

Universidad Nacional de La Matanza.

Departamento de Ingeniería e Investigaciones
Tecnológicas.

CÓDIGO DEL PROYECTO: C2- ING -015

TÍTULO: Modelado del Fenómeno de Golpe de
Ariete en Estructuras Fluidodinámicas.

PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN : CyTMA2

DIRECTOR DEL PROYECTO: Dr. Provenzano, Pablo Gabriel

INTEGRANTES: Lic. Fernández, Luis Alberto
Alumno Ávido, Matías Javier

FECHA DE INICIO: 2014/ 01/ 01.

FECHA DE FINALIZACIÓN: 2015/ 12/ 31

Informe Final.

Nomenclatura

A:	área [m ²]
a :	celeridad de onda [m/s]
a _s :	celeridad de onda incluyendo efectos FSI [m/s]
D:	diámetro del conducto [m]
e :	espesor del conducto [m]
E:	módulo de elasticidad del conducto [Pa]
F:	fuerza [N]
f :	factor de fricción de Darcy.
f _u :	término de fricción transiente
g :	aceleración de la gravedad [m/ s ²]
H :	presión transiente [m]
H ₀ :	1° pico de presión sobrepresión [m]
H _{estat.} :	presión estática en la conexión tanque – conducto [m]
l :	longitud conducción [m].
Q :	caudal volumétrico [m ³ /s].
Q̇ :	caudal másico [kg/s].
s:	variable en el campo de la <i>Transformada de Laplace</i>
t:	tiempo [s]
t _c :	tiempo crítico [s]
T _d :	periodo real de la onda de presión transitoria en el sistema [s]
V :	velocidad del fluido [m/s]
V ₀ :	velocidad de régimen [m/s] .
V _C :	volumen de control.
w _d :	frecuencia angular real de la onda de presión transitoria en el sistema [s ⁻¹]
w ₀ :	frecuencia angular <i>natural</i> de la onda de presión transitoria en el sistema (sin contemplar la fricción) [s ⁻¹].
δ :	densidad del fluido [kg/m ³]
ξ :	deformación axial [mm]
γ :	factor de amortiguamiento (refleja el efecto de la fricción en w) [s ⁻¹].
λ:	factor de fricción.
η:	coeficiente de viscosidad [kg/m.s]
ρ:	peso específico del fluido [N/m ³]
σ:	tensión (colineal al vector área) [Pa]
τ :	tiempo de cierre de válvula [s]
v:	Coeficiente de Poisson

Resumen

Palabras clave: Sobrepresión, tensión, frecuencia, interacción

El fenómeno de Golpe de Ariete ha sido abordado, tradicionalmente, desde la alteración que una perturbación provoca en el régimen del fluido circulante, habiendo sido menos estudiadas las implicancias que produce sobre la estructura que lo contiene.

Los objetivos establecidos han sido identificar los efectos provocados por el Golpe de Ariete sobre el material de la instalación y determinar la posible injerencia de parámetros de la conducción en la amplitud y la frecuencia de la onda de presión, incluyendo la interacción fluido-estructura.

Se ha aplicado el modelo viscoelástico para describir el transitorio en cada caso analizado y se ha encontrado una relación matemática entre el fenómeno estudiado y los efectos de tensión y deformación radial que produce sobre el sistema, como también relaciones de carácter no lineal entre los parámetros de la instalación y los de la onda transiente, que permitieron cuantificar las tensiones inducidas en la conducción como también la amplitud y frecuencia de la onda de presión en función de los parámetros arriba mencionados.

El trabajo se extendió a probar una mejora en el ajuste en la predicción del primer pico de presión (el más crítico) mediante la inclusión de la relación de *Poisson* en el algoritmo matemático.

Área de conocimiento:	Ingeniería Mecánica
Código de Área de conocimiento:	2200
Disciplina de conocimiento:	Mecánica de Fluidos
Código Disciplina de conocimiento:	2208
Campo de Aplicación:	Ingeniería Mecánica
Código Campo de Aplicación:	2208

Proyectos vinculados: Universidad Nacional de La Matanza,
Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas
Código: C2-ING-002
Título: El Fenómeno de Golpe de Ariete en Sistemas Fluidodinámicos
Confinados
Director: Dr. Pablo G. Provenzano
Inicio: 2012/01/01
Finalización: 2013/12/31

Introducción

El tema de investigación elegido se enmarca en el área de la Mecánica de Fluidos, capítulo de la Mecánica Clásica que trata del estudio de las leyes que gobiernan el comportamiento de los Fluidos en estado estático y en movimiento. Particularmente, el Golpe de Ariete es un fenómeno transitorio, es decir, que se da como un proceso de transición entre dos estados del fluido. Cuando el mismo se encuentra en régimen estacionario, donde la presión y el caudal permanecen prácticamente constantes y es perturbado por operación de cierre de algún dispositivo de control de flujo, se produce un cambio repentino en el comportamiento de esas variables, que comienzan a oscilar, dejando de ser constantes, hasta estabilizarse en nuevos valores aproximadamente constantes. Este proceso es relativamente breve en el tiempo, sin embargo el interés en su estudio radica en que en ese lapso de tiempo se producen desequilibrios de cierta magnitud en el fluido que pueden ocasionar efectos negativos en el sistema (Boulos et. al. (1990)). Los fenómenos transitorios se verifican también en otras disciplinas, siendo más comunes en circuitos y dispositivos eléctricos y electrónicos, y es en estas áreas de la ciencia donde han sido estudiados con mayor atención.

Las analogías que presentan los transitorios eléctricos y los fluidodinámicos son variadas, numerosos fenómenos transitorios que se dan en dispositivos y circuitos eléctricos tienen su correlato en la fluidodinámica, en tal medida que una cantidad importante de modelos (formulados con las variables respectivas de cada una de estas disciplinas) es tratada aplicando las mismas herramientas matemáticas para su resolución y las soluciones obtenidas pueden expresarse en términos de series compatibles en uno y otro campo.

El tema, por otra parte, se encuadra adecuadamente dentro de las ramas de la Ingeniería que son parte de la oferta académica de esta Casa de Altos Estudios: la asignatura Mecánica de Fluidos forma parte del programa de la carrera de Ingeniería Industrial, donde el alumno estudia las leyes que describen el comportamiento del fluido en distintos escenarios y la relación entre las variables propias de sistemas fluídicos, llegando a desarrollarse habitualmente el estudio de fluidos viscosos en régimen estacionario y transitorio, y en aplicaciones de la fluidodinámica. La investigación de fenómenos transitorios asiste como complemento de la formación en el área de Mecánica de Fluidos para todo estudiante de Ingeniería Industrial que esté interesado en avanzar en el conocimiento de los fluidos y, paralelamente, iniciarse en tareas de investigación.

Las analogías entre el Golpe de Ariete y fenómenos eléctricos y electrónicos de características similares y la aplicación de herramientas matemáticas que son de gran utilidad en la resolución de transitorios en circuitos y redes y en el Análisis de Señales constituyen una vía de enlace para alumnos de la carrera Ingeniería Electrónica a quienes les haya interesado la teoría de transitorios, como también la posibilidad de aplicar herramientas matemáticas y de ampliar el abanico de utilidades a emplear en la resolución de modelos, en un área distinta del conocimiento y, del mismo modo, de iniciar los primeros pasos en investigación.

Definición del problema

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 solicitaciones rápido. Su descripción ha sido motivo de investigación y de formulación de modelos que delinear con mayor o menor aproximación las oscilaciones de presión y velocidad del fluido en esas circunstancias. Modelos formulados tempranamente, 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. La naturaleza del transiente exige la realización de cantidad de iteraciones en la tarea de modelar presión, tornando compleja su realización y extensiva en tiempo. 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, hecho que significó un adelanto notable. Permitted, por ejemplo, incluir los 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 del fenómeno (Bergant et. al (2008); Hager (2001); Murga y Molina (1997); Streeter (1968); Lai (1961)).

Estos modelos han sido diseñados a través de la observación pormenorizada de los cambios en las variables afectadas desde el lado del fluido, mientras que otros aspectos igualmente determinantes de las características del fenómeno y que son propios de la instalación como la respuesta de la estructura confinante al tren de presiones, han sido menos abordados, mostrando un volumen de producción bibliográfica sensiblemente menor. La investigación de aspectos básicos ha sido bien documentada en trabajos destacados (por ejemplo, trabajos de Streeter y Wyllie, y Parmakian, entre otros) mientras que otros como el citado no han merecido ese *status* (Wu & Ferng (1999)).

Las presiones generan tensiones sobre la conducción de carácter radial y axial, básicamente. Se deriva de ésto la vinculación existente entre este fenómeno y los efectos producidos por las tensiones en sistemas de conducción de fluidos.

Por otra parte, la magnitud de los esfuerzos desarrollados depende fuertemente de parámetros del material de la estructura confinante, como el Módulo de Elasticidad, por lo tanto es fundamental abordar el análisis del transitorio (y de los efectos colaterales que produce) desde el fluido en conjunto con la estructura y sus características (Meniconi, et.al, (2012)).

Estas tensiones pueden ocasionar 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 un cambio progresivo de propiedades del material como ductilidad, maleabilidad, elasticidad, conocido como fatiga del material, provocando las condiciones adecuadas para la pérdida de capacidades de la estructura mencionadas anteriormente (Timoshenko (1980); Gere (2009)).

Dentro del terreno que concierne a la instalación, la importancia de parámetros como el diámetro interno del conducto o el Módulo de Elasticidad del material, está mejor determinada en relación a la amplitud de la onda mientras que su vinculación con la frecuencia resulta menos evidente.

El concepto de interacción fluido- estructura (conocido como FSI, por sus siglas en idioma inglés) es un aspecto que viene siendo estudiado más sistemáticamente desde hace tres décadas y se focaliza en la acción mutua entre ambos componentes del sistema fluídico durante eventos de cambio de régimen, como en el caso del fenómeno analizado. Se plantea esta interacción desde la perspectiva de mecanismos responsables de la transferencia de energía entre fluido y estructura ante la aplicación de una perturbación en el sistema. Entre esos mecanismos se destaca el denominado efecto de *Poisson Coupling*, que relaciona los pulsos de presión en el fluido y las ondas de tensión axial en las paredes de la conducción, como resultado de las tensiones radiales y axiales, debidas al efecto simultáneo de estiramiento axial/contracción radial y viceversa, identificado y cuantificado mediante el coeficiente de *Poisson* (Gomes da Rocha et. al. (2012)).

Investigadores destacan, como observación a la Teoría Clásica de Golpe de Ariete, que la descripción de la onda de presión que se obtiene con este modelo es adecuada en términos de los primeros picos y valles de presión, y periodo de la onda, pero presenta fallas en cuanto al modelado de la atenuación de picos en los ciclos siguientes y a la dispersión que va mostrando la onda conforme se va desarrollando el transiente, perdiendo precisión en estos aspectos. Indican que ello se debe a la desestimación de efectos como el denominado FSI, entre otros (Tijsseling, Lambert et al. (2008)).

Parámetros de la conducción como el coeficiente de *Poisson* son ignorados usualmente, por ejemplo, en el cálculo de la celeridad de la onda de presión, en algoritmos matemáticos y en desarrollos de paquetes de *software*. De esta manera, los valores obtenidos llegan a ser ligeramente menores a los reales (Bergant et al. (2008)).

Lo expuesto es causal de cierto grado de desajuste en el modelado al no contemplar parámetros y efectos propios de la instalación, indicados arriba. Este hecho demanda un nuevo enfoque, integral, que incluya a todos los componentes del sistema fluidodinámico como elementos activos que determinan las características del transitorio.

Justificación del estudio

Este Proyecto constituye una continuación del Proyecto anterior (bienio 2013-2014) sobre análisis del Golpe de Ariete. Se investigan ahora aspectos más relacionados con la injerencia en el fenómeno de parámetros de la instalación que sirve de medio para el transporte del fluido, de la interacción entre estos y el fluido y otros que comenzaron en el anterior trabajo de investigación, como el análisis de la influencia del material del conducto y del Módulo de Elasticidad en la forma de onda transiente.

El desarrollo de la investigación tiene como meta general contribuir en el mejoramiento de la descripción del fenómeno. El resultado a alcanzar es la propuesta de formulación de un camino alternativo o la mejora de uno existente en el modelado para lograr un acercamiento mayor al

proceso a analizar. Esto contribuiría a extender su interpretación y obtener resultados más ajustados, que permitirán, además, formular pautas operativas y de diseño de mayor confiabilidad.

