2.1 Cálculo de la presión transiente

Se aplicó una resolución analítica del modelo de Golpe de Ariete. El modelo (sistema de ecuaciones diferenciales en *derivadas parciales*, de clase hiperbólica) se derivó de la ecuación de *Onda Unidimensional*, que incluye el término que introduce los efectos disipativos (*FV*) [8]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \delta \frac{\partial V}{\partial t} + FV = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + \delta \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (1b)$$

Sistema – modelo de Golpe de Ariete.

Realizando algunos pasos algebraicos y aplicando la *Transformada de Laplace* se obtuvo:

$$\bar{V} = A \sinh\left(\beta \frac{x}{a}\right) + B \cosh\left(\beta \frac{x}{a}\right) + \frac{V_0}{s} \quad (2)$$

donde $\beta = \sqrt{VQs^2 + FQs}$

La ecuación (2) es la expresión (genérica) de la velocidad instantánea (\bar{V}) en el campo de la *Transformada de Laplace*. El Método de la *Transformada* permite reducir el nivel de complejidad del sistema de ecuaciones - modelo (1a y 1b), de segundo orden en derivadas parciales en el campo temporal a un sistema en derivadas ordinarias de segundo orden en el campo la *Transformada*, cuya resolución es abordable mediante métodos de uso común.



Se aplicaron las condiciones de contorno a la ecuación (2) obteniendo la expresión (particular) de la presión (\bar{P}) en el *campo de la Transformada* (ecuación (3)) [9]:

$$\bar{P} = \frac{V_0 \beta}{Q s^2} \frac{\sinh\left(\beta \frac{x}{a}\right)}{\cosh\left(\beta \frac{L}{a}\right)} + \frac{F V_0 x}{s} + \frac{P_0}{s} \quad (3)$$

La ecuación (3) predice el comportamiento de la presión en el campo de la *Transformada*, en función de las variables (x, s) (esta última, propia del dominio de la *Transformada*). No obstante, el objetivo es predecir el comportamiento de la presión en el dominio *temporal*, es decir, en función de las variables (x, t). Para ello se aplicó el procedimiento de *antitransformación* en el campo complejo. Se obtuvo la solución:

$$p(x,t) = P_0 - V_0 F x + \frac{V_0 \cdot a}{Q} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \cdot \frac{\left\{ \psi + \frac{F}{\delta} \right\} \cdot \sin\{\psi t\} \cdot \sin\left[(2n-1) \frac{\pi x}{2L} \right] \cdot \psi \left\{ \psi^2 + (1-\sqrt{2}) \left[\left(\frac{F}{\delta} + \frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 - \frac{1}{2} \right] \right\} e^{-\frac{1F}{2\delta} t}}{\psi \left\{ \psi^2 + (1-\sqrt{2}) \left[\left(\frac{F}{\delta} + \frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 - \frac{1}{2} \right] \right\}^2} \quad (4)$$

donde $\psi = \left\{ \left[(2n-1) \frac{\pi a}{2L} \right]^2 + \left(\frac{1F}{2\delta} \right)^2 \right\}^{1/2}$

2.1 Correlación entre modelo y registro experimental

La figura 2 muestra el modelado de la presión transiente de la curva experimental del sistema 1

Sistema 1 [10]

Sistema simple reservorio-
conducción – válvula
Gráfica de altura de carga
transiente [m] en función del tiempo [s]:
Material conducción: polietileno
Longitud de conducción: 352,00 m
Diámetro interno: 0,094 m
Espesor pared: 0,008 m
Válvula: tipo globo
 V_0 : 0,729 m/s
 t_c : $(2 \cdot L/a) = 2,607$ s
 τ : 0,06 s. (cierre cuasiinstantáneo)
Celeridad de onda : 270,00 m/

