

# MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN, PRESIÓN Y FLUJO DE AGUA EN UNA TUBERÍA ELÁSTICA

**Ricardo Salgado**

UAM Azcapotzalco, México. al2203031334@gmail.com

## Resumen

El problema a resolver es medir de manera más precisa las propiedades de flujos en tuberías elásticas. Mayormente en las prácticas de laboratorio se miden casos ideales, con condiciones ya establecidas. Ante ello el esbozo de posible solución es que se observará la deformación de un tubo de pared delgada bajo presión hidrostática y un flujo continuo de fluido en él, lo que resultará en un flujo pulsátil. Los resultados preliminares se compararán con un modelo teórico que combina ondas longitudinales y transversales. Con base en esta información se realiza una simulación numérica del sistema, como se muestra en la Figura 1 con el software ANSYS. Este experimento se construirá desde cero en el laboratorio de sistemas complejos (W-209). Siendo un proyecto de investigación financiado por la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco.

**Palabras clave:** Ansys, flujo, elástica, tubería.

## Abstract

The problem to be solved is to more accurately measure the properties of flows in elastic pipes. Mostly in laboratory practices, ideal cases are measured, with already established conditions. Given this, the outline of a possible solution is that the deformation of a thin-walled tube will be observed under hydrostatic pressure and a continuous flow of fluid in it, which will result in a pulsatile flow. Preliminary results will be compared with a theoretical model that combines longitudinal and transverse waves. Based on this information, a numerical simulation of the system is carried out, as shown in Figure 1 with the ANSYS software. This experiment will be built from scratch in the complex systems laboratory (W-209). Being a research project funded by the Metropolitan Autonomous University of Azcapotzalco

**Keywords:** Ansys, flow, elastic, pipe.

## 1. Introducción

Actualmente, la tendencia es automatizar la introducción de sistemas de bucle de control cerrado. Para lograr un funcionamiento óptimo del circuito de control, es extremadamente importante que los elementos de medición sean lo más precisos posible, de modo que permitan reducir al mínimo las desviaciones del sistema de control [1]. Para ello se propone que el sistema de control compare el valor de la variable o estado controlado con el valor deseado y toma acciones correctivas de acuerdo con la desviación existente sin intervención del usuario [2].

Todo esto se programará utilizando Arduino para los sensores de presión. Para lograr el mejor rendimiento del sistema de control, es importante que la medición de las variables sea lo más precisa posible. Midiendo, analizando y estudiando el flujo de líquidos y gases.

## 2. Antecedentes

En el año 2001 F. F Farshad et al., publicaron en el Journal of Petroleum Science and Engineering un trabajo donde consideraron que la geometría de la tubería, la viscosidad y la velocidad del fluido son variables importantes.

Que determinan la magnitud de la fricción y la posterior pérdida de presión en los fluidos que fluyen a través de la tubería. Se tomarán como base los experimentos de mecánica de fluidos ahí publicados donde observaron que en un flujo sobre superficies lisas no existe movimiento de partículas de fluido en relación con la superficie lisa adyacente [3].

Hacia el año 2018 en el Journal of Hydraulic Engineering se publicaron resultados computacionales del análisis numérico 1 y 2 dimensional de flujos en tuberías, donde mostraron la dependencia de un parámetro de ponderación utilizado en el proceso numérico. Además compararon los resultados de un modelo de flujo de burbujas con mediciones experimentales reportadas en la literatura. En nuestro caso se tomarán como base las comparaciones significativas, la simulación numérica de referencia no se limitará a los primeros eventos de cavitación, sino se extenderá en el tiempo [4].

D., Zerihun, y C. A. Sánchez, publicaron un trabajo en el Journal of Irrigation and Drainage Engineering en 2017, donde desarrollaron modelos de simulación computacionales para laterales de riego utilizados en colectores hidráulicos. Los autores concibieron un lateral como una red hidráulica ramificada y luego formularon el problema de simulación hidráulica de un lateral de riego basándose en técnicas de análisis de red estándar. Se ocuparán como base las técnicas de análisis de redes de tuberías que correspondan al método del gradiente el cual produce una formulación más general y robusta del problema de simulación hidráulica [5].