Desde una perspectiva más específica, y en referencia a los aspectos del transitorio propuestos, ha sido expuesta en el apartado anterior (*Definición del problema*) un área de la problemática históricamente menos trabajada pero que tiene, no obstante, injerencia directa en el Golpe de Ariete. Investigadores en el tema han indicado algunas falencias en el modelado debido a la desestimación de efectos propios de la instalación y de la interacción fluido- estructura como un eje que determina las características de la onda generada y epicentro del proceso de transferencia energética entre en fluido y el entorno que lo confina. La posibilidad de introducir esos parámetros y determinar su relación con las variables de la onda ha sido el objetivo principal. Los resultados alcanzados, traducidos en expresiones matemáticas, agregan herramientas para el entendimiento y predicción del fenómeno.

Limitaciones

Surgieron algunas limitaciones básicamente por un tema de tiempo, debido a una tarea que no estaba prevista en el actual Proyecto y que surgió a partir del interés de la Editorial *David Publishing Company* sobre un trabajo presentado en el Congreso ENIEF 2013, perteneciente al Proyecto de Investigación anterior. La Editorial me invitó a presentar un *paper* para el *Journal of Mechanics Engineering and Automation* (JMEA). Se desarrolló un nuevo trabajo relacionado temáticamente con el presentado en ENIEF, que demandó aproximadamente un año en tiempo. Esto ha generado algún retraso en la ejecución de las actividades del presente Proyecto.

El alumno integrante no mantuvo la misma performance en la segunda etapa de la investigación (año 2015), siendo su participación irregular desde mayo y cumpliendo de forma parcial e incompleta las tareas asignadas. Esta situación coincidió con su ingreso a la empresa Mercedes Benz, sin embargo el alumno manifestó su interés en continuar participando en el Proyecto y su compromiso hacia las tareas a desarrollar. Estas irregularidades derivaron en retraso y dilación en el desarrollo de algunas de las actividades que debieron ser realizadas por los restantes integrantes.

Alcances del trabajo

Los primeros resultados obtenidos se refieren a la reacción de la conducción frente a los cambios de presión transiente. La Teoría de Deformación Mecánica ha sido empleada para arribar a los resultados alcanzados. Se empleó el enfoque diferencial, aplicado al análisis a un elemento diferencial de conducto y se obtuvieron las reacciones en ese elemento. Derivan, de estas reacciones, los efectos de expansión y contracción radial del conducto. Se ha obtenido, luego, una relación que permite calcular el tenor de esas reacciones en función del Golpe de Ariete. Ha quedado verificado, desde este modo y con este encuadre, la interacción directa entre fluido y conducción, que frecuentemente es desestimada en el cálculo de transitorios como el estudiado.

La injerencia del diámetro del conducto ha sido otro aspecto central de la investigación. La intención en este caso ha sido indagar su vinculación con parámetros de la onda de presión como la amplitud y la frecuencia. Se encontró que cambios de diámetro de la conducción provocan una variación perceptible de la amplitud de la onda y se encontró, además, partiendo de estos resultados, que la frecuencia de la onda varía con cuando se modifica el diámetro. Se ha determinado la ley que gobierna estas relaciones en cada caso, expresadas en términos matemáticos.

Finalmente, la inclusión de efectos de la interacción fluido-estructura, como la relación entre constricción axial del conducto y expansión radial simultáneas de la estructura sometida a Golpe de Ariete, han sido incorporados. La mejor aproximación se obtuvo aplicando la relación de *Poisson* en el algoritmo y ha quedado plasmada a través de la comparación de resultados alcanzados empleando esa relación y desestimando la misma.

Los resultados de la investigación expuestos arriba agregan elementos para la determinación y ajuste en el modelado del transitorio mediante formulaciones y relaciones matemáticamente sencillas entre variables de la instalación y del fluido. Sirven, además, para evaluar las consecuencias sobre el sistema que derivan del empleo de materiales en la conducción y sus dimensiones y estimación de las tensiones máximas generadas, mediante herramientas de aplicación relativamente sencillas.

La información obtenida constituye un elemento de valoración para la toma de decisiones y la elección de sistemas antiarriete a instalar.

Contribuyen, finalmente, a la producción científica en aspectos del fenómeno de reciente investigación y de menor volumen de producción de trabajos.

Las tareas de difusión de la investigación se han canalizado a través de la elaboración y publicación de tres trabajos, presentados en Congresos realizados en el país y en una Revista Científica Internacional.

Se han realizado entrevistas a un profesional de reconocida trayectoria en el área de Fluidodinámica, quien dirige el Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Buenos Aires, el Ingeniero Luis Pérez Farrás. La reuniones versaron sobre aspectos generales de la Fluidodinámica y sobre el tema de transitorios en fluidos, exponiendo los resultados logrados en hasta el momento de la misma (mes de mayo de 2015). Una de las conclusiones fue la solicitud a quién suscribe de la revisión de un artículo sobre el Golpe de Ariete, de su autoría, que fuera publicado en la Revista Agua, de Facultad de Ingeniería.

Objetivos

Objetivos generales

- a) Contribuir a la producción de conocimiento en el tema de investigación
- b) Mejorar la descripción de la onda de presión transiente mediante el modelado incorporando en el análisis la influencia que ejercen en el fenómeno parámetros que son desestimados habitualmente en la producción de investigación del tema.
- c) Contribuir al modelado del fenómeno de modo más ajustado para posibilitar una mejor predicción y control del mismo y la reducción de los efectos indeseados arriba citados.

Objetivos específicos

- a) Determinar la relación entre la presión transiente y los esfuerzos inducidos en la conducción.
- b) Determinar la influencia de las propiedades del material de la conducción en la magnitud del Golpe de Ariete.
- c) Analizar la injerencia de parámetros geométricos de la instalación sobre los parámetros de la onda de presión.

Hipótesis

El proyecto de investigación se desarrolló sobre la base de las siguientes hipótesis de trabajo:

- a) El Golpe de Ariete produce en la estructura confinante una sucesión de cargas que debe soportar esa estructura y que genera cambios en sus propiedades.
- b) La forma de la onda de presión es dependiente de la ley de cierre.
- c) Las características elásticas del material de la conducción condicionan la frecuencia de sucesos de Golpe de Ariete.

Supuestos del modelo:

- Modelo unidimensional.
- Flujo compresible
- Conducción llena de líquido (el volumen de gas disuelto se considera despreciable).
- Líquido homogéneo y conducción elástica.
- Velocidad y presión uniformes en cualquier sección de la conducción.
- Sin efecto de separación de columna durante el transitorio.
- El nivel de agua en el reservorio permanece constante.- Diámetro de la conducción, constante

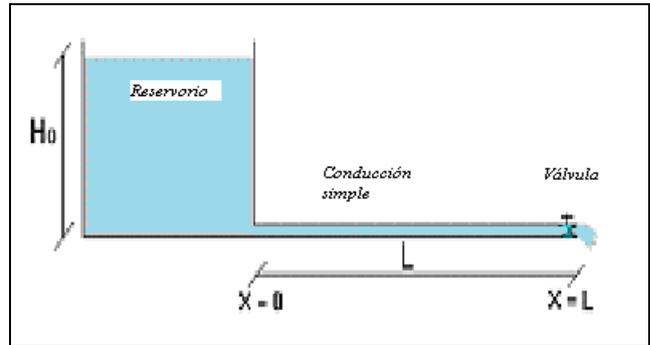


Figura 1: sistema- modelo simple.

Desarrollo

1) *Modelado del Golpe de Ariete*

Se presenta el modelo matemático que describe al Golpe de Ariete:

$$-\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} = \delta \left\{ -V_0 + s\bar{V} \right\}$$

$$\bar{P} = B \cdot \sinh\left(\frac{sx}{a}\right) + \frac{P_0}{s} \tag{1}$$

Modelo unidimensional de Golpe de Ariete

Se desarrolló la resolución analítica, aplicando la *Transformada de Laplace* al modelo:

$$a^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \cdot \bar{P} = \int_0^\infty e^{-st} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) dt = \int_0^\infty e^{-st} \partial \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) \tag{2}$$

$$\delta \int_0^\infty e^{-st} dV(x,t) = \delta \left[e^{-st} V \right]_0^\infty - \delta \int_0^\infty V(-s) e^{-st} dt \tag{2'}$$

Aplicando la *Transformada de Laplace* a las condiciones de contorno y operando se obtuvo la expresión de la presión transiente, en el campo de las frecuencias:

$$\bar{P} = \frac{\frac{\rho}{g} \left[V_0 - s \left(V_0 \frac{s\tau - l}{s^2\tau} \right) \right]}{\cosh\left(\frac{sL}{a}\right)} \sinh\left(\frac{sx}{a}\right) + \frac{P_0}{s} \tag{3}$$

Antitransformación

Se emplearon los postulados del *Teorema de Cauchy* en el campo complejo, hallando la solución:

$$p(x,t) = P_0 + \frac{\rho V_0}{g\tau} \left\{ \frac{x}{a} - \frac{8L}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^2} \cos \frac{(2n-1)\pi \cdot t}{2L} \sin \frac{(2n-1)\pi x}{2L} \right\} \quad (4)$$

(Provenzano (2013))

La solución obtenida (ecuación 4) constituyó una herramienta de análisis para modelar la onda de presión generada en el punto de la conducción donde se halla emplazado el dispositivo de control de flujo. Esta solución ha sido validada mediante comparación de los resultados obtenidos aplicando la misma con registros experimentales de Golpe de Ariete (Provenzano (2013))

II) *Análisis diferencial de las tensiones en el material de la conducción inducidas durante el Golpe de Ariete.*

El análisis del Golpe de Ariete se desarrolla en la gran mayoría de los trabajos y papers publicados sobre la asunción que la cañería no sufre deformaciones durante el transiente. Se asume, comúnmente, que el diámetro de la conducción mantiene su valor constante, sin estudiar la respuesta de la estructura. Sin embargo, en el análisis realizado, se ha mostrado que el sistema es sensible a las solicitaciones por Golpe de Ariete. El carácter de esta respuesta se da básicamente en términos de tensiones tangenciales inducidas y de deformaciones radiales, que han sido analizadas.

Se ha logrado establecer la vinculación directa que existe entre el Golpe de Ariete y las tensiones inducidas en la estructura a través de formulaciones algebraicas sencillas que permiten visualizar esta relación. Las dilataciones y contracciones de la conducción manifiestan un patrón de comportamiento alternante, en consonancia con la carga que las genera y, además, los cambios de dilatación a contracción y viceversa se dan en tiempos muy breves.

Si bien las tensiones están dentro del límite de elasticidad en el sistema analizado, el carácter alternado de las mismas está mostrando que la estructura queda expuesta a un régimen sucesivo de tensiones fluctuantes.

En el caso particular de este sistema, la conducción es de cobre, lo cual confiere un Módulo de Rigidez elevado (debido al valor del Módulo de Elasticidad de este material) por lo tanto era esperable que el tenor de estiramiento calculado en el apartado *Resultados* haya arrojado un valor menor al 1 por ciento. Por otra parte, ese valor depende del diámetro del conducto, que en el sistema analizado, es de 22,1 mm (muy pequeño) y de los picos de presión (que no han sobrepasado los 27 m.c.a., es decir, algo mayor a 2,5 atm, amplitud de presión moderada).

Sobre estos temas, los intentos para analizar la relación entre el transiente y la conducción se han remitido mayoritariamente a su estudio desde la *Teoría de Vibraciones* aplicadas a estos casos mientras que la investigación desde una concepción *Mecánica* acerca de esa relación ha sido mínimamente explorada. No obstante, este enfoque resulta interesante pues aporta información sustancial para comprender mejor al fenómeno y las acciones derivadas que provoca en estructuras, como se muestra en el desarrollo expuesto a continuación.

Materiales y Métodos

Se aplicaron los fundamentos teóricos del análisis de fatigas en anillos circulares con espesor de pared delgado a fin de obtener la expresión matemática para el cálculo de tensiones inducidas en la conducción del sistema analizado (figura 4 y tabla 2- sistema experimental). Esta teoría puede ser empleada en conductos y cañerías puesto que cumplen con las condiciones del anillo de paredes delgadas.

Considerando el espesor (t) del anillo uniforme en todo su perímetro y la relación d/t (diámetro/espesor de pared) mayor a 10 se puede tratar el problema como si el mismo perteneciera a un caso de tracción / compresión simple (Timoshenko; 1980).

La presión sobre la cara interna del anillo constituye una verdadera carga actuando en esa superficie. Su intensidad (q) queda expresada en *Newton* por metro *lineal* de perímetro. Se investigó la acción de la presión y de las reacciones inducidas (R_v) en un elemento de anillo de dimensión diferencial de (dA) y espesor uniforme t .

