



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de un mecanismo flexible
de pinzas de cierre súbito para
producir cavitación hidrodinámica**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A N

Luis Ricardo Aguilar Diaz

Rodrigo Alejandro Cortés Valdés

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Francisco Antonio Godínez
Rojano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecer al Dr. Francisco Antonio Godínez Rojano, por todo el apoyo y la paciencia mostrada, los cientos de horas invertidas, así como el conocimiento transmitido desde la realización del servicio social hasta la terminación de este trabajo de tesis. Su orientación y mentoría fueron clave para nosotros no solo para la elaboración de este documento, si no para nuestro crecimiento como profesionistas por lo cual estaremos eternamente agradecidos.

Al Ing. Kristian Ulyses Flores Aviña, por la sesión de orientación brindada para realizar la Optimización Topológica y con ello llegar al diseño de nuestro prototipo.

Al Dr. José Enrique Guzmán Vázquez por su valioso apoyo y facilidades otorgadas durante la realización de las pruebas experimentales para evaluar el desempeño de nuestro prototipo.

A todos nuestros profesores y profesoras que nos transmitieron su conocimiento y experiencia a lo largo de nuestra formación académica.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, así como a la Facultad de Ingeniería y a todo su personal, por brindarnos todos los medios para poder convertirnos más que en profesionistas, en ingenieros de calidad, siempre desde un enfoque humano y de mente crítica.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM, IA100421 Aparatos bioinspirados para producir cavitación por colisión entre superficies sólidas inmersas en líquidos.

DEDICATORIAS

Luis Ricardo Aguilar Diaz

A mi madre, Martha Diaz, por todo su esfuerzo, dedicación y sacrificio para apoyarme a lo largo de mi formación académica. Este logro es por ti y para ti.

A mis hermanas, Brenda y Yazmín, por su cariño y apoyo incondicional, así como por ser mi principal ejemplo y motivación para convertirme en un profesionalista.

A mi padre, Laurencio Aguilar, por todos los valores y principios que me inculcaste desde pequeño.

A mis tíos, Jaime, Rafael y Elia, por confiar en mí y siempre tratar de apoyarme durante mis estudios.

A mis amigos, Mariza, Monserrat y Sebastián, porque gracias a ustedes pude disfrutar cada día de mi vida universitaria.

A Ximena, porque gracias a la compañía, el apoyo y el aprendizaje que me diste pude superar los momentos más difíciles de este proyecto.

Rodrigo Alejandro Cortés Valdés

A mi familia y amigos por haber sido el eje motor de mi crecimiento, tomando con especial anhelo el amor de mi madre, cariño de mi padre y compañía de mi hermano.

La persona que soy es la suma de cada uno de ustedes.

“Hay un libro abierto siempre para todos los ojos:

La Naturaleza”

Jean-Jacques Rousseau

ÍNDICE TEMÁTICO

RESUMEN.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 Antecedentes.....	8
1.2 Definición del problema.....	17
1.3 Justificación.....	17
1.4 Objetivo general.....	18
1.5 Objetivos Particulares.....	18
2. FUNDAMENTOS Y DEFINICIONES BÁSICAS.....	20
2.1 Fluidos newtonianos y no newtonianos: Propiedades y características.....	20
2.1.1 Viscosidad	20
2.1.2 Clasificación de fluidos	21
2.1.3 Número de Reynolds	25
2.1.4 Fluidos newtonianos incompresibles	26
2.2 Cavitación (Definición y tipos)	27
2.2.1 Presión de Vapor.....	27
2.2.2 Formación de la Cavitación.....	27
2.2.3 Tipos de Cavitación.....	28
2.3 Cavitación hidrodinámica	30
2.3.1 Número de Cavitación.....	32
2.3.2 Tubos Venturi.....	33
2.4 Mecanismos Flexibles.....	37
2.4.1 Ventajas de los mecanismos flexibles.....	39
2.4.2 Desafíos para el diseño de mecanismos flexibles.....	40
2.4.3 Técnicas de diseño de los mecanismos flexibles.....	41
3. METODOLOGÍA DE DISEÑO y PLANEACIÓN.....	43
3.1 Proceso de diseño general.....	43
3.2 Definición del problema y Planeación.....	47
3.2.1 Especificaciones Objetivo.....	47
3.2.2 Selección de un prototipo de referencia para la miniaturización.....	48
4. PROCESO DE DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE PINZAS.....	50
4.1 Miniaturización del dispositivo de pinzas mediante el diseño de un mecanismo rígido.....	50
4.1.1 Descomposición funcional en sistemas del mecanismo.....	51
4.1.2 Diseño de la geometría del sistema para producir cavitación	53
4.1.3 Diseño del sistema de accionamiento, actuación y soporte.....	57
4.1.4 Materiales y manufactura del mecanismo rígido de pinzas.....	60
4.1.5 Pruebas experimentales del mecanismo rígido de pinzas.....	63
4.2 Estrategia para el diseño del mecanismo flexible.....	67
4.3 Desarrollo del concepto del mecanismo flexible de pinzas (diseño conceptual)	69

4.3.1	Investigación y estado del arte en mecanismos similares.....	69
4.3.2	Generación, combinación y evaluación de conceptos.....	75
4.3.3	Optimización topológica para el diseño del elemento flexible.....	83
4.4	Materialización del concepto del mecanismo flexible de pinzas (diseño de forma)....	101
4.4.1	Proceso de rediseño.....	101
5.	DISEÑO DE DETALLE, FABRICACIÓN Y MINIATURIZACIÓN DEL MECANISMO FLEXIBLE DE PINZAS.....	111
5.1	Modelado geométrico del mecanismo flexible de pinzas.....	111
5.1.1	Diseño del tubo Venturi en el mecanismo flexible de pinzas.....	113
5.2	Metodología de manufactura.....	115
5.2.1	Definición del proceso de fabricación.....	115
5.2.2	Evaluación y Selección de materiales.....	118
5.3	Análisis de esfuerzos.....	123
5.4	Construcción del prototipo experimental.....	130
5.5	Proceso de miniaturización del mecanismo flexible de pinzas.....	133
5.5.1	Rediseño para la miniaturización.....	134
5.5.2	Fabricación del prototipo miniaturizado.....	136
5.5.3	Evaluación experimental del prototipo miniaturizado.....	139
6.	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	142
6.1	Diseño e instrumentación del arreglo experimental para el estudio de la cavitación por el cierre súbito del mecanismo flexible.....	142
6.2	Pruebas experimentales.....	145
6.3	Análisis y discusión de resultados experimentales.....	145
6.3.1	Cinemática del cierre súbito.....	145
6.3.2	Formación de estructuras y patrones de cavitación hidrodinámica.....	154
6.3.3	Deformación plástica de la pinza.....	166
6.4	Caracterización del flujo.....	167
6.5	Especificaciones finales.....	170
	CONCLUSIONES.....	171
	TRABAJO A FUTURO.....	172
	REFERENCIAS.....	175
	ANEXOS.....	179
	ANEXO A. TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES DE LA CINEMÁTICA DEL CIERRE SÚBITO.....	179
	ANEXO B. CÓDIGO FUENTE PARA EL MODELADO DE LA CINEMÁTICA DEL CIERRE SÚBITO.....	181

RESUMEN

El presente trabajo consistió en el diseño, la fabricación y la experimentación del prototipo de un mecanismo flexible de pinzas para imitar (hasta cierto punto) el fenómeno de cavitación hidrodinámica inducido por el cierre súbito de la pinza de un camarón pistola. El diseño de este mecanismo se basó en el desarrollo y la aplicación de una metodología iterativa junto con el uso de herramientas CAE como la Optimización Topológica.

El prototipo se fabricó por medio de manufactura aditiva empleando el polímero ABS. Las dimensiones finales de este prototipo representaron una reducción de tamaño de aproximadamente el 80% con respecto a prototipos fabricados anteriormente, con los que, de igual forma, se buscaba emular el proceso de cierre súbito. Asimismo, al ser un mecanismo flexible se redujeron considerablemente el número de piezas utilizadas para su fabricación.

Por último, como parte de la validación del diseño y el funcionamiento del prototipo se realizaron pruebas experimentales activando el mecanismo dentro de un tanque con agua. El proceso de cierre del mecanismo fue videograbado a 6,000 fps con una cámara de alta velocidad. A partir del análisis de estos vídeos se desarrolló un modelo matemático para describir la cinemática del cierre súbito de la pinza del prototipo. Dicha aproximación se basa en un sistema masa – resorte – amortiguador no lineal. Además, en los vídeos se observó la generación de un chorro líquido acompañado de diversas estructuras de cavitación como vórtices anulares y la implosión de cúmulos de burbujas. Igualmente, se pudo estimar una velocidad de flujo de entre 12.8 y 16.2 m/s, lo cual, aunado a un tiempo de cierre de 2.167 ms, evidencia la capacidad del mecanismo para generar cavitación hidrodinámica.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la naturaleza ha demostrado ser un eje rector para el desarrollo de tecnologías innovadoras que resuelvan diversos problemas para el ser humano. Los mecanismos detrás del vuelo de las aves, que ayudaron al diseño de aeronaves o la capacidad de adherencia de una planta conocida como “cardo”, que facilitó la creación del velcro son algunos ejemplos en los que el hombre ha utilizado a la naturaleza como fuente de inspiración para la resolución de diferentes problemáticas.

A este tipo de proceso que busca emular diferentes sistemas y/o elementos naturales se le conoce como *diseño biomimético*.

Bajo esta misma línea de acción, surgió el interés por estudiar el mecanismo detrás del cierre súbito o chasquido de la tenaza mayor de un camarón de la familia de los alféidos conocido como “camarón pistola”, ya que se ha observado que este proceso genera una onda de choque asociada al colapso de una burbuja de cavitación hidrodinámica, la cual cuenta con la energía suficiente para aturdir o matar a sus presas.

1.1 Antecedentes

Uno de los primeros esfuerzos por entender este mecanismo y caracterizar el flujo cavitante producido por el cierre de las pinzas estuvo a cargo de los investigadores holandeses Michel Versluis y D. Lohse en el año 2000 [1]. En esta investigación se trabajó con especímenes vivos de la familia *Alpheus heterochaelis* (~5.5 cm de longitud) y se demostró que la morfología de la tenaza o quela, de aproximadamente la mitad de la longitud del cuerpo del camarón (~2.8 cm), está formada por los siguientes elementos (ver figura 1): Un músculo de apertura y cierre conocido como *músculo proximal*, una pinza móvil llamada *dáctilo* la cual contiene una protuberancia o tubérculo anguloso conocido como *émbolo*, el cual a su vez encaja en una cavidad presente en una pinza fija, prolongación del propodio [2].

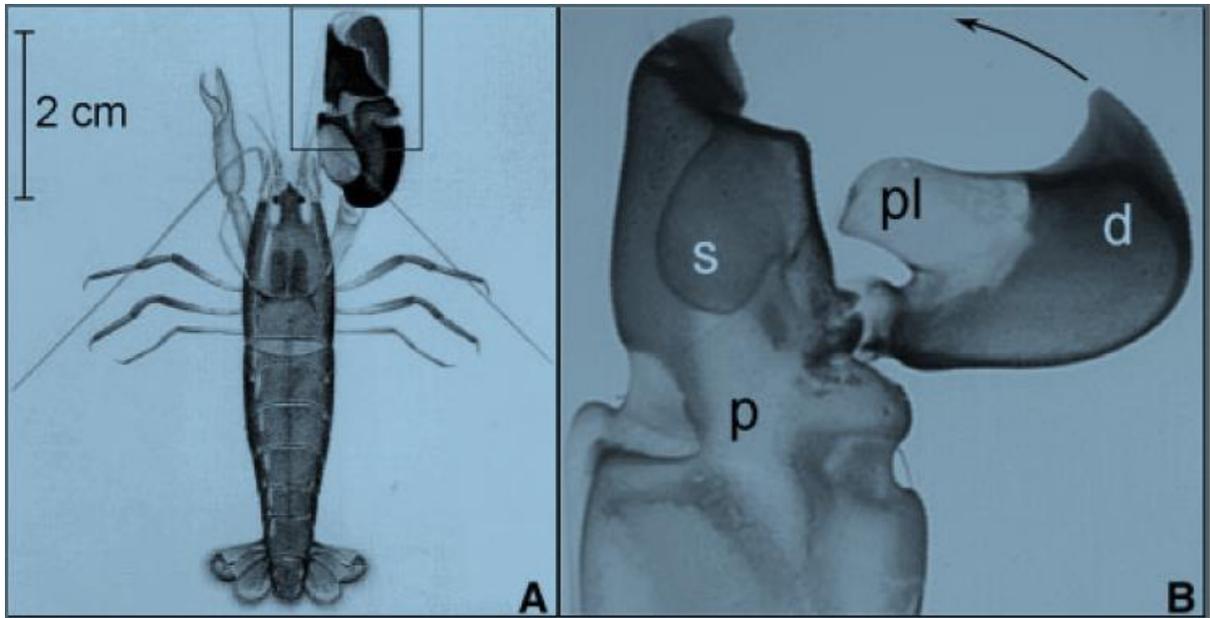


Figura 1. (A) Comparación del tamaño de la tenaza mayor (~ 2.8 cm) con el cuerpo de la especie *Alpheus heterochaelis* (~5.5 cm). (B) Partes principales del mecanismo de cierre súbito de la tenaza mayor: (d) pinza móvil o dactilo, (p) pinza fija, (s) cavidad fija y (pl) émbolo [1].

Para realizar la apertura, la pinza móvil o dactilo (d) se mueve ascendentemente debido a la contracción del músculo de apertura-cierre; una vez que el émbolo (pl) queda al descubierto, el músculo proximal se relaja y libera la tensión acumulada por su contracción, esto permite que el dactilo (d) se mueva velozmente con una velocidad angular de hasta 3500 rad/s hasta que el émbolo encaja con la cavidad presente en la pinza fija lo que resulta en la formación de un jet o chorro de agua con una velocidad de alrededor de 25 m/s [1].

En primera instancia la emisión del chasquido de entre 190 y 210 decibeles fue atribuida al contacto mecánico o choque entre los bordes del dactilo y la pinza fija, sin embargo, experimentos realizados con hidrófonos y con cámaras de video de alta velocidad (40,500 cuadros por segundo) demostraron que el fuerte sonido, con espectros de frecuencia de hasta 200 kHz, es originado por el colapso de burbujas de cavitación generadas en el chorro de agua de alta velocidad producto del cierre súbito de la pinza.

La velocidad del chorro de agua es tan alta que la presión hidrostática (300 kPa) cae por debajo de la presión de vapor (2 kPa), esto provoca que pequeñas burbujas de aire contenidas en el agua de mar llamadas núcleos (1-50 μm de radio) empiecen a crecer hasta un radio de 3.5 mm mientras están contenidas en la zona de baja presión, para posteriormente colapsar violentamente debido al

repentino incremento de la presión en la periferia de la burbuja. Este colapso se produce en aproximadamente $300 \mu\text{s}$ y a 3 mm por delante de la punta de la pinza.

La figura 2 nos muestra que la rotación del dactilo comienza en el cuadro 1 en $t = -1250 \mu\text{s}$. El cierre completo de la tenaza fue alcanzado en el cuadro referenciado con el número 2, $650 \mu\text{s}$ antes del colapso de la burbuja, lo que arroja un tiempo de cierre de aproximadamente $500 \mu\text{s}$, además, el pico principal de la emisión de sonido ocurre en $t = 0 \mu\text{s}$ (cuadro referenciado con el número 3) y coincide con el colapso de la burbuja de cavitación.

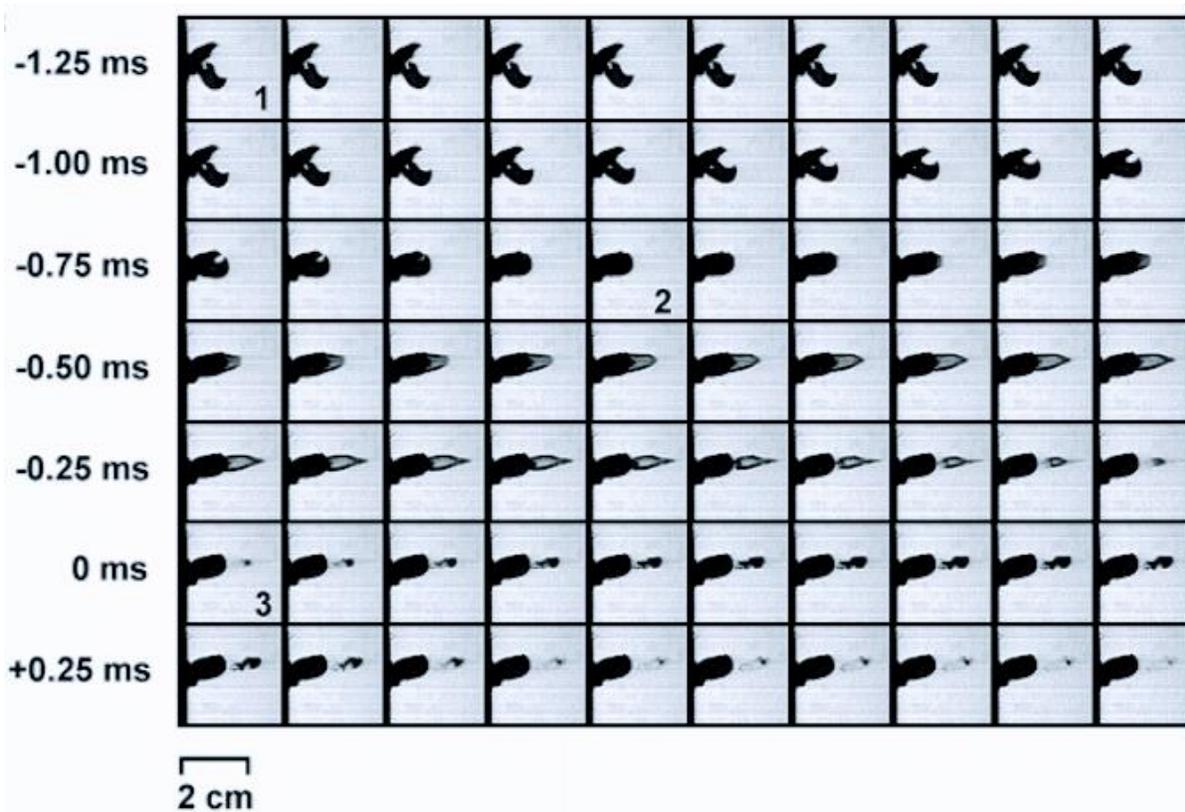


Figura 2. Secuencia de imágenes de alta velocidad muestra el cierre de la pinza móvil, tomada a intervalos de $25 \mu\text{s}$ ($40,500 \text{ fps}$) [1].

En el año 2013 un grupo de investigadores alemanes desarrollaron un modelo mecánico para tratar de reproducir el cierre de la pinza móvil y con esto entender de mejor forma la generación del chorro de agua al momento del cierre súbito de la misma [3]. El diseño de este prototipo de aproximadamente 30 cm de alto por 22.5 cm de longitud tomó como base el escaneo y la renderización 3D de la tenaza de un espécimen de la familia *Alpheus bellulus* y con ello se generó

el contorno de la tenaza y reprodujo la geometría del cierre (ver figura 3), para posteriormente trasladarlo a un modelo CAD.

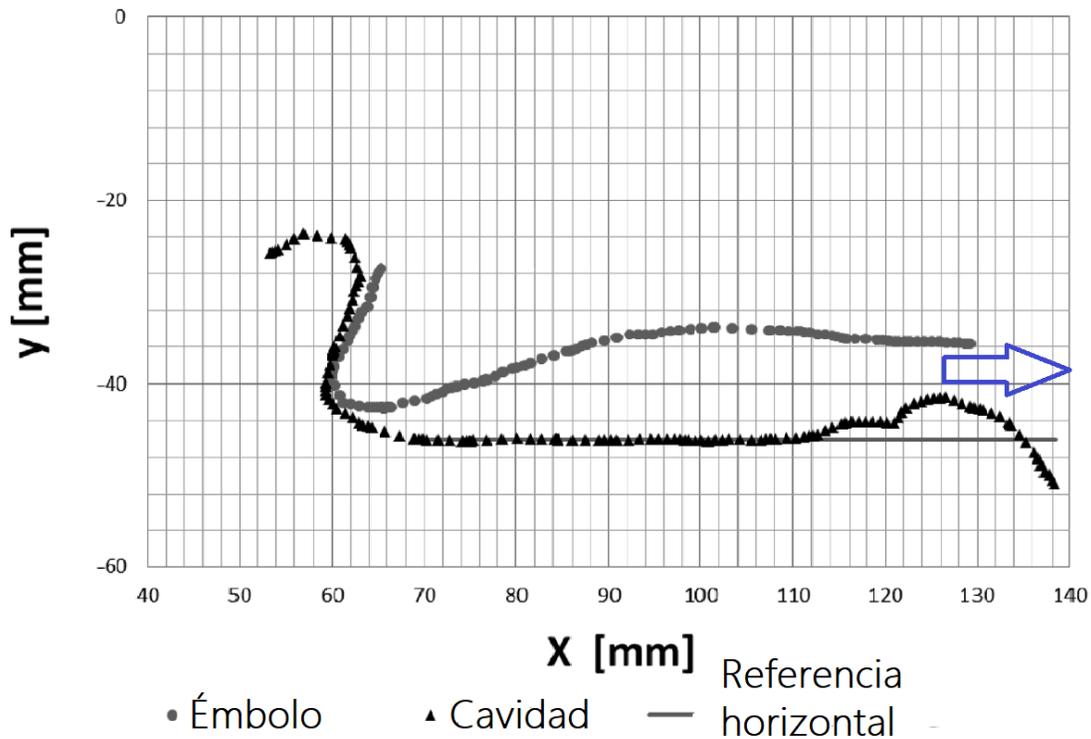


Figura 3. Puntos de contorno en el plano de la sección transversal (plano x-y). El canal de flujo está formado por el espacio entre los contornos del émbolo (puntos grises) y la cavidad presente en la pinza fija (triángulos negros). La posición cerrada se alcanza cuando el émbolo de la pinza móvil está en contacto con la concavidad de la pinza fija. La flecha indica la dirección del flujo [3].

En la figura 4 se aprecia que el modelo consta de una pinza superior la cuál presenta una protuberancia o diente en la parte inferior de la misma, además de una cavidad formada por un perfil de acrílico con base en el contorno de una pinza fija, a su vez, este perfil está en medio de dos placas paralelas de acrílico separadas 3 cm. Esta geometría busca recrear el canal por el que el flujo de agua circula al momento del cierre de la tenaza.

El mecanismo presenta un pivote fijo con respecto al cual gira la pinza superior al momento de ser accionada por un sistema de resortes sujetos tanto a la base como a la misma pinza superior por medio de una unión pernada (ver figura 4).

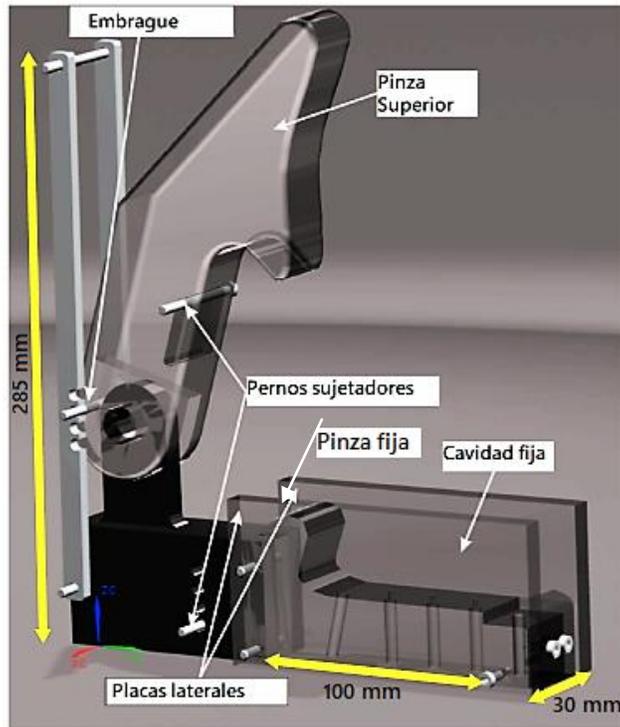


Figura 4. Modelo CAD de la tenaza ampliada a una escala de 70:1, con el émbolo en posición de apertura vertical máxima (81°). En el pivote se incluye un eje a los dos cuerpos, por lo que el émbolo puede girar a la posición de cierre. Para acelerar el émbolo a la velocidad angular requerida un resorte se estira entre los pernos sujetadores [3].

Dado que el objetivo de la experimentación en este modelo era entender la formación del flujo de alta velocidad en el momento del cierre de la tenaza, se realizó un análisis dimensional entre la tenaza del camarón y el modelo para reproducir las condiciones hidrodinámicas que originan el flujo a una escala de 70:1. Considerando lo anterior y con base en las propiedades de los fluidos de trabajo (agua y glicerina), se obtuvo un tiempo de cierre de la tenaza de 0.5 s y una velocidad de flujo de 1 m/s, los cuales distan mucho de aproximarse a los valores reales presentes en el cierre de la tenaza del camarón. Por lo tanto, el modelo ampliado puede mostrar las características principales del flujo, pero no muestra ningún efecto de cavitación [3].

Debido a esta problemática, en el año 2018 un grupo de ingenieros mexicanos se dieron a la tarea de diseñar y probar un dispositivo mecánico [4] para tratar de mejorar los resultados obtenidos con el prototipo antes descrito y con ello producir cavitación transitoria de forma repetitiva y controlada, imitando el mecanismo presente en el cierre de la tenaza mayor de los camarones alféidos.

La figura 5 muestra el modelo CAD del dispositivo mecánico, el cual consiste en un par de pinzas (mordazas), cada una con un contorno interno que se ajusta a una geometría de medio tubo Venturi.

La pinza inferior está unida rígidamente entre dos placas paralelas ópticamente transparentes (formando un cuenco) y la pinza superior gira alrededor de un pivote. Las pinzas se montan por medio de una serie de tornillos a las placas paralelas de acrílico de tal manera que cuando se cierran se forma un tubo Venturi con un extremo abierto y uno cerrado (ver figura 6).

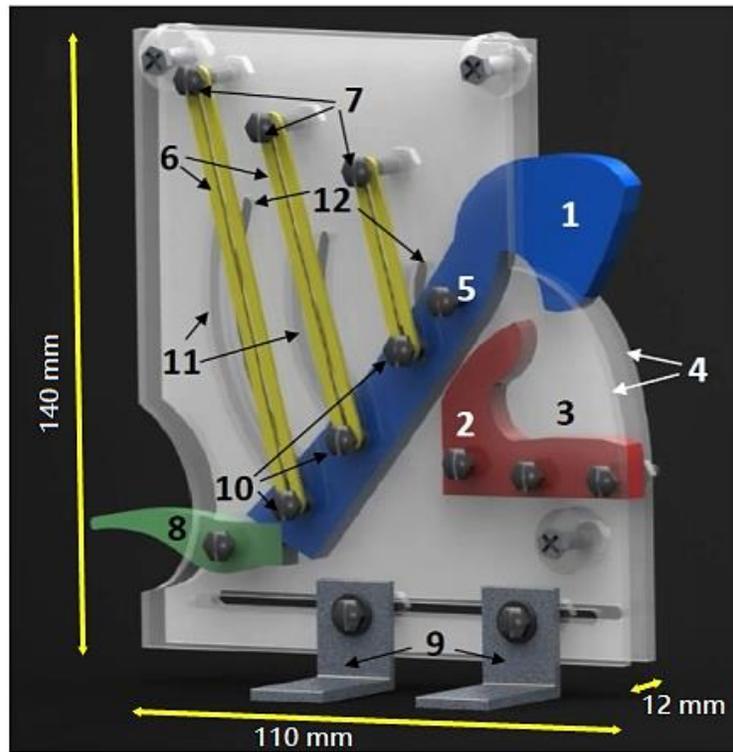


Figura 5. Modelo CAD del dispositivo mecánico para generar cavitación transitoria en su posición de apertura. 1) Pinza superior giratoria; 2) pinza inferior fija; 3) cuenco; 4) paredes de acrílico; 5) pivote; 6) conjunto de ligas de goma; 7) tornillos de sujeción (ligas); 8) gatillo mecánico; 9) soportes; 10) pernos deslizantes; 11) ranuras guía [4].

Para los experimentos, el dispositivo fue sumergido 15 cm en un tanque de paredes transparentes lleno de agua en condiciones de laboratorio (20°C, 77.86 kPa). La pinza superior giratoria es bloqueada en su posición de apertura; entonces, al momento de activar el gatillo mecánico la pinza superior se libera y es impulsada por la contracción de las ligas cerrándose en menos de 9 ms.

En este experimento se utilizó una cámara Phantom v1212 de alta velocidad (40,000 fps) para capturar las características del flujo inducido por el movimiento relativo entre las pinzas. El análisis de las imágenes reveló que la velocidad del flujo es tan alta (14.5 m/s) que propicia la formación de estructuras cavitantes, como desprendimiento de nubes, lóbulos de vapor, un vórtice anular, vórtices contrarrotantes y nubes de burbujas, como se muestra en la figura 6.

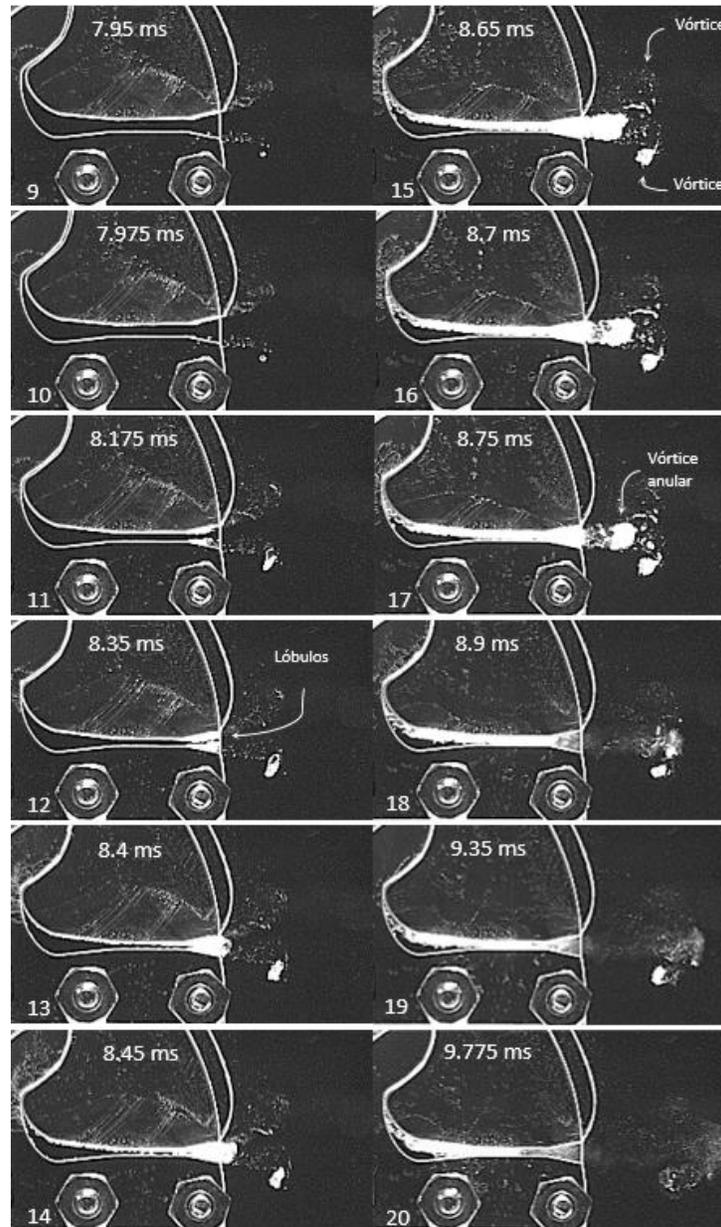


Figura 6. Secuencia fotográfica tomada con una cámara de alta velocidad que muestra el flujo cavitante inducido por el movimiento de las pinzas [4].

La secuencia de cuadros 15 a 19 (ver figura 6) nos muestran la formación de un vórtice anular desprendiéndose de un lóbulo de vapor (cuadro 17), para posteriormente colapsar súbitamente en aproximadamente 0.15 ms (cuadro 18), dejando tras de sí dos nubes de burbujas (cuadro 19) [4].

En el año 2019, Xin Tang y David Staack [5] desarrollaron un dispositivo mecánico bioinspirado en el cierre de las pinzas con el fin de investigar la formación de plasma y la emisión de fotones registrada en el colapso de las estructuras de cavitación.

Este dispositivo fue fabricado vía manufactura aditiva basada en una tomografía de micro rayos x hecha al molde de una tenaza de una especie de camarón pistola conocida como *Alpheus formosus*. Además de esto, se utilizó un resorte torsional para accionar la pinza y así proporcionarle la fuerza y la velocidad suficiente para producir el flujo de alta velocidad que promueva la formación de estructuras cavitantes, su colapso y la generación de ondas de choque y plasma. La figura 7 muestra la morfología correspondiente a la tenaza del camarón *Alpheus formosus* y el renderizado en 3D de la misma. Se puede observar la presencia de un canal de agua a la salida de la cavidad presente en la pinza fija, que durante el proceso de cierre forma una especie de boquilla con el dácilo.

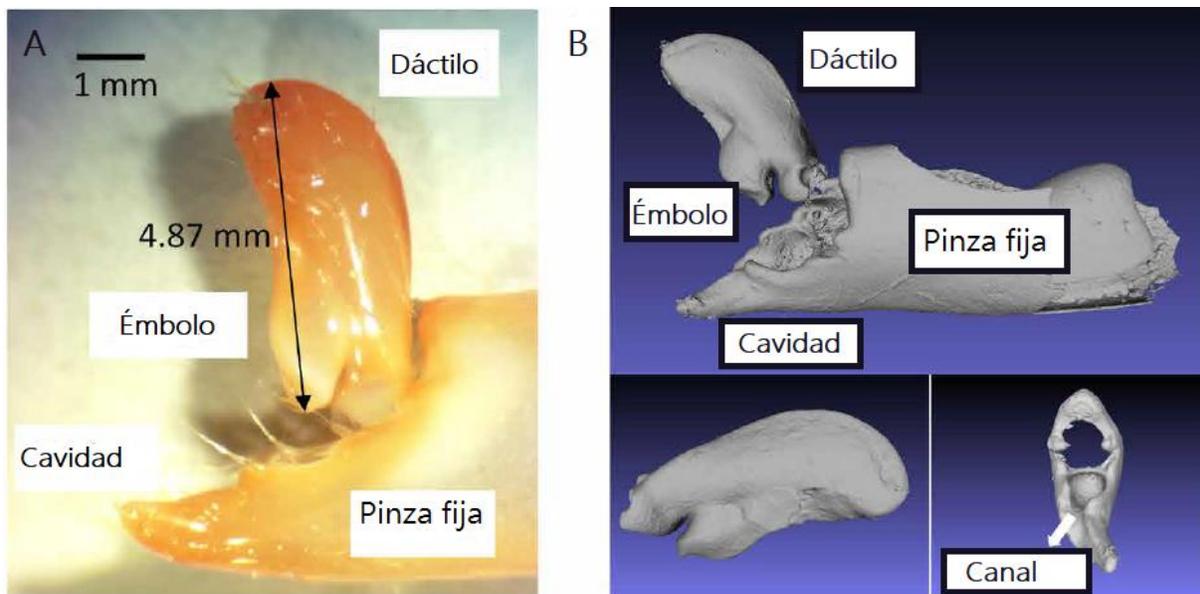


Figura. 7 (A) Morfología de la tenaza del camarón *Alpheus formosus*. (B) Renderizado 3D de malla de la pinza [5].

El modelo de la tenaza fue fabricado a una escala de 5:1 con el objetivo de facilitar la manufactura de este y su integración mecánica, además, está dividido en 2 partes múltiples separadas: La parte del dácilo (24.35 mm de longitud) y la parte de la pinza fija (ver figura 8). Además, el mecanismo de cierre consiste en dos grandes componentes que contribuyen a la operación: El émbolo y la cavidad presente en la pinza fija. El émbolo encaja en la cavidad de la pinza fija la cual desplaza toda el agua contendida dentro de esta a través del canal de flujo.

La parte trasera del dácilo fue modificada para poder fijar el resorte torsional a un eje el cual está sujeto a un rodamiento de bolas, como se muestra en la sección D de la figura 8. En el caso de

la estructura de la pinza fija fue montada rígidamente debajo del dactilo a una base de acrílico. El volumen final de la cavidad del dedo fijo fue de 222.89 mm^3 .

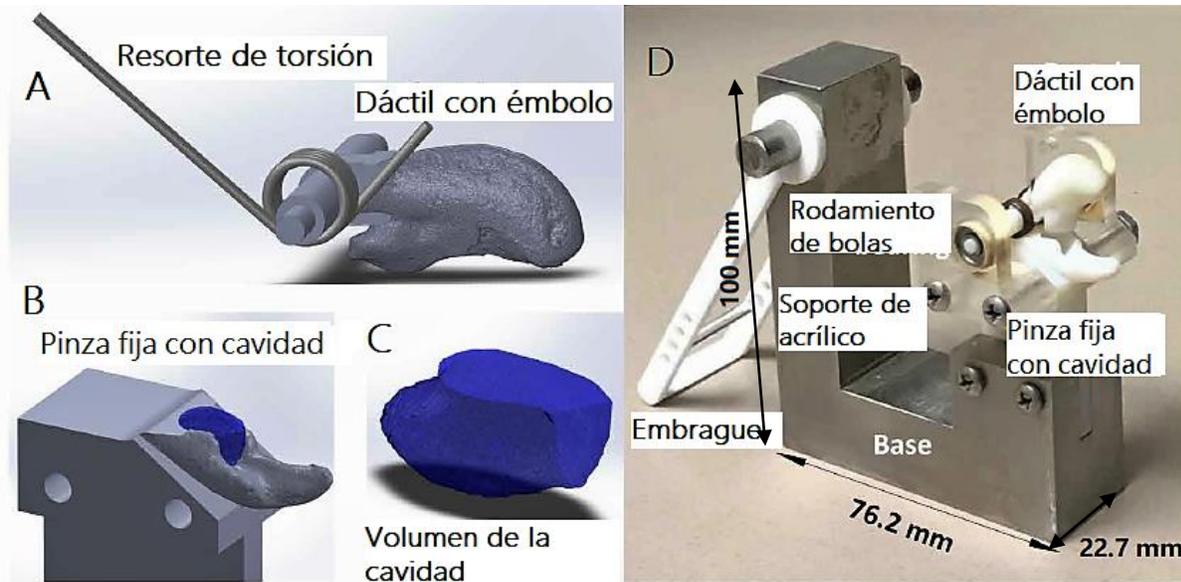


Figura 8. (A) Dáctil - émbolo con eje de paso y resorte de torsión. (B) Dedo inmóvil y volumen de la cavidad con un ancho de canal de salida 3.3 [mm]. (C) Geometría de volumen de la cavidad capturada en CAD. (D) Dispositivo bioinspirado fabricado con un resorte de torsión y un embrague [5].

La figura 9 muestra una serie de imágenes capturadas con una cámara de alta velocidad (60,000 fps), en las cuales se observa la formación de estructuras cavitantes al momento del cierre; esto debido a que la velocidad tangencial del dactilo (20.9 m/s) induce la formación de un chorro de agua con una velocidad de entre 25.6 a 37.4 m/s en aproximadamente 1.5 ms, lo cual es comparable a las velocidades registradas por Versluis [1] del flujo presente en el cierre de la tenaza de especímenes vivos [5].

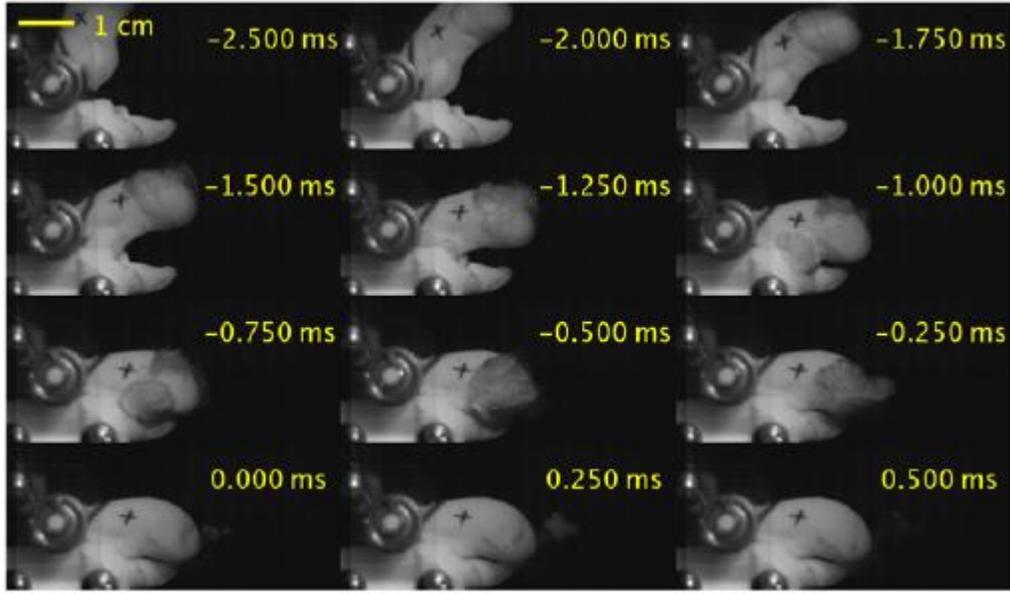


Figura 9. Imágenes registradas por cámara de alta velocidad durante la operación del dispositivo, enfatizando la evolución de la cavitación [5].

1.2 Definición del problema

A pesar de que en tiempos recientes algunos modelos y dispositivos de pinzas inspirados en las tenazas del camarón pistola han sido capaces de generar cavitación hidrodinámica, su gran tamaño (largo, ancho y alto en el orden de decenas de centímetros) y la gran cantidad de partes que se requieren para su fabricación dificultan su aplicación en áreas como la microfluídica y la biomedicina. Así mismo, en algunos casos el tamaño del mecanismo difiere con las dimensiones de la pinza de un espécimen real lo que obstaculiza el estudio de las causas que originan la presencia de fenómenos como la sonoluminiscencia a esas escalas, por lo cual se requiere el diseño de un prototipo de menor tamaño, con una reducción significativa de partes y cuyo mecanismo sea capaz de producir cavitación hidrodinámica.