### 3. Justificación

Actualmente, la tendencia es automatizar la introducción de sistemas de bucle de control cerrado. Para lograr un funcionamiento óptimo del circuito de control, es extremadamente importante que los elementos de medición sean lo más precisos posible, de modo que permitan reducir al mínimo las desviaciones del sistema de control. Para ello se propone que el sistema de control compare el valor de la variable o estado controlado con el valor deseado y toma acciones correctivas de acuerdo con la desviación existente sin intervención del usuario. Todo esto se programará utilizando Arduino para los sensores de presión. Para lograr el mejor rendimiento del sistema de control, es importante que la medición de las variables sea lo más precisa posible. Midiendo, analizando y estudiando el flujo de líquidos y gases.

### 4. Objetivo general

Analizar, teórica y experimentalmente las mediciones de las propiedades de deformación, presión y flujo de agua en una tubería elástica.

### 5. Objetivos particulares

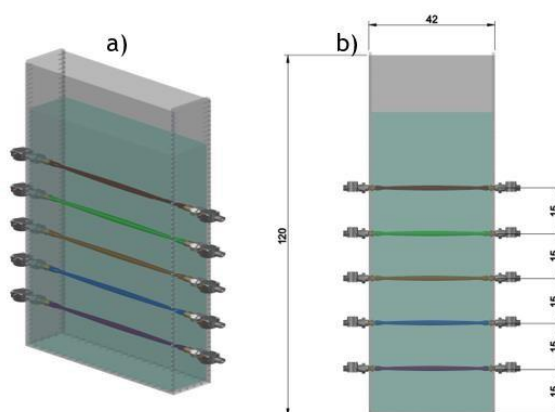
- Construir un montaje experimental de sistemas de tubos elásticos dentro de una pecera de acrílico.
- Realizar prueba de tensión de materiales elásticos.
- Implementar en lenguaje Arduino el código de programación para la recopilación de los datos obtenidos por los sensores y controlar el flujo del fluido.
- Ejecutar la simulación del montaje experimental de tubos elásticos empleando ANSYS FLUENT.
- Comparar los resultados del modelo teórico con el sistema experimental dentro de las tuberías elásticas.

### 6. Metodología

En esta sección se describe el análisis y montaje experimental, así como las variables dependientes e independientes de las pruebas experimentales:

1. Investigación sobre los modelos matemáticos existentes. Se realizará un estudio exhaustivo de los modelos matemáticos existentes en la literatura. Analizando su funcionamiento, fortalezas y limitaciones. Después de eso, se analizarán las condiciones. Los cuales excluyen aquellos modelos que aportan información importante para el proyecto. Esta etapa tiene como objetivo obtener las ecuaciones de continuidad. Bajo la hipótesis de números bajos de *Mach*, la forma cuasi-2D de la ecuación de continuidad (Ec. 1) en una tubería se puede escribir como:

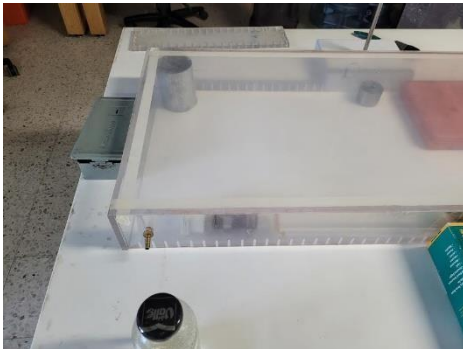
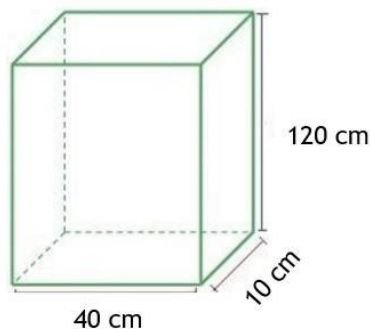
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial u}{\partial x} + 2\rho a^2 \frac{\partial s}{\partial t} = 0 \quad \dots \text{Ec. (1)}$$



4. **Figura 1.** Montaje experimental, a) Proyección isométrica y b) Proyección frontal, escala en (cm).