Si se operan dos cortes transversales al eje axial de una conducción, muy próximos entre sí, se obtiene un anillo de material que representa el elemento diferencial de conducto, como se muestra en la figura 2:

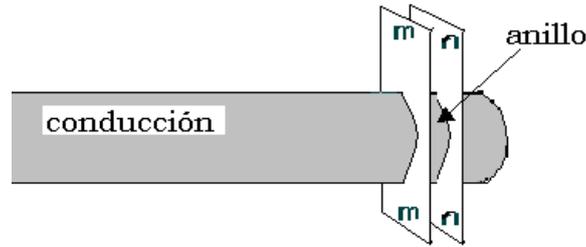


Figura 2: Anillo de conducto definido mediante corte por planos transversales al eje axial de la conducción.

El análisis de fuerzas en el anillo ha sido planteado partiendo del subelemento diferencial de área dA (figura 3a). Aislando el anillo, se procedió a incluir a la presión sobre su cara interna, expresando la presión en términos de fuerza entre unidad de área. Estas fuerzas aplicadas en el subelemento (dA) desde su cara interna provocan el estiramiento del mismo. La reacción del material se verifica a través de la aparición de tensiones internas (σ), normales al área lateral ($t \cdot dx$) del subelemento de anillo. Estas tensiones involucran fuerzas (R_v) cuya dirección se indica en la figura 3b. Tales fuerzas forman un ángulo muy pequeño con la recta tangente al plano del área externa del subelemento. Se puede demostrar que ese valor es $\theta/2$, siendo θ el ángulo central formado por los límites del subelemento dA (figura 3b). Las componentes de R_v en dirección radial (R_{vr}) se oponen a la fuerza provocada por la presión ($p \cdot dA$) del fluido e intentan restaurar el equilibrio estático del subelemento.

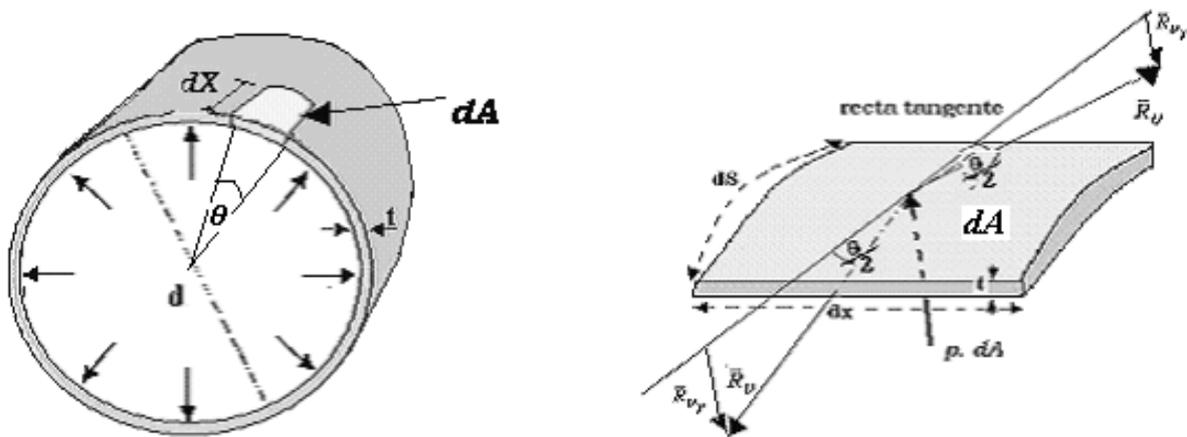


Figura 3a: Segmento de conducto anular, de ancho dX e sometido a sollicitación radial por presión interna.

Figura 3b: Reacciones (R_v) en subelemento de anillo (dA) sometido a fuerzas radiales por presión interna.

El análisis diferencial permite considerar la colinealidad de las fuerzas indicadas en la figura 3b debido a lo infinitamente pequeño que resultan las dimensiones dS y dX que lo definen.

Además, por encontrarse este subelemento diferencial en equilibrio estático, se aplicó la primera condición de la Estática (expresión 5):

$$\sum \overline{F}_r = p \cdot dA - 2 \cdot R_v^* \cdot \sin\left(\frac{d\phi}{2}\right) = 0 \quad (5)$$

* $R_v \sin\left(\frac{d\phi}{2}\right)$ es la componente radial de R_v

El ángulo $\frac{d\phi}{2}$ es muy pequeño, por lo tanto, se puede aplicar la siguiente aproximación:

$$\sin\frac{d\phi}{2} \approx \frac{d\phi}{2}$$

reemplazando en la ecuación (5), queda:

$$p \cdot dS \cdot dx - 2 \cdot R_v^* \cdot \left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0 \quad (6)$$

$$p \cdot r \cdot d\theta \cdot dx - 2 \cdot R_v^* \cdot \left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0$$

Asumiendo dx muy pequeño, se puede expresar la presión como fuerza por *unidad de longitud* dS , es decir, una carga (q) por unidad de longitud lineal:

$$p \cdot r \cdot d\theta - 2 \cdot R_v^* \cdot \left(\frac{d\theta}{2}\right) = \Rightarrow R_v = p \cdot r \quad (7)$$

(Timoshenko (1980))

y la tensión (σ_r) se obtiene como el cociente entre la reacción R_v^* y el área de aplicación:

$$\sigma_r = \frac{R_v^*}{A} \quad \Rightarrow \quad \sigma_r = \frac{p \cdot r}{A} \quad (8)$$

donde A es el área dada por la longitud dx y el espesor t

a) *Modelado del registro experimental del sistema simple.*

Se ha aplicado la solución analítica de Golpe de Ariete (ecuación 4) al modelado del registro experimental correspondiente al sistema I (Bergant & Tijsseling (2001)), obteniendo la gráfica de la figura 4.

Tabla 2: Sistema I

Sistema simple reservorio-conducción – válvula
 Gráfica de altura de carga transiente [m] en función de t[s] en el extremo de emplazamiento de la válvula.
 Material conducción: cobre
 Longitud de conducción: 37,23 m
 Diámetro interno: 0,0221 m
 Espesor pared: 0,00163 m
 Válvula: tipo globo
 V_0 : 0,200 m/s
 τ : 0,009 s. (cierre cuasiinstantáneo)
 Celeridad de onda: 1319,00 m/s

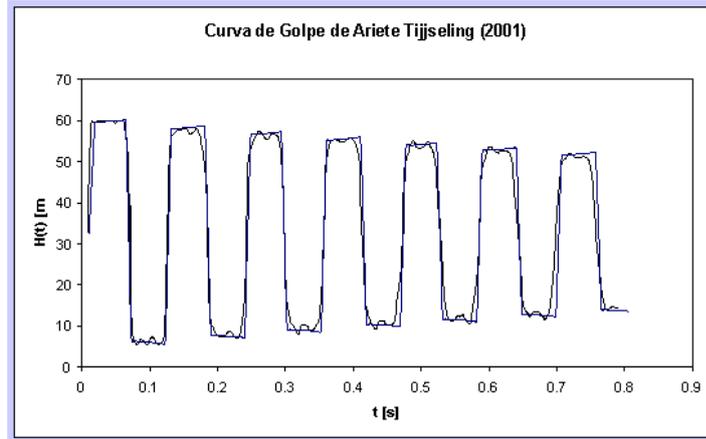


Figura 4: Registro experimental de Golpe de Ariete (línea lila) y simulación analítica (línea guionada azul).

(Bergant & Tijsseling (2001))

El modelado de la gráfica experimental muestra una correlación ajustada al registro en amplitud y forma, sin observar corrimiento progresivo de fase.

b) Dilatación en conducciones de geometría cilíndrica por Golpe de Ariete.

La consecuencia tangible e inmediata de la aparición de tensiones inducidas por Golpe de Ariete es la dilatación y contracción radial de la conducción durante el tiempo del fenómeno. La posibilidad de poder cuantificar la dilatación y contracción sucesivas brinda información importante sobre las características del transitorio como también sobre las condiciones de la instalación y de su capacidad de soportar tales solicitaciones.

Las deformaciones de un tubo cilíndrico sometido a presión por el fluido confinado pueden estimarse desde el cálculo del estiramiento (δ) del radio medio del conducto bajo presión. La presión sobre la cara interna del anillo constituye una verdadera intensidad de carga (q). Esta queda expresada en Newton por metro lineal de perímetro de anillo

Una variable de gran utilidad es la deformación unitaria (ϵ), expresada para los casos de estructuras sometidas a la tracción / compresión como el cociente entre la elongación absoluta (δ) y la longitud original (l) de la estructura (es decir, en estado relajado):

$$\epsilon = \frac{\delta}{l} \tag{9}$$

La Ley de Hooke permite determinar las tensiones (σ) generadas en una estructura por acción de agentes externos e internos (fuerzas, presión). Una manera de formular de modo simple esta Ley es mediante empleo de la deformación unitaria (ϵ):

$$\sigma_r = E \cdot \epsilon_c \tag{10}$$

que relaciona la tensión con la elongación unitaria. La expresión (10) es válida dentro del límite de elasticidad del material, donde se registra proporcionalidad directa entre incrementos de la tensión (σ) y estiramientos (δ) en la estructura afectada a esfuerzos.

El estiramiento/ contracción perimetrales implican una secuencia de deformaciones para el diámetro del conducto que verifica un patrón similar a las fluctuaciones de presión de Golpe de Ariete. Analizando la deformación diametral dada con el primer pico de sobrepresión, se tiene:

$$\sigma_r = \frac{\overline{R_v}}{A} \Rightarrow \sigma_r = \frac{p^* \cdot r}{A} \tag{11}$$

* donde $p = 1^\circ$ pico de sobrepresión (actuando como intensidad de carga q)

reemplazando la ecuación (11) en la expresión (10):

$$\varepsilon_c = \frac{p \cdot r}{A \cdot E} \tag{12}$$

(Timoshenko 1980).

se obtuvo la ecuación que relaciona la presión con la deformación perimetral unitaria (ε_c).

Resulta práctico y útil estimar la deformación diametral puesto que el diámetro del conducto es un parámetro de fácil acceso para su medición y normalmente viene tabulado en la data técnica de la cañería. La relación entre el perímetro de una circunferencia y su diámetro es constante, luego la deformación unitaria circunferencial es igual a la deformación unitaria diametral (Timoshenko 1980)

Sobre la base de este concepto, se halló la deformación circunferencial del anillo.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_d = \frac{\delta_d}{d} \Rightarrow \delta_d = \varepsilon_c \cdot d \tag{13}$$

Se empleó la expresión (12) para calcular la deformación circunferencial unitaria y la expresión (13) para estimar la deformación diametral. Se emplearon los valores de pico de presión obtenidos desde la solución (4), graficados en la figura 4.

Resultados y discusión

Se muestran en la tabla 3 la dilatación y contracción de la conducción del sistema I (tabla 2, en apartado II) en función de los picos y depresiones de la onda de presión durante el transitorio analizado. Se ha asignado, para el cálculo del área (A) en la ecuación (11) el valor 1 cm a la dimensión dX, en acuerdo con lo postulado para el análisis de anillos delgados (Timoshenko 1980).

Amplitud onda presión [m]	Amplitud onda presión [KPa] ¹	Tensión (σ) [KPa]	Estiramiento/ contracción perimetral unitaria (ε_c) [mm/m]	Estiramiento/ contracción diametral (δ_d) [mm]
26.27	256.135	186444.25	1.554	0.034
-26,20	-256.733	-186879.54	-1.557	-0.034
24,57	241.038	175455.00	1.462	0.032
-24.58	-241.135	-175525.42	-1.463	-0.032
23.62	231.719	168671.50	1.406	0.031
-23.30	-228.578	-166385.13	-1.386	-0.031
22.34	219.162	159531.10	1.328	0.029
-22.34	-219.160	-159529.63	-1.329	-0.029
20.74	203.466	148105.75	1.234	0.027
-21.06	-206.604	-150389.94	-1.253	-0.028

Tabla 3: Valores hallados de deformación perimetral unitaria y deformación diametral en función de la amplitud de onda (positiva y negativa) de la presión durante el Golpe de Ariete.

¹ * Pico de sobrepresión/ depresión (figura 4) respecto de la presión estática (32.34 m.c.a.)