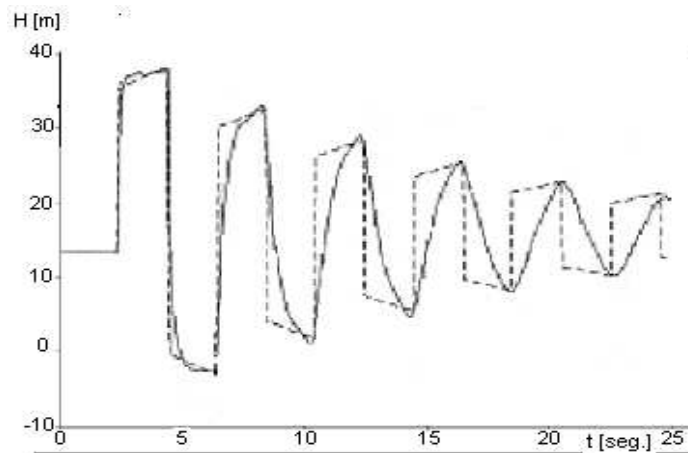


Figura 2: Registro experimental (línea llena) y simulación analítica (línea guionada).

El modelado se realizó mediante aplicación de la ecuación (4). Se observa un buen acuerdo entre el resultado de la herramienta numérica aplicadas.



Los registros de los sistemas 2 y 3 no han sido incluidos como figuras en este trabajo por razones de espacio. Se puede consultar la referencia bibliográfica [11] y [12] donde se exponen los registros de los sistemas 2 y 3 respectivamente.

2.2 Estimación de tensiones radiales

Las bases teóricas del estudio de esfuerzos radiales en anillos circulares de espesor de pared delgado fueron aplicadas para obtener la formulación analítica de cálculo de tensiones.

Las conducciones de fluido tubulares, en general, pueden ser analizadas con esta teoría porque cumplen con las condiciones del anillo de paredes delgadas. Un anillo delgado de material (perteneciente, por ejemplo, a un conducto de geometría cilíndrica) queda sometido a fuerzas radiales, como indica la figura 3a), por acción de la presión del fluido circulante. Estas fuerzas aplicadas en el área de la pared interna del anillo provocan la expansión del mismo.

La reacción del material se verifica a través de la aparición de tensiones internas en el anillo, cuya dirección se indica en la figura 3b).

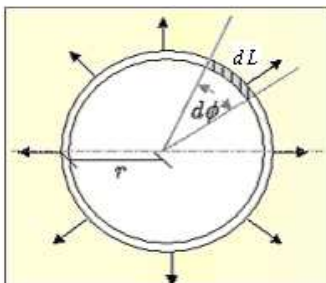


Figura 3a: Fuerzas radiales en anillo provocadas por sobrepresión interna.

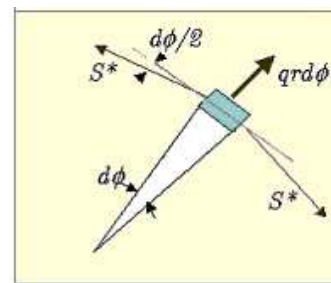


Figura 3b: Fuerzas (S^*) generadas como reacción en un elemento diferencial.

Tomando un elemento diferencial de anillo (figura 3b), las fuerzas (S^*) constituyen la reacción del anillo a la sobrepresión interna al que está sometido y se desarrollan en el interior del mismo, en la dirección indicada en esa figura.

El anillo está sometido, más concretamente, a una *carga radial distribuida* (q) expresada en términos de fuerza aplicada por unidad de longitud lineal [$N/m_{(lineal)}$]. El arco de circunferencia (dL) que se corresponde con el ángulo diferencial $d\phi$ (figura 3a, tramo rayado) puede expresarse en términos de ese ángulo diferencial $d\phi$ así [7]:

$$dL = r \cdot d\phi \quad (5)$$



Tomando el elemento diferencial de longitud dL (figura 3a):

$$q = \frac{dF}{dl} \quad \Rightarrow \quad dF = q \cdot dl \quad (6)$$

Reemplazando la expresión (5) en la ecuación (6) se obtiene la siguiente ecuación de la fuerza actuante en el diferencial dL (en términos del ángulo y el radio)

$$dF = q \cdot r \cdot d\phi \quad (7)$$

Debido a que el anillo permanece estático (sin movimiento translacional ni rotacional) se cumple que la fuerza dF debe estar compensada por fuerzas en la misma dirección radial. Esas fuerzas son las reacciones (S^*) que se desarrollan en el cuerpo del elemento diferencial del anillo (figura 3b)). Se puede demostrar que el ángulo formado entre la dirección de cada reacción (S^*) y la línea tangente al diferencial de anillo en el punto de aplicación de la fuerza dF es igual a $d\phi / 2$ (figura 3b) [7]. Luego:

$$\sum \bar{F} = \bar{q} \cdot r \cdot d\phi - 2 \cdot S^* \cdot \sin\left(\frac{d\phi}{2}\right) = 0 \quad (8)$$

