



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Diseño de un banco de pruebas para bombeo asimétrico

Autor: Catalán Lanzarote, Sergio

Tutores:

Barrios Collado, César

García Díaz, Manuel

**Ingeniería Energética y
Fluidomecánica**

Valladolid, Junio 2022.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Diseño de un banco de pruebas para bombeo asimétrico

Autor: Catalán Lanzarote, Sergio

Tutores:

**Barrios Collado, César
García Díaz, Manuel
Ingeniería Energética y
Fluidomecánica**

Valladolid, Junio 2022.

Agradecimientos a familia, amigos y tutores

Resumen

El bombeo asimétrico es una técnica de bombeo sin válvulas de la que apenas hay estudios, especialmente cuando el elemento activo es un tubo flexible sometido a una compresión rítmica. En este trabajo se han implementado una serie de instalaciones consistentes en un robot de fabricación de tubos viscoelásticos (látex); una instalación para la caracterización de los tubos fabricados; y un banco de ensayos de prestaciones de bombeo asimétrico. Los estudios se centran principalmente en la compliance de los tubos fabricados con el objetivo de validar y optimizar el proceso de fabricación; y en las prestaciones de la bomba asimétrica implementadas a través de las curvas características de altura-caudal de acuerdo a algunos parámetros de interés. La potencial aplicación de estos desarrollos es la implementación de prótesis activas cardiovasculares, especialmente para pacientes sometidos a cirugía Fontan.

Palabras clave

Bombeo asimétrico, Bombeo sin válvulas, Efecto Liebau, Cirugía Fontan.

Abstract

Asymmetric pumping is a valveless pumping technique not widely covered in bibliography, especially when the active element is a rhythmically compressed compliant tube. In this work, several experimental facilities have been implemented, including a manufacturing robot in order to fabricate viscoelastic tubes (latex); a tube characterization facility; and a performance test bench. The studies focus mainly on validation and optimization of the flexible tube fabrication process through its tube compliance; and the pumping performance by means of the head vs flow curves. The potential application of this research is the implementation of active cardiovascular prosthesis, especially for patients under Fontan surgery.

Keywords

Asymmetric pumping, Valveless pumping, Liebau effect, Fontan surgery.

Contenido

1	Introducción	23
1.1	Bombeo sin válvulas	23
1.2	Estado del arte.....	25
1.3	Aplicaciones del bombeo sin válvulas	28
1.3.1	Prótesis activas cardiovasculares	28
1.3.2	Refrigeración en microelectrónica	30
1.4	Problema a resolver	30
1.5	Objetivos	31
1.6	Contenido de este documento	31
2	Material y métodos	33
2.1	Robot para la fabricación de tubos de látex.....	33
2.1.1	Descripción de la instalación.....	33
2.1.2	Metodología	35
2.1.3	Codificación de los tubos	37
2.2	Instalación para la caracterización de tubos de látex	37
2.2.1	Hipótesis.....	37
2.2.2	Descripción de la instalación.....	38
2.2.3	Metodología	39
2.3	Instalación de bombeo asimétrico	41
2.3.1	Descripción de la instalación.....	42
2.3.2	Metodología	48
3	Resultados	51
3.1	Caracterización tubos de látex	51

3.1.1	Validación	51
3.1.2	Repetitividad	52
3.1.3	Número de capas.....	55
3.1.4	Uso en instalación hidráulica	57
3.1.5	Aplicación de vaselina	58
3.1.6	Humedad	59
3.1.7	Longitud del tubo de látex.....	62
3.2	Prestaciones de bombeo.....	63
3.2.1	Número de capas.....	63
3.2.2	Aplicación de vaselina	64
3.2.3	Longitud del tubo de látex.....	64
3.2.4	Espectro de frecuencias	65
4	Conclusiones	67
4.1	Caracterización de los tubos de látex.....	67
4.2	Bombeo asimétrico.....	67
5	Otros aspectos de interés.....	69
5.1	Líneas futuras	69
5.2	Financiación	69
5.3	Diseminación.....	69
6	Presupuesto.....	73
6.1	Presupuesto total.....	73
6.2	Presupuesto de personal	73
6.3	Presupuesto de equipos.....	73
6.4	Presupuesto de material	74

7	Bibliografía	75
8	Anexos	77
8.1	Anexo I: sistema circulatorio.....	77
8.2	Anexo II: ensayos	79
8.3	Anexo III: Resumen estado del arte	125

Índice de figuras

Figura 1 Bomba de Liebau, descrita en [1]: 1) tubo más flexible; 2) tubo más rígido; 3) unión cónica; 4) depósito con agua; 5) compresión.....	23
Figura 2 Diferentes bombas sin válvulas basadas en tubos flexibles: a) bombeo por impedancia; b) bombeo asimétrico; c) bombeo mixto; y c) no hay bombeo. 24	
Figura 3 Instalación experimental utilizada en [2], principal caso encontrado en bibliografía sobre bombeo asimétrico.	25
Figura 4 Movimiento de las ondas [11] a lo largo de la bomba de impedancia. En azul, verde y negro se representan, respectivamente, el tubo flexible, los tubos rígidos y la zona presionada. Nótese cómo las ondas rebotan en las conexiones con la tubería rígida y originan complicados patrones al superponerse.	27
Figura 5 a) Síndrome del corazón izquierdo hipoplásico; b) operación de Norwood; c) operación de Glenn; y d) operación de Fontan.....	29
Figura 6 Robot de fabricación de tubos de látex y tubo fabricado sin cortar..	33
Figura 7 Esquema e imagen de los actuadores del robot de fabricación de tubos. 34	
Figura 8 Tubos de látex fabricados y codificados.....	36
Figura 9 Almacenamiento de tubos de látex. Nótese en el fondo un tubo largo recién fabricado y colgado, aún sin cortar.	36
Figura 10 Esquema e imagen de la instalación para la caracterización de tubos de látex. 38	
Figura 11 Montaje del tubo de látex para su caracterización.	39
Figura 12 Llenado instalación de caracterización de tubos.	40
Figura 13 Banco de pruebas de bombeo asimétrico.	42
Figura 14 Depósitos 1 (izquierda) y 2 (derecha).	43
Figura 15 Electrónica de adquisición y control.....	44
Figura 16 Software de adquisición.....	44

Figura 17 Caudalímetros unidireccionales, orientados en la dirección negativa (1) y positiva (2).	45
Figura 18 Caja de control del diafragma.	47
Figura 19 Diafragma y posiciones abierto y cerrado.	47
Figura 20 Señal de los caudalímetros 1 (azul) y 2 (rojo). En el modo de frecuencia óptima el diafragma se dispara cuando la señal del caudalímetro 2 es máxima.	48
Figura 21 Diafragma en la instalación hidráulica.	48
Figura 22 Diferencia de altura h.	49
Figura 23 Altura frente al tiempo.	50
Figura 24 Caudal frente al tiempo.	50
Figura 25 Curva de compliance para Tubo 17/02 Tramo 3, 7 capas Nuevo.	51
Figura 26 Curvas de compliance para la repetitividad.	52
Figura 27 Curvas de compliance para la repetitividad de tres capas.	53
Figura 28 Curvas de compliance para la repetitividad de cinco capas.	54
Figura 29 Curvas de compliance para la repetitividad de siete capas.	54
Figura 30 Curvas de compliance para la repetitividad de nueve capas.	55
Figura 31 Curvas de compliance para las medias de las medidas por número de capas.	56
Figura 32 C_0 en función del número de capas.	57
Figura 33 K en función del número de capas.	57
Figura 34 Curvas de compliance para la comparación de nuevo y usado.	58
Figura 35 Curvas de compliance para la comparación de con y sin vaselina.	58
Figura 36 Efecto de sumergir parcialmente un tubo de látex durante dos días. Nótese el contraste en el color, al blanquearse la parte sumergida. Al tacto también se notan diferencias, siendo la parte sumergida más suave y flexible.	59

Figura 37 Curvas de compliance para el efecto de la humedad. Tubo 16/02 T1 9c N con agua en su interior.	60
Figura 38 Curva de secado de un tubo inicialmente saturado de humedad. .	60
Figura 39 Curvas de compliance para el efecto de almacenamiento en remojo para 7 capas.....	61
Figura 40 Curvas de compliance para el efecto de almacenamiento en remojo para 9 capas.....	62
Figura 41 Curvas de compliance para la comparación por longitud.....	62
Figura 42 Curvas características de bombeo según el número de capas.....	63
Figura 43 Curvas características de bombeo con y sin vaselina.....	64
Figura 44 Curvas características de bombeo según longitud.	65
Figura 45 Altura máxima frente a frecuencia (adimensionalizada con la frecuencia de resonancia).....	66
Figura 46 Caudal máximo frente a frecuencia (adimensionalizada con la frecuencia de resonancia).....	66
Figura 47 Curva de compliance para Tubo 8/02 T3 7c N.	79
Figura 48 Curva de compliance para Tubo 10/02 T1 7c N.....	80
Figura 49 Curva de compliance para Tubo 8/02 T3 7c U.	81
Figura 50 Curva de compliance para Tubo 8/02 T3 7c U (R).....	82
Figura 51 Curva de compliance para Tubo 10/02 T2 7c N.....	83
Figura 52 Curva de compliance para Tubo10/02 T2 7c N (R).....	84
Figura 53 Curva de compliance para Tubo 14/02 T1 5c N.....	85
Figura 54 Curva de compliance para Tubo14/02 T2 5c N.....	86
Figura 55 Curva de compliance para Tubo 14/02 T3 5c N.....	87
Figura 56 Curva de compliance para Tubo14/02 T3 5c N (R).....	88
Figura 57 Curva de compliance para Tubo 14/02 T1 3c N.....	89

Figura 58 Curva de compliance para Tubo 14/02 T2 3c N.	90
Figura 59 Curva de compliance para Tubo 14/02 T3 3c N.	91
Figura 60 Curva de compliance para Tubo 16/02 T1 9c N.	92
Figura 61 Curva de compliance para Tubo 16/02 T2 9c N.	93
Figura 62 Curva de compliance para Tubo 16/02 T3 9c N.	94
Figura 63 Curva de compliance para Tubo17/02 T1 7c N.	95
Figura 64 Curva de compliance para Tubo17/02 T2 7c N.	96
Figura 65 Curva de compliance para Tubo 17/02 T3 7c N.	97
Figura 66 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (1°R).....	98
Figura 67 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (2°R).....	99
Figura 68 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (3°R).....	100
Figura 69 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (4°R).....	101
Figura 70 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (5°R).....	102
Figura 71 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (6°R).....	103
Figura 72 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (7°R).....	104
Figura 73 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (8°R).....	105
Figura 74 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (9°R).....	106
Figura 75 Curva de compliance para Tubo17/02 T1 7c (re).	107
Figura 76 Curva de compliance para Tubo 16/02 T3 9c (re).	108
Figura 77 Curva de compliance para Tubo 16/02 T3 9c (sec).....	109
Figura 78 Curva de compliance para Tubo 21/02 T1 7c N.	110
Figura 79 Curva de compliance para Tubo 21/02 T2 7c N.	111
Figura 80 Curva de compliance para Tubo 21/02 T3 7c N.	112
Figura 81 Curva de compliance para Tubo 17/02 T2 7c N.	113

Figura 82 Curva de compliance para Tubo 25/02 T1 7c N.....	114
Figura 83 Curva de compliance para Tubo25/02 T1 7c U (vas).....	115
Figura 84 Curva de compliance para Tubo 25/02 T3 7c N.....	116
Figura 85 Curva de compliance para Tubo 22/02 T2 7c N.....	117
Figura 86 Curva de compliance para Tubo 23/03 T3 7c N.....	118
Figura 87 Curva de compliance para Tubo24/03 7c N (20cm).....	119
Figura 88 Curva de compliance para Tubo 23/03 T2 7c N.....	120
Figura 89 Curva de compliance para Tubo 23/03 T3 7c N.....	121
Figura 90 Curva de compliance para Tubo 23/03 T1 7c N.....	122
Figura 91 Curva de compliance para Tubo 28/03 T1 7c N.....	123
Figura 92 Curva de compliance para Tubo 28/03 T2 7c N.....	124

Índice de tablas

Tabla 1 Espesor de pared de los tubos fabricados, según su número capas.	35
Tabla 2 Características manómetro de la instalación para la caracterización de tubos de látex.	39
Tabla 3 Datos Tubo 17/02 T3 7c N.....	41
Tabla 4 Características de los caudalímetros.	46
Tabla 5 Características del manómetro de la instalación hidráulica.	46
Tabla 6 Coeficientes de los ajustes exponenciales a las medidas medias según el número de capas.	55
Tabla 7 Presupuesto total.	73
Tabla 8 Presupuesto de personal.	73
Tabla 9 Presupuesto de equipos.	73
Tabla 10 Presupuesto de materiales.	74
Tabla 11 Datos Tubo 8/02 T3 7c N.....	79
Tabla 12 Datos Tubo 10/02 T1 7c N.	80
Tabla 13 Datos Tubo 8/02 T3 7c U.....	81
Tabla 14 Datos Tubo 8/02 T3 7c U (R).	82
Tabla 15 Datos Tubo 10/02 T2 7c N.	83
Tabla 16 Datos Tubo 10/02 T2 7c N (R).	84
Tabla 17 Datos Tubo 14/02 T1 5c N.	85
Tabla 18 Datos Tubo 14/02 T2 5c N.	86
Tabla 19 Datos Tubo 14/02 T3 5c N.	87
Tabla 20 Datos Tubo 14/02 T3 5c N (R).	88
Tabla 21 Datos Tubo 14/02 T1 3c N.	89
Tabla 22 Datos Tubo 14/02 T2 3c N.	90

Tabla 23 Datos Tubo 14/02 T3 3c N.....	91
Tabla 24 Datos Tubo 16/02 T1 9c N.....	92
Tabla 25 Datos Tubo 16/02 T2 9c N.....	93
Tabla 26 Datos Tubo 16/02 T3 9c N.....	94
Tabla 27 Datos Tubo 17/02 T1 7c N.....	95
Tabla 28 Datos Tubo 17/02 T2 7c N.....	96
Tabla 29 Datos Tubo 17/02 T3 7c N.....	97
Tabla 30 Datos Tubo 16/2 T1 9c (1°R).	98
Tabla 31 Datos Tubo 16/2 T1 9c (2°R).	99
Tabla 32 Datos Tubo 16/2 T1 9c (3°R).	100
Tabla 33 Datos Tubo 16/2 T1 9c (4°R).	101
Tabla 34 Datos Tubo 16/2 T1 9c (5°R).	102
Tabla 35 Datos Tubo 16/2 T1 9c (6°R).	103
Tabla 36 Datos Tubo 16/2 T1 9c (7°R).	104
Tabla 37 Datos Tubo 16/2 T1 9c (8°R).	105
Tabla 38 Datos Tubo 16/2 T1 9c (9°R).	106
Tabla 39 Datos Tubo 17/02 T1 7c (re).....	107
Tabla 40 Datos Tubo 16/02 T3 9c (re).....	108
Tabla 41 Datos Tubo 16/02 T3 9c (sec).	109
Tabla 42 Datos Tubo 21/02 T1 7c N.....	110
Tabla 43 Datos Tubo 21/02 T2 7c N.....	111
Tabla 44 Datos Tubo 21/02 T3 7c N.....	112
Tabla 45 Datos Tubo 17/02 T2 7c N.....	113
Tabla 46 Datos Tubo 25/02 T1 7c N.....	114

Tabla 47 Datos Tubo 25/02 T1 7c U (vas).	115
Tabla 48 Datos Tubo 25/02 T3 7c N.	116
Tabla 49 Datos Tubo 22/02 T2 7c N.	117
Tabla 50 Datos Tubo 23/03 T3 7c N.	118
Tabla 51 Datos Tubo 24/03 7c N (20cm).	119
Tabla 52 Datos Tubo 23/03 T2 7c N.	120
Tabla 53 Datos Tubo 23/03 T3 7c N.	121
Tabla 54 Datos Tubo 23/03 T1 7c N.	122
Tabla 55 Datos Tubo 28/03 T1 7c N.	123
Tabla 56 Datos Tubo 28/03 T2 7c N.	124
Tabla 57 Resumen de estudios previos	126

1 Introducción

1.1 Bombeo sin válvulas

En 1954, el cardiólogo alemán Gephardt Liebau observó que durante los inicios de la vida del embrión la sangre circula en una dirección a través del sistema circulatorio sin necesidad de ninguna válvula. Esto sucede también en algunos invertebrados adultos con corazones sin válvulas. Liebau descubrió un sistema de bombeo que tenía los componentes esenciales de la dinámica cardiovascular (Figura 1). Conectó dos tubos elásticos con distintos diámetros y grosores de pared mediante un reductor para formar un tubo [1]. Colocando el final del tubo de diámetro más grande en un depósito y excitando con una frecuencia en un punto del tubo más grande Liebau obtuvo un efecto de bombeo. Se produjo un flujo neto saliente del depósito unido al tubo más pequeño hacia otro recipiente. Más adelante en 1955 Liebau descubrió que el bombeo podría ser obtenido usando tubos no elásticos con una unión en T cuyo extremo se uniese a un pistón. Posteriormente realizó una variación conectando dos tubos con distintas elasticidades o diámetros formando un circuito cerrado. Descubrió tres elementos esenciales en la efectividad del bombeo: diferencia de diámetros o elasticidades, el movimiento ocurre mediante impulsos y que el punto donde se percute no debe estar en la mitad de ninguno de los dos tubos. Desde entonces físicos y matemáticos están fascinados por modelizar analíticamente la bomba de Liebau.

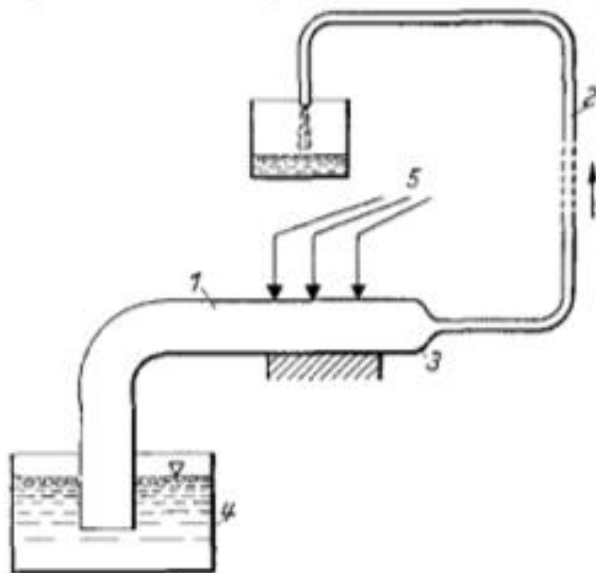


Figura 1 Bomba de Liebau, descrita en [1]: 1) tubo más flexible; 2) tubo más rígido; 3) unión cónica; 4) depósito con agua; 5) compresión.

La bomba de Liebau consiste en una bomba sin válvulas que funciona mediante dos fenómenos que pueden darse al mismo tiempo y reforzarse. Son el bombeo asimétrico y la bomba de impedancia. El bombeo asimétrico se produce cuando la excitación del sistema se produce fuera del plano de simetría del circuito, pero actúa en el plano de simetría del elemento activo (por ejemplo, mediante un pistón o percutiendo la sección central de un tubo elástico). Un flujo neto medio viaja de la zona con menos pérdidas a la zona con más pérdidas, generando una diferencia de altura en un sistema unido a dos depósitos o un caudal permanente en caso de un sistema cerrado. Se teoriza que este caudal y diferencia de altura se debe a la diferencia de energía cinética en ambos conductos debido a la asimetría [2]. Se muestra en la Figura 2 b).

El bombeo por impedancia genera un caudal al excitar mediante percusión de un tubo elástico entre dos tuberías rígidas en un punto distinto a su sección central, pero manteniendo la simetría del circuito. Se teoriza que la generación de sucesivas ondas de presión y depresión son responsables de la creación del flujo [3]. En este caso la impedancia es la resistencia que opone el material al paso de la onda. Se muestra en la Figura 2 a). El bombeo mixto sucede como una combinación de bombeo por impedancia y bombeo asimétrico, Figura 2 c). Finalmente, si no hay ninguna asimetría, no se producirá bombeo Figura 2 d).

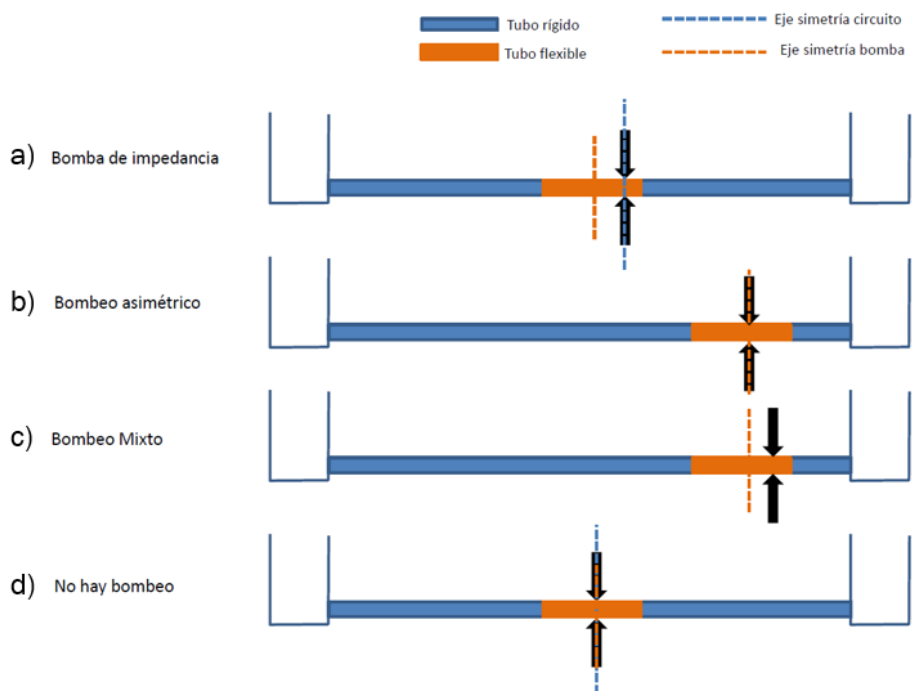


Figura 2 Diferentes bombas sin válvulas basadas en tubos flexibles: a) bombeo por impedancia; b) bombeo asimétrico; c) bombeo mixto; y d) no hay bombeo.

1.2 Estado del arte

Hans Thomann, en 1978, tratando de explicar la bomba de impedancia propone un modelo analítico unidimensional de un sistema cerrado suponiendo un flujo no viscoso y un amortiguamiento de las ondas en la parte flexible [4]. Atribuye el bombeo a efectos de la inercia.

Los primeros artículos sobre el bombeo asimétrico son dos artículos de Takagi y Saijo. En el primer estudio, en 1983 [2], se experimenta con un sistema que consta de dos tanques de agua abiertos al ambiente conectados con una unión en T, formando la tubería principal. Por el otro extremo de la unión en T se une una tubería lateral que tiene instalada un pistón accionado por un yugo escocés sin válvulas (Figura 3). Restrigen el estudio a los casos en los que el flujo medio a lo largo del tiempo en la tubería principal que une los depósitos es nulo. Este efecto de bombeo consigue que la energía cinética se almacene en uno de los tanques, el que posee la tubería más larga hasta la unión en T, aumentando su altura. Variando diferentes parámetros, como la forma de la T o la velocidad angular del yugo escocés, elaboran un modelo matemático que explica los datos tomados en los experimentos. En 1985 vuelven a utilizar la misma instalación pero presurizando los depósitos [5]. Esta vez elaboran un modelo matemático que explica el fenómeno de la resonancia, que ocurre cuando la frecuencia a la que se excita el sistema es la misma que la frecuencia natural del sistema, y teóricamente el caudal o la altura generados son máximos.

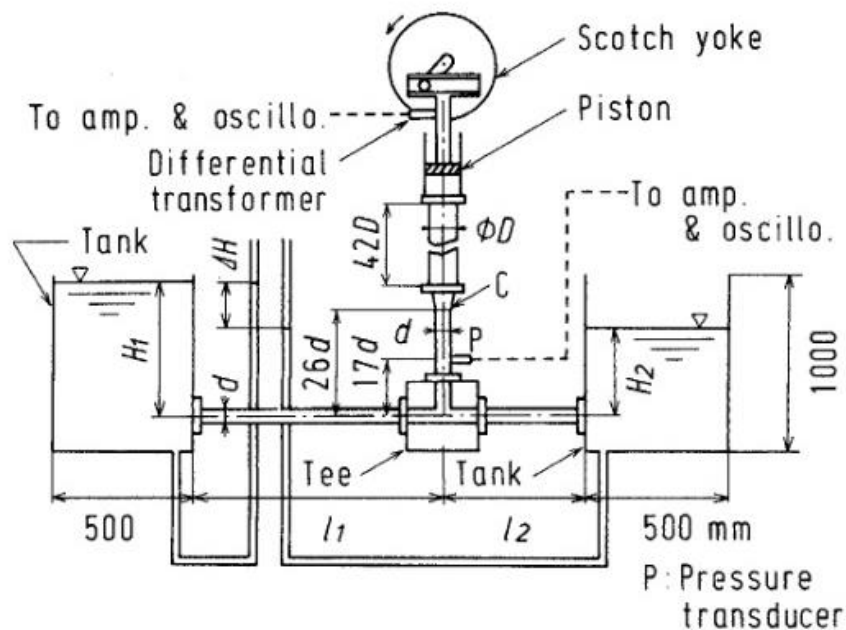


Figura 3 Instalación experimental utilizada en [2], principal caso encontrado en bibliografía sobre bombeo asimétrico.

En 1998 Moser [6] estudia un lazo cerrado circular, cuyas mitades son de cristal y látex. Se excita un extremo de la parte de látex produciendo un efecto de bombeo por impedancia. Realizan un modelo lineal basado en una analogía eléctrica, atribuyendo el flujo neto a la inercia y diferencia de impedancia, logrando establecer relaciones entre el caudal neto y la frecuencia de excitación.

Jung y Peskin establecen por primera vez el papel dominante de la dinámica de ondas en la bomba, simulando el flujo de una bomba bidimensional sin válvulas en circuito cerrado [7]. Demuestran la dependencia del flujo con la amplitud y frecuencia de la excitación en el bombeo por impedancia. Basándose en hipótesis de Kenner [6] establecen que el mecanismo de creación de flujo se debe a la asimetría en las pérdidas hidráulicas.

Ottesen en 2003 presenta un modelo numérico unidimensional de una bomba de impedancia en un sistema cerrado [8]. Se relaciona la dependencia del flujo con la amplitud, ubicación de la excitación y la elasticidad del tubo.

Borzi junto a Propst en 2003 utilizan ecuaciones unidimensionales para explicar el efecto Liebau en un sistema abierto [9]. Se trabaja con distintas configuraciones de sistemas con dos tanques. Presentan una solución numérica para un modelo con tubos elásticos.

David Auerbach et al, realizan un estudio en el que tratan de encontrar una solución analítica en 2004 al efecto Liebau despreciando la viscosidad [10]. Se busca una solución a la ecuación de Euler con la configuración geométrica simple como es una tubería recta, parte de la cual es comprimida a una cierta frecuencia.

A partir de 2005 año cabe destacar la labor del profesor Morteza Gharib, del Instituto Tecnológico de California (Caltech), en el estudio de la bomba de impedancia, publicando numerosos artículos sobre el tema:

- [3] y [11] presentan una técnica basada en la bomba de impedancia para bombear fluidos en la microescala. Se sugiere que la reflexión de las ondas en los extremos del tubo es un factor dominante. La Figura 4 muestra el viaje de las ondas en el tubo flexible. La onda se genera y avanza hacia la izquierda y la derecha desde el punto de excitación. A continuación, llega al extremo izquierdo y rebota desplazándose hacia la derecha finalmente llegan las dos ondas al extremo derecho.

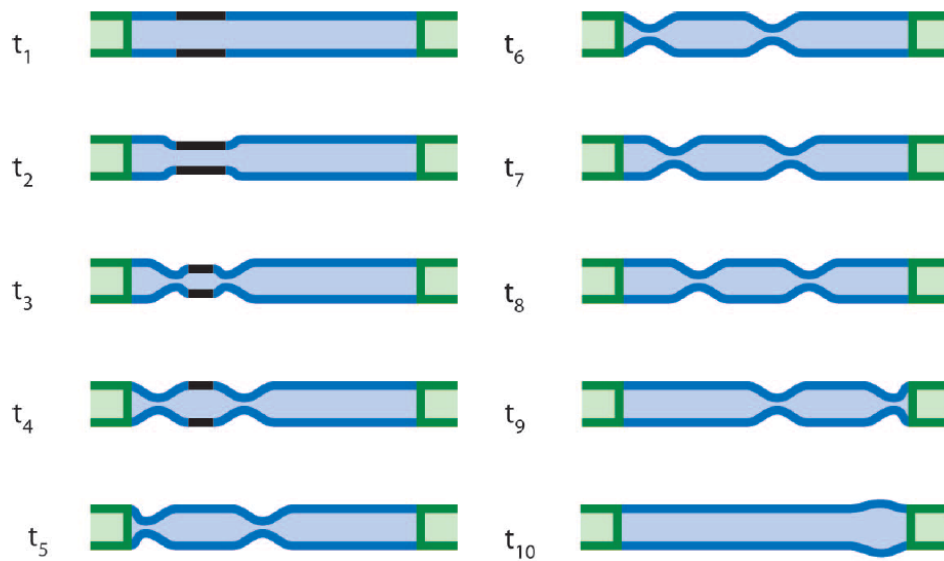


Figura 4 Movimiento de las ondas [11] a lo largo de la bomba de impedancia. En azul, verde y negro se representan, respectivamente, el tubo flexible, los tubos rígidos y la zona presionada. Nótese cómo las ondas rebotan en las conexiones con la tubería rígida y originan complicados patrones al superponerse.

- En [12] se trabaja con un tubo elástico unido en sus extremos a otros más cortos de distinta impedancia. Al final de estos tubos hay dos depósitos sellados que se presurizan para aumentar la presión transmural (diferencia entre la presión dentro de una cavidad, menos la presión fuera del compartimento que se esté considerando) del tubo elástico, que a su vez están unidos por un tubo rígido para cerrar el circuito. Mediante imágenes por ultrasonido del movimiento de la pared del tubo elástico se estudia el movimiento de las ondas y determinar la frecuencia natural. Se realiza un estudio paramétrico variando la ubicación de la percusión, ancho del percutor, frecuencia, presión del sistema y pérdidas de carga del bucle. Se concluye que la bomba de impedancia a determinadas frecuencias de excitación y amplitud puede tener mayor eficiencia que una bomba peristáltica y que el principal mecanismo de bombeo es la dinámica de la onda, trabajando de manera más eficiente en frecuencias resonantes.
- En [13] se realiza un estudio por simulación numérica de la bomba de impedancia para un sistema abierto. Se proporcionan resultados de un amplio rango de condiciones de bombeo para casos resonantes y no resonantes.
- En [14] se realiza un estudio que examina la hipótesis de que la aorta humana adulta actúa como una bomba de Liebau. En el embrión, el papel del excitador lo juegan una banda de células contráctiles cerca

del tubo de entrada del corazón [15]. Una vez el sistema cardiovascular se ha formado, el corazón genera ondas que se propagan en la aorta que pueden llegar a formar un efecto de bombeo similar al de una bomba de impedancia. En este estudio se busca investigar si la aorta podría actuar como conducto para la reflexión y propagación de las ondas y su consecuente efecto de bombeo ofreciendo así un mecanismo de bombeo suplementario que ayuda a reducir su carga. Se utiliza un modelo hidráulico con distintos modelos de una aorta artificial para series de experimentos in vitro. Los resultados indican que la propagación y reflexión de ondas pueden resultar en un mecanismo de bombeo en la aorta. En el Journal of Biomechanics aplican una bomba de Liebau con pistón a un modelo de látex de una aorta humana, llegando a aislar ambos efectos: la bomba de impedancia y el bombeo asimétrico.

Manopoulos [16] presenta un modelo unidimensional con alto grado de precisión, caracterizando el comportamiento de resonancia en frecuencias cercanas a la natural.

Propst realiza un modelo analítico [17] para sistemas con dos y tres tanques unidos mediante tuberías rígidas, en el que el tanque central se comporta como un pistón.

1.3 Aplicaciones del bombeo sin válvulas

1.3.1 Prótesis activas cardiovasculares

Una de las aplicaciones del bombeo sin válvulas es su uso para generar un flujo adicional en pacientes que sufran del corazón izquierdo hipoplásico (HLHS) [18]. Esta patología consiste en el incompleto desarrollo de estructuras del lado izquierdo del corazón, como la válvula mitral, el ventrículo izquierdo, la válvula aórtica o el arco aórtico Figura 5 a). Al haber solo un ventrículo, la sangre oxigenada y la que contiene gases residuales y es pobre en oxígeno se mezclan y se envía a todo el cuerpo. Esto causa la muerte en aproximadamente un año de vida. Tiene una incidencia entre 0,16 y 0,36 casos por cada mil nacimientos y supone entre un 1,4% y 3,8% de las cardiopatías congénitas. Es el responsable del 23% de las muertes cardíacas que ocurren en la primera semana de vida. Hoy en día, gracias a avances, desde la década de 1980, médicos y en la cirugía, tras tres operaciones se alarga la esperanza de vida permitiéndoles llegar a la adultez temprana:

- Operación Norwood: se conecta al ventrículo derecho para impulsar sangre oxigenada hacia el cuerpo. Figura 5 b).