1.3 Justificación

El diseño, la fabricación y la miniaturización de este dispositivo de pinzas dará la pauta para posibles aplicaciones en procedimientos biomédicos e industriales ya que se puede aprovechar la energía liberada del colapso de las burbujas de cavitación en la eliminación de cálculos renales y uretrales (litotricia), la liberación de venas obstruidas en enfermedades relacionadas con la trombosis

como infartos al miocardio o accidentes cerebrovasculares, así como en el tratamiento de tumores cancerígenos.

En el área industrial, la emisión de ondas de choque, la formación de micro jets de fluido y el tamaño compacto del prototipo pueden ayudar en la limpieza de ductos hidráulicos y neumáticos a un bajo costo, así como en la limpieza y purificación de agua o en sistemas de inyección de combustible.

Asimismo, el diseño y la miniaturización de nuestro mecanismo facilitaría el estudio de la cavitación hidrodinámica en diferentes geometrías de Tubos Venturi.

1.4 Objetivo general

Diseñar, fabricar, probar y miniaturizar un mecanismo de pinzas mecánicas de cierre súbito con la capacidad de producir cavitación hidrodinámica.

1.5 Objetivos particulares

1. Realizar el diseño biomimético de un mecanismo de pinzas de cierre súbito basado en la morfología del camarón pistola para producir cavitación hidrodinámica.
2. Reducir el tamaño del diseño propuesto en [4] con el fin de poder introducirlo en ductos hidráulicos no mayores a 5 cm de diámetro interno.
3. Proponer una metodología de diseño adecuada para cumplir con los objetivos mencionados anteriormente.
4. Realizar el análisis y la selección de materiales adecuados para la fabricación de un prototipo funcional del mecanismo de pinzas.
5. Realizar el análisis de esfuerzos y deformaciones presentes en el mecanismo de pinzas empleando software especializado basado en el método de los elementos finitos.
6. Construir un prototipo funcional del mecanismo de pinzas diseñado.
7. Miniaturizar el prototipo funcional, con el fin de tener el diseño de un mecanismo de pinzas a escalas milimétricas.
8. Desarrollar un modelo matemático para describir la dinámica del mecanismo.

- 9.** Validar experimentalmente el diseño final propuesto del mecanismo de pinzas desarrollando pruebas de desempeño con el objetivo de observar estructuras características de cavitación hidrodinámica.
- 10.** Analizar y comparar los resultados experimentales con resultados teóricos y numéricos de prototipos desarrollados en la literatura con el fin de proponer mejoras en el diseño para un trabajo futuro.
- 11.** Obtener los parámetros necesarios para caracterizar el flujo inducido por el cierre súbito del mecanismo de pinzas.

II. FUNDAMENTOS Y DEFINICIONES BÁSICAS

En este capítulo se presentan algunos fundamentos teóricos y definiciones básicas necesarias para mejorar el entendimiento de los fenómenos físicos involucrados en la dinámica del cierre súbito de la pinza mayor del camarón pistola, principalmente los relacionados con la cavitación hidrodinámica. Además, se presenta una breve introducción a los mecanismos flexibles, a sus principales ventajas, los desafíos que presentan, así como algunas técnicas de diseño de este tipo de mecanismos.

2.1 Fluidos newtonianos y no newtonianos: propiedades y características

Un fluido es aquel material que se deforma de manera continua bajo la acción de un esfuerzo cortante y el cuál adopta la forma del recipiente que lo contiene.

2.1.1 Viscosidad.

La viscosidad es una medida cuantitativa de la resistencia de un fluido a fluir. Más específicamente, la viscosidad determina la velocidad de deformación del fluido cuando se le aplica un esfuerzo cortante dado. Los fluidos pueden tener un amplio rango de viscosidades [6].

La fuerza que un fluido ejerce sobre un cuerpo en la dirección del flujo se llama *fuerza de arrastre*, y la magnitud es debida, en parte, a la fricción causada por la viscosidad [7].

La viscosidad de un fluido es una propiedad termodinámica y varía con la temperatura y la presión. En un estado dado (P, T) hay un amplio rango de valores para los distintos fluidos más comunes. En general, la viscosidad de un fluido aumenta sólo débilmente con la presión, sin embargo, la temperatura tiene un efecto mucho más marcado. Además, la viscosidad μ de los gases aumenta con la temperatura T, mientras que la de los líquidos disminuye [6].

En la mecánica de fluidos es muy común el empleo de la viscosidad cinemática, la cual proviene del cociente de la viscosidad dinámica μ , con respecto a la densidad ρ .

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1)$$

La tabla 1 presenta una lista de viscosidades dinámicas y cinemáticas de ocho fluidos a presión y temperatura estándar.

Tabla 1. Viscosidad dinámica y cinemática de diferentes fluidos a 1 atm y 20 °C [6].

Fluido	Viscosidad dinámica $\mu \left[\frac{Kg}{m \cdot s} \right]$	Densidad $\rho \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$	Viscosidad cinemática $\nu \left[\frac{m^2}{s} \right]$
Hidrógeno	8.8×10^{-6}	0.084	1.05×10^{-4}
Aire	1.8×10^{-5}	1.20	1.51×10^{-5}
Gasolina	2.9×10^{-4}	680	4.22×10^{-7}
Agua	1.0×10^{-3}	1000	1.002×10^{-6}
Alcohol etílico	1.2×10^{-3}	789	1.52×10^{-6}
Mercurio	1.5×10^{-3}	13,580	1.16×10^{-7}
Aceite SAE 30	0.29	891	3.25×10^{-4}
Glicerina	1.5	1,264	1.18×10^{-3}

2.1.2 Clasificación de los fluidos.

En los fluidos se observa que la resistencia al flujo depende de la velocidad y, por consecuencia, de su velocidad de deformación. Análisis más detallados revelan que existen fluidos en los que la relación de las cargas aplicadas con la velocidad de deformación es lineal; tal como pasa en los sólidos de Hooke con la deformación. Por otra parte, fluidos como la sangre o los plásticos líquidos no presentan relaciones lineales. Es entonces que se pueden clasificar a los fluidos como [8]:

- **Fluidos newtonianos.**

Son aquellos en los que la relación de esfuerzo cortante con la velocidad de deformación es lineal, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\tau = \mu \dot{\epsilon} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2)$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante.

$\dot{\epsilon}$ = Velocidad de deformación.

μ = Coeficiente de viscosidad.

La figura 10 muestra una gráfica del esfuerzo cortante, en función de la razón o velocidad de deformación (gradiente de velocidad). Para un fluido newtoniano es una recta cuya pendiente es la viscosidad de ese fluido [7].

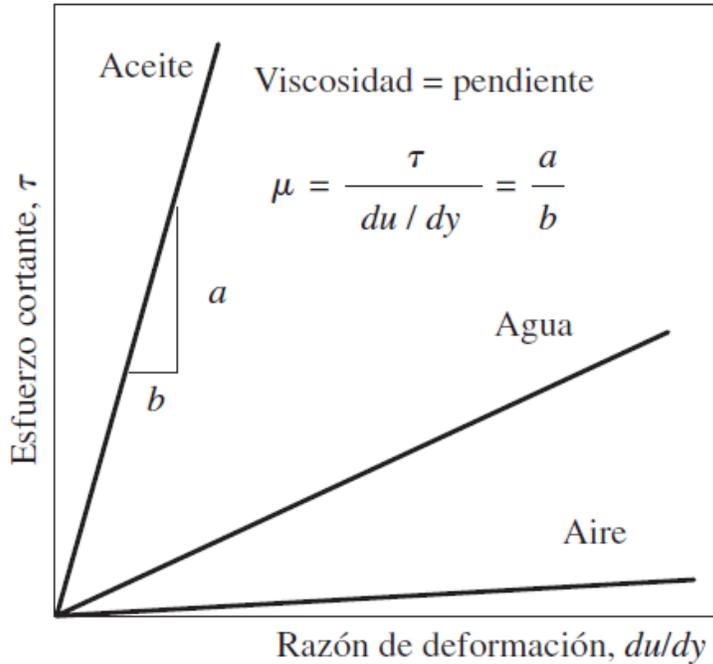


Figura 10. Gráfica del esfuerzo cortante en función de la razón de deformación para un fluido newtoniano [7].

Esta relación de proporcionalidad es la viscosidad, razón por la cual este tipo de fluidos se describen como linealmente viscosos, por consecuencia el estado de esfuerzos se podrá describir como:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \sigma'_{ij} \quad (3)$$

Donde:

σ_{ij} = Tensor de esfuerzos.

p = Presión hidrostática.

σ'_{ij} = Componente viscosa del estado de esfuerzos.

Donde el tensor σ'_{ij} depende de la velocidad de deformación y representa la componente viscosa del estado de esfuerzos; en un fluido newtoniano, en cualquier punto asociado al medio continuo, el esfuerzo σ'_{ij} depende en forma lineal de las componentes del tensor de rapidez de deformación (D_{ij}).

No existe ninguna razón experimental por la cual se pueda considerar que las propiedades de un fluido newtoniano se modifican con la posición, así como que éstas dependen de la dirección, por lo cual se describe a un fluido newtoniano como homogéneo e isotrópico [8].

La mayoría de los fluidos comunes, como agua, aire, gasolina y aceites son newtonianos.

- **Fluidos no newtonianos.**

En este caso la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal. A este tipo de medios se les denomina fluidos viscosos no lineales [8].

La figura 11 muestra diferentes relaciones entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación para fluidos no newtonianos. La pendiente de la curva se conoce como *viscosidad aparente* del fluido. Como resultado, un fluido no newtoniano no tiene un valor de viscosidad definido y constante, a diferencia de un fluido newtoniano [7].

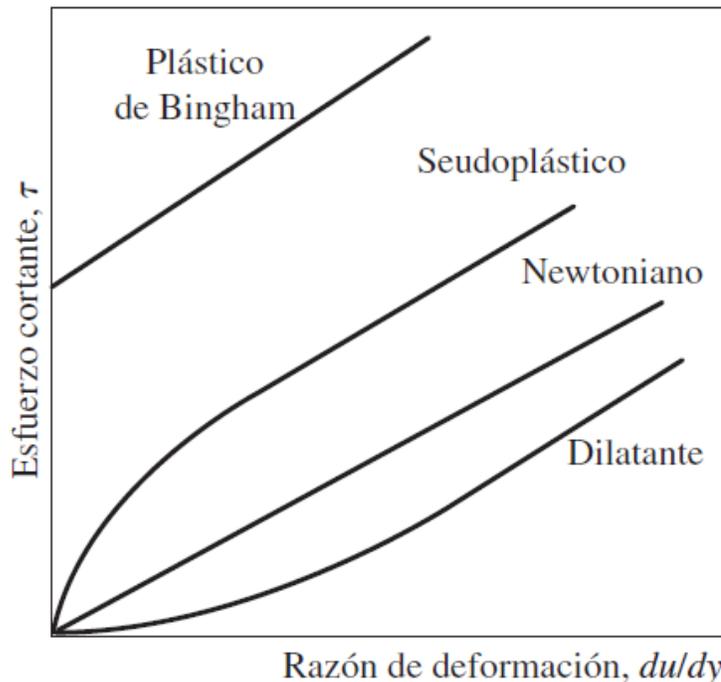


Figura 11. Variación del esfuerzo cortante con la velocidad de deformación para fluidos newtonianos y no-newtonianos [7].

Los fluidos no newtonianos cuya viscosidad aparente se incrementa con la velocidad de deformación (como las soluciones de almidón o arena suspendidos) se conocen como *fluidos dilatantes o espesantes al corte*, y los que exhiben el comportamiento opuesto (el fluido que se vuelve menos viscoso a medida que se le sujeta a un esfuerzo cortante más intenso, como algunas pinturas, las soluciones de polímero y los fluidos con partículas suspendidas) se conocen como *fluidos pseudoplásticos o adelgazantes al corte* (ver figura 12).

Algunos materiales, como la pasta de dientes, pueden resistir un esfuerzo cortante finito y se comportan como un sólido, pero se deforman de manera continua cuando ese esfuerzo sobrepasa el

del punto de fluencia, y, en consecuencia, se comportan como un fluido. Esos materiales se conocen como *plásticos de Bingham* [7].

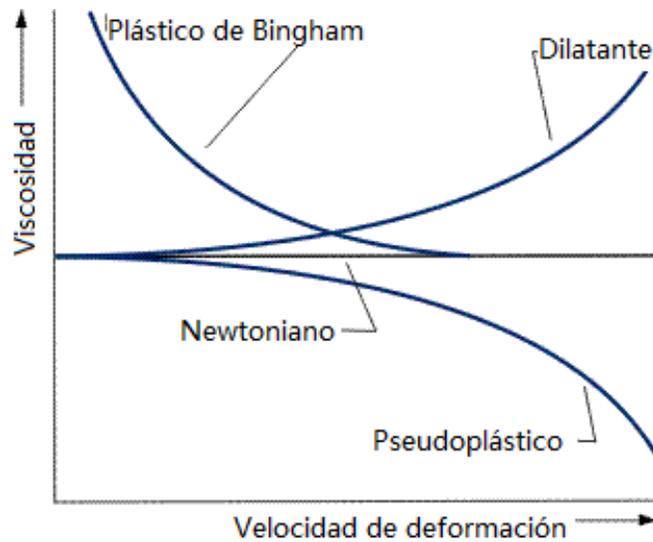


Figura 12. Variación de la viscosidad con la velocidad de deformación para fluidos newtonianos y no-newtonianos [7].

Uno de los principales modelos para describir el comportamiento de los fluidos no newtonianos es el modelo de Ostwald-Waele, también conocido como ley de la potencia (ec.4).

$$\tau = K\dot{\gamma}^n; \quad n \neq 1 \quad (4)$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante.

$\dot{\gamma}$ = Rapidez de deformación.

n = Índice de potencia.

K = Índice de consistencia.

En este modelo:

- Cuando $n < 1$ el modelo representa un comportamiento de un fluido pseudoplástico.
- Cuando $n > 1$ el modelo representa el comportamiento de un fluido dilatante.
- Cuando $n = 1$ el modelo representa el comportamiento de un fluido newtoniano y la ec. 4 se transforma en la ec. 2 con el índice de consistencia K siendo representado por el coeficiente de viscosidad μ .

Una complicación adicional al comportamiento no newtoniano es el efecto transitorio que se muestra en la figura 13. Algunos fluidos precisan un aumento gradual en el esfuerzo cortante para mantener constante la velocidad de deformación; a éstos se les denomina *reopécticos*. El caso opuesto es el de un fluido que requiere esfuerzos decrecientes; es el denominado *tixotrópico* [6].

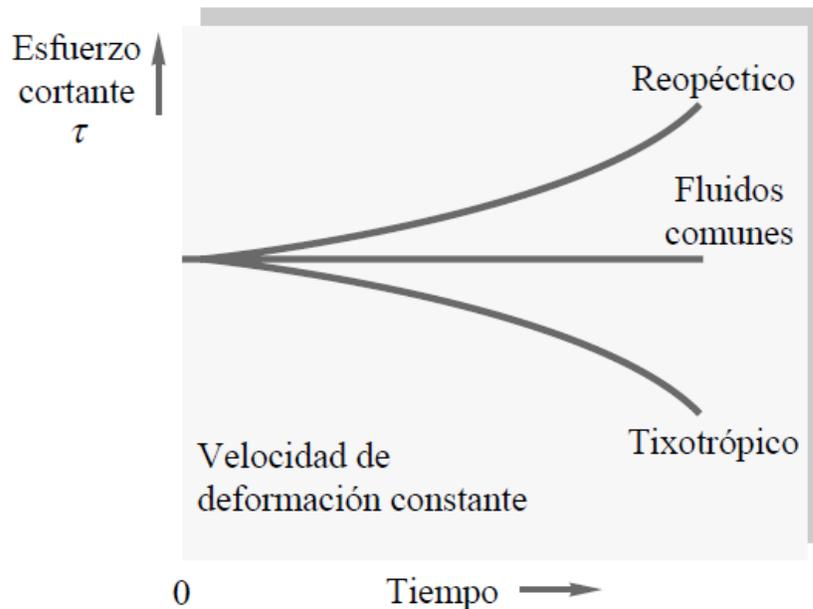


Figura 13. Efecto del tiempo sobre los esfuerzos aplicados en fluidos no-newtonianos [6].

2.1.3 Número de Reynolds.

Un parámetro importante que determina el comportamiento de los fluidos newtonianos es el *número adimensional de Reynolds*:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (5)$$

Donde:

V = velocidad característica del flujo.

L = Longitud característica.

μ = Viscosidad dinámica del fluido

ρ = Densidad del fluido.

ν = viscosidad cinemática del fluido.

Valores muy pequeños de Re indican movimiento lento y viscoso, donde los efectos de la inercia son despreciables. Valores moderados ($Re \lesssim 2300$) corresponden a un flujo laminar, caracterizado

por líneas de corriente suaves y movimiento sumamente ordenado. Valores altos ($Re \gtrsim 4000$) suelen estar asociados a un flujo turbulento, caracterizado por fuertes fluctuaciones aleatorias de alta frecuencia superpuestas a un flujo medio que también experimenta variaciones suaves con el tiempo. Al flujo que se alterna entre laminar y turbulento se conoce como de transición ($2300 \lesssim Re \lesssim 4000$). Los valores numéricos del número de Reynolds correspondientes a cada caso dependen de la geometría del flujo, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie y al tipo de fluido, entre otros factores [7].

2.1.4 Fluidos newtonianos incompresibles.

Para el caso de un fluido newtoniano incompresible, como el agua, el estado de esfuerzos se expresa como:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu D_{ij} \quad (6)$$

Donde:

σ_{ij} = Tensor de esfuerzos.

p = Presión hidrostática.

μ = viscosidad dinámica.

D_{ij} = Tensor de rapidez de deformación.

En un fluido viscoso incompresible la presión hidrostática no depende de ninguna cantidad cinemática y es indeterminada con relación al comportamiento mecánico de éste; por lo cual, se podrá superponer cualquier presión al fluido sin que esto afecte su comportamiento mecánico.

A la ecuación que describe el movimiento de fluidos newtonianos incompresibles se le conoce como ecuación de Navier-Stokes y sigue la forma siguiente:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \nabla v \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (7)$$

Donde:

p = Campo de presiones.

μ = Viscosidad dinámica.

v = Campo de velocidades.

ρ = Densidad del fluido.

g = Aceleración de la gravedad.

Para este sistema vectorial de ecuaciones, las incógnitas están representadas por el campo de velocidades y la presión, (v_1, v_2, v_3, P) , por esta razón, se requiere una cuarta ecuación para resolver el sistema. Esta ecuación es conocida como ecuación de continuidad y es representada por [8]:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (8)$$

Donde:

v = Campo de velocidades.

2.2 Cavitación (definición y tipos)

2.2.1 Presión de vapor.

Es plenamente conocido que la temperatura y la presión son propiedades dependientes para las sustancias puras durante los procesos de cambio de fase y existe una correspondencia uno a uno entre esas propiedades. A una presión determinada, la temperatura a la cual una sustancia pura cambia de fase se conoce como temperatura de saturación T_{sat} . De manera semejante, a una temperatura dada, la presión a la cual una sustancia pura cambia de fase se llama presión de saturación P_{sat} .

La presión de vapor P_v de una sustancia pura se define como la presión ejercida por su vapor en equilibrio de fases con su líquido a una temperatura dada. La presión de vapor aumenta con la temperatura. La presión de vapor es una propiedad de la sustancia pura y resulta ser idéntica a la presión de saturación P_{sat} del líquido ($P_v = P_{\text{sat}}$) [7].

2.2.2 Formación de la cavitación.

Si la presión del líquido es mayor que la presión de vapor, el único intercambio entre líquido y vapor es la evaporación en la interfaz. Si la presión del líquido se acerca a la presión de vapor, comenzarán a aparecer burbujas de vapor en el líquido. Cuando la presión del líquido cae por debajo de la presión de vapor debido al flujo, aparece un fenómeno conocido como cavitación [6].

La cavitación es la ruptura de un líquido o de una interfaz fluido-sólido causada por una reducción de la presión estática local producida por la acción dinámica del fluido en el interior y/o en las fronteras de un sistema líquido. La ruptura es la formación de una burbuja visible. Los líquidos, como el agua, contienen muchos vacíos microscópicos que actúan como núcleos de cavitación. La cavitación ocurre cuando estos núcleos crecen hasta un tamaño visible significativo.

Las burbujas de vapor (llamadas burbujas de cavitación debido a que forman “cavidades” en el líquido) se desintegran conforme son barridas hacia fuera de las regiones de baja presión. La implosión de las burbujas ocurre en periodos de mili o microsegundos, liberando una gran cantidad de energía en un mínimo lapso. Esta descarga energética, a su vez, conlleva la aparición de

temperaturas altas y ondas de alta presión extremadamente destructivas. Las ondas subacuáticas de choque a veces crean diminutas cantidades de luz. Este fenómeno se conoce como sonoluminiscencia [7].

Si un líquido fluye alrededor o dentro de geometrías complejas, la presión local puede caer debajo de la presión de saturación. Esto lleva a vaporizar el líquido en la región de baja presión formando cavitación. Físicamente, la cavitación y la ebullición del agua son procesos similares, la única diferencia es que la cavitación es un proceso isotérmico mientras que la ebullición es un proceso isobárico (ver figura 14) [9].

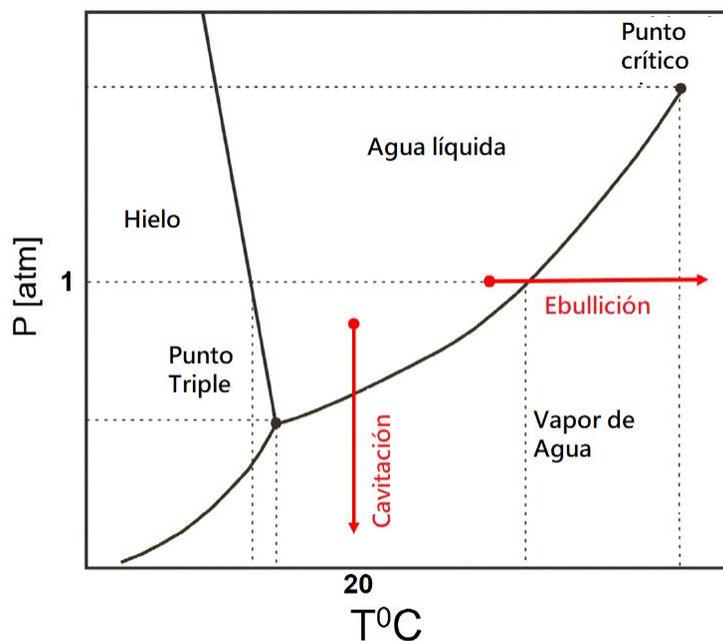


Figura 14. Diagrama de fase del agua en función de la temperatura y la presión. La temperatura es constante durante el proceso de cavitación, mientras que la presión es constante durante la ebullición [9].

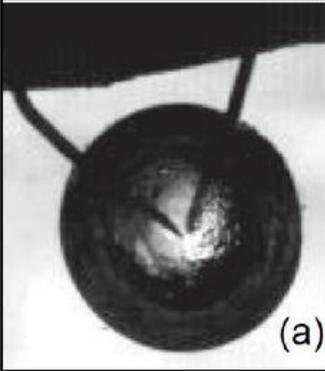
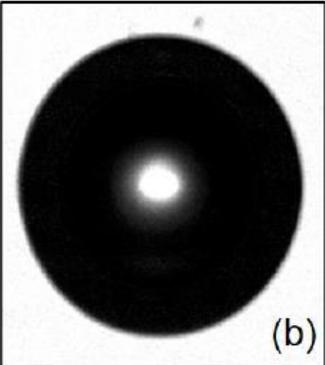
2.2.3 Tipos de cavitación.

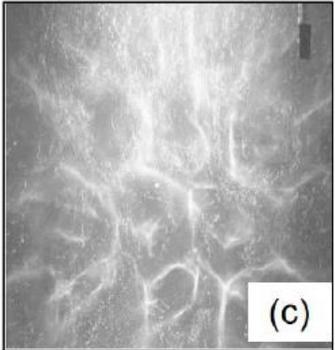
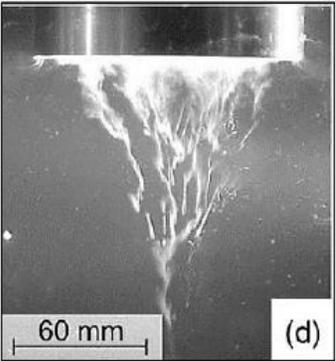
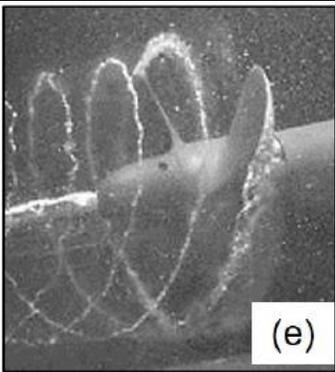
Desde el siglo pasado, diversos investigadores han estudiado el fenómeno de cavitación, la dinámica de las burbujas y el mecanismo de daño que ocasiona a elementos hidrodinámicos como turbinas o hélices de barco, así mismo sus aplicaciones, como lo son limpiadores ultrasónicos, grabadores y cortadores.

Para estudiar y analizar el fenómeno de cavitación, que es en sí mismo altamente complejo y variable, es primordial comprender la vía de formación de las burbujas o cavidades. Este hecho ocurre mediante la generación inducida de un pulso de presión, cuya intensidad, comportamiento y efectos varían dependiendo del tipo de proceso que se realiza [10].

Los diferentes tipos y métodos para generar cavitación se muestran en la tabla 2:

Tabla 2. Diferentes tipos y métodos para generar cavitación. Los tipos de cavitación se describen según el mecanismo que ocurre durante el proceso de generación de cavitación [9].

Magnitud física involucrada	Método para la generación de burbujas	Tipo de cavitación	Imagen
Temperatura	Por energía eléctrica	a) Cavitación inducida por chispas.	 <p style="text-align: right;">(a)</p>
	Por energía Óptica	b) Cavitación inducida por láser.	 <p style="text-align: right;">(b)</p>

Presión	Variación de la presión	c) Cavitación acústica	 (c)
		d) Cavitación ultrasónica	 (d)
	Reducción de la presión	e) Cavitación hidrodinámica.	 (e)

De estas metodologías, las más utilizadas corresponden a la cavitación hidrodinámica (CH) y la cavitación ultrasónica (CU), debido a que generan una mayor cantidad de burbujas en el fluido, favorecen las modificaciones químicas y/o físicas en cada sistema, poseen un adecuado potencial de escalamiento, y ostentan un alto grado de desarrollo tecnológico asociado [10].

2.3 Cavitación hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica se define como el fenómeno de generación, crecimiento y posterior colapso de microburbujas de vapor (o cavidades) en el seno de un medio líquido. Esto, debido a una disminución o caída abrupta de presión existente en un fluido tras aumentarse repentinamente su

velocidad, como resultado de un cambio en la geometría y/o área de la sección transversal del conducto de transporte.

La cavitación hidrodinámica inicia con la formación de burbujas en la zona de baja presión, al reducirse el valor de este parámetro por debajo de su presión crítica de vapor. Seguidamente, las cavidades alcanzan su máximo tamaño, exhibiendo condiciones de expansión isotérmica. Finalmente, se presenta una recuperación de la presión en el sistema, que ocasiona el colapso adiabático inmediato de la burbuja y la formación de un estado supercrítico local de alta temperatura y presión. Este proceso se muestra en la figura 15 [10].

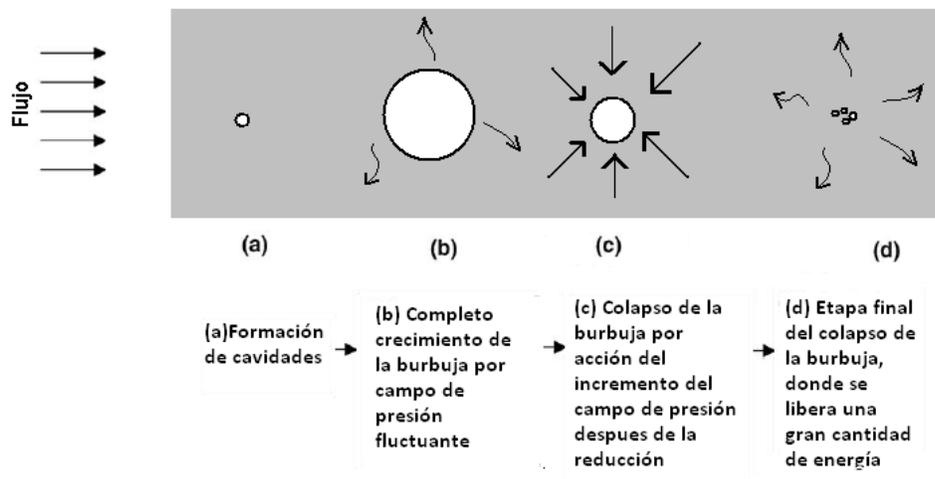


Figura 15. Representación esquemática de las diferentes etapas de la formación de burbujas de cavitación [11].

Durante el corto tiempo que dura el colapso de las burbujas, denominado punto caliente, se alcanzan temperaturas y presiones de hasta 5000K y 1000 atm respectivamente, con tasas de calentamiento y enfriamiento mayores a los 109K/s y chorros (jets) de 400 Km/h lo que propicia un incremento en la turbulencia en la corriente del fluido [12].

La cavitación hidrodinámica puede generarse simplemente por el uso de una constricción o estrechamiento en la trayectoria de flujo de un líquido. La energía cinética y la velocidad del fluido aumentan, con una consecuente disminución en la presión local del sistema. Si el estrangulamiento es suficiente para causar una reducción de la presión por debajo del límite de cavitación, correspondiente a la presión de vapor del medio a la temperatura de operación, se forman las

cavidades. Posteriormente, tras la fase de expansión, la presión se recupera, resultando en el colapso abrupto de las burbujas [10].

2.3.1 Número de Cavitación (Ca).

El parámetro adimensional que describe el fenómeno de cavitación se conoce como *número de cavitación* [7]. Este parámetro permite caracterizar la condición de cavitación al interior de un dispositivo de estrangulamiento. El valor de Ca está dado por:

$$Ca = \frac{\text{Presión} - \text{Presión de vapor}}{\text{Presión dinámica}} = \frac{2(P_{abs} - P_v)}{\rho V^2} \quad (9)$$

Donde:

P_{abs} = Presión absoluta o de descarga.

P_v = Presión de vapor a una temperatura dada.

V = Velocidad media del flujo en la garganta.

ρ = Densidad del fluido.

El inicio de la cavitación ocurre cuando $Ca = 1$, y se consideran que son más intensos los procesos cavitantes a medida que este valor disminuye por debajo de 1. Entre mayor sea la caída de presión en el sistema (ΔP), ocasionada por un gran aumento repentino de la velocidad en el flujo, se incrementará el número y la fuerza de compresión de las burbujas. Así, los efectos térmicos y mecánicos de la cavitación serán mucho más drásticos.

Para potenciar el rendimiento de la cavitación hidrodinámica, se prefieren entonces esquemas de operación donde las variables de velocidad y caída de presión permitan mantener el número de cavitación cercano a un valor óptimo. En la tabla 3 se presentan algunos valores óptimos del número de cavitación recomendados para algunas aplicaciones industriales.

Tabla 3. Número de cavitación óptimo recomendado para diferentes aplicaciones industriales [10].

Aplicación	C _a óptimo
Tratamiento de aguas residuales	0.15 – 0.55
Remoción de microorganismos y algas en fuentes de agua	0.10 – 0.54
Inactivación de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	0.29 – 0.44
Producción de biodiesel a partir de aceites vegetales	0.10 – 0.20
Hidrólisis de aceites	0.15 – 0.50
Depolimerización de goma guar	0.25 – 0.38
Emulsificación	0.16 – 0.23
Síntesis de nano-partículas	0.10 – 0.61
Extracción de lípidos a partir de microalgas	1.17
Pre-tratamiento de biomasa lignocelulósica	0.017 – 0.048
Mejoramiento del proceso de producción de cerveza	0.10 – 0.30
Disminución de viscosidad en líquidos	0.42 – 0.64

Es deseable la implosión de una mayor cantidad de burbujas con menor tamaño, en comparación con procesos que dan lugar a cavidades limitadas y de gran diámetro. El primer caso permite maximizar la interfaz total gas – líquido en el sistema, que a su vez constituye la frontera para el intercambio efectivo de masa y calor hacia el medio circundante [10].

2.3.2 Tubos Venturi.

Un Venturi es un arreglo que incluye una sección de convergencia, una garganta o constricción y una zona de divergencia; zonas en las cuales varía la dinámica del flujo (ver figura 16). El Venturi puede tener diferentes geometrías en su sección transversal a la dirección del flujo: rectangular, circular o elíptica. Los tamaños y formas marcan los principales criterios para lograr diferentes

intensidades de cavitación en este tipo de equipos, pues determinan el número de eventos cavitantes, la magnitud de la presión de colapso y el tiempo de residencia de la burbuja en la región de baja presión [10].

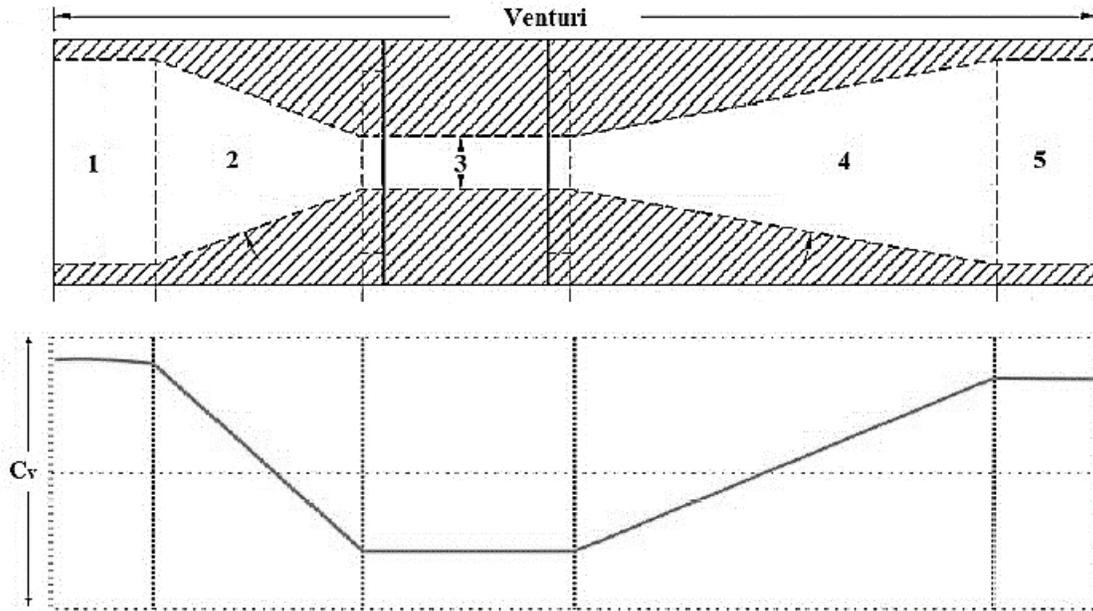


Figura 16. Representación general de un tubo Venturi. 1) Ingreso del fluido; 2) Zona de convergencia; 3) Garganta o constricción; 4) Etapa de expansión y recuperación de presión (zona de divergencia); 5) Descarga. C_v) Número de cavitación. [10].

Con un estrangulamiento efectivo, la presión del sistema se reduce alcanzando su presión de vapor, causando la evaporación instantánea del medio continuo en el líquido y la migración de algunos gases disueltos hacia esta nueva fase gaseosa. Subsecuentemente, a lo largo de la garganta, crecen las cavidades formadas hasta alcanzar su tamaño máximo. Finalmente, al expandirse el perímetro, la velocidad decrece y se recupera la presión en la sección divergente, resultando en un colapso drástico y violento de las cavidades. En la figura 17 se observan las tres etapas principales de la cavitación hidrodinámica en un tubo Venturi: formación de burbujas, expansión de burbujas y su colapso e implosión [13].

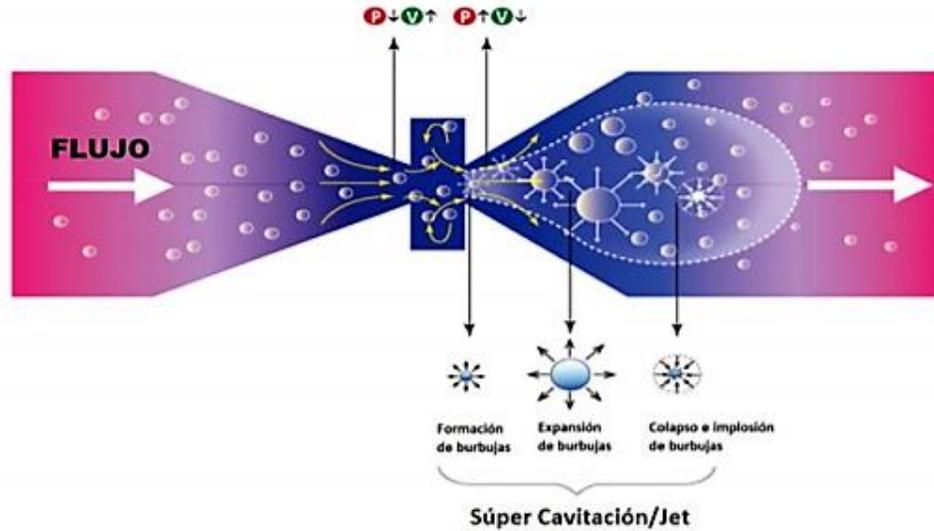


Figura 17. Proceso de cavitación en un Tubo Venturi [13].

Para el caso de una sección transversal circular, el área interna de la sección divergente aumenta siguiendo una relación polinomial de segundo grado en función de la dirección del flujo, de acuerdo con un ángulo de divergencia (ec. 10).

$$A = (\pi \tan^2 \phi)x^2 + (2\pi r_o \tan \phi)x + \pi r_o^2 \quad (10)$$

Donde:

A = Área de la sección transversal a la dirección del flujo.

ϕ = Ángulo de divergencia.

r_o = Radio de la sección transversal en la zona de constricción.

Este incremento suave en el área transversal del dispositivo previene la recuperación súbita de la presión. Lo anterior, permite que las burbujas se mantengan en la zona de baja presión durante el tiempo necesario para garantizar que se alcance el máximo tamaño posible en estas cavidades.

La magnitud de la caída de presión (ΔP) influye directamente sobre la fuerza de la implosión en las cavidades, afectando la mayor parte de los efectos del proceso. Por esta razón, la presión de descarga constituye una de las variables de mayor importancia en el estudio del fenómeno de cavitación hidrodinámica. La Figura 18 representa el comportamiento típico de la presión en un proceso de cavitación hidrodinámica [10].

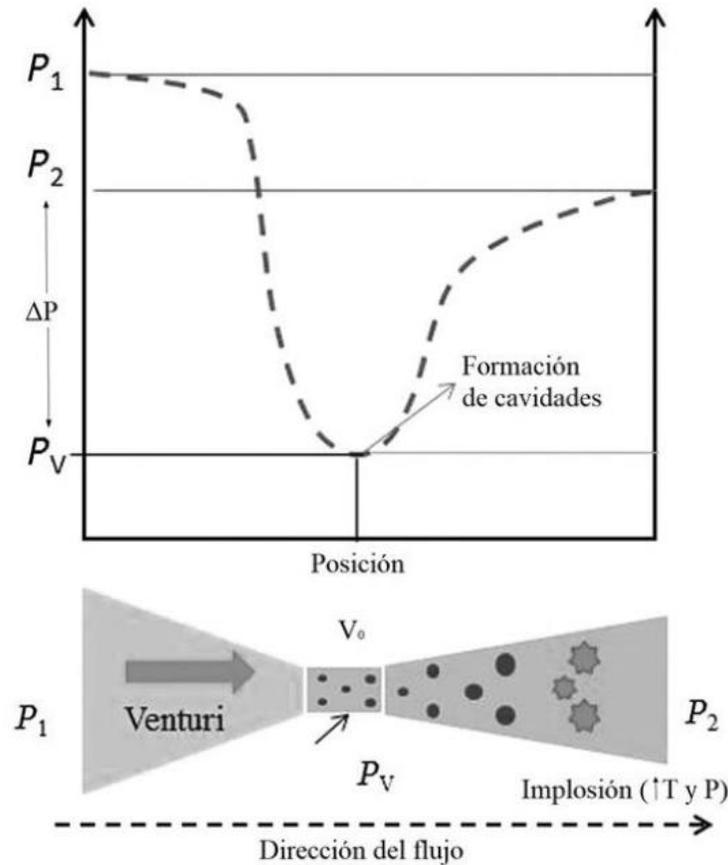


Figura 18. Variación de la presión como función de la posición en un tubo Venturi. P_1) presión inicial o, de entrada; P_2) presión de descarga o recuperación; P_v) presión de vapor del líquido a la temperatura del sistema; ΔP) caída de presión, V_0) velocidad media del fluido en la garganta. [10].

La cavitación hidrodinámica produce un colapso de menor intensidad de las burbujas, comparado con la técnica ultrasónica. Sin embargo, la eficiencia energética y el rendimiento de la cavitación se ven optimizados al emplear el principio hidrodinámico, pues se favorece la formación de un mayor número de burbujas (aumento del volumen de reacción), únicamente al controlar y modificar las condiciones geométricas del dispositivo de estrechamiento o garganta. Esto, promueve el aumento de la interfaz total existente entre el gas en las burbujas y el líquido, acrecentando el área disponible para la transferencia de masa y calor en el proceso. Cabe resaltar que, en la tecnología hidrodinámica, se aumenta considerablemente la velocidad de flujo de la corriente del líquido a expensas de la presión [10].

Debido a lo anterior, es necesario analizar, definir y controlar oportunamente los parámetros geométricos y de operación en los dispositivos de estrangulamiento (tubos Venturi), con el fin de

obtener la recuperación de presión y la intensidad energética requerida para alguna aplicación específica.

2.4 Mecanismos flexibles

Un mecanismo es un dispositivo mecánico que se utiliza para transferir o transformar movimiento, fuerza o energía. Los mecanismos tradicionales de cuerpo rígido consisten en articulaciones conformadas por eslabones rígidos conectados en juntas móviles.

La figura 19 muestra un mecanismo rígido de pinzas de presión. Este mecanismo transfiere energía de la entrada (su mano) a la salida (los dientes de la pinza). Dado que la energía se conserva entre la entrada y la salida (sin tener en cuenta las pérdidas por fricción), la fuerza de la salida puede ser mucho mayor que la fuerza de entrada, pero el desplazamiento de salida es mucho menor que el desplazamiento de entrada [14].