2. El dispositivo mostrado en la Figura 1, se construirá de acrílico y se hará hermético, ver Figura 2, con el objetivo de mantener una presión hidrostática alta que actúe sobre los tubos elásticos con flujo constante de fluido (agua) dentro de los tubos, esto dará lugar a un flujo pulsátil. Este flujo pulsátil está en función de la presión hidrostática  $P_H$ , de la presión de entrada y salida en los tubos elásticos  $P_1$  y  $P_2$  respectivamente, del área de sección transversal  $A$  y del módulo de elasticidad  $E$  propio del material. Ver Figura 3, del esquema del Flujo pulsátil,  $Fp = f(P_H, P_1, A, y E)$ .

DIMENSIONES: 120 X 40 X 10 cm



**Figura 2.** Dimensiones de (parte superior), foto de la caja de acrílico construida (parte inferior).

3. Se configurarán mediante el lenguaje Arduino los sensores de presión y flujo, para poder controlar el flujo del fluido de mejor manera a través del tubo elástico. Con esos datos generados se ejecutarán las simulaciones en ANSYS FLUENT.

## Geometry and Mesh

### Mesh Size

Cells	Faces	Nodes
8960	18496	9537

### Mesh Quality

Name	Type	Min Orthogonal Quality	Max Aspect Ratio
surface_body	Quad Cell	1	1.4142136

## Physics

### Models

Model	Settings
Space	2D
Time	Steady
Viscous	SST k-omega turbulence model

### Material Properties

Fluid	
water-liquid	
Density	998.2 kg/m <sup>3</sup>
Cp (Specific Heat)	4182 J/(kg K)
Thermal Conductivity	0.6 W/(m K)
Viscosity	0.001003 kg/(m s)
Molecular Weight	18.0152 kg/kmol
air	
Density	1.225 kg/m <sup>3</sup>
Cp (Specific Heat)	1006.43 J/(kg K)
Thermal Conductivity	0.0242 W/(m K)
Viscosity	1.7894e-05 kg/(m s)
Molecular Weight	28.966 kg/kmol
Solid	
aluminum	
Density	2719 kg/m <sup>3</sup>
Cp (Specific Heat)	871 J/(kg K)
Thermal Conductivity	202.4 W/(m K)

### Cell Zone Conditions

Fluid	
surface_body	
Material Name	water liquid
Specify source terms?	no
Specify fixed values?	no
Frame Motion?	no
Laminar zone?	no
Porous zone?	no

### Boundary Conditions

Inlet	
fluid_in	
Reference Frame	Absolute
Gauge Total Pressure [Pa]	570.85
Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa]	0
Direction Specification Method	Normal to Boundary
Build artificial walls to prevent reverse flow?	no
Turbulent Specification Method	Intensity and Viscosity Ratio
Turbulent Intensity [%]	5
Turbulent Viscosity Ratio	10
Outlet	
fluid_out	
Flow rate weighting	1
Wall	
walls	
Wall Motion	Moving Wall
Shear Boundary Condition	No Slip
Wall Surface Roughness	rough bc standard
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Define wall velocity components?	yes
X-Component of Wall Translation [m/s]	0
Y-Component of Wall Translation [m/s]	0
Wall Roughness Height [m]	0
Wall Roughness Constant	0.5

Reference Values

Area	1 m^2
Density	1.225 kg/m^3
Depth	1 m
Enthalpy	0 J/kg
Length	1 m
Pressure	0 Pa
Temperature	288.16 K
Velocity	1 m/s
Viscosity	1.7894e-05 kg/(m s)
Ratio of Specific Heats	1.4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300
Reference Zone	surface_body

Solution Status

Iterations: 1000

	Value	Absolute Criteria	Convergence Status
continuity	1.594989e-11	0.001	Converged
x-velocity	0.01109112	0.001	Not Converged
y-velocity	0.01474123	0.001	Not Converged
k	0.3042319	0.001	Not Converged
omega	2.400712e-12	0.001	Converged

Solver Settings

Equations

Flow	True
Turbulence	True
Numerics	
Absolute Velocity Formulation	True
Pseudo Time Explicit Relaxation Factors	
Density	1
Body Forces	1
Turbulent Kinetic Energy	0.75
Specific Dissipation Rate	0.75
Turbulent Viscosity	1
Explicit Momentum	0.5
Explicit Pressure	0.5
Pressure-Velocity Coupling	
Type	Coupled
Pseudo Time Method (Global Time Step)	True
Discretization Scheme	
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Specific Dissipation Rate	Second Order Upwind
Solution Limits	
Minimum Absolute Pressure [Pa]	1
Maximum Absolute Pressure [Pa]	5e+10
Minimum Static Temperature [K]	1
Maximum Static Temperature [K]	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy [m^2/s^2]	1e-14
Minimum Spec. Dissipation Rate [s^-1]	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