- Operación Glenn: la sangre de la parte superior del cuerpo va a los pulmones sin pasar por el corazón al conectar la vena cava superior a la arteria pulmonar, Figura 5 c).
- Operación de Fontan: la vena cava inferior se une a la arteria pulmonar, desconectándose del corazón, Figura 5 d). El ventrículo derecho ya no bombea sangre a los pulmones.

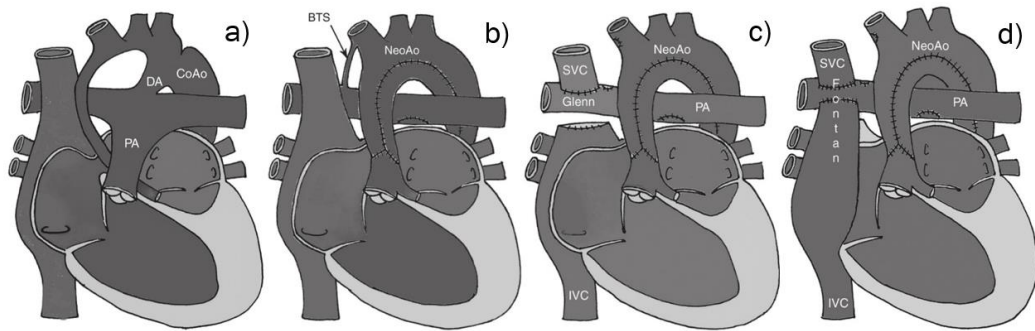


Figura 5 a) Síndrome del corazón izquierdo hipoplásico; b) operación de Norwood; c) operación de Glenn; y d) operación de Fontan.

El resultado de las tres operaciones tiene una tasa de supervivencia entre el 50% y 70%. Se logra separar la sangre oxigenada de la desoxigenada haciendo que esta última vaya directamente a las arterias pulmonares sin pasar por el corazón. Sobre el 40% de los niños sigue con vida a los 10 años después de la operación. Sin embargo, los pacientes con estas operaciones tendrán a lo largo de su vida efectos secundarios. Entre ellos:

- Presiones altas en las venas y bajas en las arterias pulmonares, generando bronquitis plástica, infecciones en el intestino y problemas en el hígado.
- Eventos tromboembólicos y arritmias recurrentes por las cicatrices del corazón.
- Intolerancia al ejercicio e insuficiencia cardíaca.

En conclusión, se consigue transformar una cardiopatía congénita mortal en una no mortal. La idea es aplicar una bomba sin válvulas en la unión de la vena cava inferior y la arteria pulmonar que se encargue de asistir el bombeo de sangre hacia los pulmones, paliando dichos efectos secundarios.

1.3.2 Refrigeración en microelectrónica

Chih-Yung Wen del Caltech junto con Wei-Shen Kuo y Kuok-Pong Leong en 2013 estudian por primera vez el uso del bombeo por impedancia para la refrigeración en sistemas electrónicos [19]. Se comprime un tubo de látex conectado en ambos extremos a tubos de cobre de diferente impedancia mediante un actuador simple, económico, silencioso y energéticamente eficiente que consiste en un motor de corriente continua y una leva. Esta compresión es periódica y en una posición asimétrica respecto a los extremos del tubo. Se ensayan diversos sistemas como uno abierto con flujo isotérmico y otro cerrado de refrigeración líquida.

En los últimos años la refrigeración en equipos electrónicos de alto rendimiento se ha convertido en un factor importante debido al incremento de calor generado en estos sistemas. La fiabilidad y rendimiento dependen del control de la temperatura por lo que es un punto de atención para los ingenieros. Las microbombas, con sus ventajas por su tamaño, dimensiones configurables, poco consumo de energía y escaso ruido han surgido como opción para la refrigeración líquida.

En su estudio obtienen un caudal máximo de 480 ml/min para un rango de voltaje de 10-13 V equivalente a una frecuencia de 48-63 Hz, los cuales son afrontables para portátiles y ordenadores. Este flujo óptimo se da a una frecuencia de 51 Hz y en la posición de 1/8 del tubo elástico. La altura máxima es de 0,62 m. El agua del sistema de lazo cerrado mantenía la temperatura del núcleo del calentador a 57,8°C, suficiente disipación de calor para la función óptima de los portátiles actuales.

Sus resultados demuestran la factibilidad de sus aplicaciones comerciales en la refrigeración. Aunque es un método sencillo, se deben estudiar la elección del material del tubo flexible para extender la durabilidad del bombeo, la longitud óptima del mismo, frecuencia de actuación y la posición de la excitación en el tubo. Además, se debe encontrar solución al endurecimiento del tubo de látex tras horas de refrigeración, así como mejorar la resistencia del tubo a la fricción por la leva.

1.4 Problema a resolver

Se han realizado diversos estudios tratando de obtener los parámetros que afectan en las prestaciones del bombeo asimétrico, bombeo por impedancia y mixto, mediante sistemas abiertos o cerrados. La mayoría se centran en el bombeo por impedancia o mixto, mientras que sobre bombeo asimétrico solamente hay referencias de estudios utilizando como elemento activo un pistón. El problema a resolver consiste en estudiar las prestaciones

del bombeo asimétrico cuando éste se produce excitando un tubo flexible de látex en su mitad. En especial, es necesario construir las instalaciones necesarias y caracterizar los tubos flexibles a través de su compliance, que es la principal propiedad mecánica que afecta a las prestaciones de la bomba asimétrica.

1.5 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es fabricar una serie de instalaciones hidráulicas y definir una serie de procedimientos para el estudio del bombeo asimétrico. Para ello, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Construcción de una instalación para la fabricación de tubos de látex.
- Construcción de una instalación para la caracterización de la flexibilidad de los tubos de látex.
- Construcción de un banco de pruebas para bombas asimétricas.
- Caracterización de los tubos de látex analizando los efectos de cinco parámetros básicos en la compliance: el número de capas, el uso en la instalación hidráulica, la aplicación de vaselina, la humedad y la longitud.
- Estudio de las prestaciones de bombas asimétricas implementadas a partir de los tubos caracterizados anteriormente, de acuerdo a los siguientes parámetros mediante las curvas características de altura-caudal.

1.6 Contenido de este documento

Este documento se divide en los siguientes capítulos:

1. **Introducción:** se explica brevemente el funcionamiento del bombeo sin válvulas, ya sea bombeo por impedancia, asimétrico o mixto. Se explican los estudios previos existentes relacionados con esta materia mostrando el progreso a lo largo de los años y sus posibles aplicaciones en la creación de bombeo para pacientes con el síndrome del corazón izquierdo hipoplásico que hayan sido sometidos a las operaciones de Norwood, Glenn, y Fontan y en la refrigeración de circuitos.
2. **Material y métodos:** se describen las instalaciones utilizadas, sus componentes y metodología de uso siendo estas el robot de fabricación

de tubos de látex, la instalación para la caracterización de tubos de látex y la instalación de bombeo asimétrico o hidráulica.

3. **Resultados:** esta sección se divide en dos grandes bloques. En el primero se muestran los resultados del estudio de la compliance de los tubos de látex bajo una serie de parámetros, como por ejemplo la repetitividad del método de fabricación, el efecto del uso de estos en la instalación hidráulica, el efecto de la humedad, el modo de almacenamiento, el espesor de la pared del tubo y el efecto de la aplicación de vaselina. En el segundo, se muestran los resultados de los ensayos en banco de pruebas de bombeo asimétrico a través de las curvas características de altura-caudal, principalmente sobre parámetros que afectan a las características del tubo de látex.
4. **Conclusiones:** se resumen las principales conclusiones de este trabajo.
5. **Otros aspectos de interés:** propuesta de líneas futuras y presencia de los resultados de este trabajo en congresos.
6. **Presupuesto:** desglose de costes asociados con este proyecto.
7. **Bibliografía.**
8. **Anexos.**

2 Material y métodos

Se dispone de tres instalaciones. La primera consiste en un robot para la elaboración de tubos de látex en la que se pueden seleccionar el grosor de éstos. La segunda tiene como función caracterizar la flexibilidad del tubo de látex. Por último, la tercera instalación es un banco modular de ensayos del bombeo sin válvulas en el que se puede variar las condiciones de contorno del sistema.

2.1 Robot para la fabricación de tubos de látex

2.1.1 Descripción de la instalación

Para la fabricación de los tubos de látex utilizados en los ensayos se utiliza el robot de tres grados de libertad la instalación de la Figura 6. Consiste en una barra de metal que se introduce en un recipiente cilíndrico que contiene látex líquido de base amoniacal, girando lentamente. Posteriormente se extrae automáticamente y rota a alta velocidad en un ángulo inclinado para conseguir que el líquido se cure de manera uniforme creándose una capa del material. Este proceso se repite tantas veces como número de capas se requiera y es totalmente automático. Finalmente, cada tubo de látex fabricado se corta en tres tubos segmentos. Se trabaja con tubos de entre tres, cinco, siete y nueve capas.



Figura 6 Robot de fabricación de tubos de látex y tubo fabricado sin cortar.

Este dispositivo es controlado por un Arduino® Nano, sobre una Shield CNC y el software libre GRBL 1.1. Los programas de fabricación del tubo se codifican mediante secuencias G-code (control numérico). La aplicación interfaz entre el hombre y la máquina (HMI) que se utiliza es el software libre Candle.

La estructura sobre la que se sostiene está formada por barras de aluminio de perfil V-Slot 40 x 40 mm. Las barras verticales tienen 115 cm de longitud, mientras que las horizontales miden 30 cm. La barra sobre la que rueda la estructura de PLA es también de perfil V-Slot pero de dimensiones 20x40 mm y 740 mm de longitud, y está anclada a la barra horizontal superior.

El robot consta de tres actuadores: el X le permite inclinarse mediante dos engranajes; con el Y puede rotar sobre su propio eje; y el Z le permite moverse verticalmente a través de un tornillo sin fin. Se pueden ver en la Figura 7. Los actuadores Y y Z son motores paso a paso OSMEC 17HS19-1684S1, Nema 17, bipolares, de 200 pasos por revolución y eje único. El motor X es un motor paso a paso OSMEC 17HS24-0644S, también Nema 17, bipolar. Los motores se sujetan sobre una estructura impresa en PLA estándar.

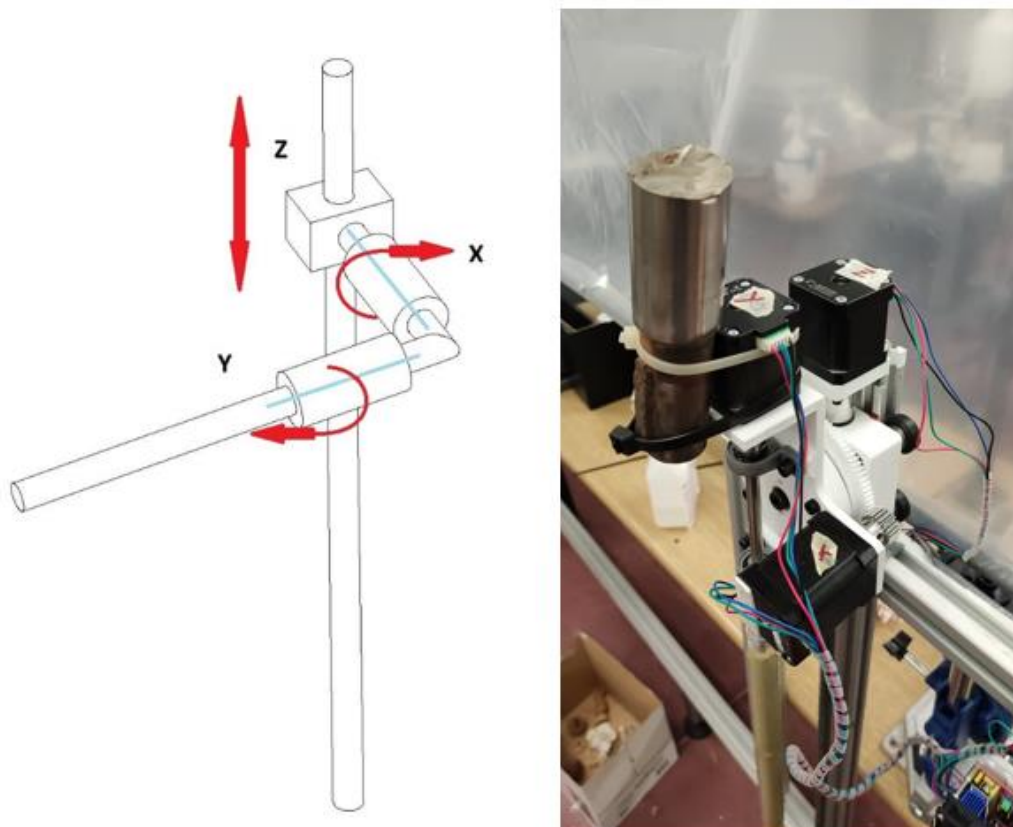


Figura 7 Esquema e imagen de los actuadores del robot de fabricación de tubos.

La barra roscada sobre la que se realiza el movimiento vertical posee un roscado trapezoidal de M10 y paso 2 mm y 800 mm de longitud. La barra en la que se forman los tubos de látex ha sido equilibrada en su extremo más corto para cambiar el centro de gravedad al eje en el que rota el motor X. El recipiente que contiene látex está anclado a la estructura mediante la barra horizontal inferior. Su longitud y diámetro interior son 60 cm y 3 cm, respectivamente.

2.1.2 Metodología

En primer lugar, se atornilla la barra de fabricación al eje y se aplica talco sobre su superficie para facilitar la extracción del tubo de látex una vez fabricado. También se comprueba la perpendicularidad para asegurar la correcta introducción de la barra en el recipiente cilíndrico. A continuación, se ejecuta el programa Candle indicando el número de capas deseadas. La barra baja rotando, introduciéndose mediante el actuador Z en el recipiente que contiene el látex. Cuando se ha introducido completamente se engrasa el recipiente con látex hasta quedar completamente lleno. Tras un tiempo determinado la barra cubierta con látex sube saliendo del recipiente y el actuador X la inclina. En esta posición rota a una velocidad mayor durante otro periodo de tiempo consiguiendo uniformidad de la distribución del material a lo largo de la barra. Todo este proceso tiene alrededor de 30 min de duración. Después se repite el proceso tantas veces como capas se programen, teniendo en cuenta que el tubo se introduce a una mayor profundidad después de cada repetición, tratando de compensar la cantidad de látex que se ha consumido formando la capa. La extracción del tubo, una vez fabricado, se consigue enrollando el látex sobre sí mismo desde una punta a la otra, y se estira llenándolo de agua y colgándolo. El resultado es un tubo ciego de alrededor de 42 cm de largo y 2 cm de diámetro. Finalmente se corta en tres tubos de 14 cm de largo. Cada uno de estos tubos pequeños se codifica y se hacen dos marcas a 10 cm de distancia entre sí indicando los límites de unión con las tuberías de PVC de las otras estaciones (Figura 8).

Los espesores de pared los tubos obtenidos son de 0,3 mm para los tubos de tres capas, 0,5 mm para los de cinco capas, 0,7 mm para los de siete y 1,05 mm para los de nueve capas, como muestra la Tabla 1.

Nº capas	Espesor (mm)
3	0,3
5	0,5
7	0,7
9	1,05

Tabla 1 Espesor de pared de los tubos fabricados, según su número capas.



Figura 8 Tubos de látex fabricados y codificados.

Como la longitud útil es de 10 cm y el diámetro es de 2 cm volumen en reposo de los tubos es de $3,1415 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$. A continuación se colocan en una estructura que ha sido diseñada para almacenar los tubos de látex con agua en su interior (Figura 9).



Figura 9 Almacenamiento de tubos de látex. Nótese en el fondo un tubo largo recién fabricado y colgado, aún sin cortar.

2.1.3 Codificación de los tubos

Los tubos se codifican de la siguiente manera, atendiendo tanto a los datos de fabricación como a su historial de uso:

- Fecha de fabricación (DD/MM).
- Tramo del tubo fabricado al que corresponde (T1, T2 o T3, siendo T1 el del extremo cerrado, T2 el central y T3 el extremo abierto).
- Número de capas (3c, 5c, 7c o 9c).
- Tubo nuevo o ya usado en la instalación hidráulica mediante una (N o U, respectivamente).
- Información adicional:
 - Repetición de caracterización (R).
 - Almacenado sumergido en agua (re).
 - Secado tras haber sido almacenado en remojo (sec).
 - Untado con vaselina (vas).
 - Longitud útil distinta a 10 cm

Por ejemplo, un tubo con la siguiente denominación,

25/02 T1 7c U (vas)

significa: tubo creado en 25/02 correspondiente al tramo 1, de 7 capas, ya usado en la instalación hidráulica con vaselina.

2.2 Instalación para la caracterización de tubos de látex

2.2.1 Hipótesis

La flexibilidad de los tubos de látex se caracteriza mediante la compliance, definida como la variación de volumen unitaria al variar la presión transmural [20] (ΔV):

$$C = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dP} \quad (1)$$

donde C, V₀, V y P son Compliance, volumen en reposo (o volumen inicial), volumen y presión transmural (diferencia de presión entre el interior y el exterior del tubo), respectivamente.

2.2.2 Descripción de la instalación

La instalación para caracterizar la flexibilidad de los tubos de látex se muestra en la Figura 10.



Figura 10 Esquema e imagen de la instalación para la caracterización de tubos de látex.

Esta instalación permite inyectar volúmenes conocidos de agua a través de la jeringa y observar la variación de la presión transmural en el tubo de látex mediante el manómetro (características en Tabla 2). Se asume que toda la instalación es rígida a excepción del tubo de látex. Por lo tanto, al estar inyectando un fluido incompresible, este volumen será el mismo incremento de volumen que experimente el tubo de látex.

Marca	JUMO
Modelo	JUMO d TRANS p30 TYP404366/000 TN43006500
Material de la carcasa	Acero inoxidable
Rango de medida (presiones manométricas)	Desde 0 hasta 0.25 bar
Precisión	± 0.156% BFSL

Rango de temperaturas	Fluido: 30 - 140°C Ambiente: -20 - 100°C Almacenaje: 40 - 125°C
Tensión de alimentación	10-30 V (corriente continua)
Salida analógica	4 - 20 mA

Tabla 2 Características manómetro de la instalación para la caracterización de tubos de látex.

2.2.3 Metodología

Para caracterizar la compliance de los tubos de látex se procede de la siguiente manera. Primero se acopla el tubo de látex a caracterizar a los tubos de PVC de forma estanca. Previamente se han añadido capas de teflón en los bordes de los tubos de PVC para conseguir un mayor grosor y por tanto un mejor ajuste de las uniones (Figura 11). El espesor requerido dependerá del número de capas del tubo de látex. A continuación, se asegura estanqueidad de la unión mediante abrazaderas metálicas.



Figura 11 Montaje del tubo de látex para su caracterización.

Después se coloca el sistema en posición vertical para llenarlo con agua (Figura 12). De este modo se evacúa de la instalación para garantizar que el fluido es incompresible. Montaje del tubo de látex para su caracterización

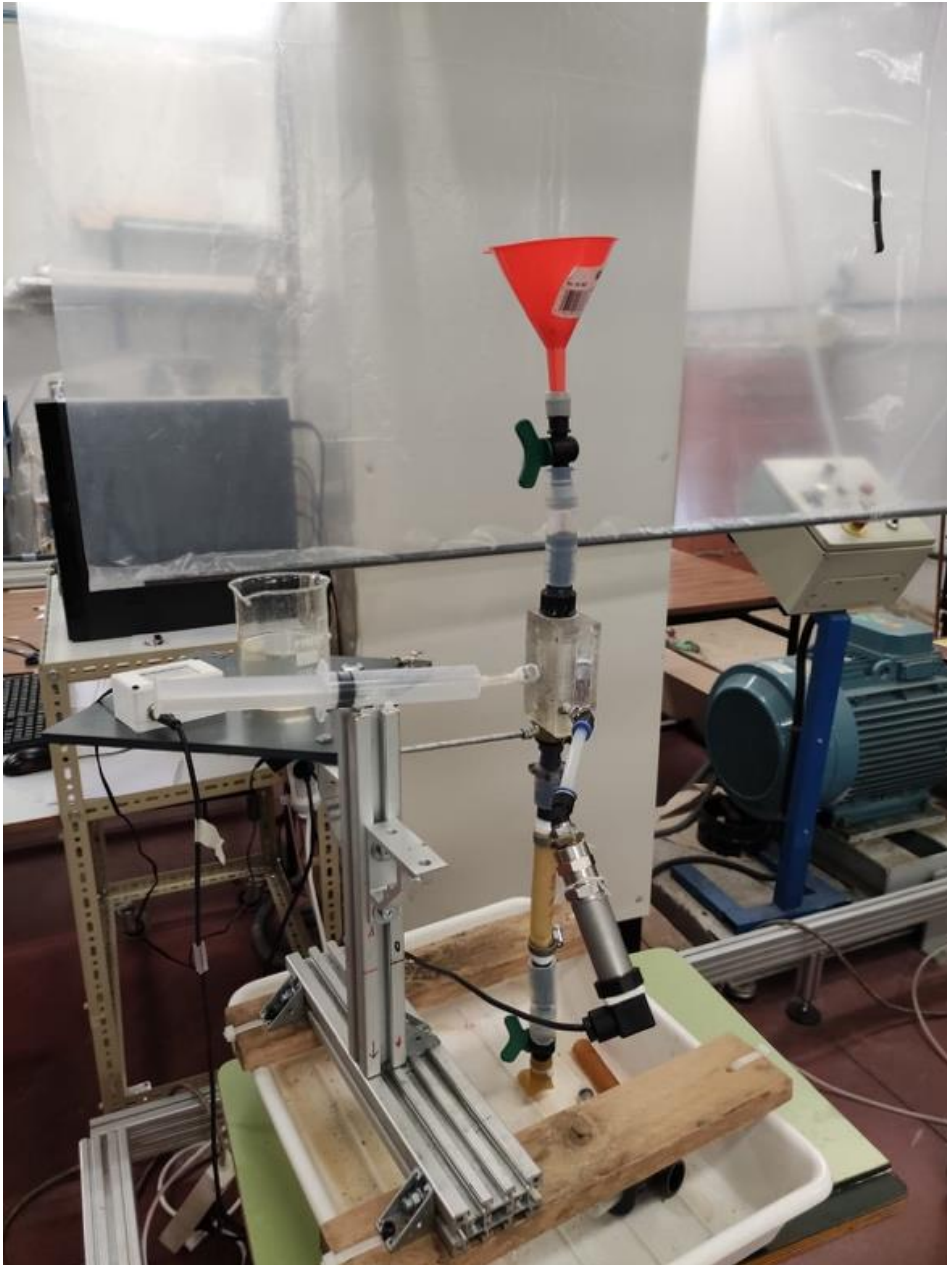


Figura 12 Llenado instalación de caracterización de tubos.

A la hora de tomar las medidas, se presiona el émbolo de la jeringa haciendo que este avance y entre un volumen de agua al sistema. En concreto, se inyectan 2 ml adicionales para cada medida. Tras esperar unos segundos a la estabilización de la lectura del manómetro, se apunta la medida obtenida. Se repite hasta llegar a 20 ml totales inyectados. Debido a que el manómetro está colocado bajo una columna de agua entre el tubo principal y su toma de presión de 20 cm, se debe realizar una corrección en la presión. Esta sobrepresión equivale al producto de la densidad del agua $1.000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, el valor de la gravedad terrestre $9,8 \text{ (m/s}^2\text{)}$ y dicha distancia vertical, resultando en $19,62 \text{ mbar}$ que se deben restar al valor de la presión medido.

La compliance se calcula de forma numérica (2), sustituyendo la derivada del volumen respecto a la presión (dV/dP) por diferencias finitas ($\Delta V/\Delta P$). El volumen en reposo, V_0 , sería el volumen cuando se inyectan 0 ml, que se calcula de forma teórica (para una longitud de 10 cm y un diámetro de 2 cm se corresponde con $3,1416 \times 10^{-5} \text{ m}^3$).

$$C = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta P} \quad (2)$$

La Tabla 3 muestra un ejemplo de un ensayo de compliance, en concreto para el tubo 17/02 T3 7c N, donde se puede observar el volumen inyectado, la presión medida, la presión corregida y la compliance (en Pa^{-1} tras el pertinente cambio de unidades).

17/02 T3 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa^{-1})
0	67,2	47,58	
2	91,2	71,58	2,6526E-05
4	112	92,38	6,1213E-05
6	127,9	108,28	1,2012E-04
8	141,8	122,18	1,8320E-04
10	153,3	133,68	2,7679E-04
12	164,6	144,98	3,3803E-04
14	172,9	153,28	5,3691E-04
16	180,5	160,88	6,7013E-04
18	186,7	167,08	9,2413E-04
20	192,1	172,48	1,1789E-03

Tabla 3 Datos Tubo 17/02 T3 7c N.

2.3 Instalación de bombeo asimétrico

Esta instalación (Figura 13) permite ensayar distintos modos de bombeo sin válvulas. Debido a su naturaleza modular, permite variar fácilmente su configuración, como por ejemplo el tipo de bombeo (asimétrico, impedancia o mixto), geometría y materiales (longitudes y diámetros, lazo abierto o cerrado, etc.) o excitación (tipo de actuador, frecuencia, tiempo de ciclo, etc.). En este TFG se utiliza en modo de bombeo asimétrico con la misma geometría y configuración de la excitación, variando únicamente el tubo de látex a ensayar.

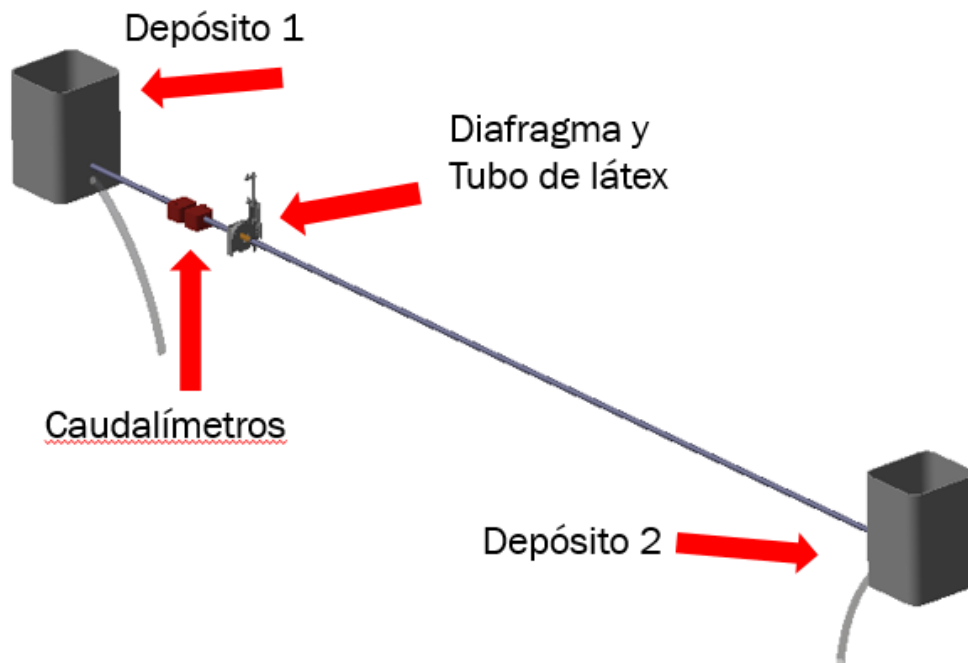


Figura 13 Banco de pruebas de bombeo asimétrico.

2.3.1 Descripción de la instalación

La instalación hidráulica consta de los siguientes elementos:

- Dos depósitos de grandes dimensiones de 750 cm² de sección transversal (Figura 14), denominados depósito de aspiración (o depósito 1, más cercano a la bomba sin válvulas) y depósito de impulsión (o depósito 2, más lejano a la bomba sin válvulas). El flujo trasiega desde el depósito 1 hacia el depósito 2. Ambos poseen en su parte inferior una tubería auxiliar con válvula para realizar su vaciado. En los ensayos se llenan hasta 15 cm por encima de la tubería principal.
- Tubería rígida de PVC de 2 cm de diámetro exterior y 2 mm de espesor de pared. La longitud de la tubería es de 0,75 m en el lado de aspiración y 3,25 m en el lado de impulsión. Dos tramos de silicona rígida transparente permiten ubicar caudalímetros de ultrasonidos. Están diseñadas para variar su longitud fácilmente, permitiendo cambios en la asimetría del sistema. Las uniones al tubo de látex se logran mediante bridas metálicas.
- Dos caudalímetros de ultrasonidos unidireccionales (Figura 17 y Tabla 4 con características).

- Manómetro, ubicado en la zona inferior del depósito 2 (Tabla 5 con características).
- Electrónica adquisición (Figura 15). Contiene un Arduino® Due que recibe las lecturas del manómetro y los caudalímetros cada 1 ms. Almacena datos en una tarjeta SD que posteriormente se descargan al ordenador.
- Electrónica de control. Se encarga de accionar las electroválvulas del actuador neumático que comprime rítmicamente el tubo de látex. Contiene un Arduino Nano®. Está programado con dos modos: frecuencia fija y óptima. En el modo de frecuencia fija se elige la frecuencia que se desea manualmente y se mantiene constante. En el modo de frecuencia óptima, cuando detecta el máximo de la señal del caudalímetro cierra el diafragma, que es cuando el tubo de látex se rellena de agua (Figura 20). El duty cycle o tiempo de cerrado es de un tercio el tiempo del ciclo.
- Diafragma. Es el actuador que comprime el tubo de látex. El diafragma está accionado por un pistón neumático que impulsa alternativamente una cremallera engranada con una corona dentada, la cual mueve las palas abriendo y cerrando el diafragma (Figura 19 y Figura 21).



Figura 14 Depósitos 1 (izquierda) y 2 (derecha).

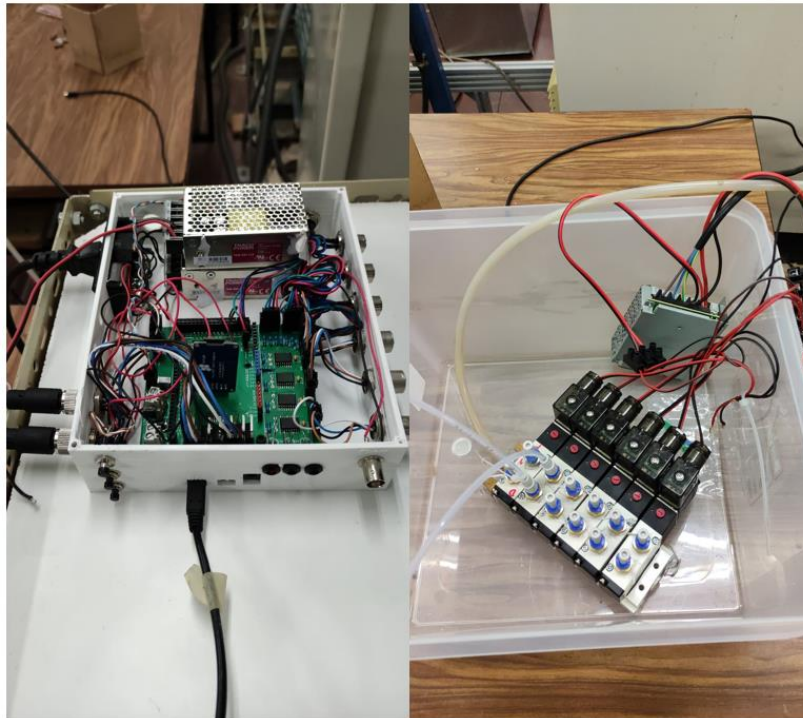


Figura 15 Electrónica de adquisición y control.



Figura 16 Software de adquisición.



Figura 17 Caudalímetros unidireccionales, orientados en la dirección negativa (1) y positiva (2).

Marca	Sonotec
Modelo	SONOFLOW IL.52/4
Principio de medida	Ultrasonidos
Caudal máximo	10 L/min
Precisión en agua a 23°C ± 2°C y a 1 bar	0 - 0.06 L/min: ± 0.6 mL/min, 0.06 - 0.6 L/min: ± 1.0%
Ciclo de medida	20 ms
Adaptador para conexión del tubo	Diámetros: exterior 8 mm / interior 4 mm
Medición de temperatura	Sensor integrado (±1 °C)
Alimentación	12-30V DC

Corriente requerida	100 mA máximo
Rango de temperaturas	Fluido: 0 – 140 °C, Ambiente: 0-70 °C, Almacenaje: -20 – 70 °C
Salida analógica	4 - 20 mA

Tabla 4 Características de los caudalímetros.

Marca	KELLER
Tipo	PD-23 /8666.1
Material de la carcasa	Acero inoxidable
Rango de medidas (presiones manométricas)	0 - 200 mbar
Precisión	± 0.5% FE
Rango de temperaturas	Almacenaje: -40 – 100 °C
Alimentación	8 - 32 V DC
Salida analógica	4 - 20 mA

Tabla 5 Características del manómetro de la instalación hidráulica.

