



**Universidad
Zaragoza**

Proyecto Fin de Carrera

Diseño, implementación y prueba de una
bomba peristáltica de alta presión y su
correspondiente sistema de manguera

Autora

Belén Calvo Bernad

Director

Jorge Falcó Boudet

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza 2014

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a todos los que me han apoyado a lo largo de la realización de este proyecto.

A la empresa World Of Medicine por darme la oportunidad de trabajar con ellos y desarrollar un proyecto tan interesante.

En especial a mis tutores Dr. Holger Winterberg y Dr. Holger Winterberg que siempre han mostrado un gran interés y han estado dispuestos a ayudar cuando era necesario.

Mi más sincero agradecimiento a Jorge Falcó Boudet por su disponibilidad e interés por este proyecto.

Pero a las personas a las que más me gustaría dar las gracias es a mis padres, que siempre han mostrado un gran interés en mi trabajo y siempre me han apoyado moralmente.

Resumen: Diseño, implementación y prueba de una bomba peristáltica de alta presión y su correspondiente sistema de manguera

El siguiente proyecto de fin de carrera tiene como objetivo el desarrollo y la construcción de una bomba hidráulica que, siguiendo el principio peristáltico, proporcione un chorro de agua a alta presión. Dicha bomba encuentra su aplicación en las intervenciones quirúrgicas de liposucción.

En el funcionamiento de una bomba peristáltica un tubo o manguera flexible es aplastado continuamente por rodillos colocados adecuadamente sobre una rueda, dicha rueda está unida al eje del motor el cual la hace girar. Entre un paso y otro del rodillo impulsor, el tubo recupera su diámetro original generando un vacío que succiona el fluido circulante ayudando así a su avance. Es importante la adecuada colocación de los rodillos ya que si en algún momento dejan de presionar el conducto, el líquido podría retroceder.

En el desarrollo del proyecto se fabrica un prototipo de laboratorio sobre el cual realizar los experimentos. En primer lugar se calcula y diseña la estructura de la bomba (soporte, motor, rueda de rodillos, rodillos, elementos auxiliares necesarios para la realización de los experimentos como fuentes de alimentación etc.). A continuación se investiga sobre el sistema de manguera.

En la realización de la parte estructural hay que destacar la importancia del estudio de las distintas ruedas de rodillos que pueden ser empleadas, se enumeran sus ventajas e inconvenientes y se lleva a cabo un estudio práctico mediante experimentos sobre el prototipo. Un correcto análisis del material, forma y dimensiones de los rodillos que presionan el tubo así como de su adecuada colocación en la rueda es también de vital importancia.

El sistema de manguera es un elemento clave en el funcionamiento de esta bomba peristáltica ya que se trabaja con presiones de hasta 30 bares. En la realización del proyecto se hace un exhaustivo análisis de los posibles materiales adecuados para la manguera, teniendo en cuenta tanto sus propiedades químicas como físicas.

En cuanto a las propiedades físicas es necesario un material suficientemente elástico como para la rápida recuperación de forma del tubo tras su constante compresión. La manguera no sólo tiene que resistir la presión de hasta 30 bares sino también la constante fricción con los rodillos.

Con todo ello se pretende con la realización de este proyecto desarrollar un prototipo que cumpla los requisitos establecidos y llevar a cabo las mediciones necesarias que lo corroboren.

Índice

1. Introducción.....	1
2. Fundamentos teóricos.....	3
2.1 Liposucción.....	3
2.2 Sistema de bombeo.....	5
2.2.1 Bombas hidráulicas de aplicación en la medicina.....	5
2.2.2 Bombas peristálticas.....	5
2.3. Pérdida de carga.....	6
3. Prototipo experimental.....	7
3.1. Construcción del montaje experimental.....	7
3.2. Sistema de tubos flexibles.....	10
4. Medición de los parámetros a controlar.....	11
5. Análisis experimental.....	12
5.1. Selección de la rueda de rodillos.....	12
5.1.1. Número de rodillos.....	13
5.1.2. Tamaño de los rodillos.....	16
5.2. Desarrollo del sistema de tubos.....	19
5.2.1. Influencia del diámetro interior del tubo flexible.....	19
5.2.2. Selección del material del tubo.....	21
5.3. Optimización del sistema de tubos flexibles.....	26
5.4 Optimización de los rodillos.....	31

Anexo

Anexo 1. Pérdida de carga.....	1
Anexo 2. Instrumentos médicos empleados en operaciones de liposucción.....	4
Anexo 3. Medición de los parámetros a controlar.....	5
3.1. Estación de medición.....	5
3.2. Medición de la presión.....	5
3.3 Medición del caudal.....	7
3.4. Medición de la velocidad de rotación.....	8
3.5. Registro de datos con LabVIEW.....	8
Anexo 4. Cálculo de la distancia necesaria entre empujador y rodillo.....	9
Anexo 5. Tamaño de los rodillos.....	13
Anexo 6. Forma del rodillo.....	15
Anexo 7. Influencia del diámetro del tubo flexible.....	18
Anexo 8. Observaciones en los materiales de Silicona y Norprene.....	25
Anexo 9. Análisis del efecto de la hendidura de los rodillos sobre la presión...	26

Bibliografía

Índice de figuras

Figura 2.1: Cánula de absorción con sus dos conductos.....	3
Figura 2.2: Principio de una liposucción asistida por chorro de agua.....	4
Figura 2.3: Diversos instrumentos empleados en las operaciones de liposucción.....	4
Figura 2.4: Principio peristáltico de una bomba.....	5
Figura 3.1: Motor conectado a la fuente de alimentación externa.....	8
Figura 3.2: Prototipo experimental de la bomba.....	8
Figura 3.3: Diagrama del sistema de tubos.....	10
Figura 3.4: Boquilla de 6 mm de longitud y 0,2 mm de diámetro interior.....	11
Figura 5.1: Rueda con 5 rodillos y 6 rodillos de diámetro 14,7 mm y rueda con 4 dobles rodillos de diámetro 6 mm.....	13
Figura 5.2: Comparación del número de rodillos utilizando un tubo de Silicona con un diámetro interior de 3,2 mm.....	14
Figura 5.3: Ruedas con rodillos cilíndricos con un diámetro de 6 mm.....	16
Figura 5.4: Comparación del número de rodillos utilizando un tubo de Tygon con un diámetro interior de 2,4 mm.....	17
Figura 5.5: Comparación del número de rodillos utilizando un tubo de Tygon con un diámetro interior de 2,4 mm.....	20
Figura 5.6: Tubo de Silicona.....	22
Figura 5.7: Tubo de Norprene.....	23
Figura 5.8: Izquierda: Tubo de Tygon DI=2,4mm. Derecha: Tubo de Tygon DI=3,2mm.....	24
Figura 5.9: Comparación de los cuatro tubos elegidos.....	25
Figura 5.10: Comparación del comportamiento del tubo reforzado al emplear las 3 ruedas de rodillos.....	28
5.11: Comparación del tubo reforzado con y sin recubrimiento protector. Empleada rueda con 6 rodillos.....	30
Figura 5.12: Rueda de rodillos con 6 rodillos con una hendidura en la parte central que permite la adherencia del tubo.....	32

Índice de figuras anexo

Figura A 2.1: Instrumento empleado en las operaciones de liposucción.....	4
Figura A 3.1: Efecto piezorresistivo.....	6
Figura A 3.2: Esquema del método de distribución de calor	7
Figura A 4.1: Curvas Fuerza/Distancia de aplastamiento de los 4 tubos de ensayo. Elasticidad de los materiales.....	12
Figura A 5.1: Ruedas con 6 rodillos con un diámetro de 6 mm a la izquierda y un diámetro de 14,7 mm a la derecha.....	14
Figura A 5.2: Comparación del comportamiento entre una rueda con 6 rodillos de 6 mm de diámetro y una rueda con 6 rodillos de 14,7 mm de diámetro.....	14
Figura A 5.3: Rodillo convexo a la izquierda y rodillo cilíndrico a la derecha.....	16
Figura A 5.4: Comparación del comportamiento del caudal y la presión con respecto a la velocidad de rotación de la rueda empleando rodillos cilíndricos o rodillos convexos.....	17
Figura A 5.5: Comparación del caudal y presión obtenidos con tubos de diferente diámetro interior. Rueda con 5 rodillos.....	20
Figura A 5.6: Comparación del caudal y presión obtenidos con tubos de diferente diámetro interior. Rueda con 6 rodillos	22
Figura A 5.7: Comparación del caudal y presión obtenidos con tubos de diferente diámetro interior. Rueda con 4 rodillos dobles	23 25
Figura A 5.8: Inestabilidad de la Silicona ante la presión.....	26
Figura A 5.9: Inestabilidad del Norprene.....	
Figura A 5.10: Comparación de los valores de presión obtenidos con una rueda con 6 rodillos cilíndricos con y sin hendidura en la parte central	27

Índice de tablas anexo

Índice de tablas anexo	13
Tabla A 5.1: Coordenadas de los puntos de flexión y de los puntos correspondientes a soportar 30 bares para las cuatro muestras de tubos elegidas.....	
Tabla A 5.2: Valores de caudal obtenidos en los experimentos a la velocidad de rotación para obtener teóricamente 100 ml/min.....	24

1. Introducción

El siguiente proyecto de fin de carrera concluye mis estudios realizados en la Universidad de Zaragoza, con fecha del 15/04/2013 al 31/11/2013, en trabajo conjunto con la empresa World Of Medicine GmbH con emplazamiento en Berlín (a continuación denominada W.O.M.) en el departamento de investigación y desarrollo.

W.O.M. es una empresa pionera y líder mundial en la medicina mínimamente invasiva. La empresa lleva desarrollando durante más de 40 años innovadores dispositivos médicos los cuales son comercializados a nivel internacional. Los productos desarrollados y fabricados por la empresa W.O.M. se dividen en cuatro grupos: "Flow & Fluid", "Vision & Image", "Disposables" y "Cardiac-Thoracic Instruments", en los cuales se desarrollan productos tales como bombas peristálticas, insufladores, productos para la visualización y la transmisión de datos en las operaciones, instrumentos de aplicación en el sistema cardiotorácico como endoscopios de disección vascular o retractores de capas pulmonares.

Los productos recién mencionados encuentran su aplicación en la laparoscopia, histeroscopia, urología y en particular la artroscopia. [1]

La empresa World Of Medicine pretende desarrollar una bomba peristáltica de alta presión cuya aplicación se encuentra en las operaciones quirúrgicas de liposucción. La liposucción se produce mediante la actuación de un chorro de agua que disuelve la grasa corporal situada en las zonas no deseadas del cuerpo, esta disolución es succionada y posteriormente desechada o reinsertada en otras zonas del cuerpo en caso de así desearlo.

Todas las bombas peristálticas hasta ahora desarrolladas y producidas por W.O.M. trabajan siguiendo el principio peristáltico (bombas de rodillos). Estas bombas se caracterizan por ser de alta calidad y disponer de un funcionamiento sencillo. A lo largo del proyecto se pretende investigar si una bomba peristáltica de alta presión puede ser considerada una alternativa a las bombas de pistón utilizadas actualmente en las intervenciones de liposucción.

El objetivo de este proyecto es el diseño, desarrollo y verificación de una bomba peristáltica, que sea capaz de proporcionar un caudal de 100 ml/min a una presión de en torno a 20-30 bares. Para ello será necesario el diseño y construcción de un prototipo experimental, la selección y prueba de los componentes más relevantes como son la rueda de rodillos y el tubo flexible a emplear. A partir del análisis de los resultados se perfecciona el sistema hasta llegar a uno óptimo que cumpla, en la medida de lo posible, con los objetivos.

La bomba a desarrollar está basada en el mismo funcionamiento que poseen las actuales bombas peristálticas que la empresa W.O.M. desarrolla.

Las bombas hidráulicas que actúan siguiendo el principio peristáltico son consideradas como alternativa debido sobre todo a su económico precio en comparación con el precio actual del mercado de las bombas de pistones destinadas para dicha aplicación.

El sistema peristáltico posee además características muy ventajosas para su aplicación en la liposucción como por ejemplo la fácil esterilización de la bomba. En las bombas peristálticas el fluido solo está en contacto con el interior del tubo por tanto sólo es

necesario esterilizar dicho tubo, al evitar partes móviles en contacto con el fluido la esterilización resulta más sencilla. La producción y el mantenimiento de la bomba son por consiguiente más fáciles y baratos.

2. Fundamentos teóricos

A continuación se describen los conceptos teóricos más significativos relativos al proyecto con el fin de ayudar a una mejor comprensión del mismo.

2.1 Liposucción

La bomba peristáltica de alta presión a desarrollar en este proyecto está pensada para su aplicación en la liposucción.

La liposucción o lipoaspiración es una tecnología sanitaria que se utiliza en cirugía estética mediante la cual las células adiposas de diversas zonas del cuerpo son absorbidas mediante una cánula o jeringa conectada a una máquina succionadora. Un tipo de liposucción es la Liposucción Asistida Water Jet, la cual debe su nombre al potente chorro de agua que se libera en la punta de la cánula. Este chorro de agua es lo suficientemente fuerte como para remover las células grasas sin traumatizar otros tejidos, nervios o vasos sanguíneos, las células de grasa liberadas son inmediatamente recogidas por la cánula para limitar la inflamación del tejido y los problemas asociados con los fluidos.

La liposucción de chorro de agua se realiza a través de una cánula de aspiración que posee un segundo tubo en su interior (Figura 2.1). Un chorro de agua pulsante proveniente de la bomba peristáltica se inyecta a alta presión a través del conducto interior en el área del problema, la grasa es disuelta y posteriormente aspirada por el conducto exterior en la misma operación (Figura 2.2).

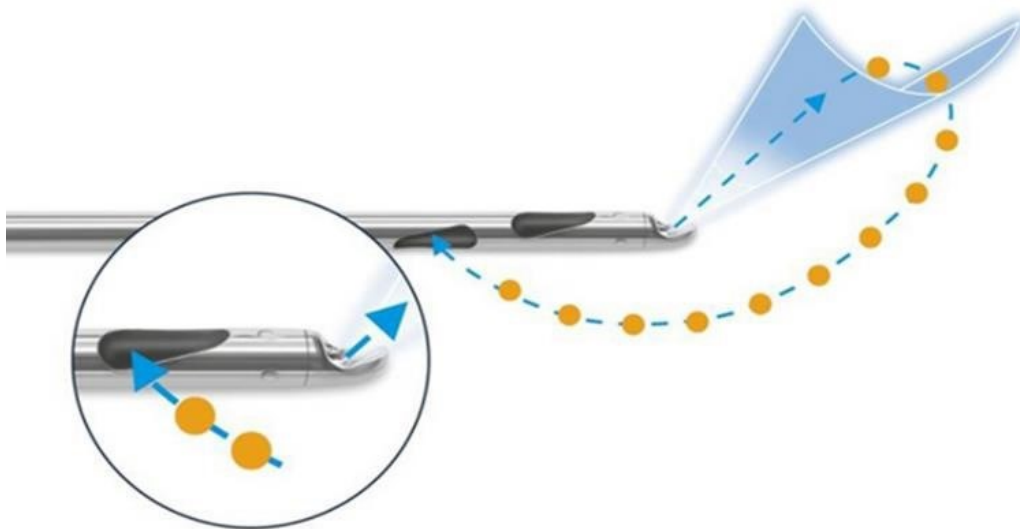


Figura 2.1: Cánula de absorción con sus dos conductos

Las ventajas empleando el chorro de agua con respecto al método tumescente convencional, en el cual se inyecta una mayor proporción de agua que de grasa a extraer, son las siguientes: reducción significativa de los tiempos de operación, mejor modelado

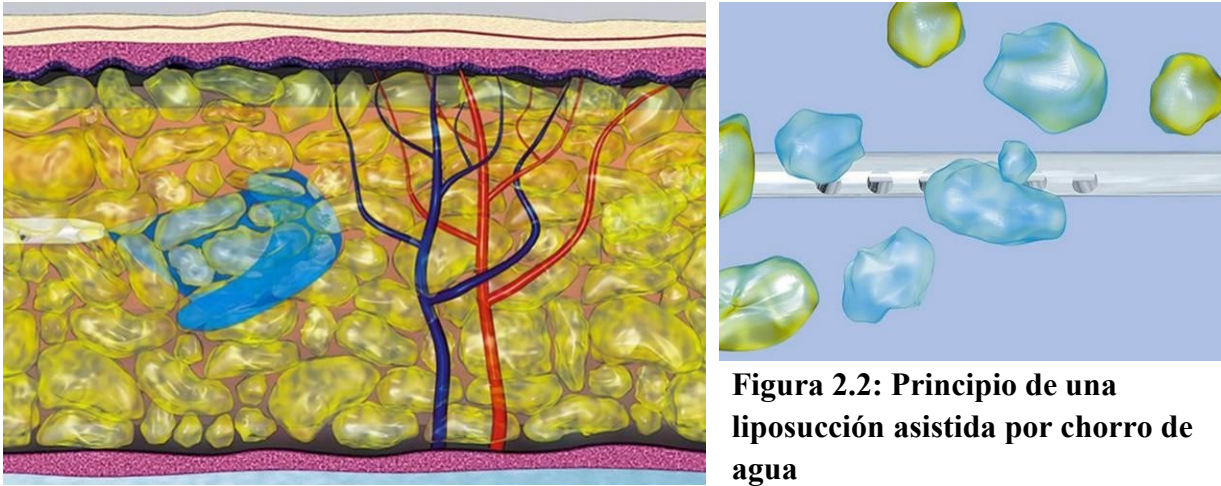


Figura 2.2: Principio de una liposucción asistida por chorro de agua

en las zonas de transición y en las zonas pequeñas, evitación de la destrucción de tejidos, reducción en la cantidad de medicamento analgésico necesario en el postoperatorio, resultado visible muy rápidamente.

En contraste con los métodos convencionales de liposucción, la grasa se elimina con mucho menos esfuerzo y con un riesgo significativamente menor de aparición de efectos secundarios en las áreas afectadas del cuerpo. La cantidad de líquido tumescente introducida en el cuerpo previa a la operación es significativamente menor. La cirugía es posible bajo anestesia local (no es necesaria anestesia general) por lo tanto el efecto negativo de los medicamentos se reduce al mínimo. Dado que la disolución y la aspiración de las células de grasa se producen en paralelo, el tiempo de operación se puede reducir significativamente.

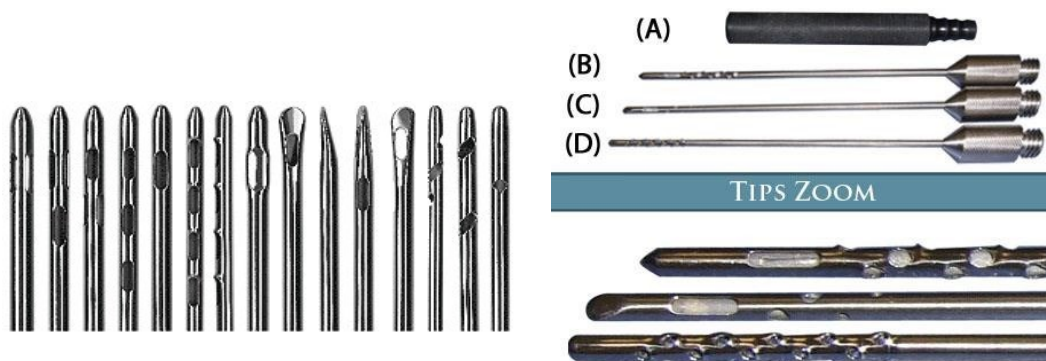


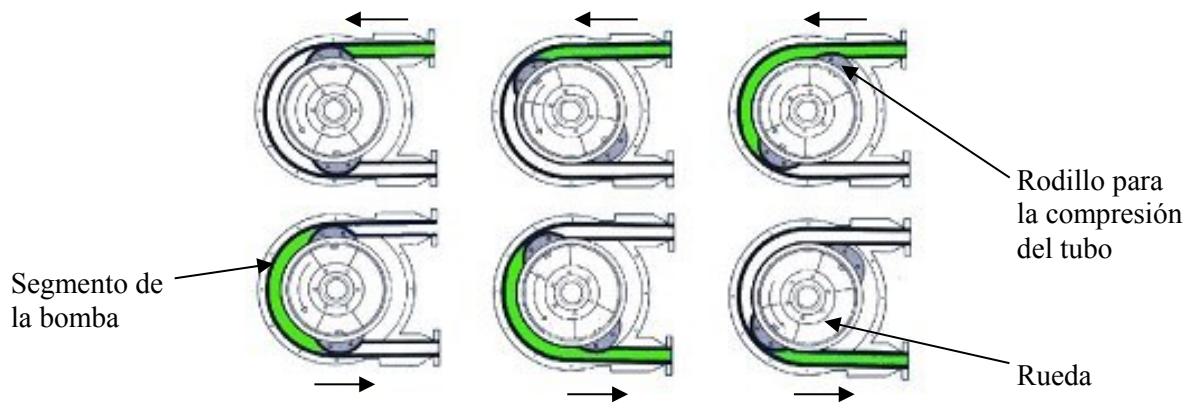
Figura 2.3: Diversos instrumentos empleados en las operaciones de liposucción

2.2 Sistema de bombeo

2.2.1 Bombas hidráulicas de aplicación en la medicina

En medicina las bombas hidráulicas son empleadas en multitud de campos. Debido a las diferentes áreas de uso y sus consecuentes necesidades asociadas en cada caso se utilizan diversos tipos de bombas.

En la siguiente figura se representa el funcionamiento de las bombas peristálticas.



2.2.2 Bombas peristálticas

Una bomba peristáltica es un tipo de bomba hidráulica de desplazamiento positivo usada para bombear una gran variedad de fluidos. Las bombas peristálticas basan su funcionamiento en el principio peristáltico que le otorga el nombre. [2]

En las bombas peristálticas los rodillos situados sobre una rueda o rotor presionan un tubo flexible por cuyo interior circula el fluido haciéndolo así avanzar. El tubo flexible está empotrado dentro de una cubierta circular de la bomba y es denominado segmento de la bomba. Un rotor con un número determinado de 'rodillos' o 'zapatas' unidos a la circunferencia de la rueda externa comprimen el segmento de la bomba. Al girar el rotor, la parte del tubo bajo compresión se cierra (o se ocluye) forzando, de esta manera, el fluido a ser bombeado para moverse a través del tubo. Adicionalmente, mientras el tubo se vuelve a abrir a su estado natural después del paso del rodillo ('restitución'), se crea una presión negativa con la que el líquido es aspirado.

Figura 2.4: Principio peristáltico de una bomba

Por lo general en las aplicaciones médicas es frecuente el empleo de silicona como material del segmento de la bomba. La silicona es un material flexible que permite, gracias a su flexibilidad, la rápida recuperación de la forma original del tubo tras ser comprimido por los rodillos. En las bombas que trabajan con fluidos a más alta presión es necesario el empleo de un material más resistente.

Los dos requisitos importantes, que son por regla general exigidos a una bomba, son la presión de entrega y el caudal. El caudal es proporcional a la velocidad de rotación del rotor, además de ser también dependiente de la elasticidad y dimensión del segmento. El diámetro interior determina la cantidad de fluido que es transportada con cada revolución del rotor mientras que el espesor de pared del tubo influye en la capacidad que tiene el tubo para recuperar su forma original tras la compresión. Esto tiene un gran impacto en la vida útil de la manguera. [3]

La presión de entrega depende de la potencia del motor y de las propiedades características de la manguera, que tiene que proporcionar una correcta oclusión cuando es comprimida por los rodillos evitando el paso de fluido.

Las bombas peristálticas tienen la característica de que el caudal es independiente de la presión.

A continuación se nombran algunas de las ventajas y desventajas que se pueden encontrar en las bombas peristálticas.

Una ventaja significativa de dichas bombas es su capacidad de autocebado, evitando válvulas o sistemas de sellado, el contraflujo es impedido mediante la correcta compresión de los rodillos sobre las paredes del tubo.

Otra ventaja de las bombas peristálticas es la diversidad de fluidos con que pueden trabajar, tanto líquidos como gases o incluso mezclas de ambos pueden circular a través del tubo, siendo necesario en cada caso un tubo de un material adecuado.

Particularmente para su uso en la medicina es significativamente ventajoso que el fluido solo esté en contacto con las paredes interiores del tubo, de esta manera la esterilización se reduce a esa zona resultando más sencilla y económica. La bomba no sufre corrosión al no estar en contacto con el fluido circulante.

El reemplazo de la manguera es muy sencillo y los costes de mantenimiento son bajos.