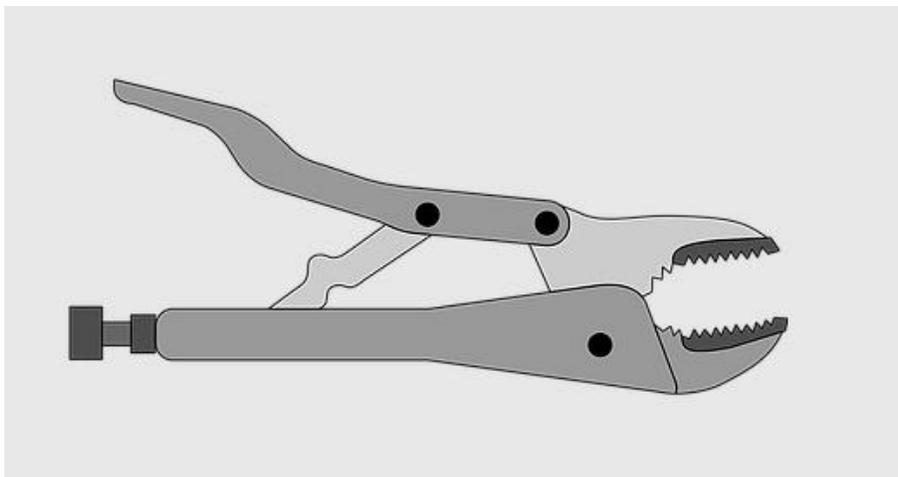


Figura 19. Mecanismo rígido de pinzas de presión [14].

Un mecanismo flexible (MF) es un mecanismo que obtiene, al menos, parte de su movilidad a partir de la deformación elástica de miembros flexibles en lugar de únicamente articulaciones móviles [14]. Estos mecanismos se diferencian de sus contrapartes, los mecanismos rígidos (MR), en que el movimiento se da gracias a la deformación de los elementos que lo componen, mientras que, en los mecanismos rígidos, el único movimiento es el que se consigue en las juntas, ya que sus elementos se consideran infinitamente rígidos. Además, mientras que en los mecanismos rígidos

cada componente tiene una función diferente, los mecanismos flexibles pueden integrar diferentes funciones en una o en un número reducido de partes [15].

La figura 20 muestra un ejemplo de mecanismo flexible basado en el mecanismo de pinzas de presión de la figura 19. En este mecanismo la fuerza de entrada se transfiere a la salida de forma similar que en el mecanismo rígido de la figura 19, solo que ahora parte de la energía de entrada se almacena en forma de energía de deformación en los miembros flexibles [14].

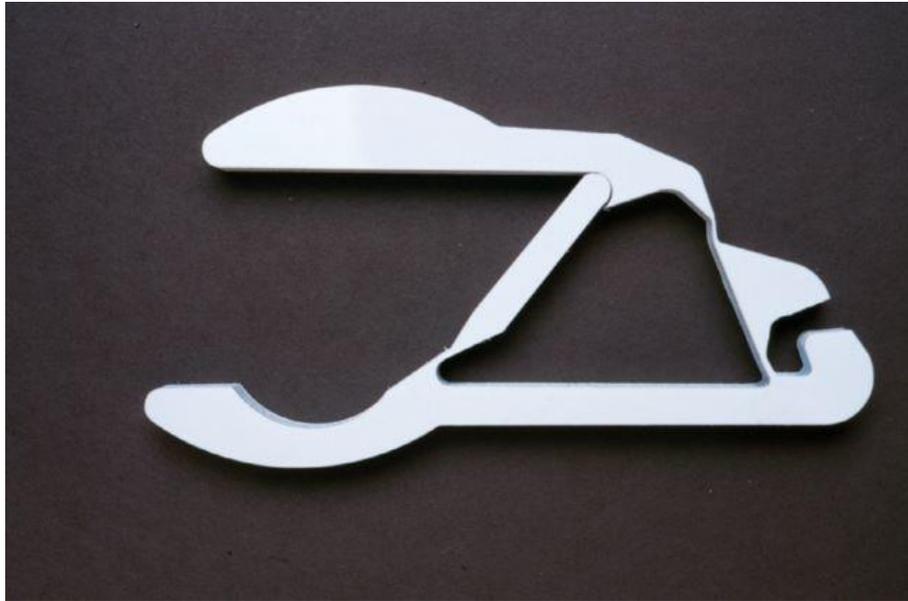


Figura 20. Mecanismo flexible de pinzas de presión [14].

El uso de los mecanismos flexibles (compliant mechanisms, en inglés) se ha incrementado en los últimos años por su versatilidad, hecho que se observa en la amplia gama de aplicaciones industriales que van desde dispositivos de alta precisión a microescala a grandes componentes de máquinas. Entre los factores que han influido para aumentar la popularidad de los mecanismos flexibles es el desarrollo de nuevos materiales, técnicas de diseño y procesos de manufactura, además, el avance en software de diseño (CAD, CAM) ha aumentado la cantidad de herramientas disponibles y la complejidad en la geometría de las piezas.

2.4.1 Ventajas de los mecanismos flexibles.

Los mecanismos flexibles presentan diferentes ventajas tales como: mayor rendimiento ya que ofrece alta compactibilidad y precisión, bajo peso y fricción, y eliminación de la lubricación; costo más bajo debido al poco número de componentes, traducido en una fabricación simplificada (pocos moldes), menor complejidad del ensamblaje; y su capacidad de miniaturizarse, es decir, se están utilizando ampliamente en microestructuras y en sistemas microelectromecánicos (MEMS) [15]. Algunas de estas ventajas se enumeran a continuación [14]:

1. **Conteo de piezas.** El número de piezas o partes es reducido por tener miembros flexibles en lugar de resortes, bisagras rígidas, pasadores, etc. El número de componentes necesarios para un mecanismo flexible puede ser considerablemente menor que para una versión rígida del mismo mecanismo.
2. **Procesos de producción.** Los mecanismos flexibles pueden ser simples de fabricar porque se prestan bien a varios procesos de fabricación como la manufactura aditiva, el corte láser, el estampado, el corte por chorro de agua, la electroerosión, etc.
3. **Precio.** Debido a que tienen menos piezas y procesos de fabricación simples, los mecanismos flexibles pueden ser muy económicos de fabricar.
4. **Movimiento preciso.** Los mecanismos flexibles pueden permitir un movimiento preciso ya que al no tener deslizamiento y juego entre los elementos que lo componen se reduce el desgaste mecánico entre piezas.
5. **Desempeño.** Dado que tienen un número menor de juntas móviles, como pasadores (giratorios) o juntas deslizantes, da como resultado una fricción reducida y la eliminación de la necesidad de lubricación.
6. **Proporciones.** Los mecanismos flexibles permiten tener dimensiones reducidas debido a la reducción de número total de piezas y uniones, además de que se pueden fabricar utilizando tecnología y materiales similares a los utilizados en la fabricación de circuitos integrados.
7. **Portabilidad.** Los mecanismos flexibles logran una reducción significativa de peso debido al diseño con piezas más simples y reducidas.
8. **Previsibilidad.** Los mecanismos flexibles son confiables durante un largo período de tiempo debido a la capacidad que tienen de almacenar energía en forma de energía de deformación en los elementos flexibles.

Adicionalmente, otra de las ventajas que presentan los mecanismos flexibles es que son considerados para diseños bio-inspirados ya que, en la naturaleza, la mayoría de los objetos que se mueven son muy flexibles, tales como el tallo de las plantas, las alas de los insectos, la trompa de los elefantes y otros tantos ejemplos donde el movimiento proviene de la flexión de las partes [15].

2.4.2 Desafíos para el diseño de mecanismos flexibles.

Así como hay una serie de ventajas asociadas al uso de mecanismos flexibles en comparación con mecanismos rígidos, también existen varios desafíos y desventajas para algunas aplicaciones [14].

- 1. Combinación de sistemas complejos.** Dificultad para analizar y diseñar mecanismos flexibles ya que se requiere conocimiento de los métodos de análisis y síntesis de mecanismos, de la deflexión de elementos flexibles y de la interacción de ambos en un sistema complejo.
- 2. Ecuaciones no lineales.** Deben utilizarse ecuaciones no lineales para su modelado matemático que tengan en cuenta las no linealidades geométricas causadas por las grandes deformaciones que presentan algunos de los miembros flexibles del mecanismo.
- 3. Almacenamiento de energía.** En algunas aplicaciones, tener energía almacenada en miembros flexibles es una desventaja, dado que se requiere la aplicación de una mayor fuerza para moverlos ya que la energía almacenada opone resistencia.
- 4. Fatiga.** Dado que los miembros flexibles están sometidos a cargas cíclicas o a cargas por largos periodos de tiempo, esto a menudo provoca que el material falle con un esfuerzo menor al considerado como límite elástico, por lo tanto, es importante diseñar esos miembros de manera que tengan suficiente resistencia a la fatiga y a la deformación plástica para realizar sus funciones prescritas y una vida útil tal que garantice su buen funcionamiento.
- 5. Movimiento limitado.** El movimiento de los eslabones flexibles está limitado por la fuerza de los miembros deflectores. Por ejemplo, un eslabón flexible no puede producir un movimiento de rotación continuo

2.4.3 Técnicas de diseño de los mecanismos flexibles.

La literatura especializada en mecanismos flexibles describe, al menos, cuatro categorías importantes en las que se pueden clasificar las diversas técnicas que permiten obtener mecanismos flexibles desde especificaciones de diseño [16]. Estos métodos están basados en:

- **Optimización Topológica (OT):** Esta metodología basa su teoría en la mecánica del medio continuo y en el análisis de sensibilidad continua en espacios topológicos. Para resolver el problema de optimización planteado, se resuelven iterativamente las ecuaciones en derivadas parciales en forma numérica con el método de los elementos finitos, el método de los elementos de borde, o por análisis isogeométrico. Inicialmente, se utilizó en optimización estructural para estructuras bidimensionales de barras, luego tuvo éxito en modelos 2D para el diseño de sistemas microelectromecánicos (MEMS) con diversos principios de actuación. Actualmente, tiene auge en el espacio 3D en combinación con técnicas con base teórica en la Derivada Topológica. La principal ventaja es que permite obtener mecanismos flexibles de geometría óptima en cuanto a mínima cantidad de material y distribución homogénea de las tensiones (flexibilidad distribuida). El principal inconveniente es que durante la ejecución del proceso de quitado de material pueden aparecer desconexiones indeseadas de partes o crearse grados de libertad adicionales indeseados. Para mitigar ello se necesitan reglas heurísticas. Una de las desventajas que pueden atribuirse a este método es la complejidad de manufactura para las soluciones óptimas.
- **Teoría de Helicoides (TH):** Esta metodología creada en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés) se basa en el empleo de Teoría de Helicoides para representar los movimientos requeridos y permite determinar los cuerpos flexibles cuyas reacciones restringirán sólo los movimientos indeseados. La metodología se denomina FACT, por sus siglas en inglés de Freedom, Actuation and Constraint Topologies. Esta metodología permite obtener soluciones conexas y de geometrías sencillas de construir y miniaturizar. Actualmente se está utilizando para crear metamateriales con propiedades mecánicas especiales; por ejemplo, con alta rigidez y baja densidad. Recientemente, se han

presentado la combinación de plataformas paralelas utilizando TH, logrando la cancelación de movimientos parasitarios espaciales.

- **Reemplazo por mecanismos Pseudo Rígidos:** Esta metodología está inspirada en el diseño de mecanismos rígidos, a los cuales se les reemplaza las juntas cinemáticas por miembros flexibles. Con ello se obtiene un mecanismo flexible con base a concentrar la flexibilidad en los pares cinemáticos (flexibilidad concentrada) o distribuida en elementos de vigas. Existen muchos antecedentes del empleo en el diseño de mecanismos pseudorígidos planos y se ha demostrado su utilidad para diseñar mecanismos con propiedades biestables, pero su sistematización para extenderlo a tres dimensiones parecía ser infactible. Recientemente, se incorporaron estos modelos de flexores en una biblioteca de elementos representados también por helicoides, probando su factibilidad sólo en la etapa conceptual.
- **Métodos de Construcción en Bloques:** Esta metodología se basa en combinar subsistemas con funciones cinemáticas predefinidas y relaciones de entrada/salida conocidas. En su estado actual, y por el enfoque cinetoestático de usar centros instantáneos de rotación permite utilizarse sólo en un limitado rango de problemas planos. Debido a que el helicoide de un movimiento contiene al centro instantáneo de rotación de dicho movimiento, podría decirse que varias ideas de la descomposición en bloques pueden generalizarse también utilizando teoría de helicoides.

En este estado del arte, se destaca el empleo de la Teoría de Helicoides como método matemáticamente riguroso y sistematizable para diseñar mecanismos flexibles de precisión. El mismo compete con la Optimización Topológica para arribar a resultados similares y su comparación objetiva entre sí es inexistente. Usando TH, se espera obtener soluciones en menor tiempo y con menor uso de recursos computacionales que con OT, pero con un análisis matemático de mayor grado de dificultad (aunque no se descarta la posibilidad de realizar lo inverso y obtener condiciones iniciales con OT para posteriores empleos de diseño con TH) [16].

III. METODOLOGÍA DE DISEÑO Y PLANEACIÓN

En este capítulo se describen las diferentes fases del proceso de diseño general empleado para la elaboración del prototipo final del dispositivo de pinzas, desde la planeación del proyecto hasta la validación experimental del prototipo final propuesto. Además, se presentan las etapas correspondientes a la fase de planeación, las cuales incluyen la definición del problema, la selección de uno de los prototipos de referencia mostrados en el capítulo 1 y la definición de las especificaciones objetivo del prototipo, es decir, las características y requerimientos físicos que tiene que cumplir el mecanismo para satisfacer los objetivos previamente establecidos.

3.1 Proceso de diseño general

El proceso de diseño general para la miniaturización de uno de los prototipos de pinzas mostrados en el capítulo 1 tiene como base la combinación de distintas metodologías de diseño, principalmente las descritas por Úlrich-Eppinger [17], Dieter [18] y Pahl-Beitz [19]. La figura 21 muestra las principales fases del proceso de diseño general además de las distintas etapas o actividades de las que se compone cada fase.

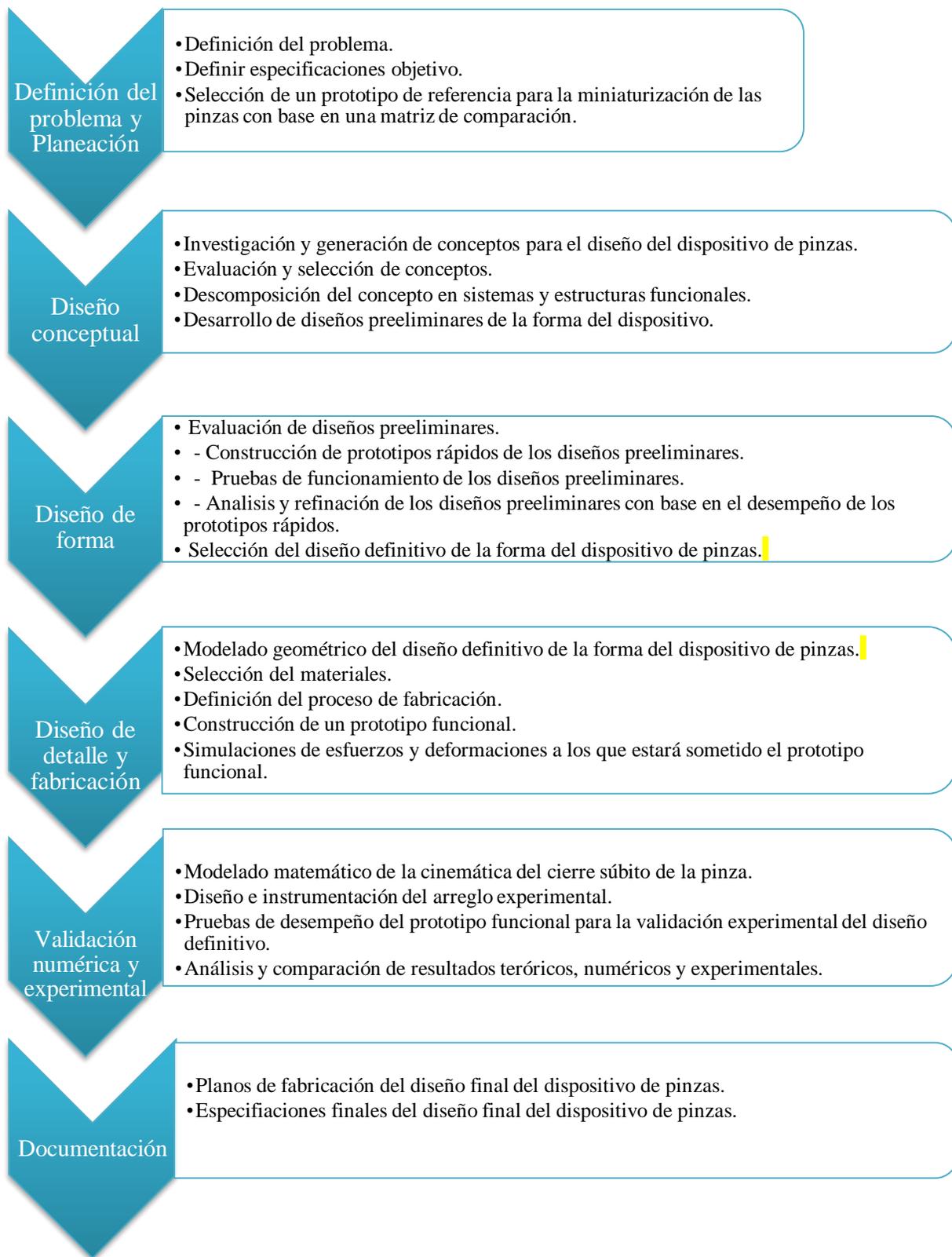


Figura 21. Proceso de diseño general para la miniaturización de las pinzas. Las fases del proceso se muestran en cada flecha y las actividades a realizar en cada una de estas en el recuadro correspondiente.

Las características y objetivos de cada una de estas fases se mencionan a continuación:

- 1. Definición del problema y planeación.** En esta etapa del proceso de diseño se identifica la problemática a solucionar o la necesidad a satisfacer (ver capítulo 1), además, se determinarán las especificaciones y restricciones que deberá tener el prototipo final del dispositivo de pinzas para cumplir con los objetivos establecidos anteriormente (especificaciones objetivo). Posteriormente se seleccionará alguno de los prototipos mostrados en los antecedentes de este documento para utilizarlo como una referencia en el proceso de miniaturización.
- 2. Diseño conceptual.** En la fase de diseño conceptual se investigarán, generarán y definirán diferentes conceptos de apoyo para el diseño y la miniaturización del dispositivo de pinzas de referencia. Cada uno de estos conceptos se evaluarán y se seleccionará el más adecuado utilizando matrices de decisión, posteriormente se identificarán los distintos subsistemas funcionales en los que se puede dividir el concepto, para que finalmente se tenga una primera propuesta de la forma que tendrá el dispositivo de pinzas la cuál servirá como una guía para el desarrollo de las siguientes fases de diseño.
- 3. Diseño de forma.** Utilizando el arreglo de referencia de la forma del dispositivo de pinzas, se desarrollará un proceso iterativo para generar distintos diseños preliminares, los cuáles se evaluarán fabricando prototipos rápidos y se refinarán hasta obtener un diseño definitivo del dispositivo, el cuál tenga el mejor desempeño comparado con los demás diseños preliminares.
- 4. Diseño de detalle y fabricación.** La fase de diseño de detalle incluye la especificación completa de la geometría, materiales, tolerancias y del proceso de fabricación del diseño definitivo del dispositivo de pinzas. En esta etapa se inicia el desarrollo del prototipo funcional a detalle:
 - a) Se realizará el modelado geométrico del dispositivo por medio de un software de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés).
 - b) Se simularán las condiciones de trabajo (esfuerzos, deformaciones, etc.) a las que estará sometido el dispositivo utilizando un software de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE, por sus siglas en inglés).

- c) Se realizará la simulación del proceso de fabricación del dispositivo por medio de un software de Manufactura Asistida por Computadora (CAM, por sus siglas en inglés).
- d) Se fabricará el prototipo funcional del diseño definitivo del dispositivo de pinzas.

5. Validación numérica y experimental. Esta fase comprende la validación tanto numérica como experimental del prototipo funcional del dispositivo de pinzas fabricado en la fase anterior para comprobar que satisface los requerimientos y especificaciones objetivo, establecidas en la fase 1.

Para esta fase:

1. Se diseñarán experimentos que buscan validar el funcionamiento del dispositivo en condiciones controladas para poder obtener datos experimentales de desempeño.
2. Se desarrollará un modelo matemático para tratar de describir la cinemática del cierre súbito de la pinza.

Finalmente se compararán los resultados numéricos y experimentales con los resultados registrados por el prototipo de referencia seleccionado en la fase 1 para juzgar el cumplimiento de los objetivos planteados anteriormente.

6. Documentación. Esta fase es en cierta manera el resultado de la fase de diseño de detalle y fabricación y contiene la documentación de control del prototipo funcional del dispositivo de pinzas, es decir, los planos o archivos de computadora que describen la geometría del mecanismo, los detalles técnicos del proceso para la fabricación del prototipo y las especificaciones finales del mismo, posterior a su validación experimental.

Cabe aclarar que el desarrollo de esta metodología de diseño no es necesariamente lineal, y en muchas ocasiones es necesario realizar cada una de las fases a la par o de forma iterativa. Un ejemplo de ello es la fase de materialización y refinación de conceptos, ya que para obtener el diseño definitivo del dispositivo se optará por fabricar prototipos rápidos preliminares y probarlos experimentalmente para observar los errores y refinar el diseño de los mismos, sin embargo, este proceso de fabricación y pruebas no tiene el mismo nivel de detalle y control como el realizado en las fases relacionadas con la fabricación y validación del prototipo funcional correspondiente al diseño definitivo del dispositivo de pinzas.

3.2 Definición del problema y Planeación

Como se mencionó anteriormente la primera etapa de la fase de definición y planeación es la identificación de la problemática a solucionar o la necesidad a resolver. El desarrollo de esta etapa se encuentra en el capítulo 1 del presente documento ya que en él se presentó la definición del problema, la justificación del proyecto y los objetivos, tanto generales como particulares que se tienen que cumplir para solucionar dicha problemática.

3.2.1 Especificaciones Objetivo.

Las especificaciones objetivo del dispositivo de pinzas deben enfocarse en cumplir con todos los objetivos establecidos en el capítulo 1. Para ello, se hace uso de una lista de métricas (ver tabla 4) las cuales describen, con detalles precisos y medibles, lo que el prototipo final tiene que ser y hacer al finalizar las tres fases de diseño mencionadas anteriormente [20]. A cada métrica se le asignó una importancia relativa y subjetiva de acuerdo con la relevancia que tiene en el cumplimiento de los objetivos del diseño del prototipo.

Las importancias relativas se definen de acuerdo con la siguiente escala:

- 1 – Importancia baja.
- 2 – Importancia media.
- 3 – Importancia alta.

Tabla 4. Lista de métricas para el prototipo de pinzas de cierre súbito. Cabe resaltar que los valores esperados para algunas métricas (Velocidad del flujo, tiempo de cierre de la pinza, etc.) favorecen la formación de estructuras cavitantes de acuerdo con [1].

No. De métrica	Métrica	Importancia relativa	Unidad	Rango de valores esperados.
1	Número de cavitación	3	Adim.	<1
2	Longitud del prototipo.	3	cm	≤ 5
3	Ancho del prototipo.	3	cm	≤ 5
4	Altura del prototipo.	3	cm	≤ 5
5	Velocidad del flujo.	2	m/s	≥ 12.5
6	Tiempo de cierre de la pinza.	2	ms	0.5 – 9
7	Peso total del prototipo.	1	g	≤ 100

3.2.2 Selección de un prototipo de referencia para la miniaturización.

A modo de facilitar la evaluación y selección de un prototipo de referencia para la miniaturización de la pinza se propone una matriz de comparación (tabla 5) la cual contrasta el desempeño de cada uno de los modelos mostrados en la sección de antecedentes del capítulo 1 con las características del proceso de cierre de una pinza real de camarón pistola.

Tabla 5. Matriz de comparación entre los modelos de pinzas de referencia.

Característica	Prototipos			
	Camarón pistola ¹	Hess ³ (2013)	Godínez ⁴ (2018)	Xin Tang ⁵ (2019)
Longitud del canal de flujo [mm]	1.41	100	22.31	24.35
Tiempo de cierre de la pinza [ms]	0.5	500	9	1.5
Velocidad del flujo alcanzado [m/s]	17 - 25	1	14.5	25.6 – 37.4
Número de Reynolds	24000	24000	323495	84000
Número de cavitación alcanzado	0.685	1	0.732	0.14 - 0.3
Tipo de actuador	Muscular	Resorte de extensión	Ligas	Resorte de torsión

Como se puede observar en la tabla 5 el modelo que logra de mejor forma reproducir el mecanismo de cierre de la pinza del camarón pistola es el desarrollado por Xin Tang [5], sin embargo, debido a que el desarrollo de este modelo conlleva una tecnología más avanzada (ver capítulo 1) se considera que el prototipo desarrollado por Godínez et al. [4] es el más adecuado para miniaturizar ya que además de tener un proceso de fabricación más sencillo, este tiene la ventaja de que, dada su configuración de diseño (ver figura 5), permite estudiar la formación de la cavitación hidrodinámica al variar los parámetros geométricos del tubo Venturi que se forma al momento de cierre de la pinza.

Es importante mencionar que el objetivo de utilizar este prototipo es para tener una referencia tanto en el diseño de la geometría de la pinza como un modelo de comparación en el desempeño del diseño del mecanismo final, es decir, se compararán los resultados obtenidos (velocidad de flujo, tiempo de cierre de la pinza, dimensiones, número de cavitación, etc.) entre el mecanismo diseñado en este proyecto con los resultados reportados por Godínez et al. [4].

IV. PROCESO DE DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE PINZAS

En este capítulo se presenta tanto el desarrollo como la materialización del concepto para el diseño y la miniaturización del dispositivo de pinzas desde dos alternativas de solución. En primera instancia, se describe el proceso de diseño de un mecanismo rígido que busca emular el desempeño del mecanismo de referencia seleccionado en el capítulo anterior, pero a una escala más pequeña. Posteriormente se muestran las etapas o fases del proceso de diseño de un mecanismo flexible de pinzas, desde el establecimiento de una estrategia o metodología adecuada para el diseño y la fabricación de este tipo de mecanismos, pasando por la generación, combinación, evaluación y selección de conceptos hasta la materialización y refinación de diseños preliminares, para terminar con la propuesta de un diseño definitivo que cumpla de la mejor forma posible con las especificaciones objetivo planteadas anteriormente (ver tabla 4).

4.1 Miniaturización del dispositivo de pinzas mediante el diseño de un mecanismo rígido

Para comenzar con el proceso de diseño del dispositivo de pinzas, en primera instancia se optó por diseñar un mecanismo rígido. Este mecanismo toma como referencia el dispositivo mecánico de pinzas desarrollado por Godínez et al. [4] con el objetivo de realizar un rediseño de este para lograr una reducción en su tamaño. La figura 22 muestra otra imagen de la configuración y las partes de este dispositivo.

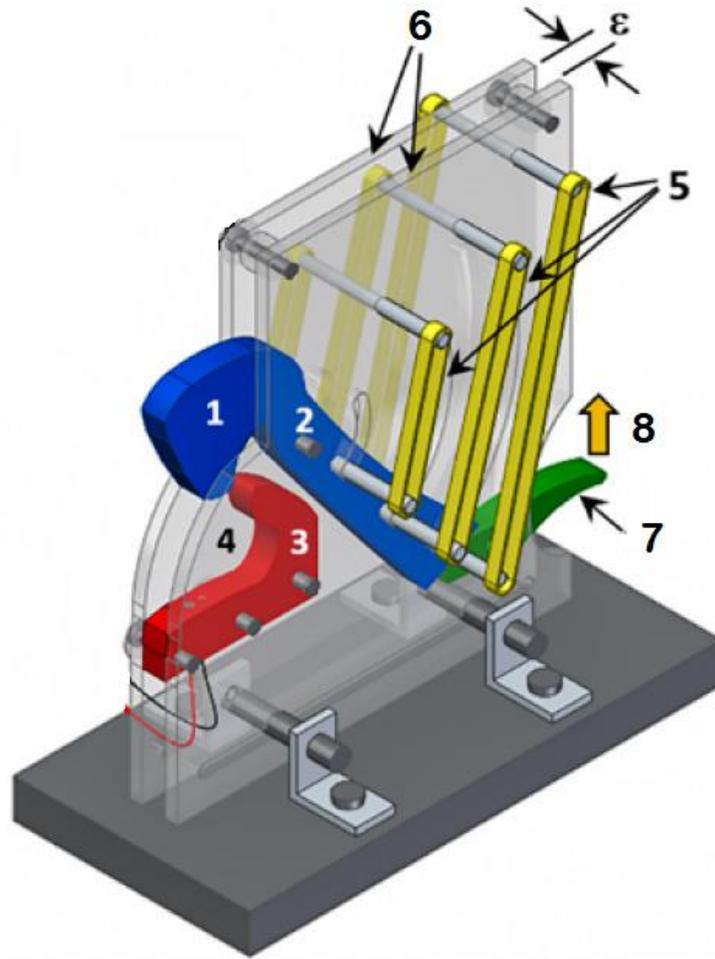


Figura 22. Modelo CAD en 3D del dispositivo mecánico de pinzas desarrollado por Godínez et al. [4] en su posición de apertura: 1) Pinza superior móvil, 2) Pivote, 3) Pinza inferior fija, 4) cuenco, 5) conjunto de ligas de goma, 6) Paredes de soporte de acrílico separadas una distancia de $\varepsilon = 5.8$ [mm], 7) gatillo mecánico, 8) Dirección de la activación del gatillo. [21]

4.1.1 Descomposición funcional en sistemas del mecanismo.

Para facilitar el análisis y el rediseño del dispositivo mecánico de pinzas de referencia se propuso realizar una descomposición funcional en sistemas (ver figura 23), es decir, se identificarán cada uno de los sistemas presentes en el dispositivo con base en las funciones particulares que tienen que realizar cada uno de estos para lograr el funcionamiento de la pinza.



Figura 23. Descomposición funcional en sistemas del dispositivo mecánico de pinzas.

A continuación, se presenta una descripción de cada uno de estos sistemas:

Sistema para producir cavitación. – El sistema para producir cavitación, también conocido como cámara de cavitación, consiste en el sistema en donde se generará la cavitación hidrodinámica, en el caso del dispositivo desarrollado por Godínez et al. [4] este sistema consiste en la configuración de un tubo Venturi que se forma en el momento de cierre total de las pinzas (ver figura 24).

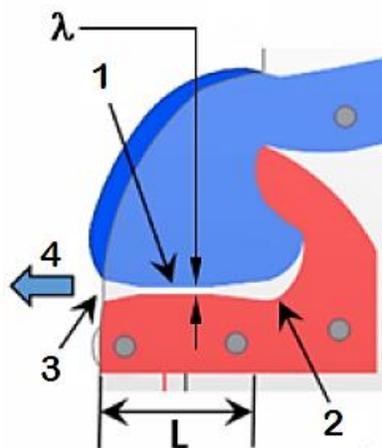


Figura 24. Sistema para producir cavitación (tubo Venturi) del dispositivo mecánico de pinzas desarrollado por Godínez et al. [4]: 1) Garganta del Venturi, 2) extremo cerrado, 3) extremo abierto (zona de divergencia), 4) Dirección del flujo. Longitud del Venturi $L = 22.31$. Longitud característica en el cuello del Venturi $\lambda = 1$ [mm]. [21]

Sistema de actuación. – Este sistema tiene la función de producir el movimiento en la pinza, es decir, donde se almacena y se transmite la energía necesaria para cerrar la pinza, los elementos que producen el movimiento tienen el nombre de actuadores y pueden ser desde resortes y ligas (como en el caso del dispositivo de referencia) hasta motores y dispositivos electromecánicos.

Sistema de soporte y accionamiento. - El sistema de soporte del prototipo sirve para dar forma al diseño y estructura, además de darle estabilidad al dispositivo en una posición dada. En el caso del sistema de accionamiento es el encargado de activar o accionar el dispositivo, en este caso, de liberar la pinza del estado de apertura. Existen diferentes clasificaciones para el sistema de activación en función de ciertas características, puede ser manual o remota además de mecánica, electromecánica, electrónica neumática, etc. En el caso del dispositivo de referencia se observa que su sistema de activación es manual utilizando un gatillo mecánico.

Materiales y manufactura. - Este apartado en si no representa ningún sistema en específico como los descritos anteriormente, sin embargo, es de plena importancia para el desarrollo del dispositivo. El considerar de que material y con qué método de manufactura se fabricará el prototipo es esencial para su diseño ya que estos pueden cambiar con base en ciertos requerimientos como los son el peso, el costo de producción, las dimensiones, las tolerancias, etc.

4.1.2 Diseño de la geometría del sistema para producir cavitación.

Como se mencionó anteriormente la cavitación hidrodinámica se define como el fenómeno de formación, desarrollo, crecimiento e implosión de cavidades, o burbujas, en un medio líquido, esto, debido a la variación de presión existente en un fluido tras aumentarse repentinamente su velocidad, como resultado de un cambio abrupto en la geometría y/o área de sección transversal del conducto de transporte. En la constricción o estrangulamiento, la energía cinética del líquido se eleva a expensas de la presión.

En un equipo para cavitación, el estrangulamiento o constricción se realiza utilizando dispositivos como platos perforados, tubos Venturi, rotores de alta velocidad, homogenizadores, entre otros. La presión de operación y las condiciones de flujo pueden variar de un mecanismo a otro, pero el fenómeno de generación de las cavidades es el mismo. Los reactores basados en plato

– orificios y Venturi han sido los más estudiados en aplicaciones con cavitación, ya que son los más eficientes para la creación y el control de condiciones intensas de formación y colapso de burbujas.

En algunas aplicaciones se prefieren los tubos Venturi en lugar de los orificios, gracias a que pueden generar un mayor número de burbujas y pueden mejorar la vida útil de la cavidad. En esta tecnología la cavitación es estable y asimétrica, siendo más utilizada en el logro de transformaciones de índole físico. Normalmente, el uso de un dispositivo Venturi se justifica para un proceso con intensidad cavitacional leve, con pulsos de presión de hasta 2 [MPa] [10].

Debido a lo anterior se justifica seguir utilizando el tubo Venturi como sistema cavitante en el diseño del dispositivo de pinzas, sin embargo, se pretende generar un rediseño de la cámara de cavitación en comparación con la que se forma en el dispositivo de referencia (ver figura 24) con base en ciertos parámetros de diseño que propicien la formación de la cavitación.

- ***Parámetros geométricos y de diseño.***

En el caso de los tubos Venturi, la nucleación de las burbujas y el inicio de la cavitación se dan directamente en la zona de estrangulamiento. Un primer parámetro geométrico para considerar es la relación (α) entre el perímetro de la garganta y el área de la sección transversal al paso del fluido el cual afecta considerablemente el número de efectos cavitantes generados durante la operación. Para un área de sección transversal definida, un mayor perímetro en la constricción genera más cavidades. Por lo tanto, formas rectangulares y elípticas son más deseables que la geometría circular [22, 23].

$$\alpha = \frac{p}{A} \quad (11)$$

Donde:

p = Perímetro de la sección transversal de la garganta del tubo Venturi.

A = área de la sección transversal del paso del fluido.

El nivel de crecimiento de las cavidades se puede controlar por medio de la selección del área interna de la garganta, la cual debe ser la suficiente para garantizar la máxima expansión de las burbujas. Con ello, se logra una mayor magnitud en la presión de implosión. El área interna de la zona de constricción se cuantifica en términos del parámetro (γ), definido como la razón entre la

altura o el diámetro de la garganta (según la geometría sea circular, elíptica o rectangular) y su longitud. Así, γ afecta directamente el tiempo de residencia de las cavidades [22]. Cuando la longitud es mayor que el diámetro o la altura en el estrechamiento, tiene lugar la formación de nubes de cavidades que interactúan entre ellas, terminando en la creación de chorros de vapor que se difunden fácilmente en el medio líquido circundante sin colapsar [24].

$$\gamma = \frac{\lambda}{l} \quad (12)$$

Donde:

λ = Altura o diámetro de la garganta (zona de constricción).

l = Longitud de la garganta.

La presión final de colapso en un tubo Venturi depende en gran medida de la forma de la zona de divergencia. La presión se restablece suavemente gracias a que la etapa de recuperación se diseña empleando un ángulo definido, y no de forma repentina como en el caso de los sistemas de platos perforados. La suave convergencia del arreglo tipo Venturi le permite generar un mayor número de eventos de cavitación antes de llegar a la garganta.

Con base en los parámetros geométricos descritos anteriormente y en la exploración e investigación de distintas formas se llegó a diseñar la geometría de dos pinzas (una fija y otra móvil) que al igual que las del dispositivo de referencia seleccionado, al cerrarse completamente y entrar en contacto forman la geometría de un tubo Venturi por donde será expulsado un fluido debido al cierre repentino de las mismas. En la figura 25 se puede observar la forma de estas pinzas, además de la geometría del tubo Venturi que se forma en el momento de su cierre total y algunos de sus parámetros geométricos.

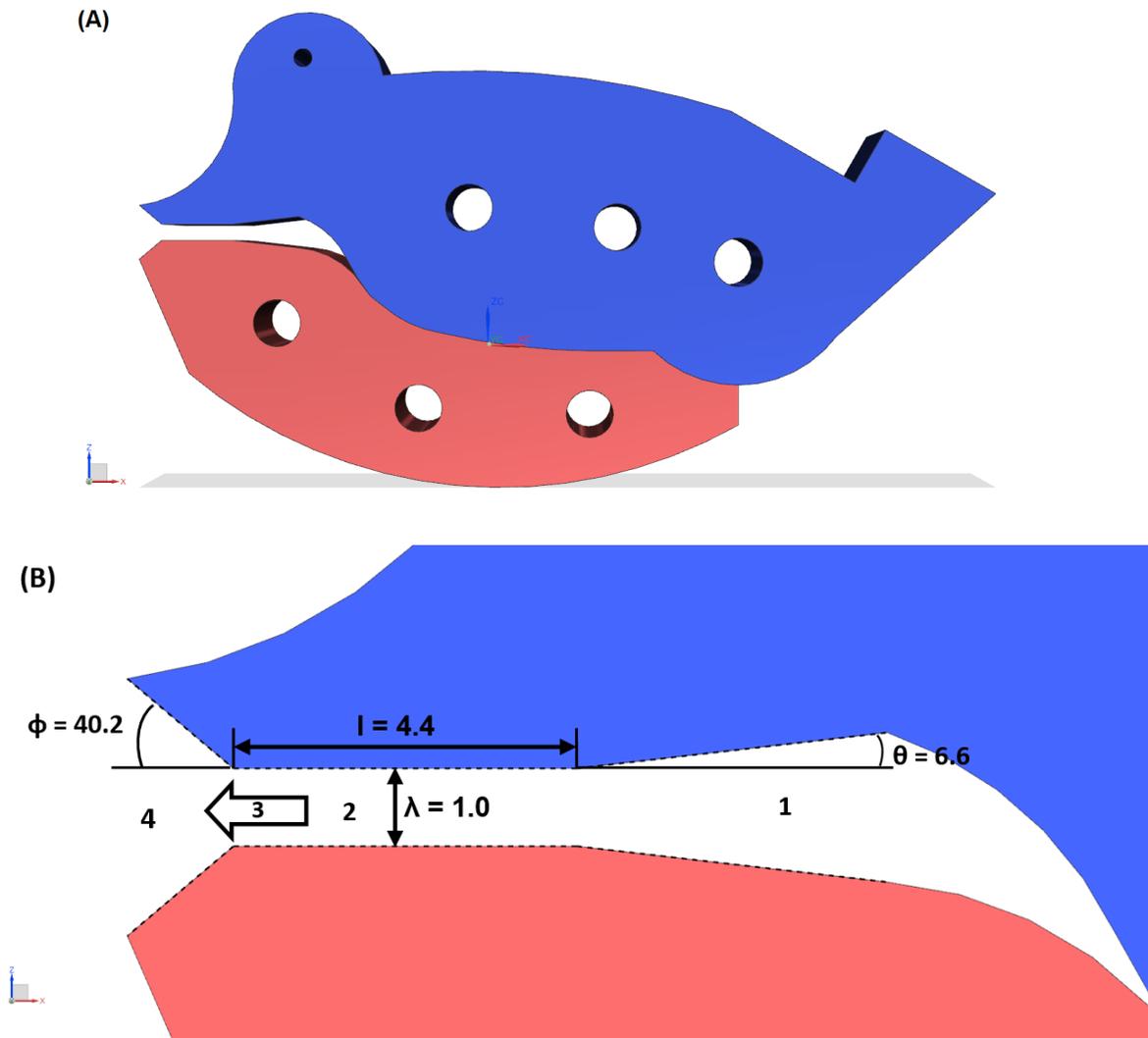


Figura 25. (A) Vista en perspectiva del modelo CAD en 3D de las pinzas del mecanismo rígido; pinza superior (móvil) en color azul, pinza inferior (fija) en color rojo. (B) Geometría y parámetros del Venturi (línea punteada amarilla); 1) Zona de convergencia, 2) Garganta o Zona de constricción, 3) Dirección del flujo, 4) Zona de divergencia. Todas las cotas están en [mm].

A modo de complementar la figura 25, a continuación, se presenta la tabla 6 la cuál muestra los parámetros geométricos del tubo Venturi que se forma en el cierre de las pinzas.

Tabla 6. Parámetros geométricos del tuvo Venturi formado por las pinzas del mecanismo rígido.

Parámetro geométrico	Valor	Unidad
Longitud del Venturi (L)	9.8	mm
Espesor (ϵ)	6	mm
Altura de la garganta (λ)	1	mm
Longitud de la garganta (l)	4.4	mm
Ángulo de convergencia (θ)	6.6	°
Ángulo de divergencia (ϕ)	40.2	°
Perímetro de la sección transversal al paso del fluido en la garganta (p)	14	mm
Área de la sección transversal al paso del fluido en la garganta (A)	6	mm ²
$\alpha = p/A$	2.33	mm ⁻¹
$\gamma = \lambda/l$	0.23	Adim.