Report Definitions

report-def-1	-3.72747e-14	kg/s
pressure	-5.394683e-10	(Pa)/(kg/s)
velocidad	-1.556233e-26	(m/s)/(kg/s)
report-def-0	-5.394683e-10	(Pa)/(kg/s)

Residuals

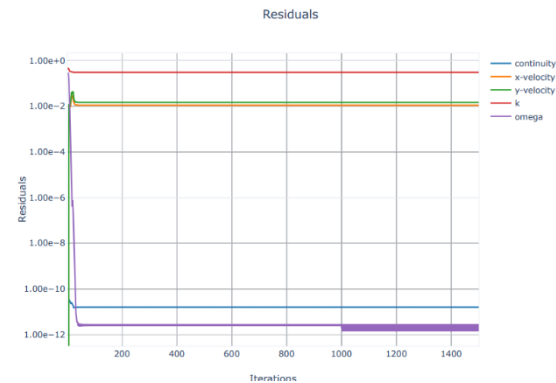
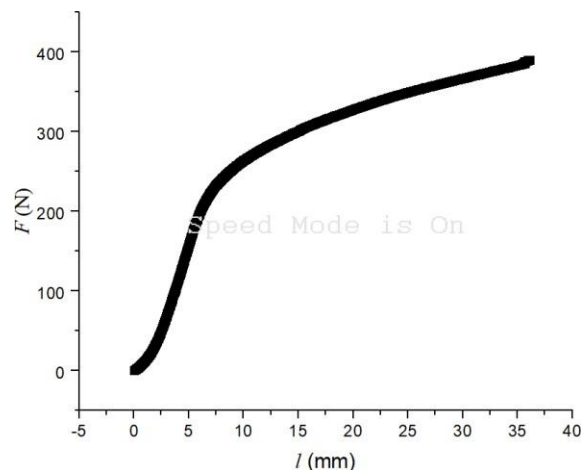


Figura 3. Grafica de residuales.

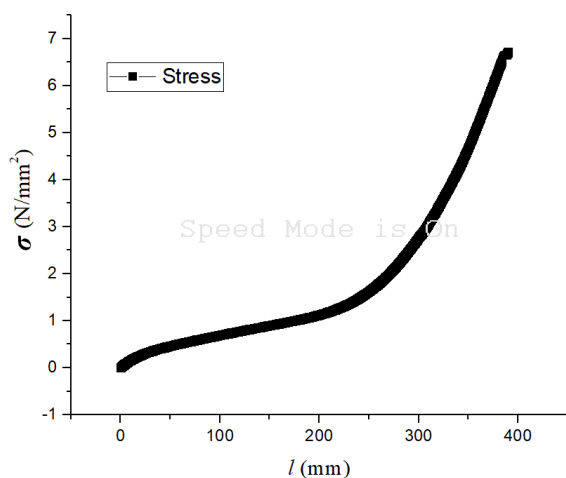
Run Information

Number of Machines	1
Number of Cores	4
Case Read	21.348 seconds
Data Read	0.136 seconds
Iteration	18.297 seconds
AMG	12.165 seconds
Virtual Current Memory	1.00667 GB
Virtual Peak Memory	1.04264 GB
Memory Per M Cell	45.7589

3. Se realizarán pruebas de tensión en los tubos elásticos. Las pruebas se harán en el laboratorio de Caracterización de Materiales del Departamento de Materiales, donde se utilizará la máquina SHIMADZU, como se observa en la Figura 4. Para obtener la deformación, el desplazamiento y fuerza de cada tubo. Obteniendo las Figuras 5 y 6.



**Figura 4.** Gráfica de la Fuerza aplicada en función del desplazamiento.



**Figura 5.** Gráfica del esfuerzo en función del desplazamiento.

4. Se realizarán las mediciones del fluido en la caja de acrílico, obteniendo la presión hidrostática, la presión interna, la velocidad del fluido y el diferencial de presión. El código de programación en Arduino recopilará los datos obtenidos por los sensores de presión y flujo.