Por contra, la desventaja que podemos encontrar en este tipo de bombas es el carácter pulsátil del caudal. El volumen de fluido albergado entre dos rodillos avanza al girar el rotor, de manera que a la salida el caudal no es continuo sino que puede observarse una pulsación. Esta pulsación es menor cuanto mayor es el número de rodillos. Esta pulsación no resulta un inconveniente para la mayoría de casos, sobre todo en bombas que precisan de un alto número de revoluciones del rotor. La vida de la manguera también es una variable dependiente de las propiedades del material del tubo y el funcionamiento de la bomba, por lo general esto puede resultar desventajoso sobre todo cuando se requiere una elevada velocidad de rotación. En la mayoría de aplicaciones médicas, por razones higiénicas, es necesario el uso de un nuevo tubo para cada paciente, lo que conlleva un menor tiempo de utilización de cada tubo.

2.3. Pérdida de carga

La pérdida de carga (o pérdida de presión) en tuberías, es la pérdida de presión en un fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las conduce.

El fluido al circular por el tubo flexible y a través de los dispositivos instalados en el sistema de tubos, sufre unas pérdidas de presión que tienen que ser tenidas en cuenta en el cálculo de los componentes. (Se encuentra una explicación más detallada en el *Anexo 1. Pérdida de carga.*)

3. Prototipo experimental

Para la realización de los experimentos y mediciones que permiten el desarrollo de la bomba peristáltica de alta presión es necesaria la construcción previa de un prototipo. Dicho prototipo se compone de dos partes, el montaje experimental formado por la estructura y soporte de la bomba junto con los aparatos auxiliares externos necesarios y el sistema de tubos formado por uno o varios tubos conductores junto con los correspondientes componentes que requiere el sistema para su correcto funcionamiento como conectores, válvulas o boquillas.

3.1. Construcción del montaje experimental

Para la realización de este proyecto final de carrera es necesaria la creación de un montaje experimental, el cual sigue el mismo principio peristáltico que las bombas hidráulicas fabricadas hasta el momento por la empresa W.O.M. No es viable sin embargo la utilización para los experimentos de uno de los ejemplares ya comercializados puesto que éstos trabajan con presiones máximas de en torno a 1 bar.

El objetivo fijado de producir un chorro de agua a 30 bares supone por tanto un gran reto, no sólo en la fabricación de la bomba en sí misma sino también en la elección de un correcto tubo y adecuados conectores que resistan estas elevadas presiones.

En primer lugar se realiza un diseño esquemático de la bomba peristáltica que se pretende construir con el fin de aclarar los componentes necesarios a calcular. Teniendo en cuenta los parámetros que se quieren controlar y la influencia que tienen sobre ellos los distintos componentes de la estructura.

La bomba peristáltica se compone de una rueda o rotor conectada a un motor el cual le transmite la potencia necesaria para girar. Se eligen varias ruedas de igual tamaño en las que se disponen un distinto número de rodillos con el fin de analizar la influencia de ese factor. El tamaño y forma de la rueda se ha elegido el considerado más adecuado de entre las ruedas disponibles fabricadas para anteriores proyectos.

Los rodillos dispuestos en la rueda son los encargados de presionar el tubo. Sobre dichos rodillos se coloca el tubo flexible rodeando la rueda. Éste queda sujeto por los extremos gracias a dos anillos que sirven de tope evitando así que el tubo se desplace al entrar la bomba en funcionamiento. La parte del tubo que queda entre los dos anillos se denomina segmento de la bomba y será donde tenga lugar el principio peristáltico. El diámetro de la rueda con relevancia para este proyecto es el de la circunferencia exterior formada por los rodillos. Dicho diámetro es de 55 mm.

La rueda está diseñada de forma que sea fácilmente extraíble para llevar a cabo de forma rápida los experimentos con las distintas ruedas.

La rueda está accionada por un motor, el cual se sitúa en la parte posterior de la bomba. Dicho motor está suministrado por una fuente de alimentación como se muestra en la figura 3.1. El motor elegido es de corriente continua, modelo GR 63x55 fabricado por Dunkermotoren. No dispone de control automático de la velocidad de rotación por tanto la velocidad de la rueda será controlada a partir de la tensión de la fuente de alimentación externa.

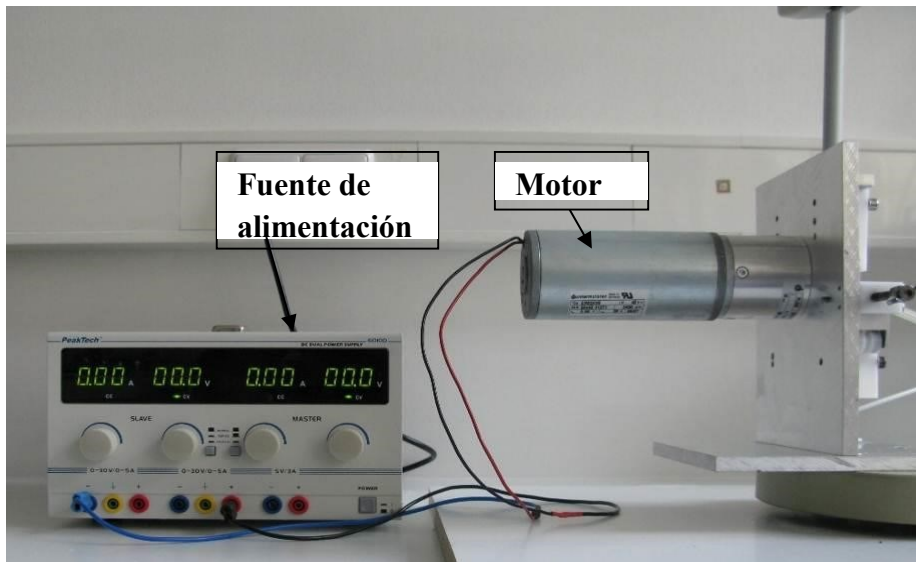


Figura 3.1: Motor conectado a la fuente de alimentación externa

El montaje experimental se ha diseñado con partes móviles que permiten la variación de parámetros como la tensión del tubo para poder estudiar las medidas más adecuadas del segmento, y su posible influencia sobre el caudal y presión obtenidos.

La siguiente figura muestra la parte frontal del primer prototipo de bomba desarrollado con el que se llevan a cabo los experimentos.

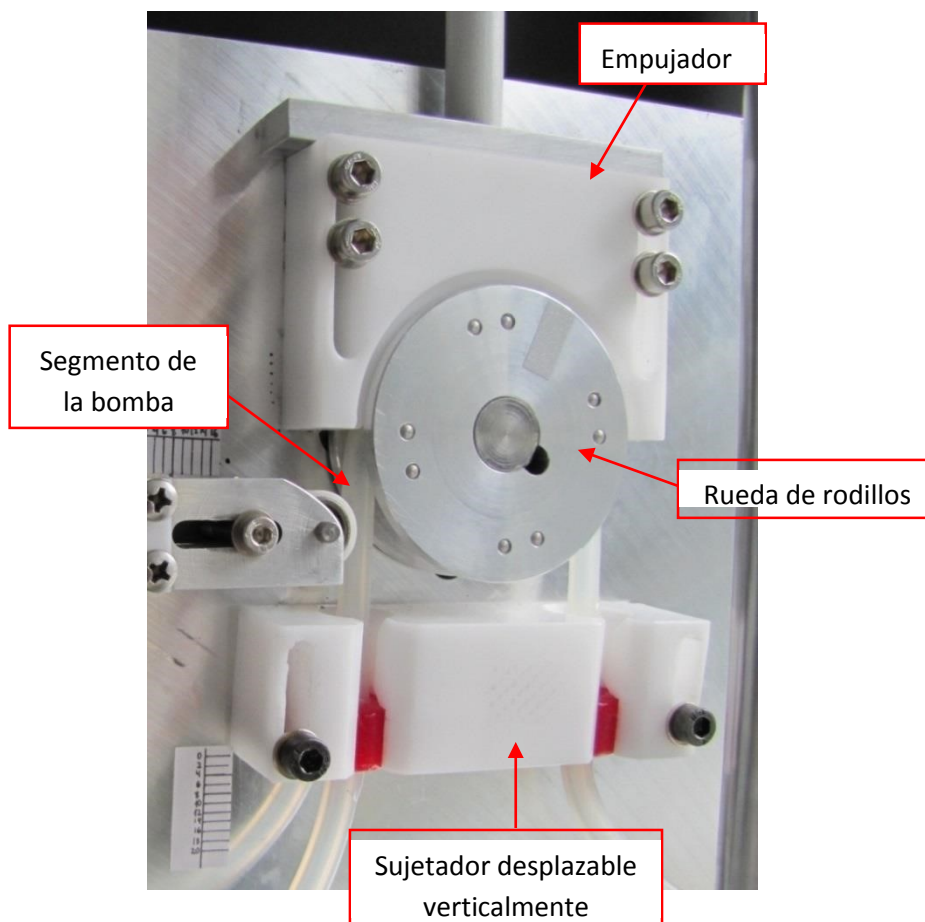


Figura 3.2: Prototipo experimental de la bomba

En dicho prototipo se observa la rueda de rodillos, el segmento de la bomba delimitado por los dos anillos de color rojo, las partes móviles, tanto lateral como inferior, que permiten la variación de la tensión de la manguera y el empujador.

El empujador es un nuevo elemento necesario en la bomba a diseñar que no se veía hasta el momento en las bombas desarrolladas por W.O.M.. A continuación se explica la necesidad de emplear dicho elemento mostrando las diferencias de la nueva bomba en comparación con las existentes.

Como se ha nombrado anteriormente las bombas peristálticas que la empresa ha desarrollado encuentran su aplicación en operaciones como la artroscopia las cuales requieren presiones máximas de tan sólo 1 bar, siendo la presión de trabajo habitual de unos 0,05 bares. En este tipo de bombas no es necesario el uso de un mecanismo exterior que presione el tubo contra los rodillos puesto que la propia tensión ejercida en el segmento al colocarlo entre los dos toques le sirve a los rodillos como resistencia para comprimir el tubo a su paso y llevar a cabo el principio peristáltico.

El sistema de tubos de estas bombas tiene dos partes diferenciadas, el segmento y el resto del tubo.

El segmento de la bomba está bajo rozamiento constante con los rodillos y debe ser de un material especial cuyas propiedades permitan la compresión y sucesiva recuperación de forma del tubo flexible. Por contra el resto del tubo tiene como misión tan sólo la conducción del fluido hasta su salida, por tanto se puede emplear un material más económico ya que no se precisan esas características.

En el caso de la bomba peristáltica de alta presión a desarrollar en este proyecto final de carrera se requiere especial atención al sistema de tubos debido a que la presión del sistema es 30 veces mayor. Por tanto será necesario un material en todo el tubo que resista esta alta presión. También habrá que elegir los conectores adecuados impidiendo posibles fugas de agua. Por último hay que destacar la gran fricción que se produce en la superficie del segmento de la bomba con los rodillos, incrementada por la presión del empujador. Siendo también mayor la velocidad de rotación que puede llegar a las 1000 rpm.

Con todo ello se decide un sistema de tubos formado por un solo tipo de tubo del mismo material y diámetro, evitando así uniones por las que puedan aparecer fugas de agua. El empujador está conectado a un dinamómetro cuyo movimiento vertical está controlado a través de un tornillo sin fin. De esta manera la fuerza a ejercer por los rodillos sobre el tubo puede ser regulada y medida. El valor de la fuerza ejercida se muestra en una pequeña pantalla.

El dinamómetro junto con la estructura de la bomba están instalados sobre un soporte que da estabilidad al montaje.

3.2. Sistema de tubos flexibles

El sistema de tubos empleado en las pruebas experimentales se muestra esquemáticamente en el siguiente diagrama. (Figura 3.3).

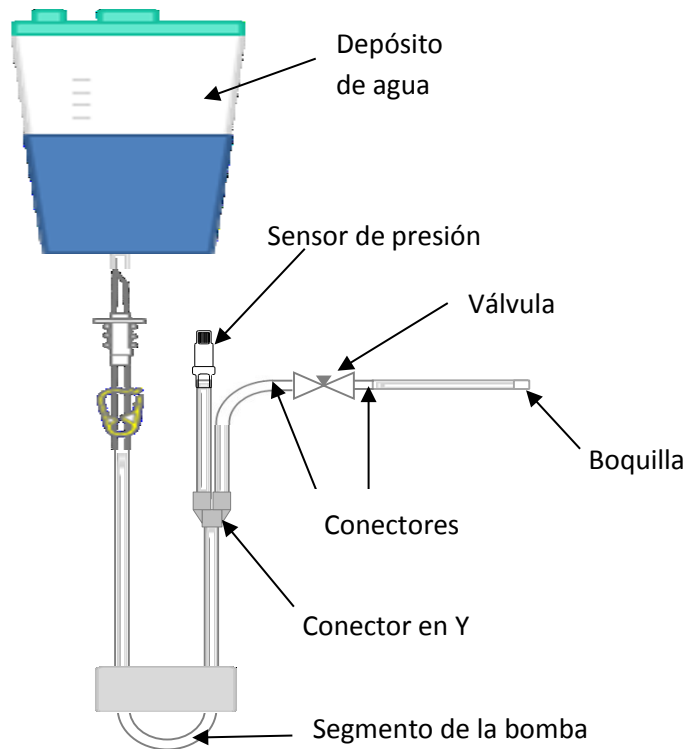


Figura 3.3: Diagrama del sistema de tubos

El sistema de tubos está constituido por un tubo flexible. Tras la sección de tubo que actúa de segmento de la bomba se inserta un conector en Y que bifurca la salida en dos. De esta forma se puede tomar una de las bifurcaciones para medir la presión a la que se encuentra el fluido a la salida. El tubo flexible de una de dichas salidas es conectado a un sensor de presión, que a través de la instalación adecuada monitoriza la información en la pantalla del ordenador en forma de gráfica presión-tiempo. La otra salida actúa de conducto del fluido al exterior en forma de chorro de agua. En este trozo de tubo puede ser instalada una válvula que permite regular el caudal de salida en caso de así desearlo. La desventaja de la válvula empleada es que carece de escala indicadora de la apertura de salida en cada momento, desconociendo el diámetro de paso que está permitiendo.

En los experimentos donde se fija un diámetro de salida determinado, se sustituye la válvula por una boquilla conectada de forma hermética al final del tubo. La boquilla tiene un diámetro de 0,2 mm, una longitud de 6 mm y está fabricada en metal.

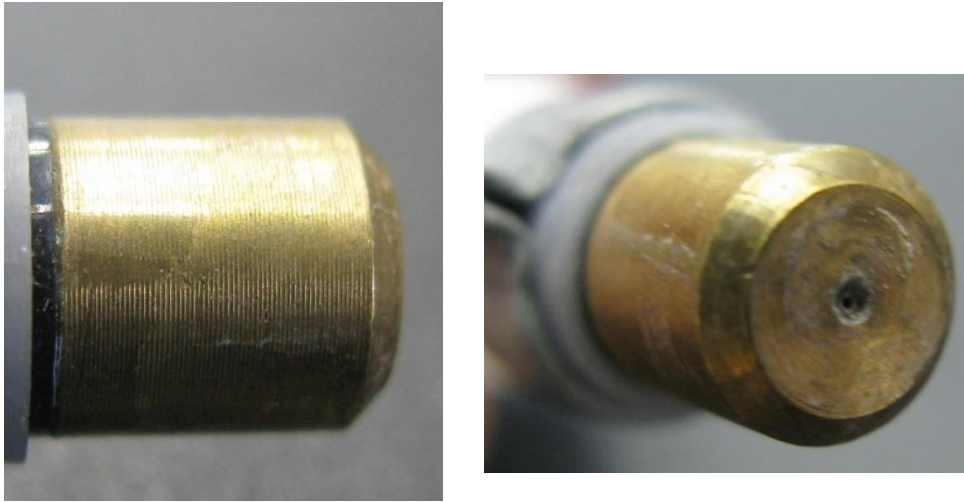


Figura 3.4: Boquilla de 6 mm de longitud y 0,2 mm de diámetro interior

En las operaciones de liposucción realizadas en la actualidad se emplean instrumentos médicos. (Más información en el *Anexo 2. Instrumentos médicos empleados en operaciones de liposucción.*)

4. Medición de los parámetros a controlar

Para poder caracterizar la bomba que se está desarrollando y comprobar en qué medida se cumplen las condiciones establecidas, es necesario controlar y analizar los parámetros relevantes. Los parámetros principales a considerar son el comportamiento de la presión y del caudal en función de la velocidad de rotación.

Para llevar a cabo los experimentos se dispone de un laboratorio habilitado en el área de investigación y desarrollo de la empresa W.O.M.

Las mediciones son en todo experimento llevadas a cabo con agua. El agua es bombeada desde un recipiente conectado a la red de suministro, utilizada en cada medición a través del sistema de tubos del prototipo de bomba y recogida a su salida en otro recipiente conectado mediante una válvula a la red de aguas residuales. La estación de medición está equipada con un ordenador. Mediante una placa de conexiones los datos leídos por los sensores pueden ser enviados al ordenador y con la ayuda del programa LabVIEW interpretados y almacenados, dando como resultado gráficas tanto de presión como de caudal en función del tiempo.

Esta estación dispone a su vez de un sensor de presión, y de un anemómetro, aunque este último no será empleado debido a su falta de precisión tal y como se explica en el anexo 3.

Para la medición de la velocidad de rotación se emplea un tacómetro.

Los sistemas de medición empleados son explicados con detalle en el Anexo 3. (*Medición de los parámetros a controlar.*)

5. Análisis experimental

En el análisis experimental se investiga y estudia los parámetros referentes a la bomba peristáltica que se consideran de mayor influencia. Es necesario tener siempre presente las dos variables a controlar: *presión* y *caudal*.

Para este análisis se varían los distintos componentes de la bomba prototipo construida, incluyendo aquí tanto modificaciones de determinados elementos de la estructura como del sistema de tubos empleado.

Para un exitoso estudio es necesario en primer lugar el cálculo teórico del prototipo con el fin de construir un ejemplar válido que permita llevar a cabo los experimentos. En el análisis experimental se incluye por tanto el cálculo para la construcción de la bomba prototipo de laboratorio así como los posteriores experimentos y mejoras realizadas a partir de la observación de los resultados obtenidos.

Para comenzar los experimentos es necesario conocer el valor adecuado de fuerza a ejercer por el empujador en cada caso, es decir la distancia que resultará entre el empujador y el rodillo. Según el tipo de tubo bastará con una fuerza u otra, ejercer una fuerza insuficiente lleva consigo el mal aislamiento del tubo al ser presionado por los rodillos sin embargo ejercer un exceso de fuerza conlleva a un aumento de la fricción lo que reduce la vida útil del tubo. (El estudio queda detallado en el *Anexo 4. Cálculo de la distancia necesaria entre empujador y rodillo.*)

5.1. Selección de la rueda de rodillos

La rueda es un elemento fundamental en el funcionamiento de la bomba, juega un papel esencial en el principio peristáltico ya que es la portadora de los rodillos que realizan dicha función. Además el diámetro de la rueda, junto con el diámetro interior del tubo y la velocidad de giro del rotor, influyen sobre el caudal a obtener a la salida de la bomba. Por todo ello es importante una correcta elección de la rueda a emplear así como de sus rodillos.

Como queda reflejado en el apartado 3.1 Construcción del montaje experimental, la rueda elegida para el prototipo tiene un diámetro interior de 55 mm. Es importante recordar que este valor denominado como diámetro interior de la rueda es en realidad el diámetro de la circunferencia formada por los rodillos.

Las ruedas están fabricadas en aluminio y conectadas a través de un eje al motor con el que giran solidariamente.

A lo largo de este capítulo se pretende analizar la influencia del número de rodillos que se disponen en la rueda sobre los dos parámetros de estudio considerados importantes.

También se analiza si la forma y tamaño de dichos rodillos puede resultar influyente.

Dichos parámetros son presión y caudal.

Para el estudio se llevan a cabo una serie de experimentos que determinarán a su vez si dicha influencia es dependiente del material y diámetro del tubo utilizado en el experimento o por el contrario el resultado varía de la misma forma con los cuatro tubos elegidos.

5.1.1. Número de rodillos

En la rueda o rotor se disponen los rodillos que van a presionar el tubo llevando a cabo el principio peristáltico en que se basa la bomba hidráulica a desarrollar.

Los rodillos empleados están fabricados en polioximetileno (o su abreviatura POM), tienen una forma cilíndrica y una longitud de 14 mm.

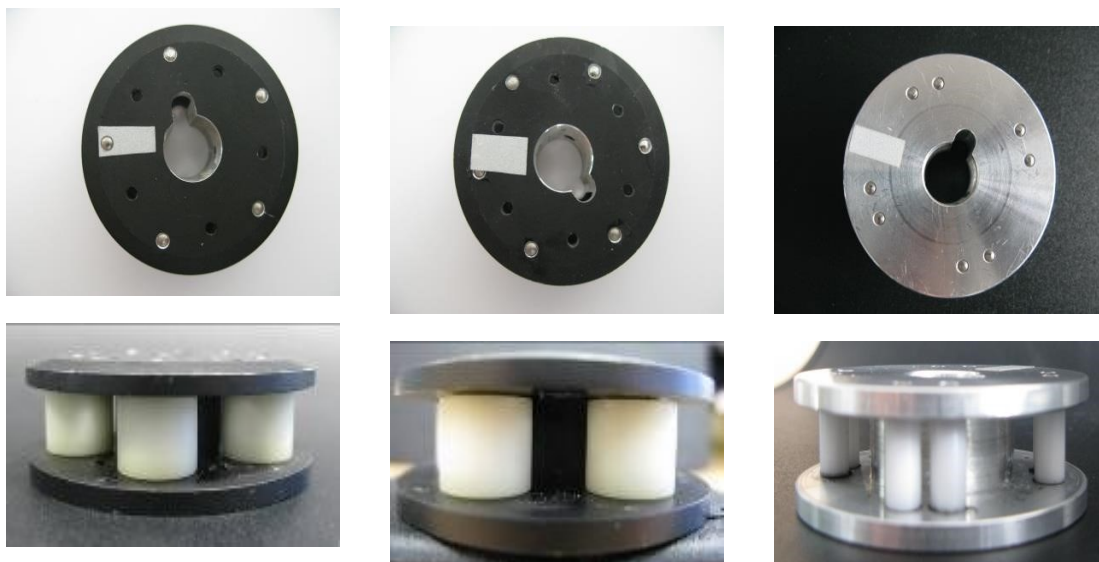
El número de rodillos que posee la rueda no es fijo, por tanto este es un parámetro a analizar en el proyecto de fin de carrera.

Para el estudio de la influencia del número de rodillos sobre la presión y el caudal se ensayan tres ruedas con diferente número de rodillos.

Para la elección del número de rodillos es importante tener en cuenta que los rodillos en ningún momento dejen de presionar el tubo en al menos un punto. Esto es necesario ya que si en algún momento los cilindros dejasen de presionar el conducto el líquido podría retroceder. El sentido de rotación del motor determina la dirección del flujo del contenido.

La bomba peristáltica ideal debería tener un diámetro infinito del cabezal y el mayor diámetro posible de los rodillos. Esta bomba peristáltica ideal tendría una vida útil ilimitada del tubo y proporcionaría un flujo constante y libre de pulsaciones.

Basándonos en esto se eligen como ruedas en el estudio las mostradas en la figura 5.1.



5 Rodillos

6 Rodillos

4 Rodillos dobles

Figura 5.1: Rueda con 5 rodillos y 6 rodillos de diámetro 14,7 mm y rueda con 4 dobles rodillos de diámetro 6 mm

La primera rueda tiene 5 rodillos, la segunda tiene 6 rodillos y por último en la tercera se han dispuesto 8 rodillos que a efectos prácticos actúan como 4 rodillos dobles. Tanto la rueda con 5 como 6 rodillos tienen rodillos de un diámetro de 14,7 mm (denominado $D=14,7\text{mm}$). En el caso de la última rueda, al disponer de un mayor número de rodillos, el diámetro es tan sólo de 6 mm (denominado $D=6\text{mm}$).