4.1.3 Diseño del sistema de accionamiento, actuación y soporte.

Para el diseño de los sistemas de accionamiento, actuación y soporte se propuso adaptar el concepto de cada uno de estos sistemas utilizados en el dispositivo de referencia (figura 22). Estos son

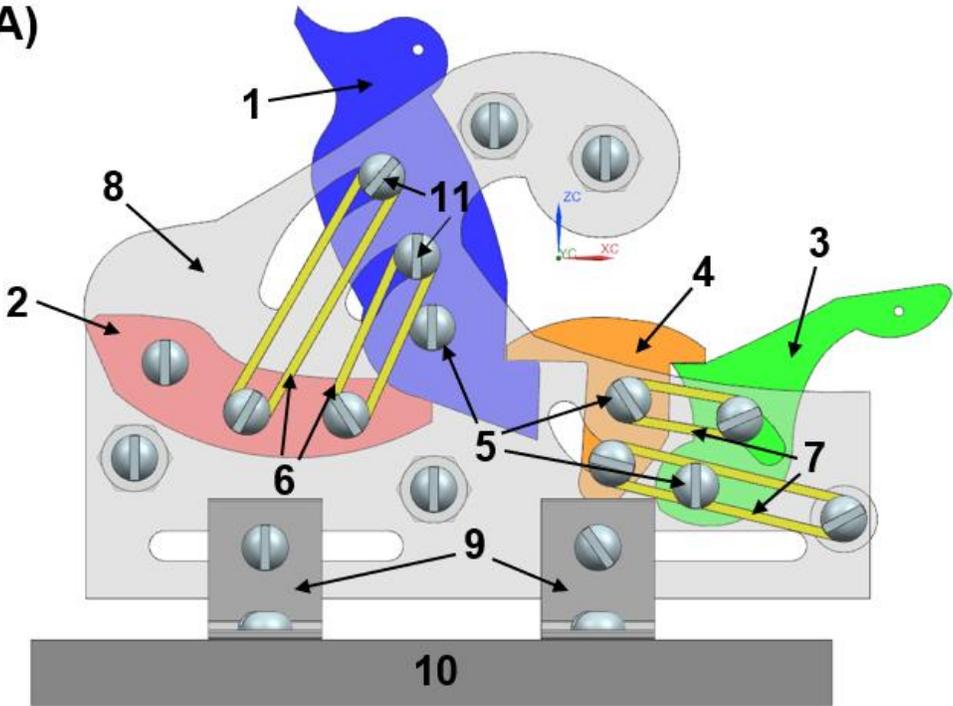
- **Sistema de actuación:** Se utilizarán dos conjuntos de ligas con diferentes propósitos, uno para el cierre y otro para la apertura de las pinzas. El primer conjunto de ligas será el encargado de estar tensionadas en la posición de apertura de las pinzas y que cuando el sistema de accionamiento sea activado estas ligas se suelten transmitiendo su energía cinética a la pinza superior. El segundo grupo de ligas estarán tensionadas en la posición de cierre de las pinzas, esto con el propósito de ayudar en el proceso de carga del dispositivo, es decir, pasar de la posición de cierre a la posición de apertura. Cabe

mencionar que cada liga está sujeta en uno de sus extremos a un perno deslizante y en el otro extremo a un tornillo de sujeción fijo.

- **Sistema de accionamiento:** Consiste en un gatillo mecánico junto con un eslabón intermedio que conecta al gatillo con la pinza superior. Al momento de accionar el gatillo en la posición de apertura, el eslabón intermedio deja de hacer contacto con la pinza superior lo que libera a las ligas encargadas del cierre de las pinzas. La carga del dispositivo es manual y consiste en jalar la pinza superior por medio de un hilo hacia su posición de apertura y una vez en esa posición tanto el eslabón como el gatillo se configurarán, ayudados por las ligas de apertura, en una posición tal que restrinjan el movimiento de la pinza superior hasta el accionamiento del gatillo.
- **Sistema de soporte.** Este sistema consiste en dos paredes con orificios y ranuras guía colocados para la unión, fijación y movimiento de los elementos de los demás sistemas por medio de tornillos, pernos deslizantes y tuercas. Adicionalmente, estas placas cuentan con dos orificios especiales cada una, donde se colocan esquineros en que a su vez son atornillados a una base la cual da estabilidad y fijación a todo el dispositivo.

La figura 26 muestra dos vistas del diseño en CAD del mecanismo rígido de pinzas, señalando cada una de las partes que conforman los sistemas descritos anteriormente.

(A)



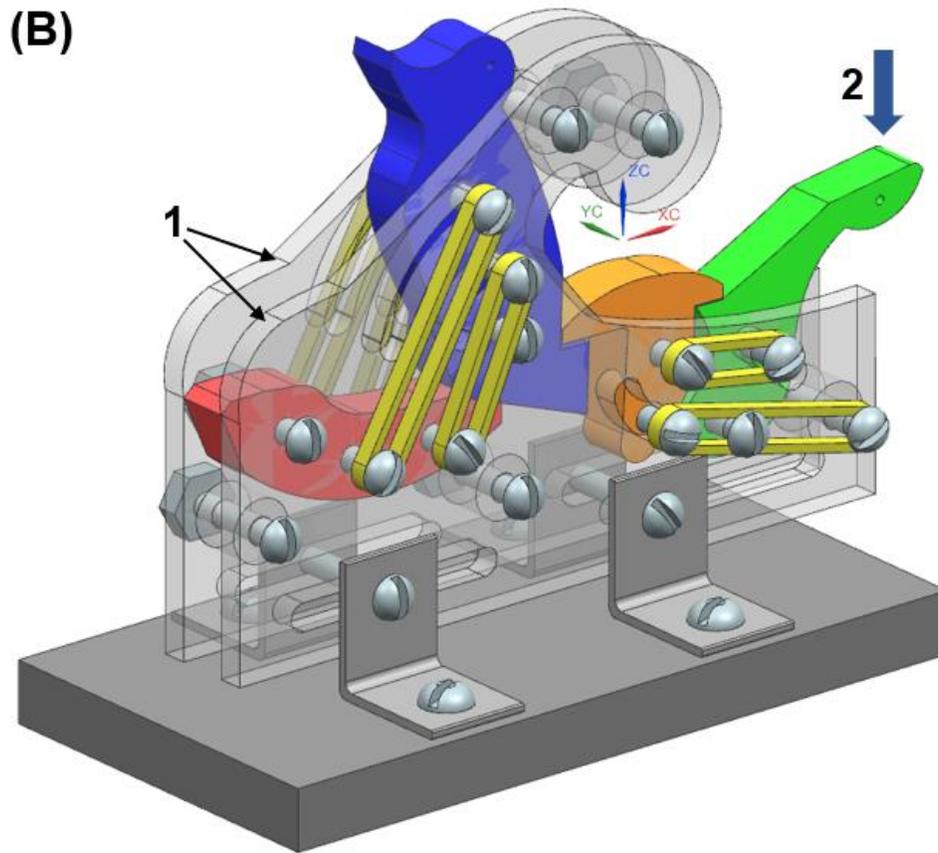


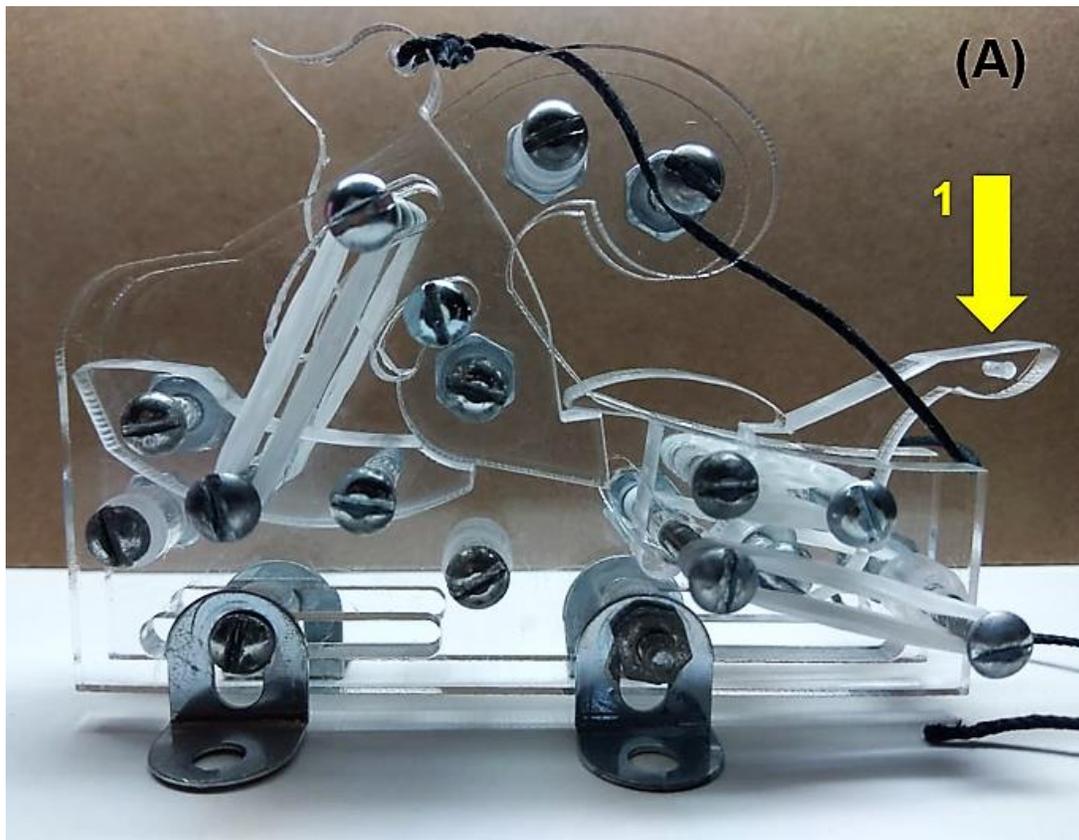
Figura 26. Modelo en CAD del mecanismo rígido de pinzas en su posición de apertura. (A) Vista lateral; 1) Pinza superior (móvil), 2) Pinza inferior (fija), 3) Gatillo mecánico, 4) eslabón intermedio, 5) Pivotes, 6) Ligas de cierre, 7) Ligas de apertura, 8) Paredes de soporte, 9) Esquineros, 10) Base, 11) Pernos deslizantes. (B) Vista en Isométrico; 1) Paredes de soporte, 2) Dirección de activación del gatillo.

Cabe destacar la correspondencia de los números de la imagen (A) de la figura 26 con el sistema al que conforman, estos son: 1 y 2 (sistema para producir cavitación), 3 y 4 (sistema de accionamiento), 5, 8, 9 y 10 (sistema de soporte), 6, 7 y 11 (sistema de actuación).

4.1.4 Materiales y manufactura del mecanismo rígido de pinzas.

Debido a la necesidad de poder observar el fenómeno de cavitación dentro del tubo Venturi y al mismo tiempo darle rigidez y resistencia al dispositivo, cada una de las partes constituyentes del mecanismo rígido (sin contar tornillos, pernos, tuercas, ligas y esquineros) se fabricaron de acrílico

transparente por medio de corte láser. Los demás elementos se consiguieron de forma comercial. Posteriormente cada uno de estos elementos se ensamblaron como lo muestra la figura 27.



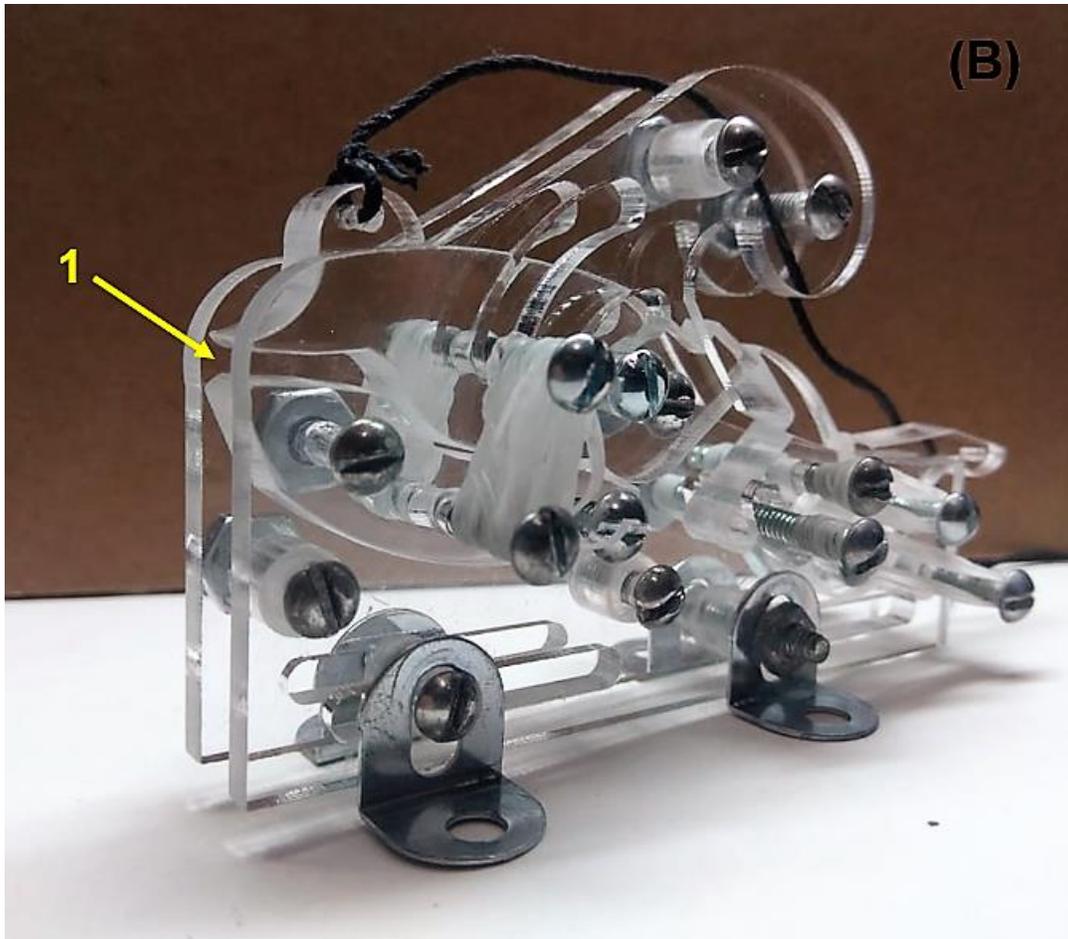


Figura 27. Prototipo del mecanismo rígido de pinzas para producir cavitación hidrodinámica. (A) Posición de apertura; 1) Dirección de activación del gatillo. (B) Posición de cierre; 1) Formación del tubo Venturi.

En la figura 27 se puede notar que se agregó hilo cáñamo en la pinza superior para facilitar la carga del dispositivo, además, se suprimió el uso de un par de ligas de cierre debido a que se observó que la velocidad de cierre que se alcanza es suficiente con un conjunto de ligas sujetas a cada lado de un perno deslizante. En la tabla 7 se muestran algunas especificaciones y características importantes de este dispositivo.

Tabla 7. Especificaciones y características físicas del mecanismo rígido de pinzas.

Especificación/característica	Valor
Dimensiones	91 x 60 x 27 [mm]
Tipo de accionamiento	Gatillo mecánico

Tipo de sistema para producir cavitación	Tubo Venturi
Actuador	Mecánico (ligas)
Material	Acrílico /goma (ligas) / acero (elementos de sujeción)
Número de partes o elementos*	40

*No se consideran la base, los esquineros ni los elementos requeridos para el ensamble de estas partes.

4.1.5 Pruebas experimentales del mecanismo rígido de pinzas.

Con el fin de analizar el desempeño del mecanismo rígido de pinzas se realizaron pruebas experimentales las cuales consistieron en sumergir el prototipo fabricado anteriormente en un tanque rectangular (40 [cm] de largo, 10 [cm] de ancho, 30 [cm] de alto) lleno de agua a condiciones ambientales de 20 [°C] y 77.86 [kPa] y con paredes transparentes. El dispositivo fue sujeto a un banco de pruebas ubicado en el fondo del tanque, como se muestra en la figura 28.

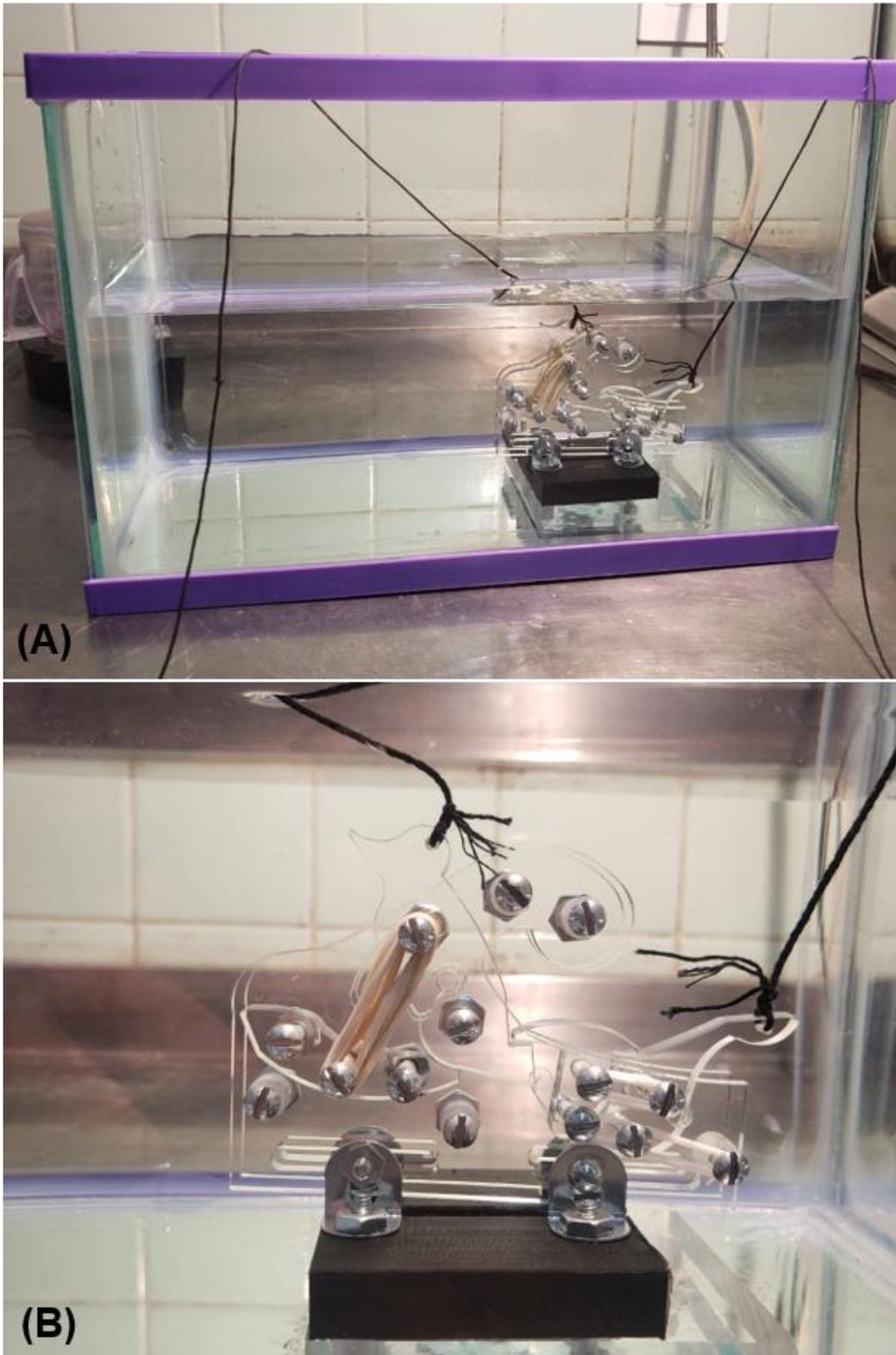


Figura 28. Configuración experimental del mecanismo rígido de pinzas. A) Vista del prototipo sumergido en agua, B) Sujeción del prototipo al banco de pruebas.

Posteriormente el dispositivo fue liberado por medio del accionamiento del gatillo mecánico lo cual provocó el cierre a gran velocidad de la pinza superior. Este proceso de cierre fue captado por medio de la grabación de un vídeo utilizando un celular de la marca Samsung modelo S9 plus y a una tasa de 960 cuadros o fotogramas por segundo. La figura 29 muestra una secuencia de imágenes del proceso de cierre de este prototipo con enfoque en la observación del fenómeno en el tubo Venturi.

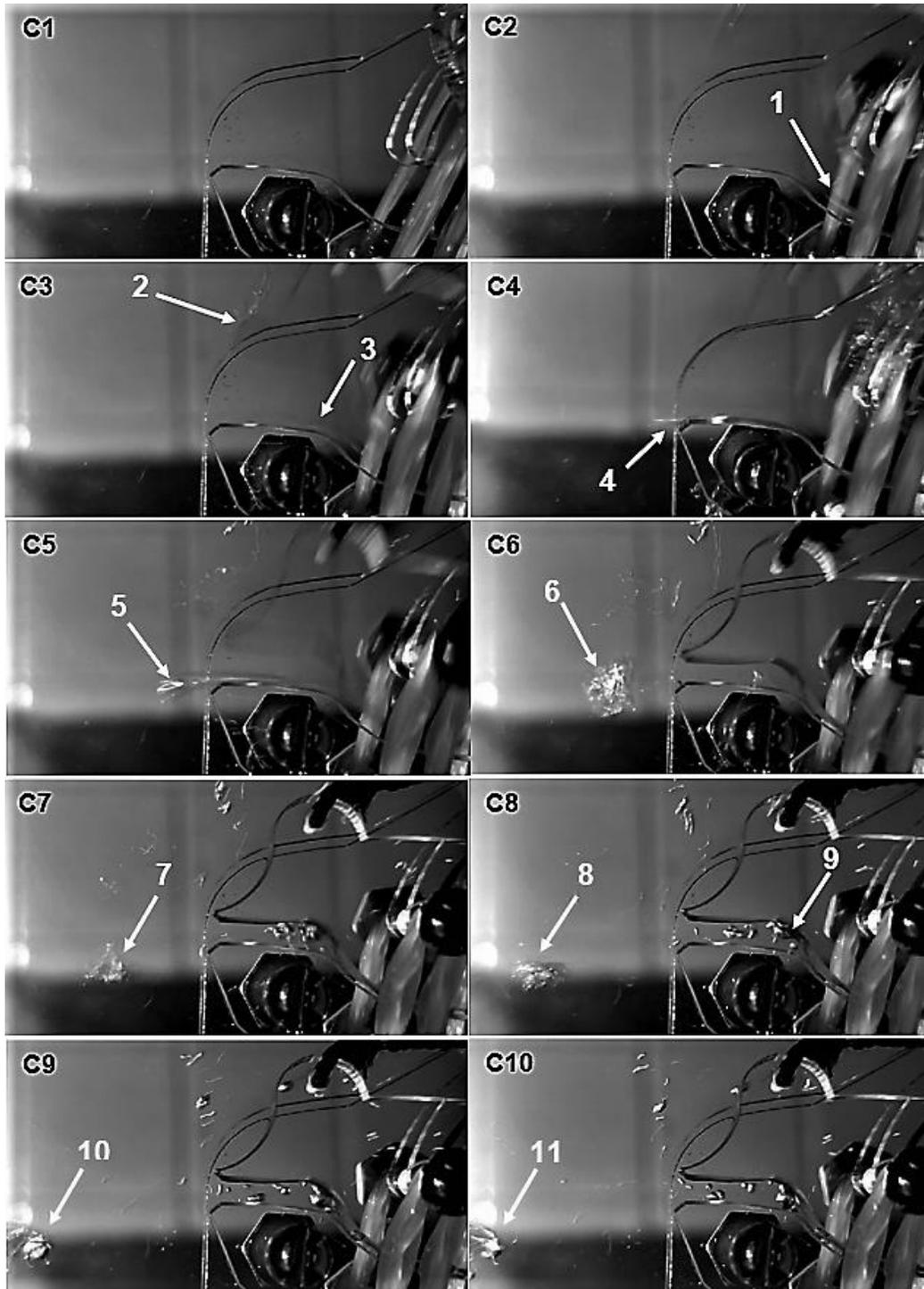


Figura 29. Proceso de cierre del mecanismo rígido de pinzas. 1) Formación de flujo en la parte trasera del Venturi, 2) Presencia de burbujas debido al arrastre que genera la punta de la pinza superior, 3) Deslizamiento del flujo en la garganta del Venturi, 4) Salida del flujo del Venturi, 5) Expulsión del flujo tipo jet, 6) Formación de un vórtice de burbujas, 7) Primera implosión del vórtice, 8) Formación de un segundo vórtice, 9) Presencia de burbujas remanentes en el Venturi, 10) Movimiento del vórtice, 11) Implosión del segundo vórtice.

Analizando la figura anterior se puede observar como el flujo se empieza a formar una vez que la pinza superior empieza su movimiento de cierre (cuadros 2 y 3) para posteriormente salir en forma de jet (cuadros 4 y 5) y formar un vórtice de burbujas a la salida del Venturi (cuadro 6) y posteriormente colapsar o implosionar (cuadro 7). Este proceso de formación del vórtice y su posterior implosión se repite una vez más en los cuadros 8, 9 y 10. Además de esto utilizando el software de análisis de video Tracker se pudo conocer que el cierre total de la pinza superior se realiza en aproximadamente 3.13 [ms] o bien con una velocidad angular máxima de aproximadamente 350 [rad/s].

Es importante mencionar que, aunque se logró una reducción de tamaño de aproximadamente el 20.23% con respecto al volumen que ocupa el mecanismo de referencia (figuras 5 y 22) y la generación de cavitación hidrodinámica al momento de activar el mecanismo dentro del agua, la gran cantidad de partes, la dificultad de ensamble, el uso de elementos de mecánicos de unión y fijación como tornillos, tuercas, pernos e inclusive los elementos de actuación como las ligas limitaron la capacidad de reducción de tamaño de este mecanismo, además de que estos elementos aportan un cantidad considerable de peso en el dispositivo. Debido a lo anterior se justifica el diseño de un mecanismo flexible con el objetivo de poder miniaturizar aún más el diseño del dispositivo de pinzas.

4.2 Estrategia para el diseño del mecanismo flexible

Dentro de las metodologías de diseño se encuentran las estrategias o modelos, los cuales dictan los pasos a seguir en el diseño. Algunas estrategias simplemente describen la secuencia de actividades que ocurren típicamente en el diseño, mientras que otras estrategias intentan prescribir un mejor o más adecuado patrón de actividades. Estas estrategias, a pesar de ser sistemáticas son heurísticas, es decir, se basan en la experiencia previa del diseñador y en ciertas directrices y reglas prácticas que conducen a lo que el diseñador espera obtener, pero sin garantía absoluta de éxito [25].

Por lo tanto, con el fin de sistematizar el diseño de Mecanismos Flexibles se estructuró una estrategia de diseño (ver figura 30) la cual nos permite combinar la utilización de alguna de las técnicas de diseño de mecanismos flexibles con la metodología de diseño de productos propuesta por Pahl y Beitz [19] considerando los desafíos propios del diseño de estos mecanismos

recomendados por Howell [26] como los son: las posibilidades de fabricación y manufactura con las que se cuenta, las limitaciones de los materiales y las condiciones del entorno.

A fin de disminuir la falta de experiencia en el proceso de diseño de este tipo de mecanismos, se usará el Método de Optimización Topológica (MOT) para conseguir una primera aproximación (diseño preliminar) del mecanismo flexible. Luego le siguen una serie de operaciones iterativas de rediseño encaminadas a refinar el diseño preliminar (resultado de la optimización) con el fin del obtener la forma final (diseño definitivo) del mecanismo lo que finalmente completa la solución al problema de diseño y da paso al proceso de miniaturización o escalamiento.

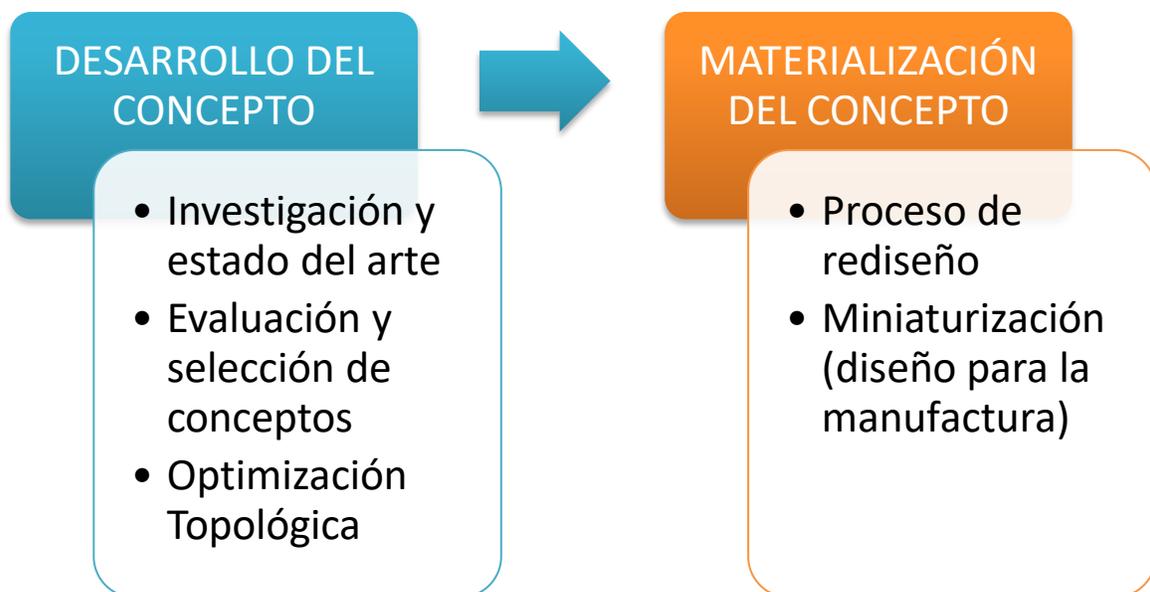


Figura 30. Estrategia propuesta para el diseño y la miniaturización del mecanismo flexible de pinzas.

Es importante mencionar que cada una de estas etapas corresponden a las fases 2 y 3 del proceso de diseño general mostrado en la figura 21 del capítulo 3 de este documento.

A fin de complementar la estrategia propuesta en la figura 30, se presenta la tabla 8 la cuál presenta lo que se espera obtener al finalizar cada una de las actividades relacionadas con cada etapa de esta estrategia.

Tabla 8. Resultados esperados en cada etapa de la estrategia de diseño del mecanismo flexible de pinzas.

Etapas	Actividad	Resultado
Desarrollo del concepto	Investigación y estado del Arte de mecanismos similares.	Conceptos preliminares
	Generación, combinación y evaluación de conceptos.	Selección de un concepto definitivo de la forma
	Optimización Topológica	Diseño preliminar
Materialización del concepto	Proceso de rediseño	Diseño definitivo
	Proceso de miniaturización	Prototipo Funcional

A continuación, se muestra el desarrollo a detalle de cada una de estas etapas en el proyecto.

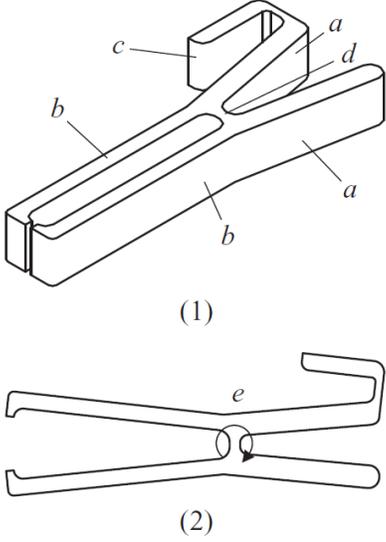
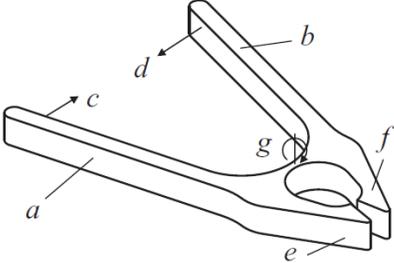
4.3 Desarrollo del concepto del mecanismo flexible de pinzas (Diseño Conceptual)

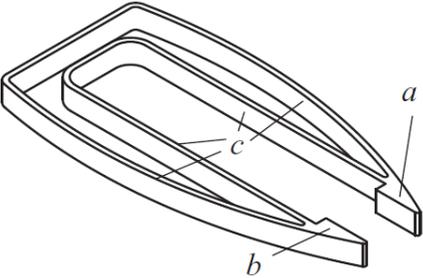
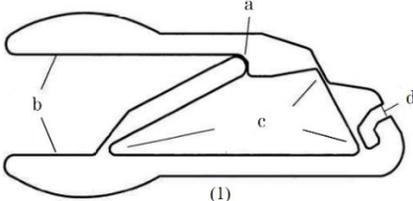
4.3.1 Investigación y estado del arte en mecanismos similares.

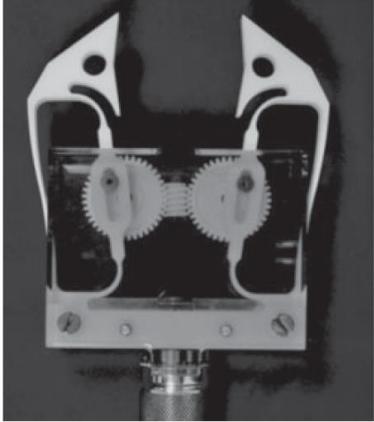
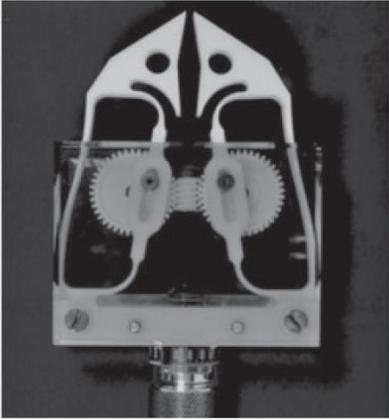
En esta sección se realizó una investigación sobre el estado del arte de mecanismos, ya sean rígidos o flexibles, que realicen una función similar a la necesaria por el dispositivo de pinzas con el objetivo de observar y documentar las distintas formas y geometrías que se tienen para realizar el diseño del prototipo.

Los distintos diseños se encontraron principalmente en páginas web enfocadas en la compartición de diseños creados por la comunidad para su fabricación utilizando manufactura aditiva, además de algunos diseños propuestos por Howell en la referencia [14] y [26]. En la tabla 9 se muestra una comparación entre los distintos diseños de pinzas encontrados y la descripción de cada uno de ellos.

Tabla 9. Estado del arte de mecanismos de pinzas (Conceptos preliminares).

No.	Nombre	imagen	Descripción
1	Gancho de agarre	 <p>(1)</p> <p>(2)</p>	<p>Este mecanismo flexible utiliza un segmento flexible de pequeña longitud a forma de pivote y como almacenador de energía elástica [26].</p> <p>(1) Cuando los segmentos rígidos a se juntan los segmentos rígidos b se separan por el segmento flexible d. El segmento rígido c es una zona de enganche.</p> <p>(2) Configuración de deformación del segmento flexible d.</p>
2	Pinzas de sujeción	 <p>(1)</p>	<p>Este mecanismo flexible tiene el mismo principio de funcionamiento que el mecanismo 1 pero con una geometría diferente.</p> <p>(1) Los segmentos rígidos a y b se trasladan en la dirección c y d, respectivamente, lo que hace que los segmentos rígidos e y f se separen. El segmento flexible g permite la deformación y almacena la energía.</p>

3	Abrazadera	 <p>(1)</p>	<p>Este mecanismo utiliza pliegues para la deformación y el almacenamiento de energía elástica [26].</p> <p>(1) Los segmentos rígidos a y b son las superficies de sujeción. Los segmentos flexibles c permiten la deformación y almacenan energía para proporcionar la fuerza de sujeción.</p>
4	Mordaza 3D	 <p>(1)</p>	<p>La figura muestra una configuración de pinza flexible en 3D compuesta por tres mitades de una pinza flexible 2D dispuestas a 120° de distancia. Cuando se presiona la parte central hacia abajo, las tres mordazas de la pinza se juntan para sujetar un objeto [26].</p> <p>(1) Pinza flexible en 3D.</p>
5	Mecanismo flexible de sujeción	 <p>(1)</p>	<p>Este mecanismo se basa en un modelo pseudo-rígido de 4 barras [14].</p> <p>(1) Este mecanismo presenta una articulación o junta pasiva a la cuál trabaja a compresión al aplicar una fuerza en las empuñaduras b, esta fuerza se trasmite al puerto de salida d por medio de la deformación de los</p>

			<p>pivotes de flexión de pequeña longitud c.</p>
6	<p>Mecanismo pseudo-flexible de agarre</p>	<div style="text-align: center;">  <p>(1)</p>  <p>(2)</p> </div>	<p>Este mecanismo flexible de sujeción proporciona un agarre casi paralelo. Proporciona una fuerza de agarre que tiene un valor casi constante [26].</p> <p>(1) Esta figura muestra el mecanismo flexible de sujeción junto con su dispositivo de accionamiento (piñón-corredera) en su posición de apertura.</p> <p>(2) Esta figura muestra el mecanismo flexible de sujeción junto con su dispositivo de accionamiento (piñón-corredera) en su posición casi cerrada.</p> <p>(3) Esta figura muestra la configuración del mecanismo flexible de sujeción fabricado con un material de alta rigidez y elasticidad, como el Nylon y el Delrin R.</p>

		 <p>(3)</p>	
7	Pinza flexible para ropa	 <p>(1)</p>  <p>(2)</p>	<p>Este mecanismo flexible funciona sin ningún ensamble y es útil para sellar bolsas y colgar artículos. La sección parabólica funciona a modo de resorte para el almacenamiento de la energía elástica [27].</p> <p>(1) En esta figura se muestra la pinza en su estado de reposo, sin embargo, debido a la forma de la sección parabólica en este estado se almacena una cierta cantidad de energía elástica.</p> <p>(2) Esta figura muestra la pinza en su estado de apertura. En este estado se logra la deformación de la sección parabólica lo que incrementa la energía potencial elástica, la cual a su vez se convierte en energía cinética al soltar las pinzas.</p>

8	Clip flexible	 <p>(1)</p>  <p>(2)</p>	<p>Esta es una pinza fabricada por manufactura aditiva utilizando PETG como material. En esta pinza se combina dos secciones: Una sección trasera con una forma de resorte la cual aporta una precarga al mecanismo y una sección de pivote la cual permite el desplazamiento angular de la pinza y la carga del resorte [28].</p> <p>(1) Esta figura muestra la pinza en su estado de precarga. Para lograr el estado de carga de la pinza se debe aplicar una fuerza hacia abajo en los extremos de la pinza lo cual generará que el resorte se deforme y el pivote gire abriendo la pinza. Si se libera la fuerza de los extremos, la energía potencial elástica almacenada por el resorte se liberará y hará que gire el pivote en el sentido contrario al de estado de carga y consecuentemente se cerrará la pinza.</p> <p>(2) Esta figura muestra el estado de reposo del mecanismo. Para lograr el estado de precarga, se debe aplicar una fuerza de compresión en la superficie externa de los extremos de la pinza para que embone el pivote y</p>
---	---------------	--	--

			el resorte se deforme a su estado de precarga.
9	Pinza para ropa	 <p>(1)</p>	<p>Las pinzas para ropa es un mecanismo rígido ampliamente conocido, las hay de distintos tipos y formas, sin embargo, el funcionamiento detrás de cada tipo se basa en dos elementos principales: Un elemento almacenador de energía, comúnmente argollas o resortes de torsión y un pivote a partir del cual giran las dos secciones de las pinzas hacia su posición de apertura o cierre.</p> <p>(1) La figura muestra una pinza para ropa con argolla metálica como elemento almacenador de energía. Al momento de aplicar una fuerza o carga hacia abajo en los extremos de la pinza, las secciones se abren y la argolla se deforma almacenando energía potencial elástica, para posteriormente liberarse y cerrar la pinza en el momento en el que se deja de aplicar dicha carga.</p>

4.3.2 Generación, combinación y evaluación de conceptos.

En esta sección se analizarán cada uno de los diseños encontrados en el estado del arte y se combinarán para generar un concepto de la forma de la pinza, tanto del elemento flexible que actuará

como almacenador de energía elástica (sistema de actuación) como del sistema para producir cavitación, con el fin de proponer el concepto de la forma del mecanismo flexible.

Al analizar los distintos diseños de la tabla 9 se puede observar que en general hay dos tipos o formas de accionamiento de las pinzas, para la apertura y para el cierre. En el accionamiento para la apertura la carga o fuerza externa que se tiene que aplicar es para lograr la apertura de las pinzas, es decir, su estado de reposo o de precarga se encuentra con las pinzas cerradas, como se observa en los diseños 1, 2, 7, 8 y 9; caso contrario lo observamos en los diseños 3, 4, 5 y 6 en los cuales el estado de reposo o de precarga se encuentra con la pinza abierta y la fuerza externa que logra la deformación del elemento flexible es para lograr el cierre de la pinza.

Para el diseño de nuestro prototipo se considerará que nuestro mecanismo sea accionado para la apertura ya que lo que se busca es que, al momento de aplicar la fuerza externa y abrir la pinza, el elemento flexible cambie de su estado de reposo o de precarga al de carga donde se almacene la mayor cantidad de energía potencial elástica para que posteriormente al dejar de aplicar la fuerza de accionamiento el elemento elástico libere la energía almacenada y la pinza cierre a una gran velocidad para formar la cavitación hidrodinámica en el sistema para producir cavitación, es decir, en el tubo Venturi que se forma al cerrar las pinzas. A continuación, se muestran los conceptos generados tomando como base los diseños correspondientes a mecanismos accionados para la apertura. Cabe resaltar que estos conceptos sólo se centran en el diseño de la configuración del elemento flexible y de algunos bocetos para el diseño del sistema para producir cavitación.

Mecanismos pseudorígidos

Se realizaron algunas aproximaciones en geometrías y topologías para comprender y familiarizarse con los distintos movimientos que pueden brindar los mecanismos flexibles. Estos primeros conceptos preliminares tomaron como referencia a mecanismos pseudo-rígidos en los que se trató de diseñar un eslabón biestable que proporciona la apertura y el cierre de la pinza por medio de un segmento flexible de menor tamaño y la aplicación de una fuerza en un gatillo mecánico, como se muestra en figura 31, sin embargo, debido a que se utilizó un material demasiado frágil (acrílico) para la fabricación del prototipo (vía corte laser), este segmento flexible se fracturó al momento de tratar de flexionar el eslabón biestable. Para el caso del diseño del sistema para producir cavitación, se utilizó como base la forma del mecanismo rígido desarrollado anteriormente (figura 27) con algunas modificaciones.