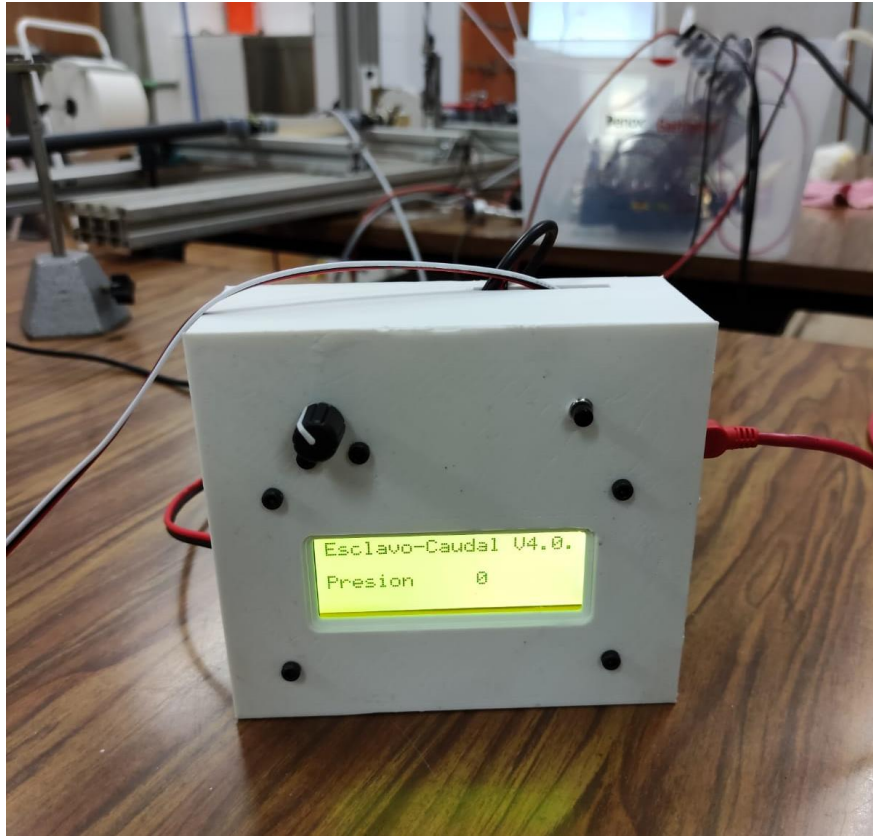


Figura 18 Caja de control del diafragma.

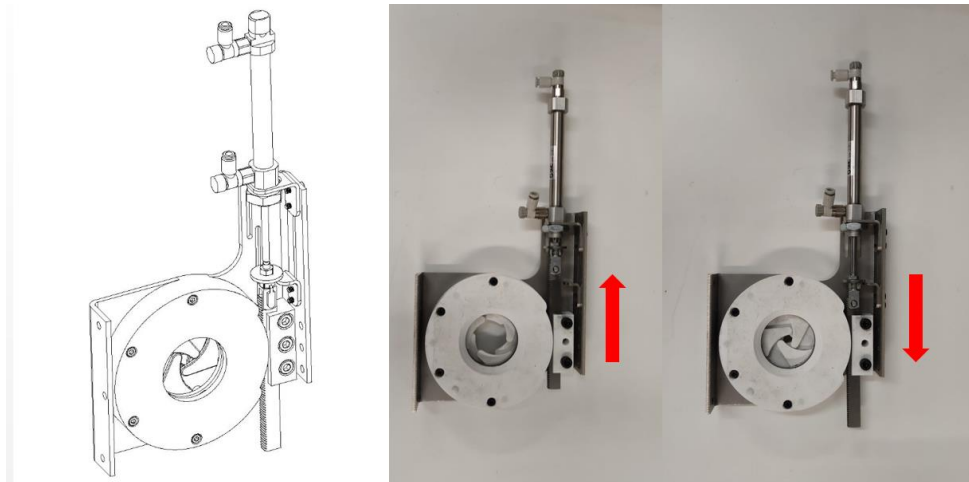


Figura 19 Diafragma y posiciones abierto y cerrado.

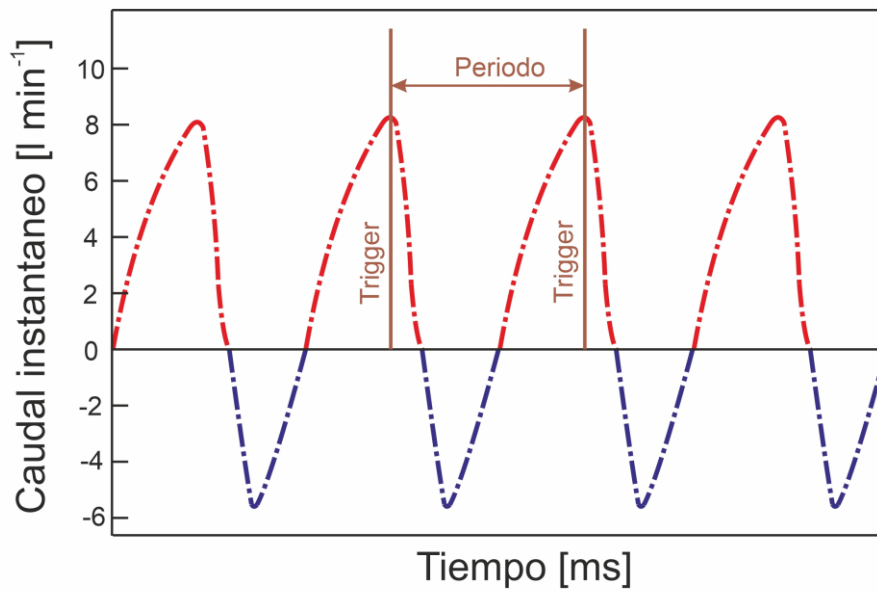


Figura 20 Señal de los caudalímetros 1 (azul) y 2 (rojo). En el modo de frecuencia óptima el diafragma se dispara cuando la señal del caudalímetro 2 es máxima.

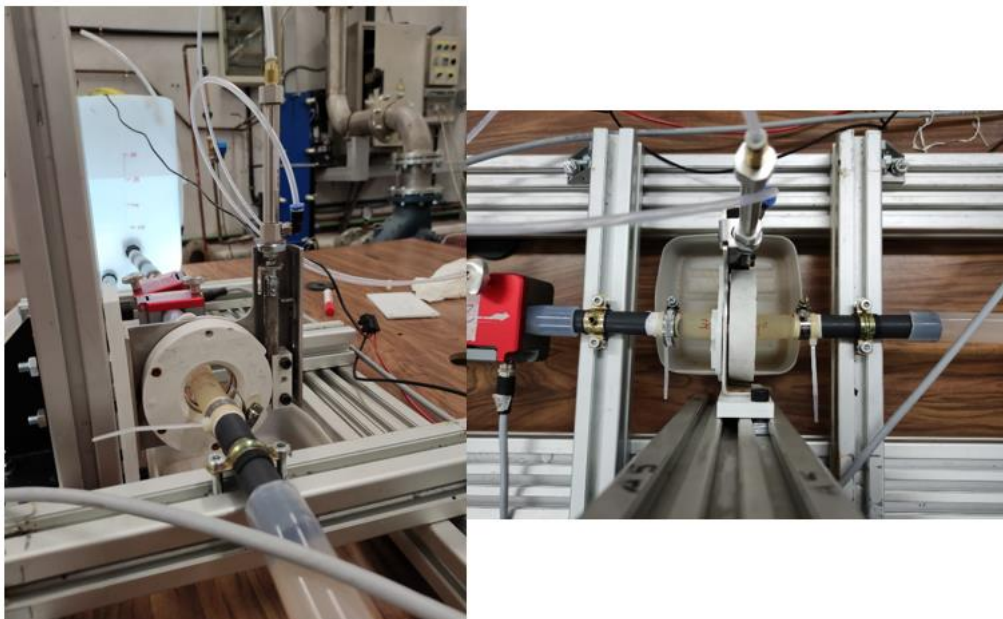


Figura 21 Diafragma en la instalación hidráulica.

2.3.2 Metodología

En primer lugar, con la instalación vacía se elige el tubo de látex que se desea ensayar y se instala. A continuación, se rellenan los depósitos de agua, comprobando que no queden burbujas de aire en los conductos. Después, se configura la adquisición y el actuador, eligiendo el método con el que se desee ensayar, ya sea el de frecuencia fija o el de frecuencia óptima, y se lanza el

experimento. Se realizan tantas pruebas como sean necesarias o hasta que el tubo de látex se rompa. Finalmente se vacía la instalación mediante las válvulas de la parte inferior de los depósitos.

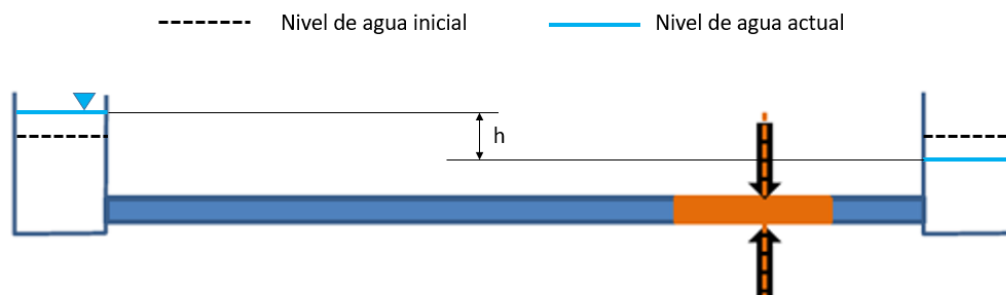


Figura 22 Diferencia de altura h .

La altura de agua que se consiga en un depósito respecto a la inicial, será la misma que baje en el otro, Figura 22. Asumiendo un caudal de 1 L/min, el número de Reynolds es aproximadamente $Re = 1.000$, lo cual se corresponde con flujo laminar y el coeficiente de fricción en las tuberías se puede calcular como $64/Re$. Las pérdidas por fricción, estimadas mediante la ecuación de Darcy-Weissbach arrojan un resultado en torno a 2 mm, un orden de magnitud de la diferencia entre las alturas de las superficies entre ambos depósitos observadas. Por lo tanto, son despreciables y la altura de bombeo, h , se puede asumir como dicha diferencia de alturas entre superficies y viene dada por (3):

$$h = 2 \frac{P - P_0}{\rho g} \quad (3)$$

donde P es la presión medida en el fondo del depósito de impulsión, P_0 la presión inicial cuando h es cero, ρ es la densidad del agua y g es la aceleración gravedad. En cada ciclo se promedia la altura Figura 23. Cada ciclo dura entorno a medio segundo.

Los caudalímetros son unidireccionales, es decir, solo toman datos del caudal en una dirección. Debido a que el flujo es oscilante es necesario colocar dos, uno por cada sentido. Para cada ciclo se promedia el caudal Figura 24. Las curvas características altura-caudal se construyen a partir de las alturas y caudales promediados.

Las frecuencias de excitación medidas se encuentran en el rango de cero a cinco hercios. El número de Womersely, parámetro adimensional asociado a flujos biológicos pulsantes, es aproximadamente 32, definido a través de (4):

$$Wo = R \sqrt{\frac{\rho \omega}{\mu}} \quad (4)$$

donde R es el radio de la tubería, ρ es la densidad del agua, μ es la viscosidad dinámica del agua y ω la frecuencia angular. Los valores con los que se ha trabajado entran dentro de los característicos del sistema circulatorio humano [21], [22].

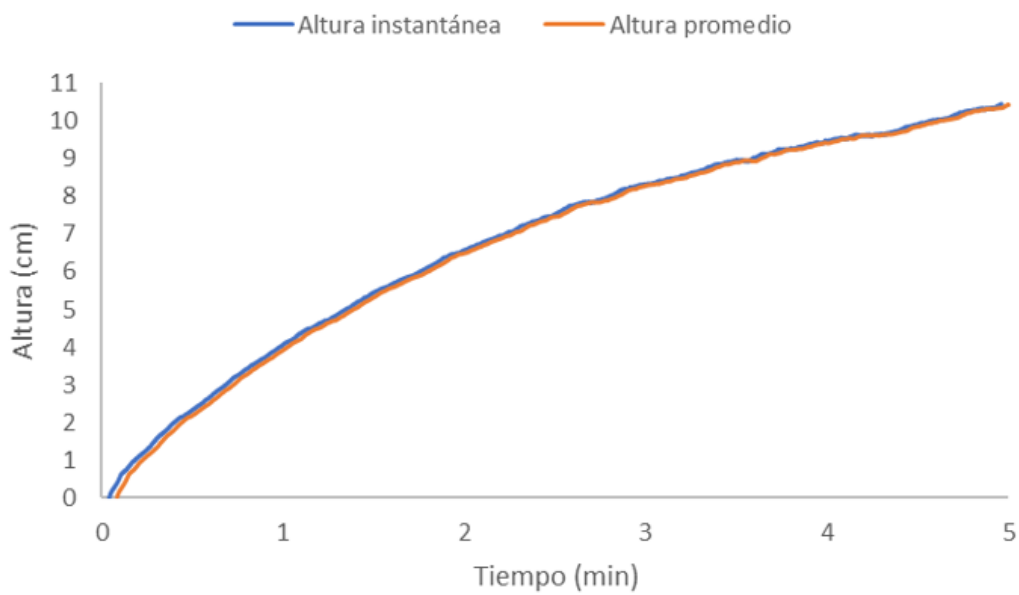


Figura 23 Altura frente al tiempo.

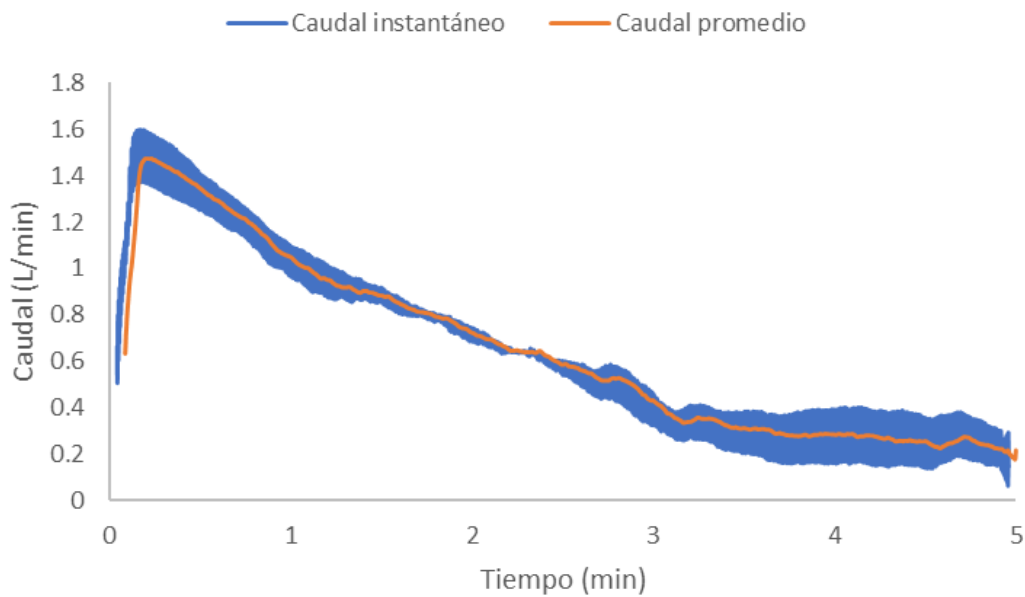


Figura 24 Caudal frente al tiempo.

3 Resultados

3.1 Caracterización tubos de látex

En este apartado se estudia la compliance de los tubos de látex. Se comprueba en primer lugar la repetitividad de los resultados. A continuación, se analizan los efectos de cinco parámetros básicos: el número de capas, el uso en la instalación hidráulica, la aplicación de vaselina, la humedad y la longitud.

3.1.1 Validación

En la Figura 25 se grafica la compliance en función de la presión transmural para el “Tubo 17/02 Tramo 3, 7 capas Nuevo” .

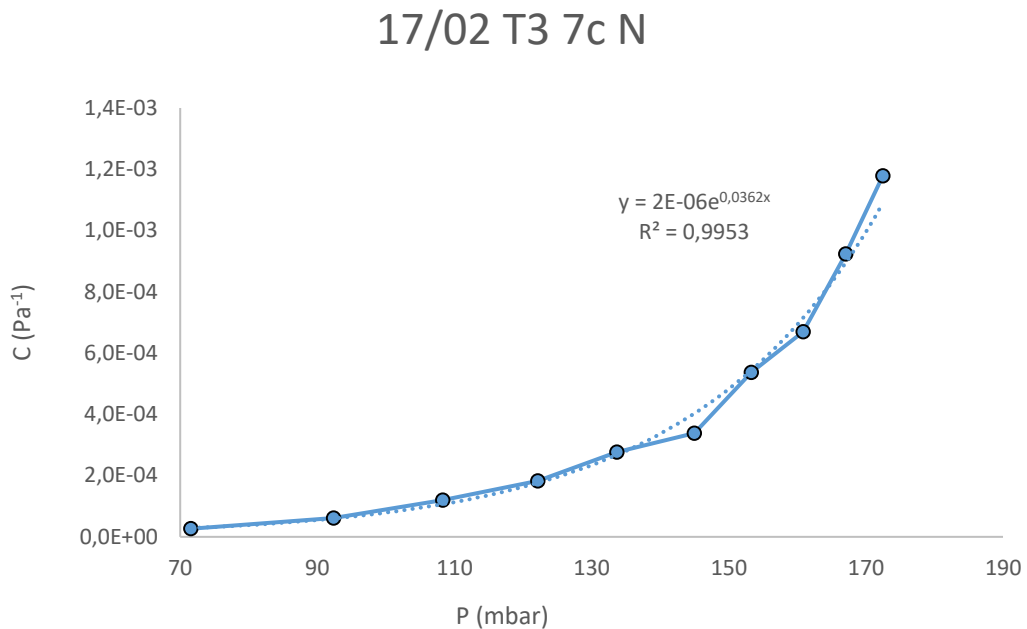


Figura 25 Curva de compliance para Tubo 17/02 Tramo 3, 7 capas Nuevo.

Se observa una curva en la que los valores de C van aumentando conforme aumenta la presión. Esta curva corresponde con una exponencial, por lo que en algunas gráficas posteriores utilizarán escala logarítmica. La pared del tubo de látex se va volviendo más fina según se va añadiendo volumen de agua y se va hinchando el tubo. La ecuación exponencial de la curva es (5):

$$C = C_0 e^{K(P-P_0)} \quad (5)$$

donde C, C₀, K, P y P₀ son compliance, compliance a una presión transmural P₀, una constante característica, presión transmural y presión transmural de referencia, respectivamente (en este se ha considerado P₀ = 0). En el ejemplo anterior la curva se corresponde con:

$$C = 2 \cdot 10^{-6} e^{(0,0362P)}$$

3.1.2 Repetitividad

En la siguiente gráfica se comparan las series de datos de tres tubos en los que la prueba se ha repetido dos veces, con el objetivo de comprobar la repetitividad del procedimiento experimental (Figura 26).

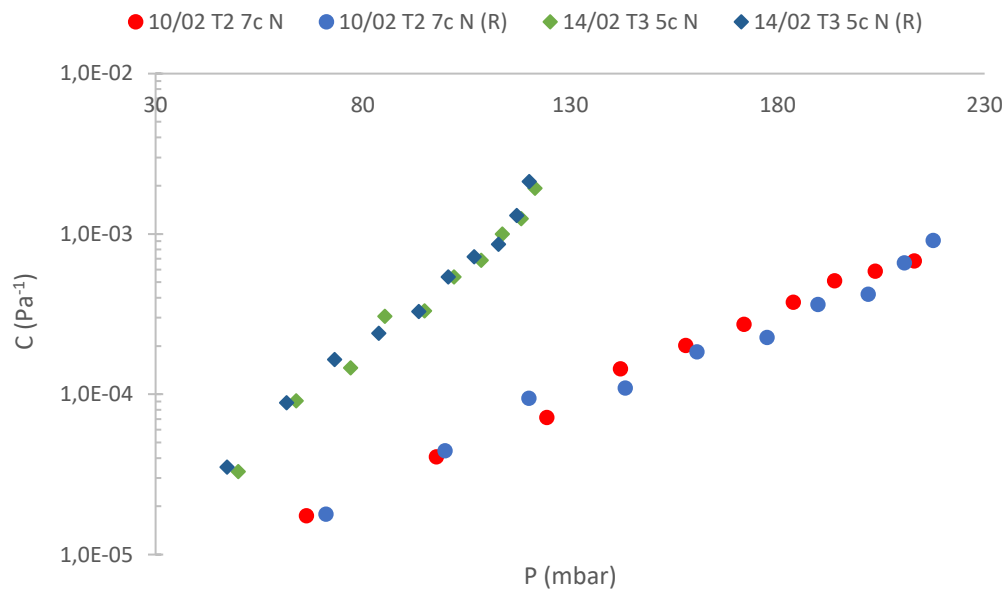


Figura 26 Curvas de compliance para la repetitividad.

En primer lugar, los puntos rojos y azules con forma de círculo hacen referencia al Tubo 10/02 Tramo 2, 7 capas Nuevo y su repetición. Se comprueba que la repetitividad de los resultados se mantiene.

En segundo lugar, los puntos verdes y azules oscuro con forma de rombo son los del tubo 14/02 Tramo 3, 5 capas Nuevo y una repetición. La nube de puntos es prácticamente idéntica, demostrando de nuevo la repetitividad del experimento. Por lo tanto, el procedimiento experimental es repetible para tubos de diferente grosor.

Además, se observa que los puntos del tubo de cinco capas están más a la izquierda de la gráfica y que su curva exponencial que forman tiene mayor pendiente. Esto se debe a que es más flexible que el de siete capas. Se realizará una comparación con la flexibilidad y el número de capas que se estudiará con más profundidad más adelante.

La Figura 27, Figura 28, Figura 29 y Figura 30, muestran los datos de tres tubos cada una de tres, cinco, siete y nueve capas respectivamente y sus medias correspondientes ajustadas a la curva exponencial (para nueve capas se tomaron siete puntos en lugar de once porque la presión superaba el fondo de escala del manómetro). Se observa que se mantiene la repetitividad entre tramos distintos de una misma serie fabricada. En el caso de los tubos de siete capas, la repetitividad se extiende a tubos de distintas series de fabricación.

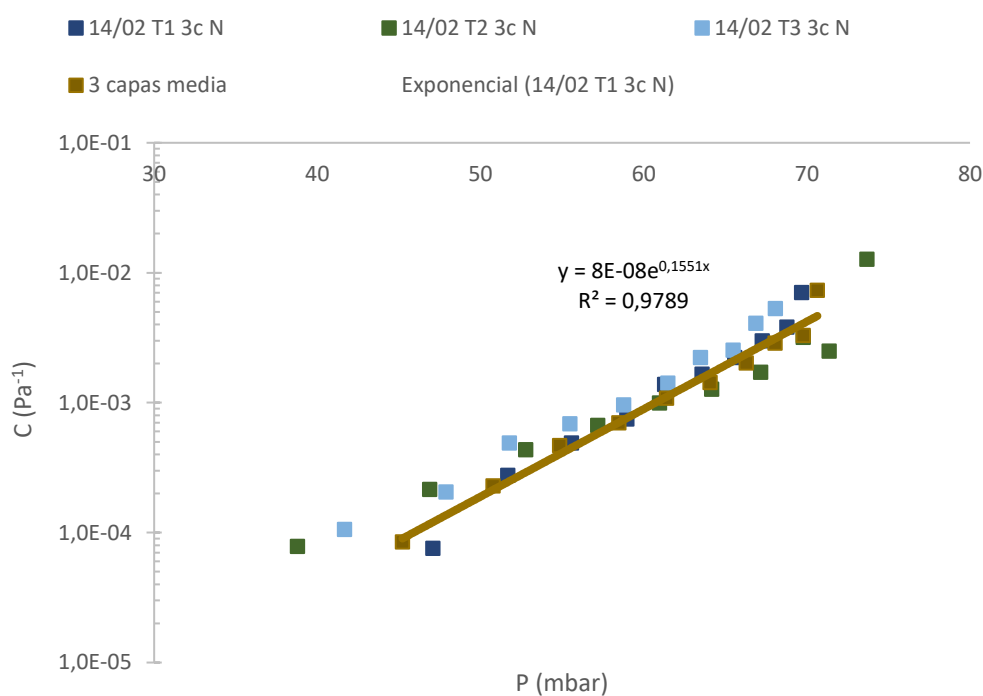


Figura 27 Curvas de compliance para la repetitividad de tres capas.

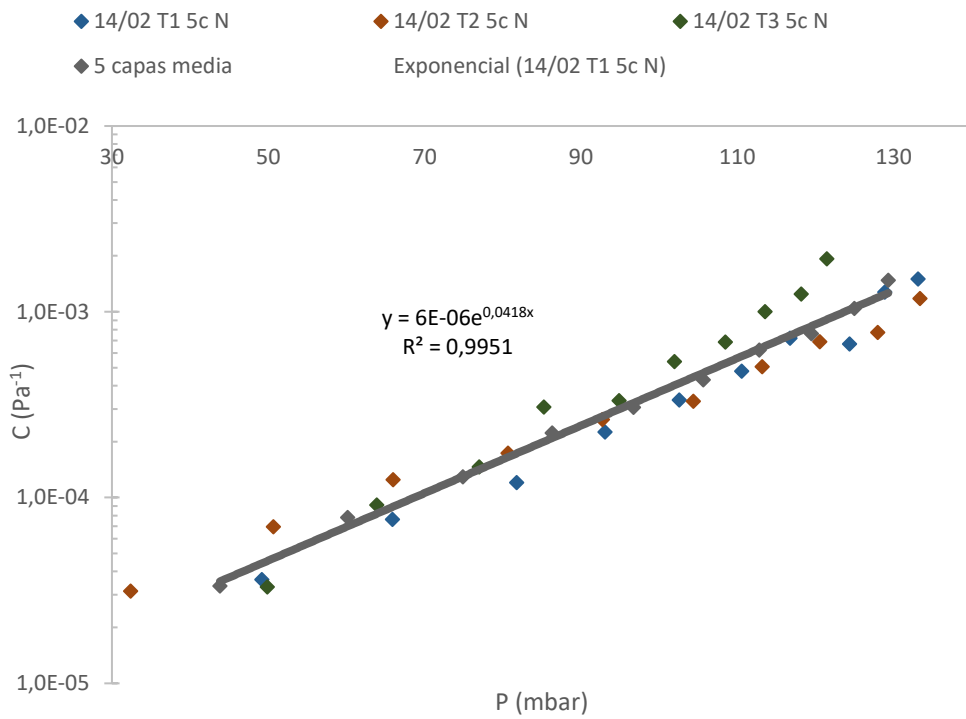


Figura 28 Curvas de compliance para la repetitividad de cinco capas.

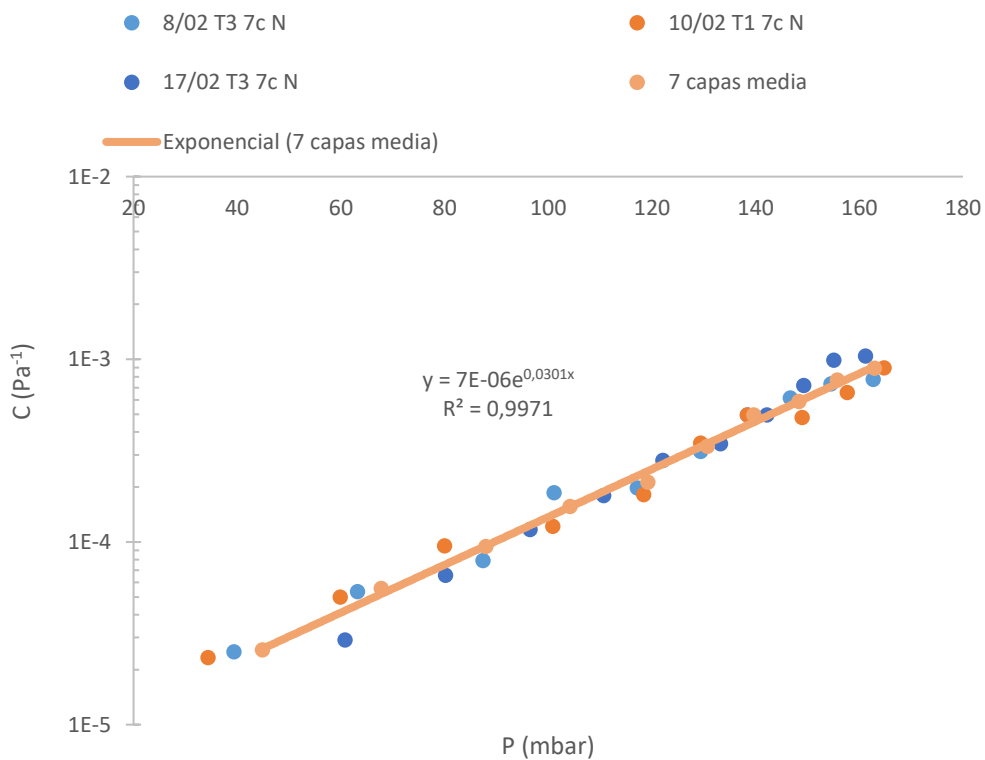


Figura 29 Curvas de compliance para la repetitividad de siete capas.

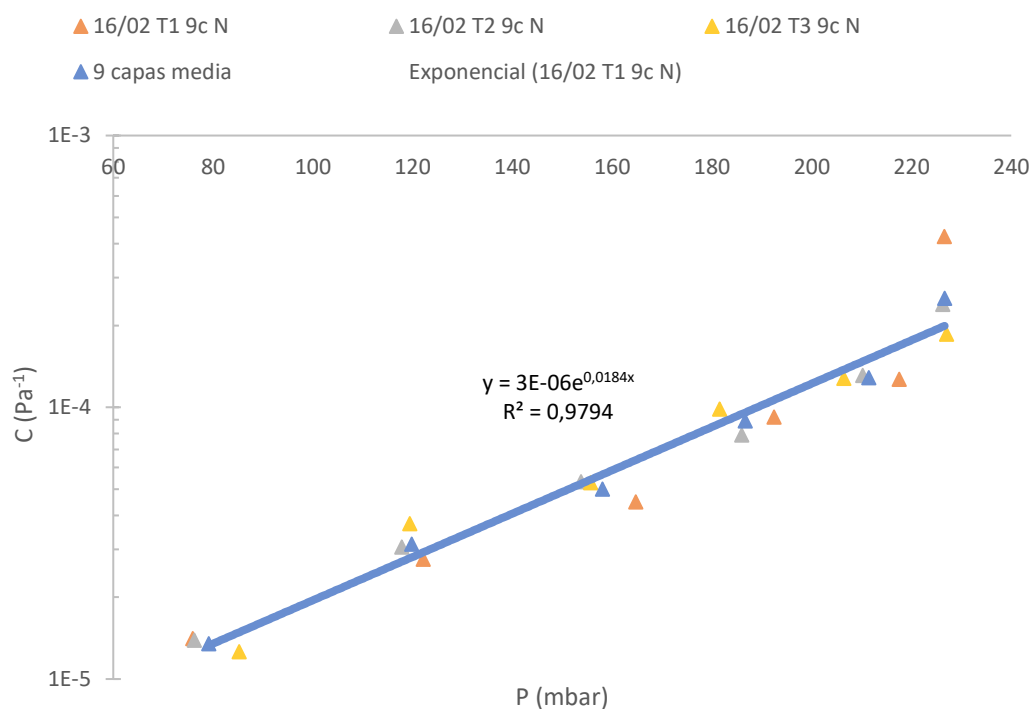


Figura 30 Curvas de compliance para la repetitividad de nueve capas.

3.1.3 Número de capas

En la Figura 31 se representan las curvas de compliance medias para tubos de tres capas, cinco, siete y nueve capas. Cuanto mayor pendiente tenga la curva, mayor flexibilidad tendrá el tubo. Los ajustes de las curvas se muestran en la Tabla 6. Cuanto mayor sea el valor de R^2 , menor será la dispersión respecto a la línea de tendencia exponencial.

Número de capas	C_0 (Pa ⁻¹)	K (mbar ⁻¹)	R^2
3	$8 \cdot 10^{-8}$	0,1551	0,9789
5	$6 \cdot 10^{-6}$	0,0418	0,9951
7	$7 \cdot 10^{-6}$	0,0301	0,9971
9	$3 \cdot 10^{-6}$	0,0184	0,9794

Tabla 6 Coeficientes de los ajustes exponenciales a las medidas medias según el número de capas.