Como objetivo en este apartado se pretende en primer lugar obtener una visión general del comportamiento de cada rueda observando la influencia del número de rodillos. A continuación se estudia si dicho comportamiento tiene dependencia del material y del diámetro del tubo. Como resultado final se pretende elegir, a partir de la información

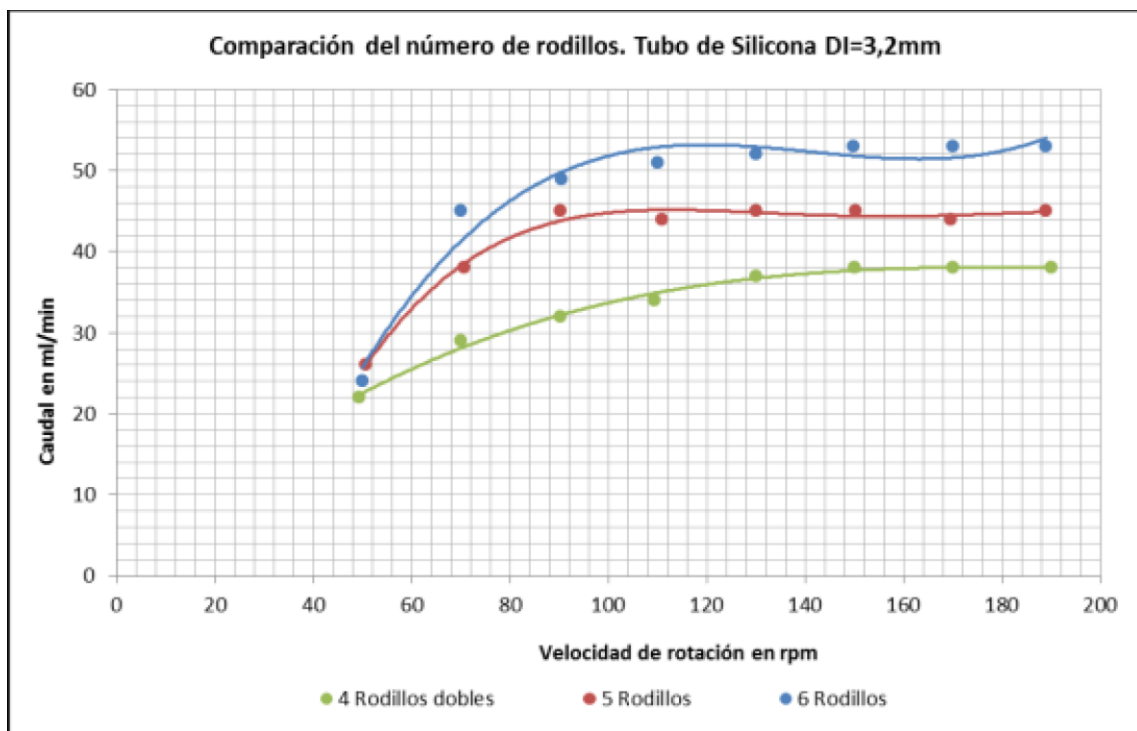
obtenida, el número de rodillos a instalar en la rueda final con el que se obtengan resultados de caudal y presión más cercanos a los fijados como objetivo.

Para la realización de la primera prueba se elige como sistema de tubos el primero, un tubo de Silicona con un diámetro interior de 3,2 mm y un espesor de pared de 1,6 mm. En el montaje del sistema de tubos se dispone de una válvula que permite regular la apertura de salida del tubo. En el diseño final la apertura permanecerá constante y puesto que no se dispone de válvulas con precisión suficiente para trabajar con diámetros del orden de décimas de milímetro se ha optado desde un primer experimento en mantener constante la apertura de la válvula, actuando así como una boquilla encargada de reducir el diámetro de la apertura de salida del conducto.

La velocidad de rotación es regulada mediante la variación de la tensión de la fuente externa de alimentación del motor. Los valores de presión y caudal han sido anotados para diferentes valores de la velocidad de rotación.

El experimento se lleva a cabo tres veces, cada vez con una rueda con un número de rodillos distinto e igual sistema de tubos.

Los resultados quedan reflejados en las siguientes gráficas.



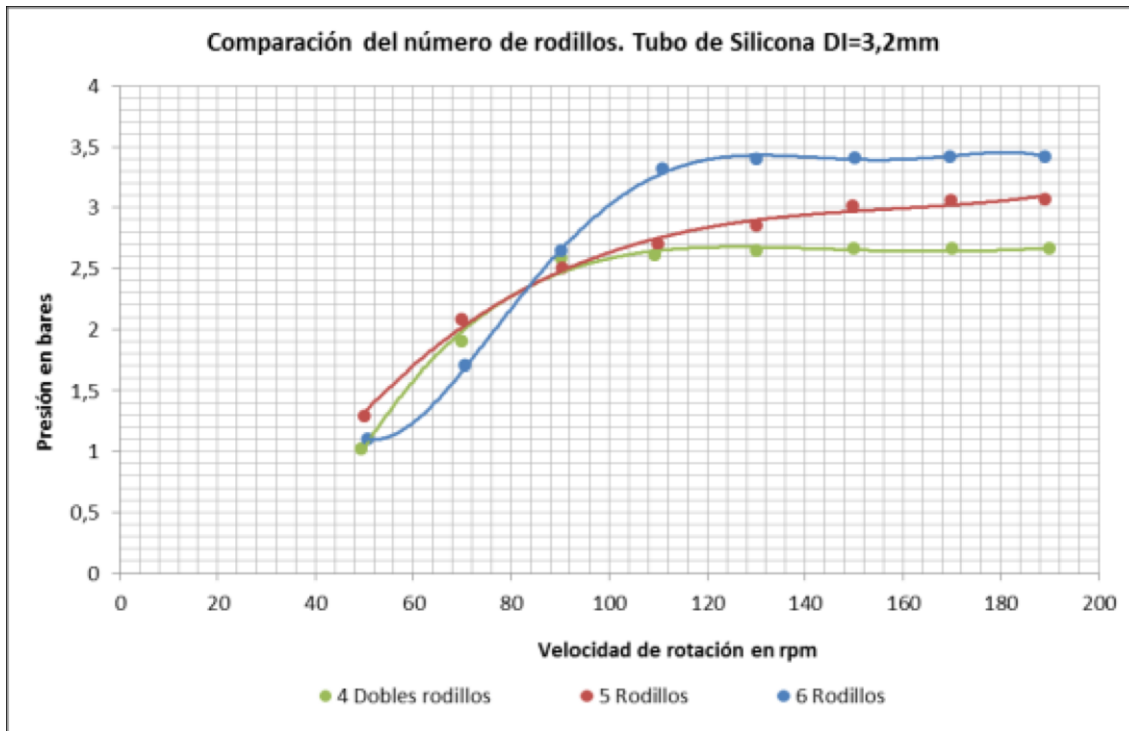


Figura 5.2: Comparación del número de rodillos utilizando un tubo de Silicona con un diámetro interior de 3,2 mm

Se muestran las curvas de caudal/velocidad de rotación y las curvas de presión/velocidad de rotación de los tres ensayos. Se observa que en todas ellas, según lo esperado basándonos en la teoría, la presión actúa en función del caudal de salida. La presión aumenta al aumentar el volumen de fluido retenido a la salida en la boquilla debido a la reducción de sección del conducto.

Comparando las tres curvas se aprecia un resultado ligeramente más elevado, tanto de caudal como por consiguiente de presión, en la rueda con 6 rodillos. Obteniéndose valores máximos de caudal de 52 ml/min y apenas una presión de 3,4 bares. Ambos alejados de los valores objetivo establecidos de 100 ml/min y 20-30 bares.

Por contra los resultados obtenidos con la rueda que dispone de 4 rodillos dobles son los más bajos. Siendo la presión máxima de tan sólo 2,5 bares con un caudal de 38 ml/min. Las tres curvas muestran una tendencia positiva de caudal y presión hasta aproximadamente 100 rpm, valor a partir del cual se mantienen constantes los valores de ambos parámetros.

La razón puede explicarse mediante la siguiente conjetura. Cuando la rueda alcanza velocidades de giro elevadas, el tiempo entre rodillos del que dispone el tubo para recuperar su forma inicial no es suficiente, por tanto, al no recuperar el diámetro de abertura inicial, el volumen de flujo efectivo disminuye impidiendo que el caudal de salida y por tanto la presión sigan aumentando. La presión y el flujo se mantienen constantes. La velocidad de recuperación del tubo depende del material y del espesor de la pared.

La Silicona es un material blando y el espesor de pared es de sólo 1,6 mm por tanto las paredes del tubo no tienen fuerza suficiente para recuperar la forma en tan corto periodo de tiempo.

5.1.2. Tamaño de los rodillos

Para resolver el problema mencionado en el apartado anterior se sustituyen los rodillos por unos de menor diámetro, de esta forma el tiempo entre rodillos queda aumentado ya que la superficie de estos es menor.

Los rodillos con un diámetro de 14,7 mm quedan sustituidos por los que se muestran en la figura 5.4, donde las tres ruedas tienen ahora rodillos cilíndricos con un diámetro de 6 mm.



5 Rodillos

6 Rodillos

4 Rodillos dobles

Figura 5.3: Ruedas con rodillos cilíndricos con un diámetro de 6 mm

A continuación, empleando las ruedas con los nuevos rodillos de menor diámetro, se estudia la influencia del material del tubo. Para ello se realiza de nuevo el experimento con un tubo de diferente material. Con ello se pretende comparar ambos resultados y analizar si cada rueda tiene el mismo comportamiento en ambos independientemente del material del tubo empleado. (Para más detalle sobre la influencia del tamaño de los rodillos sobre el caudal y presión ver el *Anexo 5. Tamaño de los rodillos.*)

Se ha mencionado que la Silicona es un material blando y por ello las paredes no tienen fuerza suficiente para recuperar la forma en un tiempo breve. Puesto que es necesario seguir aumentando la velocidad de rotación para aumentar el caudal y con ello la presión, se elige ensayar un tubo de un material más duro.

El siguiente experimento se lleva a cabo con un tubo de Tygon que tiene un diámetro interior de 3,2 mm y un espesor de pared de 1,6 mm al igual que el tubo de Silicona. Se trata de modificar sólo el material, dejando las dimensiones de tubo iguales para que sea posible la posterior comparación de resultados.

El experimento se realiza 3 veces, cada vez con una rueda con un número distinto de rodillos (4 rodillos dobles, 5 rodillos y 6 rodillos). Se anotan los valores de presión y caudal al ir aumentando la velocidad de rotación de la rueda. La regulación de la velocidad de rotación se realiza mediante la variación de la tensión de la fuente de alimentación que alimenta el motor.

En este montaje se sustituye la válvula de salida que actuaba durante el experimento con un diámetro de abertura fijo por una boquilla cuyo diámetro interior es fijo y de valor 0,2 mm.

Los comportamientos de caudal y presión en las tres mediciones son los que se muestran a continuación en la figura 5.4.

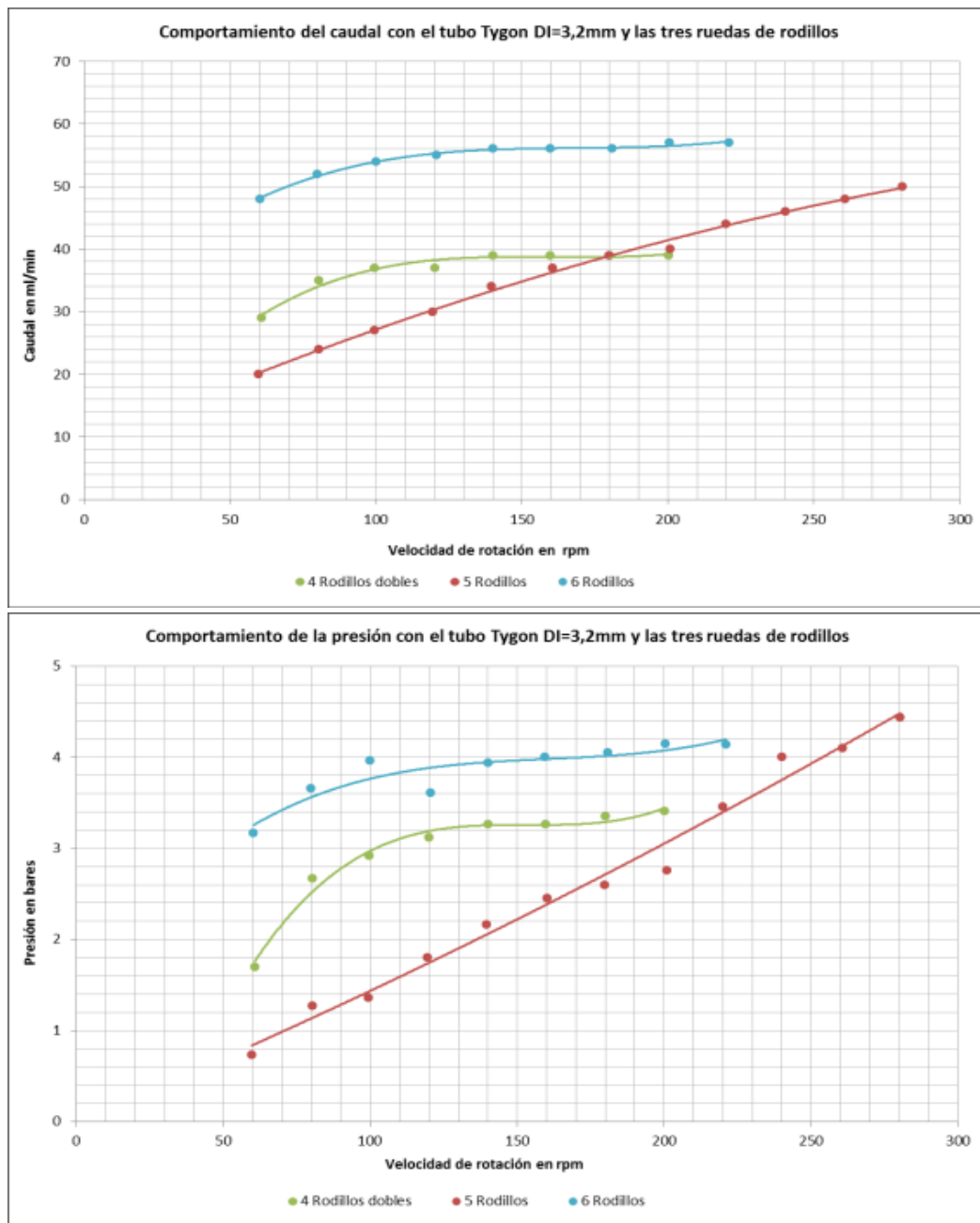


Figura 5.4: Comparación del número de rodillos utilizando un tubo de Tygon con un diámetro interior de 3,2 mm

Los resultados de la curva perteneciente al experimento realizado con la rueda con 4 rodillos dobles y un tubo de Tygon DI=3,2mm muestran una tendencia similar al experimento con el tubo de Silicona. En este caso el único parámetro modificado es el material del tubo. Al sustituir la Silicona por un material más duro como es el Tygon se observa que los valores tanto de caudal como de presión son más elevados, lo cual confirma la conjetura descrita anteriormente sobre la velocidad de recuperación de

forma del tubo. Al emplear un material más duro las paredes del tubo tienen mayor fuerza y son capaces de recuperar mejor la forma en el mismo tiempo.

Por tanto comparando valores a igual velocidad de rotación, en el experimento con Tygon la recuperación de la abertura del tubo es más rápida permitiendo el paso de un mayor volumen de fluido y así caudales y presiones mayores. A pesar de mejorar tanto presión como caudal permanecen constantes a partir de una cierta velocidad de rotación.

Si comparamos las curvas pertenecientes a las ruedas con 5 y 6 rodillos hay que tener en cuenta que no sólo se emplea un material de tubo distinto sino también unos rodillos de menor diámetro que los empleados en las gráficas de la figura 5.2.

Las curvas de caudal y presión obtenidas con la rueda con 6 rodillos muestran una tendencia similar con ambos materiales de tubo, Silicona y Tygon. Los valores son de nuevo ligeramente mayores por lo que se podría concluir que con el uso de un tubo de un material más duro se obtienen mejores resultados debido a que la fuerza de las paredes del tubo para la recuperación de forma es mayor. A pesar de ello a partir de una determinada velocidad de rotación se mantienen los valores constantes, esto significa que la rueda gira demasiado deprisa no dando tiempo al tubo a recuperar su abertura.

La curva obtenida del experimento con la rueda con 5 rodillos muestra un comportamiento diferente al utilizar Tygon en vez de Silicona. En el caso de la Silicona no tenían las paredes del tubo fuerza suficiente para recuperar la forma a partir de unas 100 revoluciones por minuto. Sin embargo al emplear Tygon este problema ya no aparece siendo la tendencia del caudal y por consiguiente de la presión positiva en todo momento. De esta forma se llega a una presión de 4,4 bares con un caudal de 50 ml/min.

(Se analiza una posible mejora a través de la modificación de la forma de los rodillos, el estudio está explicado en el *Anexo 6. Forma del rodillo.*)

Las conclusiones obtenidas tras este segundo experimento son las siguientes: - El empleo de rodillos de menor diámetro ($D=6\text{mm}$) permite un mayor tiempo de recuperación de forma del tubo obteniéndose así mejores resultados. - Se confirma que empleando un tubo de un material más duro la velocidad de recuperación de forma del tubo aumenta y se obtienen resultados de caudal y presión más elevados. - Se demuestra que el número de rodillos tiene una influencia dependiente del material del tubo. Como se ha observado el comportamiento en los experimentos realizados con la rueda con 5 rodillos es diferente utilizando un material u otro del tubo. Por tanto no se puede obtener una conclusión referente a qué número de rodillos es más adecuado para el diseño puesto que varía al emplear diferentes materiales. Será necesario seguir probando las tres ruedas con cada material y diámetro de tubo para llegar a una conclusión fiable. Si bien 5 rodillos y Tygon es la combinación más productiva.

5.2. Desarrollo del sistema de tubos

El tubo flexible juega un papel esencial en el funcionamiento de la bomba peristáltica. Hasta el momento el desarrollo de este proyecto ha estado centrado en analizar diferentes tipos de ruedas de rodillos aunque para ello haya sido necesario ayudarse también de un sistema de tubos.

A continuación se lleva a cabo un estudio más exhaustivo de los posibles tubos a utilizar. Los experimentos ya realizados han aportado una idea general del comportamiento de cada tubo de diferente material y diámetro, en el estudio más detallado se pretende justificar el descarte o la elección de cada material de acuerdo a su comportamiento de trabajo. Del mismo se analiza el diámetro del tubo más adecuado de acuerdo a un compromiso entre el cumplimiento de los requisitos y la reducción en lo posible de los problemas que puedan aparecer como rozamiento o corta vida útil del tubo.

De acuerdo con los requisitos el tubo debe soportar una presión de aproximadamente 30 bares y a través de él fluir alrededor de 100 ml/min. Para lograr esto es necesaria una alta velocidad de rotación de la rueda que produce una fuerte fricción entre el tubo y los rodillos.

Este es un problema a tener siempre presente en el siguiente estudio. Se requiere un material que no sólo resista la alta presión sino también el rozamiento constante. Además el tubo debe tener una elasticidad apropiada para realizar de forma rápida el cierre y consiguiente abertura que hace avanzar el fluido mediante el principio peristáltico.

La importancia de la elasticidad queda reflejada y analizada en el *Anexo 4 Cálculo de la distancia necesaria entre empujador y rodillo*. Figura A 4.1.)

El objetivo de la investigación es encontrar un tubo que cumpla en la medida de lo posible los requisitos anteriores. Teniendo también en cuenta los demás componentes que forman el sistema de tubos como conectores.

En primer lugar se selecciona la longitud idónea del segmento de la bomba, a continuación se estudia el diámetro del tubo y por último su material.

5.2.1. Influencia del diámetro interior del tubo flexible

Continuando con los experimentos se lleva a cabo un tercero que pretende probar la dependencia del comportamiento del caudal y de la presión con el diámetro interior del tubo empleado.

Para ello se lleva a cabo un experimento similar a los dos anteriores realizados en el apartado 5.1.2. donde se anotan los valores de presión y caudal conforme se va aumentando la velocidad de rotación de la rueda. En este ensayo se elige el tubo de Tygon, ya que ha quedado demostrado que al ser un material más duro permite mejores resultados, con un diámetro interior de 2,4 mm y un espesor de pared de 1,6 mm. Se realiza el experimento tres veces, una con cada rueda con 4 rodillos dobles, 5 rodillos y 6 rodillos.

No se ven más modificaciones con respecto a la prueba anterior por lo que los rodillos siguen teniendo un diámetro de 6 mm y la boquilla empleada a la salida un diámetro de

0,2 mm y una longitud de 6 mm.

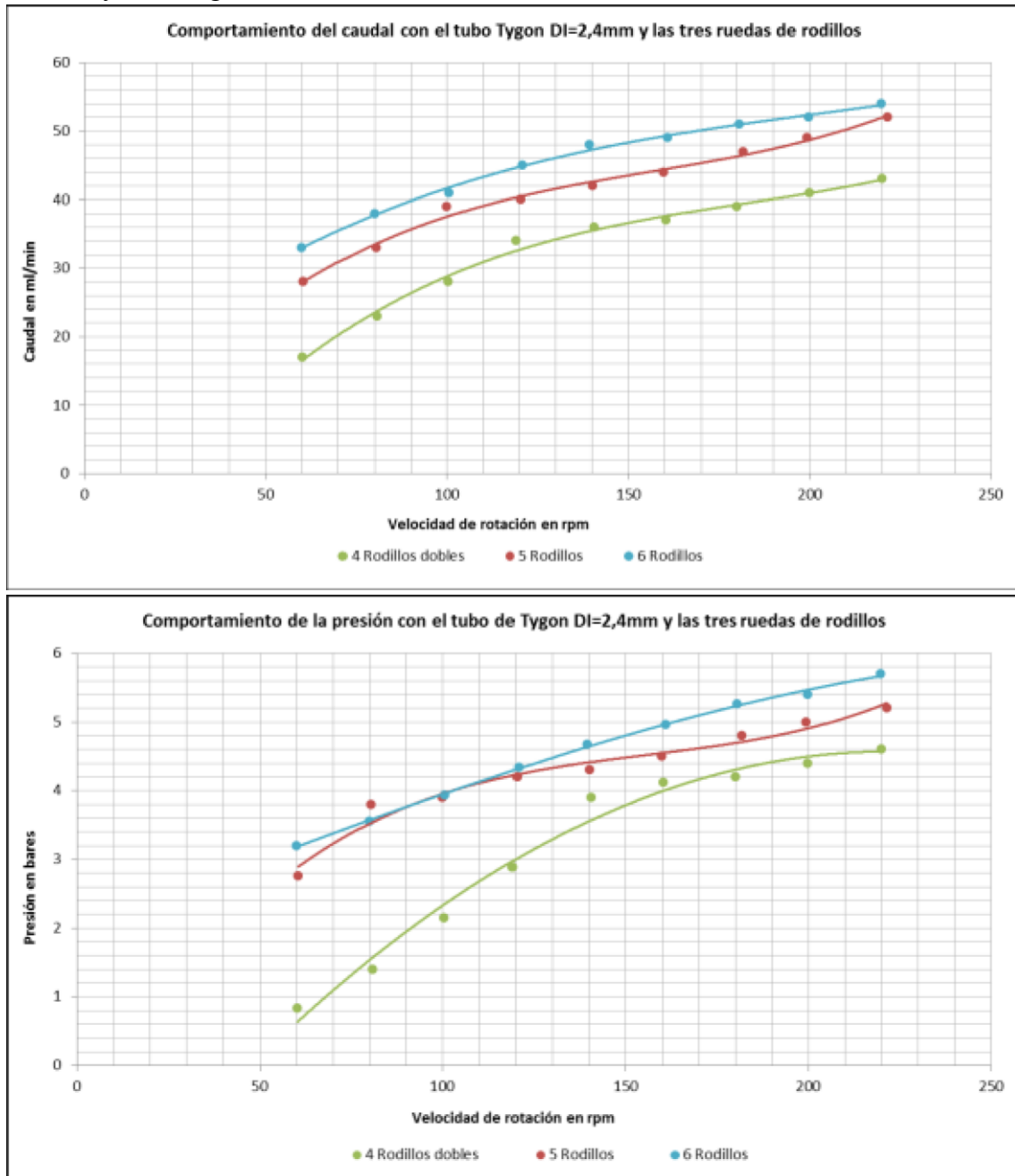


Figura 5.5: Comparación del número de rodillos utilizando un tubo de Tygon con un diámetro interior de 2,4 mm

De nuevo se verifica en las tres curvas que la presión es dependiente del caudal. En este caso la tendencia es siempre ascendente, el caudal no se mantiene constante a partir de una determinada velocidad de rotación. Esto significa que las paredes del tubo, al tener un espesor de pared del mismo grosor pero con diámetro interior menor, tienen más fuerza y son capaces de recuperar la forma del tubo en un tiempo menor.

Esta rápida recuperación permite la circulación del fluido con la abertura del tubo y su consiguiente avance al ser empujado por las paredes al cerrarse.

Comparando las curvas pertenecientes a las 3 ruedas no se aprecia una gran diferencia entre la rueda con 5 y 6 rodillos, obteniéndose con ellas valores ligeramente superiores

que con la rueda con 4 rodillos dobles. El caudal obtenido con la rueda con 6 rodillos es entorno a un 10 % superior que el obtenido con la rueda con 5 rodillos.

La rueda con 4 rodillos dobles no sólo obtiene resultados inferiores de caudal y presión sino que tiene una tendencia no tan ascendente a partir de 180 rpm, por tanto la rueda con 4 rodillos dobles queda descartada como óptima.

Como conclusión se afirma que el comportamiento varía con el diámetro interior del tubo, siendo mejor un diámetro interior menor que permita una más rápida recuperación de forma del tubo tras la oclusión. (Más experimentos que detallan la influencia del diámetro interior del tubo sobre el caudal y la presión, así como la comparación del caudal calculado teóricamente con el obtenido en los ensayos prácticos, se encuentran en el *Anexo 7. Influencia del diámetro del tubo flexible.*)

A pesar de no obtenerse una diferencia notable hay que destacar que en las tres mediciones con diferentes materiales y diámetros del tubo los mejores resultados siempre se han obtenido con la rueda con 6 rodillos.