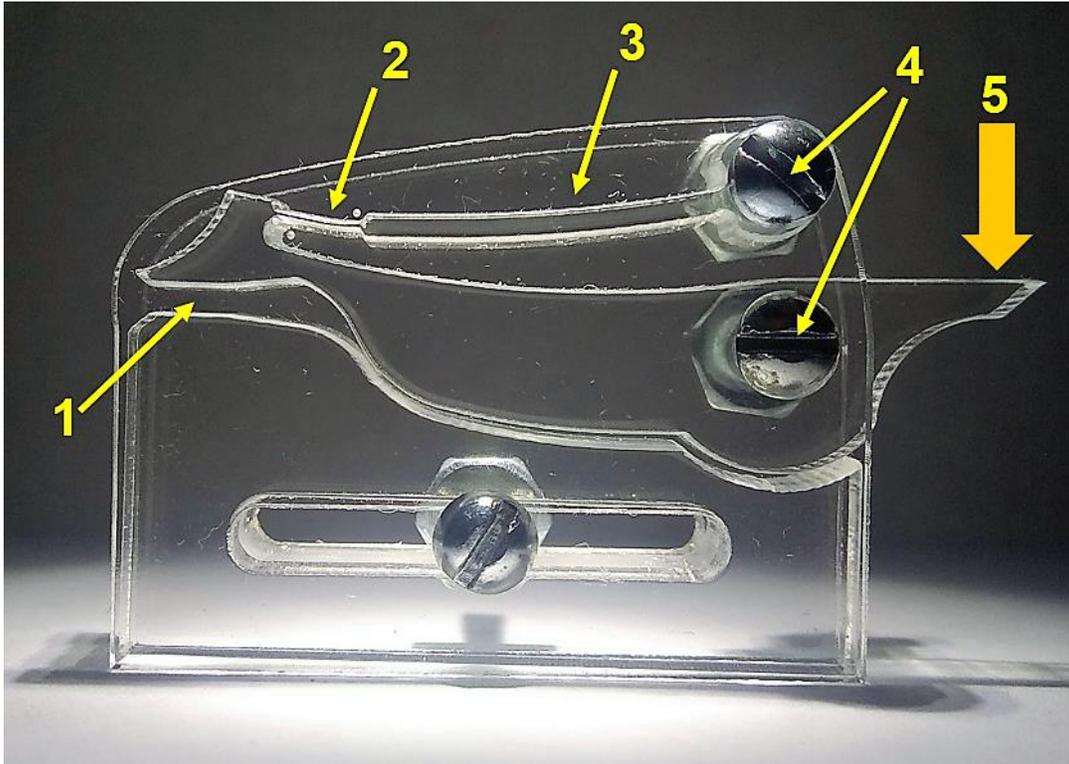


Figura 31. Mecanismo pseudo-rígido de pinzas con segmento flexible. 1) Sistema para producir cavitación , 2) Segmento flexible (zona de fractura), 3) Eslabón biestable, 4) Pivotes, 5) Dirección de la aplicación de la fuerza para cambiar el estado del eslabón.

Debido a la problemática anterior se optó por sustituir el segmento flexible por una junta rotacional que conecta la pinza superior y el eslabón biestable, sin embargo, al igual que en el diseño anterior el eslabón biestable se fracturó al momento de aplicar la fuerza para cambiar su estado debido a la fragilidad del material. En este caso la fractura se localizó en una zona de concentración de esfuerzos debido al cambio en la geometría entre eslabón con el gatillo mecánico (ver figura 32).

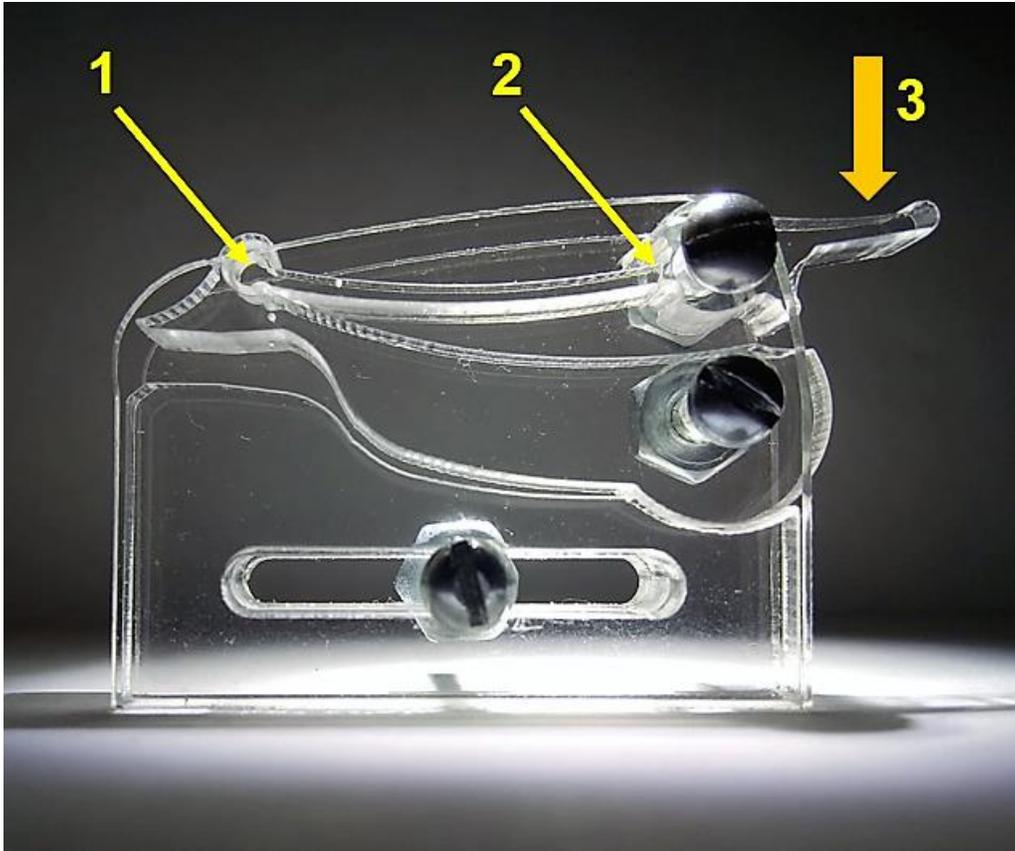


Figura 32. Mecanismo pseudo-rígido de pinzas con junta rotacional. 1) Junta Rotacional, 2) Zona de fractura, 3) Dirección de la aplicación de la fuerza para cambiar el estado del eslabón.

Las dimensiones de los dos mecanismos anteriores son 51 x 12 x 31 [mm] lo que representa una reducción de casi el 50% con respecto al volumen del mecanismo de referencia, sin embargo, debido a las fallas mecánicas que se presentaron en los prototipos, principalmente por la fragilidad del material empleado, se optó por cambiar el concepto de diseño del mecanismo flexible, así como el método de manufactura y los materiales empleados para la fabricación de los prototipos.

Como se mencionó anteriormente, los mecanismos flexibles presentan una amplia versatilidad en cuanto a sus métodos de fabricación, ya que, al obtener su movimiento de elementos o regiones flexibles, muchos de estos mecanismos pueden fabricarse a partir de láminas o capas planas de material. En nuestro caso, se eligió realizar la fabricación de los prototipos vía manufactura aditiva por extrusión de material ya que se cuenta con un equipo para este propósito con el cuál se podrán fabricar prototipos rápidos para poder evaluar los distintos conceptos de diseño, además de que este proceso de manufactura permite la aplicación de una gran variedad de materiales, principalmente

polímeros, los cuales presentan una elasticidad adecuada para lograr el funcionamiento esperado de los mecanismos.

Concepto 1

El primer concepto de interés en evaluar fue el clip flexible referenciado con el no. 8 de la tabla 9. Para este caso, el diseño se fabricó de forma íntegra por medio de manufactura aditiva utilizando el copolímero PETG como material, el cuál es una combinación del Tereftalato de polietileno (PET, por sus siglas en inglés) con un proceso de glicolizado [29]. La figura 33 muestra el prototipo fabricado de este diseño con dimensiones de 50 x 10 x 42 [mm].

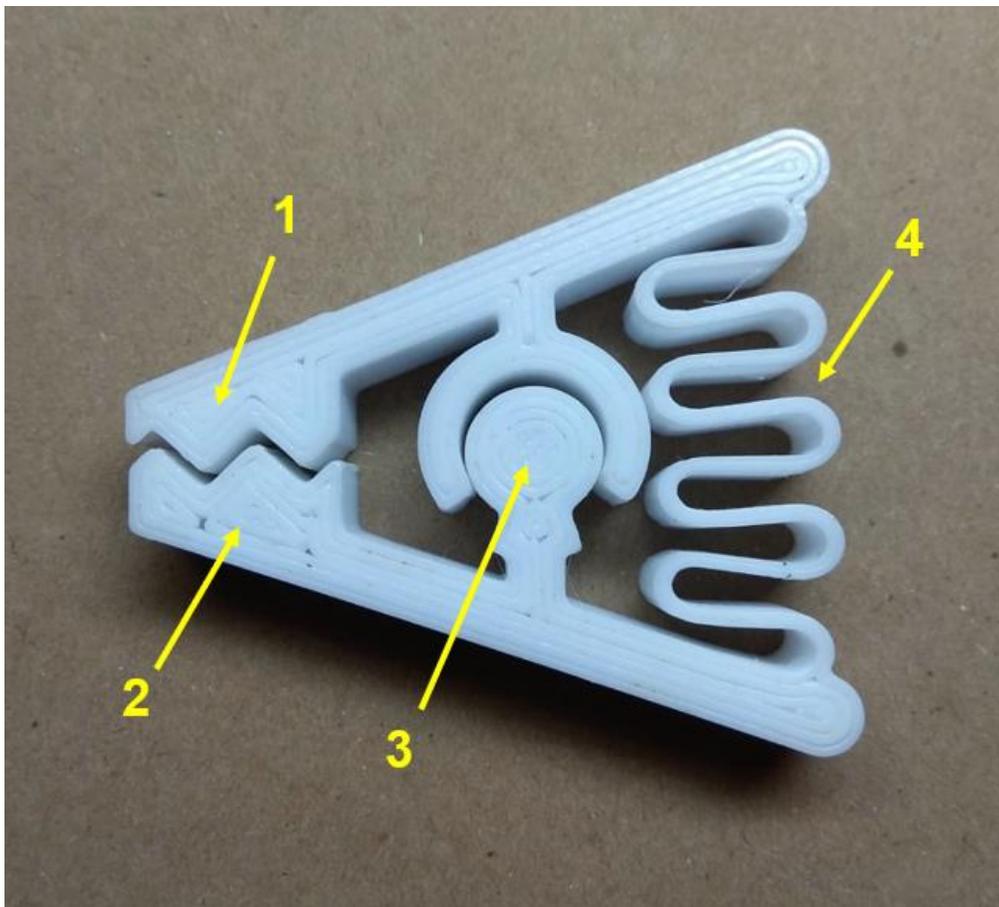


Figura 33. Primer concepto para el diseño del mecanismo flexible de pinzas. 1) Pinza superior, 2) Pinza inferior, 3) Junta Rotacional (pivote), 4) Elemento flexible (resorte).

La primera observación que se hizo al probar este diseño es que la junta rotacional que se utiliza como pivote para poder realizar la apertura de las pinzas no presenta un ensamble perfecto, lo que genera un movimiento inestable al momento rotar la pinza superior. Aunado a esto, a pesar de que

la forma de resorte del elemento flexible pareciera ser una buena idea para lograr la carga del sistema, este elemento no logra almacenar la suficiente cantidad de energía para que la pinza cierre de forma rápida para lograr cavitación hidrodinámica.

Concepto 2

El segundo concepto que se generó tuvo como base el diseño no. 7 (pinza flexible para ropa) de la tabla 9, este diseño se combinó con la forma de resorte del elemento flexible del primer concepto con el objetivo de lograr un mayor almacenamiento de energía. Al igual que el prototipo anterior, este diseño se fabricó vía manufactura aditiva, sin embargo, para este caso se utilizó el polímero Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS, por sus siglas en inglés) ya que cuenta con una mayor rigidez (ver figura 34). Las dimensiones de este prototipo son: 55 x 10 x 28 [mm].

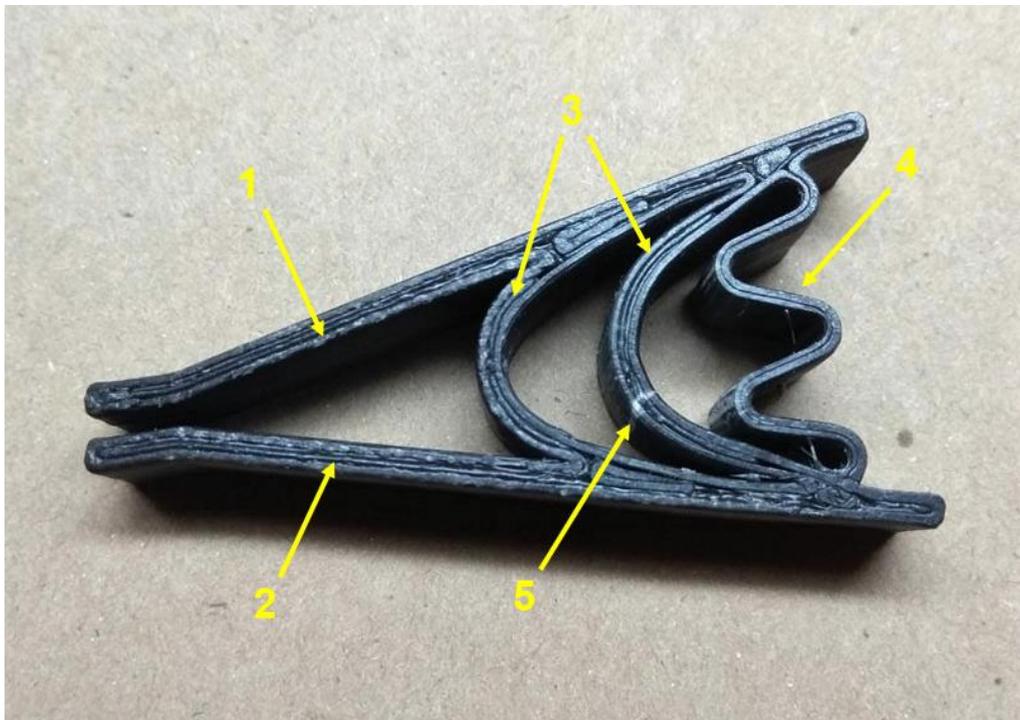


Figura 34. Segundo concepto para el diseño del mecanismo flexible de pinzas. 1) Pinza superior, 2) Pinza inferior, 3) Secciones parabólicas, 4) Resorte, 5) Zona de fractura.

Como se observa en la figura 34 para este prototipo se combinaron dos diseños de elementos flexibles, el primero como un par de secciones parabólicas y el segundo utilizando la forma de resorte, como se mencionó anteriormente. El principal problema de este concepto se presentó al

tratar de lograr la apertura de la pinza, pues debido a lo compacto del diseño entre la pinza superior e inferior, una de las secciones parabólicas se deformato a tal grado que se fracturó. Por lo cual se necesita aumentar el espacio entre pinzas además de reducir la concavidad de las secciones parabólicas.

Concepto 3

Para este concepto se mantuvo la configuración de elementos flexibles del segundo concepto, es decir, el elemento flexible tipo parábola y el resorte. Sin embargo, se aumentó el espacio entre la pinza superior e inferior, se propuso una concavidad más suave en la sección parabólica y se regresó al PETG como material de fabricación para evitar la fractura en esta sección debido a su menor rigidez. Además de esto, se propuso un primer diseño de la forma del sistema para producir cavitación, utilizando como inspiración la forma de la pinza del camarón pistola con el objetivo de hacer una primera experimentación del prototipo. En la figura 35 se observa el diseño conceptual de este prototipo.

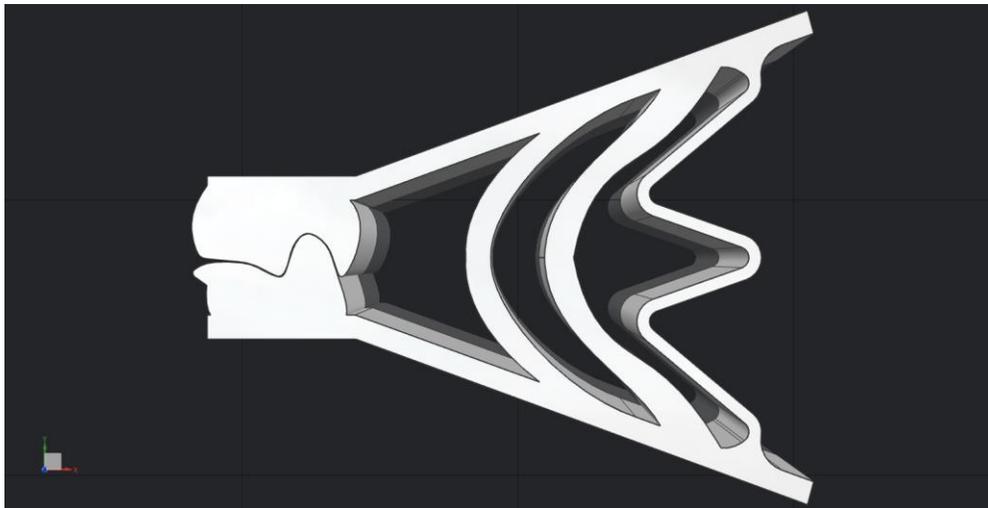


Figura 35. Tercer concepto de diseño del mecanismo flexible de pinzas.

Las dimensiones del prototipo son de 58.9 x 47.2 x 16 [mm], con un peso de aproximadamente 14 [g]. Por otro lado, se colocaron placas de Acrílico (ver figura 36) transparentes en las puntas de la pinza con el fin de generar las paredes del sistema para producir cavitación y con esto garantizar el direccionamiento del flujo. Dichas placas se unieron a partir de una soldadura caliente, esto es, calentando las superficies hasta que se ablandarán y luego poder ser unidas al material de la pinza.

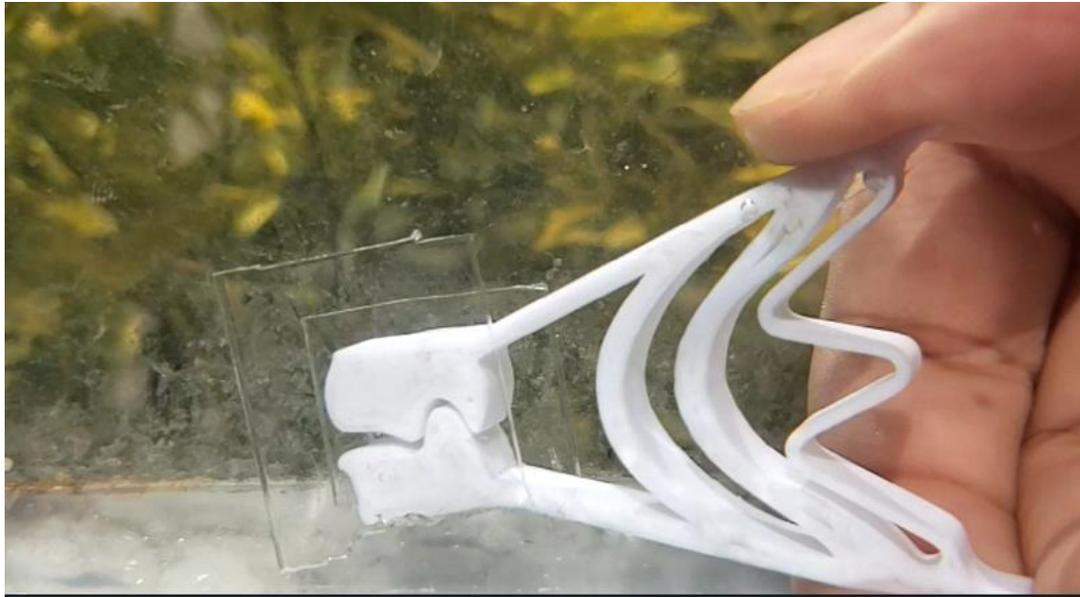


Figura 36. Prototipo rápido fabricado para la prueba experimental del tercer concepto.

Gracias a lo anterior fue posible realizar los primeros experimentos, los cuales consistieron en sumergir el prototipo en una pecera llena de agua para poder probar el funcionamiento del diseño (prueba de concepto). La figura 37 muestra una secuencia de imágenes de la prueba de concepto de este prototipo, en ella se observa el proceso de cierre de la pinza.

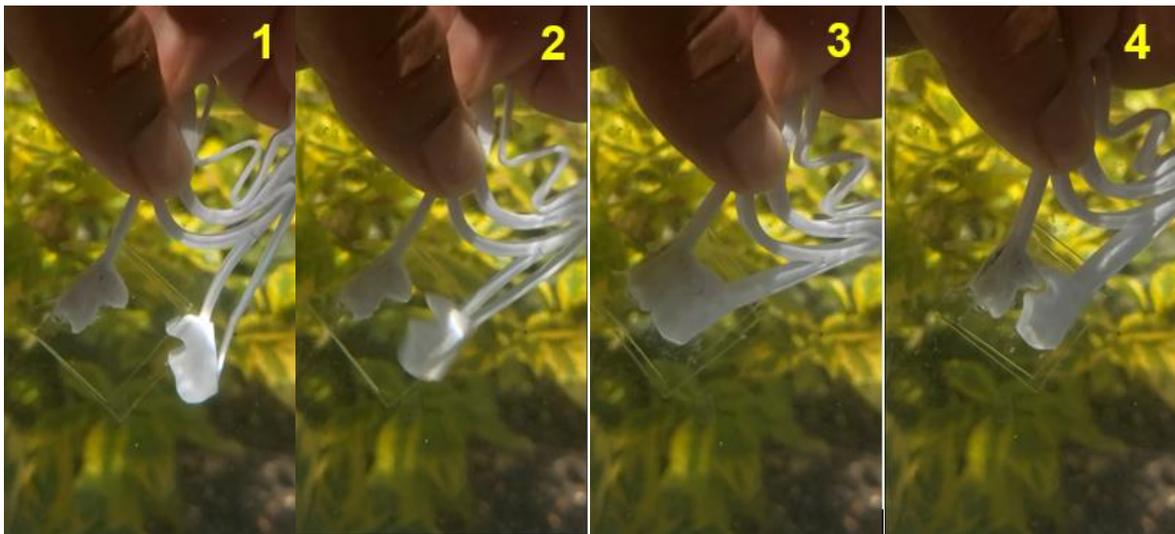


Figura 37. Proceso de cierre del prototipo del tercer concepto del mecanismo flexible de pinzas. 1) Carga de la pinza, 2) Liberación de la pinza, 3) Cierre de la pinza, 4) Estado de reposo de la pinza (precarga).

En la imagen 1 de la figura 37 se muestra a la pinza en su estado de carga, es decir, donde los elementos flexibles almacenan la mayor cantidad de energía, posteriormente se suelta la pinza de un

extremo (imagen 2) y se logra el cierre de la pinza (imagen 3) para posteriormente rebotar debido al choque de las superficies de la punta y regresar a su estado de reposo o precarga (imagen 4). Cabe resaltar que esta secuencia no da rastros de formación de cavitación hidrodinámica de la punta.

Al finalizar la experimentación de este prototipo se encontraron diversas áreas de mejora, como la falta de integridad estructural del cuerpo del mecanismo. Así mismo, se evidenció la necesidad de disminuir el recorrido de la punta de la pinza para así evitar los efectos del arrastre mientras el área de almacenamiento de energía (los resortes) no se viera afectada.

De igual manera se pudo apreciar que el tamaño del recorrido no implica necesariamente una mayor concentración de energía. Esto se debe a la importancia que guarda la geometría del mecanismo con su funcionamiento.

Al finalizar la prueba de estos conceptos y a pesar de reconocer cómo diferentes geometrías y materiales pueden generar un resultado semejante, se pudo observar que las formas no necesariamente suman, esto en referencia a la combinación de los elementos flexibles del tipo parábola y resorte presentes en los conceptos 2 y 3. Así mismo, la comprensión absoluta de los efectos combinados entre el material, topología y geometría es complicada.

Debido a lo anterior se decidió tomar una aproximación del elemento flexible a partir de análisis asistidos por computadora con la misión de predecir la geometría de este con respecto al movimiento esperado de la pinza y a un cierto material, combinándolo con la forma propuesta de la pinza del tercer concepto, en especial la forma del sistema para producir cavitación.

4.3.3 Optimización topológica para el diseño del elemento flexible.

Una técnica para diseñar sistemáticamente Mecanismos Flexibles, que ha sido ampliamente acogida tanto en la academia como en la industria, es el Método de Optimización Topológica (MOT). El MOT es un método computacional que permite diseñar estructuras óptimas de forma automática, distribuyendo una determinada cantidad de material en el interior de un dominio de diseño predeterminado con el fin mejorar su desempeño frente a un fenómeno físico considerado. Adicionalmente, el MOT puede generar soluciones novedosas y/o puede ser utilizado para ampliar la experiencia y la intuición del diseñador. Sin embargo, el resultado que arroja el MOT debe ser

considerado como un primer bosquejo del diseño conceptual, lo cual implica que se requiere una posterior interpretación del diseñador y un posible post-procesamiento para corregir los defectos del resultado del método [15].

Una vez seleccionado el concepto preliminar de la forma de la pinza, se planteará el problema de Optimización Topológica (OT), el cual consiste en modelar el concepto con alguna herramienta de Diseño Asistido por Computadora (CAD), seleccionar un área de diseño, definir las restricciones a las que está expuesta la geometría, definir una función objetivo a maximizar o minimizar en el área de diseño y realizar la optimización topológica utilizando una herramienta de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE). Posteriormente a los diseños obtenidos mediante la OT se les aplica una serie de operaciones de refinamiento o post-procesamiento con el objetivo de corregir los defectos de la optimización y reducir la complejidad de la geometría y de esta forma disminuir los costos de manufactura. Adicionalmente, se verifica el diseño mediante el método de los elementos finitos (MEF) y se procede a la fabricación de este por manufactura aditiva (MA). Finalmente, el diseño refinado se utilizará como punto de partida para el proceso de rediseño con el fin de lograr un funcionamiento óptimo del mecanismo.

A continuación, se presenta las diferentes etapas en las que consistió la optimización topológica para la obtención de la forma del elemento flexible del mecanismo de pinzas. Para este objetivo se utilizó el software de análisis y simulación numérica HyperWorks desarrollado por la empresa Altair Engineering.

1. Modelado geométrico y preprocesamiento

Para comenzar el análisis se modeló el concepto utilizando una herramienta de diseño asistido por computadora (CAD), en este caso se utilizó el programa NX 12 de la empresa Siemens para realizar el modelado geométrico. La geometría se procuró que fuera lo más sencilla posible y que tomara como base la forma general de la pinza, como se muestra en la figura 38.

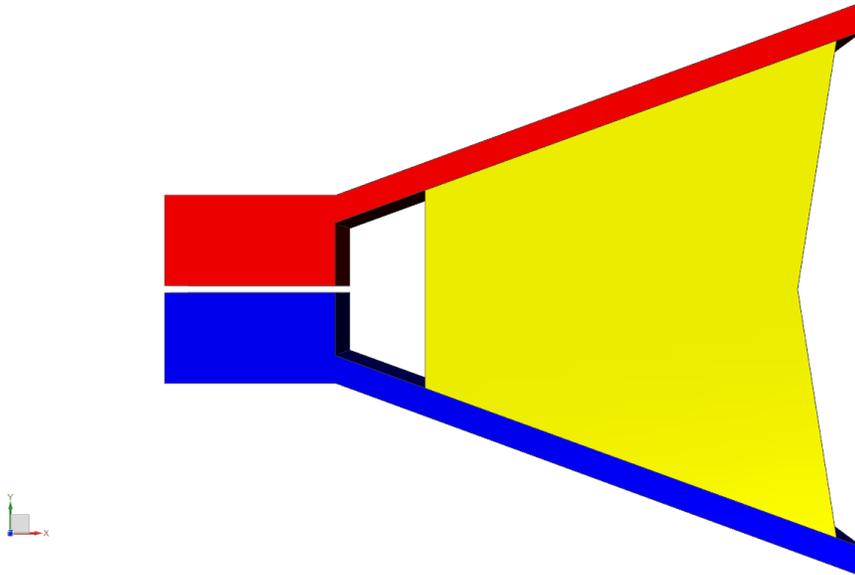


Figura 38. Modelo CAD del concepto de la forma de la pinza: Pinza superior (rojo), pinza inferior (azul), zona de optimización (amarillo).

Posteriormente el modelo CAD se importó al software HyperMesh (parte de la paquetería de HyperWorks) para realizar el preprocesamiento de la optimización. Este preprocesamiento consta de tres etapas principales:

- **Mallado:** Se realizó el mallado de la geometría anterior por medio de elementos solidos (3D) de primer orden del tipo TETRA con tamaño de 0.5 [mm] (ver figura 39).

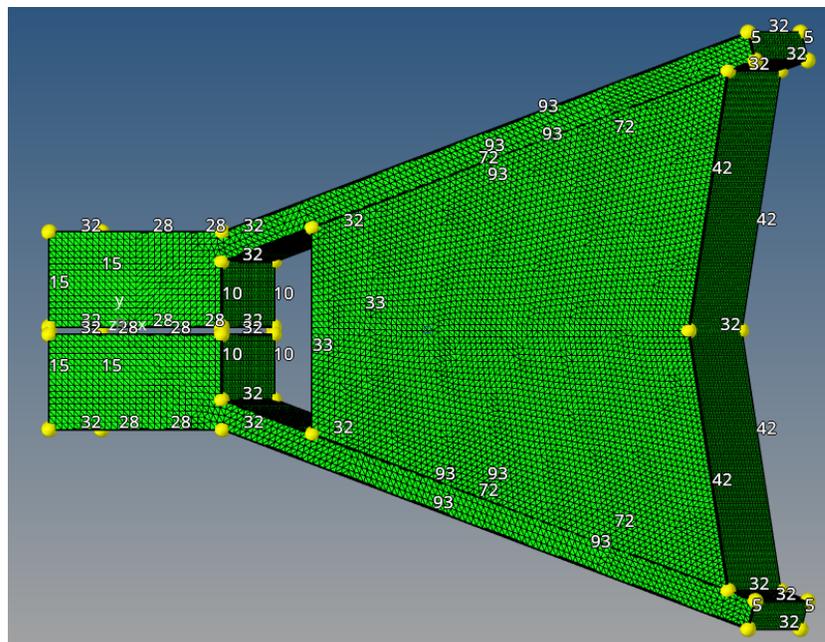


Figura 39. Mallado de la geometría de la pinza con elementos Tetra.

- **Definición del material:** En este caso se utilizó PETG como material debido a sus propiedades elásticas y su facilidad de uso para la manufactura aditiva [30]. La tabla 10 muestra las propiedades mecánicas de este material necesarias para caracterizarlo en el software.

Tabla 10. Principales propiedades mecánicas del PETG para su caracterización [31].

Material	Densidad [kg/m ³]	Módulo de elasticidad E [GPa]	Módulo de rigidez G [GPa]	Coefficiente de Poisson ν	Esfuerzo de cedencia [MPa]	Esfuerzo último [MPa]
PETG	1270	2.59	0.925	0.4	47.3	40.6

- **Condiciones de Frontera.** Se definieron las condiciones de frontera las cuales simulen la dinámica del fenómeno de cierre de la pinza (ver figura 40), para ello se definió una carga de 250 [N] distribuida por elementos RBE3 en el extremo superior de la pinza para simular la fuerza necesaria para la apertura de la pinza superior. La magnitud de esta carga está determinada por la fuerza de agarre promedio que ejerce la mano de una persona adulta [32]. Además, se definió una zona de empotramiento ubicada en la cara inferior de la pinza y definida por elementos RBE2 los cuales restringen el movimiento de los seis grados de libertad de cada elemento en dicha zona.

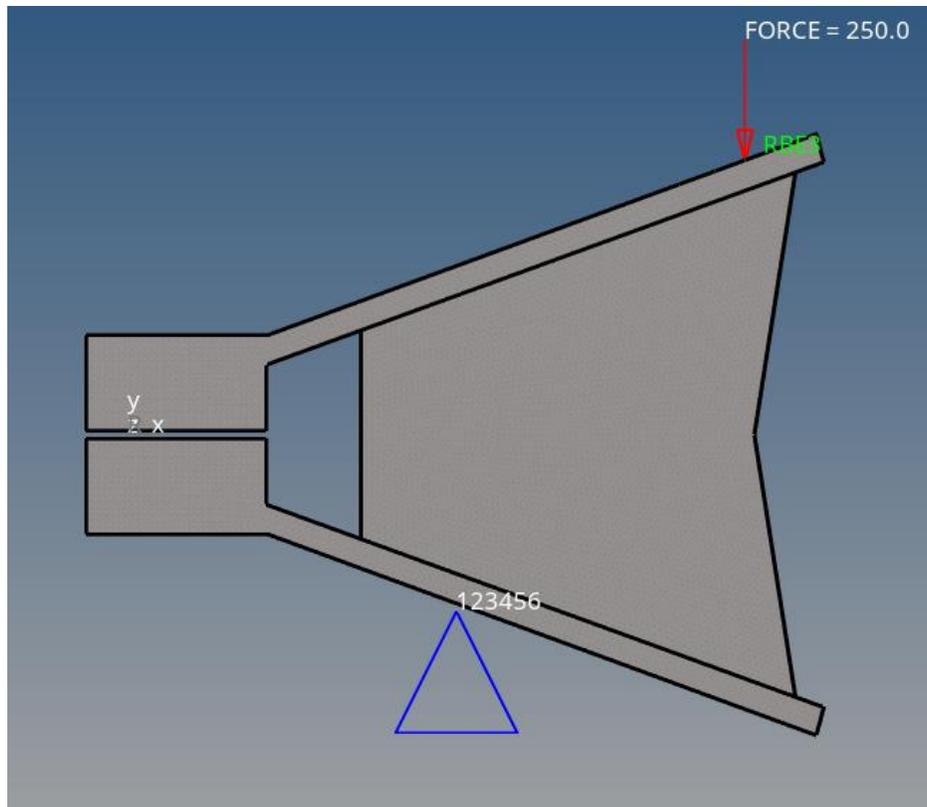


Figura 40. Condiciones de frontera para la optimización topológica de la pinza. La flecha roja representa la zona y dirección de la aplicación de la carga de 250 [N], mientras que el triángulo azul representa una zona de restricción del tipo SPC (empotramiento).

2. Definición de las áreas de diseño y de no diseño.

Posteriormente se definieron las áreas de diseño y de no diseño, es decir, las zonas en las que se llevará a cabo la optimización topológica (zona de diseño). Las áreas que no son de diseño no se modificarán durante la optimización. Para este caso se consideró la estructura externa y la punta de la pinza como el área de no diseño, mientras que el área restante se delimitó como el área de diseño (ver figura 41).

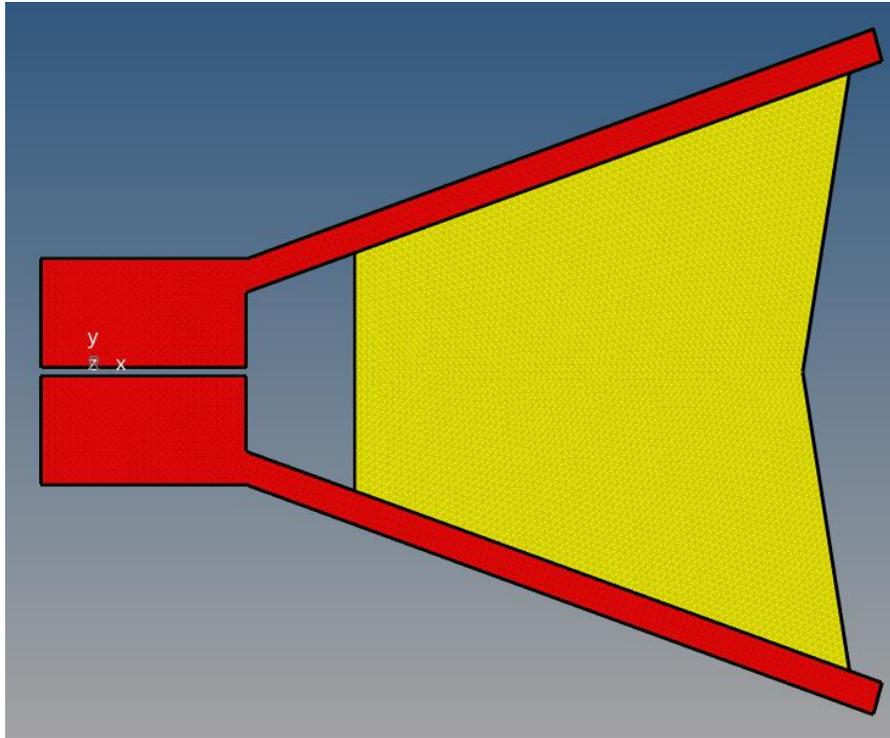


Figura 41. Área de diseño (amarillo) y de no diseño (rojo) para la optimización topológica.

3. Definición del objetivo de la optimización y de las restricciones de diseño.

Para esta etapa se definió la función objetivo de la optimización topológica, en este caso fue maximizar una función que toma el nombre de weighted compliance (flexibilidad ponderada), esta función se representa matemáticamente como la suma de la energía almacenada debido a la deformación elástica del modelo. A un mayor valor, la deformación será mayor bajo la misma carga y se generará un comportamiento flexible en la zona de diseño [33]. Posteriormente se definieron las restricciones de diseño las cuales consistieron en disminuir la mayor cantidad de masa del material en el área de diseño.

La combinación de la definición de la dinámica de fenómeno por medio de las condiciones de frontera, el objetivo de la optimización y las restricciones de diseño fueron las etapas necesarias para poder realizar la optimización topológica de forma correcta.

4. Resultado de la Optimización topológica.

Fueron necesarias 107 iteraciones para converger en el resultado, este proceso empleó aproximadamente 420 [s] de tiempo de cómputo y fue realizado en una computadora Microsoft Surface Go con procesador Intel Pentium Gold y 8 GB de memoria RAM. Para asegurar que la deformación se mantuviera dentro del rango elástico, se utilizó una restricción la cual limita el esfuerzo máximo que podría presentar cada elemento y así evitar que el material se deformara plásticamente.

Cabe mencionar que el solucionador, es decir, el programa que realiza las iteraciones para llegar al resultado de la optimización asigna un valor de entre 0 y 1, conocido como densidad de elemento (element density), a los elementos en relación al esfuerzo que presentan dado el caso de carga predefinido, es decir, los elementos que contengan los mayores esfuerzos serán asignados con una densidad alta (valores cercanos a 1) y los que presenten menor magnitud de esfuerzos serán asignados con una densidad baja (valores cercanos a 0). Con esta relación se puede discretizar la parte del material cuya densidad de elementos sea baja o por debajo de un valor de densidad predefinido, esto con el objetivo de eliminar material y sólo quedarse con la estructura donde se presenten la mayor cantidad de esfuerzos, es decir, el diseño óptimo para el caso de carga [34].

En la figura 42 se muestra el resultado de la última iteración de la optimización topológica, así como el mapa de colores que representan la magnitud de las densidades de elementos en el área de diseño, para este caso, se definió que se suprimieran todos los elementos con densidad menor a 0.2 dando lugar al diseño óptimo de nuestro elemento flexible.

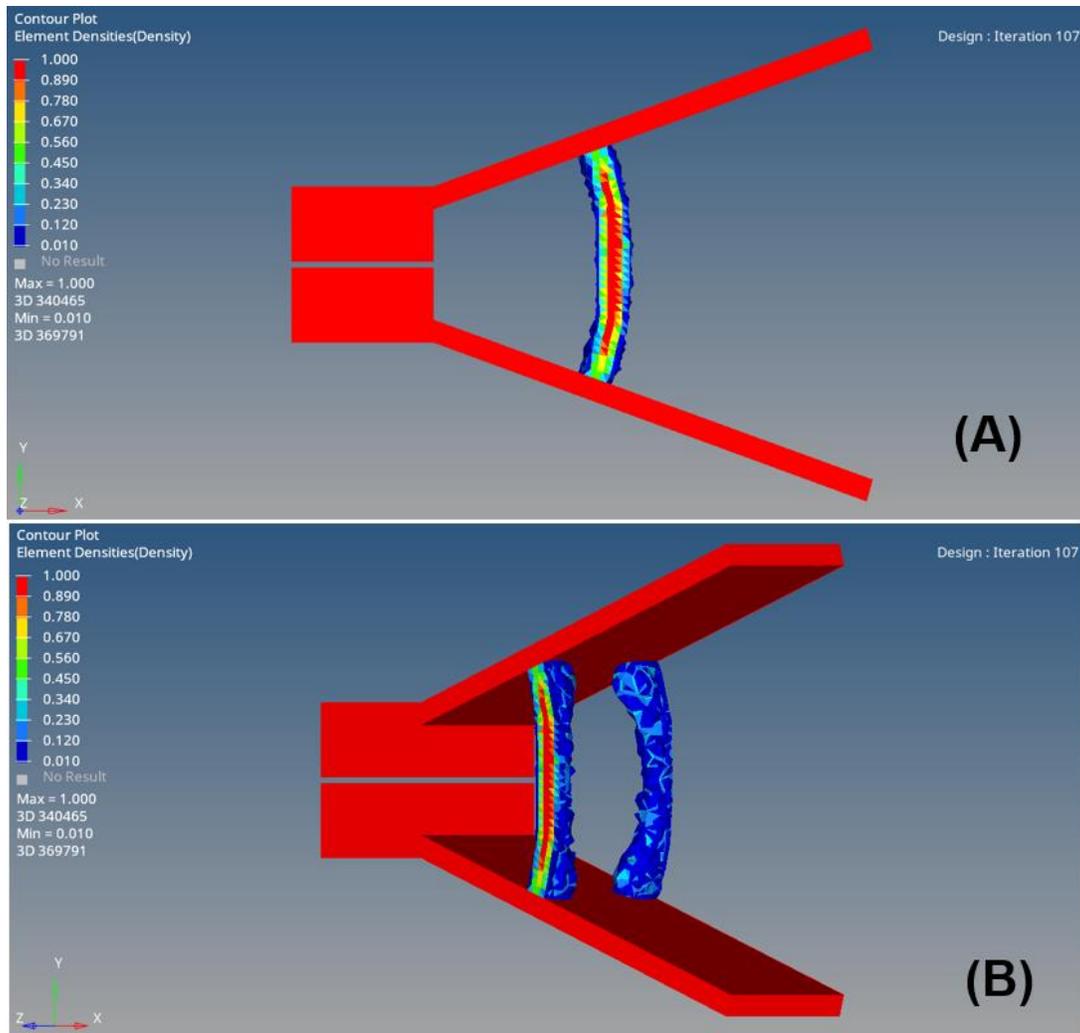


Figura 42. Geometría resultante de la optimización topológica. (A) Vista lateral. (B) Vista Isométrica posterior. La densidad de elementos es representada por el mapa de colores y solo se muestran el conjunto de elementos con densidad mayor a 0.2.