5. Con todos los datos obtenidos, se analizarán, para poder generar una simulación del mismo experimento. Dicha simulación se realizará en el programa ANSYS FLUENT. Como resultado se

obtendrán valores teóricos. Y se compararán los datos teóricos con los experimentales.

6. Para finalizar, en esta etapa se elaborará el reporte final con los resultados obtenidos. Se documentarán los productos principales, siendo los entregables vinculados en esta proposición de estudio.

## 7. Normatividad

Las tuberías de polietileno para abastecimiento de agua están reguladas por la norma oficial española UNE-EN 12201-2:2012+A1:2020, en ella se recogen las características físicas (índice de fluidez, tiempo de inducción a la oxidación, efecto sobre la calidad del agua) y mecánicas (alargamiento a rotura, resistencia hidrostática) que debe cumplir la tubería [6].

Respecto a usos de abastecimiento, es la norma oficial española UNE-EN ISO 15874-1:2013 misma que establece las características geométricas, físicas (opacidad, retracción longitudinal, índice de fluidez, resistencia al impacto, y estabilidad térmica mediante ensayo de presión hidrostática), y mecánicas (resistencia hidrostática) que deben cumplir los sistemas de canalización de polipropileno [6].

Se aplicará la norma ASME B31.1 de la American Society of Mechanical Engineers para la presión en tuberías. Esta norma prescribe los requerimientos para el diseño, materiales, fabricación, pruebas, inspección, operación, y mantenimiento de sistema de tuberías. Todas las reglas de esta norma han sido desarrolladas considerando las necesidades de aplicación de tuberías encontradas en estaciones generadoras de energía eléctrica, plantas industriales y petroquímicas, y sistemas de ventilación, etc [7].

## 8. Resultados

Relación constitutiva de la pared del tubo

En base a lo descrito en el apartado anterior se hallaron los siguientes valores para el coeficiente de elasticidad y de viscosidad parietal:

Tabla 1

Ajuste de parámetros modelo ARX de la pared del tubo

Elasticidad parietal ( $E$ )	Viscosidad parietal $\eta$
4.95 mmHg/mm	0.84 mmHg s/mm.

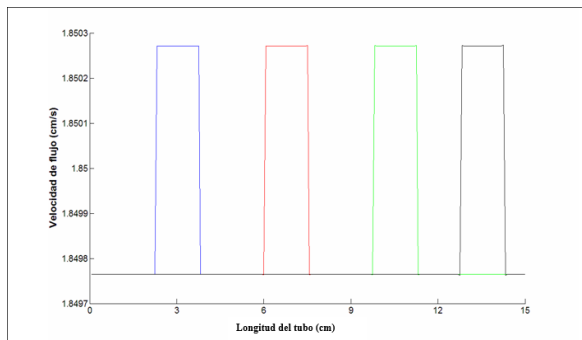
Se emplearon varios tubos flexibles de 15 cm de longitud.

El valor del paso temporal se fijó de tal forma de preservar la condición de Courant- Friedrichs-Lewy, mientras que el tamaño de malla espacial fue fijo y uniforme para todo el dominio de integración computacional.

El modelo se inicializo con los valores medios medidos experimentalmente de presión y diámetro.

Resultados de la integración de las ecuaciones del modelo

Para las condiciones indicadas en el párrafo anterior se integraron las ecuaciones del modelo (1) arrojando para la velocidad de flujo los resultados que se muestran en la Figura 5.



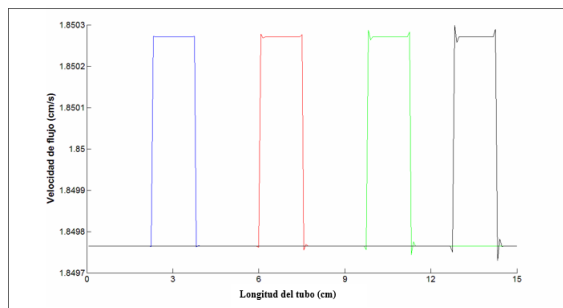
**Figura 6.** Onda de flujo en el tubo de paredes delgadas. Azul primer cuarto del recorrido, rojo punto intermedio, verde tres cuartos del recorrido, negro tramo final del recorrido.