5.2.2. Selección del material del tubo

Como se ha mencionado anteriormente el tubo desempeña un papel muy importante en el funcionamiento de la bomba, por ello es necesario elegir un material adecuado que permita la obtención de resultados favorables.

En este capítulo se detalla el proceso seguido para la selección de los materiales que se ensayan en los experimentos.

Una selección apropiada del material del tubo requiere un estudio previo de los materiales disponibles en el mercado. En dicha búsqueda se analizan las diferentes propiedades de los materiales hasta destacar tres que son considerados adecuados para dicho fin. Los materiales son Silicona, Norprene y Tygon.

A continuación son analizados detalladamente, poniéndolos a prueba y mostrando el comportamiento y resultados obtenidos.

Los materiales son puestos a prueba mediante los tubos elegidos, tres tubos con un diámetro interior de 3,2 mm, en los tres materiales (Silicona, Norprene y Tygon) y un último tubo de Tygon con un diámetro menor de 2,4 mm.

Silicona

En primer lugar se analiza el tubo de Silicona con diámetro 3,4 mm y espesor de pared 1,6 mm.

La Silicona o polidimetilsiloxano (PDMS) es un polímero sintético en el que los átomos de silicio están unidos a través de átomos de oxígeno, este polímero es inodoro e incoloro y está hecho principalmente de silicio. La silicona es inerte y estable a altas temperaturas, lo que la hace útil en gran variedad de aplicaciones industriales y en aplicaciones médicas y quirúrgicas [4].

La Silicona ha sido elegida como material a considerar para el tubo flexible debido a que es el material utilizado para la fabricación de los tubos empleados en las bombas que hasta el momento se han desarrollado W.O.M.. La diferencia entre la bomba que se pretende desarrollar y las bombas hasta el momento fabricadas en la presión de trabajo. Al ser la presión a alcanzar con la nueva bomba mucho mayor, se realiza una prueba

inicial que permita conocer el alcance máximo que puede soportar el tubo de silicona antes de romperse por un exceso de presión.

La prueba se realiza gracias a una bomba auxiliar que produce presiones muy elevadas. Al conectar el tubo a dicha bomba e impedir la salida del fluido al exterior se va aumentando la presión en el interior del tubo midiendo a su vez el valor que este soporta. Finalmente el tubo, llegando a una presión máxima de 7-8 bares, no puede soportar más presión por lo que aparecen grietas que dañan la manguera hasta que se rompe.

A pesar de ser un material que no es capaz de soportar las altas presiones que se pretende conseguir con la bomba peristáltica se considera en unos primeros experimentos donde no se trabajará con tan elevadas presiones. Se considera debido al fácil acceso de dicho material en la empresa así como a los posibles conectores o adhesivos que son idóneos para dicho material pudiendo no resultar efectivos con otros materiales.

La Silicona es un material blando con una dureza según la escala de Rockwell de 40 A.

Su elasticidad es adecuada para un rápido aplastamiento y consiguiente abertura del tubo, sin embargo puede resultar desfavorable ante la fricción con los rodillos lo cual puede acortar notablemente la duración de vida del tubo flexible. La figura muestra el tubo flexible de Silicona empleado en las mediciones.



Figura 5.6: Tubo de Silicona

Norprene

Norprene® es una formulación patentada derivada de Neopreno, EPDM y otros elastómeros diseñado para aplicaciones críticas en donde se requiere simultáneamente un tubo con alta resistencia mecánica, un comportamiento muy estable ante la abrasión, un elevado vacío y muy baja permeabilidad al gas.

Además es fabricado con una extensa variedad de medidas siendo apto para todo tipo de bombas peristálticas existentes en el sector.

Como permite ser autosoldable y autosellante es posible adaptar conectores en los extremos sellados [6].

El tubo de Norprene empleado es de color beis y tiene un diámetro interior de 3,2 mm y un espesor de pared de 1,6 mm. Su dureza según la escala Rockwell es de 50 A.

En el estudio previo de este material se ha medido el valor máximo de presión que es capaz de resistir. Para ello se ha realizado una prueba similar a la realizada con el tubo de Silicona. La presión máxima que resiste este tubo es de aproximadamente 7 bares. De nuevo nos encontramos con un material que no es capaz de cumplir con los requisitos de presión establecidos. A pesar de ello se elige como material a emplear en los primeros experimentos debido a su económico precio y a su sencillez de trabajo. Puesto que en los primeros experimentos no se alcanzarán presiones muy elevadas y sólo pretenden conseguir una visión general de los elementos más adecuados como número de rodillos, forma o diámetro idóneo del tubo, es suficiente con el empleo de materiales como el Norprene. En la figura se muestra el tubo de Norprene empleado en las mediciones.



Figura 5.7: Tubo de Norprene

Tygon

Tygon es el nombre que Saint-Gobain Corporation otorga a la familia de tubos flexibles consistentes en una variedad de materiales base. Tygon es un material empleado en ámbitos diversos como procesos médicos, químicos, industriales, alimentarios o farmacéuticos. Hay multitud de productos, principalmente tubos, fabricados con este material. Su resistencia química y sus propiedades físicas varían entre las diferentes formulaciones pero en general es considerado resistente ante cualquier ataque químico y su biocompatibilidad lo hace ideal para su uso en aplicaciones médicas.

Tygon es un material con una dureza de 75 A en la escala de Rockwell por lo que es más duro que la Silicona o el Norprene y por tanto capaz de soportar mejor el rozamiento con los rodillos y las altas presiones.

Debido a sus ventajosas propiedades se pone a prueba este material con dos diámetros de tubo diferentes. El primer tubo tiene un diámetro interior de 3,2 mm (denominado Tygon DI=3,2mm) y el segundo un diámetro interior de 2,4 mm (denominado Tygon DI=2,4mm). Ambos tienen un espesor de pared de 1,6 mm.

En la figura 5.7 aparecen ambos tubos, pudiendo comparar la diferencia de diámetros. En tubo situado en la izquierda es el de menor diámetro como se puede observar.

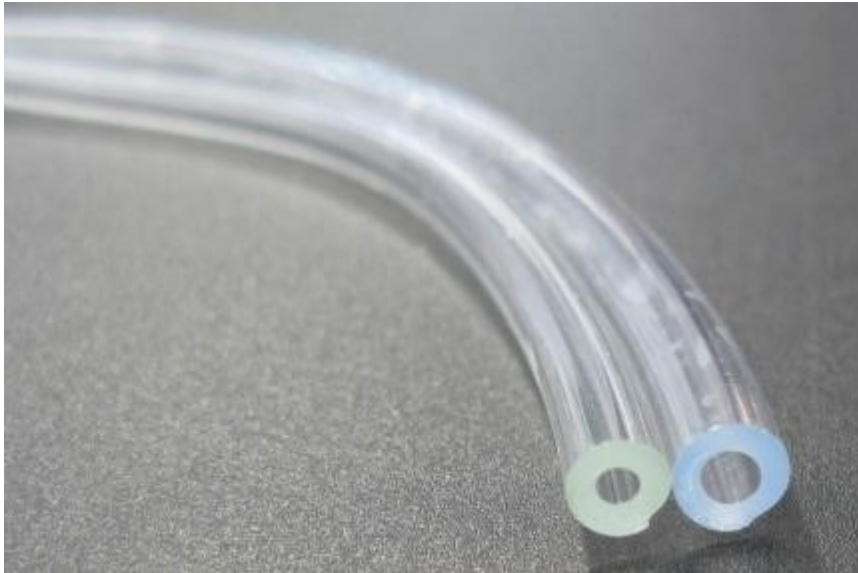


Figura 5.8: Izquierda: Tubo de Tygon DI=2,4mm. Derecha: Tubo de Tygon DI=3,2mm

Se realiza una prueba para comparar las características de los cuatro tubos elegidos. El objetivo es comparar los resultados obtenidos con los teóricos calculados en el anexo 4, los resultados se muestran en el gráfico siguiente.

En esta prueba se emplea como rueda de rodillos aquella que dispone de 4 rodillos dobles.

El sistema de tubos consiste en el tubo a ensayar, el sensor de presión y una válvula dispuesta en el extremo del tubo la cual se regula para cerrar el paso del fluido al exterior siendo el caudal de salida nulo. De esta forma se consiguen comparar los valores máximos de presión obtenidos con cada uno de los tubos al emplear el mismo montaje de la bomba en todos ellos.

Se va anotando el valor de presión obtenido conforme se desplaza hacia abajo el empujador. Con este desplazamiento se va aumentando progresivamente la distancia de aplastamiento y por tanto el cierre del tubo se hace más hermético.

Se hace girar el rotor o rueda de rodillos a una velocidad constante de 65 rpm. En la gráfica que se muestra a continuación aparecen las distancias de aplastamiento límite a partir de las cuales la presión permanece constante.

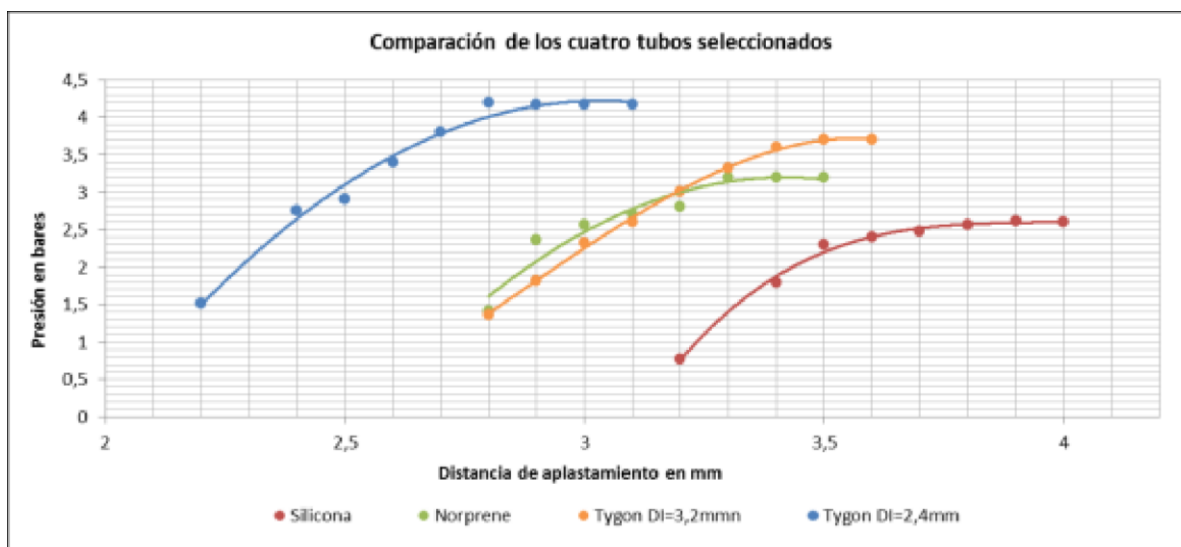


Figura 5.9: Comparación de los cuatro tubos elegidos

Se calcula que las distancias de aplastamiento necesarias para soportar una presión de 4,2 bares, presión máxima alcanzada por un tubo en esta prueba, son las correspondientes a ejercer una fuerza de compresión de tan sólo 16 N en vez de los 100 N requeridos para soportar los 30 bares.

Es importante hacer notar que la distancia de aplastamiento es medida gracias a un micrómetro de precisión. La espiga o elemento móvil que determina la lectura del micrómetro se coloca sobre la parte superior del empujador. El instante en que el empujador entra en contacto con el tubo, estando este en su forma natural, se toma como referencia de medida. En este momento se regula el micrómetro dándole un valor de cero en la escala. A continuación se desplaza el empujador comprimiendo el tubo hasta que en la aguja del micrómetro marca la medida de aplastamiento teórica adecuada para el tubo que se está ensayando.

Como notación hay que considerar que los valores medidos tienen un margen de error ya que se toma el instante de referencia sin otro elemento más preciso que la observación del tubo.

Observando las cuatro curvas anteriores de la figura 5.8 se aprecia que la distancia de aplastamiento a partir de la cual la presión se estabiliza es entorno a la distancia correspondiente al punto de flexión de cada tubo mostrado en la gráfica de la figura A 4.1 del Anexo 4.

Dicho punto de flexión representa el momento en que las paredes del tubo se ponen en contacto. Esto significa, debido a la consecuente estabilización de la presión, que a partir de ese momento la hermeticidad del cierre es buena.

En teoría el valor de presión máxima producido debe ser el mismo para todos los materiales debido a que la presión es independiente del tubo e idealmente infinito. En la práctica este valor está limitado por las limitaciones físicas que aparecen en el montaje y por el tipo de material y dimensión del tubo que afectan al comportamiento de la presión. De la gráfica se extrae la siguiente información.

Cuanto más duro y de menor diámetro es el material, mayor es la presión máxima alcanzada.

El uso de materiales blandos y elásticos como la Silicona no resulta efectivo. La razón se puede encontrar en las paredes del tubo, al ser de un material blando son aplastadas con facilidad pero no consiguen recuperar su forma natural con rapidez.

Este efecto es fundamental para el funcionamiento de la bomba puesto que si el caudal efectivo disminuye, la presión permanece constante.

La presión máxima alcanzada con el tubo de Silicona es de 2,5 bares con una distancia de aplastamiento de en torno a 3,6 mm.

El diámetro del tubo es un factor influyente tal y como se muestra en la gráfica.

Comparando tubos con el mismo espesor de pared se observa que las paredes tienen más fuerza con menor diámetro de tubo. Esa fuerza permite recuperar la abertura del tubo rápidamente.

Las curvas obtenidas con tubos de Tygon DI=3,2mm y Tygon DI=2,4mm tienen una forma similar aunque desplazada en el eje X en torno a 0,6 mm debido a la diferencia de diámetros.

La forma de la curva es debida a la elasticidad de cada material.

Conforme a los resultados obtenidos se concluye que el material y diámetro más adecuado es el Tygon con un diámetro interior de 2,4 mm. Con este tubo se alcanza una presión máxima de 4,2 bares con una distancia de desplazamiento de aproximadamente 2,8 mm.

Finalmente se puede concluir que la Silicona y el Norprene no son materiales adecuados (Ver más información en el *Anexo 8. Observaciones en los materiales de Silicona y Norprene.*)

En la realización de los experimentos con Tygon no se ha observado ninguna inestabilidad o anomalía. Además se alcanzan con este material los valores más elevados de presión aunque hasta el momento son de tan solo 4,5 bares. Este valor de presión es muy inferior al objetivo de 20-30 bares por lo que será necesaria la investigación de nuevos materiales o el rediseño de la construcción para poder alcanzar mejores resultados.

5.3. Optimización del sistema de tubos flexibles

A partir de los resultados obtenidos en los experimentos realizados hasta el momento se pretende construir un sistema de tubos flexibles optimizado, pudiendo así mejorar los valores tanto de presión como de caudal.

Como ha quedado demostrado los tubos empleados hasta el momento tienen limitaciones físicas que impiden alcanzar los requisitos de caudal y presión establecidos, por tanto se busca un nuevo tubo a partir de la información recogida que sea capaz de producir un caudal y una presión mayores resistiendo tanto la carga mecánica por la fricción con los rodillos como la ejercida por la alta presión del interior del tubo flexible.

Dado que con el tubo con menor diámetro se han obtenido resultados más favorables, se escoge un tubo flexible de diámetro aún menor. El material tiene que resistir una presión de al menos 30 bares y tener una elasticidad tal que se cierre y abra en un periodo de tiempo mínimo ya que al ser el tubo de un diámetro pequeño requiere una gran velocidad de rotación para obtener un caudal de 100 ml/min.

El sistema de tubos se compone de varios conectores que permiten bifurcar el tubo tras el segmento de la bomba hacia el sensor de presión y hacia la boquilla de salida. Los conectores han de ser por tanto también los adecuado evitándose fugas.

El tubo flexible escogido es fabricado por la empresa GORE, modelo HPBT (High Pressure Braided Tubing), tiene un diámetro interior de 1,6 mm y un espesor de pared de 1 mm. Está fabricado en una base de silicona reforzada en su interior con una malla de fibras poliméricas. Dicho tubo está testado para soportar presiones de 117 bares, lo cual asegura un buen funcionamiento ante la presión trabajando en la bomba peristáltica que se está desarrollando. En los experimentos realizados con dicho tubo flexible se comprobará su resistencia ante el rozamiento con los rodillos lo cual determina su duración.

Los conectores empleados son conectores Luer y la boquilla situada en la salida que actúa en el lugar del instrumento de operación sigue siendo una boquilla con una longitud de 6 mm y un diámetro interior de 0,2 mm.

A continuación se realiza un experimento con el sistema de tubos flexibles optimizado en el cual se ensayan las tres ruedas de rodillos puesto que no ha quedado demostrado que el funcionamiento de una sea superior al de las demás.

Se lleva a cabo el experimento tres veces, con la rueda con 5 rodillos, 6 rodillos y 4 rodillos dobles. Se anotan los valores de caudal y presión obtenidos al ir aumentando la velocidad de rotación mediante la regulación de la tensión del sistema auxiliar de alimentación del motor. En este caso la velocidad de rotación es elevada al máximo que el tubo es capaz de resistir antes de romperse. Al trabajar con un tubo reforzado capaz de resistir altas cargas mecánicas y presiones se trabaja con velocidades de rotación mucho más elevadas que en los experimentos anteriores.

Las dos gráficas siguientes reflejan el comportamiento del caudal y la presión de los tres experimentos llevados a cabo.

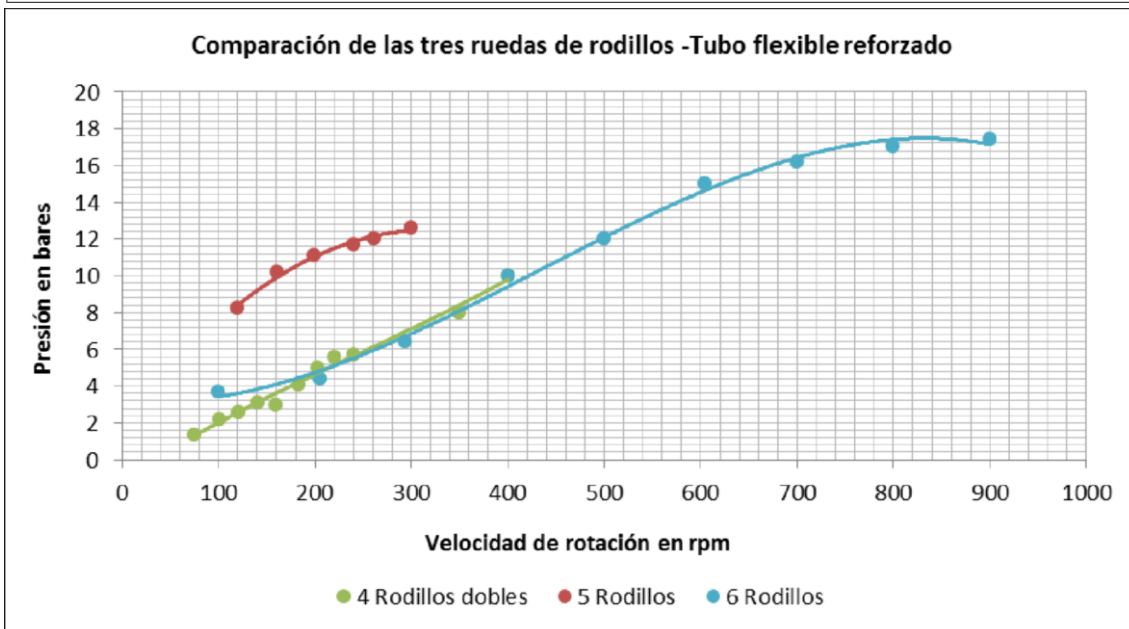
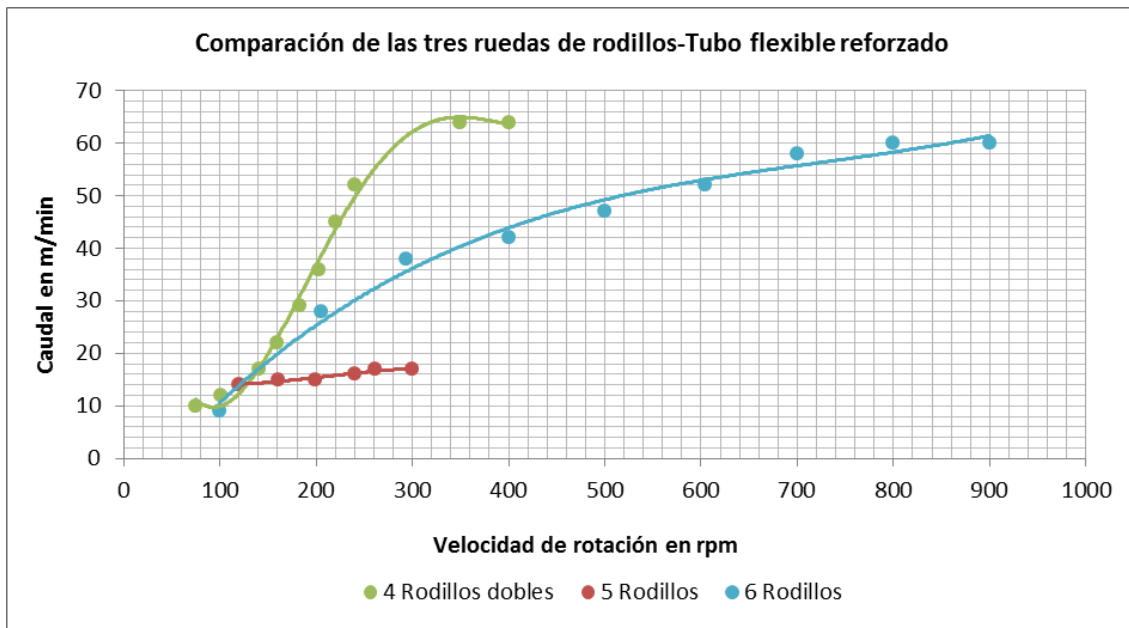


Figura 5.10: Comparación del comportamiento del tubo reforzado al emplear las 3 ruedas de rodillos

En el experimento se va aumentando la velocidad de rotación de la rueda de rodillos hasta la aparición de fisuras en el tubo que producen fugas de agua y por tanto fuerzan la finalización del experimento.

Se aprecia en las tres curvas que los valores de presión obtenidos son mayores que los obtenidos con los tubos empleados hasta el momento. Esto confirma que las características del sistema de tubos optimizado son más adecuadas para la obtención de altas presiones.

El problema de la resistencia por parte del tubo flexible a la alta presión desaparece, si bien persiste el causado por el rozamiento, que incluso se ve incrementado al trabajar con velocidades de rotación superiores.

En el caso de la prueba realizada con la rueda de rodillos con 5 rodillos el tubo no es capaz de soportar más de 300 rpm, valor a partir del cual aparecen fisuras en la superficie del

tubo que impiden con la continuación del experimento. Por tanto el caudal máximo alcanzado es de tan solo 22 ml/min y la presión de 13 bares. A pesar de haber alcanzado un valor de presión muy superior al obtenido hasta el momento, el valor del caudal es todavía muy inferior al de 100 ml/min establecido como requisito.

Analizando la curva que representa el experimento realizado con la rueda con 4 rodillos dobles se observa una mejora de la resistencia al rozamiento en comparación con el experimento realizado con la rueda con 5 rodillos. El tubo flexible es capaz de permanecer intacto hasta las 335 rpm, velocidad a partir de la cual aparecen fisuras en el tubo que de nuevo obligan a finalizar el experimento. Los valores alcanzados de caudal y presión son 64 ml/min y 10 bares respectivamente. Con esta rueda de rodillos se aprecia que la curva permanece constante en los últimos valores medidos de modo que se intuye una tendencia constante que impediría la obtención de caudales y presiones mayores.

Por último se analiza la curva que mejores resultados muestra. Se trata del experimento realizado empleando la rueda con 6 rodillos. El tubo flexible en este caso ha resistido velocidades de rotación de hasta 900 rpm sin sufrir daños. El caudal alcanzado para dicha velocidad de rotación es de 60 ml/min y la presión 17,8 bares. Dichos resultados son muy positivos a pesar de no llegar a alcanzar los valores mínimos fijados como objetivo.

Se considera por tanto que el tubo reforzado con fibras poliméricas trabajando junto con la rueda con 6 rodillos es la combinación óptima. La disposición de los 6 rodillos resulta ser la más adecuada para minimizar la fricción entre el tubo y los rodillos.

A pesar de la minimización de la fricción, esta sigue siendo elevada y causando como consecuencia una corta duración del tubo. Por ello en este proyecto fin de carrera se sigue estudiando la posibilidad de reducir dicha fricción con el fin de obtener un sistema capaz de proporcionar dichos resultados durante un mayor periodo de tiempo.