El diseño óptimo para maximizar la flexibilidad ponderada en el área de diseño consiste en la geometría de un par de columnas ligeramente flexionadas en los extremos del centro de la pinza. Estas columnas son similares a las secciones parabólicas propuestas en los conceptos 2 y 3, sin embargo, estas columnas presentan una concavidad más suave y en dirección contraria, asemejándose a la forma de un arco de flechas precargado con una cuerda o hilo.

5. Refinación de la optimización topológica.

Como se mencionó anteriormente el resultado de la optimización topológica es solo un boceto que sirve como herramienta o guía para visualizar la forma de la geometría del elemento flexible de

nuestro mecanismo de pinzas, por lo cual es necesario aplicar un proceso de refinamiento para corregir los defectos de la optimización. En este caso el proceso de refinamiento estuvo enfocado en suavizar las irregularidades presentes en la geometría de las columnas o arcos resultantes.

Para lograr esto el resultado de la optimización se importó a un modelador CAD, más concretamente el software NX 12, y se empezaron a usar bordes y superficies geoméricamente regulares que siguieran la forma de las geometrías propuestas por la optimización topológica (arcos o columnas). Posteriormente, el área de no diseño se empezó a modificar con el fin de obtener la forma del sistema para producir cavitación propuesto en el concepto 3 (ver figura 33). El resultado de este proceso de refinamiento se muestra en la figura 43.

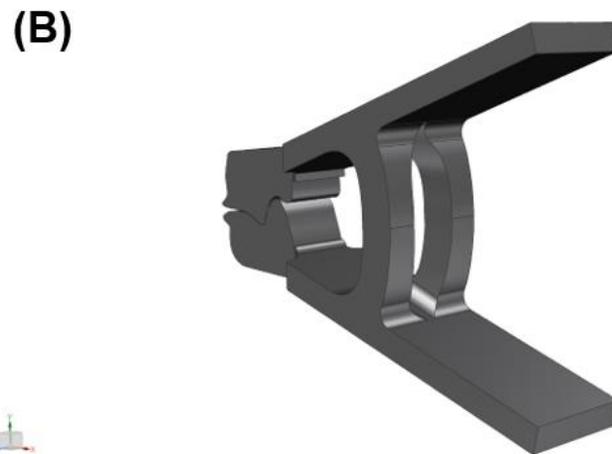
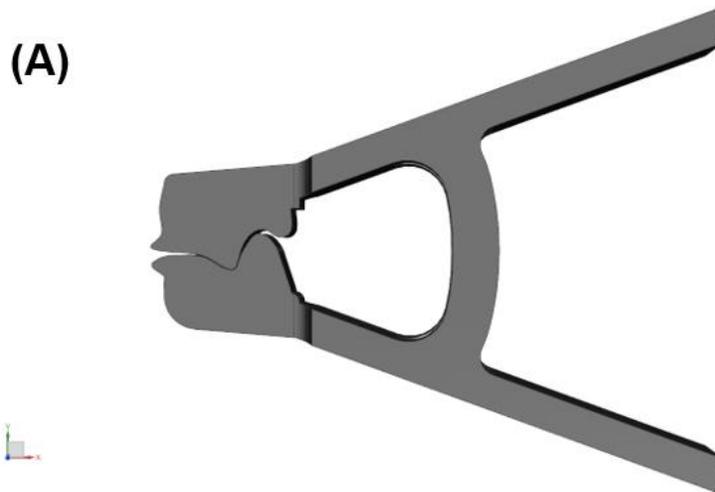


Figura 43. Refinación del diseño resultante de la optimización topológica. (A) Vista lateral. (B) Vista isométrica posterior.

Como se observa en la figura 43, el diseño resultado de esta refinación es una combinación entre el diseño del sistema para producir cavitación del concepto 3 con el resultado de la optimización topológica lo que genera un modelo consistente con todo el desarrollo del concepto iniciado desde la investigación y estado del arte de mecanismos similares.

6. Verificación numérica y experimental del diseño refinado de la optimización topológica

Cómo último paso de este proceso se tiene que verificar el diseño refinado con el fin de comprobar su funcionamiento y observar las posibles áreas que tienen que ser corregidas o mejoradas para un desempeño óptimo. La verificación se realizó a través de dos medios: Numérica y Experimental. A continuación, se describe a detalle cada una de estas verificaciones.

a) Verificación Numérica.

Se realizó un análisis de esfuerzos y deformaciones por medio del software CAE, Altair HyperWorks, con el objetivo de conocer la distribución de las fuerzas internas a las que está sometido el diseño bajo un caso de carga y poder proponer cambios en las zonas donde haya una gran concentración de esfuerzos.

Para este análisis se importó el modelo refinado al software y se utilizaron las mismas características de preprocesamiento utilizadas para la optimización topológica (ver figura 44), esto es:

- Malla 3D con elementos Tetras de 0.5 [mm] de tamaño.
- PETG como material.
- Definición de una fuerza de 250 [N] por medio de elementos RBE3 en el extremo de la cara superior de la pinza y una condición de empotramiento en la cara inferior como condiciones de frontera.

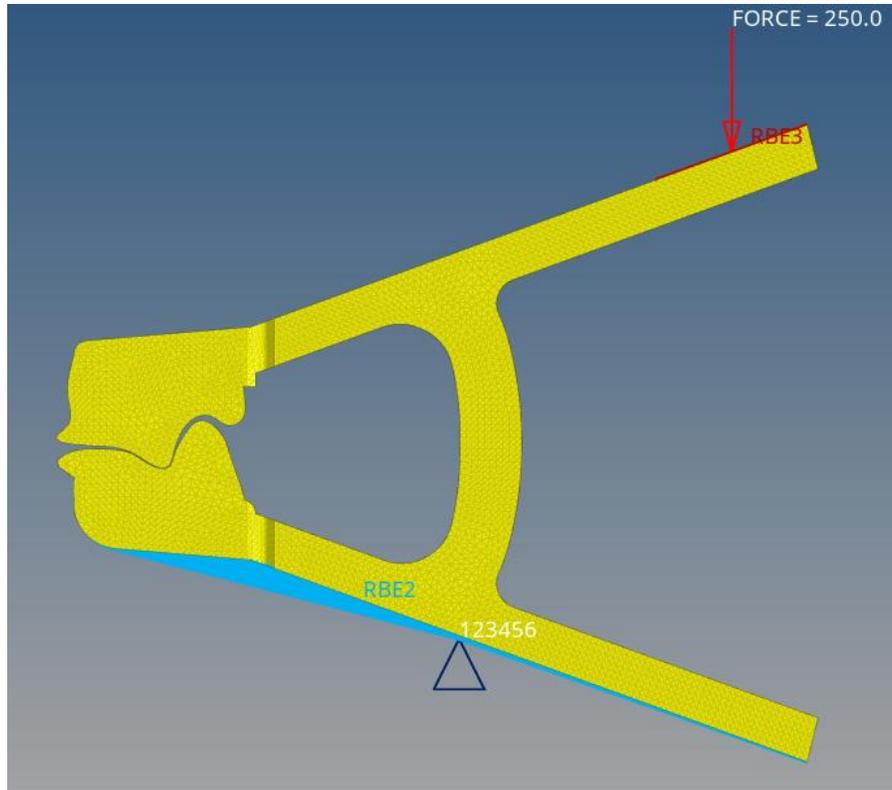


Figura 44. Condiciones de preprocesamiento para el análisis de esfuerzos del diseño refinado de la optimización topológica.

A diferencia de la optimización topológica, para este caso se realizó un análisis estático lineal, ya que a pesar de que el problema presenta varios casos de no linealidad, como la no linealidad de material por el uso de un material plástico o la no linealidad geométrica dado el caso de carga propuesto para simular la apertura de las pinzas, este análisis es solo una herramienta para poder tener una buena aproximación de la distribución de esfuerzos que tendrá el modelo bajo un caso de carga sencillo y condiciones ideales, sin tener que invertir el elevado costo de cómputo que conlleva realizar un análisis no lineal.

Este análisis se ejecutó con una computadora Dell Inspiron 5570 con procesador Intel core I5 de 8GB de RAM y demoró 41.73 [s] en terminar el proceso.

La figura 45 muestra un mapa de colores de la distribución de esfuerzos en la pinza dado el caso de carga definido anteriormente, en este caso, la magnitud del esfuerzo máximo obtenido es de 167.05 [MPa] representado por color rojo.

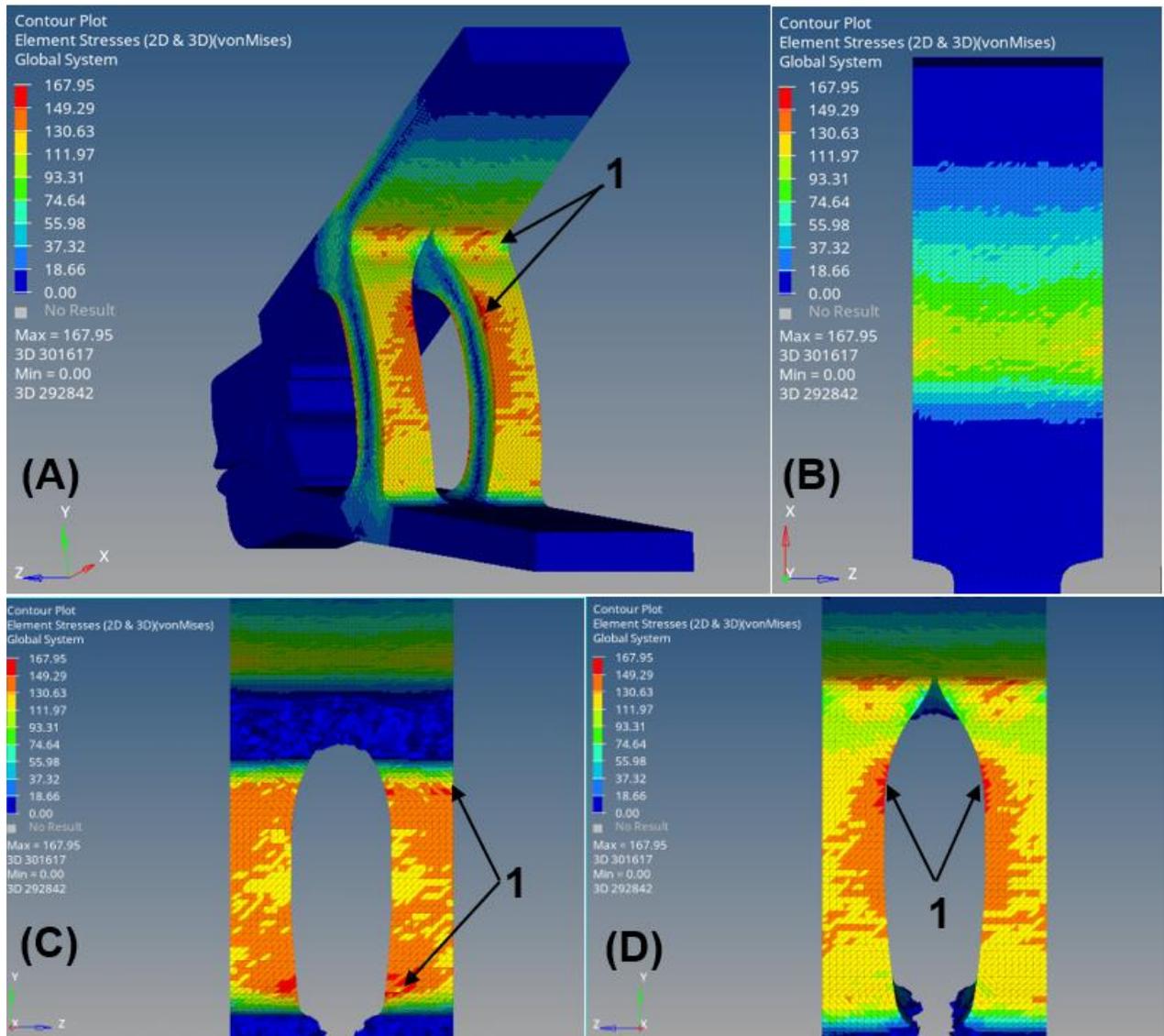


Figura 45. Mapa de colores de la distribución de esfuerzos presentes en el diseño refinado dada la aplicación de una carga de 250 [N]. (A) Vista isométrica posterior. (B) Vista superior. (C) Corte frontal. (D) Corte posterior. 1) Zona de concentración de esfuerzos (presencia de esfuerzo máximo).

Como se puede observar en la figura anterior la concentración de esfuerzos se da principalmente en tres zonas: La primera son las caras externas de los arcos o elementos flexibles, ya que es donde se almacena la mayor parte de la energía elástica al momento de realizar la apertura de las pinzas al aplicar la carga. La segunda zona de concentración de esfuerzos son los extremos de dichos arcos, esto debido a un redondeo o cambio de geometría en dicha sección. Por último, la tercera zona de concentración de esfuerzos es la parte de la pinza superior cercana a los arcos.

Cabe mencionar que en términos generales las caras externas de los arcos son donde se presentan los esfuerzos de mayor magnitud, de entre 112 y 168 [MPa], además, la zona de la pinza superior también presenta una magnitud de esfuerzos a considerar de entre 56 y 112 [MPa].

Para observar de una mejor forma estas zonas de concentración de esfuerzos y con ello centrarnos en un rediseño de estas se consideró hacer que el software solo mostrara los elementos en donde se tuviera un esfuerzo mayor al esfuerzo de cedencia a flexión del material en uso. La razón de considerar este parámetro es que, en términos generales, el sistema de arcos y pinzas, tanto superior e inferior, se reducen a una viga sometida a un momento flector dada la aplicación de carga en los extremos de esta, esto puede observarse de mejor manera en la figura 46, la cual muestra que existen dos zonas o caras que están sometidas a tensión y dos que están sometidas a compresión.

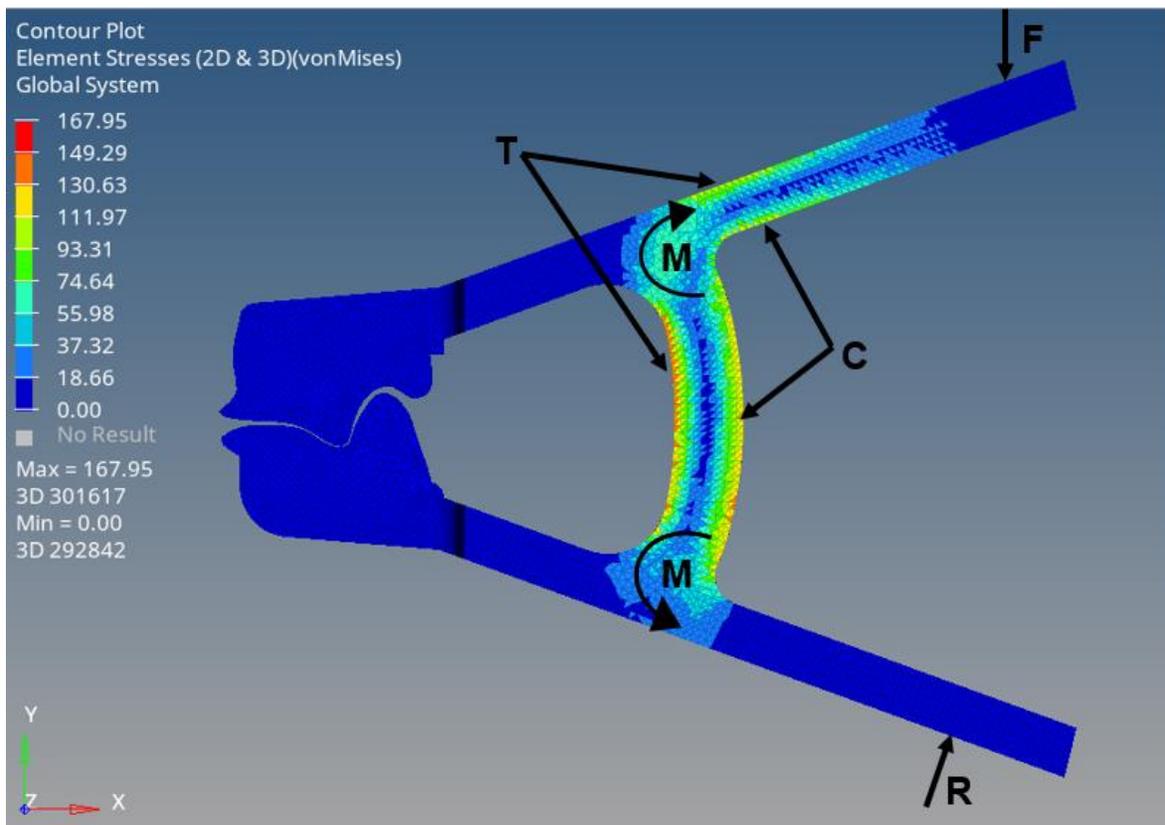


Figura 46. Representación del caso de flexión que se presenta en la pinza. C) Compresión, F) Fuerza o carga aplicada = 250 [N], M) Momento flector, R) Fuerza de reacción, T) Tensión.

Como se mencionó anteriormente el material que se utilizó para este análisis es PETG el cual tiene un esfuerzo de cedencia a flexión de aproximadamente 69.5 [MPa] [31]. La figura 47 muestra

el conjunto de elementos en los cuales el esfuerzo obtenido es mayor a 69.5 [MPa], los cuales, como se mencionó en la figura anterior, son las zonas o caras de los arcos y la pinza superior donde se presenta esfuerzos de Tensión y compresión.

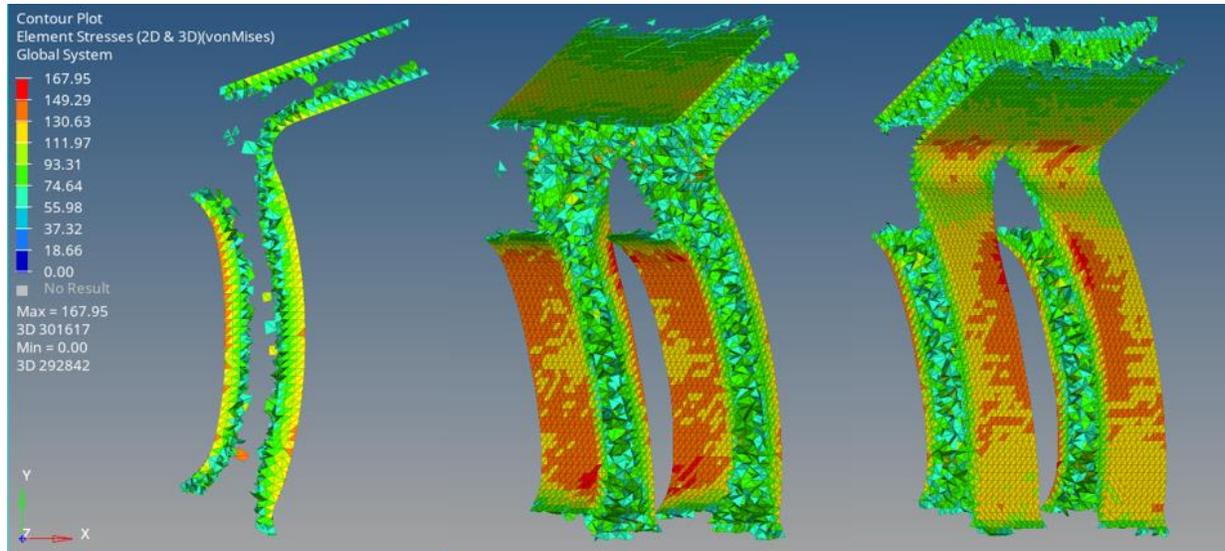


Figura 47. Zonas del diseño refinado de pinzas con esfuerzo mayor a 69.5 [MPa].

Como se mencionó anteriormente, esta etapa de verificación tiene el propósito de servir como una herramienta para vislumbrar las zonas en las que se tiene que enfocar el rediseño del sistema de actuación o elemento flexible, con el fin de reducir lo más posible los esfuerzos en la pinza y mejorar su resistencia al momento de cargarla, es decir, realizar su apertura. Las posibles modificaciones que se pueden aplicar para lograr este objetivo se mencionaran posteriormente.

b) Verificación experimental.

Como complemento de la verificación numérica, se fabricó un prototipo rápido para evaluar el funcionamiento del diseño refinado y observar las zonas que requieran un rediseño, tanto en el sistema de actuación (elemento flexible) como en el sistema para producir cavitación.

Para este caso, al igual que los prototipos pasados, la fabricación de este modelo se realizó mediante manufactura aditiva utilizando PETG como material base, como se muestra en la figura 48.



Figura 48. Prototipo rápido fabricado para la verificación experimental del diseño refinado de la optimización topológica.

Las especificaciones de este prototipo se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Especificaciones del prototipo del diseño refinado de la optimización topológica.

Especificación	Valor
Material	PETG
Masa	10.6 [g]
Dimensiones*	59.3 x 49.7 x 16 [mm]
Volumen	8,348. 71 [mm ³]

*Las dimensiones corresponden a la pinza en su posición de cierre.

En primera instancia, el prototipo presenta una rigidez adecuada para evitar la deformación plástica en la zona de los arcos, sin embargo, se necesita aplicar una cantidad considerable de fuerza

para abrir la pinza superior y cuanto más se abre la pinza, se empieza a manifestar una deformación principalmente en las zonas donde se concentran la mayor cantidad de esfuerzos (ver figura 49) lo que genera un cierre defectuoso de la pinza.

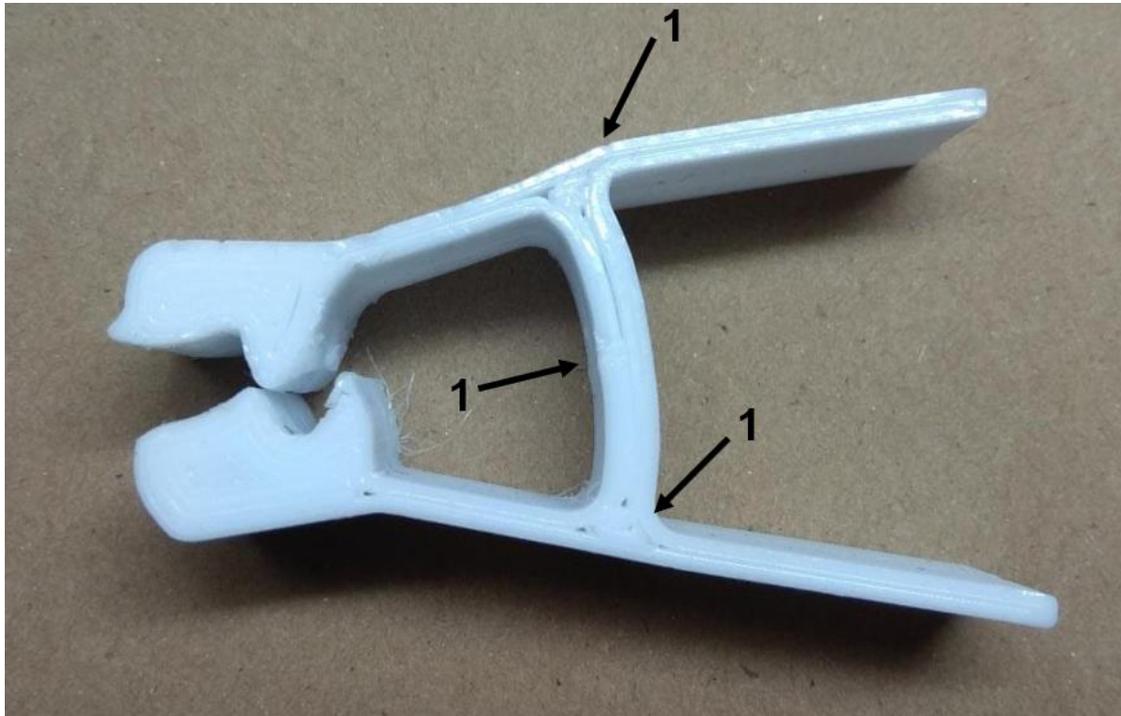


Figura 49. Deformación presente en el prototipo del diseño refinado de pinzas luego de su apertura. 1) Zonas donde se presenta una mayor deformación.

Para poder realizar pruebas de funcionamiento al prototipo y poder verificar si el sistema para producir cavitación genera cavitación hidrodinámica, al diseño se le tuvo que adaptar un poste en la parte posterior de la pinza inferior a modo de gatillo mecánico para poder cargar la pinza superior y posteriormente poder liberarla más fácilmente. Esta adaptación se muestra en la figura 50. Cabe destacar que en este poste se agregó un orificio para poder depositar algún hilo o alambre y con esto poder liberar la pinza sin tener que tocar el dispositivo directamente.

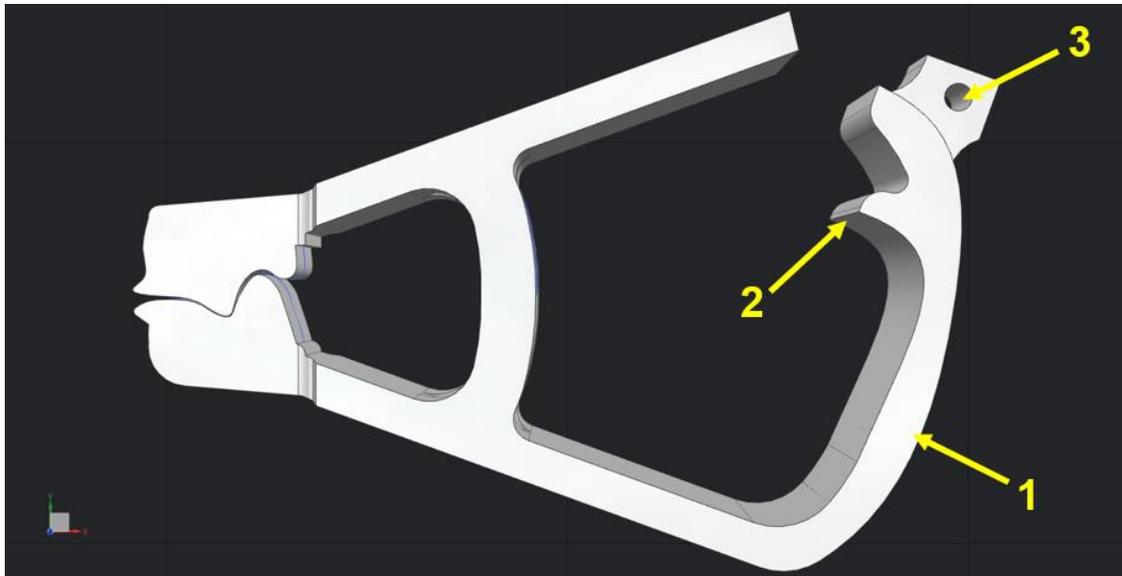


Figura 50. Diseño refinado de pinzas resultado de la optimización topológica con adaptación de gatillo mecánico para la carga y liberación de la pinza superior. 1) Diseño del gatillo mecánico, 2) Superficie de enclave entre la pinza superior y el gatillo para la carga del mecanismo, 3) Orificio para hilo o alambre.

Al igual que el diseño anterior este prototipo se fabricó utilizando PETG vía manufactura aditiva, además, se añadieron dos placas de acrílico de 1 [mm] de espesor en los laterales del sistema para producir cavitación para confinar el flujo y restringir su salida en una sola dirección. Este prototipo, previamente cargado, se sumergió en agua y se liberó el gatillo lo que propició el cierre de la pinza superior a gran velocidad. La figura 51 muestra una secuencia de imágenes captadas de la activación de este prototipo, desde su posición de carga hasta la posición de cierre de la pinza superior.

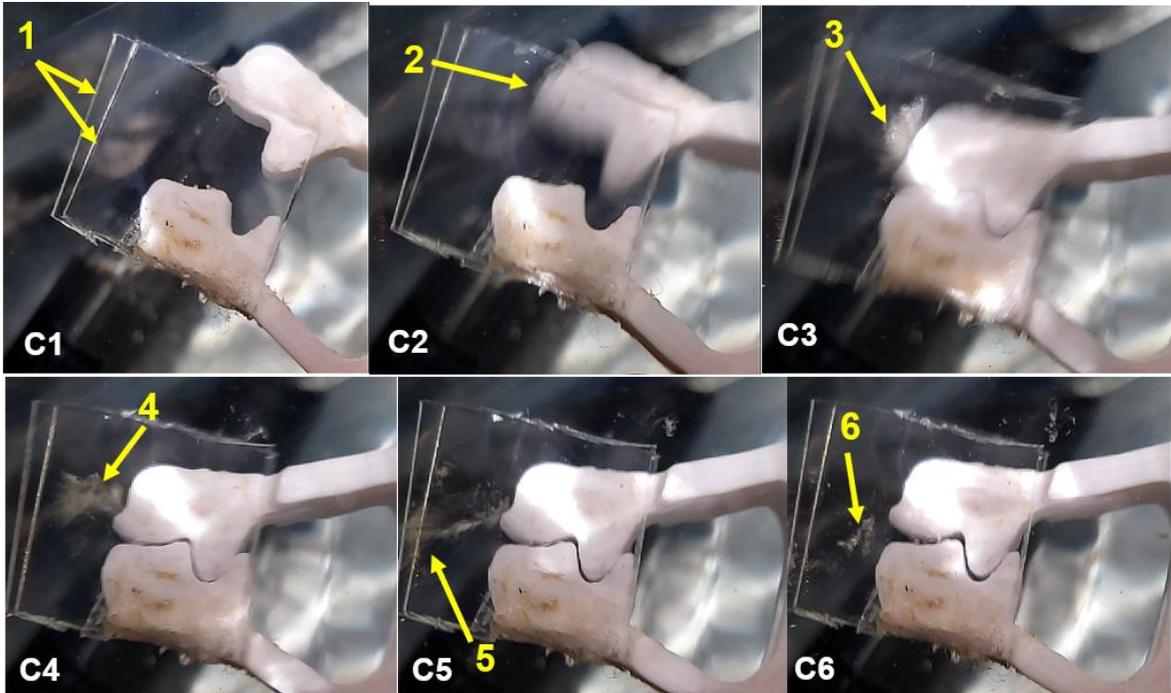


Figura 51. Proceso de cierre del diseño refinado de pinzas resultado optimización topológica. 1) Paredes laterales de acrílico, 2) Momento de cierre de la pinza superior, 3) Formación de nube de burbujas, 4) Colapso de la nube de burbujas, 5) Flujo de burbujas, 6) Burbujas remanentes.

Como se puede observar en la figura anterior al momento de cierre de la pinza superior se generan cúmulos o nubes de burbujas en las inmediaciones de la salida del sistema para producir cavitación (tubo Venturi) para posteriormente colapsar y disiparse en el medio, en este caso agua de grifo. Esto si bien no es una confirmación de que se produce cavitación hidrodinámica en el proceso, ya que lo que se observa podría ser debido a la presencia de burbujas en la proximidad del sistema para producir cavitación debido a la presencia de gas en el agua, es un buen antecedente que nos permite confirmar que, con un rediseño adecuado, la geometría de la pinza obtenida de la optimización topológica es lo bastante prometedora para poder producir y observar cavitación de una manera más clara.

Con la verificación experimental del diseño refinado de pinzas se puede considerar como terminado tanto el proceso correspondiente a la optimización topológica, como el diseño conceptual del mecanismo flexible de pinzas y se da comienzo a la materialización del concepto o diseño de forma que se basa en un proceso de rediseño que busca corregir errores y mejorar el desempeño de los prototipos propuestos hasta este momento, con la finalidad de obtener un diseño definitivo y un prototipo funcional que cumpla con los objetivos y especificaciones planteadas anteriormente.

4.4 Materialización del concepto del mecanismo flexible de pinzas (Diseño de forma)

4.4.1 Proceso de rediseño.

Al finalizar el desarrollo de la optimización topológica se entra en un proceso plenamente iterativo el cual busca generar y fabricar diversos prototipos rápidos, vía manufactura aditiva, y rediseñarlos con base en pruebas experimentales y comparaciones empíricas para finalizar con la propuesta del diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas, que cumpla con las especificaciones y objetivos de desempeño planteados anteriormente. Este proceso de rediseño se observa de mejor forma en la figura 52.



Figura 52. Proceso iterativo de rediseño de prototipos rápido para la obtención del diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas.

Cabe resaltar que este proceso es altamente iterativo y se concentra en la corrección de errores y la aplicación de mejoras para lograr un progreso en el desempeño entre cada una de las iteraciones. La primera iteración de este proceso toma como base el diseño obtenido de la refinación de la optimización topológica.

A pesar de que el mecanismo flexible es una sola pieza, el modelo se tuvo de dividir en diversas partes o secciones, esto con el fin de poder identificar en que zonas se realizarán las mejoras y así facilitar el rediseño. La figura 53 muestra las diversas partes o secciones en las que se dividió el mecanismo flexible tomando como base el diseño mostrado en la figura 47.

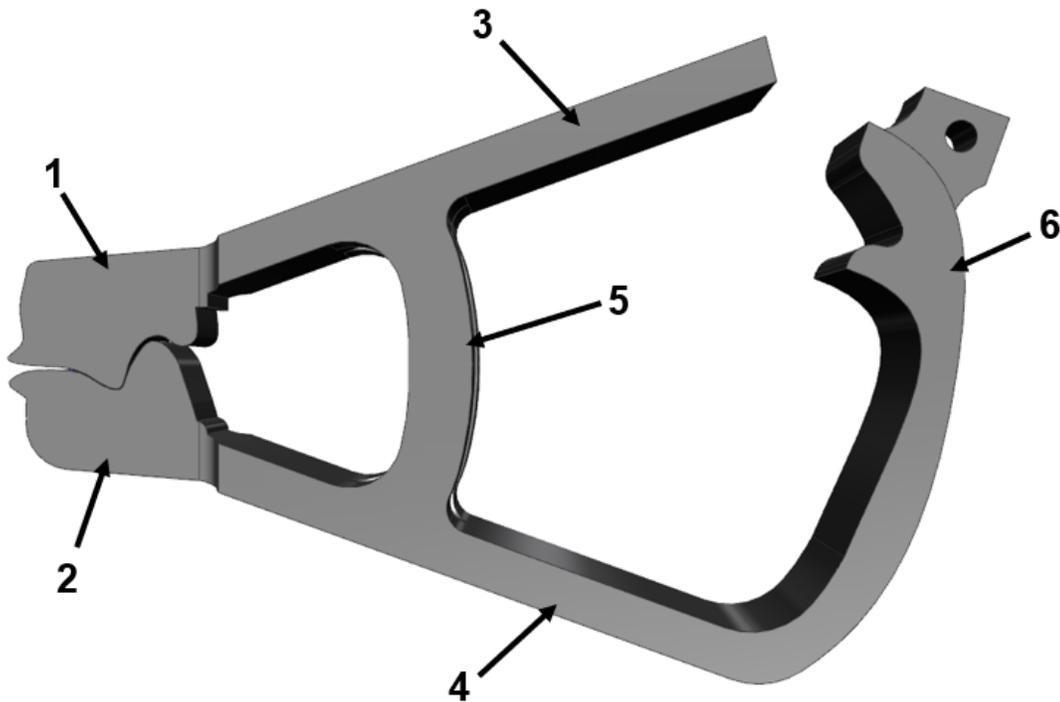
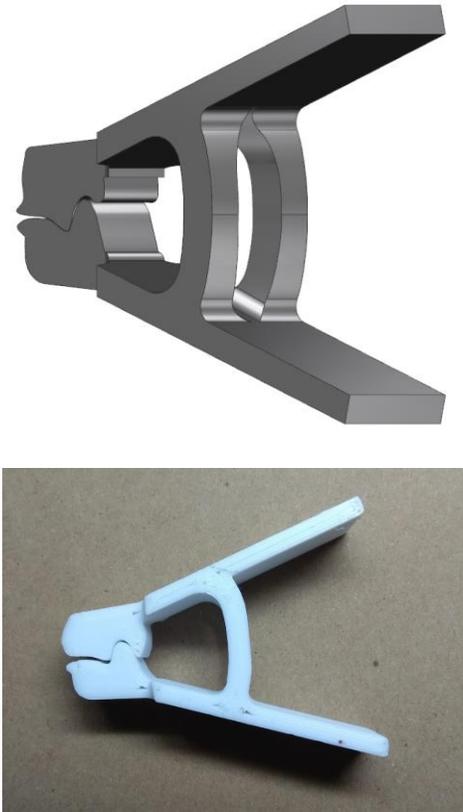


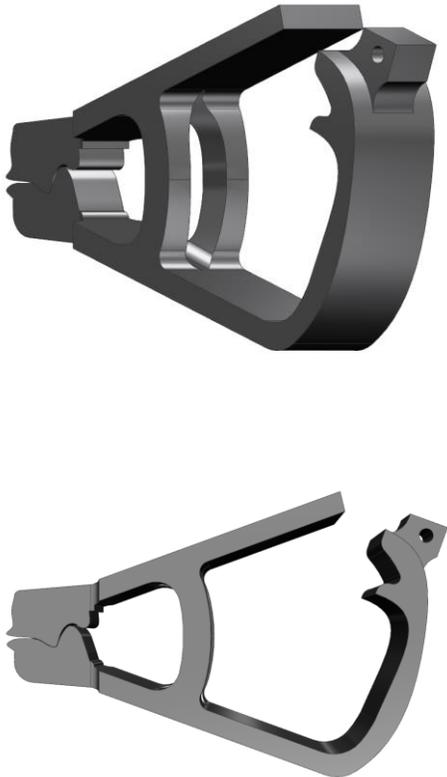
Figura 53. Partes o secciones del mecanismo flexible de pinzas. 1) Punta de la pinza superior, 2) Punta de la pinza inferior, 3) Cuerpo de la pinza superior, 4) Cuerpo de la pinza inferior, 5) Segmento flexible, 6) Gatillo Mecánico.

En la tabla 12 se señalan las distintas iteraciones que se obtuvieron de este proceso, se muestran algunas imágenes del modelo en CAD y del prototipo del modelo de cada iteración, además de

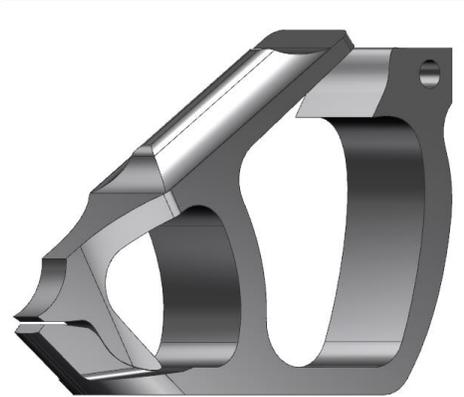
mencionar los principales cambios en el diseño con respecto a la iteración anterior y las observaciones que se obtuvieron en las pruebas de desempeño del prototipo de cada iteración.

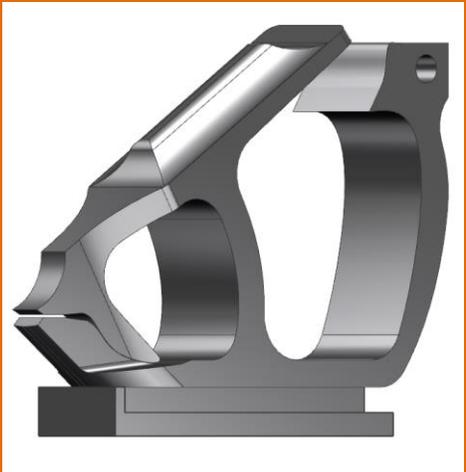
Tabla 12. Iteraciones del proceso de rediseño del mecanismo flexible de pinzas.

No. De iteración	Imagen	Cambios en el diseño	Observaciones en el desempeño del prototipo
1		<p>Se refinó la configuración geométrica resultado de la optimización topológica por medio de superficies y bordes regulares. Esta iteración incorpora el diseño del Venturi o sistema cavitante del tercer concepto (ver figura 33) con ligeras modificaciones pensadas para provocar cavitación hidrodinámica.</p>	<p>Se pierde velocidad de cierre debido al ancho de la punta de la pinza (sistema para producir cavitación), además de una geometría que provoca una mayor cantidad de arrastre.</p> <p>El mecanismo no puede ser accionado de una manera repetible.</p> <p>La deformación del mecanismo es baja debido una alta rigidez. Las concentraciones de esfuerzos se dan principalmente en el segmento flexible y en el cuerpo de la pinza superior.</p>

<p>2</p>		<p>Se redujo el ancho del Venturi además de aminorar las concavidades y las irregularidades con tal de disminuir el arrastre.</p> <p>Se agregó el diseño de un gatillo mecánico a modo de cargador-accionador en la parte trasera del mecanismo para poder accionar la pinza de una forma más repetible.</p> <p>Se disminuyó la concentración de esfuerzos en áreas críticas mejorando la geometría de las aristas o arcos de la pinza (segmento flexible).</p>	<p>La velocidad de cierre aumentó, pero sigue existiendo un gran arrastre debido a la geometría del cuerpo de la pinza superior, especialmente en la zona de aplicación de la carga.</p>
<p>3</p>		<p>Se rediseño el cuerpo de la pinza superior reduciendo el ancho de esta (a excepción de la zona de aplicación de carga) además de agregar una forma geométrica pensada para aumentar la rigidez en esa zona de la pinza.</p> <p>Se cambia del material de fabricación del prototipo de PETG a ABS con el objetivo de mejorar la facilidad de manufactura sin perder demasiada rigidez.</p>	<p>La concavidad presente en la parte trasera de la punta de la pinza inferior es innecesaria debido a que aumenta el arrastre.</p> <p>El cuerpo de la pinza inferior se deforma al estar cargado el mecanismo, esto debido a su conexión con el gatillo mecánico.</p> <p>El flujo expulsado en la salida del Venturi al momento de cierre presenta una dirección diagonal no deseada.</p>

<p>4</p>		<p>Se agregaron distintas estructuras en la cara superior del cuerpo de la pinza inferior, con el fin de rigidizar esta zona y evitar deformaciones no deseadas cuando el mecanismo está cargado.</p> <p>Se eliminó la concavidad presente en la punta de la pinza superior con el fin de disminuir el arrastre.</p>	<p>Se observa la necesidad de un método de sujeción del modelo a un banco de pruebas para mejorar la experimentación y la repetibilidad del accionamiento del mecanismo.</p>
<p>5</p>		<p>Se agregó la estructura de un riel en la cara inferior del cuerpo de la pinza inferior con el fin de poder ser colocado en un banco de pruebas.</p> <p>La forma del riel ayudó a rigidizar el cuerpo de la pinza por lo que se pudo prescindir de las estructuras colocadas en la cara superior del cuerpo de la pinza inferior.</p>	<p>El flujo expulsado en la salida del Venturi sigue presentando una dirección diagonal no deseada.</p> <p>La geometría de la punta dificulta en gran medida su posterior miniaturización.</p>

			
6	 	<p>Se rediseñó la forma de la punta de la pinza considerando los siguientes puntos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Disminuir la mayor cantidad de arrastre posible. - Mejorar la facilidad de manufactura y, por ende, la capacidad de miniaturización. - Restringir la salida del flujo en una sola dirección con la pinza en la posición de cierre. - Se omitió la adición del riel para observar de mejor forma el movimiento del mecanismo. 	<p>Se observa de manera cualitativa una mejoría en la generación de cavitación hidrodinámica.</p> <p>Se hace evidente la posibilidad de incrementar el volumen del segmento flexible para así almacenar más energía. Esto sin cambiar la trayectoria resultante que generarían las partes de la pinza.</p>
7		<p>La geometría del segmento flexible se modificó al fusionar los arcos en una sola estructura, con esto se incrementó el área que almacena la energía elástica.</p> <p>Debido al aumento de fuerza necesaria para cargar la pinza, se optó por rigidizar el cuerpo de la</p>	<p>El incremento de energía almacenada genera una mayor concentración de esfuerzos en ciertas áreas, principalmente en el segmento flexible.</p> <p>La rigidez del cuerpo de la pinza superior es óptima, el cuerpo de la pinza</p>

		<p>pinza superior al aumentar su ancho al mismo tiempo de incrementar su largo para facilitar la activación,</p>	<p>inferior debe ser reforzado para evitar deformaciones o roturas.</p>
<p>8</p>	 	<p>Se agrega de nuevo el riel para facilitar la generación de pruebas constantes, así como rigidizar el cuerpo de la pinza inferior.</p> <p>Se generan cambios geométricos menores para disminuir la concentración de esfuerzos en las zonas de interfaz entre las partes rígidas y las partes flexibles.</p>	<p>Gracias al incremento de energía almacenada se manifiesta la posibilidad de minimizar la piza conservando su geometría.</p>

Cabe mencionar que el análisis de las pruebas experimentales realizadas en cada iteración se realizó por medio de la toma de vídeos en el momento de la activación de la pinza sumergida en agua a temperatura y presión ambiente (20 [°C] y 77.86 [kPa]). Estos videos fueron realizados por medio de un celular de la marca Samsung, modelo S9 plus a 960 cuadros por segundo.