** presión en la unidad de longitud estimada como intensidad de carga (q) [N/m]

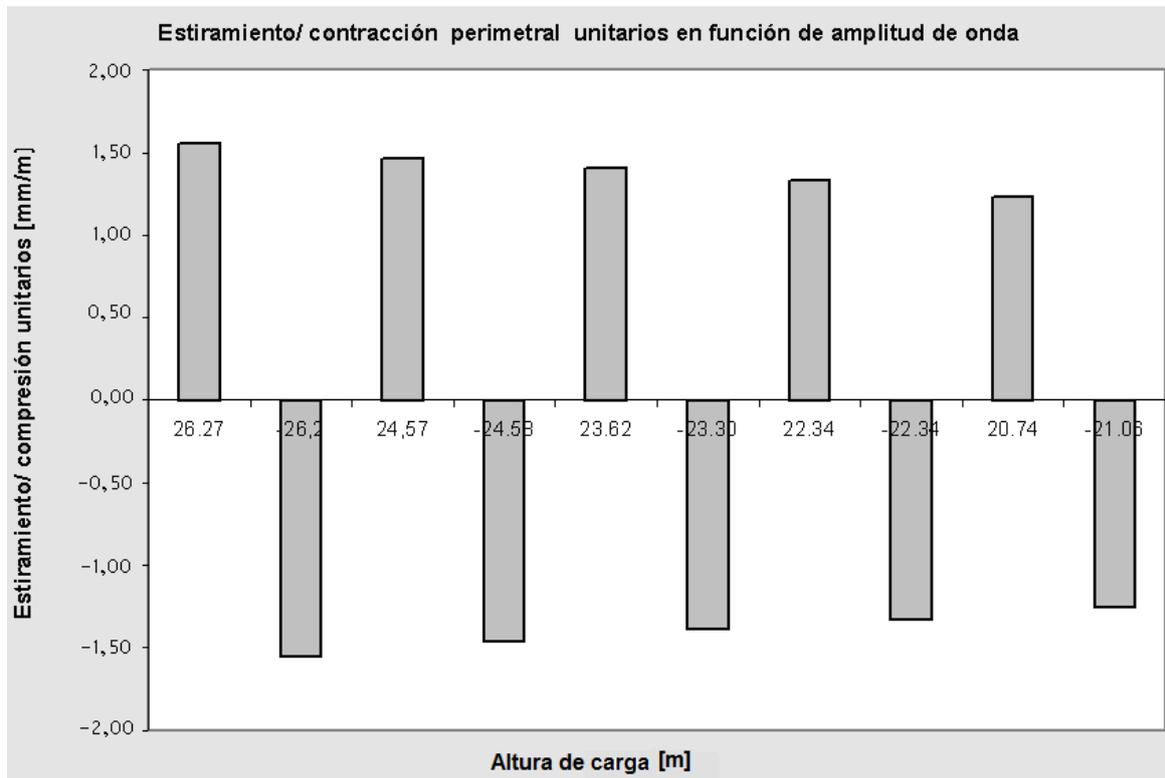


Figura 5: Estiramiento/ compresión unitarios del anillo en función de las oscilaciones de la presión transiente.

$$\text{Tenor de estiramiento (T): } \left[T[\%] = \frac{\delta_d}{d} \cdot 100 \right]_{(1^\circ \text{ pico sobrepresión})} = 0,15\%$$

La figura 5 muestra la respuesta del segmento anular de conducto a la carga que constituye la presión oscilatoria. Se observa la alternancia de las deformaciones elásticas en el sentido radial en sincronía con las oscilaciones de la presión, atenuándose en el tiempo del transitorio. Se observa, también, coherencia con el comportamiento de la carga instantánea (p) en atenuación y fase.

El tenor de estiramiento diametral dado con el primer pico de presión ha sido menor al 1%.

III) Análisis de la uniformización de la frecuencia en función de la variación del tiempo crítico.

El estudio del potencial *stress* que el Golpe de Ariete puede generar en estructuras fluidodinámicas es realizado frecuentemente investigando la magnitud de la sobrepresión y depresión alternadas que se suceden en el transcurso del fenómeno.

En estos estudios se procede a variar el parámetro de interés del sistema en cada prueba (por ejemplo, se varía el diámetro del conducto en cada experiencia). Las conclusiones que se obtienen están, en general, más relacionadas a la influencia que se pueda observar sobre la magnitud de la amplitud de la onda que sobre otros parámetros de onda

La vasta bibliografía referida al estudio de este fenómeno indica que el análisis de la amplitud de la onda ha sido investigado más frecuentemente en relación con el cambio de material del conducto. Un reducido y reciente número de trabajos analizan la influencia de parámetros como el diámetro en la amplitud de la onda, y este parámetro resulta de particular interés puesto que es comúnmente modificable en una estructura fluidodinámica.

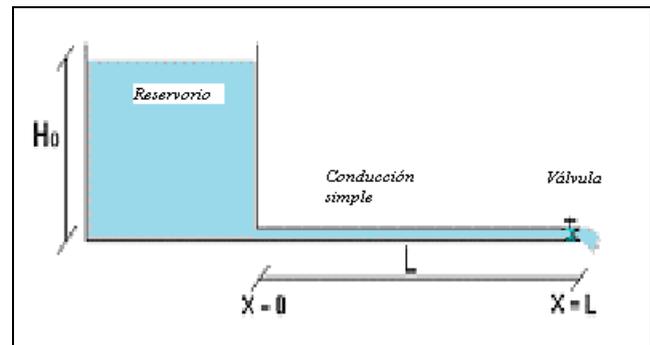
Se sabe que su influencia sobre la presión oscilatoria es ejercida de forma indirecta a través de la celeridad de onda (a) (Lázaro López, 1997). Los fundamentos que sustentan esta afirmación son la Ley de Conservación de Masa y La Ley de Conservación de Energía (Potter, 2014).

Materiales y Métodos

Se realizó análisis de la influencia del diámetro de la conducción en la amplitud de la onda de presión durante el Golpe de Ariete para un sistema- modelo simple y unidimensional formado por un reservorio, conducción simple, con una válvula que obtura el extremo libre del mismo. Se asignó un diámetro distinto en cada uno de los cuatro estudios realizados manteniendo el resto de los parámetros invariables (figura 1).

Tabla 4- Datos del sistema experimental.

Material del conducto: polietileno.
 Longitud: 352 m
 Diámetro interno: 94 mm
 Espesor pared: 8 mm
 Velocidad de régimen del fluido: 0.729 m/s
 Celeridad de onda: 270 m/s
 Tiempo de cierre de válvula: 0.06 s.
 (quasiinstantaneo).



(Brunone et al., 2000).

Figura 1: sistema- modelo simple.

El trabajo experimental, correspondiente a Bruno Brunone (Brunone et. al, 2000) concluye con una gráfica del registro de presión realizado mediante transductores colocados junto a la válvula, que es el punto donde la amplitud de las oscilaciones de esta variable alcanzan su mayor expresión. Se ha modelado este registro mediante aplicación del algoritmo analítico desarrollado arriba (ecuaciones 1 a 4) para la obtención de la solución que describe las oscilaciones de presión durante el transitorio, en función del tiempo y de la longitud de la conducción ($p(x,t)$). Se introdujo en el algoritmo la función de cierre como condición de contorno dinámica. El modelado de la presión durante el Golpe de Ariete para el sistema descrito ha sido efectuado para cada caso analizado, donde se asignó un valor de diámetro interno de conducto distinto, manteniendo constante el resto de las variables y también el material del conducto (polietileno) en todos los casos. Con el propósito de determinar la clase de relación matemática existente entre ambas variables se obtuvo el valor de celeridad correspondiente en función de cada diámetro y estos valores fueron aplicados en el algoritmo para obtener el modelado de la presión. En la tabla 5 se muestran los valores de diámetros aplicados y la celeridad de onda correspondiente, bajo iguales condiciones estructurales y operativas del sistema.

Resultados y discusión

El primer valor tabulado en tabla 5 pertenece al diámetro interno real del sistema, el segundo, tercero y cuarto, iguales un medio, tres medios y el doble del diámetro real, respectivamente.

Tabla 5: Diámetro interno aplicado y celeridad de onda en cada prueba

Prueba	Diámetro interno [mm]	Celeridad de onda [m/s]
1°	94 (real del sistema)	270,00
2°	47	378,00
3°	141	223,29
4°	188	193,95

La primera prueba se utilizó, además, como elemento para corroborar el nivel de ajuste del modelado mediante la solución analítica (ecuación 4) por comparación con el registro experimental (Brunone et al. (2000)). La figura 6 muestra la curva de presión del registro experimental en trazo continuo, y de su modelado analítico en trazo guionado:

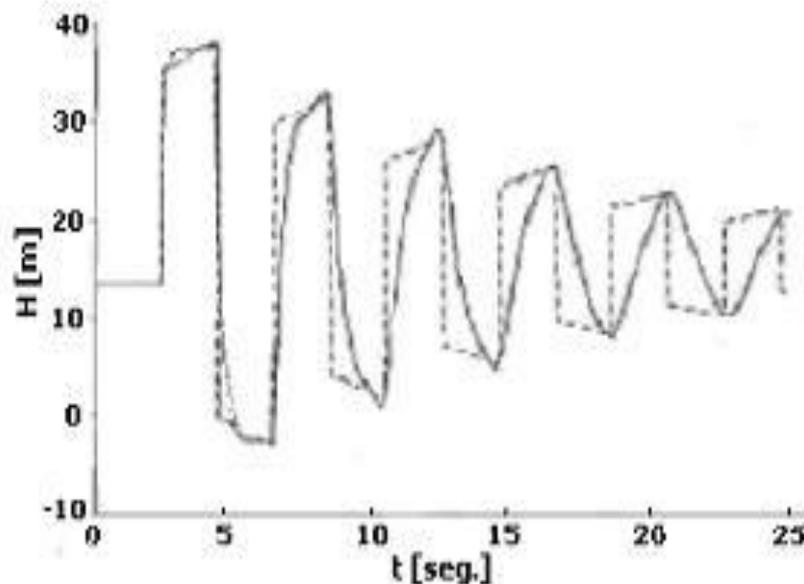


Figura 6: Registro de presión transiente (trazo continuo) y modelado (trazo guionado).

Se observa un buen ajuste en la reproducción de la amplitud en cada ciclo y además no se registra distorsión en la fase, indicando una adecuada representación de la onda real.

La solución (ecuación 4) se empleó para modelar los tres casos restantes. Los resultados se presentan en la figura 7. Al efecto de preservar la claridad de la figura no se ha incluido la gráfica modelada correspondiente al primer caso (diámetro real), que ya ha sido expuesta en la figura 6. Se pueden distinguir tres curvas modeladas en color más una curva de color negro que es propiamente el registro experimental. Cada curva muestra la oscilación de la presión durante el fenómeno como función de cada diámetro interno aplicado. La gráfica de color verde se obtuvo al emplear el menor diámetro (segundo caso analizado, ver tabla 5), la respectiva de color azul corresponde al diámetro indicado en el tercer caso y la de color rojo, al diámetro mayor (cuarto caso analizado).

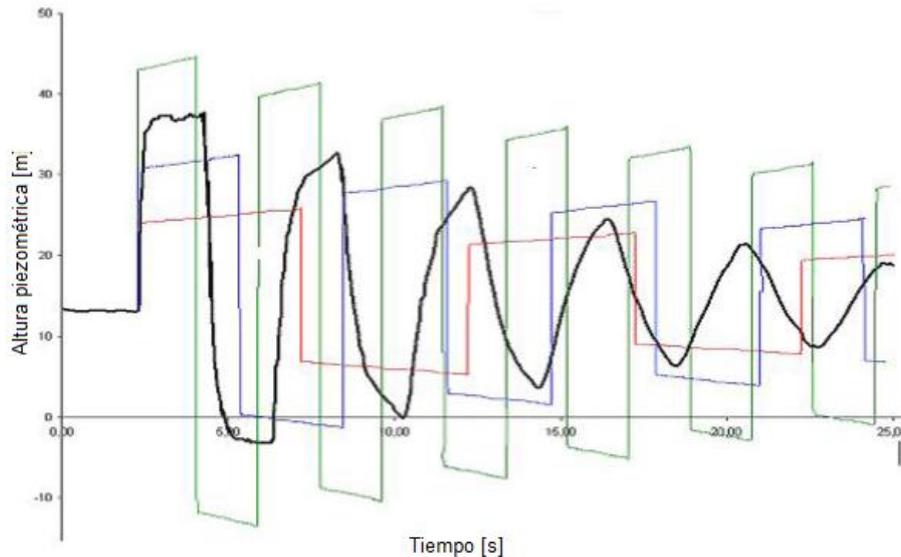


Figura 7: Curva experimental de golpe de ariete (trazo negro) y curvas modeladas: trazo verde, diámetro: 47mm, trazo azul, diámetro: 141 mm y trazo rojo, diámetro: 188 mm.