Siendo el ángulo $\frac{d\phi}{2}$ es muy pequeño, se puede considerar que $\sin\left(\frac{d\phi}{2}\right) \approx \frac{d\phi}{2}$,

y reemplazando en la ecuación (8), queda:

$$\begin{aligned} \bar{q} \cdot r \cdot d\phi - 2 \cdot S^* \cdot \left(\frac{d\phi}{2}\right) &= 0 \\ \bar{q} \cdot r \cdot d\phi - S^* \cdot d\phi &= 0 \quad \Rightarrow \quad S^* = \bar{q} \cdot r \quad \text{ó} \quad S^* = \bar{q} \cdot \frac{D}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

La tensión (σ_r) a la que está sometida el anillo se obtiene como el cociente entre la reacción S^* y el área de aplicación:

$$\sigma_r = \frac{S^*}{A} \quad \Rightarrow \quad \sigma_r = \frac{\bar{q} \cdot D}{2} \quad (10a)$$

(con D : diámetro medio del anillo y m : espesor de pared del anillo).

que puede expresarse en función de la presión interna (p) [7]:

$$\sigma_r = \frac{p \cdot D}{2 \cdot h_A} \quad (10b)$$



2.3 Aplicación del cálculo de tensiones a una conducción cilíndrica, de característica constante, sometida a Golpe de Ariete.

El procedimiento expuesto arriba para el cálculo de las tensiones en un anillo circular puede aplicarse a toda conducción cilíndrica de característica constante donde un fluido transcurre por su interior. La configuración geométrica de la conducción es la adecuada para aislar virtualmente una porción de conducto de forma anular y de espesor de pared pequeño en comparación con su diámetro. La relación espesor/ diámetro de conducción del sistema analizado (ver figura 2)) es 0,085, lo que permitió la aplicación del procedimiento arriba desarrollado.

Se modelaron los ciclos de presión de golpe de ariete de los tres registros experimentales mediante el empleo de la solución analítica (ecuación (4)). Los valores de pico de presión así obtenidos fueron aplicados en la expresión (10b) para lograr el cálculo aproximado de las tensiones radiales generadas por golpe de ariete en la conducción de cada sistema analizado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestran en tablas 1 a 3 los resultados obtenidos de tensión radial generada por golpe de ariete para los tres sistemas fluidodinámicos arriba citados. Se obtuvieron los valores de pico de presión en cada ciclo de la onda transiente (tablas 1; 2 y 3, tercera columna) mediante modelado del golpe de ariete en los tres sistemas empleando la ecuación (4) y se aplicaron esos valores de pico de presión para el cálculo de las tensiones desarrolladas en cada conducto empleando la ecuación (10b) (tablas 1;2 y 3, cuarta columna).

Tabla 1: Valores de picos de presión de cada ciclo de la onda (figura 2) y cálculo de tensión correspondiente a cada pico.

Sistema Experimental N°1 [10]	Pico de presión N°	Presión [MPa]	Tensión generada [MPa]
	1°	0.3708	2.1786
Di = 0,094 m	2°	0.3169	1.8616
h _A = 0,008 m	3°	0.2776	1.6311
Material: polietileno	4°	0.2492	1.4639
σ _{fluencia} : 7 a 28 MPa	5°	0.2237	1.3141



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

Tabla 2: Valores de picos de presión de cada ciclo y cálculo de tensión correspondiente a cada pico.

Sistema Experimental N°2 [11]	Pico de presión N°	Presión [MPa]	Tensión generada [MPa]
Di = 0,0221 m h _A = 0,0016 m Material: cobre σ _{fluencia} : 55 a 760 MPa	1°	0,5751	3,8986
	2°	0,5602	3,7974
	3°	0,5405	3,6641
	4°	0,5317	3,6046
	5°	0,5131	3,4782

Tabla 3: Valores de picos de presión de cada ciclo y cálculo de tensión correspondiente a cada pico.