Como se puede observar en la tabla anterior, la iteración número 8 es resaltada en color anaranjado, esto debido a que dicha iteración representa el diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas ya que es donde se observa el mejor desempeño del prototipo. Lo anterior se puede constatar en las figuras 54 y 55 las cuales muestran una serie de imágenes o cuadros captados justo en el momento del cierre de la pinza, desde una vista lateral y frontal respectivamente. Cabe mencionar que para estos experimentos también se tuvieron que agregar un par de placas de acrílico de 1 [mm] de espesor en los laterales del sistema para producir cavitación para restringir y redireccionar el flujo hacia la salida del Venturi.

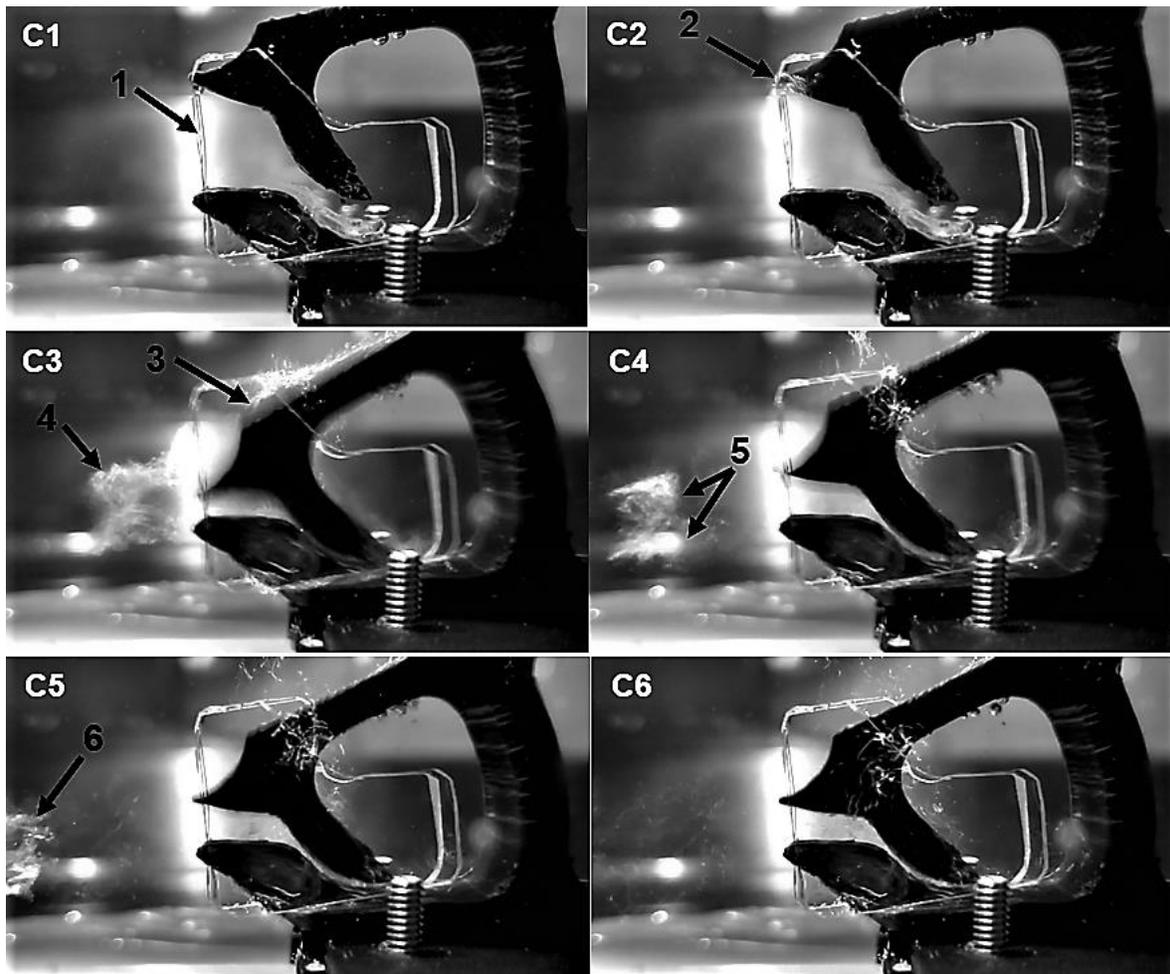


Figura 54. Vista lateral del proceso de cierre del diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas. 1) Placas de acrílico de 1 [mm] de espesor, 2) Formación inicial de la nube de burbujas debido al deslizamiento relativo entre la pinza superior y las placas de acrílico, 3) Presencia de capa limite en las cercanías de la pinza superior debido a su movimiento con respecto del agua, 4) Formación de vórtices compuesto de nubes de burbujas, 5) Colapso de los vórtices, 6) Desvanecimiento de la nube de burbujas.

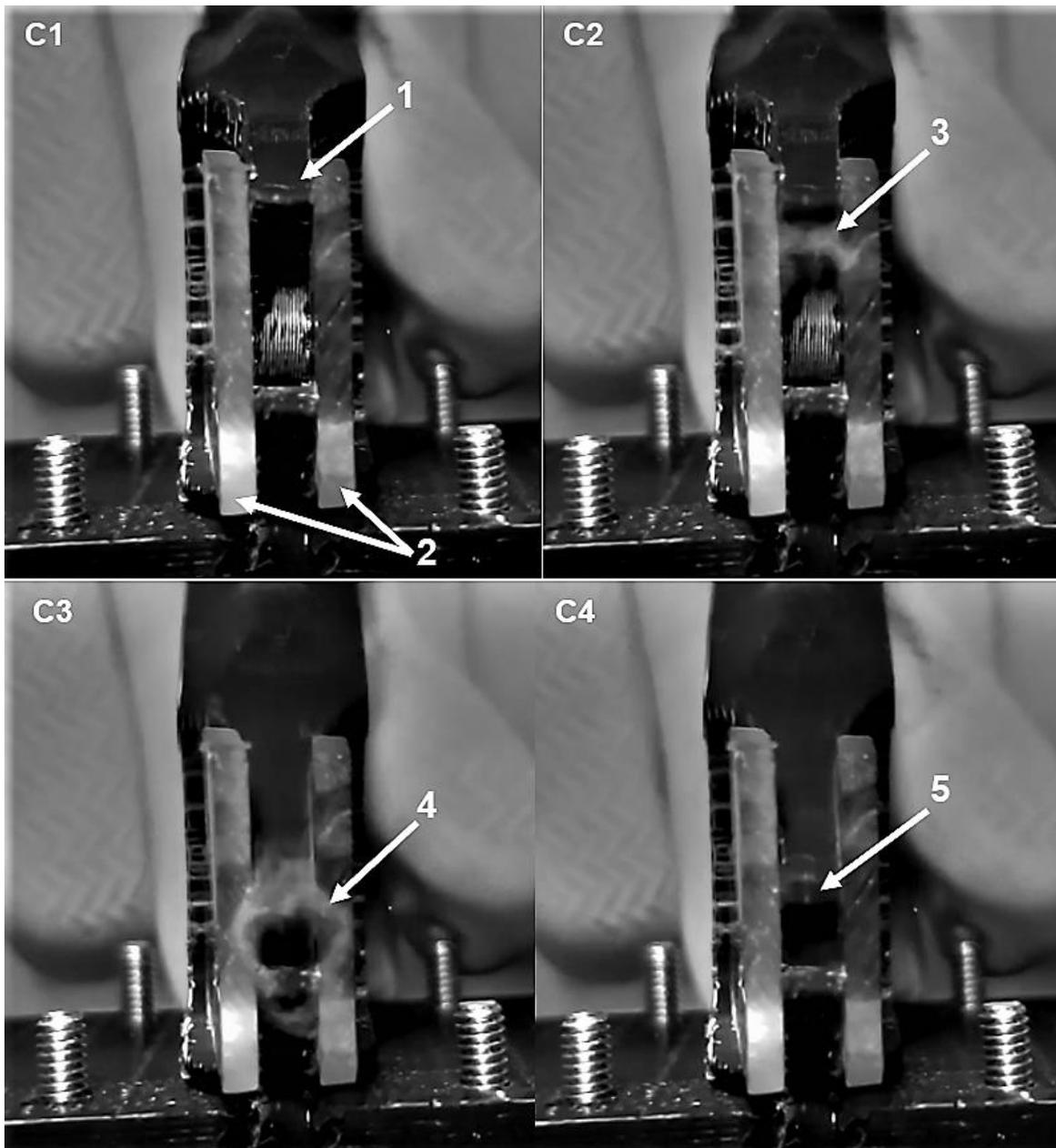


Figura 55. Vista frontal del proceso de cierre del diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas. 1) Pinza superior en su posición de apertura, 2) Paredes de Acrílico, 3) Formación de nube de burbujas, 4) Formación de vórtice anular, 5) Pinza superior en su posición de cierre.

A partir de la experimentación y el análisis de las secuencias de imágenes presentadas anteriormente se puede inferir que:

- Se presenta una alta rigidez estructural y una resistencia lo suficientemente grande en zonas de concentración de esfuerzos para permitir la carga y la activación de la pinza.

- Se observa una alta velocidad de cierre, ya que la pinza superior cierra en menos de 1 [s], lo que se traduce en un alto almacenamiento de energía en el segmento flexible.
- Se puede observar la generación de un vórtice anular de burbujas afuera del Venturi que se desplaza en la dirección esperada del flujo, lo que puede ser considerado como indicios de la generación de cavitación hidrodinámica.

A pesar de que se tienen resultados bastante prometedores con la observación y análisis de estas secuencia de imágenes, la calidad del vídeo deja mucho que desear, además de que se observa la presencia de distintos elementos externos, como burbujas y partículas suspendidas en el agua, lo que ensucia el experimento y dificulta la confirmación de que lo que se está viendo realmente es cavitación hidrodinámica o es algún otro fenómeno externo, por lo cual es necesaria una prueba experimental más controlada y el uso de una cámara de vídeo de más potencia para poder mejorar la observación del fenómeno y validar que el modelo realmente genera cavitación hidrodinámica, además de poder medir de forma más confiable ciertos parámetros importantes, como lo es la velocidad de cierre de la pinza, la velocidad del flujo a la salida del Venturi, el radio del vórtice anular o la frecuencia del colapso de este vórtice.

En adición a lo anterior, se llegó al cuestionamiento de que tanto es posible miniaturizar este diseño definitivo con las opciones de manufactura con las que se cuenta. Este proceso de miniaturización del mecanismo flexible de pinzas, así como su validación experimental se presentará de forma más detallada en los capítulos siguientes.

V. DISEÑO DE DETALLE, FABRICACIÓN Y MINIATURIZACIÓN DEL MECANISMO FLEXIBLE DE PINZAS

Este capítulo se muestra el diseño de detalle del diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas el cual contempla la definición de la geometría de la pieza por medio de su modelado geométrico, la definición del proceso de fabricación y la selección de materiales, todo esto con el fin de elaborar un prototipo funcional de forma estandarizada y poder registrar sus especificaciones finales.

Posteriormente se realiza un análisis de esfuerzos y deformaciones del mecanismo flexible de pinzas para validar numéricamente el diseño y la resistencia estructural del prototipo funcional dado el caso de carga al que está sometido.

Por último, se muestra el proceso de miniaturización o escalamiento del diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas, así como su fabricación y pruebas experimentales de desempeño del diseño miniaturizado.

5.1 Modelado geométrico del mecanismo flexible de pinzas

El modelado geométrico del mecanismo flexible de pinzas se realizó por medio del software de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés) NX 12 de la compañía Siemens. Este modelado consistió en tratar de suavizar los bordes y las superficies irregulares para facilitar la manufactura del prototipo. La figura 56 muestra distintas vistas del modelo CAD del mecanismo flexible de pinzas.

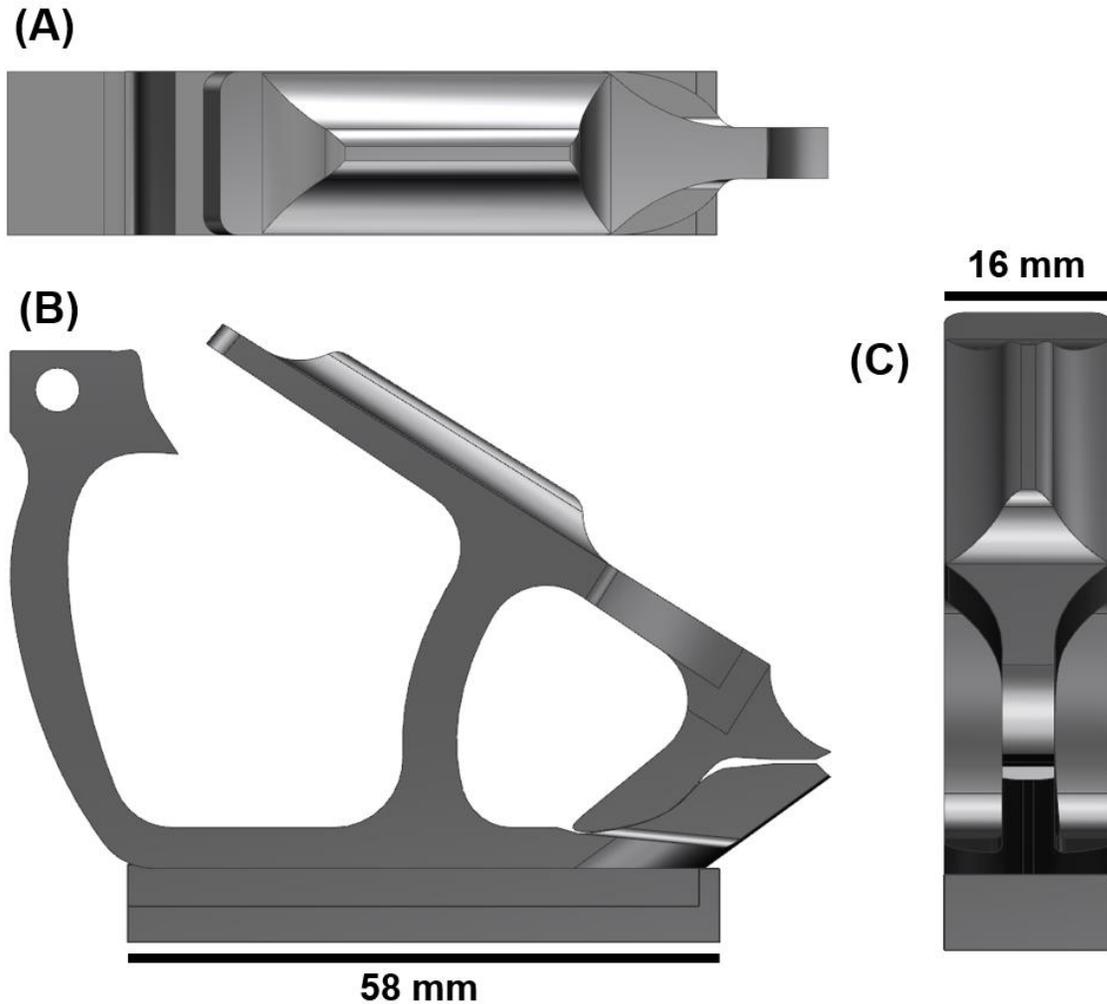


Figura 56. Modelo CAD en 3D del diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas. (A) Vista Superior. (B) Vista Lateral. (C) Vista Frontal.

Las dimensiones máximas de este modelo son 80.61 [mm] de largo, 60.67 [mm] de alto y 16 [mm] de ancho. Cabe mencionar que la altura del mecanismo podría reducirse 7.23 [mm] si se elimina el riel de la cara inferior del cuerpo de la pinza inferior (como se muestra en la iteración número 7 de la tabla 12) sin embargo, en este caso se decide conservar esta parte pues es necesaria para ensamblar el mecanismo al banco de pruebas diseñado y mejorar su experimentación.

Al igual que los mecanismos que anteriormente se probaron experimentalmente, para este modelo también se diseñaron un par de paredes laterales las cuales estarán ubicadas en los laterales de la punta de la pinza, es decir, en el sistema para producir cavitación. Esto con el fin de redirigir el flujo y restringirlo hacia la salida del tubo Venturi o zona de divergencia. En la

figura 57 se muestra el ensamble experimental del modelo CAD del mecanismo flexible de pinzas con las paredes laterales y el banco de pruebas.

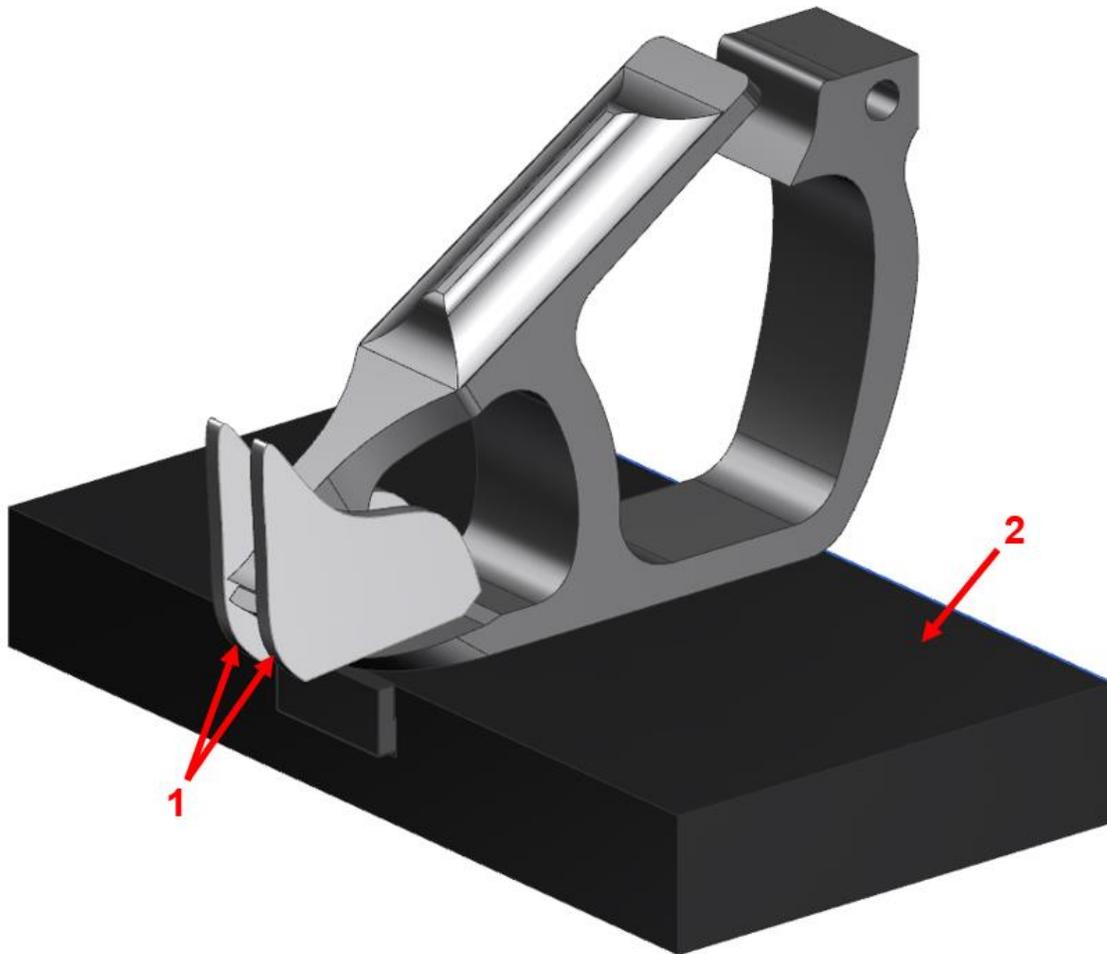


Figura 57. Ensamble experimental del modelo en CAD del mecanismo flexible de pinzas. 1) Diseño de las paredes laterales, 2) Diseño del banco de pruebas.

5.1.1 Diseño del Tubo Venturi en el mecanismo flexible de pinzas.

Una parte de suma importancia es el diseño de la geometría del tubo Venturi o sistema para producir cavitación en el mecanismo flexible de pinzas, ya que, como se mencionó anteriormente, es en esta sección donde se generará la cavitación hidrodinámica debido a la caída abrupta de la presión local que se produce en el momento de cierre de la pinza superior. Para este prototipo se utilizó como base la geometría del sistema para producir cavitación diseñada para el mecanismo rígido de pinzas (ver figura 25), sin embargo, en este caso la geometría del tubo Venturi que se

forma al momento del cierre de la pinza no es simétrica por lo cual algunos de los parámetros geométricos y de diseño son distintos entre la parte superior e inferior del tubo Venturi como el ángulo de convergencia o la longitud del Venturi.

En la figura 58 se observa la geometría del tubo Venturi que se forma al momento del cierre total del mecanismo flexible de pinzas, además de algunos parámetros geométricos de este sistema.

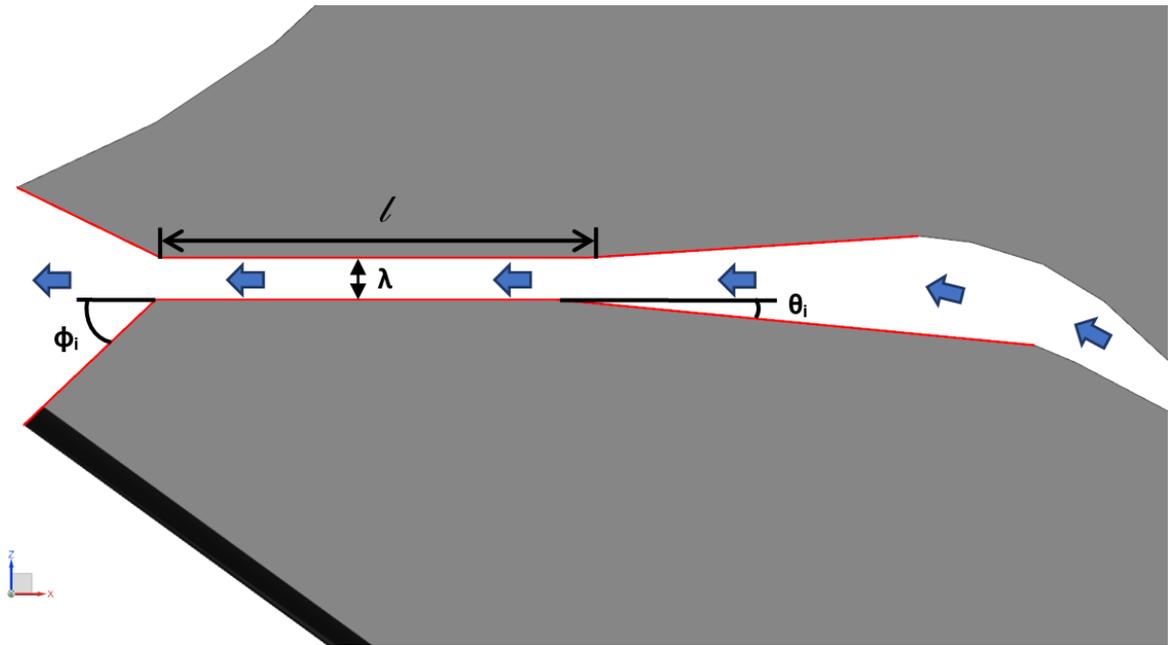


Figura 58. Geometría del tubo Venturi para el mecanismo flexible de pinzas. l = Longitud de la garganta, λ = altura de la garganta, ϕ_i = ángulo de divergencia inferior, θ_i = ángulo de convergencia superior. Las flechas azules representan la dirección que se espera que tome el flujo dentro del tubo Venturi. El resaltado en rojo muestra el contorno del tubo Venturi.

A continuación, se presenta la tabla 13 en donde se muestran los valores de los parámetros geométricos para este diseño de sistema para producir cavitación.

Tabla 13. Parámetros geométricos del sistema para producir cavitación del mecanismo flexible de pinzas.

Parámetro geométrico	Medio Venturi Superior	Medio Venturi inferior	Unidad
Longitud del Venturi (L)	9.4	10.5	mm
Espesor (ϵ)	5		mm
Altura de la garganta (λ)	0.4		mm

Longitud de la garganta (l)	4.4		mm
Ángulo de convergencia (θ)	3.7	5.5	°
Ángulo de divergencia (ϕ)	26.1	43.5	°
Perímetro de la sección transversal al paso del fluido en la garganta (p)	10.8		mm
Área de la sección transversal al paso del fluido en la garganta (A)	2		mm ²
$\alpha = p/A$	5.4		mm ⁻¹
$\gamma = \lambda/l$	0.1		Adim.

5.2 Metodología de manufactura

La metodología que se utilizó para la manufactura del prototipo experimental basado en el diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas parte del modelo en CAD diseñado anteriormente y consta principalmente de 2 fases:

- 1) **Definición del proceso de fabricación.** – Se definirá el proceso de fabricación utilizado, así como los instrumentos, el equipo y los parámetros necesarios para la fabricación del prototipo con una calidad adecuada.
- 2) **Selección de materiales.** – Se investigarán los materiales adecuados para la fabricación del prototipo y se seleccionara alguno de acuerdo con su facilidad manufactura y a las propiedades requeridas para el correcto desempeño del prototipo experimental.

A continuación de describen cada una de estas fases correspondientes a la metodología de manufactura.

5.2.1 Definición del proceso de fabricación.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de fabricación utilizado fue el de Manufactura Aditiva (MA) debido a que se cuenta con un equipo de MA por extrusión de material así como por

su afinidad para la fabricación de mecanismos flexibles puesto que al ser una tecnología enfocada en la construcción de prototipos rápidos y la poca cantidad de piezas presentes en los mecanismos flexibles hacen que en conjunto se pueda fabricar todo el mecanismo al instante.

Cada proceso de fabricación utilizando manufactura aditiva inicia con un modelo digital 3D (diseño CAD 3D) en cualquier formato en el que quiera ser creado. Este puede ser también capturado desde un objeto físico usando un escáner 3D, o modelado usando un software de diseño 3D. Después de los chequeos necesarios para ver qué tan factible es su fabricación, un último paso necesario es traducir el modelo 3D a un lenguaje que una maquina o equipo de manufactura aditiva pueda interpretar, generalmente se utilizan archivos de estereolitografía (STL, por sus siglas en inglés). El modelo es seccionado en diferentes capas horizontales, y cada capa es convertida en un formato de coordenadas X e Y para la máquina de extrusión de material. El equipo de manufactura aditiva lee estas coordenadas y fabrica el objeto capa por capa, depositando el material para formar el objeto o pieza deseada [35].

En nuestro caso se utilizó un equipo de manufactura aditiva de la marca Anycubic modelo i3 Mega S (ver figura 59) la cual utiliza la extrusión de material como proceso de manufactura aditiva. En este proceso el material termoplástico se almacena en estado sólido en un carrete de hilo (filamento) de plástico hasta que alcanza la temperatura adecuada antes de la boquilla de extrusión. A continuación, el material es depositado en forma líquida a través de una boquilla debido a que se encuentra a temperaturas por encima del punto de fusión del material, creando la nueva capa, la cual llega a su estado sólido por enfriamiento natural. De igual forma, otro carrete es empleado para proporcionar material con el fin de crear estructuras de soporte o apoyo cuando sea necesario [35].

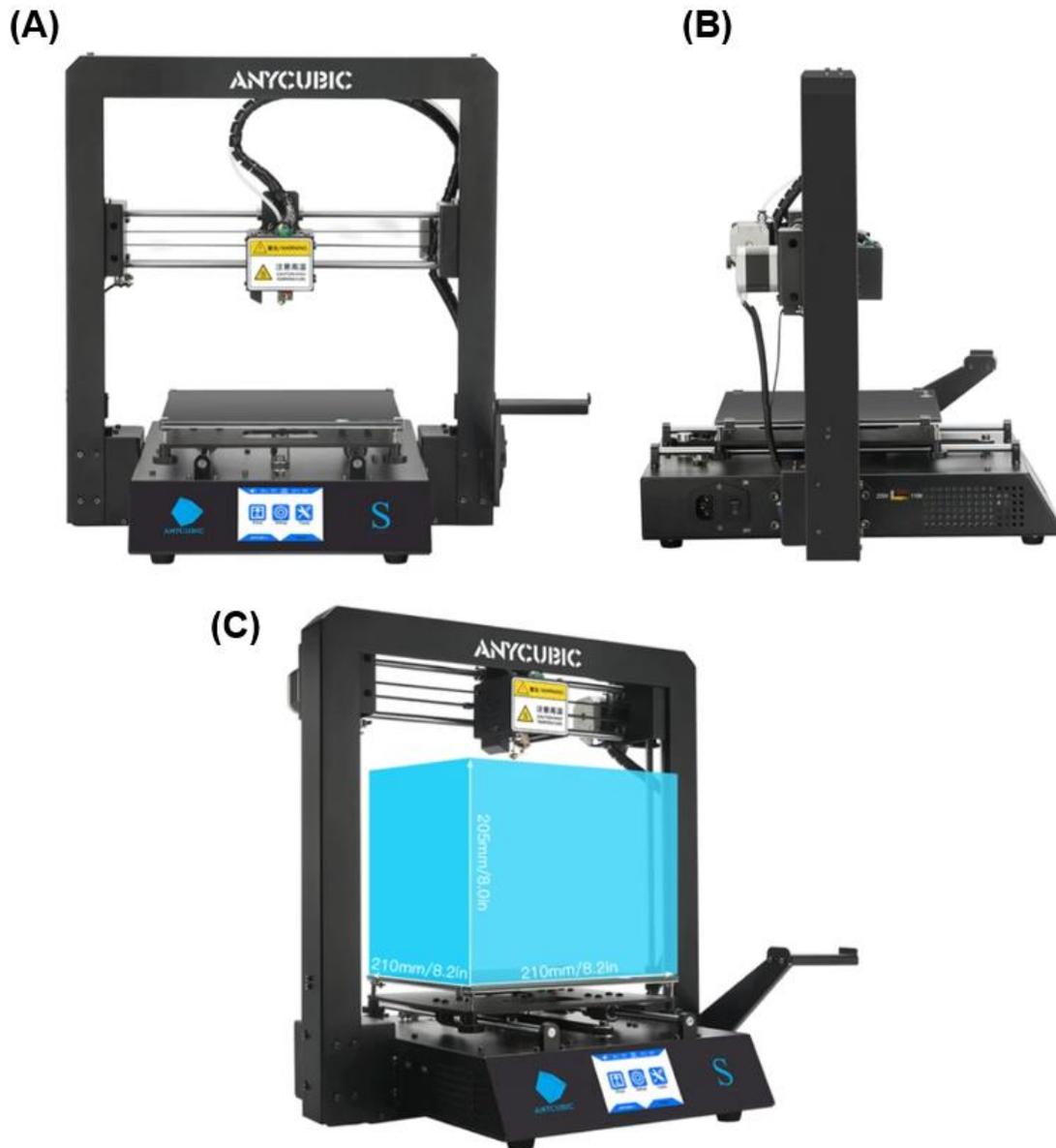


Figura 59. Equipo de Manufactura Aditiva (Anycubic i3 Mega S) utilizada para la fabricación del prototipo experimental del mecanismo flexible de pinzas. (A) Vista Frontal. (B) Vista Lateral. (C) Volumen de fabricación [36].

Las características y especificaciones técnicas de este equipo se muestran a continuación en la tabla 14.

Tabla 14. Especificaciones técnicas del equipo de manufactura aditiva Anycubic i3 Mega S [36].

Especificación técnica	Valor
Proceso de manufactura aditiva	Extrusión de Material
Volumen de fabricación	210 x 210 x 205 [mm]

Materiales de fabricación admitidos	TPU, PLA, ABS, HIP, PETG, Madera
Resolución máxima de capa	50 [µm]
Formatos de entrada	.STL, .OBJ, .DAE, .AMF
Temperatura de funcionamiento	8 °[C] a 40 [°C]
Peso	16.5 [Kg]
Exactitud de posicionamiento	X/Y = 0.0125 [mm], Z = 0.002 [mm]

5.2.2 Evaluación y Selección de materiales.

Uno de los puntos fundamentales para poder realizar la fabricación del prototipo experimental es la elección del material adecuado para obtener el mejor desempeño posible del mecanismo. En este caso los materiales considerados para evaluar son los admitidos por el equipo con el que se cuenta, estos son: ABS, PLA y PETG. Materiales como el TPU (Poliuretano termoplástico) y el HIPS (poliestireno de alto impacto) no fueron considerados dada su relativa dificultad de adquisición y costo en el mercado.

Cabe destacar que algunos de estos materiales ya fueron utilizados para la fabricación de prototipos rápidos con el fin de evaluar los distintos conceptos y probar los diseños preliminares, por lo que el aprendizaje práctico que se tuvo con el uso de estos materiales también será tomado en cuenta.

A continuación, se presenta una breve descripción de estos materiales para poder evaluarlos y posteriormente seleccionar el adecuado de acuerdo con ciertos factores relacionados con el desempeño del mecanismo.

ABS

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS, por sus siglas en inglés) es el plástico más utilizado en manufactura aditiva. Es un termoplástico que contiene una base de elastómeros a base de polibutadieno, lo que lo hace más flexible y resistente a los golpes. El ABS se utiliza en la manufactura aditiva cuando se calienta entre 230°C y 260°C. Es un material resistente, capaz de soportar fácilmente temperaturas de -20°C a 80°C. Además de su alta resistencia, es un material reutilizable y se puede soldar con procesos químicos. Sin embargo, el ABS no es biodegradable y

se contrae en contacto con el aire, por lo que la plataforma de fabricación debe calentarse para evitar deformaciones [37].

Algunas de sus características son:

- Tenaz y duradero.
- Resistente a impactos y al calor.
- Necesita una plataforma caliente para fabricarse.
- Necesita Ventilación.
- El costo de un carrete de 1 [Kg] de filamento de ABS de 1.75 mm de grosor es de entre 430 y 510 pesos mexicanos vendidos por Amazon mx.

Se utiliza principalmente en la fabricación de prototipos funcionales [38]. La tabla 15 muestra las propiedades mecánicas de este material.

Tabla 15. Propiedades mecánicas del ABS [39].

Propiedad	Valor
Densidad (ρ)	1.07 [g/cm ³]
Resistencia ultima a la tensión (σ_u)	40.4 [MPa]
Esfuerzo de cedencia (σ_y)	44.8 [MPa]
Módulo de elasticidad (E)	2.31 [GPa]
Relación de Poisson (ν)	0.36
Esfuerzo de cedencia a flexión (σ_{flex})	72.7 [MPa]
Módulo de flexión (E_{flex})	2.33 [GPa]
Módulo de rigidez (G)	0.849 [GPa]

PLA

Conocido como ácido poliláctico o PLA, es un plástico renovable que se ofrece como opción de material de bajo costo para prototipado rápido. El PLA se fabrica con materias primas renovables como el almidón de maíz. Es uno de los materiales más fáciles de fabricar, aunque tiende a reducirse ligeramente después de su manufactura. No necesita una plataforma con calefacción al fabricarse,

al contrario que con el ABS. El PLA también se fabrica a una temperatura más baja que el ABS, entre 190°C a 230°C.

El PLA es un material más difícil de manipular debido a su alta velocidad de enfriamiento y solidificación. También es importante mencionar que los modelos pueden deteriorarse cuando entran en contacto con el agua. Sin embargo, el material es consistente, fácil de usar y viene en una amplia variedad de colores, lo que lo hace adecuado para la extrusión.[37].

Algunas de sus características son:

- Facilidad de manufactura por extrusión de material.
- Rígido y fuerte pero frágil.
- Menos resistente al calor y a productos químicos.
- Biodegradable.
- El costo de un carrete de 1 [Kg] de filamento de PLA de 1.75 mm de grosor es de entre 480 y 540 pesos mexicanos vendido por Amazon mx.

Sus aplicaciones se encuentran en la fabricación de modelos conceptuales y prototipos estéticos [38]. La tabla 16 muestra las propiedades mecánicas de este material.

Tabla 16. Propiedades mecánicas del PLA [40].

Propiedad	Valor
Densidad (ρ)	1.29 [g/cm ³]
Resistencia ultima a la tensión (σ_u)	64.5 [MPa]
Esfuerzo de cedencia (σ_y)	40.0 [MPa]
Módulo de elasticidad (E)	2.34 [GPa]
Relación de Poisson (ν)	0.35
Esfuerzo de cedencia a flexión (σ_{flex})	76.4 [MPa]
Módulo de flexión (E_{flex})	3.84 [GPa]
Módulo de rigidez (G)	0.867 [GPa]

PETG

El PETG, o poliéster glicolizado es un termoplástico ampliamente utilizado en el mercado de fabricación aditiva, que combina la simplicidad de su manufactura con PLA y la resistencia del ABS. Es un plástico amorfo, que puede ser 100% reciclado. Tiene la misma composición química que el tereftalato de polietileno, mejor conocido por sus siglas PET, sin embargo, se ha agregado glicol para reducir su fragilidad y, por lo tanto, que gane en resistencia [37].

El PETG resiste mejor los impactos, esfuerzos y la temperatura que el PLA. Además, es esterilizable y resistente a los químicos.

Algunas de sus características son:

- Compatible con temperaturas de fabricación más bajas para una producción más rápida.
- Resistencia a la humedad y a los productos químicos.
- Alta transparencia.
- El costo de un carrete de 1 [Kg] de filamento de PETG de 1.75 mm de grosor es de entre 410 y 490 pesos mexicanos vendido por Amazon mx.

El PETG es utilizado principalmente en aplicaciones impermeables y en componentes de fijación mediante presilla [38]. La tabla 17 muestra las propiedades mecánicas de este material.

Tabla 17. Propiedades mecánicas del PETG [31].

Propiedad	Valor
Densidad (ρ)	1.27 [g/cm ³]
Resistencia ultima a la tensión (σ_u)	40.6 [MPa]
Esfuerzo de cedencia (σ_y)	47.3 [MPa]
Módulo de elasticidad (E)	2.59 [GPa]
Relación de Poisson (ν)	0.4
Esfuerzo de cedencia a flexión (σ_{flex})	69.5 [MPa]
Módulo de flexión (E_{flex})	1.96 [GPa]
Módulo de rigidez (G)	0.925 [GPa]

Cabe destacar que muchos de los valores de propiedades mecánicas presentadas en las tablas 15, 16 y 17 varían en función del fabricante y el proceso de manufactura que se utiliza para la obtención del polímero. La información de estas tablas se basa en los valores promedio registrados por una página web especializada en la recopilación de estos datos.

Después de investigar y conocer las características de cada uno de los materiales mencionados anteriormente se tendrá que seleccionar el que mejor desempeño presente dada la dinámica del mecanismo. Para lograr esto se decidió utilizar dos factores de selección:

- 1) **Módulo de resiliencia.** – El módulo de resiliencia es definido como la energía de deformación por unidad de volumen que un material puede absorber antes de ceder o fluir [41], es decir, la capacidad de un material de almacenar energía de deformación elástica o en su zona elástica. La ecuación 13 muestra una forma para calcular este módulo de resiliencia.

$$U_Y = \frac{\sigma_y^2}{2E} \quad (13)$$

Donde:

U_Y : Módulo de resiliencia.

σ_y : Esfuerzo de cedencia.

E : Módulo de elasticidad.

Cabe destacar que, para materiales viscoelásticos como es el caso de los polímeros utilizados, dicha energía dependerá de la velocidad de deformación, sin embargo, este modelo es una aproximación al comportamiento del material para nuestro caso de estudio. El objetivo de considerar este factor es el de poder almacenar la mayor cantidad de energía al momento de la carga de la pinza y por lo cual, en principio, permitirá obtener un cierre más energético.

- 2) **Esfuerzo de cedencia a Flexión.** – El segundo factor a considerar es el módulo de cedencia a flexión, debido a que el elemento flexible en nuestro mecanismo está sujeto principalmente a esfuerzos de flexión, por lo cual, se considera una resistencia a la cedencia para este tipo de esfuerzo lo más grande posible para evitar la deformación plástica del material en esta zona y con ello la pérdida de energía en el cierre de la pinza.

A continuación, se muestra la tabla 18 en la cual se pueden observar los valores de los factores mencionados anteriormente para cada uno de los materiales considerados para la fabricación del prototipo experimental del mecanismo flexible de pinzas.

Tabla 18. Valor de los factores de elección para los materiales ABS, PLA y PETG.