Las gráficas de la figura 7 muestran dos resultados importantes: el primero es el cambio de la amplitud visible de la onda en función de los distintos diámetros de conducto. Esta diferencia en la amplitud se da en términos de una relación inversa respecto del diámetro, es decir, el incremento del diámetro muestra una disminución de la amplitud de onda (para las mismas condiciones estructurales y operativas en el sistema). Es esperable una relación de estas características, en virtud de las leyes de Conservación de Masa y de Energía puesto que la sección transversal de conducto (y en consecuencia, el diámetro del mismo) influye en la magnitud del caudal másico y en la transformación de energías cinética y potencial del fluido. Este primer resultado se analiza en el apartado (a). El segundo resultado se refiere a la variación de la frecuencia de la onda respecto al cambio de diámetro, tema que se expone en el apartado (b₁) y se deriva de ello una referencia fundamental en el apartado (b₂).

a) *Influencia del diámetro interno del conducto en la amplitud de la onda de presión*

A la vista de los resultados obtenidos, expuestos en las figuras 6 y 7, donde se verifica la influencia del diámetro interno del conducto en la amplitud de las ondas de presión, con el objetivo de hallar una formulación matemática que exprese la vinculación entre ambas variables y que permita cuantificar esta relación, se han tabulado los distintos diámetros analizados y el primer pico de presión observado cada uno de los casos. Este pico es el de mayor magnitud puesto que los siguientes alcanzan valores progresivamente menores. Esto se debe a efectos disipativos implícitos en todo fluido en movimiento, como la viscosidad del fluido y la fricción ejercida en la interfase fluido, pared interna del conducto, que sustraen energía al flujo circulante. Por lo tanto, el primer pico de presión es referente de la magnitud del Golpe de Ariete.

La figura 8 exhibe en el plano puntos formados por el par sobrepresión-diámetro interno respectivo. Se visualiza en esta figura la tendencia decreciente de la presión conforme el diámetro aumenta. Mediante aplicación del Método de Mínimos Cuadrados se ha encontrado que esta tendencia se ajusta a una relación de clase exponencial decreciente, cuya expresión matemática, (indicada en el margen derecho superior esa figura) ha sido evaluada mediante la estimación del Coeficiente de Determinación (R^2). El valor hallado de R^2 es 0,991 (muy cercano a 1) lo que valida la tendencia exponencial decreciente indicada.

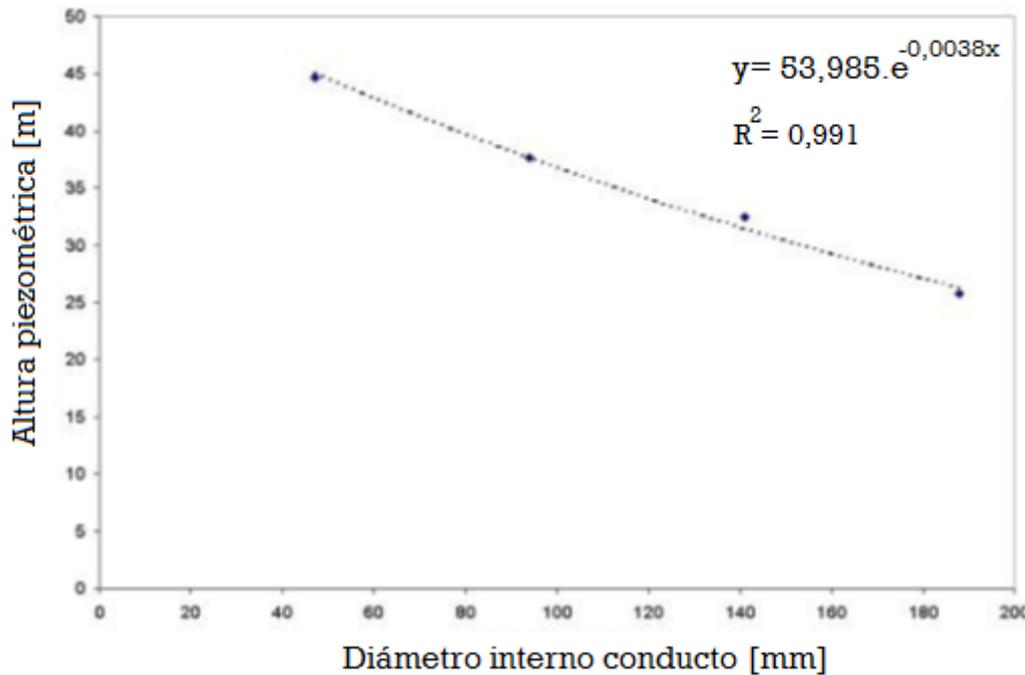


Figura 8: Primer pico de presión en función del diámetro interno de conducción (puntos azules) y tendencia exponencial decreciente (curva guionada).

b₁) *Influencia del diámetro interno del conducto en la frecuencia de la onda de presión*

Otro resultado hallado ha sido la sensibilidad que la frecuencia de onda muestra respecto de la variación de diámetro de la estructura confinante. Esta relación entre ambas variables es menos evidente que el cambio de la amplitud ya analizado y se requiere del empleo de algoritmos de modelado para poder visualizarla. Se observa en la figura 7 que la dependencia de la frecuencia respecto del diámetro interno se dá en términos de proporcionalidad inversa. La curva de trazo verde, obtenida para el diámetro menor (47 mm) es, a simple vista, la que presenta mayor cantidad de ciclos en el intervalo de tiempo analizado (los primeros 25 segundos desde que se provoca el Golpe de Ariete). En contraparte, para el diámetro mayor (188 mm) se obtuvo la curva de trazo rojo, que muestra la menor cantidad de ciclos en ese intervalo de tiempo. La frecuencia, calculada partiendo de los ciclos de la onda en cada una de los casos analizados, es detallada en la siguiente tabla:

Tabla 6: Relación entre la frecuencia de la onda de presión y el diámetro del conducto.

Prueba	Diámetro interno [mm]	frecuencia [s ⁻¹]
1°	94 (real del sistema)	0.240
2°	47	0.210
3°	141	0.146
4°	188	0.092

Se ha hallado una relación de clase cuadrática invertida, que se indica en el cuadro superior derecho de la figura 9. El ajuste de esta expresión ha sido evaluado mediante el mismo método ya aplicado, obteniendo una bondad en el ajuste muy cercana a 1, indicada por el coeficiente R²:

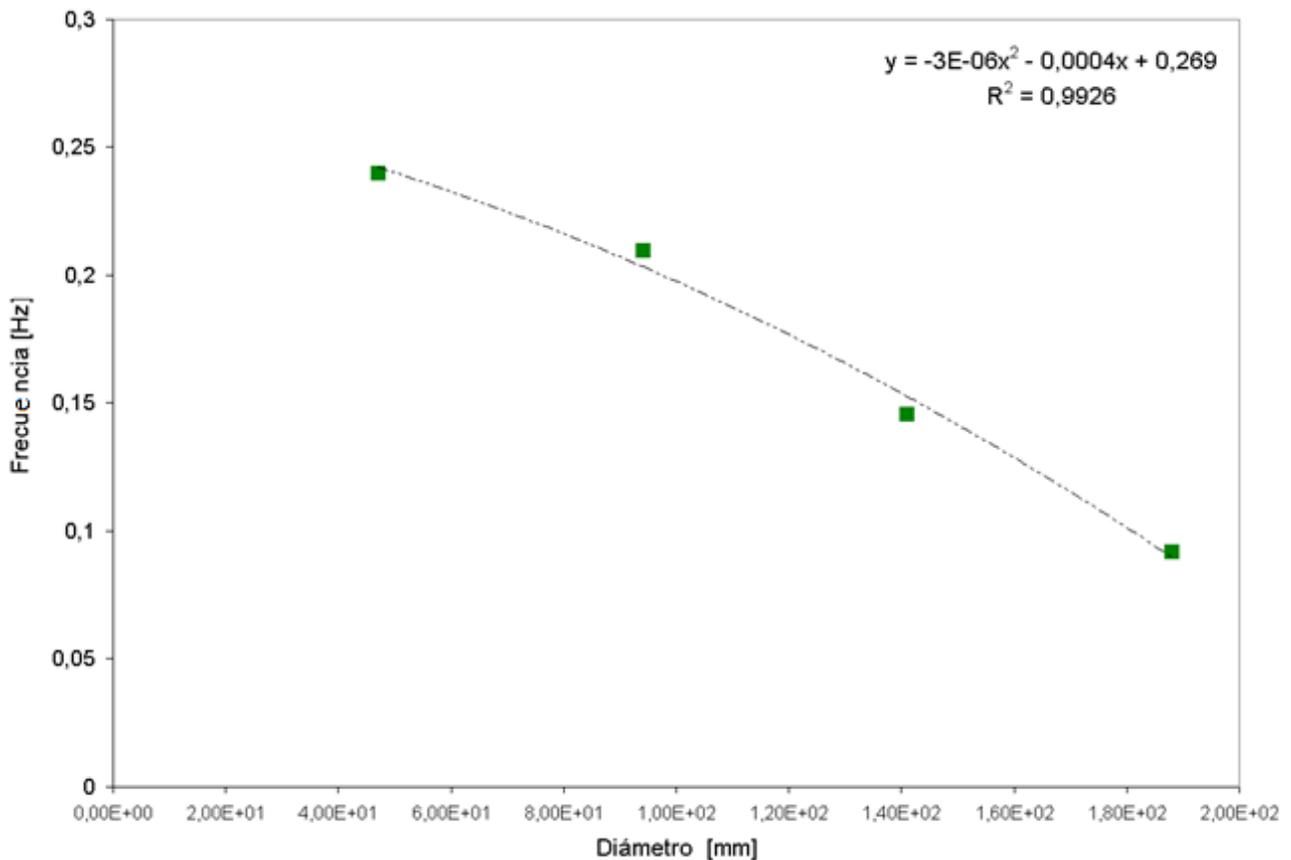


Figura 9: Relación inversa, no lineal entre el diámetro del conducto y la frecuencia de onda de presión en el sistema analizado.

La solución aplicada para modelar el fenómeno ha permitido graficar la onda y consecuentemente los ciclos de presión transiente en cada caso estudiado. Los resultados alcanzados (figura 7) indican un decrecimiento notorio de los ciclos de onda conforme el diámetro de la conducción aumenta su valor en una vez y media o en el doble del valor original.

b₂) Ponderación de la frecuencia

La evaluación del Golpe de Ariete en un sistema se realiza en general, y como se indicó anteriormente, mediante la estimación de la amplitud de la onda como variable determinante de su expresión. Enunciados, fórmulas y desarrollos de *software* muestran que el interés principal se ha centrado en este aspecto desde varias décadas atrás hasta la actualidad. Sin embargo, desde un panorama más amplio, aparece la frecuencia de la onda como otra variable de peso. Esta última variable se vincula con el tiempo crítico, del que se ha hecho mención anteriormente.

Si se observa la información que estas dos variables aportan, se concluye que la amplitud se restringe a la intensidad de la presión, cuyo mayor exponente es el primer pico, y los siguientes van decreciendo por los efectos disipativos que afectan al fenómeno. Pero una concepción más amplia debe incluir a la frecuencia de la onda que, en conjunto con la amplitud, proveen información más completa del suceso a los efectos de lograr una descripción más acabada del evento.

La ponderación de esta variable debe ser efectuada en las mismas condiciones estructurales y operativas del sistema. Esto significa que en cada prueba experimental se debe asegurar igualdad de frecuencia de onda en igual lapso de tiempo. Sin embargo, en las pruebas este aspecto no es contemplado puesto que en el momento de evaluar la injerencia de una variable en el Golpe de Ariete (como el caso analizado de variación de diámetro) se realiza el análisis fijando el valor del

resto de las variables geométricas, por ejemplo la longitud del conducto, lo cual parecería ser, *a priori*, un criterio correcto. Los resultados logrados derivados de la experimentación indican adecuadamente la afectación de la amplitud de la onda debido al cambio de diámetro, sin embargo se observa que la frecuencia es distinta con cada diámetro de conducto estudiado. Un criterio más realístico consiste, entonces, en efectuar las experiencias variando el parámetro en estudio en un sistema pero asegurando que la frecuencia sea la misma para cada experiencia. Para ello es necesario abandonar la idea de mantener constante la longitud del conducto por otra que verifique la igualdad de frecuencia en un determinado lapso de tiempo, durante el transcurso del fenómeno. Esto se logra ajustando el valor de la longitud convenientemente en cada prueba realizada.