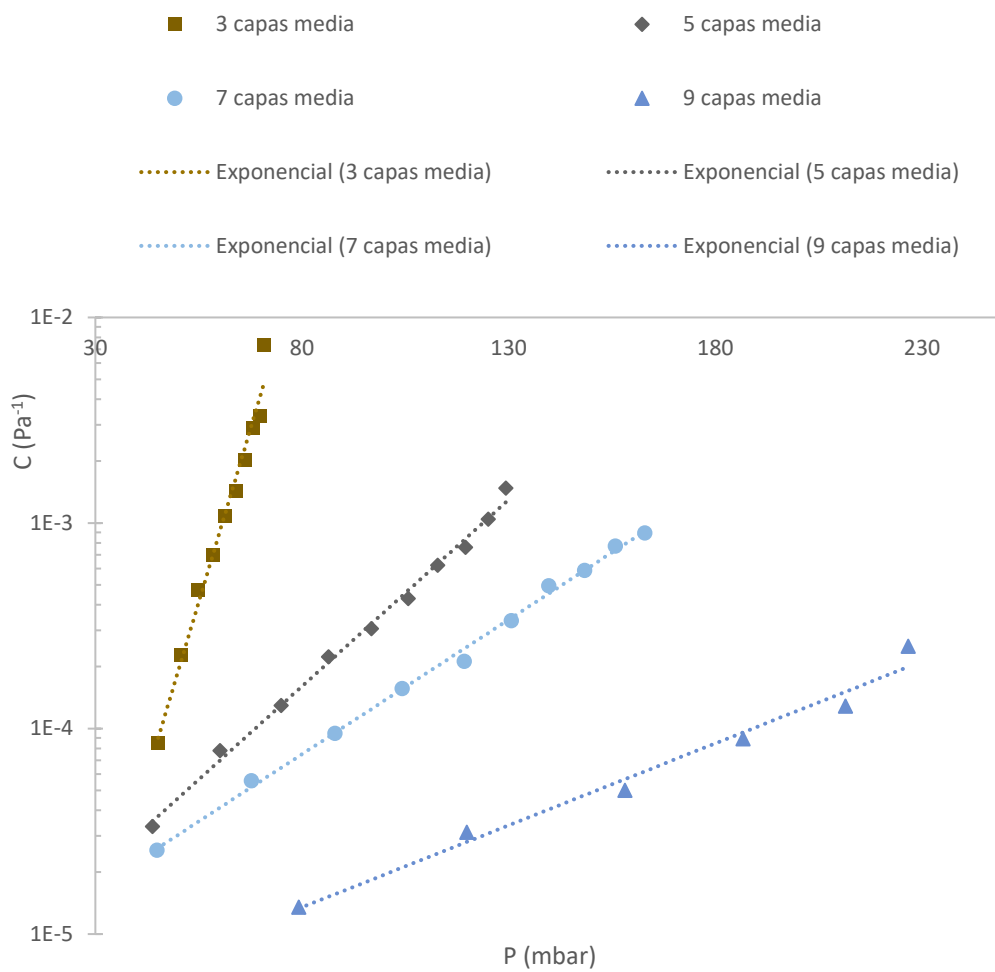


Figura 31 Curvas de compliance para las medias de las medidas por número de capas.

La Figura 32 y la Figura 33 muestran la relación del C_0 y de K respecto del número de capas. En el primer caso, C_0 aparentemente sigue en el rango estudiado una tendencia parabólica respecto al número de capas con un máximo en torno a siete capas. En el segundo caso, K disminuye inversamente proporcional al número de capas. Al ser más rígido el tubo su comportamiento elástico tiende a parecerse más al régimen lineal ideal.

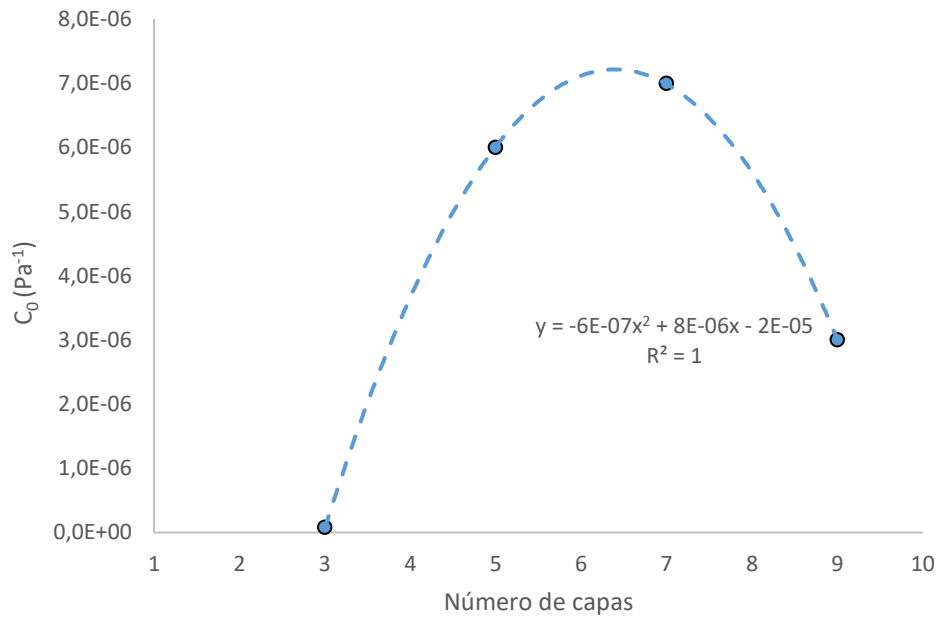


Figura 32 C_0 en función del número de capas.

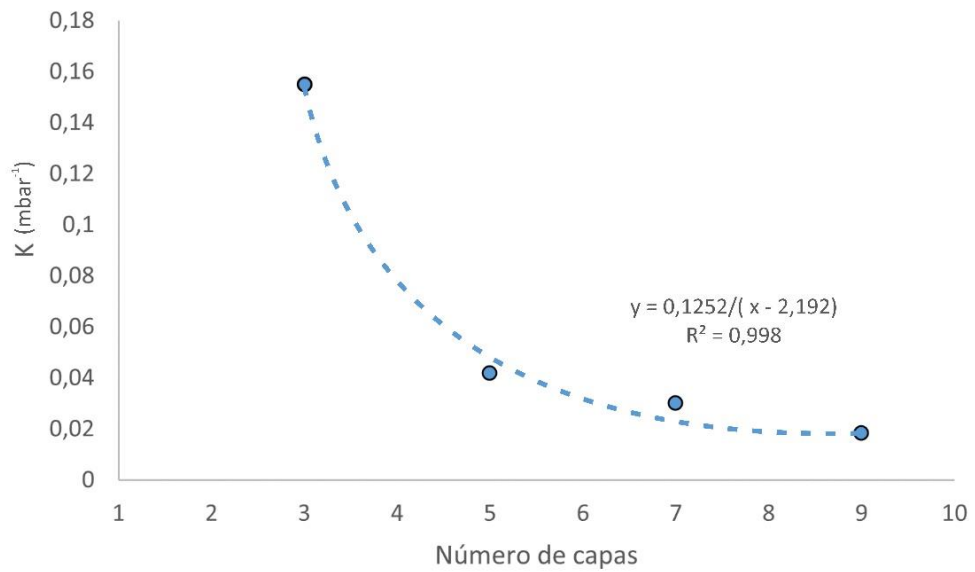


Figura 33 K en función del número de capas.

3.1.4 Uso en instalación hidráulica

La Figura 34 compara las curvas de compliance del mismo tubo nuevo y tras ser usado en la instalación hidráulica. No se observan cambios significativos debido al desgaste.

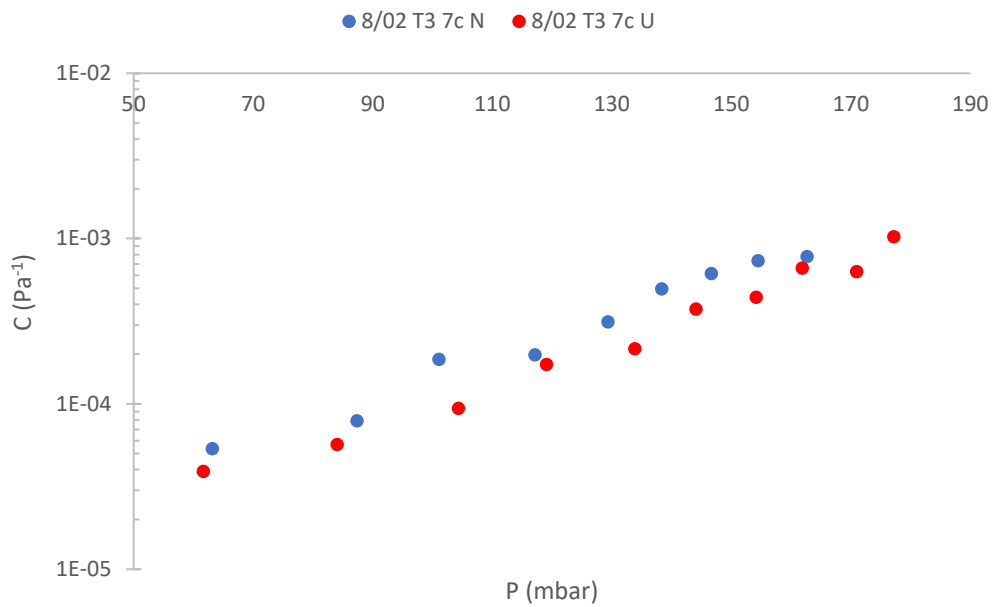


Figura 34 Curvas de compliance para la comparación de nuevo y usado.

3.1.5 Aplicación de vaselina

La Figura 35 compara el Tubo 25/02 Tramo 1, 7 capas Nuevo en naranja con el mismo usado con vaselina en azul. Se aprecia que los puntos en naranja están más desplazados a la derecha siendo más rígidos. Esto puede deberse a que el tubo ha estado relleno con agua durante la prueba en la instalación hidráulica o a que el tubo absorbe la vaselina.

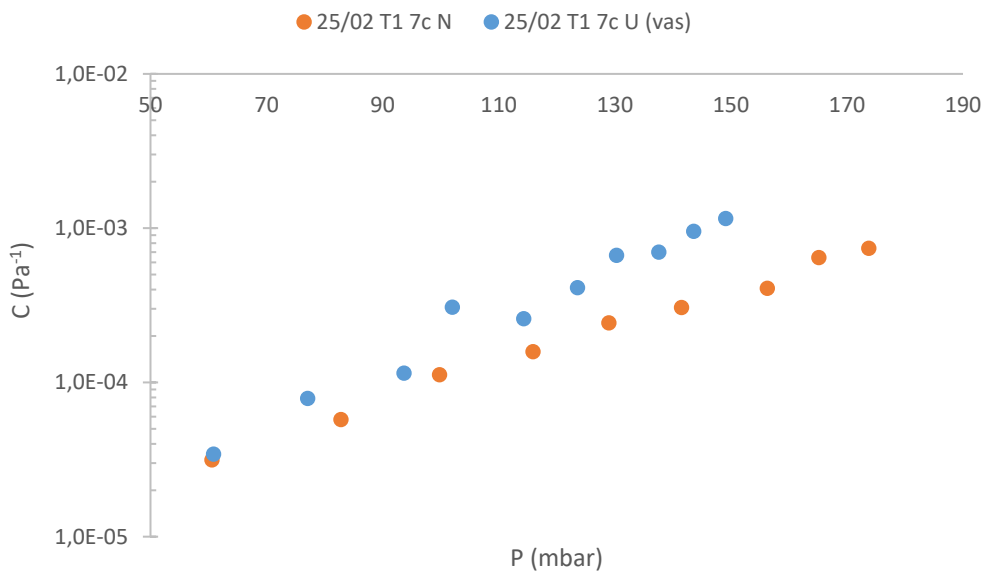


Figura 35 Curvas de compliance para la comparación de con y sin vaselina.

3.1.6 Humedad

Para comprobar el efecto de la humedad se realizaron varias tomas de datos espaciadas en el tiempo a un mismo tubo nuevo (previamente almacenado en seco) que permaneció instalado en la instalación experimental compliance continuamente relleno de agua durante tres días seguidos. En la Figura 37, se aprecia el efecto de estar en contacto con el agua durante estos largos periodos de tiempo. Se observa que las curvas se van desplazando hacia la izquierda hasta converger en una curva muy diferente a la original. Por lo tanto, el tubo se hace más flexible al estar en contacto con agua porque absorbe humedad. De hecho, este cambio de propiedades es apreciable por inspección visual y al tacto, Figura 36.



Figura 36 Efecto de sumergir parcialmente un tubo de látex durante dos días. Nótese el contraste en el color, al blanquearse la parte sumergida. Al tacto también se notan diferencias, siendo la parte sumergida más suave y flexible.

En la Figura 36 se observa que la parte en remojo del tubo de látex adquiere color blanquecino mientras que la parte que no estuvo en contacto con agua permanece con el color del látex. Cuando el tubo queda almacenado con agua sólo en su interior solo la parte interna se blanquea y se vuelve más suave al tacto.

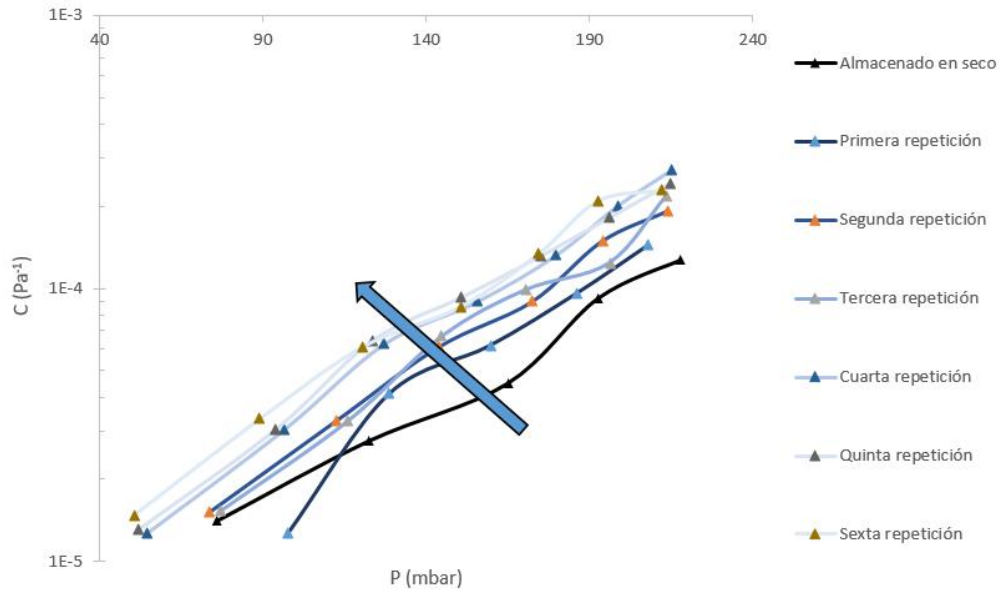


Figura 37 Curvas de compliance para el efecto de la humedad. Tubo 16/02 T1 9c N con agua en su interior. La flecha azul indica que conforme pasa el tiempo, el agua en el tubo lo hace más elástico.

La Figura 38 muestra la curva de secado de un tubo de látex saturado de humedad. El tubo absorbe alrededor de un 10% de su masa en seco.

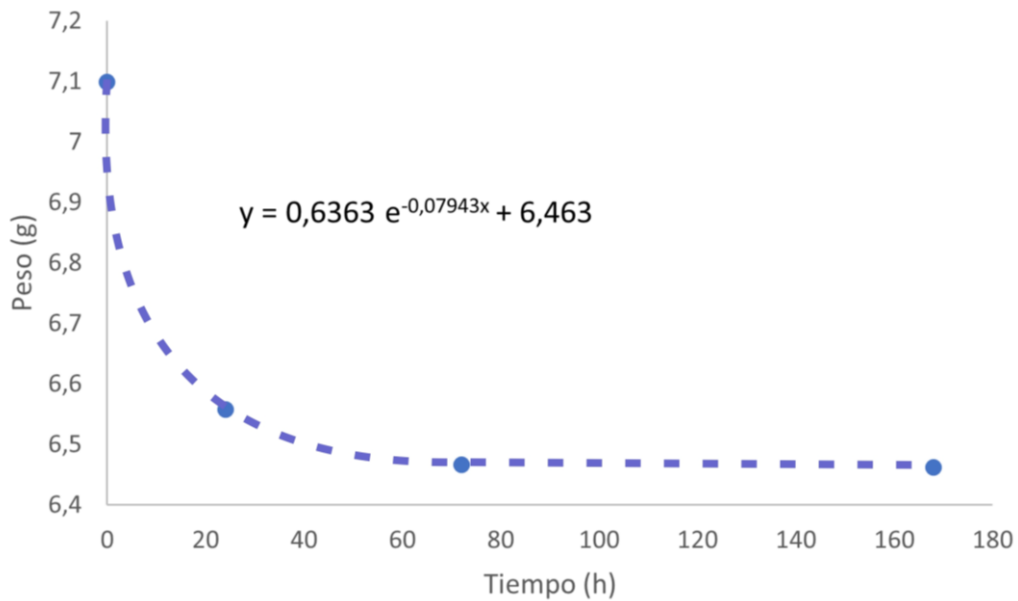


Figura 38 Curva de secado de un tubo inicialmente saturado de humedad.

La curva exponencial negativa es típica de un proceso de secado modelado mediante la ecuación de conservación de las especies (6):

$$\frac{dm}{dt} = -Am \quad (6)$$

donde m es la masa de agua, t el tiempo y, A la constante de la cinética de primer orden de la reacción de evaporación; donde se ha añadido como término independiente el peso del tubo seco.

Dado que los tubos deben almacenarse de modo que sus propiedades sean las mismas que cuando se usen en la instalación hidráulica, se estudió el método de almacenamiento más adecuado: totalmente en remojo o solamente con agua en su interior. En la Figura 39 y la Figura 40 se muestra el efecto de los distintos tipos de almacenamientos para los tubos. En rojo, se muestran los puntos de las curvas referentes al almacenamiento en seco, en verde con agua en su interior y en azul completamente en remojo. Se observa que el tubo que se almacenó con agua en su interior es ligeramente más flexible que el de almacenaje en seco. Además, los tubos que se almacenaron totalmente en remojo se vuelven mucho más flexibles, llegando incluso a asemejarse con curvas con un número de capas inferior. Por lo tanto, se decide que a partir de ahora los tubos se almacenarán con agua en su interior como muestra la Figura 9, ya que será la forma en la que trabaje en la instalación de bombeo.

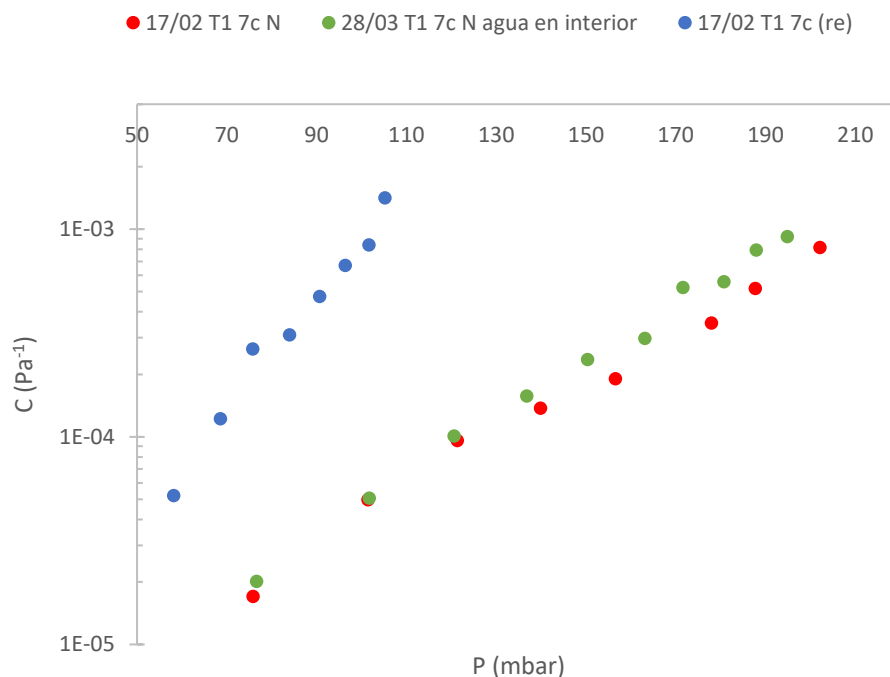


Figura 39 Curvas de compliance para el efecto de almacenamiento en remojo para 7 capas.

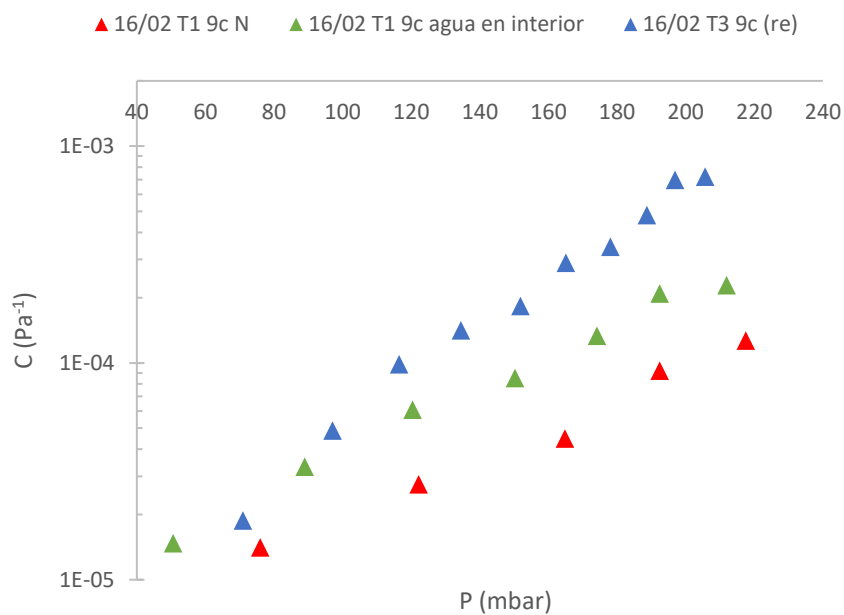


Figura 40 Curvas de compliance para el efecto de almacenamiento en remojo para 9 capas.

3.1.7 Longitud del tubo de látex

Finalmente, se estudió si hay alguna diferencia significativa entre tubos de distinta longitud. La Figura 41 compara las curvas de compliance para la media de los tubos de siete capas y 10 cm y un tubo de siete capas y 20 cm. No se aprecian diferencias muy significativas.

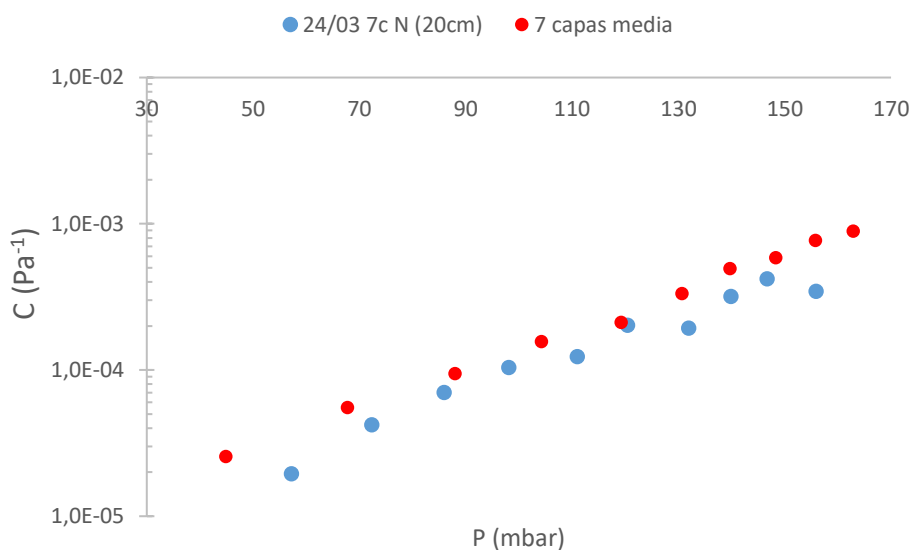


Figura 41 Curvas de compliance para la comparación por longitud.

3.2 Prestaciones de bombeo

Se han estudiado las prestaciones de bombas asimétricas implementadas a partir de los tubos caracterizados anteriormente, de acuerdo a los siguientes parámetros: el número de capas, el uso de vaselina, la longitud del tubo de látex y frecuencia de excitación. Los resultados muestran las curvas características de altura-caudal. El rango de alturas obtenidas sugiere que del tubo de látex trabaja en la zona de bajas presiones de las curvas obtenidas anteriormente.

3.2.1 Número de capas

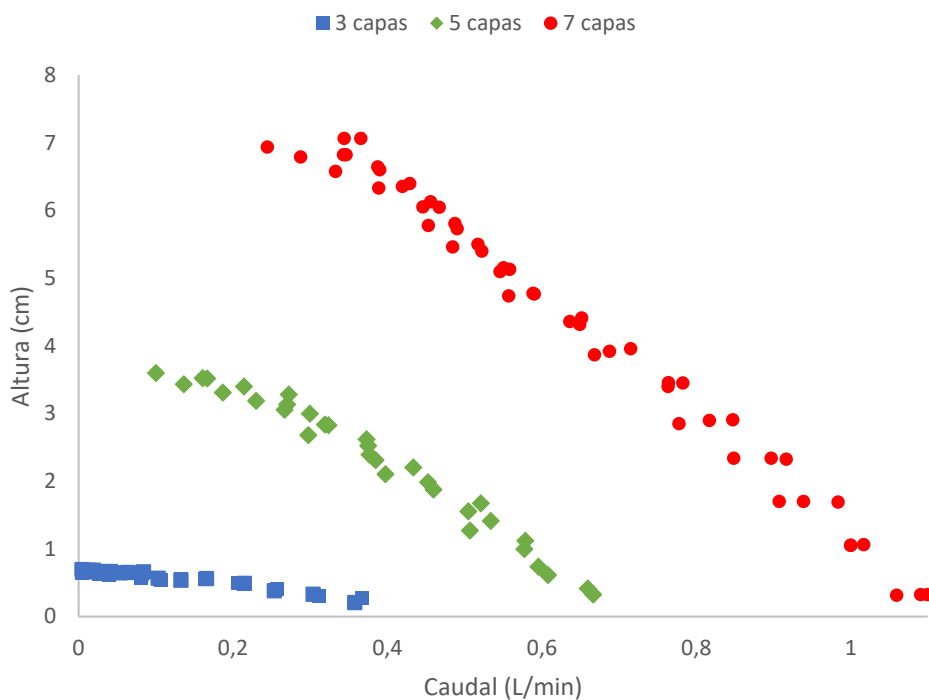


Figura 42 Curvas características de bombeo según el número de capas.

En la Figura 42 se comparan las prestaciones del bombeo según el número de capas: en rojo con círculos se muestran tres repeticiones con un tubo de siete capas, en verde con rombos dos repeticiones de uno con cinco capas y en azul con cuadrados dos de tres capas. Se puede observar que los resultados son repetibles, ya que los puntos para cada ensayo para el mismo número de capas son prácticamente coincidentes, y que a mayor número de capas se consiguen las mejores alturas y caudales. Por lo tanto, se trabajará a partir de ahora con tubos de siete capas. No se pudo caracterizar las prestaciones de bombeo de los tubos de nueve capas debido a que el actuador mecánico no tenía suficiente fuerza para deformarlo completamente.

3.2.2 Aplicación de vaselina

Este ensayo, Figura 43, compara el uso de los tubos recubiertos con vaselina y sin ella. Para ilustrarla se ha realizado el mismo experimento tres veces con y sin vaselina. Se observa que los tubos con vaselina consiguen mejores prestaciones debido a que el tubo se pliega y despliega de manera más fácil al estar lubricado.

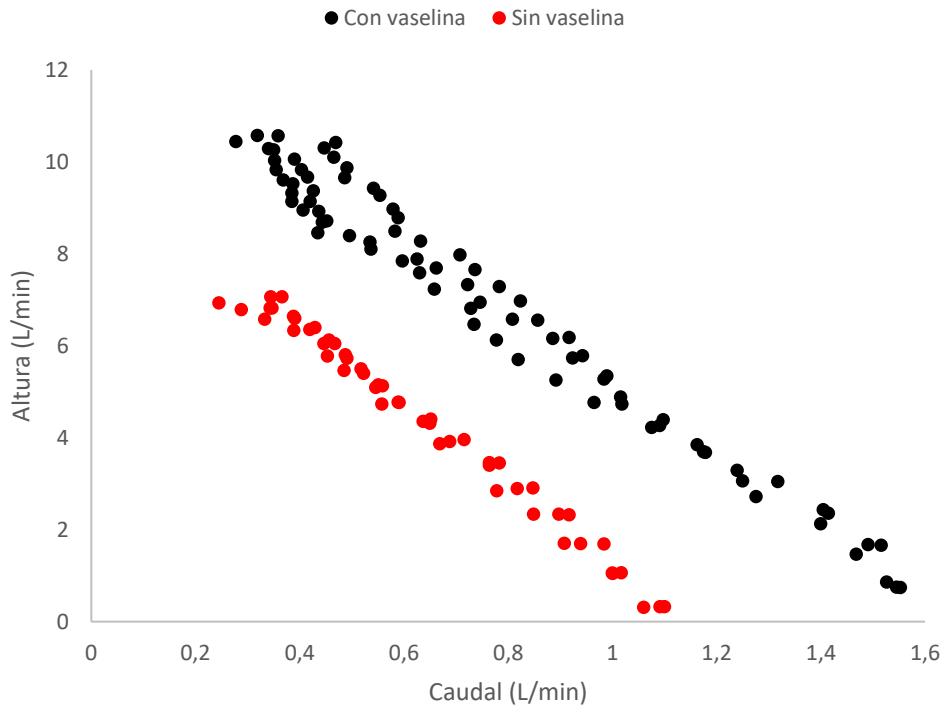


Figura 43 Curvas características de bombeo con y sin vaselina.

3.2.3 Longitud del tubo de látex

El siguiente ensayo, Figura 44, prueba con tubos de distintas longitudes y sin vaselina. El tubo de 10 cm (en naranja), consigue mejores prestaciones de altura que el de 20 cm (en azul), para un rango similar de caudales. Anteriormente, se observó que las curvas de compliance eran similares (Figura 41). Esto implica que la longitud del tubo de látex, aunque no es vital desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, sí tiene gran importancia en el comportamiento hidráulico.

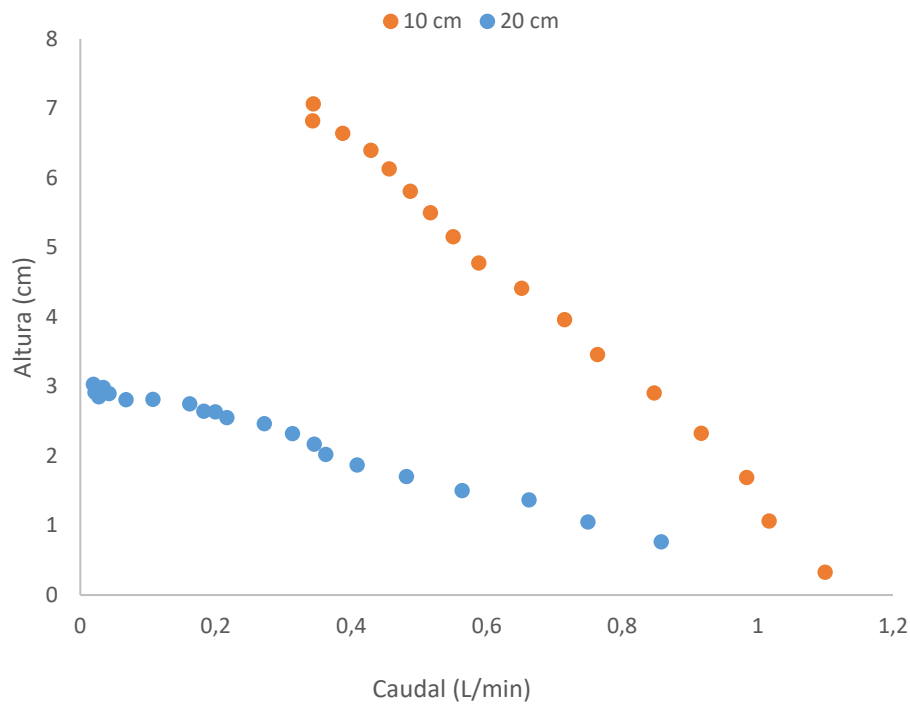


Figura 44 Curvas características de bombeo según longitud.

3.2.4 Espectro de frecuencias

Todos los ensayos anteriores se realizaron a la frecuencia óptima. Se realizó una serie de ensayos a frecuencia fija con tubos de siete capas para observar el comportamiento fuera del punto óptimo. La Figura 45 y la Figura 46 muestran, respectivamente, la altura máxima y el caudal máximo obtenidos para un barrido de frecuencias hasta aproximadamente el doble de la frecuencia óptima. Claramente se observa una tendencia no lineal y una caída brusca de las prestaciones para pequeñas desviaciones del punto óptimo. Se observa también que hacia el doble de la frecuencia óptima las prestaciones vuelven a crecer hacia un segundo pico, de forma similar a otros fenómenos dependientes de la frecuencia. A pesar de la caída de prestaciones, en ningún momento se observó reversión del sentido del flujo, algo que sí ocurre en la bomba de impedancia.