Como puede apreciarse en la Figura 5 la onda de flujo no se distorsiona a lo largo de todo el recorrido por el tubo/arteria. Dicha onda no sufre atenuaciones ni modificaciones significativas. El efecto mecánico de su paso por el tubo de paredes elásticas delgadas se limita a interactuar con la estructura de la pared para que esta absorba dicha perturbación mediante dos efectos, por un lado, mediante disipación de energía viscosa, y por otro por medio del amortiguamiento elástico.

En la Figura 6 se muestra el resultado al haber incrementado en veinte veces el valor de la constante de viscosidad de la pared del tubo/arteria. En este caso se puede apreciar claramente que se comienza a evidenciar una perturbación en la onda de propagación del flujo.

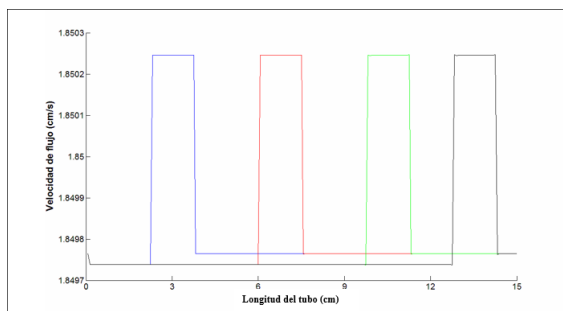
Esto se debe a que dicha pared posee un mayor nivel de interacción con el flujo y derivada de esta interacción se hacen presentes efectos relacionados con la actividad de la misma sobre la velocidad de propagación de la onda de fluido.

En cambio, si el coeficiente de viscosidad de la pared del tubo se reduce esto no tiene efectos sobre la propagación de la onda de flujo. Esto se debe a que al disminuir dicho coeficiente se reduce el nivel de interacción con la pared del tubo.



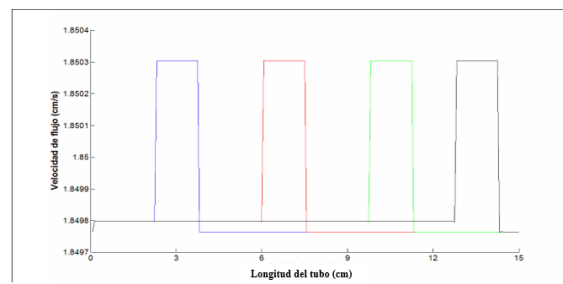
**Figura 7.** Esquema de colores igual al de la Figura 108.

Si en cambio se modifica el coeficiente de elasticidad de la pared del tubo en un 5 % por arriba o por debajo de los valores experimentales, entonces se manifiestan cambios en la propagación de la onda de flujo según se puede apreciar en las Figura 7 y Figura 8.



**Figura 8.** Propagación de la onda de flujo para un coeficiente de elasticidad 5% menor al experimental. Los colores se han seleccionado de forma análoga a la de la Figura 108.

En la Figura 7 se ve claramente que al tratarse de un tubo con paredes menos flexibles el flujo que circula tras el paso de la onda es menor, y esto se debe a que la fuerza de restitución elástica proporcionada por las paredes del tubo es menor que para el caso indicado en la Figura 5.



**Figura 9.** Propagación de la onda de flujo para un coeficiente de elasticidad 5% mayor al experimental. Los colores se han seleccionado de forma análoga a la de la Figura 108.



En el caso de la Figura 8 al emplearse un coeficiente de restitución elástica mayor, la restitución al estado previo al paso de la onda de presión es mayor que en el caso de la Figura 7 y por lo tanto la velocidad de la onda de flujo es ligeramente mayor.

Del resultado de las integraciones numéricas del modelo se concluye que, para el caso planteado aquí, es decir un tubo largo (típicamente 15 cm) de paredes delgadas (3 mm) de sección circular se pudo plantear una relación constitutiva de las paredes del mismo en base a dos componentes, una elástica pura y otra de naturaleza viscosa.

En este sentido el modelo brindó resultados satisfactorios desde el punto de vista cualitativo que deberán ser convalidados con mediciones experimentales ulteriores.