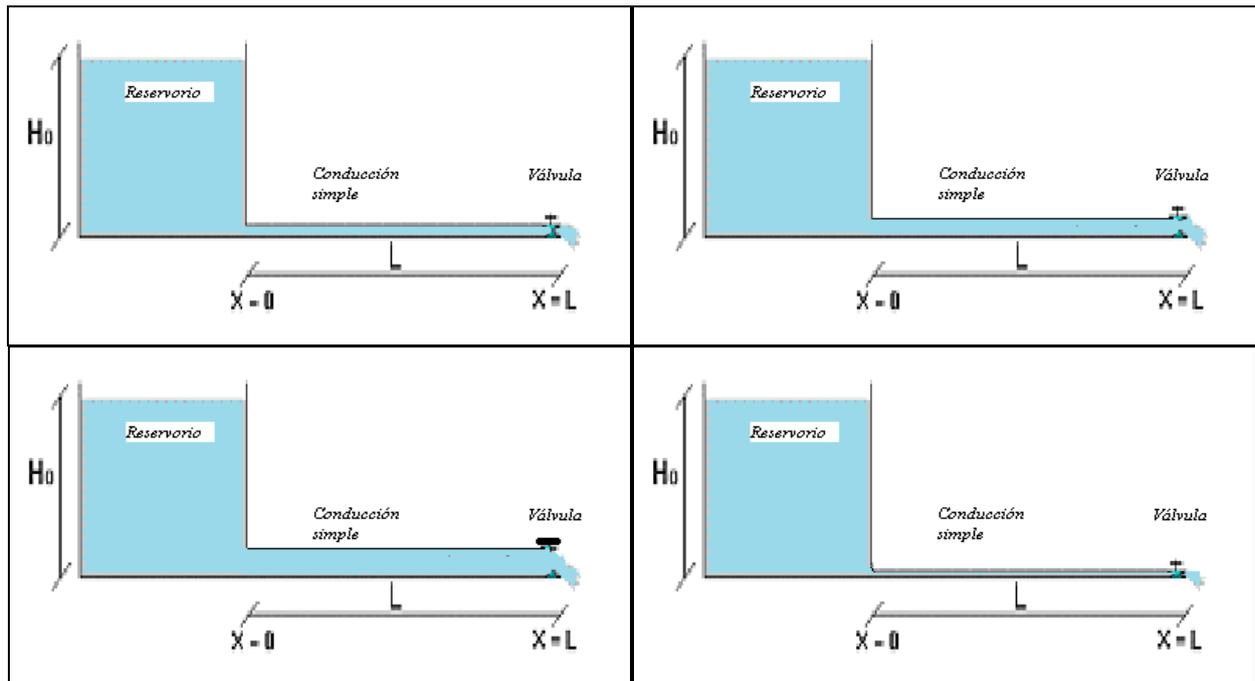


Figura 10: Análisis del Golpe de Ariete variando el diámetro y manteniendo constante la longitud.

Materiales y Métodos

Se ha trabajado sobre este particular, aplicando el criterio indicado en el final del inciso b₂) de la sección III). Se evaluó la longitud correspondiente (*l*) en función del cambio de diámetro en cada uno de los cuatro casos manteniendo el valor del tiempo crítico (*t_c*) uniforme (se adoptó el valor del tiempo crítico correspondiente al registro experimental). Los resultados se obtuvieron mediante la expresión:

$$t_c = \frac{2 \cdot l}{a} \quad (14)$$

(Mataix Plana – (1982); Mendiluce Rosich (1987))

El tiempo crítico se define como el tiempo que tarda la onda de presión en recorrer desde el punto de origen de la onda hasta el extremo del conducto que se conecta al tanque en un viaje de ida y retorno al punto de origen.

El valor de la longitud (para cada diámetro de conducción) que genera la misma frecuencia de onda se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 7: Uniformización del tiempo crítico al valor del correspondiente al sistema experimental mediante valor de longitud de conducto adecuado al valor del diámetro aplicado en cada caso.

Prueba	Diámetro conducto [mm]	Tiempo crítico [s]	Longitud conducto [m]	Δ longitud [m] (respecto a valor real del sistema)
1°	94 (real del sistema)	2.607	352,00	0.00
2°	47	2.607	492,80	140.80
3°	141	2.607	291.06	- 60.94
4°	188	2.607	200.45	- 151.55

Se ha encontrado una relación de carácter inverso entre el diámetro y la longitud del conducto, como se muestra la figura 11, mediante aplicación del criterio de Mínimos Cuadrados. La ecuación hallada indica una tendencia logarítmica inversa. Esta se muestra en el margen superior derecho de la figura.

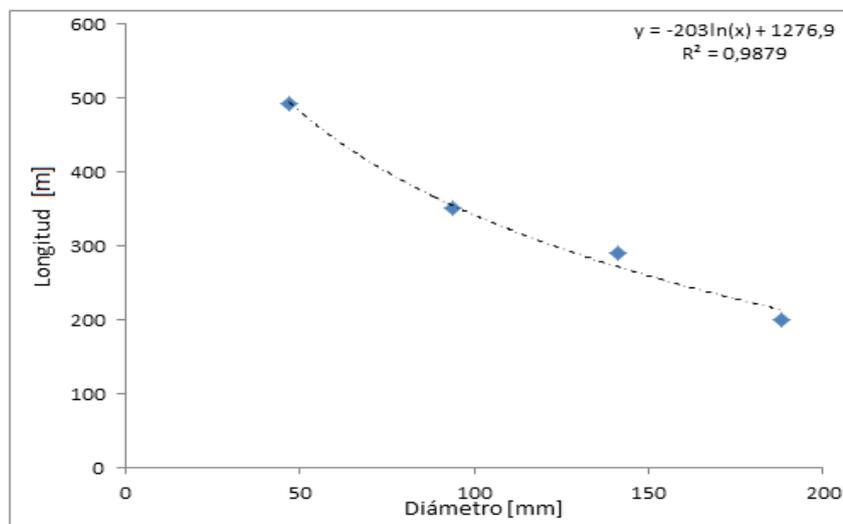


Figura 11: Relación entre el diámetro del conducto y su longitud para igual tiempo crítico en cada prueba.

La línea guionada indica el ajuste a la tendencia logarítmica. La estimación del Coeficiente de Determinación (R^2) de 0.9879 (muy próximo a 1) confirma la bondad del ajuste.

Se ha encontrado una diferencia notable de longitud respecto de la longitud real del sistema analizado al variar el diámetro (última columna de la tabla 7). Un diámetro igual a la mitad del real determina que su longitud, para obtener la misma frecuencia de onda, debe ser un 40% más largo mientras que si el diámetro se duplica, la longitud es un 43% menor a la del conducto real del sistema estudiado. Este hecho muestra la sensibilidad de la frecuencia de la onda a la variación del diámetro del conducto.

VI) *Análisis de cambios en la frecuencia de la onda en función del material del conducto.*

El material del conducto es otro parámetro determinante de las características del Golpe de Ariete. Condiciona a la amplitud de la onda de presión y su forma. El desarrollo de numerosos trabajos experimentales a lo largo de la centuria pasada y durante los primeros años del siglo actual indica que el Golpe de Ariete se manifiesta más severamente en instalaciones donde el material del conducto muestra mayor *Rigidez a la Flexión* (ψ) (parámetro definido como el producto entre el *Módulo de Elasticidad* (E) del material del conducto y el *Momento de Inercia* (I_z)). La Rigidez a la Flexión constituye una medida valorable de la resistencia que el material ofrece a la acción de flexión:

$$\psi = E \cdot I_z \tag{15}$$

caracterizado, éste último factor, como la integral del producto entre un diferencial de área (dA) y la distancia (y) al cuadrado, que separa al diferencial de área de la línea neutra (línea que coincide con el eje axial del conducto cuando su geometría es cilíndrica)

$$I_z = \int y^2 \cdot dA \quad (16)$$

(Timoshenko, 1980).

Correlaciones realizadas entre el primer pico de presión de Golpe de Ariete y la *Rigidez a la Flexión*, indican que existe una vinculación de carácter *no lineal* entre ambas variables, hecho que demuestra la importancia del material del conducto en las características y desarrollo del transiente (Provenzano, 2013).

La Rigidez a la Flexión toma valores mayores (para una misma geometría del caño o barra) cuando el módulo de elasticidad es mayor. La expresión (15) permite observar el carácter directamente proporcional que vincula a ambas variables cuando se mantienen fijos los parámetros geométricos del conducto (lo que permite fijar el Momento de Inercia como constante).

Materiales con valores elevados de Módulo de Elasticidad son los metálicos y también materiales de construcción (por ejemplo, hormigones) empleados en la fabricación de cañerías para servicio. Por lo tanto se espera que, para una misma perturbación aplicada en instalaciones de iguales dimensiones geométricas y distinto material de conducto, la amplitud de la presión transiente sea mayor en el caso de materiales metálicos y otros que presenten mayor resistencia a la sollicitación por flexión.

Se tiene, por otra parte, que la *celeridad* de la onda de presión (a), que se transmite desde el punto donde se produce la perturbación (apertura/ cierre de válvula, arranque y parada de sistemas de impulsión) aguas arriba y aguas abajo de ese punto, es otro parámetro del que dependen las características de la presión transiente. El Módulo de Elasticidad del material condiciona también a la celeridad. Valores típicos de celeridad se encuentran en el rango de 250 m/s a 1400 m/s, donde los más bajos corresponden a conducciones cuyo material presenta menor Rigidez a la Flexión como los poliméricos (polietileno, PVC) mientras que superando los 900 m/s, corresponden a conductos de materiales de alta Rigidez a la Flexión (metálicos, hormigonados) (Mendiluce Rosich, 1987; Lázaro López, 1995; Tijjseling, 2001).

La frecuencia de la onda tiene un rol principal en estudio del fenómeno, como surge del análisis realizado en la sección III de este informe.

El objetivo en esta sección es hallar una formulación que identifique la forma en que el material se relaciona con la frecuencia.

Históricamente, el tratado que se ha dado a esta relación a permanecido en un segundo plano, siendo un número menor de investigadores quienes han dedicado atención a este particular. Algunos trabajos destacados indican una relación entre los efectos disipativos (debido a la viscosidad del fluido y a la fricción en la interfase fluido-conducto) y la frecuencia de la onda, señalando que las frecuencias menores generan una respuesta de base ligada a estos efectos disipativos (Brown, 1965; Holmboe & Rouleau, 1967; Trikha, 1975). No obstante, la prosecución del estudio que incluye a la frecuencia como variable activa muestra discontinuidad en la producción de resultados.

En vista de lo expuesto, se conoce que la celeridad de onda depende (entre otros) del Módulo de Elasticidad del material. Resta hallar una conexión entre este último parámetro y la frecuencia de la onda.

Materiales y métodos

Se ha investigado sobre la posible conexión anteriormente indicada entre esas variables.

El tiempo crítico (t_c), tiempo que tarda la onda de presión en recorrer la longitud del conducto desde el punto de origen de la onda (dispositivo de control de flujo) hasta el extremo donde se

conecta con el tanque, en un viaje de ida y retorno al punto de origen (ver figura 1), se relaciona con la celeridad de la onda.

Se ha trabajado con los datos del sistema de tabla 4 (Brunone (2000)) tomando como primera prueba el sistema real (con conducción de polietileno) y luego se procedió a ir reemplazando la conducción (en forma sucesiva) por otras de idénticas dimensiones y diámetro, pero de material de la conducción indicado en la tabla 8, y en cada caso ha sido calculada la celeridad de onda. El resto de los parámetros del sistema se mantuvieron constantes. El fluido es agua a temperatura ambiente.