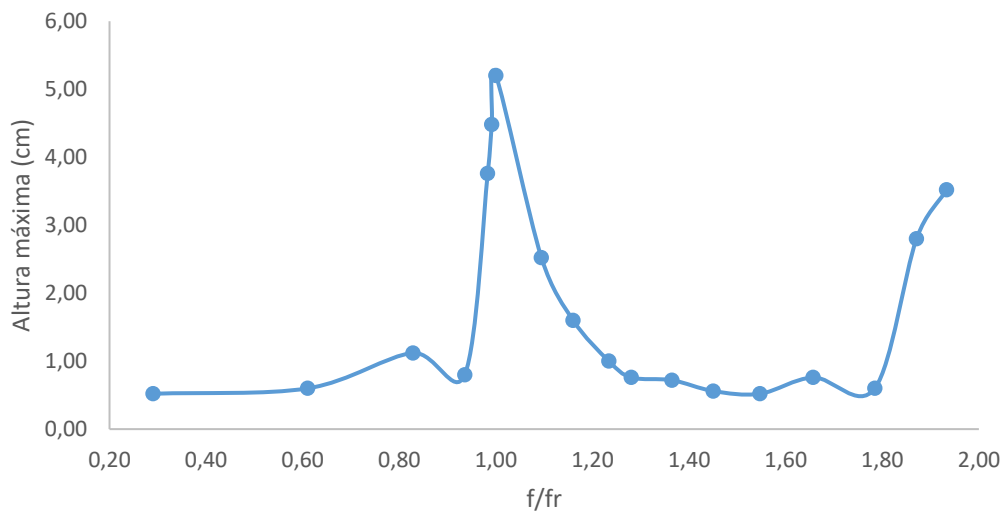


Figura 45 Altura máxima frente a frecuencia (adimensionalizada con la frecuencia de resonancia).

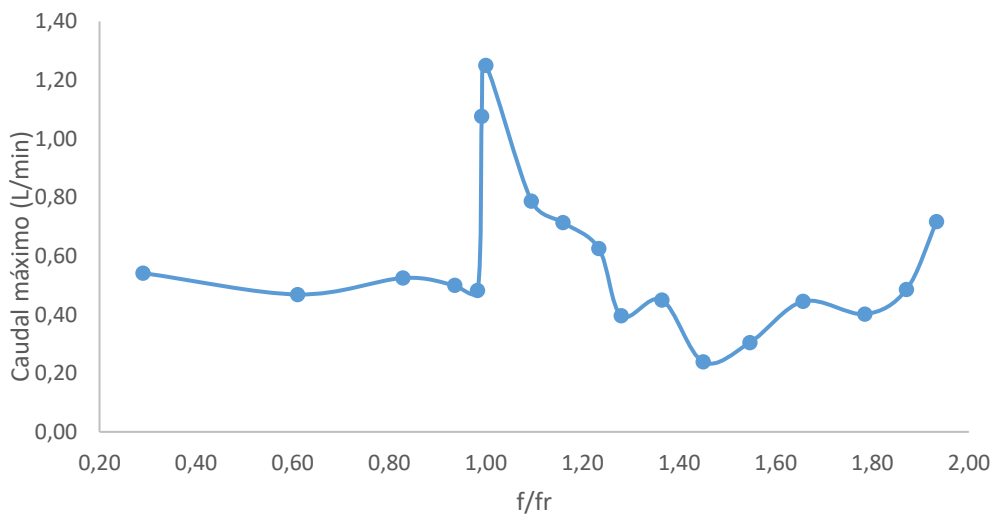


Figura 46 Caudal máximo frente a frecuencia (adimensionalizada con la frecuencia de resonancia).

4 Conclusiones

4.1 Caracterización de los tubos de látex

- Las curvas de compliance en función de la presión transmural son curvas exponenciales.
- El grosor de la pared afecta a la flexibilidad del tubo, aumentando ésta conforme disminuye el número de capas. Es decir, las curvas se desplazan hacia arriba y a la izquierda para tubos con menos capas.
- El desgaste del uso en la instalación hidráulica apenas modifica la flexibilidad de los tubos.
- La aplicación de vaselina por el exterior del tubo consigue que el tubo se vuelva más flexible.
- Un tubo inicialmente seco, en presencia de agua aumentará su flexibilidad conforme absorbe agua. Los tubos almacenados completamente sumergidos aumentan drásticamente su flexibilidad, llegando a adquirir flexibilidades correspondientes a las de tubos con menores números de capas. En cambio, si se almacena solamente con agua solamente en su interior, su flexibilidad no varía tanto.
- La longitud del tubo no afecta en su flexibilidad.

4.2 Bombeo asimétrico

- Se consiguen mejores prestaciones (altura y caudal) cuanto mayor sea el grosor de la pared.
- La aplicación de la vaselina mejora las prestaciones de bombeo.
- La longitud de los tubos de látex afecta en las prestaciones de bombeo, consiguiendo mejores alturas con tubos cortos.
- Pequeñas desviaciones respecto a la frecuencia óptima hacen caer bruscamente las prestaciones de la bomba asimétrica.

5 Otros aspectos de interés

5.1 Líneas futuras

Las líneas futuras derivadas de este estudio sobre bombeo asimétrico podrían ser las siguientes:

- El diseño de un diafragma que logre una mejor compresión del tubo de látex. Consistiría en un diafragma con forma de toroide de sección rectangular hueco en su interior donde se inyectaría aire para expandir sus paredes y lograr la compresión del tubo.
- Aplicación del método de caracterización de compliance de tubos a materiales biocompatibles, de cara a la aplicación de la bomba de asistencia cardiopulmonar.
- Construcción de modelo numérico de bombeo asimétrico donde se incluyan las características de la compliance del tubo flexible.
- Realizar estudios en la instalación de bombeo asimétrico modificando parámetros geométricos, como por ejemplo variar la longitud total, la relación de longitudes entre la tubería de impulsión y la de aspiración, los diámetros de las tuberías, o la altura de la columna inicial de líquido.

Realizar estudios en la instalación de bombeo asimétrico con líquidos de distintas densidades y viscosidades.

5.2 Financiación

Este proyecto está subvencionado por la Junta de Castilla y León bajo el programa: “Subvenciones del programa de apoyo a proyectos de investigación financiados por fondos FEDER” de número de proyecto VA182P20.

5.3 Diseminación

Este trabajo ha participado en la siguiente conferencia:

García-Díaz M., Barrios-Collado C., Castro-Ruiz F., Moneo-Fernández J. A., Anatol J., Catalán-Lanzarote S., Hovarth M., Roche E. T., Sierra-Pallarés, J. An asymmetric pump for assisting failing Fontan circulation. First Spanish Fluid Mechanics Conference, Cádiz (Spain), Jun 2022.

An asymmetric pump for assisting failing Fontan circulation

Manuel García-Díaz^{1*}, César Barrios-Collado¹, Francisco Castro-Ruiz¹, José Ángel Moneo-Fernández¹, Joaquín Anatol¹, Sergio Catalán-Lanzarote¹, Markus Hovarth², Ellen T. Roche² and José Sierra-Pallares¹

¹Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica & ITAP, Universidad de Valladolid. Paseo del Cauce 59, 47011, Valladolid (SPAIN)

² Institute for Medical Engineering and Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA
 * manuel.garcia.diaz@uva.es

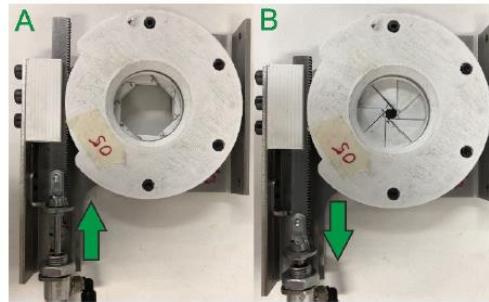
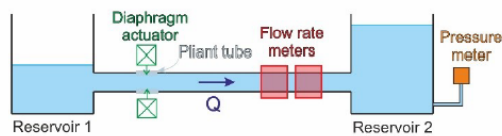
INTRODUCTION

Fontan operation is the current standard of care for single ventricle defects palliation, but it results in significant late complications in children. The use of a mechanical circulatory device (a pump) to alleviate the missing subpulmonary ventricle could potentially stabilize the failing Fontan circulation [1]. A new alternative to traditional heart pumps is the asymmetric pump. Based on the Liebau pump, asymmetric pumps are valveless non-fluid touching pumps whose working principle is the kinetic energy difference between its ends [2].

This work aims to assess an asymmetric pump for assisting failing Fontan circulation using a simplified in vitro facility.

METHODS

An in vitro facility has been built to first test asymmetric pumping in a simplified manner (Figure 1). A test rig similar to the one published in [2] has been constructed replacing the piston pump with a latex pliant tube and a diaphragm pincher. The latex pliant tube is compressed by the pitcher, emulating the work of [3]. In this case, the pitcher is a diaphragm actuator like the one used in a traditional photo camera (Figure 2), able to open and close at a controlled frequency.



Besides, the test rig is composed of two reservoirs connected with two tubes of different length, which can be replaced to assess different configurations.

RESULTS

Concerning latex tubes, they are manufactured in the laboratory and tested to characterize its compliance. The compliance is defined in equation 1.

$$C = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dP} \quad (1)$$

where V_0 is the initial tube volume, V is volume and P is pressure. Figure 3 shows the compliance against pressure for tubes of different wall thickness

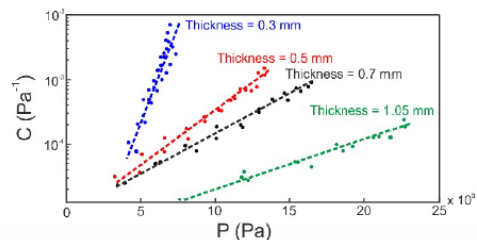
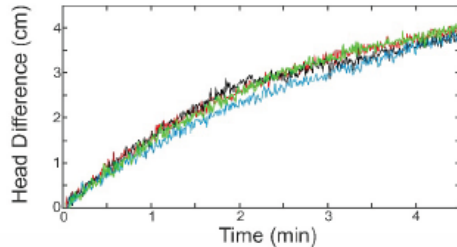


FIG 3 - Compliance of latex tubes of different wall thickness.

Regarding the temporal evolution of head difference between tanks, it has been monitored

and is represented in Figure 4 against experiment time for four equal experiments, conducted with the 0.5 mm thickness tube.



Can be noticed that head difference increases rapidly in the early moments of each experiment and as time passes, all experiments converge to the same head.

CONCLUSIONS

Asymmetric pumping has revealed itself as a promising technology for assisting in failing Fontan circulation. It shows interesting features like its valveless nature, and it can assist properly under the conditions studied.

Future work will keep studying asymmetric pumping by considering all possible variables that could affect the performance of the system. Besides, it will be studied into an in vitro loop, which resembles much more precisely Fontan circulation.

REFERENCES

- [1] Farahmand, M., Kavarana, M. N., Trusty, P. M., and Kung, E. O., 2020, "Target Flow-Pressure Operating Range for Designing a Failing Fontan Cavopulmonary Support Device," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **67**(10), pp. 2925–2933.
- [2] Takagi, S; Saijo, T., 1983, "Study of a Piston Pump, without Valves,," *Bull. JSME*, **26**(218).
- [3] Roche, E. T., Horvath, M. A., Wamala, I., Alazmani, A., Song, S. E., Whyte, W., Machaidze, Z., Payne, C. J., Weaver, J. C., Fishbein, G., Kuebler, J., Vasilyev, N. V., Mooney, D. J., Pigula, F. A., and Walsh, C. J., 2017, "Soft Robotic Sleeve Supports Heart Function," *Sci. Transl. Med.*, **9**(373).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors want to acknowledge Junta de Castilla y León for funding this work under the program "Subvenciones del programa de apoyo a proyectos de investigación financiados por fondos FEDER" with project number VA182P20.

6 Presupuesto

A continuación, se realiza una estimación del presupuesto incurrido en este Trabajo Fin de Grado.

6.1 Presupuesto total

Personal	Coste total (€)
Personal	17300,00
Equipos	100,62
Material	1493,91
Coste total	18894,53

Tabla 7 Presupuesto total.

El presupuesto suma un total de dieciocho mil ochocientos noventa y cuatro euros y con cincuenta y tres céntimos.

6.2 Presupuesto de personal

Personal	Horas	€/h	Coste total (€)
Ingeniero	500	25	12500,00
Técnico de laboratorio	240	20	4800,00
Coste total			17300,00

Tabla 8 Presupuesto de personal.

El presupuesto de personal alcanza los diecisiete mil trescientos euros.

6.3 Presupuesto de equipos

Equipo	Coste unitario (€)	Tiempo utilización (h)	Importe total (€)
Ordenador portátil	0,1867 €/h	450	84,02
Ordenador fijo	0,1867 €/h	80	14,94
CATIA V5-6R2021	0,138 €/h	12	1,66
			100,62

Tabla 9 Presupuesto de equipos.

El coste unitario de amortización se ha calculado considerando el tiempo total de amortización de 5088 horas totales. Siendo el coste del portátil y el ordenador fijo de 1000 € y suponiendo que el valor residual es de 50 €, ya que hay piezas que pueden ser reutilizadas. El valor de una licencia de CATIA V5-6R2021 es de 700 €. El presupuesto de equipos alcanza los cien euros y sesenta y dos céntimos.

6.4 Presupuesto de material

Componente	Cantidad	Coste unitario (€)	Importe total (€)
Robot para la fabricación de tubos de látex			
Barra metálica Ø 2 cm	500 mm	6,00	6,00
Arduino Nano	1	14,95	15,00
Barra aluminio V-Slot 40x40	3000 mm	28,30 €/m	84,90
Barra aluminio V-Slot 20x40	1000 mm	15,55 €/m	15,55
Motor Nema 17	3	39,99	119,97
Estructura PLA	1	8,00	8,00
Barra roscada trapezoidal M10 paso 2mm	800 mm	62,19 €/m	62,19
Látex líquido	10	5,95 €/L	59,50
Recipiente de cristal	1	52,00	52,00
Instalación para la caracterización de tubos de látex			
Manómetro JUMO	1	375,00	375,00
Válvulas de bola	2	4,95	9,90
Impresión plástico para unión		12,00	12,00
Instalación de bombeo asimétrico			
Depósito	2	10,00	20,00
Diafragma	1	16,00	16,00
Manómetro KELLER	1	375,00	375,00
Caudalímetro Sonotec	2	50,00	100,00
Válvulas de bola	2	4,95	9,90
Arduino Due	1	53,00	53,00
Electrónica	1	50,00	50,00
Otros			50,00
			1493,91

Tabla 10 Presupuesto de materiales.

El coste del material es de mil cuatrocientos noventa y tres euros con noventa y un céntimos. En el apartado de otros se cuentan materiales como bridas, teflón, tornillos, tuercas y herramientas.

7 Bibliografía

- [1] G. Liebau, "On a valveless pump principle (Ger)," *Naturwissenschaften*, vol. 327, p. 1, 1954.
- [2] T. Takagi, S; Saijo, "Study of a Piston Pump, without valves.," *Bull. JSME*, vol. 26, no. 218, 1983.
- [3] A. I. Hickerson, D. Rinderknecht, and M. Gharib, "Experimental study of the behavior of a valveless impedance pump," *Exp. Fluids*, vol. 38, no. 4, pp. 534–540, 2005, doi: 10.1007/s00348-005-0946-z.
- [4] H. Thomann, "A simple pumping mechanism in a valveless tube," *Zeitschrift für Angew. Math. und Phys. ZAMP*, vol. 29, no. 2, pp. 169–177, 1978, doi: 10.1007/BF01601511.
- [5] K. Takagi, S.; Takahashi, "Study of a Piston Pump without Valves (2nd Report)," *Bull. JSME*, vol. 28, no. 239, 1985.
- [6] A. Moser, M.; Huang, J.W.; Schwarz, G.S.; Kenner, T.; Noordergraaf, "Impedance defined flow generalization of William Harvey's concept of circulation - 370 years later.," *Int. J. Cardiovasc. Med. Sci.*, vol. 1, pp. 205–211, 1998.
- [7] E. Jung and C. S. Peskin, "TWO-DIMENSIONAL SIMULATIONS OF VALVELESS PUMPING USING THE IMMERSSED BOUNDARY METHOD," *SIAM J. Sci. Comput.*, vol. 23, no. 1, pp. 19–45, 2001.
- [8] J. T. Ottesen, "Valveless pumping in a fluid-filled closed elastic tube-system: One-dimensional theory with experimental validation," *J. Math. Biol.*, vol. 46, no. 4, pp. 309–332, 2003, doi: 10.1007/s00285-002-0179-1.
- [9] A. Borzì and G. Propst, "Numerical investigation of the Liebau phenomenon," *Zeitschrift für Angew. Math. und Phys.*, vol. 54, no. 6, pp. 1050–1072, 2003, doi: 10.1007/s00033-003-1108-x.
- [10] D. Auerbach, W. Moehring, and M. Moser, "An Analytic Approach to the Liebau Problem of Valveless Pumping," *Cardiovasc. Eng. An Int. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 201–207, 2004, doi: 10.1023/B.
- [11] D. G. Rinderknecht, "Development of a microimpedance pump for pulsatile flow transport: Part 1: Flow characteristics of the microimpedance pump.," *PhD thesis, Calif. Inst. Technol.*, vol. 2008, 2008.
- [12] A. I. Hickerson, "An Experimental Analysis of the Characteristic Behaviors of an Impedance Pump," California Institute of Technology, 2005.
- [13] I. Avrahami and M. Gharib, "Computational studies of resonance wave pumping in compliant tubes," *J. Fluid Mech.*, vol. 608, pp. 139–160, 2008, doi: 10.1017/S0022112008002012.

- [14] N. M. Pahlevan and M. Gharib, "In-vitro investigation of a potential wave pumping effect in human aorta," *J. Biomech.*, vol. 46, no. 13, pp. 2122–2129, 2013, doi: 10.1016/j.jbiomech.2013.07.006.
- [15] A. S. Forouhar *et al.*, "The embryonic vertebrate heart tube is a dynamic suction pump," *Science (80-)*, vol. 312, no. 5774, pp. 751–753, May 2006, doi: 10.1126/science.1123775.
- [16] C. G. Manopoulos, D. S. Mathioulakis, and S. G. Tsangaris, "One-dimensional model of valveless pumping in a closed loop and a numerical solution," *Phys. Fluids*, vol. 18, no. 1, p. 017106, Jan. 2006, doi: 10.1063/1.2165780.
- [17] G. Propst, "Pumping effects in models of periodically forced flow configurations," *Phys. D Nonlinear Phenom.*, vol. 217, no. 2, pp. 193–201, 2006, doi: 10.1016/j.physd.2006.04.007.
- [18] M. Yabrodi and C. W. Mastropietro, "Hypoplastic left heart syndrome: From comfort care to long-term survival," *Pediatric Research*, vol. 81, no. 1–2. Nature Publishing Group, pp. 142–149, Jan. 2017. doi: 10.1038/pr.2016.194.
- [19] C. Y. Wen, S. J. Yeh, K. P. Leong, W. S. Kuo, and H. Lin, "Application of a valveless impedance pump in a liquid cooling system," *IEEE Trans. Compon., Packag. Manuf. Technol.*, vol. 3, no. 5, pp. 783–791, 2013, doi: 10.1109/TCPMT.2012.2230298.
- [20] J. Meier, "A Novel Experimental Study of a Valveless Impedance Pump for Applications at Lab-On-Chip , Microfluidic , and Biomedical Device Size Scales," vol. 2011, 2011.
- [21] R. Davtyan and N. A. Sarvazyan, "Output of a valveless Liebau pump with biologically relevant vessel properties and compression frequencies," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–10, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-90820-4.
- [22] M. Farahmand, M. N. Kavarana, P. M. Trusty, and E. O. Kung, "Target Flow-Pressure Operating Range for Designing a Failing Fontan Cavopulmonary Support Device," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 67, no. 10, pp. 2925–2933, 2020, doi: 10.1109/TBME.2020.2974098.

8 Anexos

8.1 Anexo I: sistema circulatorio

La función del sistema circulatorio es transportar nutrientes, deshechos, oxígeno, dióxido de carbono y hormonas entre otras sustancias a través del cuerpo humano. Está formado por la sangre, el corazón y los vasos sanguíneos: arterias, venas y capilares. Están encargados de proporcionar un gasto cardíaco y una presión arterial necesaria. La sangre está formada por el plasma, que contiene plaquetas, glóbulos blancos y glóbulos rojos. El corazón es un músculo que funciona como una bomba, proporcionando un movimiento constante de la sangre por los conductos. Hay distintos tipos de vasos sanguíneos:

- **Arterias:** se encarga de transportar la sangre oxigenada del corazón a todos los tejidos del cuerpo. Poseen las paredes más fuertes ya que deben soportar las elevadas presiones a las que circula por su interior la sangre.
- **Arteriolas:** son la parte del final de las arterias, encargadas de transmitir la sangre a los capilares. Mediante su expansión y contracción se regula el gasto necesario derivado a los capilares.
- **Capilares:** en ellos se intercambian los componentes de la sangre con los tejidos del organismo.
- **Vénulas:** son la desembocadura de los capilares y recogen la sangre con poco oxígeno. Van aumentando su tamaño hasta llegar a las venas.
- **Venas:** transportan la sangre de vuelta al corazón con presiones bajas. Pueden aumentar o disminuir su diámetro para controlar el flujo y suplir estas presiones. Poseen paredes finas.

Hay dos tipos de tipos de circulación:

- **Circulación pulmonar:** se recarga el oxígeno de la sangre y se expulsan gases residuales. La sangre se envía desde el ventrículo derecho hasta los pulmones mediante las arterias pulmonares, se oxigena y regresa al corazón a la aurícula derecha.
- **Circulación sistemática:** la sangre oxigenada es bombeada del ventrículo izquierdo al resto del organismo viajando por arterias y capilares y vuelve al corazón mediante las venas.

Circulación de la sangre a través del corazón:

La sangre pobre en oxígeno entra mediante las venas cavas superior e inferior a la aurícula derecha, donde una diferencia de presiones entre el ventrículo y la aurícula derecha hace avanzar a la sangre por la válvula tricúspide al ventrículo derecho de forma unidireccional y sin retorno. A continuación, sale por la válvula pulmonar y llega a los pulmones derecho e izquierdo a través de las arterias. Tras el intercambio de gases en los pulmones vuelve al corazón por las venas pulmonares llegando a la aurícula izquierda, se introduce en el ventrículo izquierdo por la válvula mitral y se transmite al resto del cuerpo por la aorta.

Todo este proceso sucede en dos fases: sístole y diástole. En la sístole los ventrículos se contraen expulsando la sangre y durante la diástole la sangre se introduce en los ventrículos durante la apertura de las válvulas tricúspide y mitral.

8.2 Anexo II: ensayos

8/02 T3 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	33,6	13,98	
2	59	39,38	2,5064E-05
4	82,8	63,18	5,3497E-05
6	107	87,38	7,8920E-05
8	120,7	101,08	1,8587E-04
10	136,8	117,18	1,9771E-04
12	149	129,38	3,1309E-04
14	158	138,38	4,9515E-04
16	166,3	146,68	6,1361E-04
18	174,1	154,48	7,3456E-04
20	182,3	162,68	7,7637E-04

Tabla 11 Datos Tubo 8/02 T3 7c N.

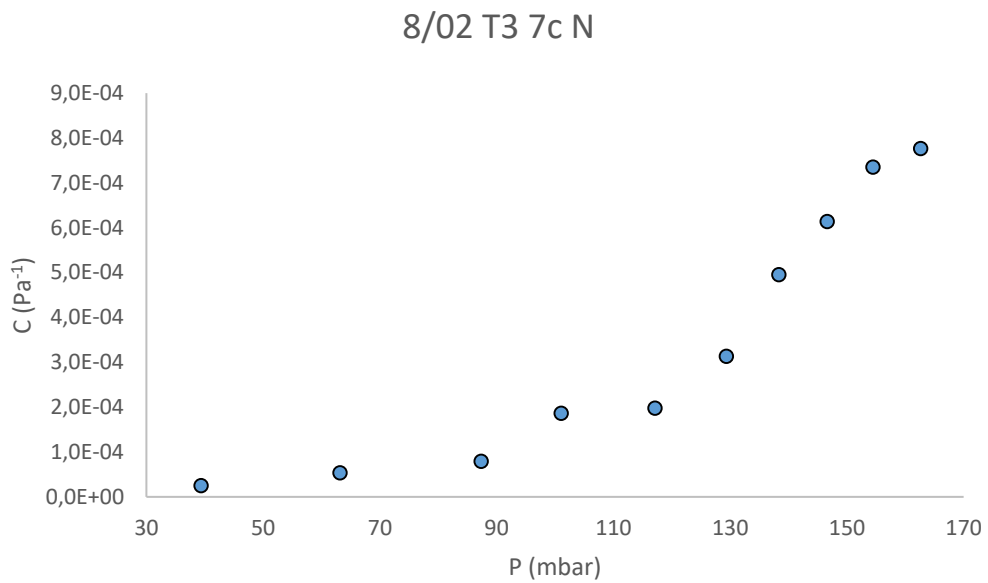


Figura 47 Curva de compliance para Tubo 8/02 T3 7c N.

10/02 T1 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	26,7	7,08	
2	54	34,38	2,3319E-05
4	79,5	59,88	4,9931E-05
6	99,6	79,98	9,5018E-05
8	120,5	100,88	1,2184E-04
10	138	118,38	1,8189E-04
12	149	129,38	3,4725E-04
14	158	138,38	4,9515E-04
16	168,6	148,98	4,8047E-04
18	177,3	157,68	6,5857E-04
20	184,4	164,78	8,9665E-04

Tabla 12 Datos Tubo 10/02 T1 7c N.

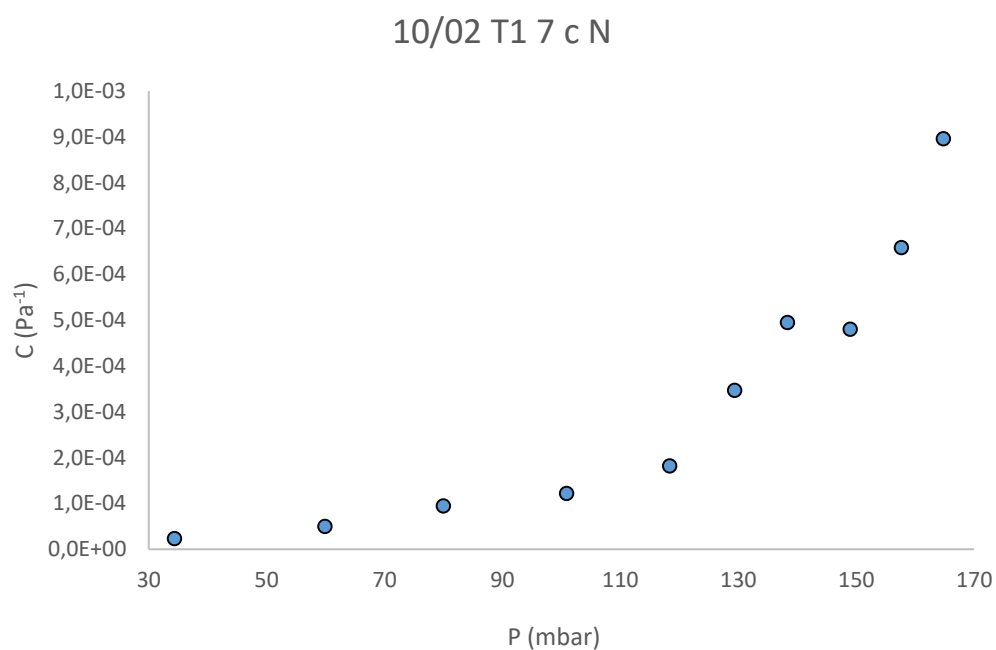


Figura 48 Curva de compliance para Tubo 10/02 T1 7c N.

8/02 T3 7c U			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	65	45,38	
2	81,3	61,68	3,9056E-05
4	103,7	84,08	5,6841E-05
6	124	104,38	9,4082E-05
8	138,7	119,08	1,7323E-04
10	153,5	133,88	2,1507E-04
12	163,7	144,08	3,7448E-04
14	173,8	154,18	4,4122E-04
16	181,5	161,88	6,6142E-04
18	190,6	170,98	6,2962E-04
20	196,8	177,18	1,0268E-03

Tabla 13 Datos Tubo 8/02 T3 7c U.

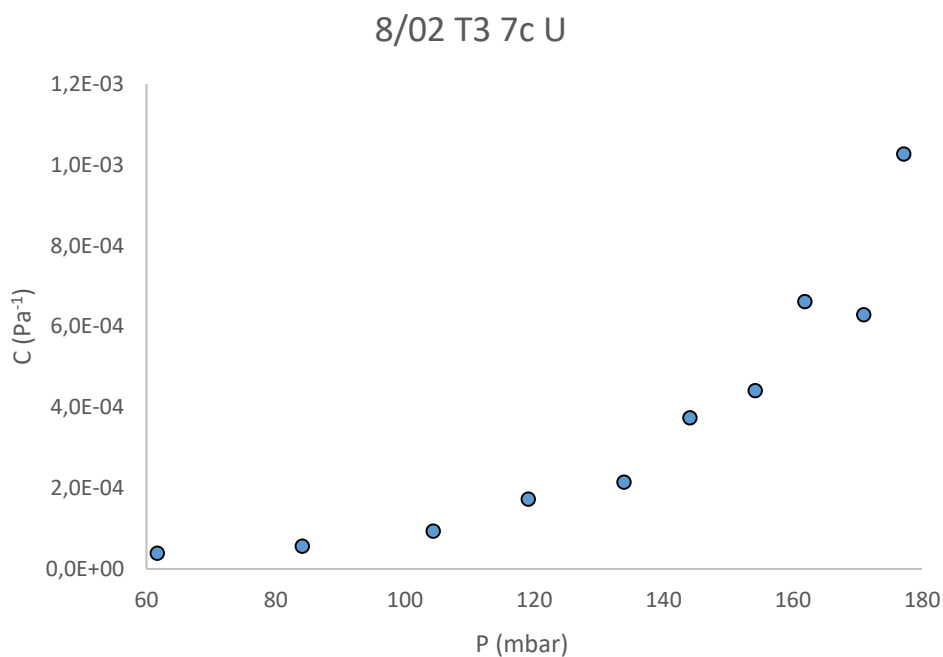


Figura 49 Curva de compliance para Tubo 8/02 T3 7c U.

8/02 T3 7c U (R)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	48	28,38	
2	74,7	55,08	2,3843E-05
4	96	76,38	5,9777E-05
6	115,75	96,13	9,6702E-05
8	131,8	112,18	1,5866E-04
10	145,6	125,98	2,3066E-04
12	158,3	138,68	3,0077E-04
14	167	147,38	5,1222E-04
16	175,9	156,28	5,7224E-04
18	183,3	163,68	7,7427E-04
20	191	171,38	8,2678E-04

Tabla 14 Datos Tubo 8/02 T3 7c U (R).

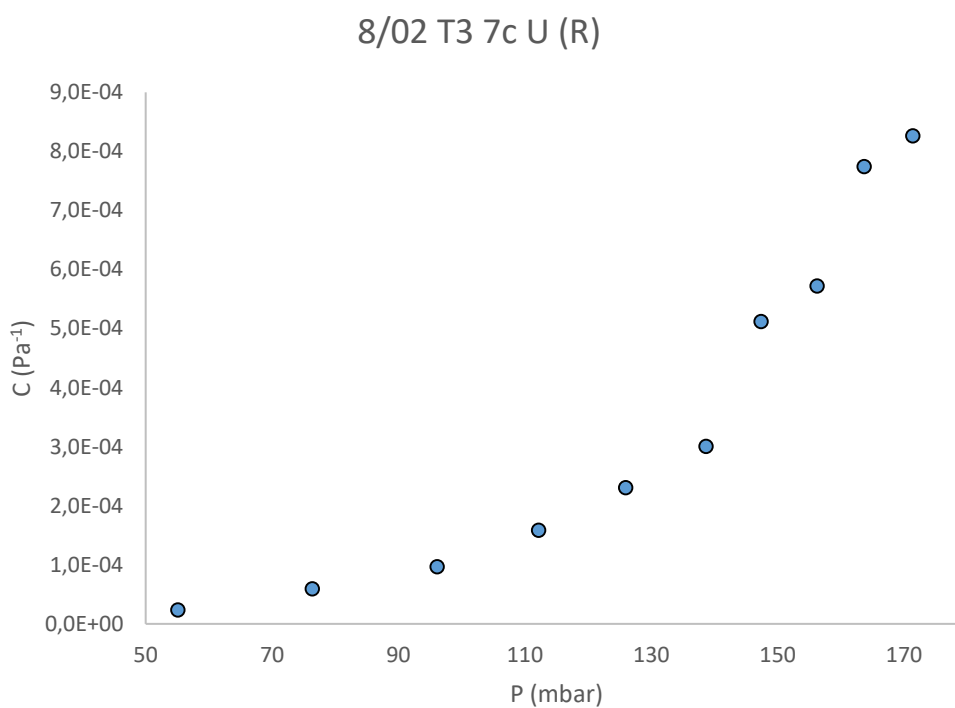


Figura 50 Curva de compliance para Tubo 8/02 T3 7c U (R).

10/02 T2 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	49,6	29,98	
2	86	66,38	1,749E-05
4	117,3	97,68	4,068E-05
6	144	124,38	7,153E-05
8	161,7	142,08	1,439E-04
10	177,5	157,88	2,015E-04
12	191,5	171,88	2,728E-04
14	203,4	183,78	3,745E-04
16	213,4	193,78	5,093E-04
18	223,2	203,58	5,847E-04
20	232,6	212,98	6,773E-04

Tabla 15 Datos Tubo 10/02 T2 7c N.