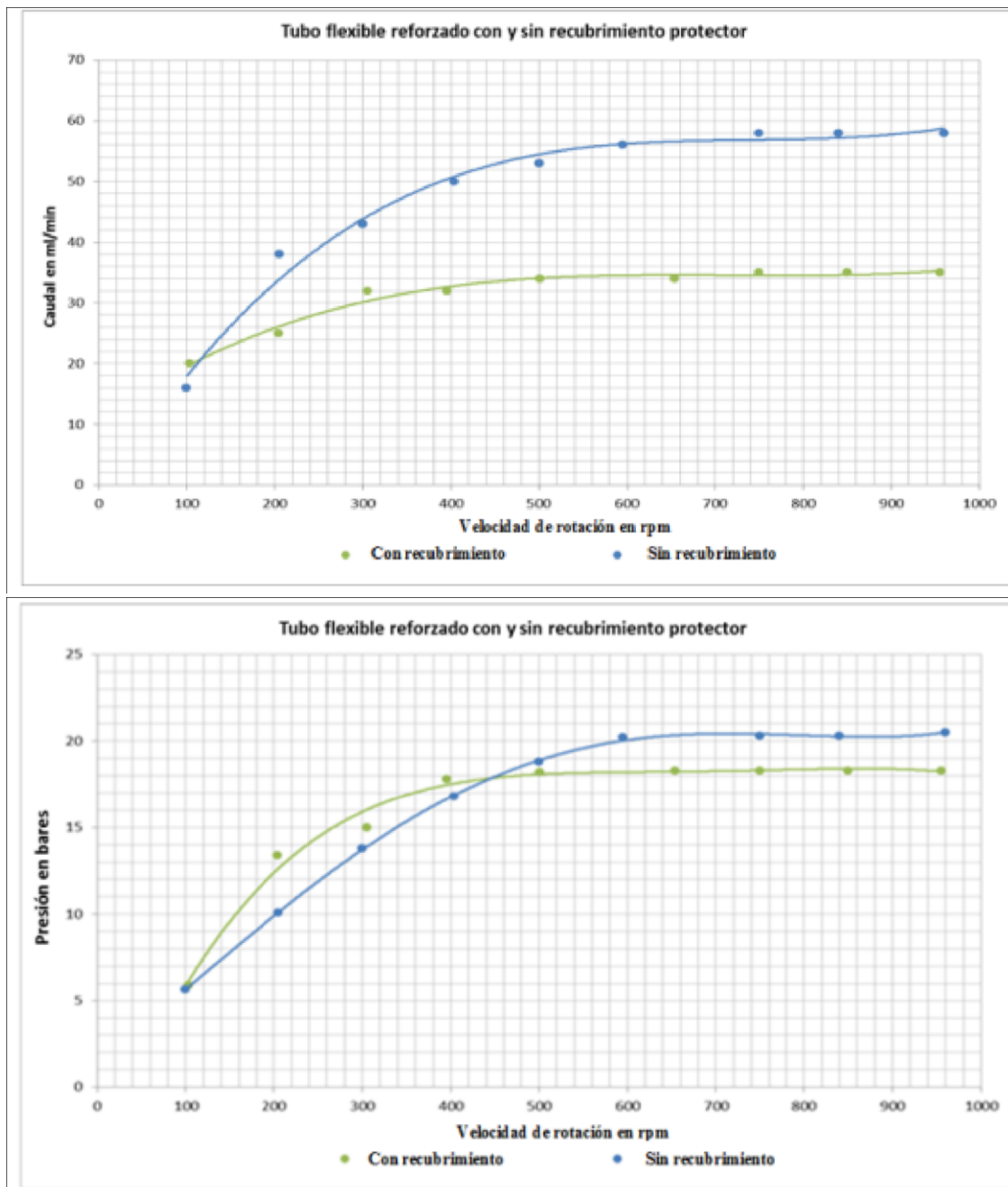
Se considera la posibilidad de recubrir el tubo con otro tubo concéntrico que actúe como protector. Este tubo protector tiene la finalidad de absorber el rozamiento, minimizando así el roce entre el tubo flexible óptimo y los rodillos. Para el tubo que actúa como recubrimiento se elige un tubo de silicona ya que se dispone de tubos de silicona de diversos diámetros.

La silicona se considera además un material adecuado debido a que no se precisa que resista las altas presiones por no estar en directo contacto con ellas.

En el siguiente experimento se prueba el tubo reforzado con fibras poliméricas recubierto con un tubo de silicona que actúa como protector frente al rozamiento entre el tubo y los rodillos.

Se emplea la rueda de rodillos con 6 rodillos y el sistema de tubos flexibles descrito en la optimización, incluyendo los conectores Luer y la boquilla de salida con un diámetro interior de 0,2 mm.

En las siguientes gráficas se muestran los datos recogidos en las dos pruebas, comparando los resultados con y sin recubrimiento protector.



5.11: Comparación del tubo reforzado con y sin recubrimiento protector. Empleada rueda con 6 rodillos

Las dos curvas obtenidas en los experimentos con y sin recubrimiento muestran un comportamiento similar aunque desplazado en el eje de ordenadas.

Los valores tanto de caudal como de presión son menores al emplear el recubrimiento.

La causa puede residir en la falta de contacto directo entre los rodillos y el tubo que impide el aplastamiento total del tubo reduciéndose el volumen efectivo de fluido de trabajo. El doble tubo, tubo reforzado más tubo protector, hace que las paredes del tubo necesiten mayor tiempo para recuperar su forma natural.

Recubriendo el tubo se pretendía protegerlo de la fricción alargando así su duración. Sin embargo se observa que en la práctica el recubrimiento, al ser de silicona, queda dañado enseguida al trabajar la bomba a revoluciones tan elevadas. Una vez dañado el recubrimiento, el tubo interior queda expuesto al rozamiento de los rodillos y acaban apareciendo fisuras que traen consigo fugas de agua.

Queda demostrado que el recubrimiento de silicona no es una solución válida al problema del rozamiento, empeorando además los resultados de caudal y presión. Sería necesario hacer un estudio para probar distintos materiales que actuaran como recubrimiento protegiendo el tubo interior. En el ámbito de este proyecto final de carrera no se dispone de tiempo necesario para ello.

Analizando la curva del experimento con el tubo sin recubrimiento se observa que el caudal obtenido es menor que en el experimento anterior con la misma rueda con 6 rodillos, sin embargo la presión es mayor, y ambos permanecen constantes a partir de en torno a 500 rpm. Los valores máximos de caudal y presión son de 58 ml/min y 20,5 bares respectivamente.

Esta diferencia de valores de un experimento a otro con los mismos componentes indica que el experimento no es reproducible. La razón reside en la falta de precisión al medir la distancia de aplastamiento o la fuerza ejercida por el empujador.

Para una precisión adecuada sería necesario un sistema de regulación mucho más sofisticado y por tanto costoso. En el ámbito de este proyecto fin de carrera se utilizan los elementos de medida disponibles, por tanto hay que aceptar la no reproducibilidad de los resultados, sabiendo sin embargo que habría que estudiarla en una futura investigación con los elementos de medida adecuados ya que se trata de un punto importante en el desarrollo de un producto de comercialización en el mercado.

5.4 Optimización de los rodillos

En el capítulo anterior queda demostrado que la opción más adecuada para el tubo flexible es el tubo de silicona reforzado con fibras poliméricas con un espesor de pared de 1 mm y un diámetro interior de 1,6 mm. Sin embargo los rodillos cilíndricos utilizados hasta el momento no permiten una buena adherencia del tubo, el cual se desliza hacia uno de los extremos mientras la bomba está en funcionamiento. Si el tubo flexible no está perfectamente centrado sobre el rodillo, el rodillo no puede comprimirlo correctamente de modo que el principio peristáltico no se lleva a cabo. Por eso es de vital importancia que el tubo se mantenga centrado en todo momento.

Para solucionar dicho problema se realizan en los rodillos unas hendiduras en la parte central que facilitan al tubo su adherencia. En la siguiente figura se muestra la rueda de rodillos con los 6 rodillos con una muesca en la parte central.

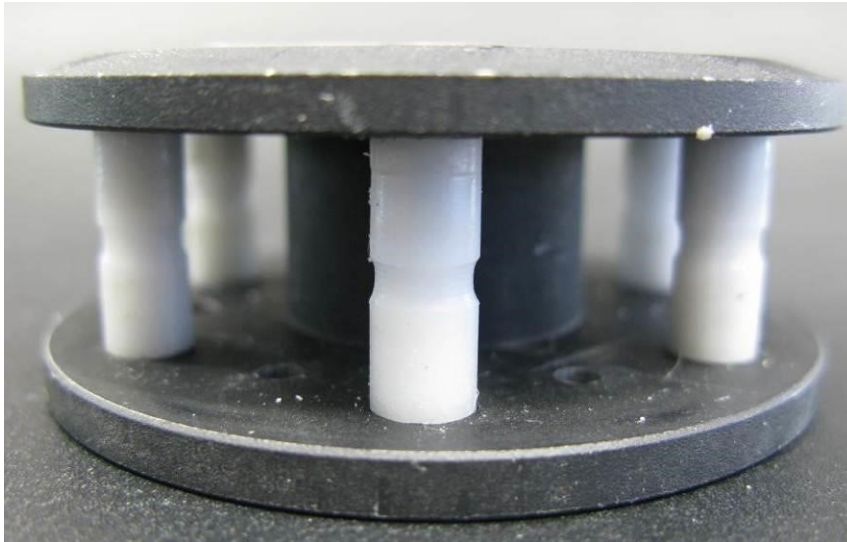


Figura 5.12: Rueda de rodillos con 6 rodillos con una hendidura en la parte central que permite la adherencia del tubo

Los resultados del experimento realizado para analizar la influencia de la hendidura se muestran en el *Anexo 9. Análisis del efecto de la hendidura de los rodillos sobre la presión*. Como conclusión se emplean los rodillos con hendidura central ya que a pesar de acarrear una ligera disminución de presión a igualdad de velocidad de rotación, permiten un funcionamiento adecuado de la bomba peristáltica mejor y a mayores velocidades de rotación de la rueda de rodillos.

6. Conclusión

6.1 Resumen

El objetivo de este proyecto fin de carrera era el desarrollo, producción y verificación de una bomba peristáltica de alta presión capaz de proporcionar un chorro de agua con un caudal de 100 a 120 ml/min y una presión de 20 a 30 bares.

Dicha bomba basa su funcionamiento en el principio peristáltico utilizado hasta el momento en las bombas que la empresa W.O.M. ha desarrollado.

Para lograr esto ha sido necesario el estudio de los componentes tanto de la estructura de la bomba como del sistema de tubos utilizado. A continuación se desarrolla un prototipo de laboratorio gracias al cual se puedan llevar a cabo los experimentos que permiten desarrollar el proyecto.

El análisis de los resultados ha ido permitiendo una optimización de los componentes, siguiendo la dirección más adecuada hasta lograr una bomba peristáltica capaz de proporcionar algo más de 20 bares y un caudal de en torno a 60 ml/min. A pesar de no cumplir con los objetivos fijados, los resultados son considerados muy positivos y queda demostrado que es posible, mediante el sistema peristáltico, el desarrollo de una bomba que cumpla con dicho fin. Si bien queda abierto a la continuación de su desarrollo.

A lo largo del desarrollo del proyecto se han ido resolviendo innumerables problemas tanto constructivos: fugas en conectores, mejora de piezas, búsqueda y elección adecuada de adhesivo correspondiente a cada material etc. como problemas de medida de los parámetros o problemas de concepto en el diseño inicial. La correcta evolución del

proyecto ha dado como resultado el prototipo capaz de conseguir los valores nombrados anteriormente.

Dicho prototipo se compone de un motor de corriente continua conectado a una fuente de alimentación externa el cual hace girar la rueda de rodillos, una rueda de rodillos con 6 rodillos cilíndricos con una hendidura en la parte central que facilita la adherencia del tubo, un sistema de tubos formado por un tubo flexible de silicona reforzado con fibras poliméricas con un diámetro interior de 1,6 mm y un espesor de pared de 1 mm, conectores Luer que permiten una hermética conexión entre segmentos de tubo, un sensor de presión capaz de medir presiones de hasta 100 bares conectado a un ordenador en el que aparece la información medida, una boquilla para la reducción de la sección a la salida que aporta la oposición necesaria al fluido que permite el aumento de presión y por último un empujador que ejerce la presión necesaria para el aplastamiento del tubo, todo ello construido sobre un soporte que da robustez y firmeza a la bomba peristáltica. También hay que añadir los componentes auxiliares de medida empleados que permiten la realización de los experimentos como el depósito de agua, probetas, cronómetro, tacómetro así como las diversas herramientas empleadas.

6.2. Futuras investigaciones

La realización de este proyecto fin de carrera está limitada a un periodo de tiempo de 7 meses. Consecuentemente no es posible el estudio exhaustivo de todas las posibilidades que podrían suponer una mejora en el sistema. Sin embargo considero importante nombrar dichas posibles opciones de mejora para futuras investigaciones.

La fricción entre los rodillos y el tubo siempre ha resultado un problema a tener en cuenta. Dicho rozamiento reduce la vida del tubo flexible hasta incluso menos de 15 minutos lo cual lo imposibilita para su utilización en la aplicación a la que está destinada la bomba peristáltica, una operación de liposucción asistida por chorro de agua, la cual tiene una duración media de entre 30-45 minutos.

Sería necesario el estudio de nuevos materiales con propiedades que los doten de resistencia frente a dicho rozamiento conservando a su vez la elasticidad que permite el cierre y abertura en tiempos mínimos.

También sería recomendado el estudio de un recubrimiento que, empleando el mismo tubo reforzado, lo proteja de la fricción aumentando así su duración. Dicho recubrimiento podría ser otro tubo concéntrico o una capa de una sustancia protectora.

Con las mejoras anteriores se podría aumentar la velocidad de rotación y con ello la presión alcanzando los valores fijados como objetivo. Sin embargo al emplear un tubo con un diámetro interior de tan sólo 1,6 mm es más costoso alcanzar los valores objetivo para el caudal. Con el fin de resolver dicho problema se podría estudiar la posibilidad de colocar dos tubos trabajando en paralelo, de esta forma el caudal se duplicaría llegando sin problema a los objetivos.

Mediante una modificación de la estructura del empujador y de los rodillos así como una sencilla adaptación en el sistema de tubos se podría conseguir un caudal total que sea la suma del caudal que proporcionan ambos tubos, a una presión que es la alcanzada por el fluido en ambos tubos flexibles.

Otra posible idea a llevar a estudio sería la realización de una bomba en varias etapas. De esta forma la diferencia de presión entre la entrada y salida sería la mitad, supongamos que para obtener una presión final de 30 bares se realiza una bomba en dos etapas, es decir, dos bombas peristálticas colocadas consecutivamente. Cada bomba debe aumentar el fluido sólo 15 bares de presión, siendo menores los problemas de fugas en conectores o resistencia del tubo a altas presiones en la etapa inicial.

Anexo 1. Pérdida de carga

Las pérdidas de carga o pérdidas de presión están presentes en el desarrollo de este proyecto por lo que es importante conocer su origen y hacer los cálculos que ayuden al correcto diseño.

Las pérdidas pueden ser continuas, a lo largo de conductos regulares, accidentales o localizadas, debido a circunstancias particulares, como un estrechamiento, un cambio de dirección, la presencia de una válvula, etc.

Al primer grupo, pérdidas primarias, pertenecen las “pérdidas de superficie” en el contacto del fluido con la superficie (capa límite), rozamiento de unas capas de fluido con otras (régimen laminar o las partículas de fluido entre sí régimen turbulento). Tienen lugar en flujo uniforme y por lo tanto, principalmente se producen en tramos de tuberías de sección constante.

Al segundo grupo, pérdidas secundarias, pertenecen las “pérdidas de forma” que tienen lugar en las transiciones (estrechamiento o expansiones), en codos, válvulas y en toda clase de accesorios de tuberías [1].

El cálculo de las pérdidas de carga debido tanto a la fricción en la tubería como a las resistencias individuales que encuentre el fluido a lo largo de la tubería (válvula, boquilla, codo, etc.) se realiza teniendo en cuenta el tipo de fluido, tratándose de un fluido compresible o incompresible.

La bomba a diseñar encuentra su aplicación en operaciones de liposucción asistida con chorro de agua. En estas operaciones el fluido a bombear es siempre agua, o en su defecto, una disolución acuosa con características similares en lo que respecta a tipo de fluido, por tanto el medio puede considerarse para el estudio de esta bomba como incompresible.

En primer lugar se ha de calcular la pérdida de presión debida a la fricción con las paredes del tubo. Esta pérdida es dependiente del diámetro interior y de la longitud de la manguera. En tubos de mayor longitud, se encontrarán pérdidas de carga mayores, así también se ven aumentadas las pérdidas al disminuir el diámetro interior del tubo. La fórmula mostrada a continuación indica esta relación con mayor precisión. Se trata de la ecuación de Darcy-Weisbach obtenida de forma empírica.

$$h_f = f \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec.:1.}$$

siendo:

h_f = pérdida de carga debido a la fricción (m) l = longitud del tubo (m) d = diámetro interior del tubo (m) v = velocidad media de la sección del tubo (m/s) g = constante gravitatoria (m/s^2) f = factor de fricción o coeficiente de resistencia de Darcy-Weisbach (adimensional)

El factor de fricción o coeficiente de resistencia de Darcy-Weisbach f es un parámetro adimensional que se utiliza para calcular la pérdida de carga en una tubería debida a la fricción.

Este parámetro es dependiente del diámetro interior del tubo, la velocidad del fluido, la densidad y la viscosidad del líquido y la rugosidad de la superficie del tubo. El factor puede, entre otros, extraerse de tablas, ecuaciones o del diagrama de Moody.

La ecuación de Darcy-Weisbach se puede aplicar tanto a flujo laminar como a flujo turbulento. Como se explica más adelante, en el ámbito de este proyecto se trabaja con flujo laminar ($Re < 2000$) por tanto el valor del coeficiente de fricción para dicho caso se representa mediante la relación que sigue a continuación:

$$f_{\text{laminar}} = \frac{64}{Re} \quad \text{Ec.:2}$$

En régimen laminar, el factor de fricción es independiente de la rugosidad relativa y depende únicamente del número de Reynolds.

$$f_{\text{laminar}} = \frac{64}{Re}$$

El número de Reynolds (Re) es un número adimensional utilizado para caracterizar el movimiento de un fluido. Este número recibe su nombre en honor de Osborne Reynolds (1842-1912), quien lo describió en 1883.

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande).

Para un fluido que circula por el interior de una tubería circular, como sería el caso del tubo de la bomba peristáltica a diseñar, el número de Reynolds viene dado por:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

Ec.:3 o

equivalentemente por:

$$Re = \frac{v_s D}{\nu}$$

Ec.:4 donde:

ρ : densidad característica del fluido (kg m^{-3})

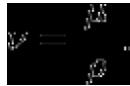
v_s : velocidad característica del fluido (m s^{-1})

D : diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema (m)

μ : viscosidad dinámica característica del fluido ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$)

ν : viscosidad cinemática característica del fluido ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

siendo:



Ec.:5

Como todo número adimensional es un cociente, una comparación. En este caso es la relación entre los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos [2].

En segundo lugar se calculan las pérdidas de presión locales debidas a los accesorios y los cambios de sección (h). En este caso, el número adimensional es representado por el coeficiente de pérdida, K, que representa en cada caso el valor de la resistencia local, los valores de cada resistencia pueden ser extraídos de las tablas correspondientes y son siempre coeficientes empíricos. Este factor es dependiente del caudal, la geometría o tipo de resistencia y el número de Reynolds entre otros.

$$h = K \cdot \frac{Q^2}{2g} \quad \text{Ec.:6.}$$

donde Q es el caudal y g la constante de gravitación universal.

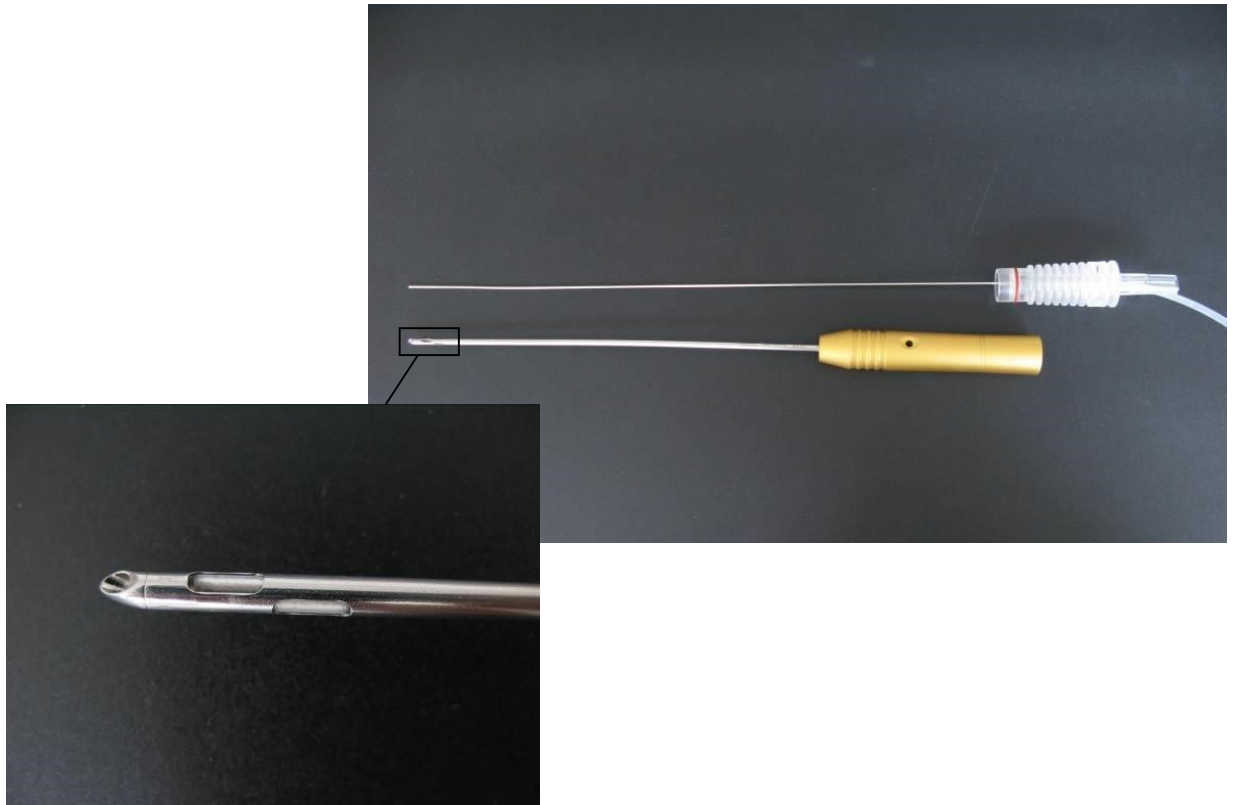
El fluido avanza a una velocidad igual al caudal dividido por el área de sección transversal interna de la manguera. La velocidad, junto con la densidad y la viscosidad son parámetros reflejados en el número de Reynolds.

La bomba a desarrollar tiene como objetivo proporcionar un caudal de en torno a 100120 ml/min.

Para conseguirlo se va a trabajar con tubos que tienen un diámetro interior de valor situado entre 1,6 mm y 3,4 mm. El número de Reynolds para este rango de valores es siempre menor de 2.000, por lo que el fluido al circular por el interior del tubo se puede considerar en el ámbito de este proyecto flujo laminar.

En el caso particular de la bomba que se pretende desarrollar, los tubos son de longitudes relativamente cortas y el número de accesorios que se encuentra el fluido en su recorrido es numeroso, por ello las pérdidas de presión primarias juegan un papel menor al de las pérdidas de presión secundarias.

En el sistema de mangueras utilizado en los experimentos con la bomba prototipo de laboratorio, se pueden encontrar accesorios como codos o cambios de dirección (pieza en T), reducciones de sección, válvulas o boquillas.



Anexo 2. Instrumentos médicos empleados en operaciones de liposucción

En la parte final del tubo, sustituyendo a la boquilla que representa en las pruebas de laboratorio la función del instrumento, debe ser conectado el instrumento médico utilizado en las operaciones de liposucción.

Un posible instrumento se muestra en la Figura A 2.1.

Figura A 2.1: Instrumento empleado en las operaciones de liposucción

El instrumento se compone de una larga cánula por donde avanza el fluido antes de ser inyectado en el interior del cuerpo y otra cánula concéntrica que la recubre. La cánula interior tiene, en este caso, un diámetro interior de 0,3 mm. La cánula exterior sirve a la vez de refuerzo y de conducto de absorción de la mezcla formada por la disolución acuosa insertada y la grasa disuelta a extraer.