Sistema Experimental N°3 [12]	Pico de presión N°	Presión [MPa]	Tensión generada [MPa]
Di = 0,042m h _A = 0,003 m Material: acero σ _{fluencia} : 250 MPa	1°	1,2300	8.6100
	2°	1,0200	7.1400
	3°	0,8900	6.2300
	4°	0,8010	5.6070
	5°	0,7250	5.0750

Los resultados indican valores de tensión radial alcanzados con los picos de presión sucesivos registrados durante el fenómeno. Se encontró, para el primer caso analizado (tabla 1) donde la conducción es de polietileno, que la mayor tensión (que se registra con el primer pico) alcanza a 2,18 MPa. Durante el fenómeno la estructura soporta sucesivamente las tensiones que se exponen en la columna cuarta, como función de la consecución de los picos de presión. La tensión de fluencia ($\sigma_{fluencia}$) para el polietileno no se encuentra especificada en tablas técnicas pues el límite de elasticidad en materiales de alto grado de plasticidad no está, en general, definido. No obstante, una referencia válida ha sido referenciar el resultado con la *tensión última* o *de corte*, que para polietileno está en el rango de 7 a 28 MPa [13].

El segundo caso analizado (tabla 2) observa una tensión radial máxima de 3,90 MPa (generada por el primer pico de presión). La conducción del sistema experimental es de cobre, y para este material, la tensión de fluencia ($\sigma_{fluencia}$) es del orden de 55 MPa, valor muy superior a esa tensión de 3,90 MPa generada por golpe de ariete.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Para el tercer caso estudiado, donde la conducción es de acero, se encontró una tensión radial máxima de 8,61 MPa, valor sensiblemente menor a la tensión de fluencia del acero, de 250 MPa [13]. Luego, las tensiones desarrolladas en los tres sistemas no han comprometido por deformación permanente a las respectivas estructuras. Por otra parte, es válido citar que el cierre practicado en cada uno es el que mayor amplitud de presión genera, por lo tanto el valor de tensión hallado para el primer pico (el más crítico) es el máximo que puede darse en la conducción, para las condiciones en que se indujo el golpe de ariete en cada sistema estudiado. Sin embargo, una sucesión frecuente de episodios de este fenómeno podría generar fatiga del material de la conducción con el tiempo, con reducción de sus propiedades mecánicas. Tal situación puede derivar en la aparición (más o menos tardía) de deformación de la tubería y la posibilidad de pérdida parcial de funcionalidad en el tiempo.

4. CONCLUSIONES

El golpe de ariete genera oscilaciones de la presión del fluido que inducen tensiones en la estructura confinante. Estas tensiones constituyen la respuesta del sistema a las sollicitaciones provocadas en él por este fenómeno fluidodinámico. Las tensiones producen deformaciones temporales o permanentes en el material de la estructura, que dependen de las características mecánicas y geométricas del mismo y esta cuestión requiere especial atención debido a las consecuencias que pueden originar estas deformaciones. Las mismas se refieren principalmente a la pérdida parcial (y en distinto grado) de propiedades mecánicas, que derivan en una remisión de la funcionalidad de la estructura.

El trabajo expuesto es una vía de aproximación al estudio de los esfuerzos en la estructura derivados del golpe de ariete. Si bien este desarrollo es específico para el cálculo de tensiones radiales en anillos delgados, ésta es una condición que cumplen un gran número de conducciones, donde el espesor de pared es notablemente menor al diámetro interno, por lo tanto constituye una herramienta de gran utilidad para el análisis de tensiones inducidas.

La ecuación empleada en el cálculo de tensiones (ecuación 10b) resulta, por otra parte, simple y de fácil aplicación y contando con una herramienta de modelado del fenómeno mediante la cual se obtiene la descripción de las oscilaciones de presión, se logra información sobre las tensiones radiales que afectan al conducto, lo que permite una primera predicción del estado de la estructura confinante afectada por el transiente y el pronóstico de posibles deterioros a futuro.