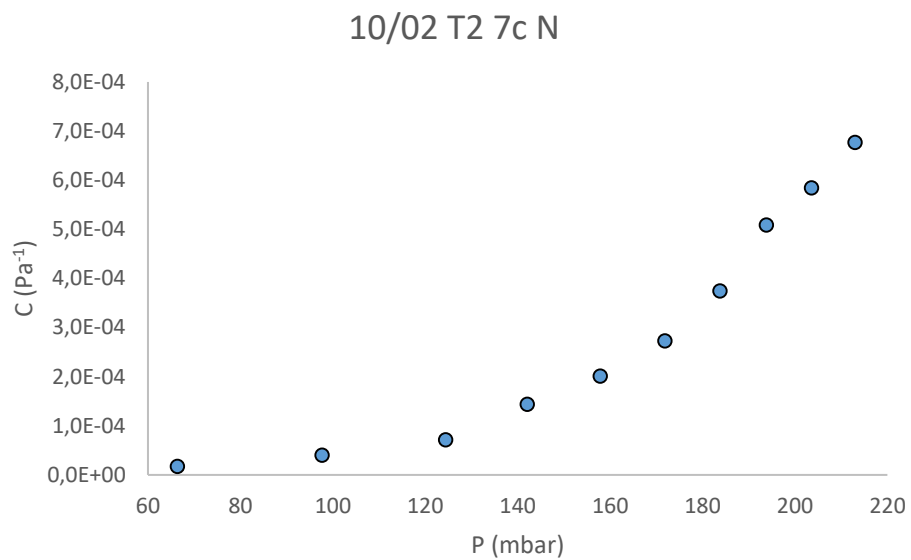


Figura 51 Curva de compliance para Tubo 10/02 T2 7c N.

10/02 T2 7c N (R)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	55,1	35,48	
2	90,7	71,08	1,7883E-05
4	119,4	99,78	4,4364E-05
6	139,6	119,98	9,4547E-05
8	162,9	143,28	1,0929E-04
10	180,2	160,58	1,8399E-04
12	197,1	177,48	2,2602E-04
14	209,4	189,78	3,6230E-04
16	221,5	201,88	4,2091E-04
18	230,2	210,58	6,5857E-04
20	237,2	217,58	9,0946E-04

Tabla 16 Datos Tubo 10/02 T2 7c N (R).

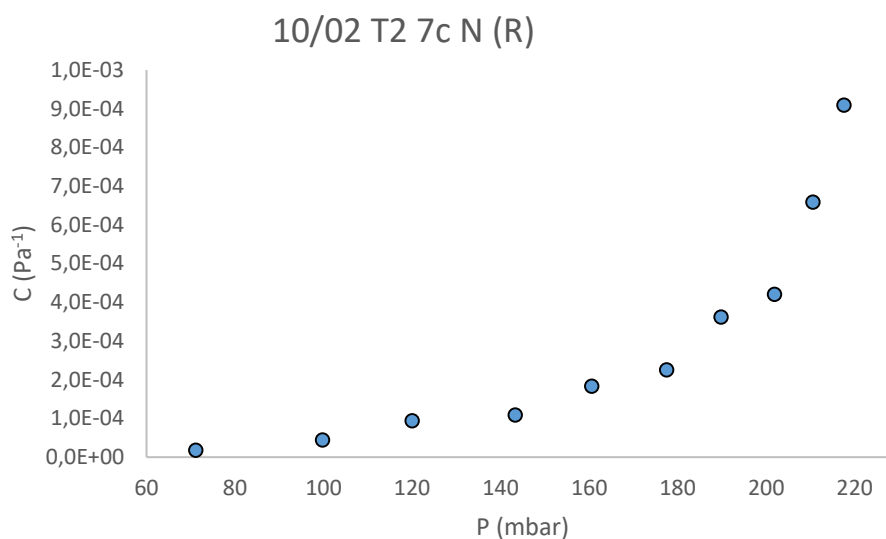


Figura 52 Curva de compliance para Tubo10/02 T2 7c N (R).

14/02 T1 5c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	51,2	31,58	
2	68,8	49,18	3,6172E-05
4	85,5	65,88	7,6242E-05
6	101,4	81,78	1,2012E-04
8	112,7	93,08	2,2535E-04
10	122,2	102,58	3,3506E-04
12	130,2	110,58	4,7746E-04
14	136,4	116,78	7,1876E-04
16	144	124,38	6,7013E-04
18	148,5	128,88	1,2732E-03
20	152,75	133,13	1,4979E-03

Tabla 17 Datos Tubo 14/02 T1 5c N.

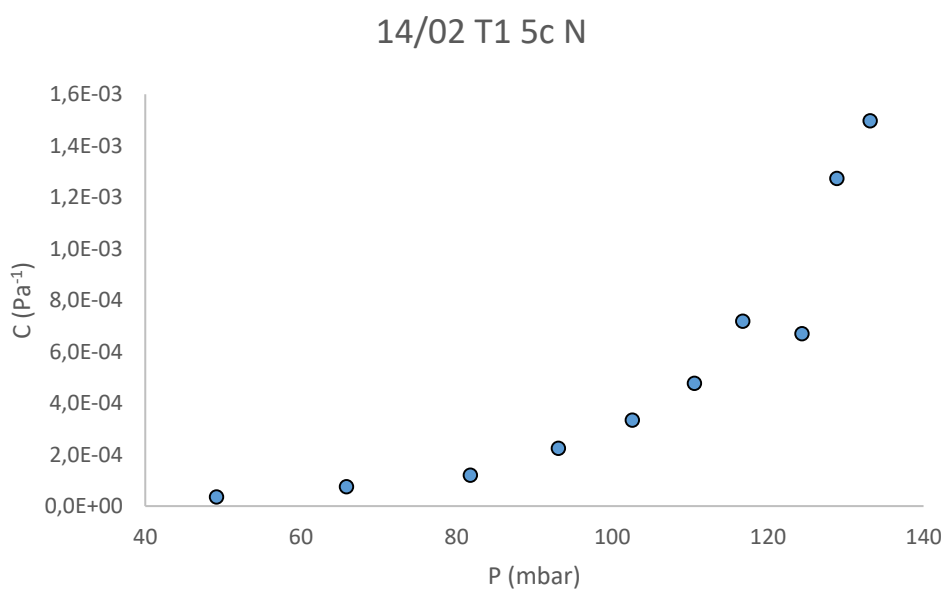


Figura 53 Curva de compliance para Tubo 14/02 T1 5c N.

14/02 T2 5c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	31,7	12,08	
2	52	32,38	3,1361E-05
4	70,3	50,68	6,9576E-05
6	85,6	65,98	1,2483E-04
8	100,3	80,68	1,7323E-04
10	112,4	92,78	2,6307E-04
12	124	104,38	3,2929E-04
14	132,8	113,18	5,0640E-04
16	140,2	120,58	6,8824E-04
18	147,6	127,98	7,7427E-04
20	153	133,38	1,1789E-03

Tabla 18 Datos Tubo 14/02 T2 5c N.

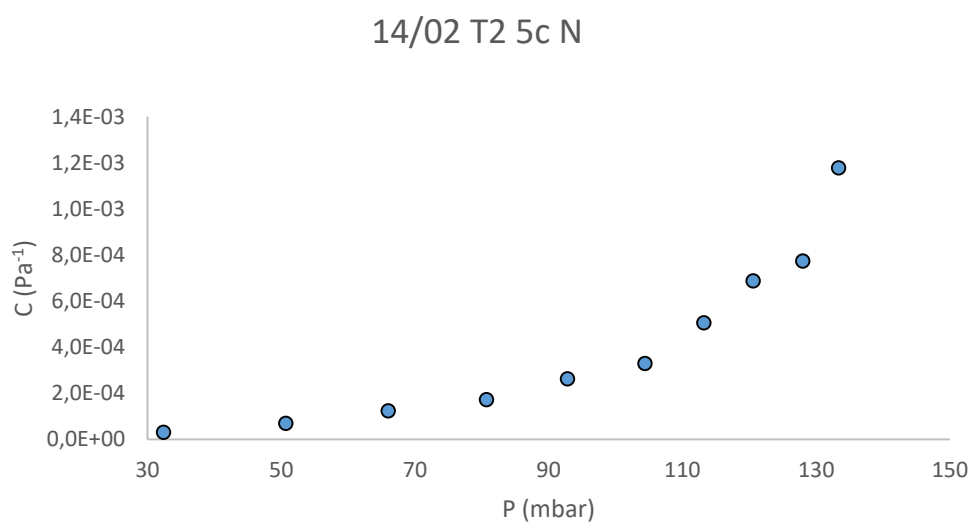


Figura 54 Curva de compliance para Tubo14/02 T2 5c N.

14/02 T3 5c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	50,2	30,58	
2	69,5	49,88	3,2985E-05
4	83,5	63,88	9,0946E-05
6	96,6	76,98	1,4579E-04
8	104,9	85,28	3,0680E-04
10	114,5	94,88	3,3157E-04
12	121,6	101,98	5,3799E-04
14	128,1	108,48	6,8559E-04
16	133,2	113,58	9,9862E-04
18	137,8	118,18	1,2456E-03
20	141,1	121,48	1,9292E-03

Tabla 19 Datos Tubo 14/02 T3 5c N.

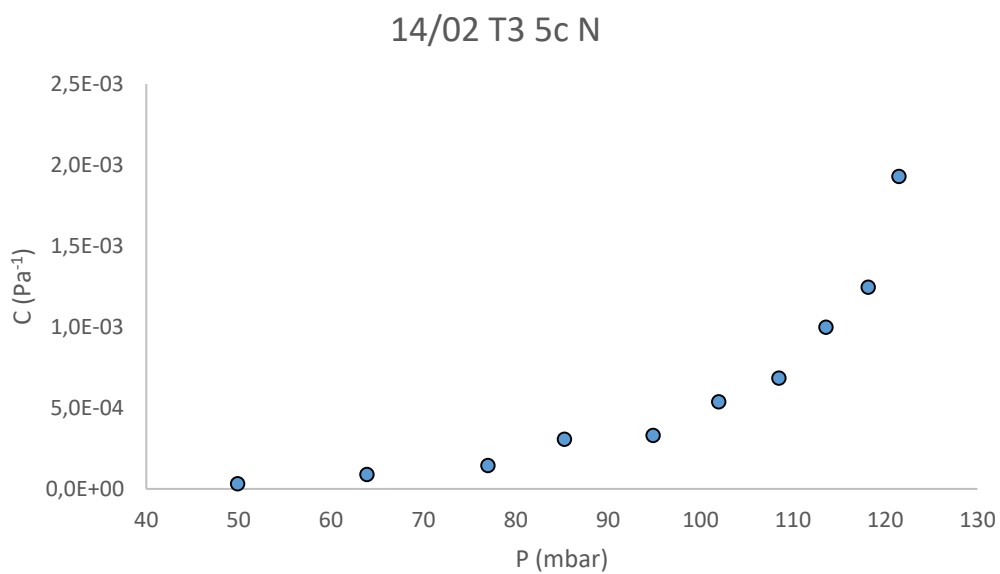


Figura 55 Curva de compliance para Tubo 14/02 T3 5c N.

14/02 T3 5c N (R)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	48,7	29,08	
2	66,8	47,18	3,5172E-05
4	81,2	61,58	8,8419E-05
6	92,8	73,18	1,6464E-04
8	103,4	83,78	2,4023E-04
10	113,1	93,48	3,2815E-04
12	120,2	100,58	5,3799E-04
14	126,4	106,78	7,1876E-04
16	132,3	112,68	8,6321E-04
18	136,7	117,08	1,3022E-03
20	139,7	120,08	2,1221E-03

Tabla 20 Datos Tubo 14/02 T3 5c N (R).

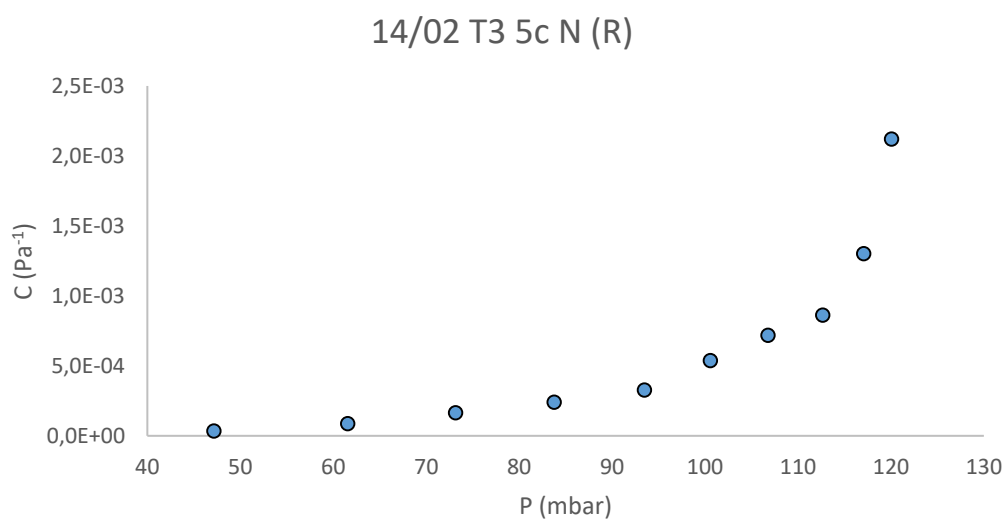


Figura 56 Curva de compliance para Tubo14/02 T3 5c N (R).

14/02 T1 3c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	58,3	38,68	
2	66,7	47,08	7,5788E-05
4	71,3	51,68	2,7679E-04
6	75,2	55,58	4,8971E-04
8	78,6	58,98	7,4896E-04
10	80,9	61,28	1,3840E-03
12	83,2	63,58	1,6607E-03
14	85,2	65,58	2,2282E-03
16	86,9	67,28	2,9959E-03
18	88,4	68,78	3,8197E-03
20	89,3	69,68	7,0736E-03

Tabla 21 Datos Tubo 14/02 T1 3c N.

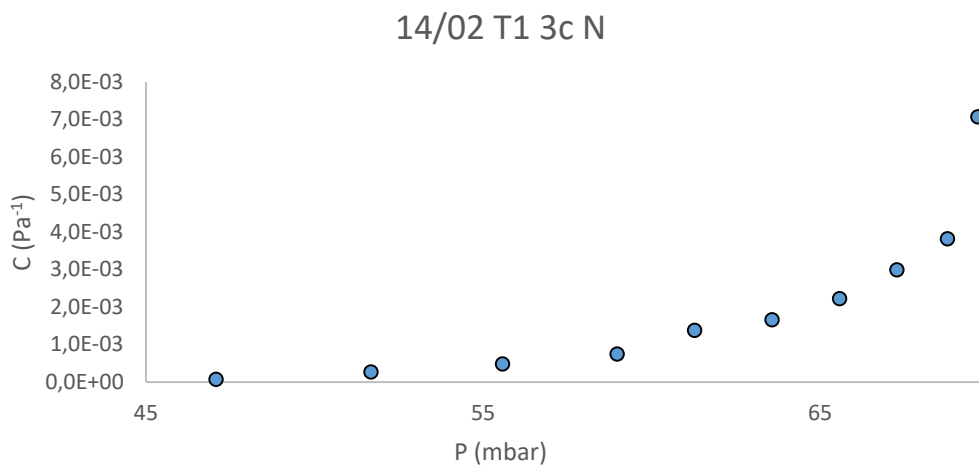


Figura 57 Curva de compliance para Tubo 14/02 T1 3c N.

14/02 T2 3c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	58,4	38,78	
2	66,5	46,88	7,8595E-05
4	72,4	52,78	2,1580E-04
6	76,8	57,18	4,3406E-04
8	80,6	60,98	6,7013E-04
10	83,8	64,18	9,9472E-04
12	86,8	67,18	1,2732E-03
14	89,4	69,78	1,7140E-03
16	91	71,38	3,1831E-03
18	93,3	73,68	2,4911E-03
20	93,8	74,18	1,2732E-02

Tabla 22 Datos Tubo 14/02 T2 3c N.

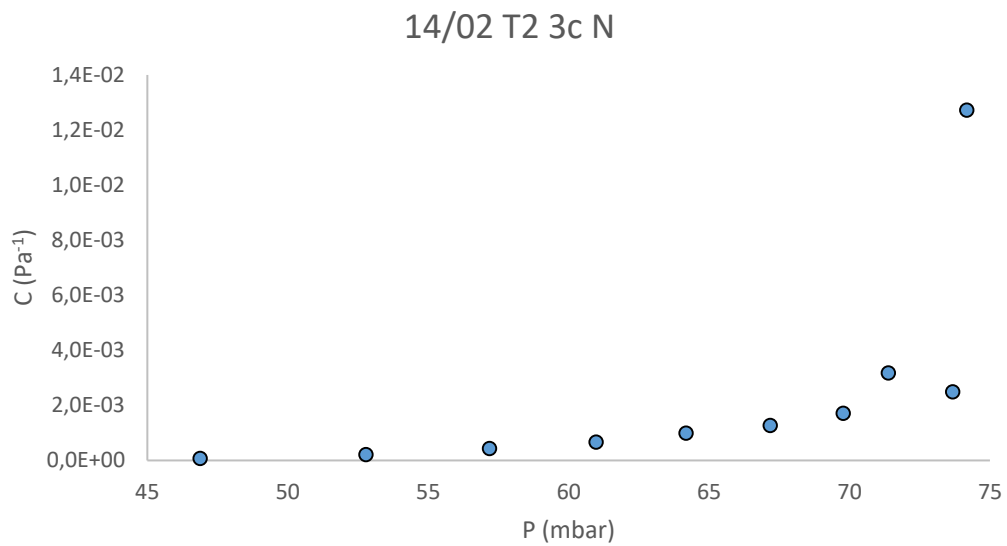


Figura 58 Curva de compliance para Tubo 14/02 T2 3c N.

14/02 T3 3c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	55,3	35,68	
2	61,3	41,68	1,0610E-04
4	67,5	47,88	2,0536E-04
6	71,4	51,78	4,8971E-04
8	75,1	55,48	6,8824E-04
10	78,4	58,78	9,6458E-04
12	81,1	61,48	1,4147E-03
14	83,1	63,48	2,2282E-03
16	85,1	65,48	2,5465E-03
18	86,5	66,88	4,0926E-03
20	87,7	68,08	5,3052E-03

Tabla 23 Datos Tubo 14/02 T3 3c N.

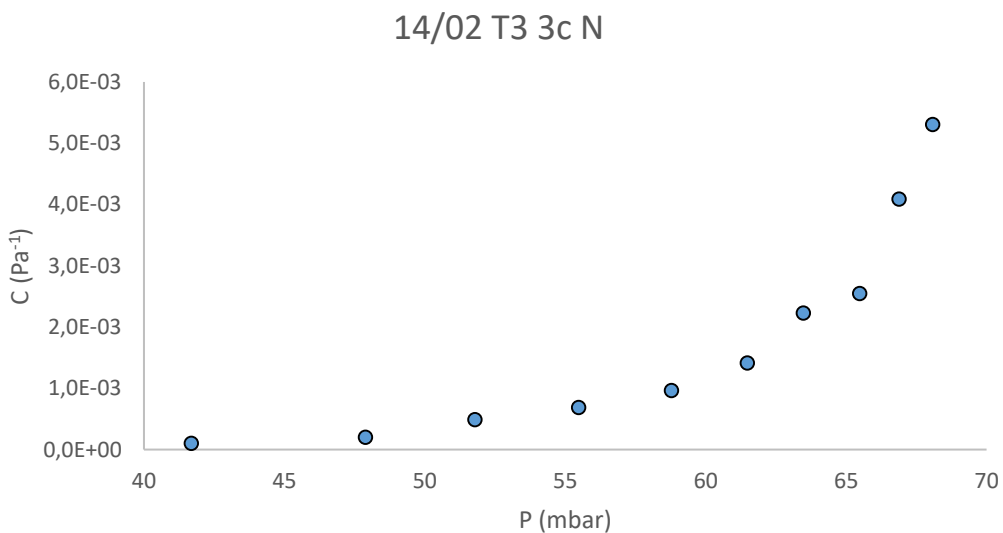


Figura 59 Curva de compliance para Tubo 14/02 T3 3c N.

16/02 T1 9c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	50,4	30,78	
2	95,6	75,98	1,4085E-05
4	141,8	122,18	2,7559E-05
6	184,4	164,78	4,4832E-05
8	212,1	192,48	9,1931E-05
10	237,2	217,58	1,2682E-04
12	246,2		
14	max		
16	max		
18	max		
20	max		

Tabla 24 Datos Tubo 16/02 T1 9c N.

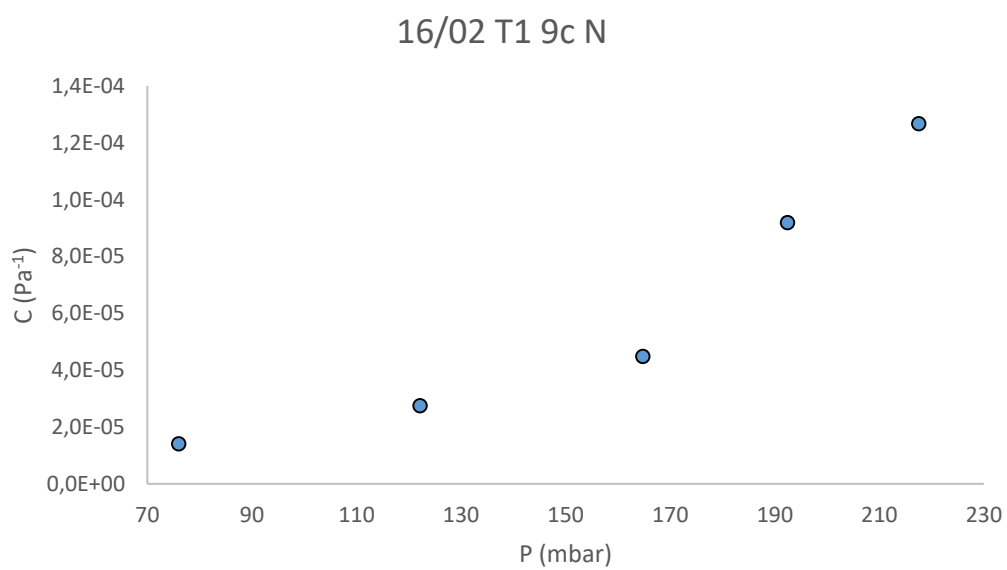


Figura 60 Curva de compliance para Tubo 16/02 T1 9c N.

16/02 T2 9c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	50	30,38	
2	95,9	76,28	1,3870E-05
4	137,5	117,88	3,0607E-05
6	173,4	153,78	5,3199E-05
8	205,6	185,98	7,9083E-05
10	229,9	210,28	1,3099E-04
12	245,9	226,28	2,3873E-04
14	max		
16	max		
18	max		
20	max		

Tabla 25 Datos Tubo 16/02 T2 9c N.

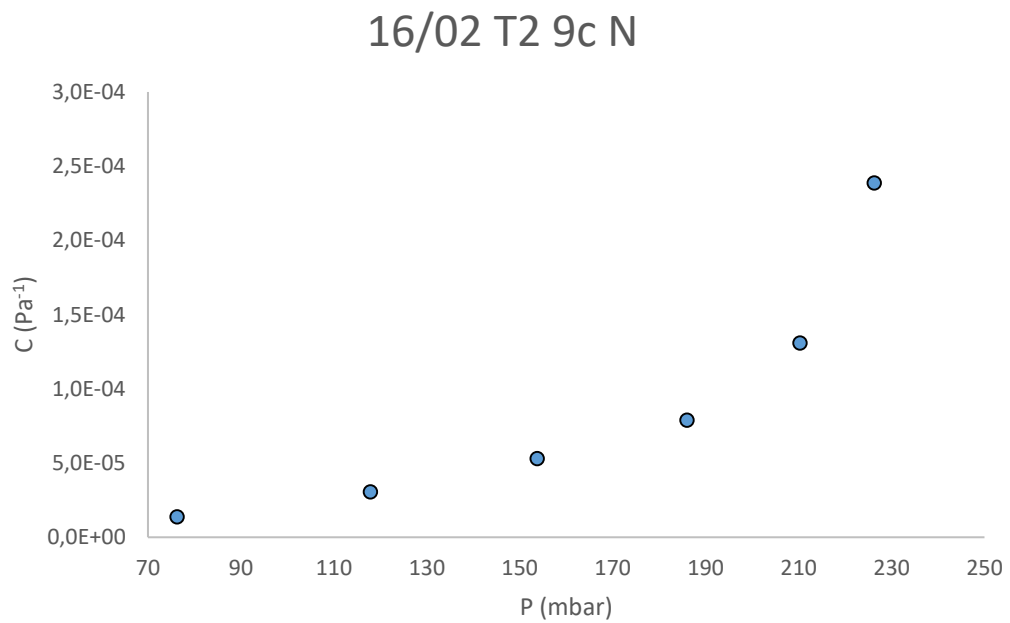


Figura 61 Curva de compliance para Tubo 16/02 T2 9c N.

16/02 T3 9c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	54,4	34,78	
2	104,9	85,28	1,2606E-05
4	139,1	119,48	3,7229E-05
6	175,3	155,68	5,2759E-05
8	201,2	181,58	9,8320E-05
10	226,1	206,48	1,2784E-04
12	246,7	227,08	1,8542E-04
14	max		
16	max		
18	max		
20	max		

Tabla 26 Datos Tubo 16/02 T3 9c N.

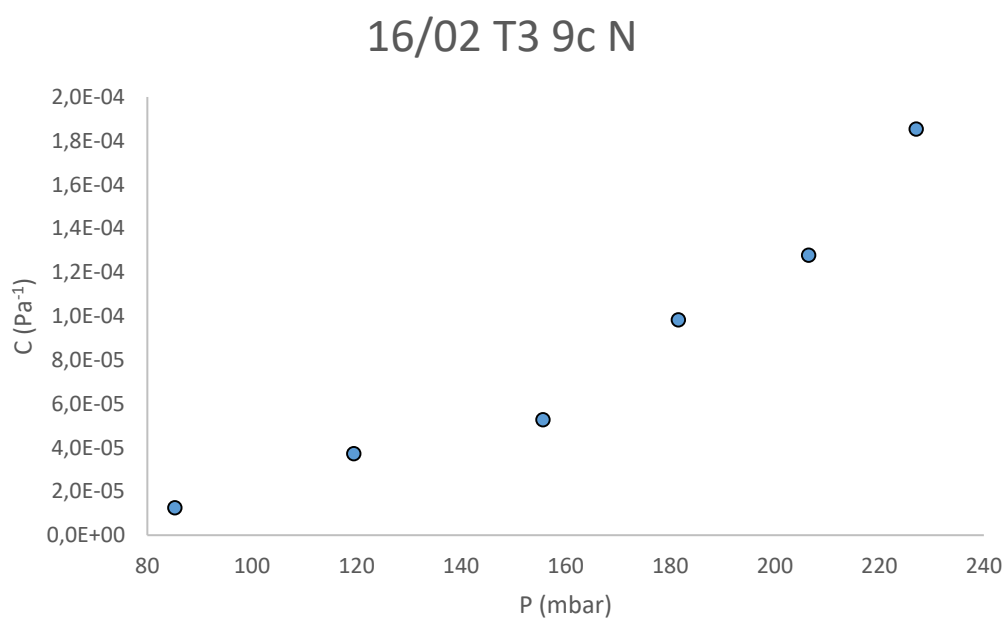


Figura 62 Curva de compliance para Tubo 16/02 T3 9c N.

17/02 T1 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	58,1	38,48	
2	95,5	75,88	1,7022E-05
4	121,1	101,48	4,9736E-05
6	141	121,38	9,5973E-05
8	159,5	139,88	1,3765E-04
10	176,2	156,58	1,9060E-04
12	185	165,38	4,3406E-04
14	197,6	177,98	3,5368E-04
16	207,4	187,78	5,1969E-04
18	214	194,38	8,6812E-04
20	221,8	202,18	8,1618E-04

Tabla 27 Datos Tubo 17/02 T1 7c N.

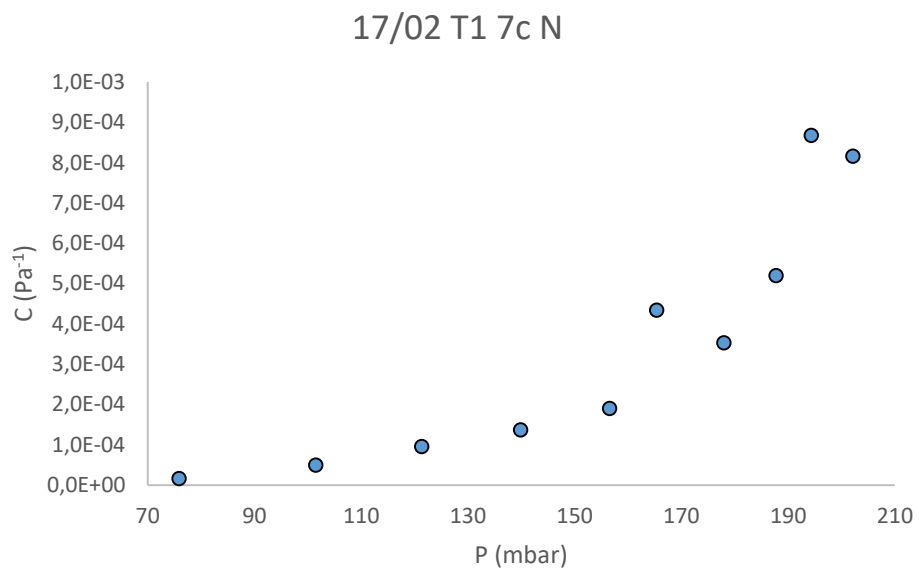


Figura 63 Curva de compliance para Tubo17/02 T1 7c N.

17/02 T2 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	57,8	38,18	
2	87,4	67,78	2,1507E-05
4	112,4	92,78	5,0930E-05
6	131,8	112,18	9,8446E-05
8	150,9	131,28	1,3332E-04
10	163,6	143,98	2,5064E-04
12	179	159,38	2,4803E-04
14	190,4	170,78	3,9091E-04
16	198,8	179,18	6,0630E-04
18	206,7	187,08	7,2526E-04
20	213,5	193,88	9,3621E-04

Tabla 28 Datos Tubo 17/02 T2 7c N.

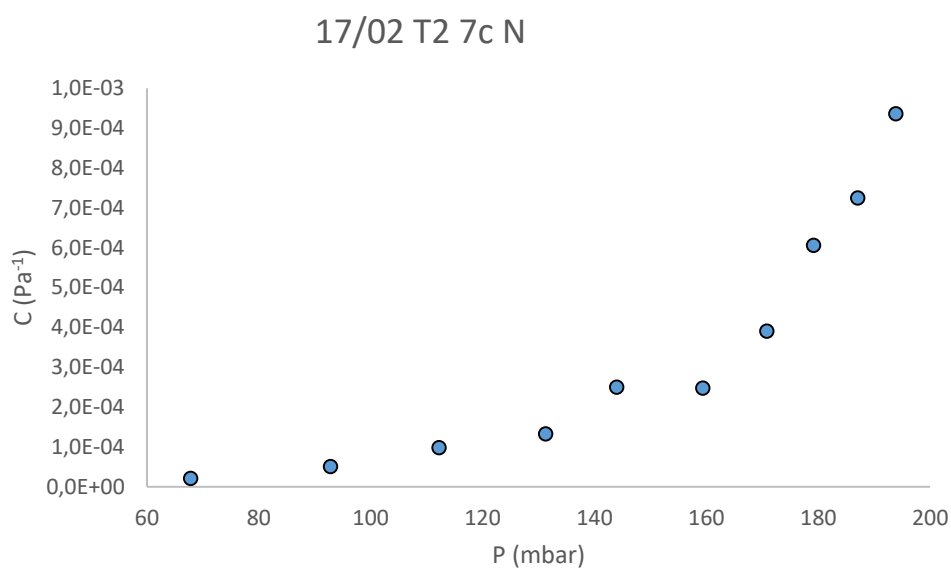


Figura 64 Curva de compliance para Tubo17/02 T2 7c N.

17/02 T3 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	58,5	38,88	
2	80,4	60,78	2,9069E-05
4	99,8	80,18	6,5631E-05
6	116,1	96,48	1,1717E-04
8	130,3	110,68	1,7933E-04
10	141,7	122,08	2,7922E-04
12	152,8	133,18	3,4412E-04
14	161,8	142,18	4,9515E-04
16	168,9	149,28	7,1732E-04
18	174,7	155,08	9,8786E-04
20	180,8	161,18	1,0436E-03

Tabla 29 Datos Tubo 17/02 T3 7c N.