El sistema de tubos requiere conectores en varias zonas de unión de tubos entre sí o con otros elementos como el depósito de agua. A lo largo del estudio experimental se observan numerosos problemas, en su mayoría de fugas, en las juntas de unión recién mencionadas. Como conclusión final tras trabajar con distintos métodos, han sido elegidos los conectores Luer para el sistema mejorado de tubos. Los conectores Luer tienen salidas macho o hembra que serán conectadas entre sí. En particular el conector Luer en Y tiene dos salidas macho y una hembra.

Cada uno de los componentes del sistema de tubos implica una resistencia que conlleva una pérdida de presión. Mediante dichas fórmulas las pérdidas de carga de cada

elemento pueden ser calculadas. La caída de presión es siempre dependiente del caudal, a mayor caudal mayor serán también las pérdidas de presión.

En este modelo de laboratorio las pérdidas de carga más significativas se encuentran en la boquilla o instrumento de salida. El cambio brusco de sección trae como resultado una gran caída de presión. Estas pérdidas varían con las dimensiones del accesorio. Antes de comenzar a emplear un elemento es necesario por tanto calcular las pérdidas de carga que conlleva, de manera que sea posible minimizar estas pérdidas.

En el cálculo previo de las pérdidas de carga para el instrumento quirúrgico se observa que la gran longitud de éste conlleva unas pérdidas enormes. El chorro de agua fluye a través de la cánula a la salida, esto causa pérdidas de presión en función de la longitud del instrumento y el diámetro interior. En el caso del instrumento representado en la figura 5.3 y trabajando con un caudal de salida de 100 ml/min, las pérdidas de carga debidas a la fricción entre el flujo y las paredes internas del tubo ascienden a 94,19 bares, siendo 30 bares el objetivo indicado a conseguir según los requisitos, las pérdidas de carga tan solo en el instrumento médico suponen un 213,8 % de pérdidas. Por tanto para la realización de los experimentos en el laboratorio se busca una solución alternativa como la boquilla descrita anteriormente, con un diámetro de salida de 0,2 mm y una longitud de sólo 6 mm. Las pérdidas de carga que sufre el fluido al circular por este elemento son de 12,82 bares, es decir un 42,73 %, que en comparación con el 213,8 % ocasionado por el instrumento son unas pérdidas relativamente aceptables.

Anexo 3. Medición de los parámetros a controlar

3.1. Estación de medición

Para llevar a cabo los experimentos se dispone de un laboratorio habilitado en el área de investigación y desarrollo de la empresa W.O.M.

Las mediciones son en todo experimento llevadas a cabo con agua. El agua es bombeada desde un recipiente conectado a la red de suministro, utilizada en cada medición a través del sistema de tubos del prototipo de bomba y recogida a su salida en otro recipiente conectado mediante una válvula a la red de aguas residuales. La estación de medición está equipada con un ordenador. Mediante una placa de conexiones los datos leídos por los sensores pueden ser enviados al ordenador y con la ayuda del programa LabVIEW interpretados y almacenados, dando como resultado gráficas tanto de presión como de caudal en función del tiempo.

Esta estación dispone a su vez de un sensor de presión, explicado con más detalle a continuación, y de un anemómetro encargado de medir el caudal a la salida.

3.2. Medición de la presión

En tecnología de fluidos para medir la presión del medio lo más habitual es utilizar un sensor de presión que trabaja basándose en el efecto piezorresistivo.

La piezoresistividad es la propiedad de algunos materiales conductores y semiconductores, cuya resistencia eléctrica cambia cuando se los somete a un esfuerzo o estrés mecánico (tracción o compresión) que los deforma.

Dicho cambio es debido a la variación de la distancia interatómica (en el caso de los metales) y a la variación de la concentración de portadores (en el caso de los semiconductores).

La resistencia eléctrica de los materiales piezorresistivos depende de la temperatura (especialmente en el caso de los semiconductores). En contraste con el efecto piezoeléctrico, la piezorresistividad sólo causa un cambio de resistencia y no produce potencial eléctrico.

Para el estudio de la bomba peristáltica que se pretende desarrollar en este proyecto final de carrera se ha elegido un sensor basado en este efecto piezorresistivo capaz de medir presiones de hasta 100 bares. En concreto el sensor de presión es el modelo CTE8100PON fabricado por SensorTechnics. Dicho sensor contiene una membrana de silicio que se verá deformada al actuar la presión sobre ella causando una situación de estrés mecánico. La membrana contiene en sus extremos cuatro resistores piezoeléctricos conectados mediante un puente de Wheastone los cuales permitirán medir la variación de resistencia eléctrica. El número de cargas se corresponde con el grado de estrés.

El material elegido para la membrana es el silicio debido a sus propiedades elásticas y a ser un material semiconductor.

La deformación de la membrana causada por la presión provoca en el silicio un cambio de longitud. Dicho cambio de longitud es el que conduce a una variación de la resistencia eléctrica debido a que en el silicio aparecen cargas eléctricas en las superficies de frontera de determinados cristales.

Al producirse esa elongación de la membrana dos de los resistores piezoeléctricos se comprimen y los otros dos se estiran. El cambio es registrado a través de la información que emiten los cuatro resistores piezoeléctricos en forma de variación de resistencia la cual es directamente proporcional a la presión. La presión por tanto queda registrada en el ordenador y mostrada mediante gráficas presión-tiempo [3].

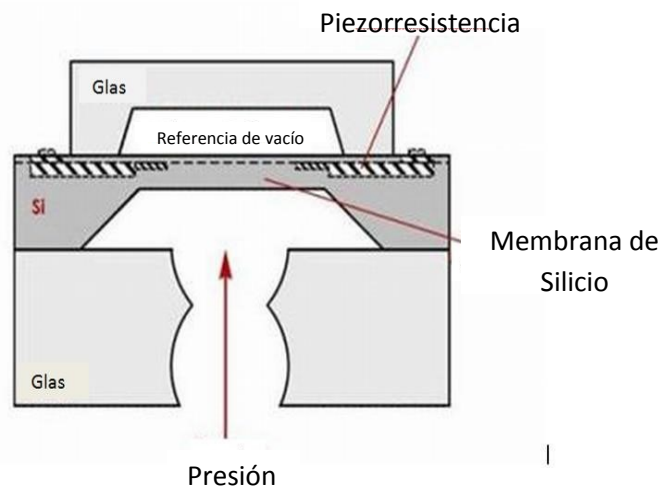


Figura A 3.1: Efecto piezorresistivo

Las ventajas de los sensores de presión piezorresistivo, en comparación con otros sensores de presión (por ejemplo, sensores de presión piezoeléctricos), son una mayor sensibilidad y un factor de forma mucho más pequeño, además de ser más económicos de producir.

3.3 Medición del caudal

La estación de medición está equipada con un termo-anemómetro. Un termoanemómetro es un sensor que permite la medición del caudal utilizando el principio de convección.

El fluido del cual queremos conocer su caudal se hace circular por una superficie caliente provocando que algunas de las moléculas del fluido absorban energía térmica. Esta absorción de la energía provoca en la superficie caliente una disminución de la temperatura. La diferencia de temperatura de dicha superficie en un tiempo determinado es proporcional al número de moléculas que circulan por ella en dicho tiempo y, por tanto, puede este efecto ser utilizado para la medición de flujo.

En la práctica han prevalecido dos métodos de medición: El método de pérdida de calor y el método de distribución de calor.

El termo-anemómetro instalado en la estación de medición que se dispone en el laboratorio sigue el segundo, es decir, el método de distribución de calor. El dispositivo que conforma el anemómetro está compuesto por dos termómetros resistivos R_1 y R_2 conectados formando un puente de medición. Entre ellos se coloca un elemento de calentamiento o resistencia, P , la cual se mantiene a una potencia de calentamiento constante.

Cuando no circula flujo por el sensor, hay una distribución uniforme de la temperatura entre R_1 y R_2 . Ambos termómetros marcan la misma temperatura y por lo tanto la corriente de flujo indicada es igual a cero.

Por el contrario, cuando por el sensor circula una corriente de flujo en la dirección indicada en la figura 4.2, el termómetro resistivo R_1 marca una temperatura inferior al R_2 debido a que el fluido se ha calentado gracias a la resistencia P . Para flujo laminar, la diferencia de temperatura entre R_1 y R_2 , es proporcional a la velocidad de flujo. La ventaja de este método de medición en comparación con el método de pérdida de calor es que en el primero se puede determinar la dirección del flujo [4].

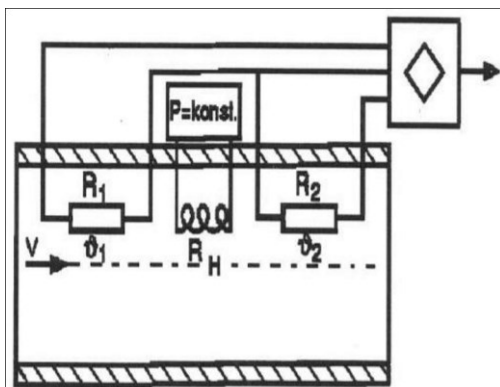


Figura A 3.2: Esquema del método de distribución de calor

El caudal objetivo impuesto para la bomba peristáltica a desarrollar es un caudal bajo, de tan solo 100 ml/min, debido a esto y al tipo de experimentos a realizar se puede prever que el caudal de salida puede ser en algunas de las mediciones casi nulo. Con caudales tan bajos el sensor de caudal del que se dispone en la estación de medida no proporciona datos suficientemente fiables, el margen de error del sistema no puede considerarse despreciable trabajando con caudales pequeños. Por esta razón, el caudal es medido manualmente en todos los experimentos realizados a lo largo de este proyecto de fin de carrera.

El caudal se determina manualmente como una relación entre el volumen y el tiempo. Para la medida del volumen se utiliza un cilindro de medición graduado y para la medición del tiempo se emplea un cronómetro.

La siguiente ecuación muestra el caudal como relación volumen-tiempo.

$$\text{Caudal [ml / min]} = \text{Volumen [ml]} / \text{tiempo [min]} \quad \text{Ec. 7.}$$

Para mayor facilidad a la hora de trabajar se expresa el volumen en mililitros (ml), y el tiempo en minutos (min). De esta forma en cada medición se registra el volumen de agua procedente de la salida de la bomba que se recoge en el cilindro de medición en un minuto de tiempo cronometrado con exactitud.

3.4. Medición de la velocidad de rotación

Para la medida de la velocidad de rotación se emplea un tacómetro de mano modelo DT 2L/k fabricado por la marca Conrad Elektronik. La transmisión del movimiento de rotación se lleva a cabo a través de una continua emisión y recepción de un haz de luz.

En este dispositivo se encuentran tanto el emisor como el receptor.

Un diodo láser actúa como emisor emitiendo un haz de luz de color rojo sobre un punto fijo del rotor del cual se pretende medir la velocidad de rotación. Sobre dicho rotor es necesario colocar previamente una pequeña tira adhesiva que gira con él y refleja a su encuentro el haz de luz en cada rotación.

El tacómetro registra el número de vueltas efectuado por el rotor en un minuto y lo muestra en un display. Las unidades mostradas en pantalla son revoluciones por minuto (rpm).

Con el tacómetro es posible medir sin contacto la velocidad de 5 a 99.999 revoluciones por minuto a una distancia de medición máxima de 1 m. [5]

3.5. Registro de datos con LabVIEW

Para la recogida y registro de datos se ha empleado un programa denominado LabVIEW (acrónimo de "Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench"). LabVIEW es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico. Este programa fue desarrollado por National Instruments en 1986 siendo disponible su última versión en el año 2013.

Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales. Entre sus objetivos están el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo (no sólo en ámbitos de Pruebas, Control y Diseño) y el permitir la entrada a la informática a profesionales de cualquier otro campo. Este programa es recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido, pues acelera la productividad.

En el marco de este proyecto final de carrera el programa LabVIEW es empleado principalmente como ayuda para la visualización en forma gráfica de los datos de presión obtenidos del sensor. Siendo posible su registro tanto en formato digital como en papel.

El programa se compone de dos partes, el diagrama de bloques y la pantalla frontal que transmite la información visual al usuario. El diagrama de bloques debe ser diseñado previamente representando la información del sistema que se va a estudiar.

Gracias a este programa se puede llevar un seguimiento y control de la presión a la salida de la bomba peristáltica en cada instante, dato de vital importancia junto con el caudal recogido a la salida.

Anexo 4. Cálculo de la distancia necesaria entre empujador y rodillo

La parte de tubo correspondiente al segmento de la bomba está situada sobre los rodillos bajo presión ejercida por el empujador. El empujador opone resistencia a los rodillos, favoreciendo así una mejor oclusión del tubo. Es importante destacar que la oclusión es sólo una fase del proceso peristáltico, para completarlo con éxito es imprescindible la consiguiente apertura y recuperación de la forma inicial permitiendo el paso del fluido. Por tanto el empujador debe ejercer una fuerza mínima pero suficiente de manera que los rodillos sean capaces de cerrar el tubo a su paso recuperando a su vez la apertura inicial cuando ningún rodillo esté enfrentado al empujador.

La fuerza recién mencionada varía dependiendo del material del tubo y de su diámetro. Esta fuerza determinará la distancia entre el empujador y el rodillo enfrentado. Dicha distancia es denominada rendija. La rendija debe ser la máxima posible para minimizar la fricción que sufre el tubo. En la realización de los experimentos es más sencillo medir la distancia que recorre el empujador cuando desciende comprimiendo el tubo, a dicha distancia se la denomina distancia de aplastamiento. La distancia de aplastamiento será aquella distancia que haya recorrido el empujador desde la posición de referencia cuando el tubo está en su forma natural hasta que está comprimido en su forma de trabajo.

A continuación se analiza mediante la siguiente prueba el valor de la rendija teóricamente adecuada para soportar en cada caso la presión máxima fijada como objetivo de 30 bares.

Estos valores se calculan para cuatro tubos de diferente tamaño y material que han sido escogidos para un primer análisis. Estos cuatro tubos han sido seleccionados de entre todos los que se ofrecen en el mercado tras comparar sus propiedades.

Todos los materiales son similares a los de los tubos utilizados en la actualidad por la empresa W.O.M. en sus bombas peristálticas, exceptuando la capacidad de resistir altas presiones que necesariamente tiene que ser más elevada.

Los tubos empleados en las sucesivas pruebas son brevemente descritos a continuación.

Silicona

Uno de los tubos elegidos es de silicona y tiene un diámetro interior de 3,2 mm y un espesor de pared de 1,6 mm. La silicona es un material blando, la dureza según la escala A de Rockwell de dicho tubo es de 40 A.

Norprene

El siguiente tubo elegido es de un material conocido como Norprene. Tiene un diámetro interior de 3,2 mm y un espesor de pared de 1,6 mm. El Norprene es también un material blando cuya dureza según la escala A de Rockwell es 50 A.

Dos de los tubos elegidos son del mismo material por lo que se denominan con el diámetro interior para diferenciarlo a lo largo del proyecto. El material se conoce como Tygon, es un material más duro que los dos anteriores siendo su dureza según la escala A de Rockwell de 75 A.

Tygon DI = 3,2 mm

El tercer tubo está hecho de Tygon. Su diámetro interior es de 3,2 mm y su espesor de pared de 1,6 mm.

Tygon DI = 2,4 mm

Por último se ha elegido un tubo del mismo material y distinto diámetro. En este caso el diámetro interior es de 2,4 mm y el espesor de pared de 1,6 mm.

En primer lugar se calculan, a partir de las gráficas obtenidas en las siguientes mediciones, los valores teóricos de rendija que serían necesarios para cada tubo, teniendo en cuenta su diámetro y material. Las mediciones se realizan mediante una máquina estática para ensayos a compresión fabricada por la empresa Zwick Roell, modelo Z 0.5.

Se realizan cuatro ensayos, cada uno tomando una muestra de uno de los cuatro tubos escogidos. En cada ensayo se coloca el tubo sobre la rueda con rodillos, esta rueda es una de las que será empleada en los experimentos con el prototipo de laboratorio. El número de rodillos en este caso no es relevante puesto que la rueda se coloca estáticamente de forma que el rodillo quede enfrentado con el brazo prensador del aparato, que actúa representando al empujador de la bomba prototipo.

El brazo prensador que representa al empujador tiene una terminación plana y está conectado a una célula de carga capaz de soportar 500 N de fuerza.

La máquina para ensayos de compresión se programa para que descienda comprimiendo la muestra a una velocidad de 10 mm / min.

La distancia de aplastamiento se divide en dos, la debida a la compresión del tubo cuyo valor se corresponde con el diámetro interior y la debida al aplastamiento de las paredes del tubo, valor dependiente tanto de la fuerza ejercida como de las características del material. En el aplastamiento de la primera parte el empujador no realiza apenas fuerza sobre el tubo, es en esta segunda parte, cuando el empujador ha recorrido la distancia correspondiente al diámetro interior del tubo, cuando la fuerza requerida por el empujador para continuar descendiendo a la velocidad establecida aumenta exponencialmente.

Las gráficas reflejan claramente estas dos secciones. De ellas se podrá extraer el valor de la distancia de aplastamiento que se requiere en cada caso. En primer lugar se calcula de forma teórica el valor de fuerza necesario para que el cierre del tubo soporte una diferencia de presión de 30 bares entre ambos lados. A partir de dicha información se obtiene de la gráfica el valor de la distancia de aplastamiento.

La presión deseada (p) es de 30 bares.

$$1 \text{ bar} = 0,1 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 30 \text{ bar} = 3 \text{ N/mm}^2$$

La superficie (A) de contacto es dependiente del diámetro exterior del tubo (d_A) y se aproxima de acuerdo con la ecuación :

$$A = d_A * d_R \quad \text{Ec. 8.}$$

donde d_R representa el diámetro de los rodillos . Para el cálculo de la superficie de contacto es suficiente con una aproximación, para ello se considera el contacto entre el rodillo y el tubo un rectángulo el cual se corresponde al formado cuando la fuerza ejercida por el empujador es la máxima.

La fuerza requerida (F) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$F = p * A \quad \text{Ec. 9.}$$

La rueda empleada en el ensayo de compresión es una rueda con 4 rodillos dobles, a efectos prácticos solo es relevante el tamaño del rodillo que tiene un diámetro de 6 mm.

Distinguimos dos valores de fuerza dependiendo del valor del diámetro.

Los tubos Silicona, Norprene y Tygon ID=3,2mm tienen un diámetro interior de 3,2 mm y un diámetro exterior de 6,4 mm. El cálculo de fuerza requerida es el siguiente:

$$d_R = 6 \text{ mm}$$

$$d_A = 6,4 \text{ mm}$$

$$A = 6,4 \text{ mm} * 6 \text{ mm} = 38,4 \text{ mm}^2$$

$$F = 3 \text{ N/mm}^2 * 38,4 \text{ mm}^2 = 115,2 \text{ N}$$

El cálculo para el tubo Tygon ID = 2,4 mm, con un diámetro interior de 2,4 mm y un diámetro exterior de 5,6 mm es el que se muestra a continuación:

$$d_R = 6 \text{ mm}$$

$$d_A = 5,6 \text{ mm}$$

$$A = 5,6 \text{ mm} * 6 \text{ mm} = 33,6 \text{ mm}^2$$

$$F = 3 \text{ N/mm}^2 * 33,6 \text{ mm}^2 = 100,8 \text{ N}$$

Las siguientes curvas Fuerza/Distancia de aplastamiento se corresponden con los cuatro tubos mencionados.

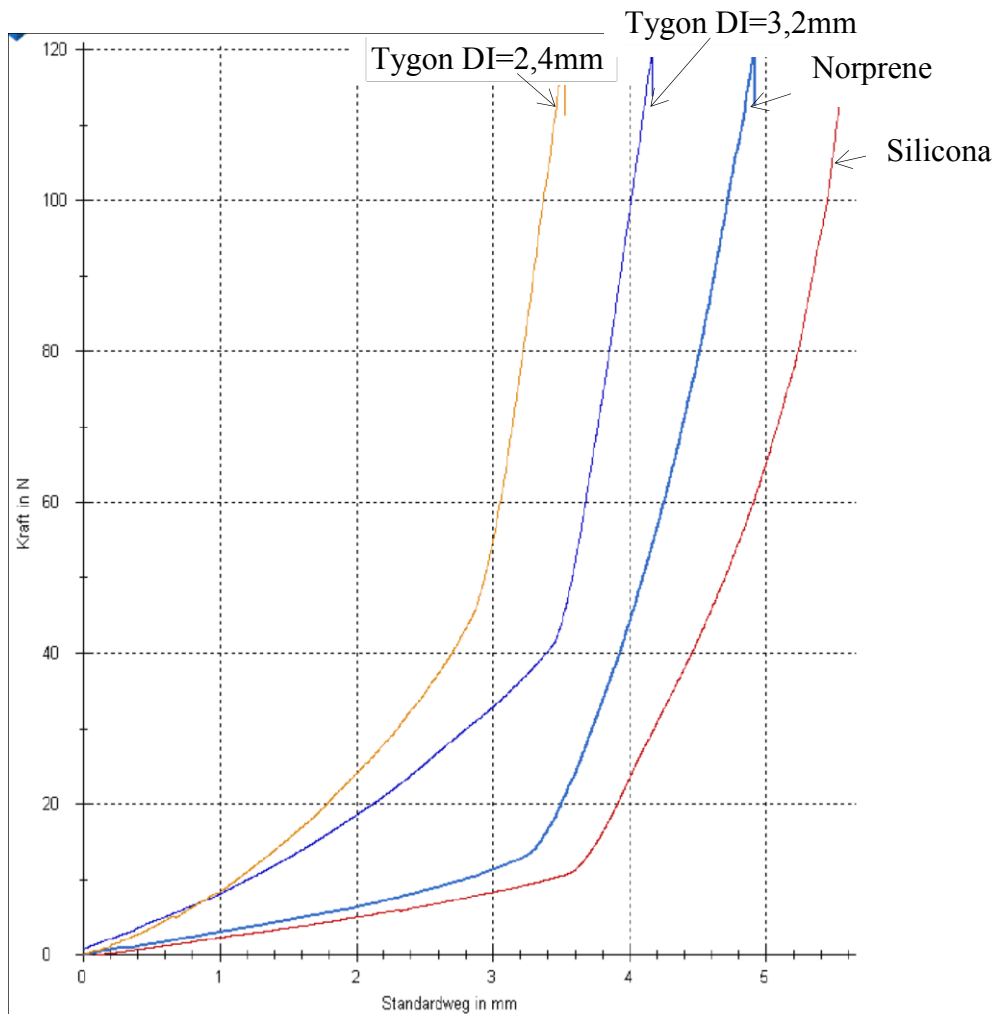


Figura A 4.1: Curvas Fuerza/Distancia de aplastamiento de los 4 tubos de ensayo. Elasticidad de los materiales

Cada valor de la fuerza ejercida por el empujador se corresponde con una distancia de aplastamiento. Gracias a las curvas extraemos los valores de las distancias de aplastamiento necesarias para obtener la fuerza calculada anteriormente de forma teórica como fuerza requerida para soportar 30 bares de presión.

Las distancias de aplastamiento resultantes son las siguientes para cada tubo:

Silicona : Distancia de aplastamiento = 5,6 mm

Norprene : Distancia de aplastamiento = 4,8 mm

Tygon_ID = 3,2 mm : Distancia de aplastamiento = 4,1 mm

Tygon_ID = 2,4 mm : Distancia de aplastamiento = 3,4 mm

Se observa que las curvas llegan hasta 120 N en todos los casos, esto es debido a que la máquina de ensayo de compresión es programada para detenerse automáticamente cuando la fuerza ejercida es de 120 N.

El punto de flexión de la curva representa el momento en el que las paredes del tubo entran en contacto produciendo un aumento exponencial de la fuerza a ejercer por el empujador.

En la figura 5.1 se puede apreciar que para los materiales más blandos como la Silicona y el Norprene la fuerza ejercida para poner en contacto las paredes del tubo es mucho menor que para el material más duro, Tygon. Es decir, los puntos de flexión tienen sus coordenadas más bajas en el eje de ordenadas.

También se puede destacar que el punto de flexión en la curva del Tygon ID = 2,4 mm no está claramente definido, mientras los puntos de flexión en materiales más blandos se aprecian claramente.

Para mayor exactitud se muestran en la siguiente tabla los valores de las coordenadas tanto de los puntos de flexión como de los puntos correspondientes a soportar los 30 bares de presión establecidos como objetivo máximo.

Tubo	Punto de flexión		Punto de resistencia a 30 bares	
	Distancia de aplastamiento [mm]	Fuerza [N]	Distancia de aplastamiento [mm]	Fuerza [N]
Silicona	3,6	11	5,6	115,2
Norprene	3,3	13	4,8	115,2
Tygon DI=3,2mm	3,4	41	4,1	115,2
Tygon DI=2,4mm	2,8	46	3,4	100,8

Tabla 5.1: Coordenadas de los puntos de flexión y de los puntos correspondientes a soportar 30 bares para las cuatro muestras de tubos elegidas

Anexo 5. Tamaño de los rodillos

Anteriormente se ha observado que el tamaño de los rodillos afecta al comportamiento del caudal y la presión.