Tabla 8: Relación entre la celeridad de la onda (como en función del material del conducto) y la frecuencia de la onda obtenida para el sistema fluidodinámico analizado:

Material conducto	Celeridad de onda [m/s]	Frecuencia [Hz]
Polietileno	487.58	0.346
Hormigón	1028.04	0.730
Aleación de Mg	1164.60	0.827
Aluminio 6061-T6	1246.07	0.885
Hierro Fundido	1291.13	0.916
Cobre	1319.78	0.937
Acero	1367.25	0.972

Resultados y discusión

Los datos de tabla 8 han sido graficados obteniendo la figura 12, donde se muestra la relación entre la celeridad de la onda de presión y la frecuencia, en cada caso analizado:

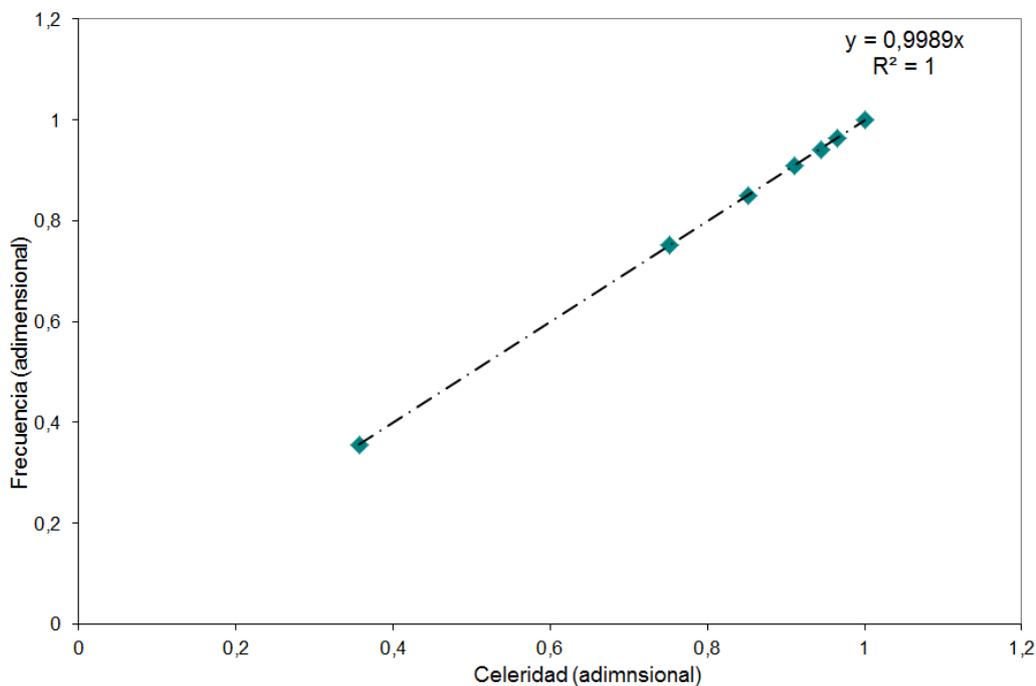


Figura 12: Relación entre celeridad de onda (en función del material del conducto) y la frecuencia de la onda (adimensionalizadas), durante el Golpe de Ariete.

Se encontró una relación directamente proporcional (lineal) que vincula a la frecuencia en dependencia con la celeridad de la onda. Se aplicó el Método de Mínimos Cuadrados para determinar esta relación (indicada en el margen derecho superior de la figura 12), siendo la

bondad del ajuste confirmado por estimación del Coeficiente de Determinación (R^2). El valor hallado de R^2 es 1 observando que la ley lineal es corroborada de modo perfecto.

Se deriva de esto que la mayor rigidez a la flexión (verificada a través de módulo de elasticidad del material del conducto) indica una mayor frecuencia de la onda.

Se esperaba hallar una ley de carácter directamente proporcional debido a que, intuitivamente, una mayor celeridad implica menor tiempo insumido en recorrer determinada longitud de conducción, es decir, se espera un menor periodo de la onda y, consecuentemente, un mayor valor de la frecuencia.

V) Evaluación de la celeridad de onda incluyendo los efectos de interacción fluido estructura.

La onda de presión transiente puede propagarse a través de una conducción sin modificar su forma si esa conducción es totalmente rígida, sin embargo éste es un caso ideal puesto que todo material posee condición elástica en mayor o menor grado. Esta condición se verifica, durante el Golpe de Ariete, en la elongación y contracción alternadas, axial y radial de la conducción por donde circula el fluido, producto de la transferencia de parte de la energía cinética desde el fluido hacia las paredes de la conducción y de éstas hacia el fluido, consecutivamente. La condición elástica implica que la conducción va retornando progresivamente a sus dimensiones originales conforme el fenómeno va atenuándose hasta extinguirse, siempre que las tensiones axiales y radiales que la afectan (provocadas por la transferencia de energía indicada, durante el fenómeno) no superen el límite de proporcionalidad o límite de *Hooke* (propio de cada material) puesto que superado éste se producen deformaciones permanentes en el material del conducto.

Estas acciones mecánicas sobre la conducción determinan claramente una interacción entre el fluido y la estructura de la instalación durante el Golpe de Ariete. La literatura publicada con relación a esta interacción (FSI, siglas en idioma inglés) es relativamente reciente y se aproxima más al estudio de vibraciones en conducciones y accesorios de la instalación, considerando a esta interacción desde el capítulo de la Física que concierne al movimiento oscilatorio en sus distintas expresiones (libre, amortiguado, forzado o resonante), aplicando elementos y conceptos de la *Teoría de Vibraciones* al análisis y formulación de modelos que describen efectos vibratorios en la instalación (Tijsseling- Vaugrante (2001); De Jong (1994); Tentarelli (1990)).

Desde un enfoque más relacionado con la Mecánica, ciertos procesos de interacción entre el fluido y la estructura han sido identificados como responsables de la transferencia de energía entre ambos componentes del sistema: uno de ellos se conoce como *Poisson Coupling*, que se desarrolla en toda la extensión de la conducción y se genera por la acción de pulsos de presión en el fluido, consecuencia del estado transitorio provocado, por ejemplo, por el accionamiento de válvulas y sistemas de impulsión. Estos pulsos inducen tensiones axiales y radiales (acopladas) en las paredes de la cañería y las consecuentes deformaciones elásticas de longitud y diámetro, dependientes del *Coeficiente de Poisson* (ν), propio de cada material. En materiales que presentan menor rigidez este mecanismo puede generar, inclusive, vibraciones localizadas dando lugar a la existencia, propagación e interacción de diferentes clases de esfuerzos en la conducción como tensiones axiales y tensiones de cizalla (Gomes da Rocha y col. (2012); Stuckenbruck y col (1985)).

Una de las más difundidas de Golpe de Ariete es la Teoría Clásica, donde la onda es modelada mediante expresiones que no incluyen los efectos de interacción fluido-estructura citados. Los resultados alcanzados muestran una estimación correcta de los picos de presión y periodo de onda, pero fallan generalmente en el modelado de la dispersión del frente de onda. Otros aspectos desestimados incluyen efectos como el contenido de aire en el líquido circulante, comportamiento no elástico de ciertas clases de materiales del conducto, interacción de la cañería con el anclaje, acción radial debido a tensiones y cambio de dirección del fluido debido a accesorios como curvas, codos y tees, entre otros (Tijsseling, Lambert et. al. (2008)).

La validez de los resultados logrados mediante el empleo del modelo de la Teoría Clásica queda supeditada, entonces, a una cuantificación precisa de la celeridad de la onda de presión, para lo cual, una vía es obtener el valor de esta variable de modo experimental.

Otra vía es la aplicación de la Fórmula que se expone a continuación y que contempla la inclusión de esos efectos mediante un factor α (alfa) con el cual se introduce el *Coefficiente de Poisson* (ν) del material del conducto en el algoritmo:

$$a_s = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \alpha \cdot (K/E)(D/e)}} \quad (19)$$

α : parámetro de constricción axial, dependiente del *Coefficiente de Poisson*.

(Tijsseling, Lambert et. al. (2008)).

Se ha evaluado la estimación de la celeridad de onda mediante la expresión de *Joukowsky*, que no incluye en su expresión fenómenos de constricción axial / expansión radial del conducto y se ha probado la fórmula (19) propuesta con el objetivo de cuantificar el error en la estimación al aplicar la expresión de *Joukowsky*.

Materiales y métodos

Se aplicaron la expresión de *Joukowsky* (fórmula (20)) y la fórmula (19) al sistema fluidodinámico analizado para determinar el valor de la celeridad de onda (a) sin contemplar efectos de la interacción fluido-estructura y la ecuación que permite obtener la celeridad (a_s) incluyendo efectos de la interacción.

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + (K/E)(D/e)}} \quad (20)$$

(Joukowsky (1904))

Se determinó el primer pico de presión (como altura de carga) en el sistema fluidodinámico analizado mediante la expresión de *Allievi*, aplicando el valor de celeridad calculado con la expresión (20). Seguidamente se estimó ese primer pico con el valor de celeridad que incluye tales efectos. Se calculó la diferencia de presión entre ambos casos y se determinó la incidencia que la interacción fluido-estructura produce en la presión transiente como medida de ponderación para el sistema analizado (ver datos del sistema en tabla 4).

Resultados y discusión

Se muestran en la tabla 9 los valores de celeridad y presión (primer pico) obtenidos:

Tabla 9: Primer pico de presión calculado con valor de celeridad sin incluir efectos FSI e introduciendo efectos FSI para el sistema analizado:

Material conducto		Celeridad [m/s]	Amplitud 1° pico de presión [m.c.a]
Poliétileno ($\nu = 0,4$)	(desestimando FSI)	270,00	20,06
	(incluyendo FSI)	293,54	21,81

Diferencia entre picos de presión:

$$\Delta H = 21.81 \text{ m} - 20.06 \text{ m} = 1,75 \text{ m} \quad (\approx 10,17 \text{ atm.})$$

Luego, el primer pico de presión (el más crítico) es 0,17 atmósferas mayor al primer pico calculado mediante la expresión de *Joukowsky*.

La ponderación de esa diferencia se ha efectuado por comparación entre la diferencia de presión (ΔH) y el pico de presión calculado con el valor de celeridad (a):

$$\frac{\Delta H}{H_{(a)}} \cdot 100 = 8,76 \%$$

Esta diferencia de altura del orden del 9 por ciento aproximadamente (para el caso analizado, donde la conducción es de polietileno) está indicando que la interacción fluido-estructura ejerce una influencia apreciable en la magnitud del pico de presión.

No obstante este nuevo valor de primer pico de presión, mayor en ese porcentaje, no implica riesgo de deformación permanente de la conducción puesto que es sensiblemente menor respecto del valor límite de tensión elástica del polietileno.

Conclusiones

El análisis de Golpe de Ariete, focalizado generalmente desde el lado del fluido circulante y sus características, ha sido abordado en este trabajo desde el lado de la instalación que lo conduce y la influencia de algunos de los parámetros estructurales más importantes. Se ha abordado también desde la interacción mutua entre el fluido y la estructura confinante.

En la mayoría de los trabajos y papers publicados se asume que la cañería no sufre deformaciones durante el transiente. El diámetro de la conducción con valor constante es una hipótesis común, sin estudiar la respuesta de la estructura. Sin embargo, en el análisis realizado, se ha mostrado que el sistema es sensible a las solicitaciones por Golpe de Ariete. El carácter de esta respuesta se da básicamente en términos de tensiones tangenciales inducidas y de deformaciones radiales, que han sido analizadas.

Se ha logrado establecer la vinculación directa que existe entre el Golpe de Ariete y las tensiones inducidas en la estructura mediante formulaciones algebraicas sencillas, que permiten visualizar esta relación. Las dilataciones y contracciones de la conducción manifiestan un patrón de comportamiento alternante, en consonancia con la carga que las genera y, además, los cambios de dilatación a contracción y viceversa se dan en tiempos muy breves. Si bien las tensiones están dentro del límite de elasticidad en el sistema analizado, el carácter alternado de las mismas está mostrando que la estructura queda expuesta a un régimen severo de tensiones fluctuantes.

En el caso particular de este sistema, la conducción es de cobre, lo cual confiere un Módulo de Rigidez elevado (debido al valor del Módulo de Elasticidad de este material) por lo tanto era esperable que el tenor de estiramiento calculado en el apartado *Resultados* de la sección II) haya arrojado un valor menor al 1 por ciento. Por otra parte, ese valor depende del diámetro del conducto, que en el sistema analizado, es de 22,1 mm (muy pequeño) y de los picos de presión (que no han sobrepasado los 27 m.c.a., es decir, algo mayor a 2,5 atm, amplitud de presión moderada).

Sobre estos temas, los intentos para analizar la relación entre el transiente y la conducción se han remitido mayoritariamente a su estudio desde la *Teoría de Vibraciones* aplicadas a estos casos mientras que la investigación desde la concepción *Mecánica* acerca de esa relación ha sido mínimamente explorada. No obstante, resulta interesante este enfoque pues aporta información sustancial para comprender mejor al fenómeno y las acciones derivadas que provoca en estructuras, como se muestra en el desarrollo expuesto arriba.