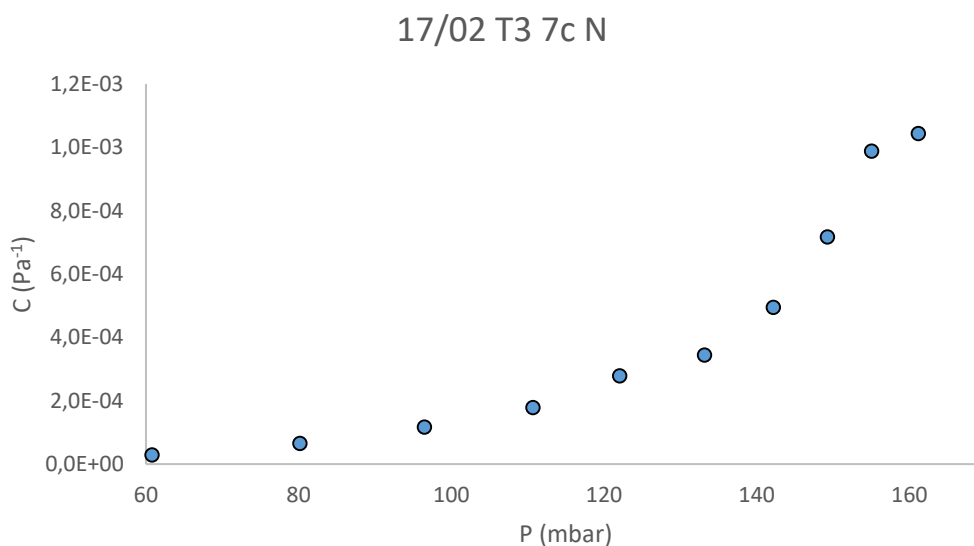


Figura 65 Curva de compliance para Tubo 17/02 T3 7c N.

16/2 T1 9c (1ºR)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	66,6	46,98	
2	117,2	97,58	1,2581E-05
4	148,2	128,58	4,1072E-05
6	179,1	159,48	6,1808E-05
8	205,6	185,98	9,6094E-05
10	227,6	207,98	1,4469E-04
12	max		
14	max		
16	max		
18	max		
20	max		

Tabla 30 Datos Tubo 16/2 T1 9c (1ºR).

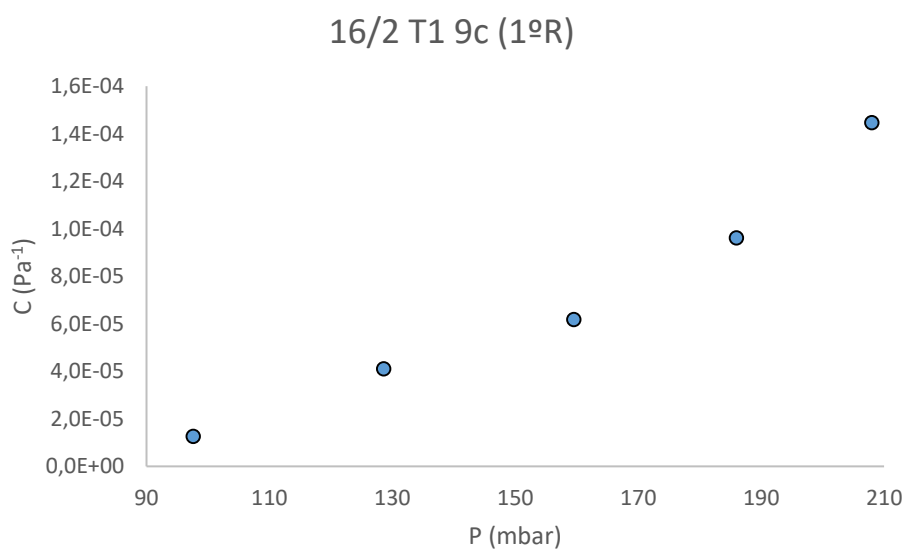


Figura 66 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (1ºR).

16/2 T1 9c (2ºR)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	51,2	31,58	
2	93,3	73,68	1,5122E-05
4	132,2	112,58	3,2731E-05
6	163,5	143,88	6,1018E-05
8	192	172,38	8,9350E-05
10	213,4	193,78	1,4874E-04
12	233,3	213,68	1,9195E-04
14	max		
16	max		
18	max		
20	max		

Tabla 31 Datos Tubo 16/2 T1 9c (2ºR).

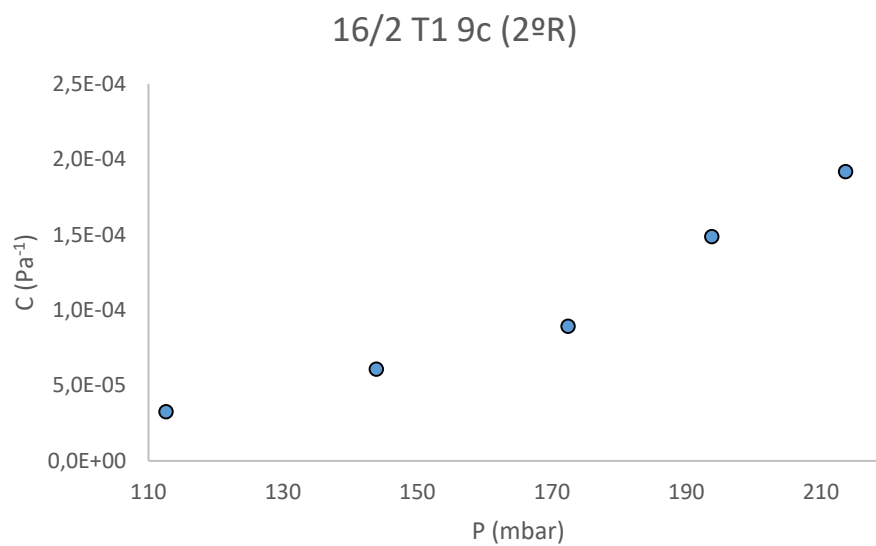


Figura 67 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (2ºR).

16/2 T1 9c (3ºR)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	54,9	35,28	
2	96,5	76,88	1,5303E-05
4	135,5	115,88	3,2647E-05
6	164,2	144,58	6,6546E-05
8	190	170,38	9,8701E-05
10	215,7	196,08	1,2386E-04
12	233,2	213,58	2,1827E-04
14	max		
16	max		
18	max		
20	max		

Tabla 32 Datos Tubo 16/2 T1 9c (3ºR).

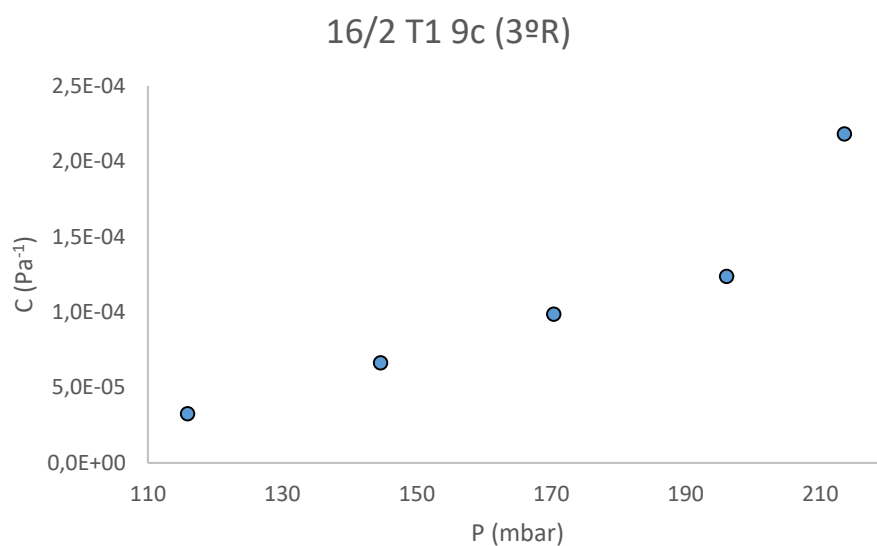


Figura 68 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (3ºR).

16/2 T1 9c (4°R)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	23,4	3,78	
2	71,7	52,08	1,3181E-05
4	109,7	90,08	3,3506E-05
6	144,7	125,08	5,4567E-05
8	174,6	154,98	8,5167E-05
10	195,2	175,58	1,5452E-04
12	216,3	196,68	1,8103E-04
14	233,4	213,78	2,6060E-04
16	max		
18	max		
20	max		

Tabla 33 Datos Tubo 16/2 T1 9c (4°R).

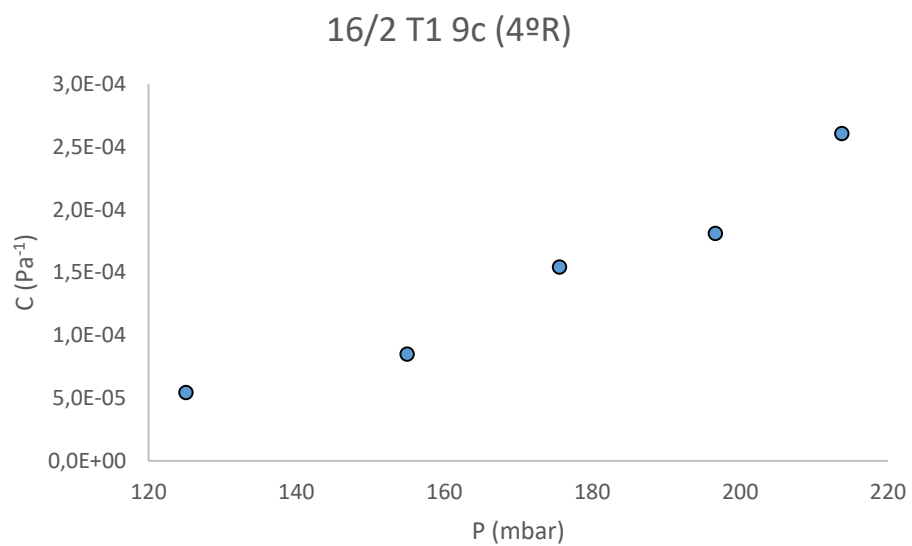


Figura 69 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (4°R).

16/2 T1 9c (5°R)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	20,3	0,68	
2	83,6	63,98	1,0057E-05
4	118,3	98,68	3,6693E-05
6	152,2	132,58	5,6338E-05
8	175,9	156,28	1,0745E-04
10	199,4	179,78	1,3545E-04
12	220,4	200,78	1,8189E-04
14	236,6	216,98	2,7508E-04
16	max		
18	max		
20	max		

Tabla 34 Datos Tubo 16/2 T1 9c (5°R).

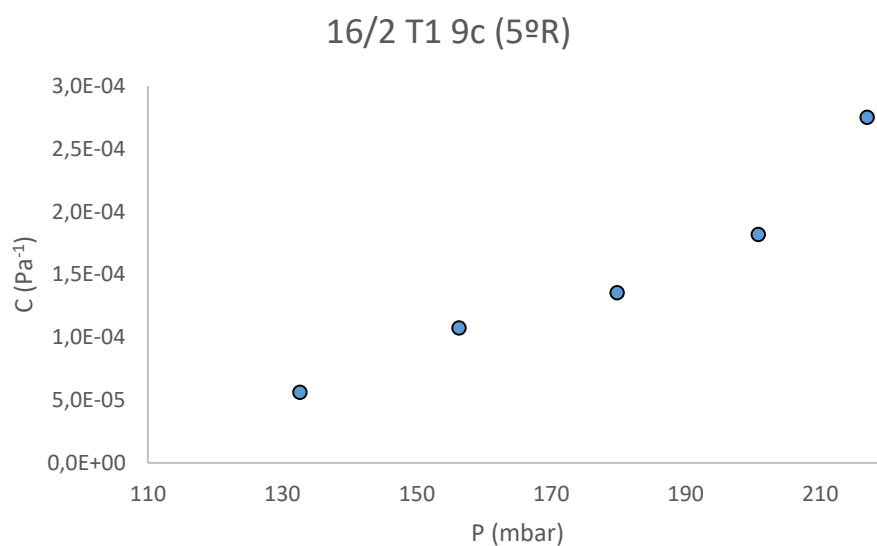


Figura 70 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (5°R).

16/2 T1 9c (6°R)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	23,6	3,98	
2	74	54,38	1,2631E-05
4	116	96,38	3,0315E-05
6	146,6	126,98	6,2414E-05
8	175,1	155,48	8,9350E-05
10	199,2	179,58	1,3208E-04
12	218,2	198,58	2,0104E-04
14	234,6	214,98	2,7173E-04
16	max		
18	max		
20	max		

Tabla 35 Datos Tubo 16/2 T1 9c (6°R).

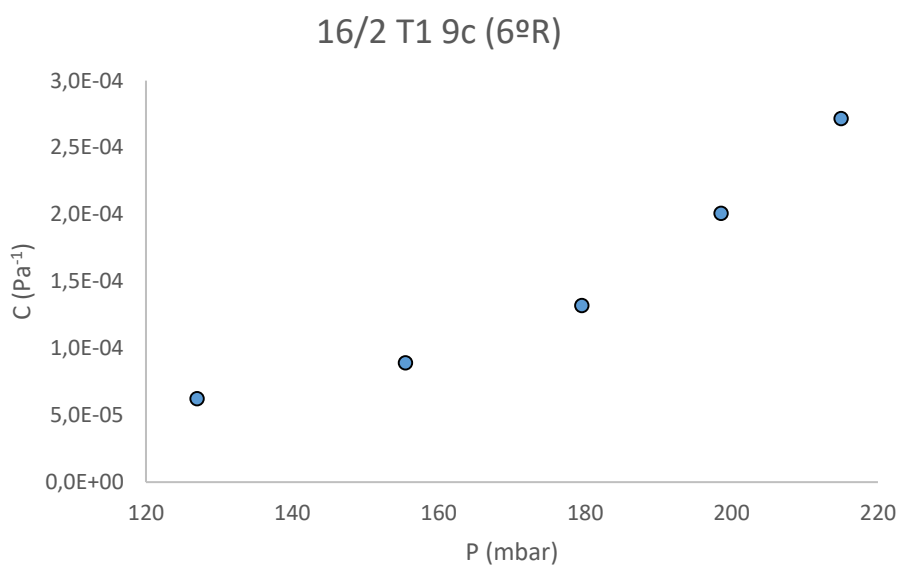


Figura 71 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (6°R).

16/2 T1 9c (7°R)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	24,7	5,08	
2	69,7	50,08	1,4147E-05
4	105,4	85,78	3,5665E-05
6	141,3	121,68	5,3199E-05
8	169,8	150,18	8,9350E-05
10	190,2	170,58	1,5603E-04
12	214,2	194,58	1,5915E-04
14	232,3	212,68	2,4621E-04
16	max		
18	max		
20	max		

Tabla 36 Datos Tubo 16/2 T1 9c (7°R).

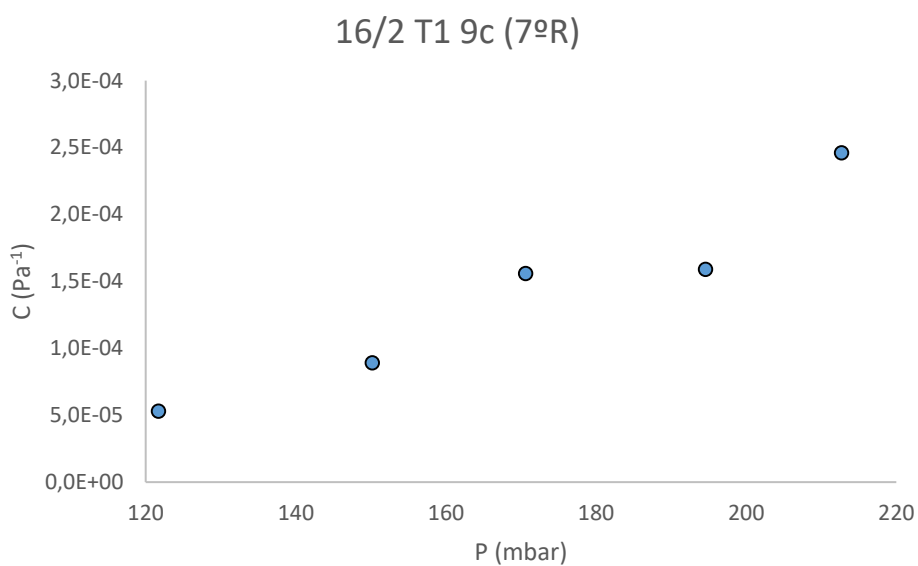


Figura 72 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (7°R).

16/2 T1 9c (8°R)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	22,4	2,78	
2	71,3	51,68	1,3019E-05
4	113,3	93,68	3,0315E-05
6	143	123,38	6,4305E-05
8	170,4	150,78	9,2937E-05
10	194,6	174,98	1,3153E-04
12	215,6	195,98	1,8189E-04
14	234	214,38	2,4219E-04
16	max		
18	max		
20	max		

Tabla 37 Datos Tubo 16/2 T1 9c (8°R).

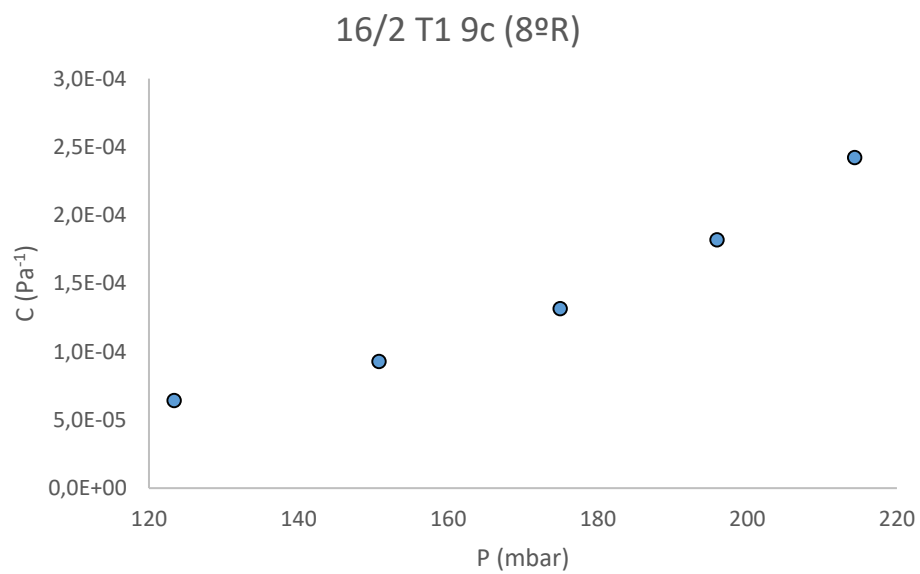


Figura 73 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (8°R).

16/2 T1 9c (9°R)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	27	7,38	
2	70,2	50,58	1,4737E-05
4	108,6	88,98	3,3157E-05
6	140	120,38	6,0824E-05
8	169,9	150,28	8,5167E-05
10	193,8	174,18	1,3318E-04
12	212,1	192,48	2,0873E-04
14	231,6	211,98	2,2853E-04
16	max		
18	max		
20	max		

Tabla 38 Datos Tubo 16/2 T1 9c (9°R).

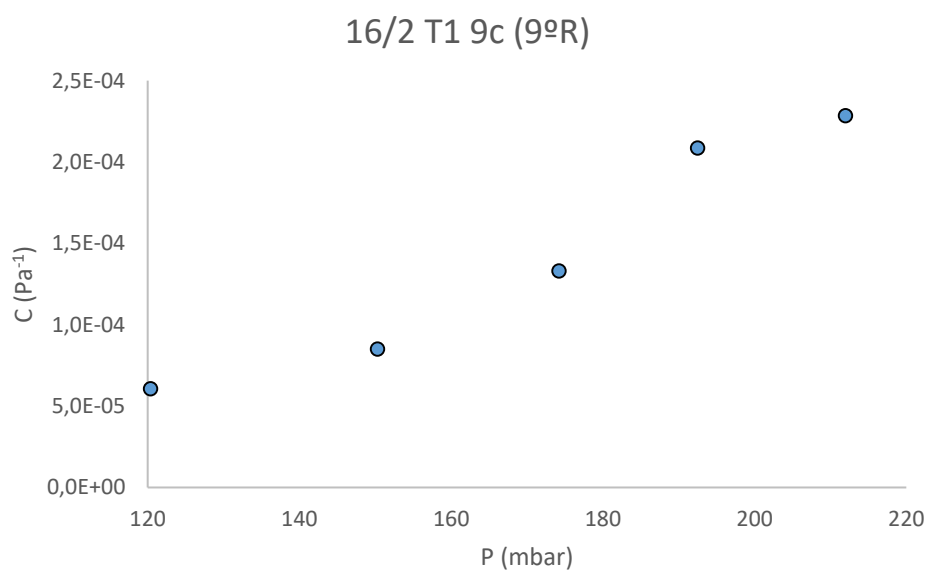


Figura 74 Curva de compliance para Tubo 16/2 T1 9c (9°R).

17/02 T1 7c (re)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	65,6	45,98	
2	77,8	58,18	5,2182E-05
4	88,2	68,58	1,2243E-04
6	95,4	75,78	2,6526E-04
8	103,6	83,98	3,1055E-04
10	110,3	90,68	4,7509E-04
12	116	96,38	6,7013E-04
14	121,3	101,68	8,4082E-04
16	124,9	105,28	1,4147E-03
18	max		
20	max		

Tabla 39 Datos Tubo 17/02 T1 7c (re).

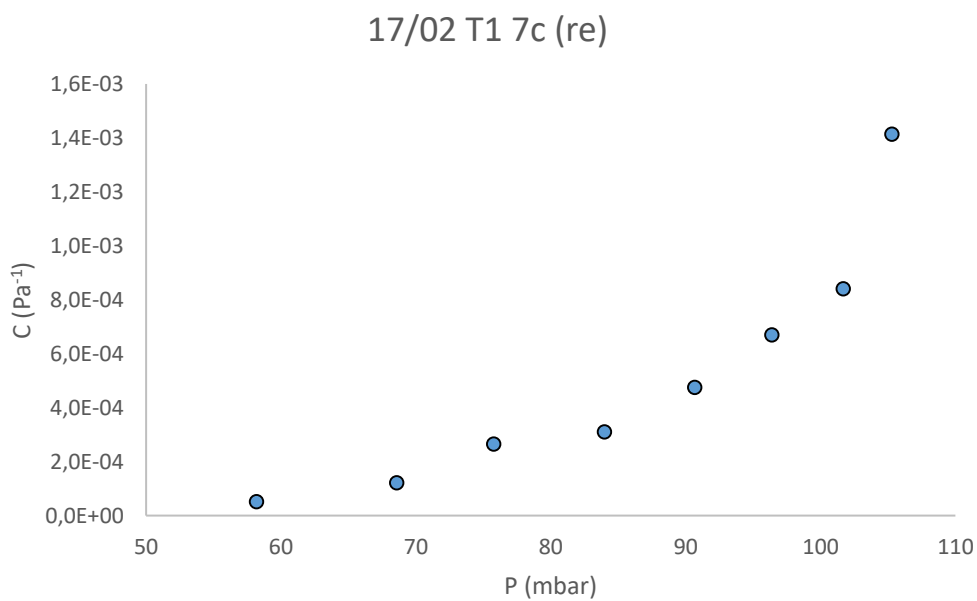


Figura 75 Curva de compliance para Tubo17/02 T1 7c (re).

16/02 T3 9c (re)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	56,6	36,98	
2	90,6	70,98	1,8724E-05
4	116,7	97,08	4,8783E-05
6	136,1	116,48	9,8446E-05
8	154,1	134,48	1,4147E-04
10	171,5	151,88	1,8294E-04
12	184,7	165,08	2,8937E-04
14	197,7	178,08	3,4280E-04
16	208,3	188,68	4,8047E-04
18	216,5	196,88	6,9873E-04
20	225,3	205,68	7,2343E-04

Tabla 40 Datos Tubo 16/02 T3 9c (re).

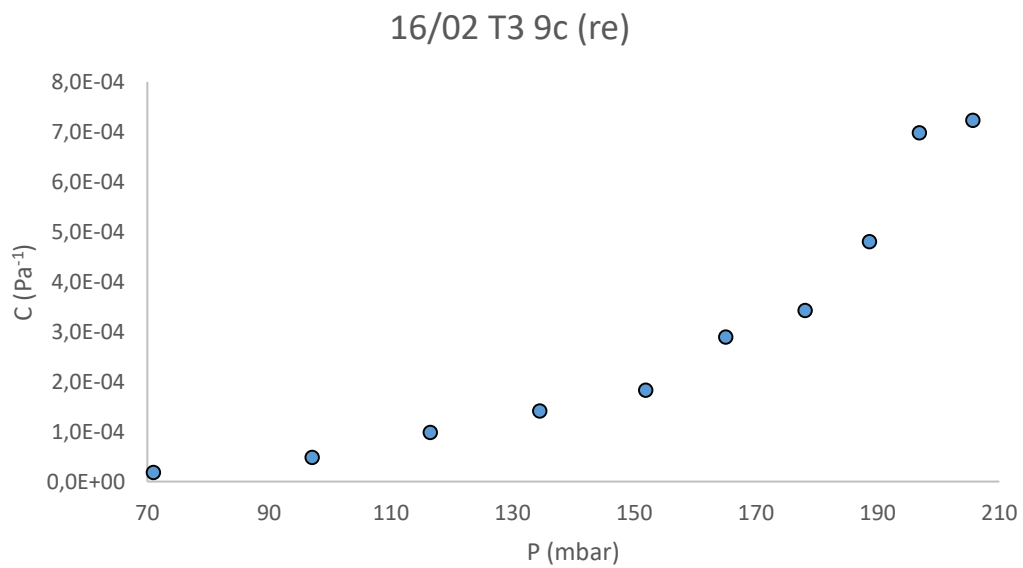


Figura 76 Curva de compliance para Tubo 16/02 T3 9c (re).

16/02 T3 9c (sec)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	52,7	33,08	
2	85,4	65,78	1,9468E-05
4	109,5	89,88	5,2832E-05
6	133,3	113,68	8,0246E-05
8	152,9	133,28	1,2992E-04
10	170,6	150,98	1,7984E-04
12	185,9	166,28	2,4965E-04
14	198,1	178,48	3,6527E-04
16	210,3	190,68	4,1746E-04
18	222,5	202,88	4,6964E-04
20	232	212,38	6,7013E-04

Tabla 41 Datos Tubo 16/02 T3 9c (sec).

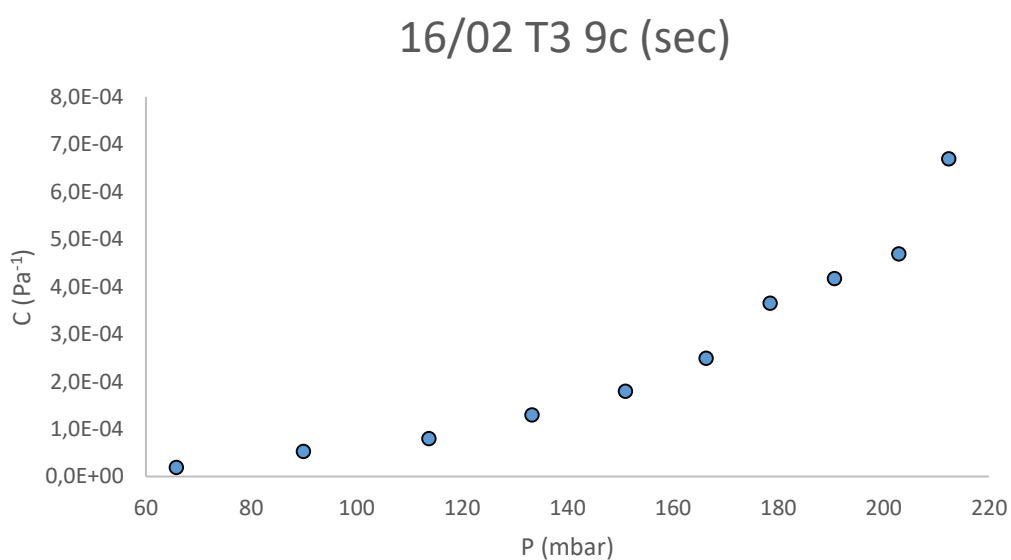


Figura 77 Curva de compliance para Tubo 16/02 T3 9c (sec).

21/02 T1 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	51,5	31,88	
2	90,5	70,88	1,6324E-05
4	114,4	94,78	5,3274E-05
6	136,8	117,18	8,5262E-05
8	155,5	135,88	1,3618E-04
10	171,4	151,78	2,0019E-04
12	184,9	165,28	2,8294E-04
14	197,9	178,28	3,4280E-04
16	207,2	187,58	5,4763E-04
18	214,3	194,68	8,0698E-04
20	223,1	203,48	7,2343E-04

Tabla 42 Datos Tubo 21/02 T1 7c N.

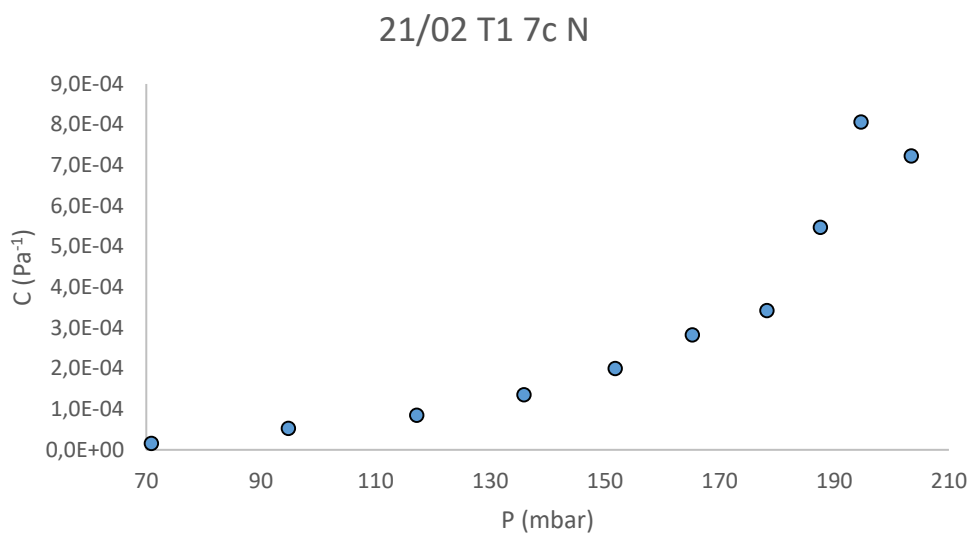


Figura 78 Curva de compliance para Tubo 21/02 T1 7c N.

21/02 T2 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	61,3	41,68	
2	99,8	80,18	1,6536E-05
4	122,3	102,68	5,6588E-05
6	148,9	129,28	7,1799E-05
8	169,1	149,48	1,2606E-04
10	185,1	165,48	1,9894E-04
12	200,3	180,68	2,5130E-04
14	210,4	190,78	4,4122E-04
16	218	198,38	6,7013E-04
18	225,4	205,78	7,7427E-04
20	233,3	213,68	8,0585E-04

Tabla 43 Datos Tubo 21/02 T2 7c N.

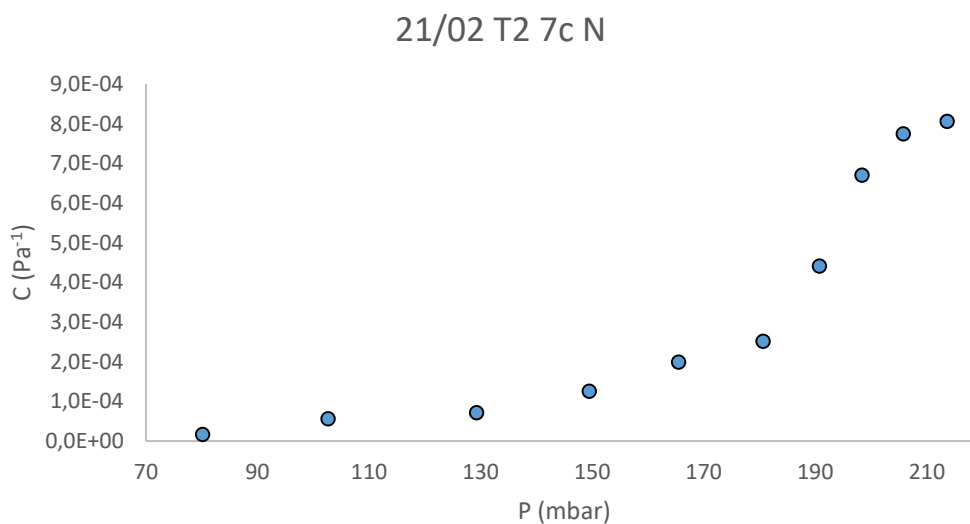


Figura 79 Curva de compliance para Tubo 21/02 T2 7c N.

21/02 T3 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	58,9	39,28	
2	97,3	77,68	1,6579E-05
4	116,4	96,78	6,6662E-05
6	141,8	122,18	7,5191E-05
8	167,4	147,78	9,9472E-05
10	181,4	161,78	2,2736E-04
12	196,8	177,18	2,4803E-04
14	210,8	191,18	3,1831E-04
16	223,2	203,58	4,1072E-04
18	235,2	215,58	4,7746E-04
20	243,4	223,78	7,7637E-04

Tabla 44 Datos Tubo 21/02 T3 7c N.