A continuación se pretende analizar dicho efecto comparando las curvas tanto de caudal como de presión de experimentos realizados con el mismo montaje, tan sólo variando el tamaño del rodillo. De esta forma se quiere confirmar que los rodillos de menor diámetro resultan favorecedores en el funcionamiento de la bomba peristáltica obteniéndose mejores resultados.

En las siguientes figuras se muestran las dos ruedas a comparar. Ambas tienen 6 rodillos, a la izquierda se muestra la rueda con 6 rodillos con un diámetro de 6 mm y a la derecha la rueda con 6 rodillos con un diámetro de 14,7 mm.

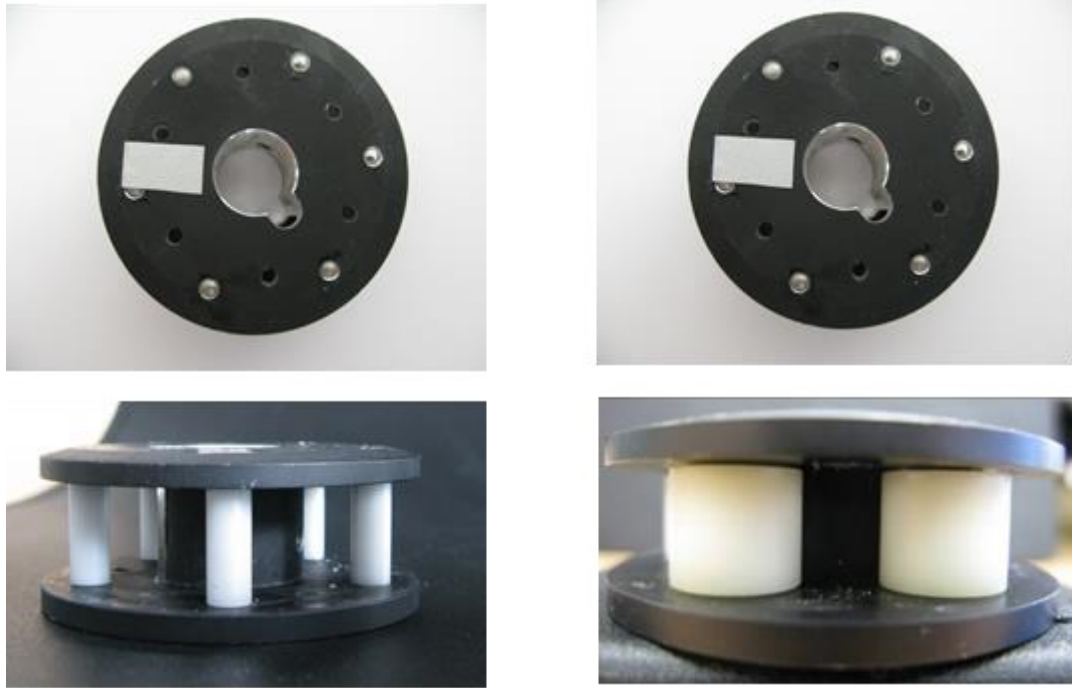
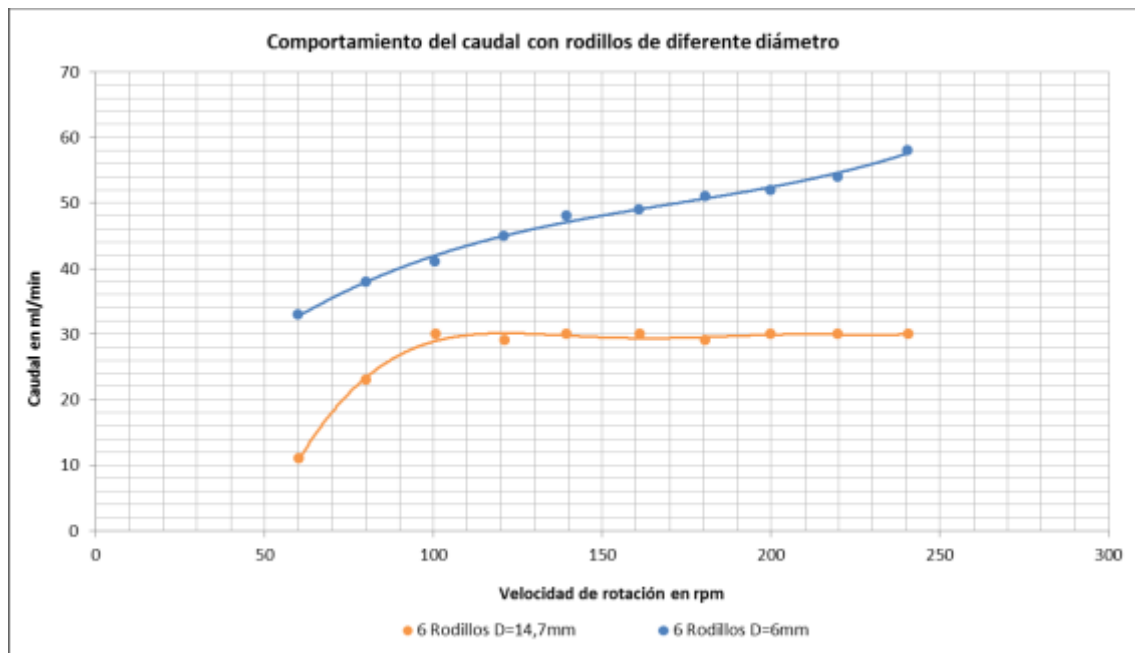


Figura A 5.1: Ruedas con 6 rodillos con un diámetro de 6 mm a la izquierda y un diámetro de 14,7 mm a la derecha

Los ensayos son llevados a cabo con el tubo que ha resultado ser el más adecuado hasta el momento, esto es el tubo de silicona con un diámetro interior de 2,4 mm y un espesor de pared de 1,6 mm. La boquilla conectada a la salida tiene una longitud de 6 mm y un diámetro interior de 0,2 mm. La velocidad de rotación es controlada mediante la regulación de la tensión de la fuente de alimentación externa conectada al motor.



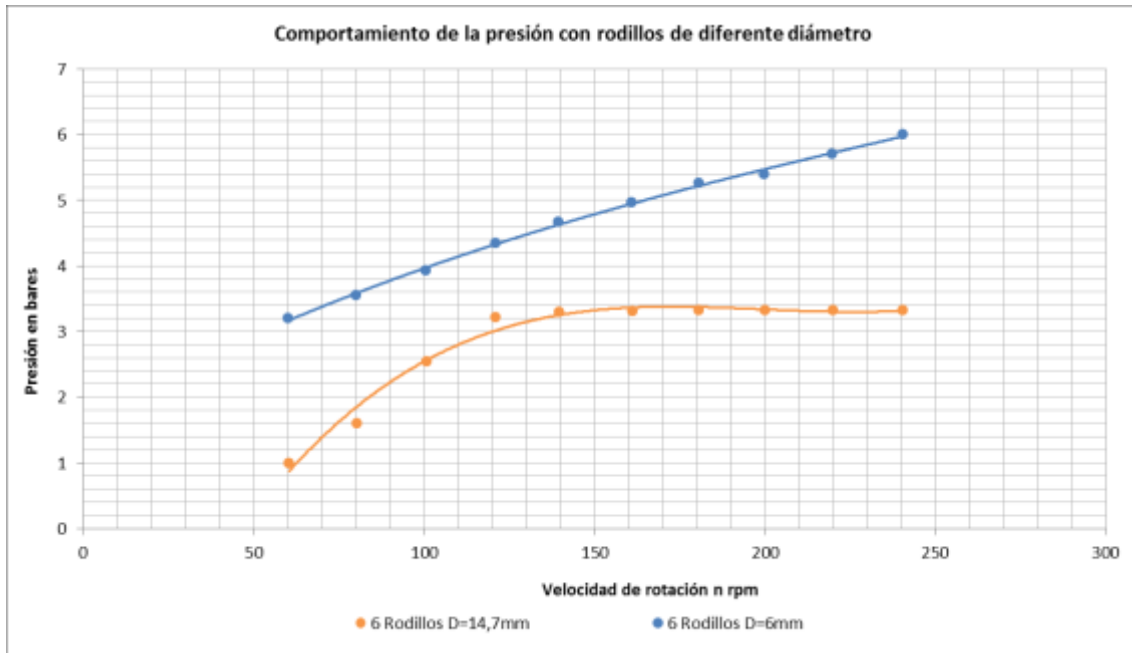


Figura A 5.2: Comparación del comportamiento entre una rueda con 6 rodillos de 6 mm de diámetro y una rueda con 6 rodillos de 14,7 mm de diámetro

Las gráficas anteriores reflejan el diferente comportamiento de ambos rodillos. Se aprecia claramente el aumento del caudal con los rodillos de 6 mm de diámetro mientras que con los rodillos de 14,7 mm de diámetro permanece constante a partir de 100 rpm. Este suceso es debido a la falta de tiempo que hay para la recuperación de la forma del tubo.

El tubo, al no tener fuerza suficiente en las paredes para recuperarse en el periodo de tiempo entre dos rodillos, no se abre completamente reduciéndose el volumen de fluido que avanza. Al disminuir el volumen efectivo el efecto peristáltico no se puede realizar y la presión deja de aumentar.

Se confirma que el tamaño influye en el funcionamiento de la bomba siendo mejor con rodillos de menor diámetro, por tanto a partir de ahora serán utilizados los rodillos de 6 mm de diámetro.

Anexo 6. Forma del rodillo

Se observa que los resultados obtenidos hasta el momento están bastante alejados de los valores establecidos como objetivo.

Se trata de buscar alternativas o modificaciones que sirvan de solución a los posibles problemas que impiden alcanzar mayores valores tanto de caudal como de presión. La forma cilíndrica del rodillo podría provocar un mal aislamiento del tubo cuando este se cierra por acción del rodillo. Al trabajar con un material duro como el Tygon se considera la posibilidad de que el volumen efectivo de fluido se vea reducido debido a la falta de vacío que provoca la succión del fluido. Al haber un gran estrés en la superficie exterior del tubo, las zonas laterales en la parte interior no se ponen en contacto por lo que el aislamiento no es completo.

Para solucionar este problema se prueba a sustituir los rodillos cilíndricos por unos ligeramente convexos, de esta forma se permite la expansión del tubo en sus laterales disminuyendo el estrés y cerrando el tubo de forma completa.

Los rodillos convexos tienen un diámetro máximo en el centro de 6 mm y mínimo en los extremos de 5,4 mm. La longitud de los rodillos sigue siendo la misma, 14 mm. A continuación se muestra en la fotografía los dos rodillos, convexo a la izquierda y cilíndrico a la derecha.

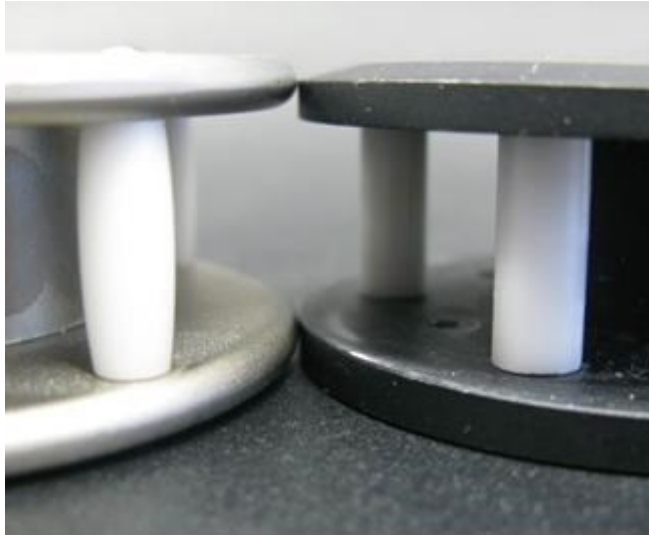


Figura A 5.3: Rodillo convexo a la izquierda y rodillo cilíndrico a la derecha

El tubo que se pretende analizar es el que hasta el momento ha resultado funcionar más adecuadamente, el tubo de Tygon con un diámetro interior de 2,4 mm y un espesor de pared de 1,6 mm. Para la realización de dicho análisis se emplea la rueda con 5 rodillos ya que las curvas realizadas con dicha rueda muestran un claro comportamiento de estancamiento, permaneciendo constante el caudal y presión a partir de una cierta velocidad de rotación.

Se ha elegido la rueda con 5 rodillos y el sistema de tubos no se modifica con respecto al experimento anterior.

Se lleva a cabo el experimento dos veces, para obtener las dos curvas que se muestran a continuación correspondientes a los rodillos cilíndricos y a los rodillos convexos.

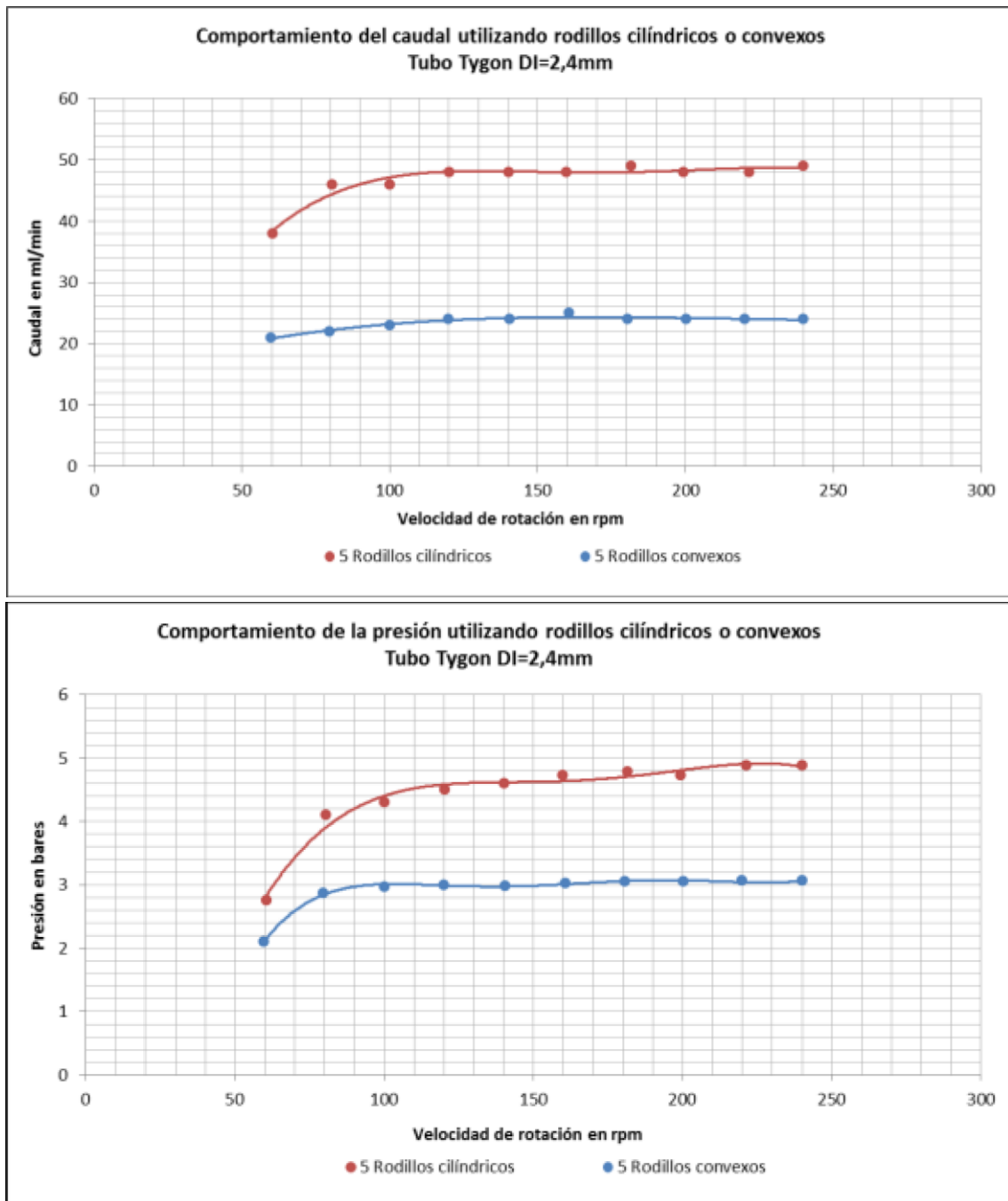


Figura A 5.4: Comparación del comportamiento del caudal y la presión con respecto a la velocidad de rotación de la rueda empleando rodillos cilíndricos o rodillos convexos

Los gráficos obtenidos muestran un resultado distinto al esperado con los rodillos convexos. Con esta ligera modificación de los rodillos se esperaba solucionar el problema del estancamiento. Sin embargo las curvas, tanto con rodillos cilíndricos como con los de forma convexa, muestran unos valores constantes a partir de en torno a 80 rpm, es decir prácticamente desde el comienzo del experimento.

Los valores se estabilizan incluso en valores más bajos con los rodillos convexos, llegando a un máximo de 24 ml/min y una presión de 3 bares, mientras que con los

rodillos cilíndricos se obtenían valores algo mayores, de 48 ml/min de caudal y 5 bares de presión.

Esto indica o bien que la causa del problema no es la expuesta anteriormente sobre el exceso de estrés en la superficie exterior del tubo, o bien siendo dicho efecto el causante no ha sido resuelto mediante la utilización de rodillos convexos.

Los resultados muestran que los rodillos convexos no son una solución adecuada por ello se seguirá empleando rodillos con forma cilíndrica para la realización de los experimentos que vienen a continuación.

Anexo 7. Influencia del diámetro del tubo flexible

El diámetro interior del tubo flexible tiene una influencia directa sobre el caudal a obtener en la salida.

Una selección adecuada del diámetro del tubo es fundamental. El caudal también se ve influido por la velocidad de rotación de la rueda de rodillos y por su diámetro. El objetivo de este estudio es analizar los resultados tanto de caudal como de presión con tubos que tienen diferentes diámetros interiores al ir variando la velocidad de rotación. La rueda de rodillos empleada tiene un diámetro constante de valor 55 mm en todas las mediciones de forma que ese parámetro no es objeto del estudio. Otro parámetro importante objeto de estudio es el comportamiento de la presión. La presión depende del caudal y de la resistencia de salida en el extremo del tubo. La resistencia la opone la boquilla colocada en el extremo del tubo, la cual tiene una longitud de 6 mm y un diámetro interior de 0,2 mm. Este parámetro permanece constante durante la realización de todas las mediciones.

Esta boquilla ha sido realizada con el diámetro menor posible que se puede fabricar con los aparatos de los que se dispone y la longitud mínima siendo a la vez un componente robusto y minimizando las pérdidas de presión.

La pérdida de carga de este elemento cuando circula un caudal de 100 ml/min es de 6,32 bares aproximadamente.

En los experimentos se comparan dos tubos del mismo material y diámetros diferentes, siendo el diámetro la única variable modificada y debiéndose así todas las diferencias a dicha variable.

El análisis sobre la rueda de rodillos no ha demostrado con claridad qué una rueda tenga un mejor funcionamiento que otra ya que influye también el tipo de material empleado en el tubo flexible. Por ello en los experimentos llevados a cabo a continuación se emplean las 3 ruedas de rodillos con 5 rodillos, 6 rodillos y 4 rodillos dobles. Antes de comenzar con las mediciones es importante conocer el rango de revoluciones por minuto necesarias teóricamente para obtener, con el tubo flexible determinado, el caudal fijado en los requisitos. Se expone a continuación el cálculo, para cada diámetro del tubo flexible, de la velocidad de rotación necesaria de trabajo de la rueda para obtener un caudal de 100 ml/min.

Los tubos flexibles empleados son los de Tygon ya que es un material que ha respondido bien ante la carga mecánica aguantando la fricción del tubo con los rodillos.

Además de haber descartado los materiales de Silicona y Norprene por las razones descritas en el capítulo 5.3.2. *Selección del material del tubo*. Los tubos a ensayar tienen un espesor de pared de 1,6 mm y un diámetro interior de 3,2 mm y 2,4 mm respectivamente.

Las fórmulas mostradas a continuación relacionan el caudal obtenido a la salida en función de la velocidad de rotación de la rueda.

$$Q = V \cdot t$$

$$Q = V_R \cdot n$$

$$V_R = \pi \cdot r_T^2 \cdot l_C$$

$$l_C = 2 \cdot \pi \cdot r_R$$

$$V_R = 2 \cdot \pi^2 \cdot r_T^2 \cdot r_R$$

$$Q = 2 \cdot \pi^2 \cdot r_T^2 \cdot r_R \cdot n$$

$$Q = f \cdot n$$

siendo: Q =

caudal V =

volumen t =

tiempo

V_R = volumen por revolución n

= velocidad de rotación r_T =

radio interior del tubo r_R = radio
de la rueda de rodillos

l_C = longitud de la circunferencia que forma el tubo al apoyarse sobre la rueda de rodillos

Hay que tener en cuenta que se toma la longitud l_C como aproximación, un cálculo más preciso requiere la longitud exacta equivalente a la suma de todos los segmentos en que está dividido el tubo al ser comprimido por los rodillos. Por tanto dicho valor depende del número de rodillos.

El volumen por revolución exacto sería la suma de los volúmenes de cada uno de dichos segmentos.

Tratándose de un cálculo para hallar una velocidad de rotación que sirva de orientación para la realización del experimento, es suficiente con el empleo de la longitud aproximada l_C .

Los radios están dados en milímetros y la velocidad de rotación en revoluciones por minuto por tanto es necesario transformar los milímetros cúbicos en mililitros para el manejo de unidades de forma más sencilla.

La fórmula final es la siguiente:

$$Q = 2 \cdot \pi^2 \cdot r_T^2 \cdot r_R \cdot n \cdot 10^{-3}$$

A partir de la fórmula anterior se puede estimar la relación caudal-velocidad de rotación de la rueda.

Se calcula la velocidad de rotación de la rueda de rodillos a la que teóricamente debe girar para obtener un caudal de 100 ml/min empleando la rueda de rodillos de diámetro interior 55 mm y el tubo correspondiente en cada caso.

En el caso del tubo flexible Tygon DI=3,2mm, la velocidad de rotación teórica es de 72 rpm, mientras que para el tubo Tygon DI=2,4mm al tener un menor diámetro requiere mayor velocidad de rotación para obtener el mismo caudal de valor 128 rpm.

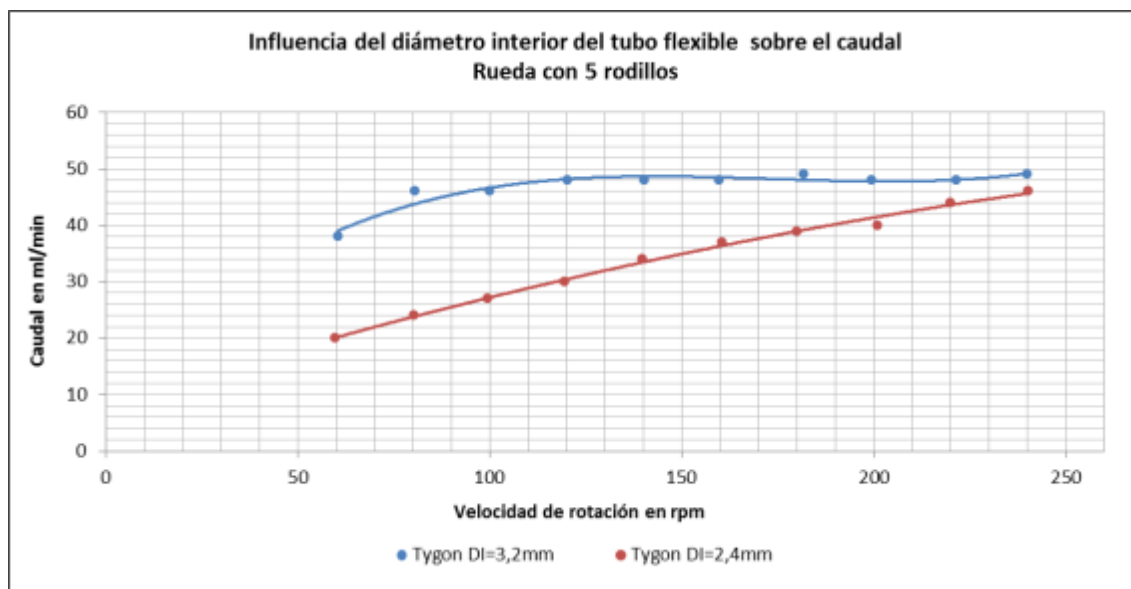
A partir de dichos valores teóricos se realiza el experimento trabajando a una velocidad de rotación del rango de los valores calculados, dicha velocidad es regulada a partir de la tensión de la fuente externa de alimentación del motor.

Se pretende comparar el caudal teórico de 100 ml/min con el caudal obtenido en la práctica correspondiente a la velocidad de rotación de 72 rpm y 128 rpm respectivamente.