El aspecto tensional en conducciones es desestimado en la mayoría de los trabajos sobre golpe de ariete, no obstante, el mismo toma relevancia puesto que habilita a evaluar el impacto



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

de este fenómeno en la operatividad mecánica de la estructura fluidodinámica y permite formular acciones para evitar posibles deterioros, con los consiguientes daños y pérdidas. Por lo tanto, este aspecto no debe excluirse en absoluto y, contrariamente, es necesario introducirlo en la agenda de temas relativos a la operación y mantenimiento de sistemas fluídicos.

5. REFERENCIAS

- [1] Murga, N. - Molina, N. 'Sistema de protección de bombas y cañerías en oleoductos sometidos a flujos transitorios' *Universidad Nacional del Sur – Bahía Blanca* (1997).
- [2] Vitkovsky, J; Bergant, A.; Simpson, A., 'Systematic Evaluation of One Dimensional Unsteady Friction Model in Simple Pipelines' *J. of Hydraulics Eng. – ASCE*, (2006)
- [3] Bergant A., Tijsseling, A, Vitkovsky J. Covas DIC, Simpson A, Lambert , M. 'Parameters Affecting Water Hammer Wave Attenuation, Shape and Timing' – Part 1 : Mathematics Tools – Part 2 (2008).
- [4] Streeter, V.L. y Wylie, E.B. (1988), "Mecánica de Fluidos", McGraw-Hill, cap 13 (1988).
- [5] Gomes de Rocha, R.; Bastos de Freitas, R. 'Numerical Solution of Fluid-Structure Interaction in Piping Systems by Glimm's Method', *Journal of Fluids and Structures* vol 28, pp 392-415 (2012).
- [6] Meniconi, S; Brunone, B. et.al. 'Water-Hammer Pressure Waves Interaction at Cross Sectional Changes in Series in Viscoelastic Pipes', *Journal of Fluids and Structures*, vol 33, pp 44 – 58 (2012).
- [7] Timoshenko, V; 'Resistencia de Materiales 1ª Parte'. Ed. Espasa Calpe – Madrid (1980).
- [8] Ingard U., Kraushaar W. 'Introducción al Estudio de la Mecánica, Materia y Ondas' Ed. Reverté. Buenos Aires (1966).
- [9] Provenzano, P; Aguerre, R. ; Baroni, F. 'Inclusión de los Efectos Disipativos en el Golpe de Ariete Mediante el Modelado de las Curvas Envolventes' *Proc. del VI Congreso Argentino de Ingeniería Química (CAIQ 2010) - (Area: Mecánica de Fluidos)* (2010).
- [10] Brunone, B., 'Velocity Profiles and Unsteady Pipe Friction in Transient Flow', *Journal of Resources Planning and Management*, pp 236 – 144 (2000).
- [11] Bergant, A. & Tijsseling, A. ; 'Parameters Affecting Water Hammer Wave Attenuation, Shape and Timing' 10th International Meeting of the Work Group on The Behaviour of Hydraulic Machinery Under Steady Oscillatory Conditions. Trondheim, Norway (2001).
- [12] Mitosek, M; Chorzelzsky M; Malesinsca, A; 'Experimental Analysis of Natural Velocity of Water Column due to Water Hammer in Series Pipe Systems' *Warsaw University of Technology* (1998).
- [13] Gere, J.; 'Resistencia de Materiales'. 5ª edición - Editorial Paraninfo (Ceengage (Learning)) (2009).



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

6. NOMENCALTURA

- A: área [m^2]
- a : celeridad de onda [m/s]
- D_i : diámetro interno del conducto [m]
- e : espesor del conducto [m]
- E: módulo de elasticidad del conducto [Pa]
- F: coeficiente de pérdida de carga
- F: fuerza [N]
- f: factor de fricción de Darcy.
- g : aceleración de la gravedad [m/s^2]
- h_A Altura de la sección anular de conducto (m)
- L : longitud conducción [m].
- p Presión [MPa]
- P_0 Presión de régimen [MPa]
- P Presión instantánea [MPa]
- q Carga por unidad de longitud [N/m]
- \dot{Q} caudal másico [kg/s].
- r Radio [m]
- t: tiempo [s]
- t_c : tiempo crítico [s]
- V : velocidad del fluido [m/s]
- V_0 : velocidad de régimen [m/s] .
- δ : densidad del fluido [kg/m^3]
- ρ : peso específico del fluido [N/m^3]
- σ_r : tensión radial [MPa]