Se observó que el comportamiento elástico se genera en la entrada de la tubería elástica. Ya que cuando se le aplica una fuerza hidrostática se genera la deformación de la pared, esto se observó en los videos que se grabaron a 900 fps, para observar el movimiento, ya que ocurren en un corto tiempo de 6 milisegundos. Esto también se corrobora en la simulación en ANSYS, indicando que la mayor presión se genera al principio de la tubería. Y como anteriormente se comentó, en la pared se observa una deformación del 5%.

También algo curioso, es que, en las pruebas de tensión, siempre el material se fracturaba en la entrada de la tubería elástica, esto se puede tomar como un indicio y sirvió para hipótesis de comportamiento. corroborándose con los datos experimentales y justificando lo con lo simulación.

Con relación a los parámetros que reflejan la constitución de las paredes del tubo se comprobó que el modelo es mucho más sensible a la componente de naturaleza elástica que a la de origen viscoso. Esto es consistente con los resultados conocidos en la literatura, por lo cual y en esta etapa del desarrollo del presente modelo se pudo constatar que los objetivos fueron cubiertos satisfactoriamente.

## 9. Conclusión

Tanto de manera teórica, como experimental, se aprecia un comportamiento similar del fluido. En la entrada de la tubería elástica se muestra una deformación se genera en la entrada de la tubería. Se puede observar que al principio de la tubería se produce turbulencia en las paredes, esto es provocado por el aumento de presión y una disminución de velocidad en la entrada de la tubería.

Dicha deformación se pudo apreciar también, cuando se hicieron las pruebas de tensión del elastómero.

En esta proyecto, las habilidades adquiridas con la ingeniería mecánica fueron indispensables, pues además de comprender los conceptos de transferencia de calor, era un prerrequisito el conocimiento de las ecuaciones de continuidad, manejar el programa ANSYS y saber realizar las pruebas de tensión, donde siempre están presentes las materias de ingeniería de los materiales, taller de termo fluidos y simulación aplicada a ingeniería mecánica, áreas de especialización sin las cuales el desarrollo de dicho proyecto habría sido casi imposible.

Presentando un proceso iterativo para dar con los parámetros de diseño, análisis y simulación adecuados para observar el comportamiento del fluido. Y así poder tener un indicio de exploración para próximas investigaciones. Sabiendo por donde iniciar y por donde no ir, facilitando la búsqueda de información de mencionado tema.

Para concluir, se puede distinguir que el objetivo general fue cubierto en su totalidad, validando el fenómeno descrito en un inicio. La consolidación de los objetivos particulares de igual forma debe mencionarse, pues el análisis completo de la tubería elástica indicó su práctica. Dando inicio y final, a saber, el comportamiento del fluido y el porqué. Consolidando con ciertas pruebas experimentales y teóricas exitosas, dando cierre a este proyecto.

## 10. Referencias

- [1] Farshad, M., 2006, «Plastic Pipe Systems», *Elsevier eBooks*, pp. 1-27.
- [2] Cassiolo, G. H. B., Carvalho, E. P., Caballero, J. A., y Ravagnani, M. A. S. S., 2020, «Optimization of Water Distribution Networks Using a Deterministic Approach», *Engineering Optimization*, **53**(1), pp. 107-124.
- [3] Farshad, F. F., Rieke, H. H., y Garber, J. D., 2001, «New Developments in Surface Roughness Measurements, Characterization, and Modeling Fluid Flow in Pipe», *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **29**(2), pp. 139-150.
- [4] Santoro, V. C., Crimi, A., y Pezzinga, G., 2018, «Developments and Limits of Discrete Vapor Cavity Models of Transient Cavitating

- Pipe Flow: 1D and 2D Flow Numerical Analysis», *Journal of Hydraulic Engineering*, **144**(8).
- [5] Zerihun, D., y Sanchez, C. A., 2017, «Irrigation Lateral Hydraulics with the Gradient Method», *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-asce*, **143**(8).
- [6] Admin, y Admin, 2014, «Normativa para tuberías plásticas», AIMPLAS [Online]. Available: <https://www.aimplas.es/blog/normativa-para-tuberias-plasticas/>.
- [7] «B31.1 - Power Piping - ASME» [Online]. Available: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-1-power-piping>.