El experimento se lleva a cabo 6 veces, ensayando los dos tubos flexibles con cada una de las 3 ruedas de rodillos diferentes.

Los primeros resultados son mostrados en la figura A 5.5.

Corresponden al comportamiento del caudal y de la presión con respecto a la velocidad de rotación de la rueda, al emplear una rueda con 5 rodillos cilíndricos y ambos tubos flexibles: Tygon DI=3,2mm y Tygon DI=2,4mm.



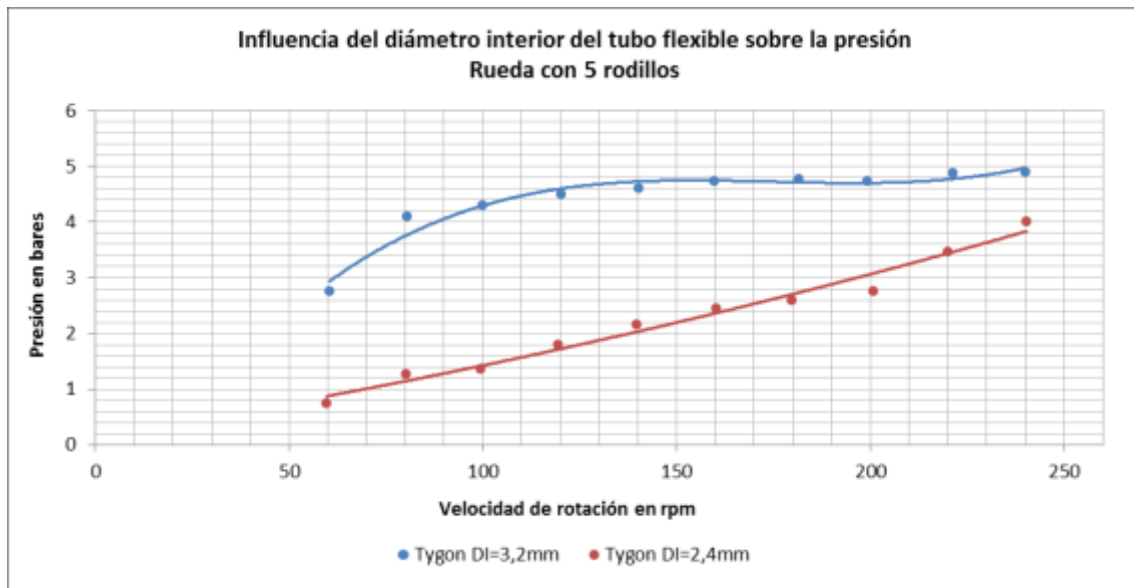


Figura A 5.5: Comparación del caudal y presión obtenidos con tubos de diferente diámetro interior. Rueda con 5 rodillos

Los gráficos muestran claramente la dependencia de la presión con el flujo.

De acuerdo con la teoría para una misma velocidad de rotación se obtienen valores menores del caudal cuanto menor es el diámetro interior del tubo puesto que el volumen eficaz del interior del tubo es menor. Sin embargo la tendencia del tubo flexible Tygon DI=2,4mm, a pesar de proporcionar un menor caudal, es ascendente. Esta tendencia creciente indica que la bomba está funcionando adecuadamente y las paredes del tubo tienen fuerza suficiente para recuperar la forma cilíndrica en el tiempo entre rodillos de forma que el principio peristáltico se lleva a cabo.

Observando la curva perteneciente al tubo Tygon DI=3,2mm se destaca su tendencia constante. Esto significa que el tubo no está funcionando correctamente impidiendo obtener un mayor caudal incluso aumentando la velocidad de rotación de la rueda. Si comparamos los valores de caudal obtenidos en el experimento con los obtenidos en los cálculos teóricos observamos que para ambos tubos flexibles el caudal es menor en la práctica.

En el caso de Tygon DI=3,2mm para una velocidad de rotación de 72 rpm se obtiene un caudal de 42 ml/min en vez de los 100 ml/min teóricos.

En el caso de Tygon DI=2,4mm para una velocidad de rotación de 128 rpm se obtienen tan solo 32 ml/min en vez de los 100 ml/min que deberían obtenerse de acuerdo a la teoría.

La explicación a esta diferencia se halla en la velocidad de recuperación de forma. El tubo es necesario comprimirlo por completo al paso del rodillo de forma que queden aislados ambos lados del tubo. Para ello se requiere una fuerza del empujador suficiente. Al ejercer dicha fuerza sobre el tubo, este queda algo aplastado incluso cuando el rodillo no está oponiéndose al empujador, lo cual implica una recuperación de forma del tubo parcial en vez de total. Esto sumado a la escasa fuerza de las paredes del tubo para recuperar en milésimas de segundo su forma natural hace que el volumen efectivo quede reducido.

Trabajar con un volumen efectivo menor implica un menor caudal lo que conlleva a su vez a una menor presión.

A continuación se realiza el mismo experimento con la rueda de rodillos con 6 rodillos cilíndricos para comprobar si el comportamiento de ambos tubos es el mismo independientemente de la rueda de rodillos empleada.

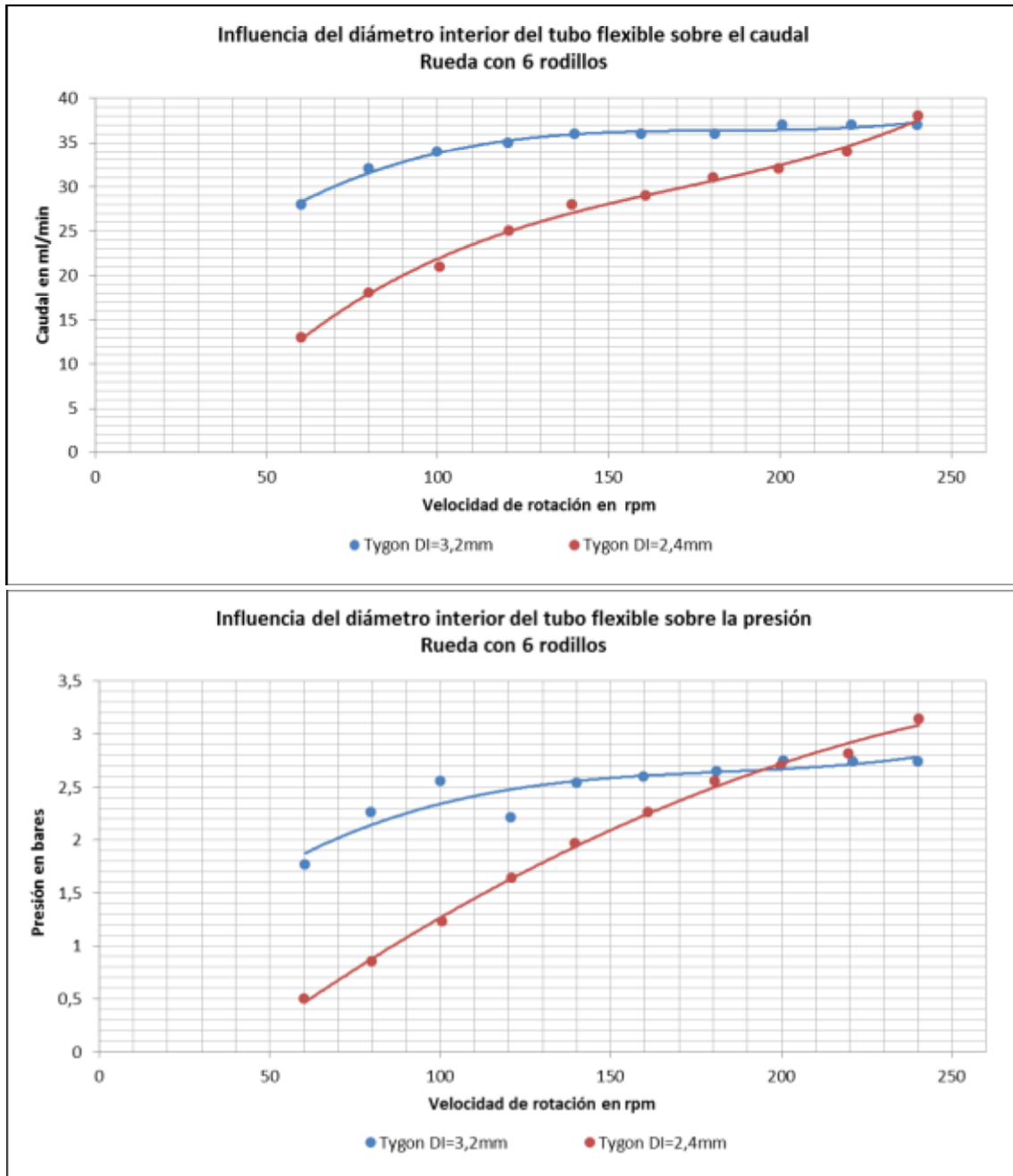


Figura A 5.6: Comparación del caudal y presión obtenidos con tubos de diferente diámetro interior. Rueda con 6 rodillos

Los resultados obtenidos con la rueda que dispone de 6 rodillos son similares a los obtenidos en el experimento anterior donde la rueda empleada disponía de 5 rodillos.

De nuevo se observa que el tubo de menor diámetro produce menor caudal para una misma velocidad de rotación pero sin embargo la tendencia es creciente, lo cual implica que el principio peristáltico se está llevando a cabo correctamente.

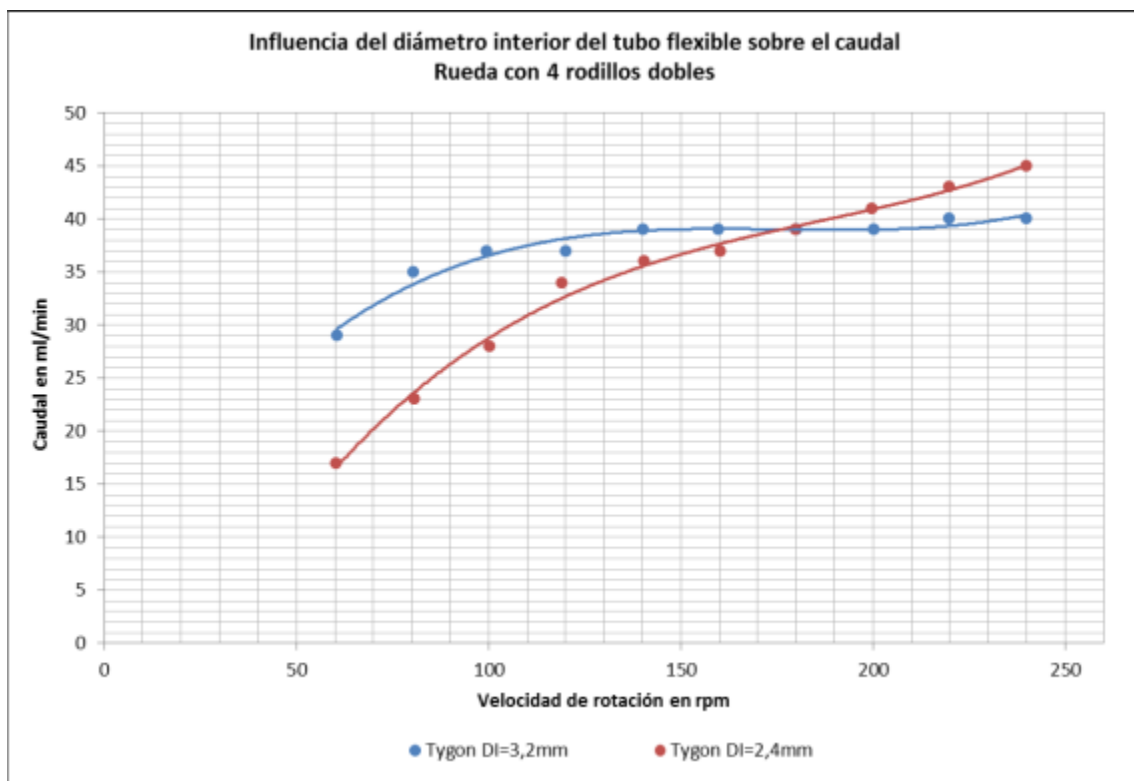
En el caso de Tygon DI=3,2mm el caudal, y por tanto la presión, permanecen constantes debido a la disminución del volumen efectivo causado, como se ha explicado para el experimento anterior, por la insuficiente velocidad de recuperación de las paredes del tubo.

Los valores de caudal obtenidos en la práctica son de nuevo menores que los calculados teóricamente. En este caso con el tubo de mayor diámetro, Tygon DI=3,2mm, se alcanza un caudal de 31 ml/min para la velocidad de rotación de 72 rpm que se corresponde teóricamente a un caudal de 100 ml/min. Mientras que para el Tygon DI=2,4mm el caudal es de 26 ml/min a una velocidad de rotación de 128 rpm. Siendo incluso mayor la diferencia con los teóricos 100 ml/min.

Este experimento demuestra que en la práctica hay factores que determinan numerosas pérdidas, las cuales no están tenidas en cuenta en los cálculos teóricos.

Se puede demostrar también que el tubo con diámetro interior 2,4 mm, a pesar de obtener un caudal menor que el teórico, tiene un mejor funcionamiento pudiendo seguir aumentando la velocidad de rotación para obtener un caudal mayor.

Por último se realiza el experimento con la rueda con 4 rodillos dobles. Los resultados se muestran en los siguientes gráficos.



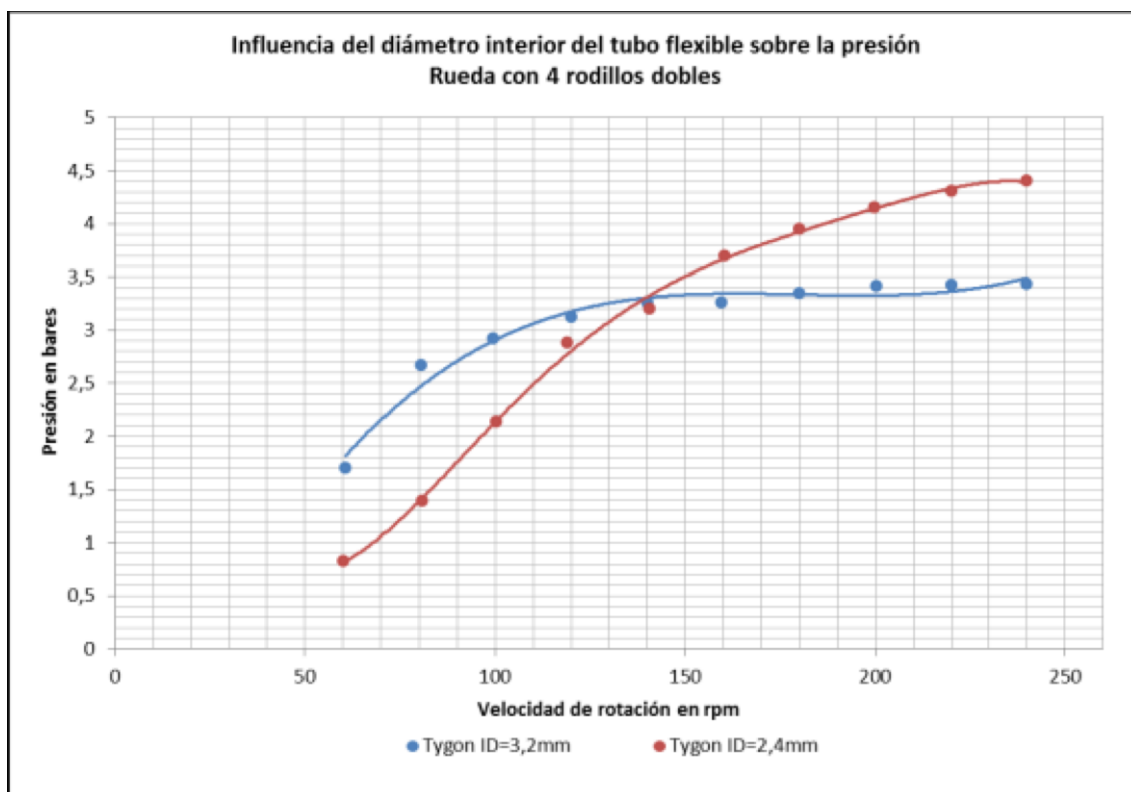


Figura A 5.7: Comparación del caudal y presión obtenidos con tubos de diferente diámetro interior. Rueda con 4 rodillos dobles

Las curvas muestran de nuevo un comportamiento similar a los casos anteriores. El Tygon DI=2,4mm muestra una curva creciente mientras que la curva del Tygon DI=3,2mm permanece constante a partir de en torno a 100 rpm.

También los valores de caudal obtenidos son menores que los calculados teóricamente. En el caso de Tygon DI=3,2mm para una velocidad de rotación de 72 rpm se obtiene un caudal de 32 ml/min en vez de los 100 ml/min teóricos.

En el caso de Tygon DI=2,4mm para una velocidad de rotación de 128 rpm se obtienen 35 ml/min en vez de los 100 ml/min que deberían obtenerse de acuerdo a la teoría.

La siguiente tabla recoge los valores prácticos obtenidos en los tres experimentos anteriores. De esta forma se puede comparar con facilidad los valores de caudal obtenidos a la velocidad de rotación a la que teóricamente deberían obtenerse 100 ml/min.

	5 Rodillos	6 Rodillos	4 Rodillos dobles
Tygon DI=3,2mm	42 ml/min	31 ml/min	32 ml/min
Tygon DI=2,4mm	32 ml/min	26 ml/min	35 ml/min

Tabla A 5.2: Valores de caudal obtenidos en los experimentos a la velocidad de rotación para obtener teóricamente 100 ml/min

Queda demostrado en las tres pruebas que el tubo con diámetro interior 2,4 mm muestra una tendencia más favorable ya que por tener menor diámetro las paredes del tubo flexible

tienen mayor fuerza para recuperar la forma en el escaso periodo de tiempo entre rodillos. A pesar de observar en la tabla anterior que los valores alcanzados con el Tygon DI=3,2mm son mayores, es importante fijarse en que la tendencia del caudal es constante y por tanto no se podrían obtener mayores caudales aumentando la velocidad de rotación.

Acumulación
de agua



Anexo 8. Observaciones en los materiales de Silicona y Norprene

Durante el transcurso de los experimentos se observan otros problemas que llevan al inmediato descarte del material para su uso en esta aplicación. En el caso del tubo de Silicona se observa que las propiedades elásticas del material lo hace inestable ante la presión. Debido a un taponamiento del tubo en la zona del segmento de la bomba, el fluido no puede avanzar acumulándose para formar una burbuja que deforma el tubo (ver figura 5.8).

Figura A 5.8: Inestabilidad de la Silicona ante la presión

Dicha inestabilidad ante la presión junto con las limitaciones físicas del material para alcanzar presiones mayores de 7 bares caracterizan a la Silicona como material no válido para la fabricación del tubo de la bomba peristáltica de alta presión a desarrollar.

Del mismo modo al llevar a cabo un experimento con un tubo de Norprene, se observa una anomalía de este material. Se produce un ligero ensanchamiento del tubo en una zona sin ser sometida a mayor presión (ver figura A 5.9).

Acumulación
de agua



Figura A 5.9: Inestabilidad del Norprene

Aunque el problema que resulta determinante para su descarte es la aparición de pequeñas partículas procedentes del interior del tubo. La bomba peristáltica encuentra su aplicación en la medicina, por ello es esencial el uso de un material que cumpla con los requisitos establecidos por la ley para la seguridad del paciente. El desprendimiento de partículas imposibilita el uso del Norprene como material para la fabricación del tubo flexible.

Anexo 9. Análisis del efecto de la hendidura de los rodillos sobre la presión Se lleva a cabo un nuevo experimento para comprobar la eficacia de los nuevos rodillos tras la optimización y cómo esta hendidura central repercute en los resultados obtenidos de presión.

Se comparan los resultados obtenidos del experimento con la rueda de rodillos cilíndricos con los resultados obtenidos en dicho experimento, en el cual los rodillos están modificados con una hendidura central.

El sistema de tubos es el obtenido tras la optimización.

Se comparan en el siguiente gráfico las presiones alcanzadas en ambos experimentos.

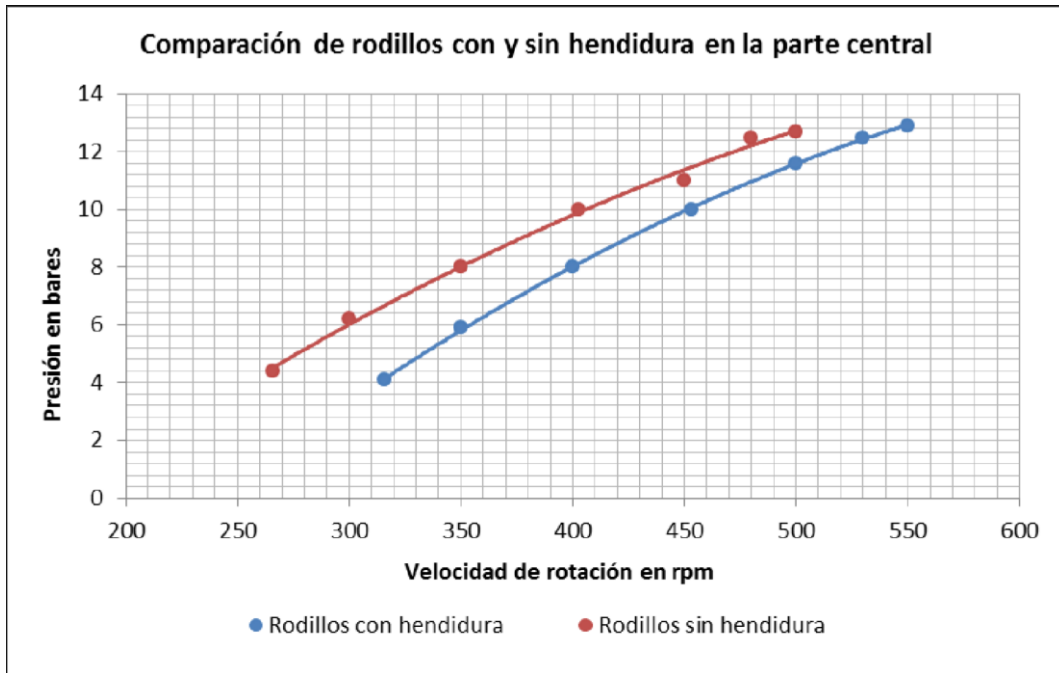


Figura A 5.10: Comparación de los valores de presión obtenidos con una rueda con 6 rodillos cilíndricos con y sin hendidura en la parte central

El gráfico muestra la comparación entre rodillos cilíndricos con y sin hendidura en la parte central. Ambas curvas muestran un comportamiento similar. La curva perteneciente al experimento con rodillos con hendidura está ligeramente desplazada hacia abajo en el eje de ordenadas lo cual indica que para una misma velocidad de rotación de la rueda de rodillos se obtiene un valor de presión algo menor.

La ventaja de esta modificación de los rodillos es la capacidad de obtener presiones más altas ya que, al permanecer el tubo fijo en el centro, es posible aumentar la velocidad de rotación y con ello la presión.

El experimento se ha finalizado para valores de 500-550 rpm debido a que el tubo, en el caso de los rodillos sin hendidura, se desliza hacia los extremos del rodillo dejando así de ser comprimido por el empujador y por tanto dejando de funcionar la bomba peristáltica.

Bibliografía

- [1] Página web de la empresa World of Medicine; <http://www.world-of-medicine.com/>; (Acceso 17.04.2013)
- [2] Bombas peristálticas; www.clarksol.com/html/peristaltic_pump.htm ; (Acceso 24.04.2013)
- [3] Amy Ebelhack; Peristaltic Pumps – Matching the Tubing to the Fluid – Considering peristaltic pump tubing performance parameters; Chemical Processing Magazine, Oktober 2001
- [4] Wikipedia, Silicona; <http://es.wikipedia.org/wiki/Silicona>; (Acceso 02/01/2014)

Bibliografía Anexo

- [1] Universidad de Valladolid, Master en automoción; https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/389/51453/1/Documento6.pdf; (Acceso 18.09.2013)
- [2] Wikipedia, Número de Reynolds; http://es.wikipedia.org/wiki/Número_de_Reynolds; (Acceso 10/12/2013)
- [3] Völklein Friedemann, Thomas Zetterer; Praxiswissen Mikrokomputertechnik (Grundlagen Technologien Anwendungen); 2 Auflage; Vieweg; Verlag; Wiesbaden; Januar 2006; ISBN 3-528-13891-2
- [4] J.Niebuhr, G.Lindner; Physikalische Messtechnik mit Sensoren; Oldenbour-Verlag; 1996; ISBN 3-486-23614-8
- [5] Manual del usuario (Bedienungsanleitung); Conrad Elektronik; Handdrehzahlmesser DT 2L/k
- [6] Norprene https://us.vwr.com/store/catalog/product.jsp?product_id=4638160; (Acceso 14.10.2013)