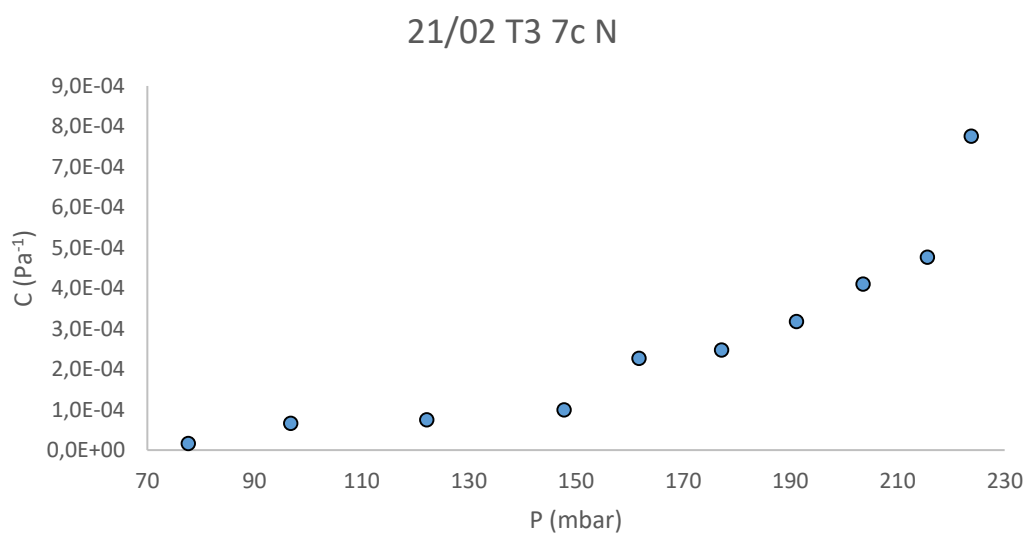


Figura 80 Curva de compliance para Tubo 21/02 T3 7c N.

17/02 T2 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	65	45,38	
2	87,7	68,08	2,8045E-05
4	108,4	88,78	6,1509E-05
6	125,4	105,78	1,1234E-04
8	137,7	118,08	2,0703E-04
10	148,9	129,28	2,8421E-04
12	158,2	138,58	4,1072E-04
14	167,9	148,28	4,5942E-04
16	175,6	155,98	6,6142E-04
18	182	162,38	8,9525E-04
20	187,2	167,58	1,2243E-03

Tabla 45 Datos Tubo 17/02 T2 7c N.

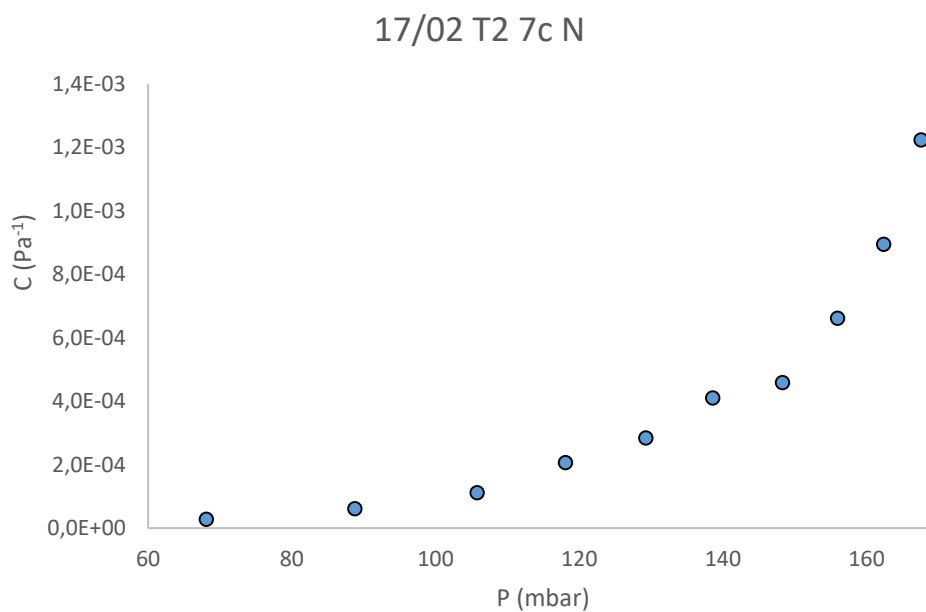


Figura 81 Curva de compliance para Tubo 17/02 T2 7c N.

25/02 T1 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	60	40,38	
2	80,2	60,58	3,1516E-05
4	102,4	82,78	5,7353E-05
6	119,4	99,78	1,1234E-04
8	135,5	115,88	1,5817E-04
10	148,6	128,98	2,4298E-04
12	161,1	141,48	3,0558E-04
14	163,4	143,78	1,9375E-03
16	175,9	156,28	4,0744E-04
18	184,8	165,18	6,4377E-04
20	193,4	173,78	7,4026E-04

Tabla 46 Datos Tubo 25/02 T1 7c N.

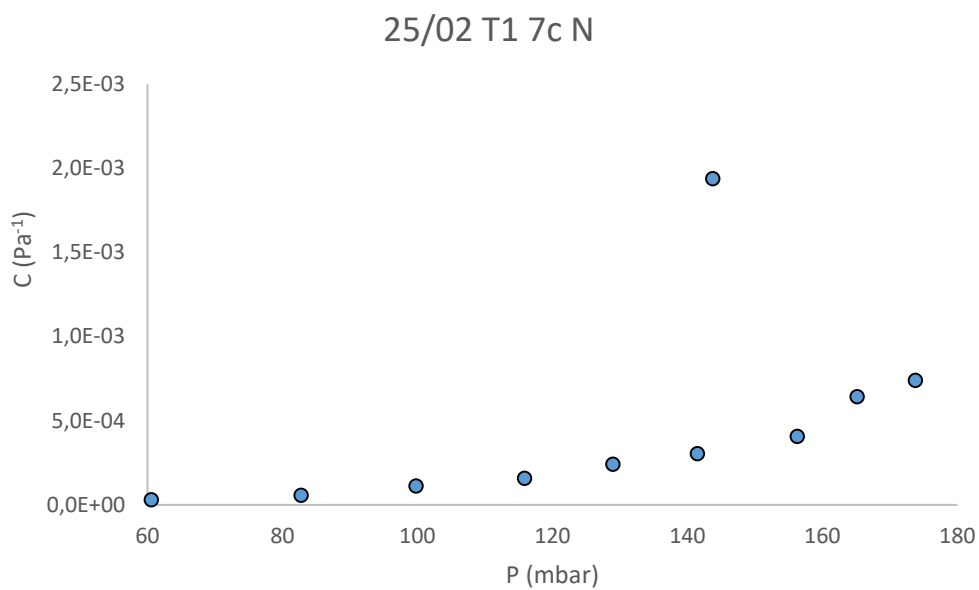


Figura 82 Curva de compliance para Tubo 25/02 T1 7c N.

25/02 T1 7c U (vas)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	61,9	42,28	
2	80,5	60,88	3,4227E-05
4	96,7	77,08	7,8595E-05
6	113,3	93,68	1,1505E-04
8	121,6	101,98	3,0680E-04
10	133,9	114,28	2,5879E-04
12	143,2	123,58	4,1072E-04
14	149,9	130,28	6,6513E-04
16	157,2	137,58	6,9767E-04
18	163,2	143,58	9,5493E-04
20	168,7	149,08	1,1575E-03

Tabla 47 Datos Tubo 25/02 T1 7c U (vas).

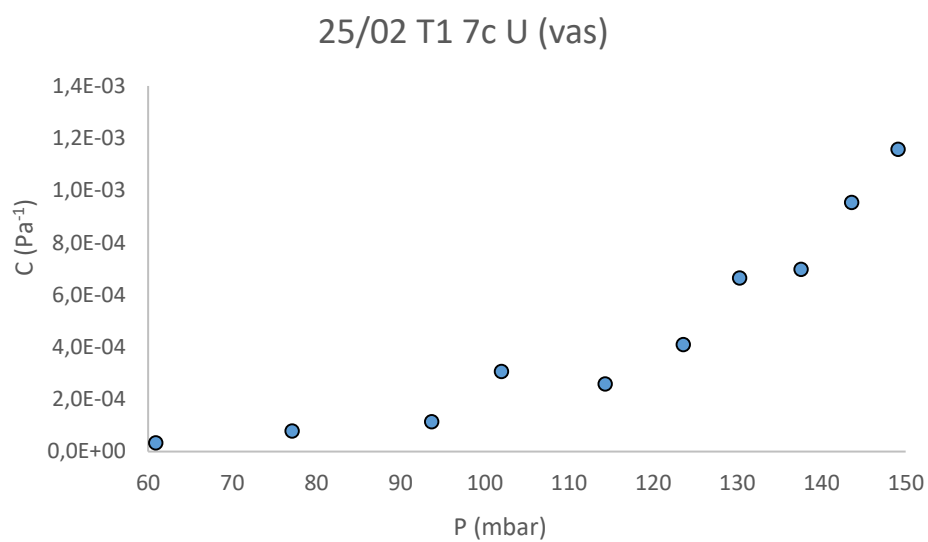


Figura 83 Curva de compliance para Tubo25/02 T1 7c U (vas).

25/02 T3 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	68,4	48,78	
2	97,1	77,48	2,2182E-05
4	121,9	102,28	5,134E-05
6	136	116,38	0,00013545
8	152,8	133,18	0,00015158
10	168,6	148,98	0,00020146
12	181,1	161,48	0,00030558
14	192,8	173,18	0,00038088
16	204,5	184,88	0,0004353
18	211	191,38	0,00088147
20	217,6	197,98	0,00096458

Tabla 48 Datos Tubo 25/02 T3 7c N.

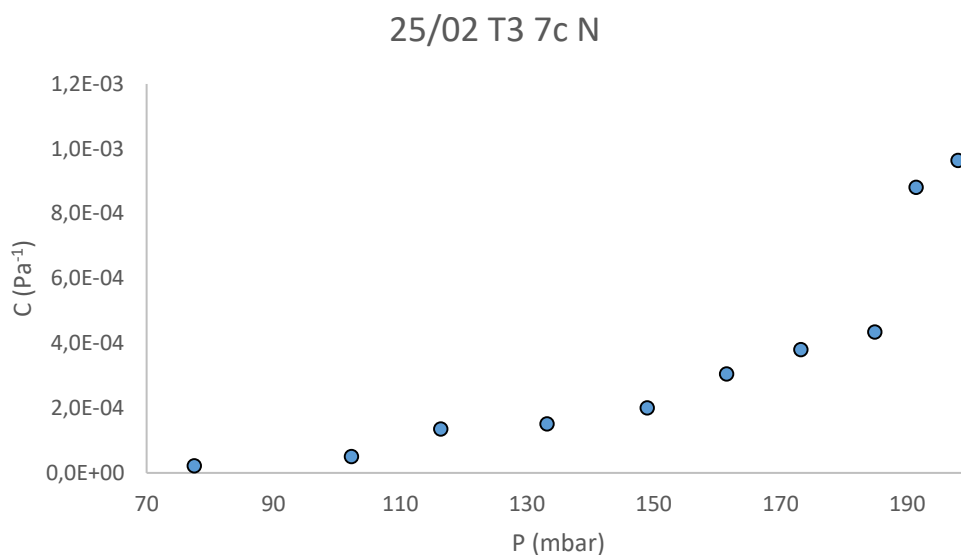


Figura 84 Curva de compliance para Tubo 25/02 T3 7c N.

22/02 T2 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	67,4	47,78	
2	95,1	75,48	2,2983E-05
4	113,1	93,48	7,0736E-05
6	135,8	116,18	8,4135E-05
8	151,3	131,68	1,6429E-04
10	166,3	146,68	2,1221E-04
12	177,8	158,18	3,3215E-04
14	188,6	168,98	4,1262E-04
16	198,5	178,88	5,1444E-04
18	206,2	186,58	7,4410E-04
20	212,9	193,28	9,5018E-04

Tabla 49 Datos Tubo 22/02 T2 7c N.

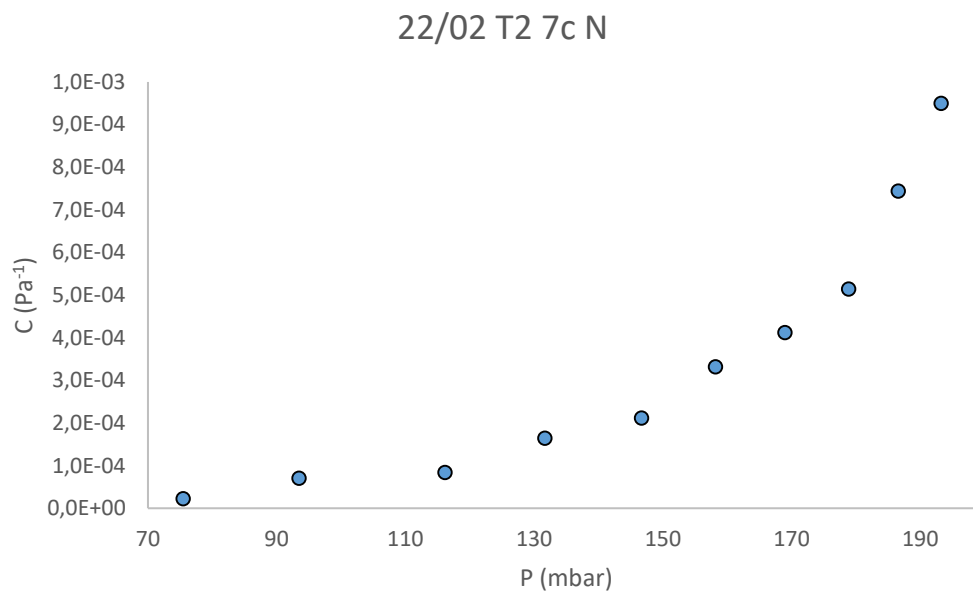


Figura 85 Curva de compliance para Tubo 22/02 T2 7c N.

23/03 T3 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	64,3	44,68	
2	91,6	71,98	2,3319E-05
4	112,3	92,68	6,1509E-05
6	129,2	109,58	1,1301E-04
8	142,7	123,08	1,8863E-04
10	156,7	137,08	2,2736E-04
12	169	149,38	3,1055E-04
14	180,1	160,48	4,0147E-04
16	184,5	164,88	1,1575E-03
18	189,8	170,18	1,0811E-03
20	195,4	175,78	1,1368E-03

Tabla 50 Datos Tubo 23/03 T3 7c N.

Tubo 23/03 Tramo 3, 7 capas Nuevo

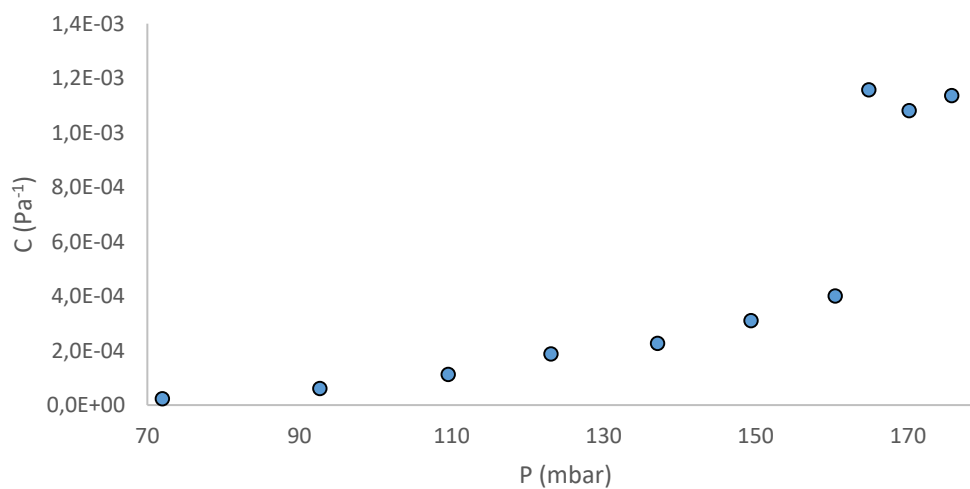


Figura 86 Curva de compliance para Tubo 23/03 T3 7c N.

24/03 7c N (20cm)			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	60,5	40,88	
2	76,8	57,18	1,9528E-05
4	91,9	72,28	4,2160E-05
6	105,5	85,88	7,0215E-05
8	117,7	98,08	1,0436E-04
10	130,6	110,98	1,2338E-04
12	140	120,38	2,0318E-04
14	151,5	131,88	1,9375E-04
16	159,5	139,88	3,1831E-04
18	166,3	146,68	4,2129E-04
20	175,5	155,88	3,4599E-04

Tabla 51 Datos Tubo 24/03 7c N (20cm).

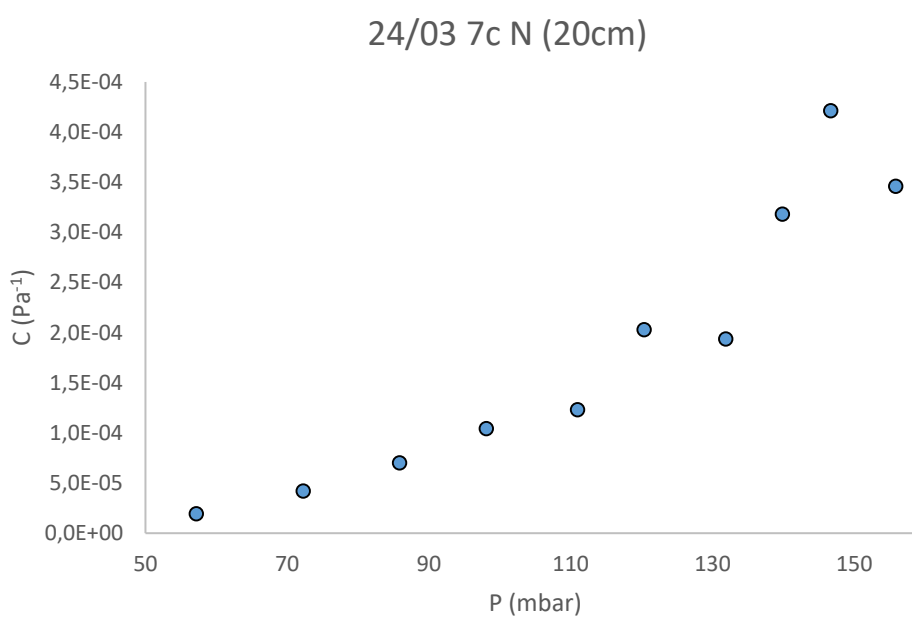


Figura 87 Curva de compliance para Tubo24/03 7c N (20cm).

23/03 T2 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	59,6	39,98	
2	83,9	64,28	2,6198E-05
4	104,1	84,48	6,3032E-05
6	120,2	100,58	1,1862E-04
8	131,4	111,78	2,2736E-04
10	142,7	123,08	2,8169E-04
12	147,1	127,48	8,6812E-04
14	153,1	133,48	7,4272E-04
16	159	139,38	8,6321E-04
18	162,7	143,08	1,5485E-03
20	169,8	150,18	8,9665E-04

Tabla 52 Datos Tubo 23/03 T2 7c N.

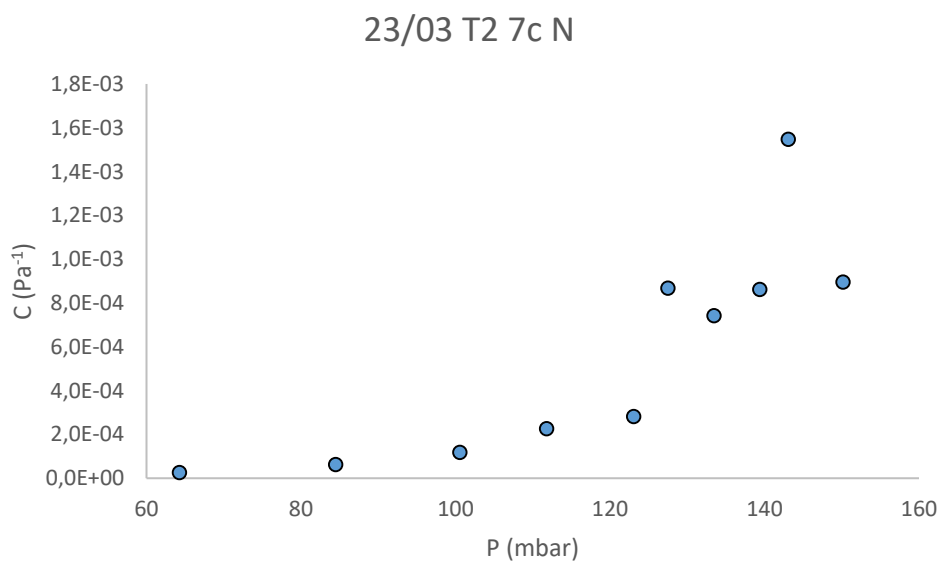


Figura 88 Curva de compliance para Tubo 23/03 T2 7c N.

23/03 T3 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	69,2	49,58	
2	96,8	77,18	2,3066E-05
4	117,8	98,18	6,0630E-05
6	136,2	116,58	1,0380E-04
8	149	129,38	1,9894E-04
10	164,3	144,68	2,0805E-04
12	167,4	147,78	1,2322E-03
14	177,7	158,08	4,3265E-04
16	186,3	166,68	5,9220E-04
18	193,5	173,88	7,9577E-04
20	200	180,38	9,7942E-04

Tabla 53 Datos Tubo 23/03 T3 7c N.

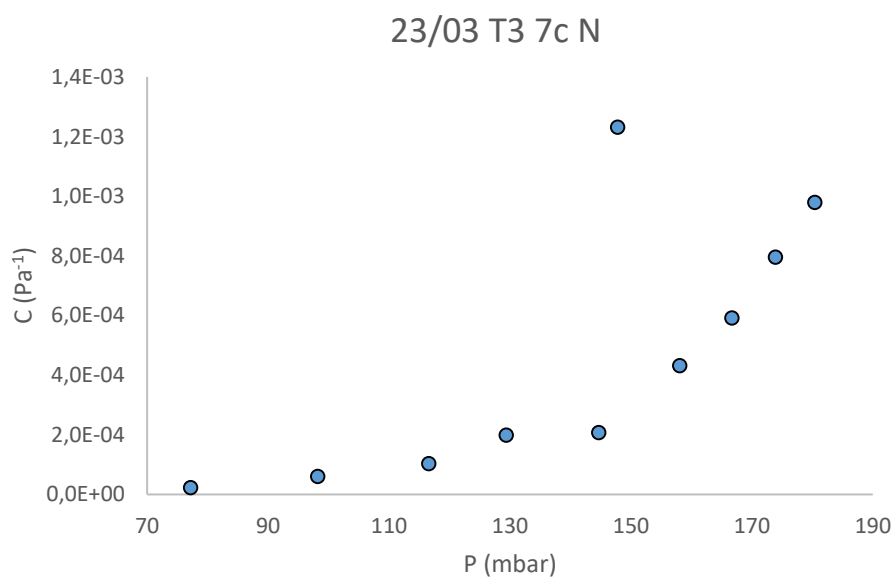


Figura 89 Curva de compliance para Tubo 23/03 T3 7c N.

23/03 T1 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	75,1	55,48	
2	90,4	70,78	4,1609E-05
4	104,3	84,68	9,1600E-05
6	114,5	94,88	1,8724E-04
8	123,8	104,18	2,7381E-04
10	132,9	113,28	3,4979E-04
12	140	120,38	5,3799E-04
14	144,8	125,18	9,2840E-04
16	149,8	130,18	1,0186E-03
18	155	135,38	1,1018E-03
20	158,2	138,58	1,9894E-03

Tabla 54 Datos Tubo 23/03 T1 7c N.

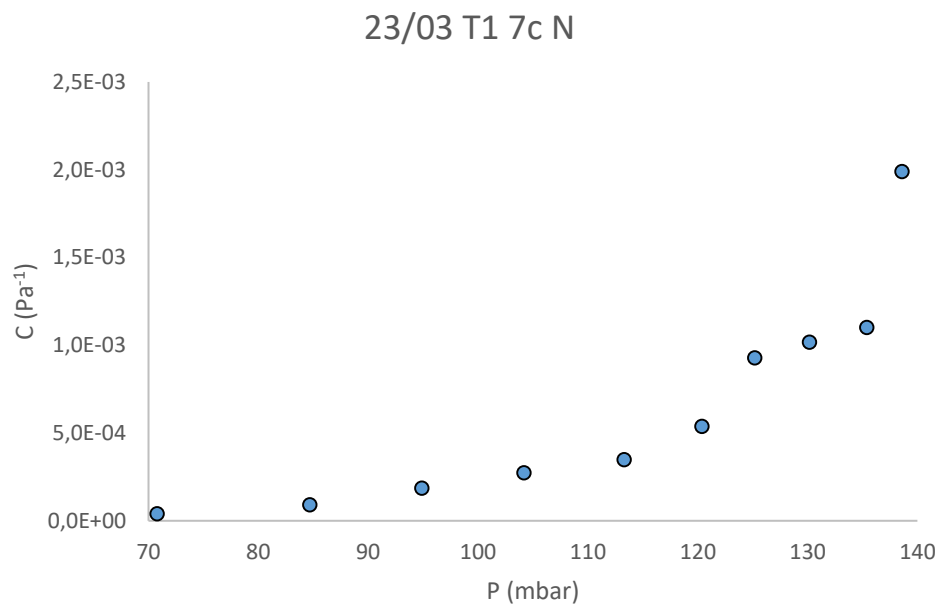


Figura 90 Curva de compliance para Tubo 23/03 T1 7c N.

28/03 T1 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	64,7	45,08	
2	96,3	76,68	2,0146E-05
4	121,4	101,78	5,0727E-05
6	140,3	120,68	1,0105E-04
8	156,5	136,88	1,5719E-04
10	170	150,38	2,3579E-04
12	182,8	163,18	2,9842E-04
14	191,3	171,68	5,2428E-04
16	200,4	180,78	5,5967E-04
18	207,6	187,98	7,9577E-04
20	214,5	194,88	9,2264E-04

Tabla 55 Datos Tubo 28/03 T1 7c N.

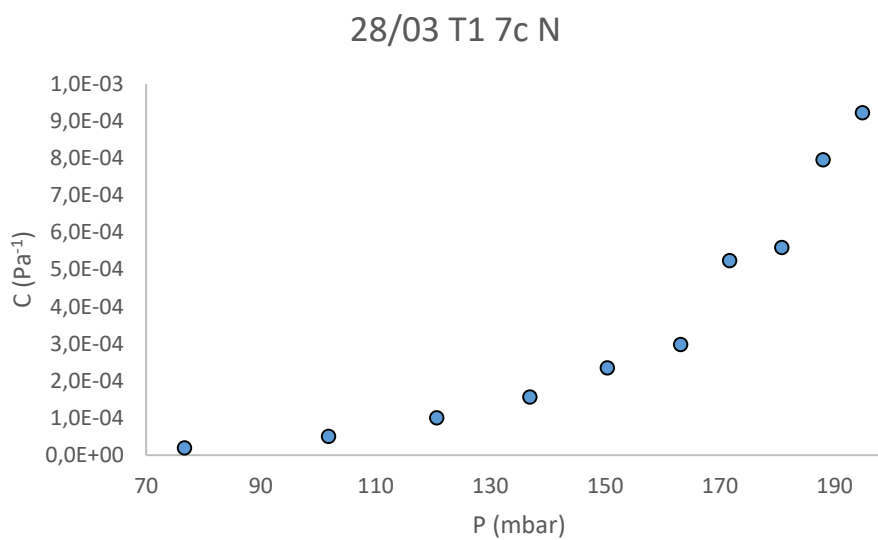


Figura 91 Curva de compliance para Tubo 28/03 T1 7c N.

28/03 T2 7c N			
V (ml)	P (mbar)	P corregida (mbar)	C (Pa ⁻¹)
0	68,1	48,48	
2	97,1	77,48	2,1952E-05
4	121,4	101,78	5,2397E-05
6	143,9	124,28	8,4883E-05
8	158,8	139,18	1,7090E-04
10	174,2	154,58	2,0669E-04
12	187,7	168,08	2,8294E-04
14	199,4	179,78	3,8088E-04
16	208,1	188,48	5,8540E-04
18	216,4	196,78	6,9031E-04
20	221,8	202,18	1,1789E-03

Tabla 56 Datos Tubo 28/03 T2 7c N.

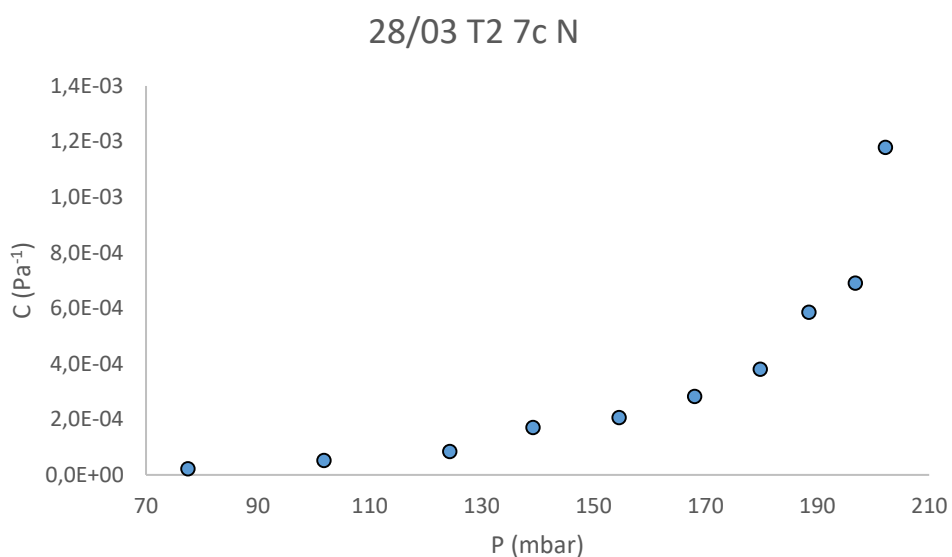


Figura 92 Curva de compliance para Tubo 28/03 T2 7c N.

8.3 Anexo III: Resumen estado del arte

Nombre	Autor	Año	Tipo	Contenido
A simple pumping mechanism in a valveless tube	Hans Thomann	1978	Bomba Impedancia	Modelo analítico y unidimensional de un sistema cerrado suponiendo un flujo no viscoso y un amortiguamiento de las ondas en la parte flexible
Study of a Piston Pump, without valves	Shoji TAKAGI y Toru SAJJO	1983	Bombeo Asimétrico	Modelo matemático que explica el flujo asimétrico variando parámetros en el experimento
Study of a Piston Pump without Valves (2nd Report)	Takagi, S.; Takahashi K	1985	Bombeo Asimétrico	Estudio de los efectos de la resonancia en un rango de frecuencias bajas
Impedance defined flow generalization of William Harvey's concept of circulation - 370 years later	Maximilian Moser, Thomas Kenner, Johnnie W Huang y Graham S Schwarz	1998	Bomba Impedancia	Lazo cerrado circular, una mitad de cristal y otra media de látex. Establecen relaciones entre el caudal neto y la frecuencia de excitación
Two-Dimensional Simulations of Valveless Pumping Using the Immersed Boundary Method	Jung Eunok y Peskin Charles	2001	Bomba Impedancia	Establecen que el mecanismo de creación de flujo se debe a la asimetría en las pérdidas hidráulicas
Valveless pumping in a fluid-filled closed elastic tube-system: Onedimensional theory with experimental validation	Ottesen	2003	Bomba Impedancia	Modelo numérico unidimensional de un sistema cerrado. Se relacionó la dependencia del flujo con la amplitud, ubicación, elasticidad del tubo
Numerical investigation of the Liebau phenomenon	Borzi A, Propst G	2003	Bomba Liebau	Utilizan ecuaciones unidimensionales para explicar una bomba en un sistema abierto sin válvulas
An Analytic Approach to the Liebau Problem of Valveless Pumping	Auerbach D, Moehring W, Moser M	2004	Bomba Liebau	Tratan de encontrar una solución analítica al problema de Liebau despreciando la viscosidad. Buscan una solución a la ecuación de Euler con la configuración geométrica simple, una tubería recta, parte de la cual es flexionada a una frecuencia
A valveless micro impedance pump driven by electromagnetic actuation	Derek Rinderknecht, Anna Iwaniec Hickerson & Morteza Gharib	2005	Bomba Impedancia	Técnica basada en la bomba de impedancia para bombear fluidos en la microescala. Reflexión de la onda en el extremo del tubo es un factor dominante
An Experimental Analysis of the Characteristic Behaviors of an Impedance Pump	Anna Iwaniec Hickerson	2005	Bomba Impedancia	Investiga parámetros como la ubicación, ancho de la pinza, frecuencia y presión. Propone que el principal mecanismo de bombeo es la dinámica de la onda, trabajando más eficiente en frecuencias resonantes. Bomba impedancia mayor eficiencia que peristáltica

Computational studies of resonance wave pumping in compliant tubes	Avrahami I, Gharib M	2008	Bomba Impedancia	Establece un modelo numérico de un sistema abierto y se proporcionan resultados de un amplio rango de condiciones de bombeo junto con la demostración de la naturaleza de resonancia de la bomba. También se caracterizan las dinámicas de onda para casos resonantes y no resonantes
In-vitro investigation of a potential wave pumping effect in human aorta	Niema M Pahlevan y Morteza Gharib	2013	Bomba Liebau	Aplican una bomba de Liebau con pistón a un modelo de látex de una aorta humana, llegando a aislar ambos efectos: la bomba de impedancia y el bombeo asimétrico

Tabla 57 Resumen de estudios previos