Otro elemento estructural es el diámetro de la conducción, parámetro geométrico que observa una clara injerencia en aspectos múltiples de la onda de presión transiente, como ha quedado demostrado en la sección III). Su incidencia sobre la amplitud de la onda de presión se podría intuir a priori (puesto que un incremento del diámetro del conducto, por ejemplo, supone

disminución de la velocidad del fluido conforme la Ley de Continuidad), sin embargo, la cuantificación de esa relación no resultaba tan evidente. Las gráficas obtenidas han sido concluyentes al respecto y la relación exponencial decreciente hallada entre estas dos variables indica una dirección precisa acerca de la forma en que la amplitud disminuye con el incremento del diámetro. Se desprende de esta relación, además, una consigna que advierte que todo cambio de diámetro en un tramo de conducción (hecho común en instalaciones que transportan fluidos) debe ser estudiada con mayor cuidado en vistas de no generar un incremento de la magnitud de efectos indeseados como el Golpe de Ariete.

Otro aspecto que resulta novedoso ha sido la sensibilidad que la frecuencia de la onda muestra con el cambio de diámetro, como se muestra en la figura arriba citada. Este aspecto, menos evidente, está indicando que la modificación del diámetro del conducto introduce también variación en la frecuencia, en acuerdo con los resultados obtenidos. Concretamente, se observa en la figura 7 el decrecimiento perceptible de los ciclos de onda, provocado por el incremento del diámetro de la conducción en el doble del valor original, y viceversa. Se deriva de esto que modificaciones del diámetro deben ser efectuadas sólo en casos debidamente justificados y con un estudio previo de las variación que genera en la onda de presión transiente.

Si se observa la onda transiente, se advierte que la información que aporta la amplitud de onda se restringe a la magnitud de la presión (instantánea) que debe soportar la conducción, donde cada oscilación sucesiva resulta de menor intensidad por los efectos disipativos que afectan al fenómeno. Este hecho reviste gran importancia como indicador del mayor o menor grado de severidad del evento transitorio y de las tensiones inducidas, sin embargo una concepción más amplia debe incluir también a la frecuencia de onda como sujeto de análisis puesto que ésta es indicadora del modo en que se repiten las oscilaciones.

La idea de establecer como parámetro fijo al tiempo crítico en vez de establecer una longitud de conducto fija resulta conveniente al ser la vía que asegura la uniformización de la frecuencia en el intervalo de tiempo analizado durante el transitorio, en los distintos escenarios analizados.

Se ha investigado también el material de la conducción como factor que condiciona a la frecuencia de la onda de presión. La figura 12 expone el resultado de su incidencia sobre esa variable. Se ha encontrado una relación de carácter lineal, directamente proporcional entre ambas variables, que permite de manera sencilla (mediante las expresiones algebraicas que relacionan la celeridad de la onda con la frecuencia) y directa obtener, para un mismo sistema hidráulico donde se modifica sólo el material del conducto, la frecuencia de la onda de presión. Esta expresión resulta práctica para la cuantificación de la frecuencia, que aporta a la vez información sobre las características del transitorio.

Ha sido investigada, también, la inclusión de efectos que originados en la interacción fluido-estructura (ó FSI). Se ha analizado uno de esos efectos, conocido como *Poisson Coupling*, mediante el cual se introduce en el algoritmo la constricción axial observada en la conducción, que depende del *Coficiente de Poisson* y de la propiedad de elasticidad del material. Los resultados obtenidos en el sistema fluidodinámico investigado indican que la sobrepresión llega a una magnitud que supera en un 9 por ciento (prácticamente) a la calculada desestimando el parámetro de *Poisson* en el cálculo. Este porcentaje es apreciable por su magnitud y afirma la importancia de contemplar aspectos propios de la interacción entre el fluido y el material confinante. El polietileno presenta un coeficiente de *Poisson* elevado ($\nu = 0,4$) y materiales que presentan alta flexibilidad como poliméricos, cauchos y distintas clases de gomas y siliconas poseen valores de *Poisson* mayores aún (hasta $\nu = 0,5$) mientras que materiales de alta rigidez a la flexión, como los metálicos en general, presentan valores del orden de $\nu = 0,3$ o menores por lo que evidentemente la diferencia de celeridades (a y a_s) será menor en estos últimos y, consecuentemente, menor será la diferencia entre los picos de presión. Sin embargo (y básicamente en operación de cierre brusco) el valor de pico de presión cuando se trata de conductos de materiales como el acero, por ejemplo, puede superar en más de tres veces el valor de la presión alcanzado en el sistema con conducción de polietileno, para las mismas condiciones de la instalación y operativas. Entonces, la recomendación de incluir los efectos de FSI se extiende a toda clase de material de conducción, asegurando de esta forma una predicción más ajustada del fenómeno.

Bibliografía

- Bergant, A. & Tijsseling, A. (2001) '*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
- Bergant A., Tijsseling, A, Vitkovsky J. Covas D., Simpson A, Lambert M. (2008) '*Parameters Affecting Water Hammer Wave Attenuation, Shape and Timing*' – Part 1 : Mathematics Tools –
- Boulos, P. F., Wood, D. J., and Funk, J. E. (1990). "A comparison of numerical and exact solutions for pressure surge analysis," *Proc., 6th International BHRA Conf. on Pressure Surges*, A. R. D. Thorley, ed., Cambridge, U.K
- Brunone, B. (2000) '*Velocity Profiles and Unsteady Pipe Friction in Transient Flow*', Journal of Resources Planning and Management, pages 236 – 144
- Brunone, B. (2010) '*Wall Shear Stress in Transient Turbulent Pipe Flow by Local Velocity Measurement*', Journal of Hydraulics Engineering ASCE, pages 716 - 726
- De Jong, V. (1994) '*Analysis of Pulsation and Vibration in Fluid –Filled Pipe Systems*' PhD. Thesis, Department of Mechanical Engineering – Eindhoven University- The Netherlands.
- Gere, J. (2009) '*Resistencia de Materiales, 5^o edición*' Editorial Paraninfo - México.
- Gomes de Rocha, R.; Bastos de Freitas, R. (2012) '*Numerical Solution of Fluid – Structure interaction in Piping Systems by Glimm's Method*', Journal of Fluids and Structures vol 28, pp 392-415.
- Hager W (2001) '*Swiss Contribution to Water Hammer Theory*' Journal of Hydraulic Research, 39,3,10
- Holmboe E, Rouleau W. (1967) '*The Effect of Viscous Shear on Transients in Liquid Lines*' Journal of Basic Engineering, Trans. ASME ,Vol. 89, N° 1, pages 174 – 180.
- Joukowsky, N. (1904), '*Waterhammer*', Translated by O. Simin., *Procs. American Water Works Assoc.*, Vol 24, pages. 341-424.
- Lai, Ch. (1961) '*A Study of Water Hammer Including Effect of Hydraulic Losses*', Thesis - Department of Civil Engineering – University of Michigan
- Lázaro López, Andrés (1997) '*Manual de Hidráulica*' Publicación de la Universidad de Alicante
- Mataix Plana, C. (1986) '*Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*' 2^o edición. Editorial Oxford.
- Mendiluce Rosich, E. (1987) '*El Golpe de Ariete en Impulsiones*'- II ed- Ed. Bellisco.
- Meniconi, S ; Brunone, B. ; Ferrante, M. (2012), '*Water—Hammer Pressure Waves Interaction at Cross Sectional Changes in Series in Viscoelastic Pipes*, Journal of Fluids and Structures, vol 33, pp 44 - 58.
- Murga, N.; Molina, N. (1997) '*Sistemas de Protección de Bombas y Cañerías en Oleoductos Sometidos a Flujos Transitorios*' Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca – Pcia de Buenos Aires-
- Potter, M.; Wiggert, D. (2014) '*Mecánica de Fluidos*' 4^o edición, Editorial Cengage- Learning.
- Provenzano, P. (2013) '*Influencia del Material de la Conducción en el Desarrollo del Golpe de Ariete*' *Mecánica Computacional Vol XXXII – Ed. de la Asociación Argentina de Mecánica Computacional (A.M.C.A.)*
- Streeter, V.L.y Wylie, E.B.(1988)) '*Mecánica de Fluidos*', Mc.Graw-Hill.
- Stuckenbruck, S.; Wiggert, D.; Otwell, R. (1985) '*The influence of pipe motion on acoustic wave propagation*' ASME – Journal of Fluids Engineer, V: 107.
- Tijsseling, A.; Vaugrante, P. (2001) '*FSI in L shaped and T shaped Pipe System*' Department of Mathematics and Computing Science – Eindhoven University- The Netherlands.
- Tijsseling, A.; Lambert, M.; Simpson, A.; Stephens, M.; Vitkovsky, J.; Bergant, A. (2008) '*Skalak's extended theory of water hammer*' - Journal of Sound and Vibration, Vol. 310.
- Triha, A.K. (1975) '*An Efficient Method for Simulating Frequency-Dependent Friction in Transient Liquid Flow*' Journal of Fluids Engineering, ASME 97(1), pp. 97–105.
- Tentarelli, S. (1990) '*Propagation of Noise and Vibration in Complex Hydraulic Tubing Systems*' PhD Thesis- Lehigh University – Department of Mechanical Engineering – Bethlehem – USA-
- Tijsseling, A.; Vaugrante, P. (2001) '*FSI in L shaped and T shaped Pipe System*' Department of Mathematics and Computing Science – Eindhoven University- The Netherlands.

- Tijsseling, A.; Lambert, M.; Simpson, A.; Stephens, M.; , A.; Vitkovsky, J.; Bergant, A (2008) 'Skalak's extended theory of water hammer' -Journal of Sound and Vibration – 310.
- Timoshenko, S; Young, D.(1980) '*Elementos de Resistencia de Materiales*', 2° edición. Editorial Montaner y Simon S. A.- Barcelona.
- Wu, T & Ferng, C. (1999) '*Effects of Nonuniforms Conduit Section on Waterhammer*' Acta Mechanica, pp 137-149, National Taiwan University, Taipei.

Anexos

Revisión de un artículo publicado por el Ingeniero Luís Pérez Farrás (Director del Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Buenos Aires) sobre el tema de Golpe de Ariete, en la Revista Agua.

Invitación recibida del Editorial in Chief del International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) en diciembre de 2015 para publicar un trabajo sobre el tema de investigación actual.

Invitación recibida desde el Editorial Office (Ethan Publishing Company) del International Journal of Mechanical Engineering and Automation (IJMEA) en enero de 2016 para publicar un trabajo sobre el tema de investigación actual.

Publicaciones

Autor: Provenzano, Pablo G.
Título: Influence of Pipe-Diameter on Water Hammer Phenomenon.
Fuente: Journal of Mechanics Engineering and Automation.
Volumen: 5
Número: 6
Páginas: 370-376
Editorial David Publishing Company
Fecha Junio de 2015

Autor: Provenzano, Pablo G.; Fernández, Luis, A; Avido, Matías, J.
Título: Análisis de las Tensiones Generadas en Instalaciones Hidráulicas por Golpe de Ariete.
Fuente: Anales IV Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (formato digital).
Sección: G-Sistemas Térmicos e Hidráulicos
Código GT-N°588
Editorial Editorial Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Nordeste
Fecha Septiembre de 2014

Congresos

Autor: Provenzano, Pablo G. Fernández, Luis, A; Avido, Matías, J.
Título: Tensiones Generadas por Golpe de Ariete.
Tipo: Póster
Reunión: Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas 2015.
Lugar: Ciudad de San Rafael –Mendoza.
Fecha: 15 al 17 de abril de 2015
Responsable: Universidad Nacional del Cuyo, Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria
Trabajo: Póster.

Autor: Provenzano, Pablo G. Fernández, Luis, A; Avido, Matías, J.
Título: El fenómeno de Golpe de ariete en sistemas fluido dinámicos confinados.
Tipo: Jornada
Reunión: 1° Jornada de Investigación Interdepartamental
Lugar: Ciudad de San Justo–Pcia de Buenos Aires.
Fecha: 15 de septiembre de 2014
Responsable: Universidad Nacional del La Matanza, Secretaría de Ciencia y Tecnología
Trabajo: Artículo completo

Autor: Provenzano, Pablo G. Fernández, Luis, A; Avido, Matías, J.
Título: Análisis de las Tensiones Generadas en Instalaciones Hidráulicas por Golpe de Ariete.
Tipo: Exposición
Reunión: IV Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
Lugar: Ciudad de Resistencia –Chaco.
Fecha: 2 al 5 de septiembre de 2014
Responsable: Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ingeniería – FoDAMI
Trabajo: Artículo completo