Material	Módulo de resiliencia	Esfuerzo de cedencia a flexión (σ_{flex})
ABS	434.42 [kJ/m ³]	72.7 [MPa]
PLA	341.88 [kJ/m ³]	76.4 [MPa]
PETG	431.91 [kJ/m ³]	69.5 [MPa]

Como se puede observar en la tabla anterior tanto el ABS como el PETG presentan valores similares tanto en el módulo de resiliencia como en el esfuerzo de cedencia a flexión, sin embargo, se seleccionó al ABS como material para la fabricación del prototipo experimental final ya que los prototipos anteriormente fabricados con este material fueron los que presentaron un mejor desempeño y una mejor cohesión entre capas. Aunado a esto el rango de precio de este material es el segundo más bajo, es de fácil acceso y tiene la característica que al alcanzar su deformación plástica el material sufre una decoloración lo cual sirve como referencia para conocer las zonas de la pieza donde la magnitud de esfuerzos es mayor y con ello poder proponer rediseños en dichas zonas.

5.3 Análisis de esfuerzos

Cómo es bien sabido, una primera validación del diseño de un producto o prototipo es su validación estructural por medio de un Análisis por Elementos Finitos (FEA, por sus siglas en inglés) de esfuerzos y deformaciones. En este caso nuestro objetivo es conocer la distribución de esfuerzos a los que estará sometido el prototipo experimental final al momento de la carga del mecanismo.

Cabe recalcar que además de la no linealidad que presenta el material, el proceso de fabricación (Extrusión de material por MA) incrementa la complejidad para realizar una simulación de esfuerzos precisa de la pieza fabricada, ya que en este proceso se generan porosidades en diferentes direcciones y partes donde se presenta un comportamiento mecánico anisotrópico por lo cual el prototipo fabricado no se puede considerar que esta hecho de un material sólido, sin embargo, es importante

mencionar que el propósito de este análisis es tener sólo una noción de la distribución de esfuerzos presentes en nuestro prototipo y validar que los cambios en el diseño ayudaron a disminuir la magnitud de estos esfuerzos.

Las etapas del proceso para realizar este análisis se asemejan al flujo de trabajo empleado para realizar la optimización topológica del mecanismo flexible de pinzas y se basan en tres principales fases:

1. Modelado (Preprocesamiento).
2. Solución/análisis
3. Visualización de resultados (Post-procesamiento).

En este caso se utilizó el software CAE Altair HyperWorks para realizar el análisis. La figura 60 muestra cada una de las etapas que conforman un análisis FEA estándar.

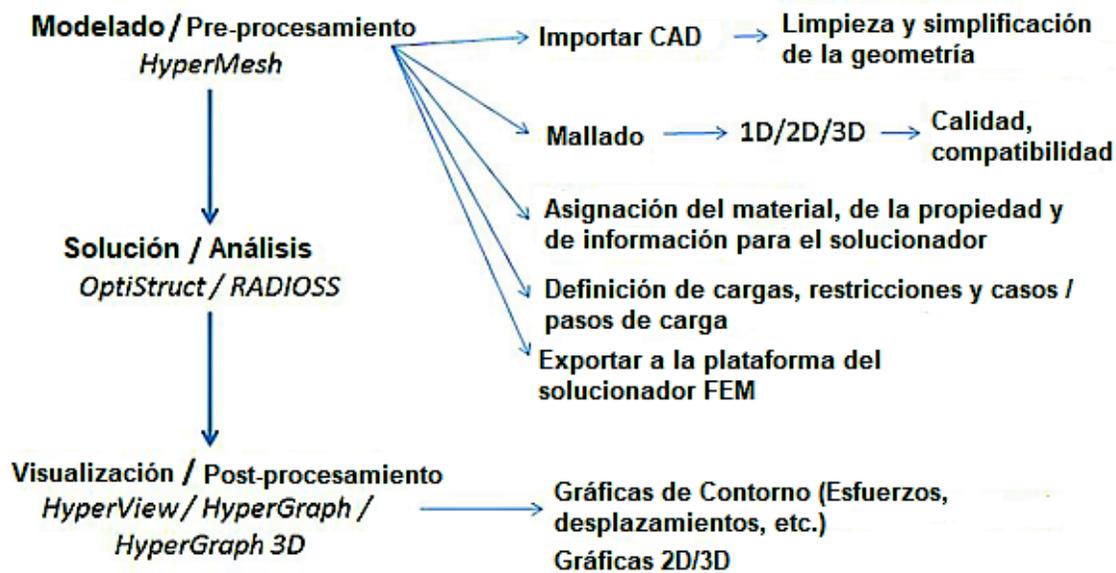


Figura 60. Proceso estándar de un Análisis por Elementos Finitos (FEA) en HyperWorks [42].

A continuación, se describe cada una de las etapas de este proceso FEA aplicadas al análisis de esfuerzos de nuestro prototipo experimental final del mecanismo flexible de pinzas.

1. Modelado (pre-procesamiento)

- a) **Importación del CAD.** Para comenzar con el análisis se importó al software el modelo en CAD del diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas (ver figura 56). Posteriormente se simplificó la geometría al eliminar la parte del riel que se ensambla al banco de pruebas y se realizó una visualización topológica de la

geometría con el fin de conocer la conexión entre superficies en función de sus bordes. En este caso se pretende que todos los bordes sean bordes compartidos lo cual significa que todas las superficies se encuentran unidas y que el objeto forma un volumen cerrado (ver figura 61).

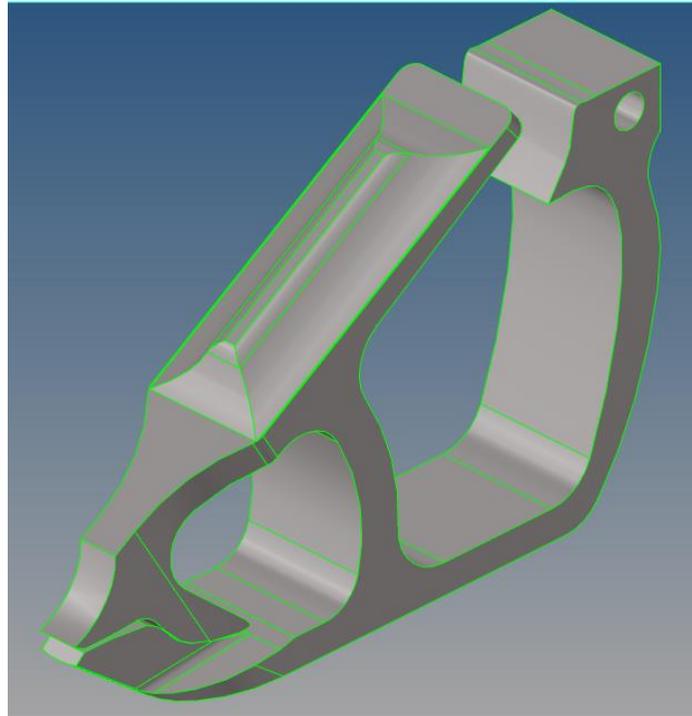


Figura 61. Visualización de bordes y superficies presentes en el modelo CAD del mecanismo flexible de pinzas. Los bordes verdes representan bordes compartidos.

- b) Mallado.** En este caso el mallado de nuestro modelo será un mallado 3D utilizando elementos sólidos tetraédricos (tetra). Para conseguir esto al modelo se le tiene que aplicar una malla base o malla cascarón utilizando elementos 2D para que a partir de estos elementos se desarrollen los elementos 3D. En nuestro caso se utilizaron elementos del tipo R-Trias con un tamaño de 1 [mm] como malla cascaron (ver figura 62).

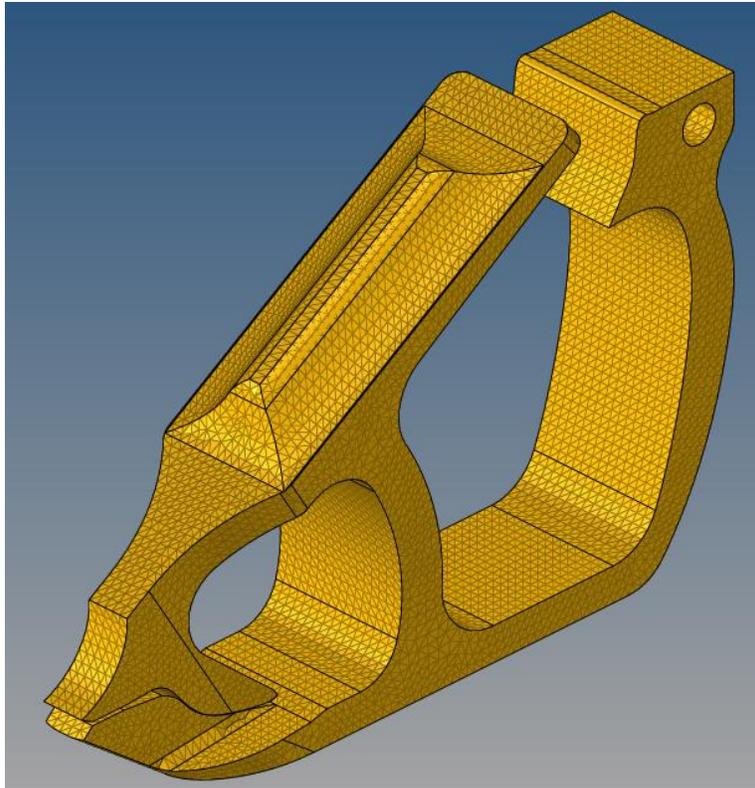


Figura 62. Mallado en 3D del modelo. Se utilizaron elementos R-Trias de 1 [mm] como malla base para la creación de elementos 3D tetraédricos.

- c) **Definición del material y de la propiedad:** El material que se utilizó para este análisis es ABS y se caracterizó utilizando las propiedades mecánicas de la tabla 15. La propiedad asignada a nuestro modelo es PSOLID.
- d) **Condiciones de Frontera y casos de carga.** Para simular la carga del mecanismo se utilizó el mismo caso de carga empleado anteriormente en la optimización topológica del mecanismo flexible de pinzas. Es decir, se definió una condición de empotramiento utilizando elementos 1D del tipo RBE2 en la cara inferior del mecanismo con el objetivo de restringir los 6 grados de libertad en esta zona (ver figura 63).

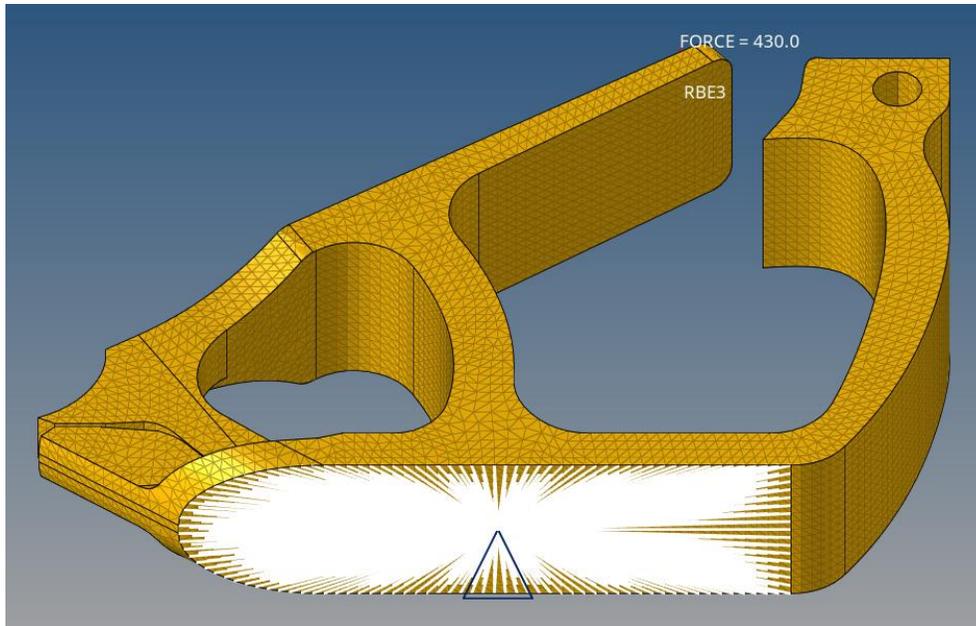


Figura 63. Condición de empotramiento en la cara inferior del modelo utilizando elementos RBE2.

Posteriormente se definió la fuerza necesaria para abrir la pinza y poner el mecanismo en su posición de carga. La magnitud de esta fuerza es de aproximadamente 430 [N] y su zona de aplicación se encuentra en el extremo del cuerpo de la pinza superior. En este caso se asignó una fuerza con dicha magnitud y distribuida en la zona de aplicación a partir de elementos 1D del tipo RBE3 (ver figura 64).

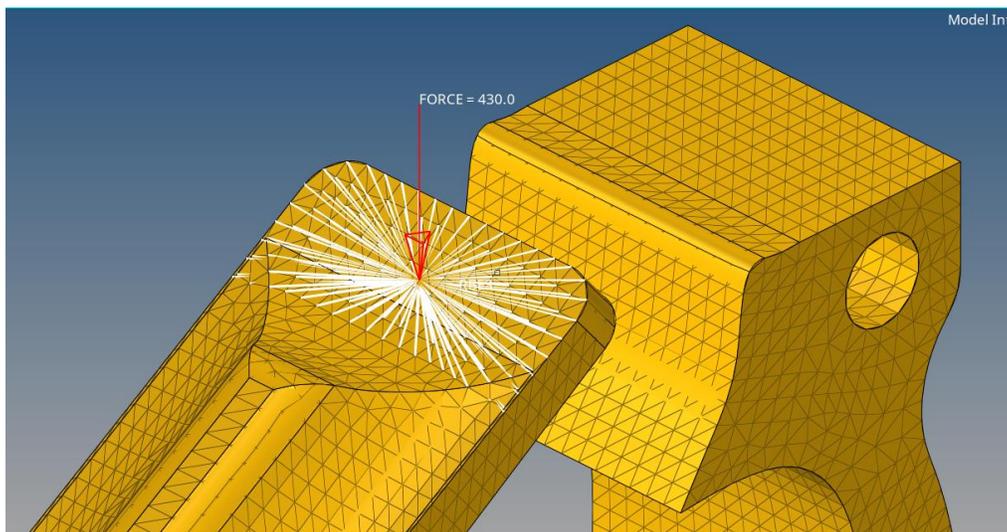


Figura 64. Magnitud, dirección y zona de aplicación de la fuerza necesaria para lograr la carga del mecanismo.

2. Solución/Análisis

Al igual que el análisis de esfuerzos realizado con anterioridad se realizó un análisis estático lineal para simular el proceso de carga del mecanismo. Cabe recordar que a pesar de que el problema presenta varios casos de no linealidad (geométrica y de material) el análisis estático lineal se considera una idealización y primera aproximación del fenómeno físico en estudio. Es importante resaltar que este análisis tampoco considera las irregularidades debidas al proceso de fabricación, en este caso, a la manufactura aditiva, por lo cual se considera al prototipo como un objeto sólido. La figura 65 muestra de forma general la configuración el caso de carga en estudio.

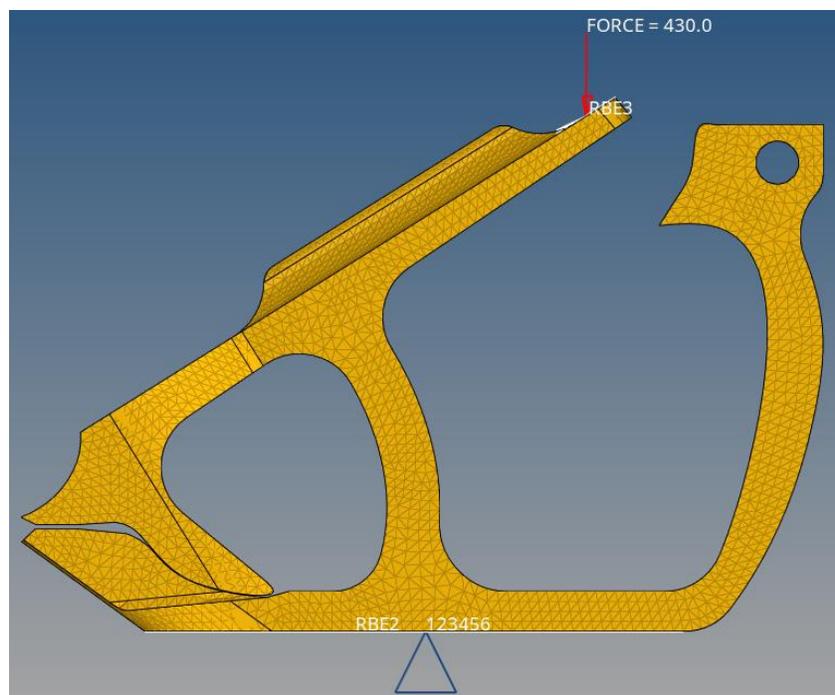


Figura 65. Configuración del caso de carga para el análisis estático lineal.

Este análisis se ejecutó con una computadora Dell Inspiron 5570 con procesador Intel Core I5-825u de 8GB de RAM. La memoria ocupada para realizar el análisis fue de 800 MB y el proceso de completó en 12.12 [s].

3. Visualización (Post-procesamiento)

- a) **Graficas de contorno.** La figura 66 muestra la gráfica de contorno o mapa de colores de la distribución de esfuerzos de Von Mises en mecanismo dado el caso de carga definido anteriormente, en este caso, la magnitud del esfuerzo máximo obtenido es

de 117.536 [MPa] representado por color rojo. Además de esto también se muestra la distribución de esfuerzos en los ejes X, Y Z.

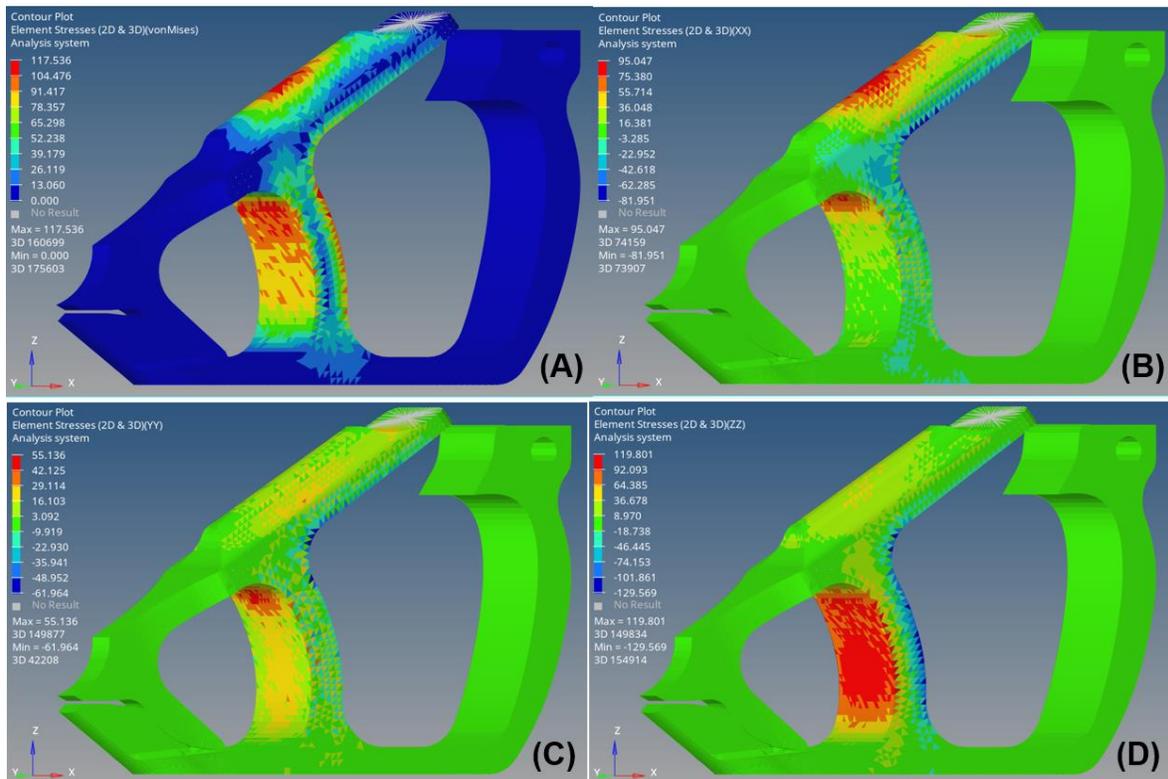


Figura 66. Mapa de colores de la distribución de esfuerzos presentes al momento de la carga del diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas. (A) Esfuerzos de Von Mises. (B) Distribución de esfuerzos en el eje X. (C) Distribución de esfuerzos en el eje Y. (D) Distribución de esfuerzos en el eje Z.

Al analizar los resultados del análisis de esfuerzos se observa que la distribución de esfuerzos es similar a la distribución obtenida en el análisis de esfuerzos realizado al diseño refinado de la optimización topológica (ver figura 45), sin embargo, la magnitud del esfuerzo máximo de Von Mises es de 117.536 [MPa] lo cual representa una reducción de aproximadamente el 29.64% de la magnitud del esfuerzo máximo obtenido en el análisis anterior. Cabe resaltar que para este análisis la magnitud de fuerza aplicada para lograr llevar a la posición de carga al mecanismo fue de 430 [N] a diferencia de los 250 [N] que se utilizaron anteriormente, por lo cual se justifica que a pesar de que se necesite aplicar una fuerza de mayor magnitud para lograr la carga del mecanismo, el cambio en el diseño, así como el cambio de material propician una disminución en la magnitud de los esfuerzos presentes en el mecanismo.

Por otro lado, también se observa que la dirección donde se presenta una mayor magnitud de esfuerzos es en el eje Z cuyo esfuerzo máximo llega a ser de 119.801 [MPa]. Caso contrario la dirección donde se presenta una menor magnitud en los esfuerzos es en el eje Y ya que la magnitud del esfuerzo máximo obtenido para esta dirección es de 55.136 [MPa].

5.4 Construcción del prototipo experimental

Una vez definido el proceso de fabricación (extrusión de material por manufactura aditiva) y seleccionado el material de fabricación (ABS) se da comienzo a la construcción del prototipo experimental final que pretende validar el diseño propuesto y cumplir con todas las especificaciones objetivo, planteadas anteriormente. Este proceso se basa principalmente en las consideraciones prácticas que se tienen que tomar en la fabricación por MA del modelo en CAD del diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas, mostrado en la figura 56, así como la fabricación y ensamble de elementos extras como lo son las paredes laterales o el banco de pruebas.

Para lograr un comportamiento lo más isotrópico posible en la pieza a imprimir, se tiene que considerar la orientación de la pieza a fabricar, es decir, la orientación de la deposición de las capas que formarán a la pieza o prototipo. En este caso, se buscaron dos factores: La distribución de los esfuerzos debería ser similar en las diferentes capas y los esfuerzos entre las capas deberían ser mínimos, esto para garantizar que las capas se comporten de una manera similar, no se separen y que la integridad estructural del mecanismo sea asegurada al momento de cargar y liberar la pinza dentro del rango definido por el diseño.

Del análisis de esfuerzos, se puede observar que la dirección donde se presenta una menor magnitud en los esfuerzos es el eje Y por lo cual la deposición de las capas tendrá que ser perpendicular a esta dirección, es decir en el plano XZ.

Como una interfaz entre la máquina de MA y el usuario se utiliza el software Cura con el cuál se pueden modificar los parámetros de manufactura y simular el proceso de fabricación del prototipo. La figura 67 muestra la orientación de la fabricación, las trayectorias que realizará la boquilla de extrusión, así como un mapa de colores que representa la velocidad de fabricación en diferentes zonas del prototipo.

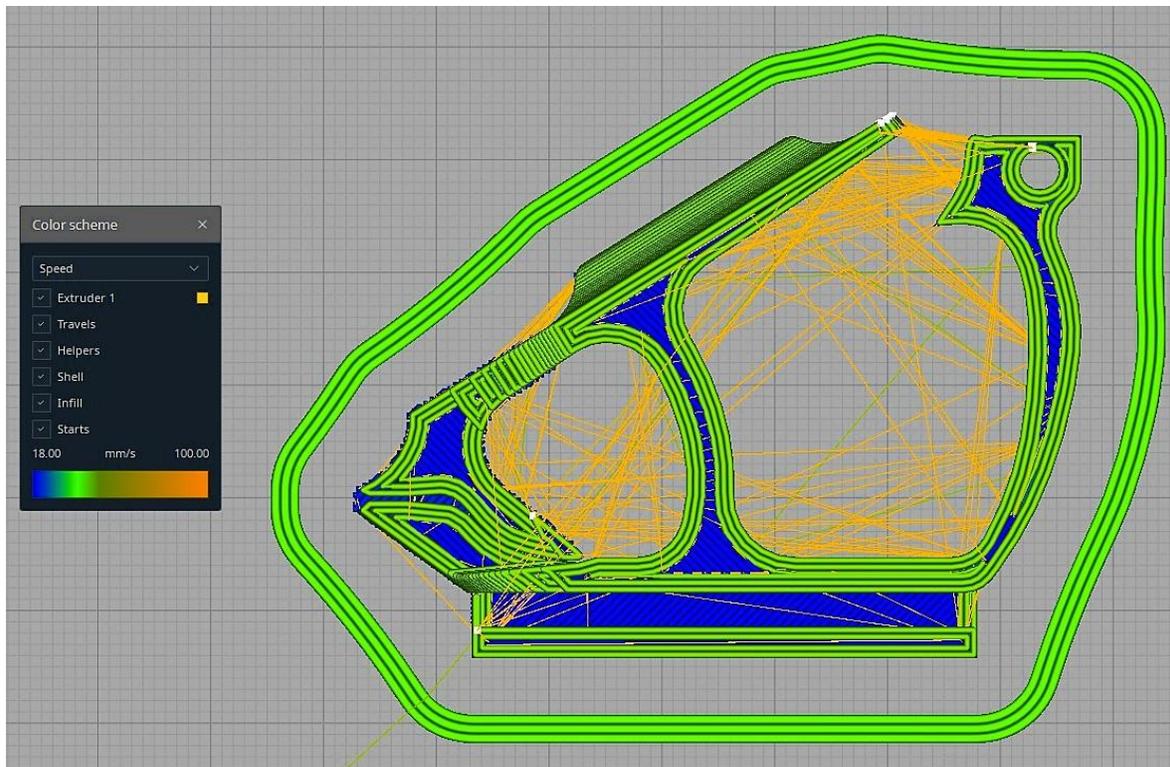


Figura 67. Simulación mediante el software Cura de la fabricación del prototipo experimental final del mecanismo flexible de pinzas por medio de manufactura aditiva. La velocidad de fabricación es representada por el mapa de colores y la trayectoria de la boquilla de extrusión se muestra a través de las líneas anaranjadas.

A la par de la definición de la orientación de la pieza, se tienen que ajustar los parámetros del proceso de manufactura, tales como la temperatura de fabricación, el diámetro del filamento o el calibre de la boquilla de extrusión, con el fin de poder controlar el proceso y tener una pieza de la mejor calidad posible. La tabla 19 muestra los parámetros del proceso, así como algunas estimaciones del prototipo experimental resultante.

Tabla 19. Parámetros y características del proceso de manufactura aditiva del prototipo experimental final del mecanismo flexible de pinzas.

Parámetro	Valor
Material	ABS
Diámetro del filamento	1.75 [mm]
Altura de capa	0.22 [mm]
Calibre de la boquilla (ancho de línea)	0.6 [mm]

Velocidad de fabricación	40 [mm/s]
Temperatura de fabricación	220 [°C]
Tiempo de fabricación	134 [min]
Dimensiones del prototipo	62.7 x 45.5 x 12.8 [mm]
Densidad del prototipo	1.43 [g/cm ³]

Como se puede observar en la tabla anterior las dimensiones del prototipo resultante del proceso de manufactura aditiva no concuerdan con las dimensiones del modelo CAD del mecanismo flexible de pinzas mostrado en la figura 56, esto debido a que en primera instancia se fabricó un primer prototipo con las dimensiones originales del CAD, sin embargo, la fuerza requerida para la carga y descarga del mecanismo generaba dificultades de manipulación, por lo cual se decidió fabricar un prototipo con una reducción aproximada del 20% del tamaño original, tomando como referencia la medida del ancho del diseño hecho en CAD, y con ello reducir la magnitud de la fuerza que se debe de emplear para su carga.

Otro punto para considerar es que, debido a la humedad presente en el ambiente, el filamento de ABS se tuvo que precalentar y secar para eliminar la presencia de agua y evitar la formación de burbujas al momento de que dicho filamento se caliente para su deposición.

Para finalizar el proceso de construcción del prototipo experimental final se fabricaron las paredes laterales por medio de corte láser utilizando una placa de acrílico transparente de 2 [mm] de espesor. Estas paredes se pegaron al prototipo resultado de la MA utilizando un adhesivo industrial instantáneo (cianocrilato). La figura 68 muestra el prototipo experimental final del mecanismo flexible de pinzas el cual se utilizará para validar experimentalmente el resultado de todo el proceso de diseño y fabricación comenzado desde el capítulo 4 de este documento. Esta validación experimental, así como sus resultados se muestran en capítulos posteriores.



Figura 68. Prototipo experimental final del mecanismo flexible de pinzas. 1) Paredes de acrílico de 2 [mm] de espesor. La flecha azul representa la dirección de salida del flujo.

5.5 Proceso de miniaturización del mecanismo flexible de pinzas

Como se mencionó anteriormente, una de las preguntas que surgieron al terminar el proceso de rediseño del mecanismo flexible de pinzas era hasta qué punto se podía miniaturizar o escalar el diseño definitivo siempre y cuando se pueda fabricar un prototipo funcional considerando la tecnología, las herramientas y los materiales con los que se cuenta. Para poder responder esta pregunta se siguió un proceso de miniaturización que consta de 3 etapas principales: Rediseño, Fabricación y evaluación experimental. Cabe aclarar que, para propósitos de este trabajo, se entiende como miniaturización al proceso de una reducción considerable del tamaño del mecanismo la cual se pretende que sea mayor a un 50% del prototipo mostrado en la figura 68.

5.5.1 Rediseño para la miniaturización.

Para comenzar este proceso se realizó una reducción o escalamiento en el tamaño del mecanismo de aproximadamente el 70% con respecto al tamaño original del diseño definitivo, conservando la geometría del prototipo experimental final. Este prototipo se muestra en la figura 69.



Figura 69. Prototipo experimental reducido a un 30% del tamaño del diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas.

Las dimensiones de este prototipo son de 23.7 x 18.0 x 4.2 [mm], sin embargo, la punta de la pinza se vuelve muy difícil de imprimir debido a su tamaño y a las formas irregulares que se presentan en el diseño. Debido a lo anterior se llegó a la necesidad de cambiar ligeramente el diseño del mecanismo, así como de utilizar instrumentos de fabricación por manufactura aditiva más precisos.

En general, las máquinas de MA de extrusión de material utilizan una boquilla de 0.4 [mm] de diámetro para depositar el plástico fundido. No obstante, dichas boquillas son intercambiables, pudiendo encontrar boquillas de 0.2 [mm] de diámetro de manera asequible. La importancia del diámetro de la boquilla recae en la definición que puede llegar a tener la pieza. Esto se manifiesta en dos diferentes magnitudes:

- **El ancho de la línea.** Delimitando la definición de la pieza en el plano paralelo a la cama de la fabricación.
- **La altura de capa:** Delimitando la definición de la pieza en el plano perpendicular a la cama de la fabricación.

Gracias a la disponibilidad de una boquilla con un diámetro de 0.2 [mm], se buscó modificar el diseño con tal de no tener zonas que requirieran mayor definición en el eje perpendicular a la cama de fabricación. De igual manera se buscó que las zonas a imprimir tuvieran múltiplos de 0.2 [mm] para evitar áreas vacías, además de omitir la utilización de un gatillo mecánico debido a la dificultad de manipulación que presentará el mecanismo a estas escalas. Estas modificaciones geométricas en diferentes secciones de la pinza se realizaron con el fin de obtener un diseño más simple para evitar problemas en la manufactura y con ello poder reducir aún más el tamaño del prototipo logrando una reducción de aproximadamente el 78% con respecto a las dimensiones del modelo en CAD del diseño definitivo. El modelo en CAD de este rediseño se muestra en la figura 70.

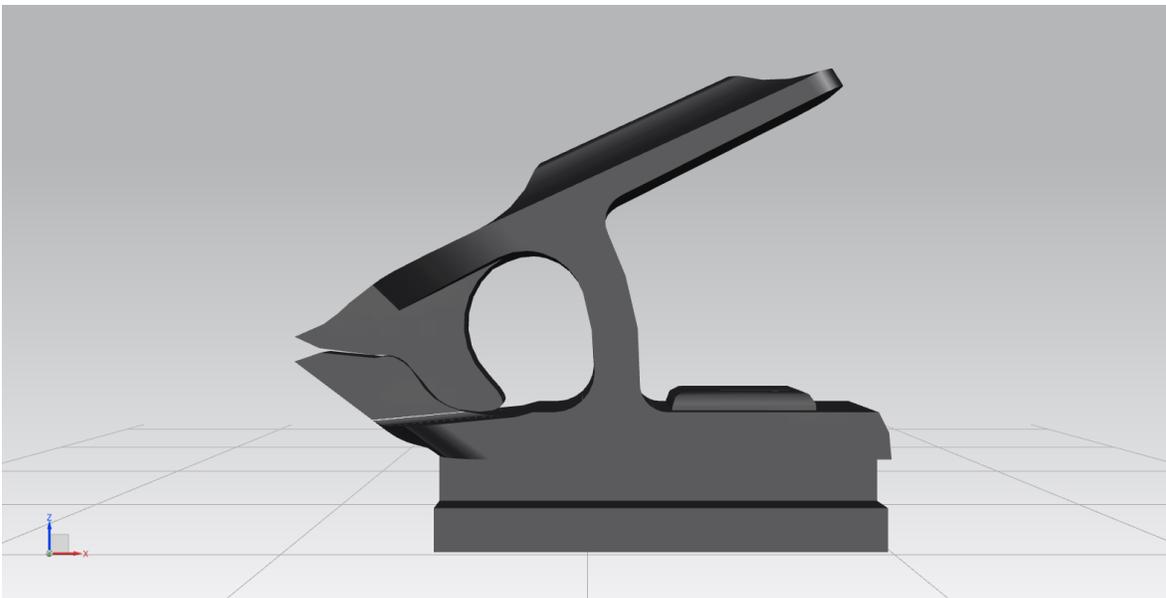


Figura 70. Modelo en CAD del diseño modificado para la miniaturización y fabricación mediante MA del mecanismo flexible de pinzas.

5.5.2 Fabricación del prototipo miniaturizado.

Cómo en los prototipos fabricados anteriormente, este se realizará por medio de manufactura aditiva utilizando un equipo de extrusión por manufactura aditiva. Para definir la altura de capa necesaria se buscó la mínima posible para conservar una calidad aceptable en el prototipo. De acuerdo con una revisión cualitativa de los resultados en diversas piezas fabricadas en este caso se llegó a definir una altura de capa de 0.16 [mm]. Esto se debe a que la radiación en forma de calor que expide la punta de la boquilla llega a las capas anteriores pudiendo causar deformaciones en las zonas ya fabricadas como se observa en la figura 71. Por la misma razón, se buscó una velocidad media de aproximadamente de 28 [mm/s], con fin de evitar la presencia de la punta de la boquilla de manera prolongada sobre una misma área.

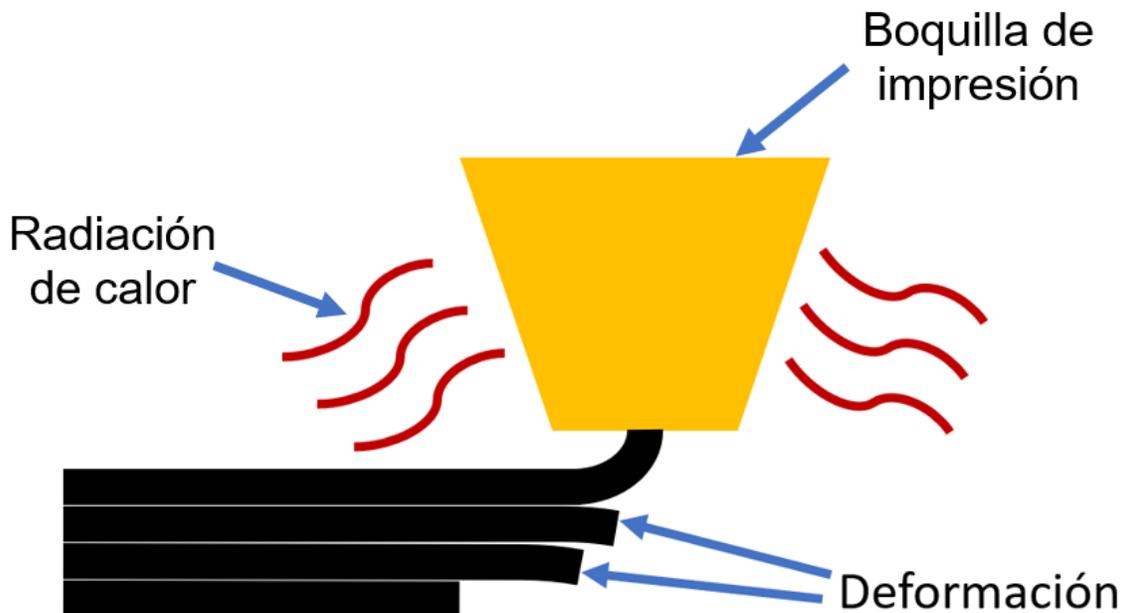


Figura 71. Deformación de capas de material debido a la radiación de calor que expide la boquilla de extrusión.

La necesidad de los parámetros anteriores radica en la tendencia del material utilizado (ABS) a disminuir en gran medida su adhesión de capa al utilizar algún método de enfriamiento.

Por otro lado, siendo un material hidrofílico, el ABS, tiende a almacenar humedad del aire que puede manifestarse en forma de burbujas o bloqueo de la boquilla. Razón por la cual, se aplicaron sesiones de secado al filamento utilizando un deshidratador de alimentos a 55°C cada vez que pasaba un periodo de tiempo prolongado sin haber sido utilizado.

En orden de conseguir una buena calidad de pieza se necesitó calibrar de manera regular la posición de la cama debido a las tolerancias requeridas para una pieza tan pequeña.

Con respecto a la configuración utilizada para generar el código de fabricación, se buscó completar los elementos fabricados mediante la utilización de paredes, omitiendo algún patrón de relleno, esto para que las líneas tuvieran su mayor resistencia ante los esfuerzos aplicados a las piezas. En la figura 72 muestra la simulación del proceso de fabricación de este prototipo realizado con el software Cura, en ella se muestran las capas de material, así como las trayectorias y las velocidades de la boquilla de extrusión.

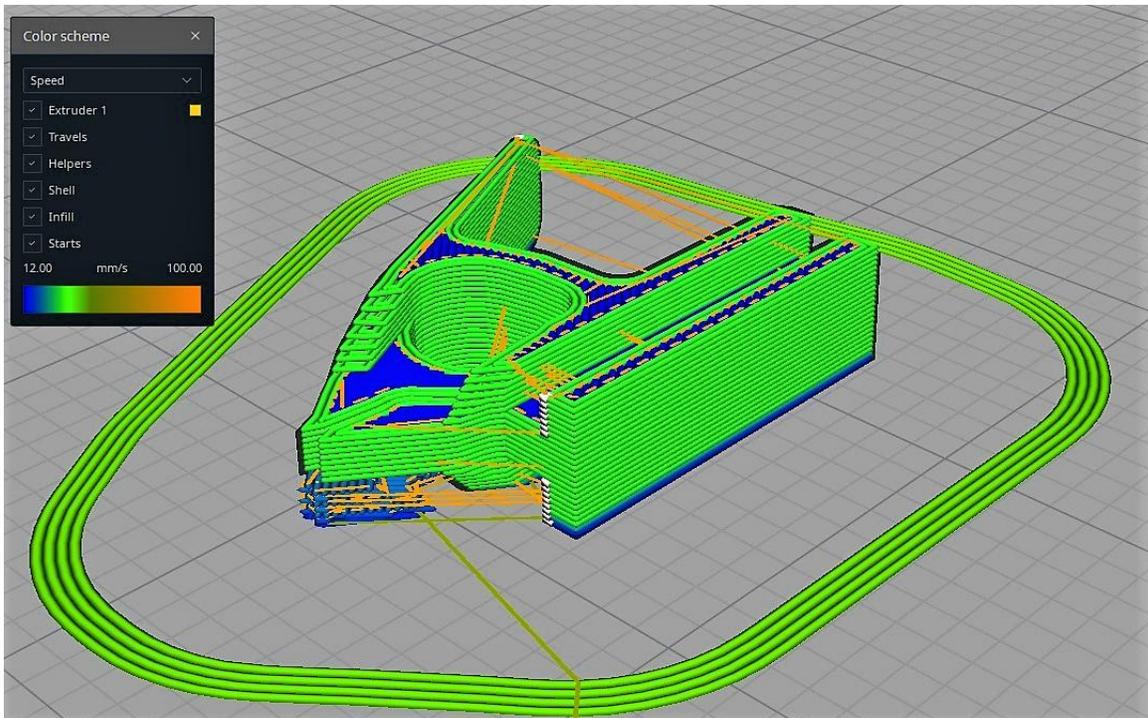


Figura 72. Simulación del proceso de MA del diseño miniaturizado del mecanismo flexible de pinzas. La velocidad de fabricación es representada por el mapa de colores y la trayectoria de la boquilla de extrusión se muestra a través de las líneas anaranjadas.

Los parámetros del proceso, así como el prototipo fabricado se muestran a continuación en la tabla 20 y en la figura 73, respectivamente.

Tabla 20. Parámetros y características del proceso de manufactura aditiva del prototipo miniaturizado del mecanismo flexible de pinzas.

Parámetro	Valor
Material	ABS
Diámetro del filamento	1.75 [mm]
Altura de capa	0.16 [mm]
Calibre de la boquilla (ancho de línea)	0.2 [mm]
Velocidad de fabricación	28 [mm/s]
Temperatura de fabricación	220 [°C]
Tiempo de fabricación	13 [min]
Densidad del prototipo	1.43 [g/cm ³]



Figura 73. Prototipo del diseño miniaturizado del mecanismo flexible de pinzas.

5.5.3 Evaluación experimental del prototipo miniaturizado.

La evaluación experimental del prototipo fabricado anteriormente consta en una serie de pruebas experimentales con el fin de evaluar su desempeño y poder saber si el mecanismo muestra indicios de generar cavitación hidrodinámica.

Al igual que las pruebas experimentales realizadas anteriormente el prototipo experimental fue ensamblado al banco de pruebas y fue sumergido en agua a temperatura y presión ambiente (20 [°C] y 77.86 [kPa]), sin embargo, debido a que en la etapa de rediseño de este prototipo se decidió eliminar el gatillo mecánico se tuvo que fabricar un dispositivo electromecánico con el fin de poder activar el mecanismo de forma remota y repetitiva. La figura 74 muestra la configuración experimental para la prueba de este prototipo.

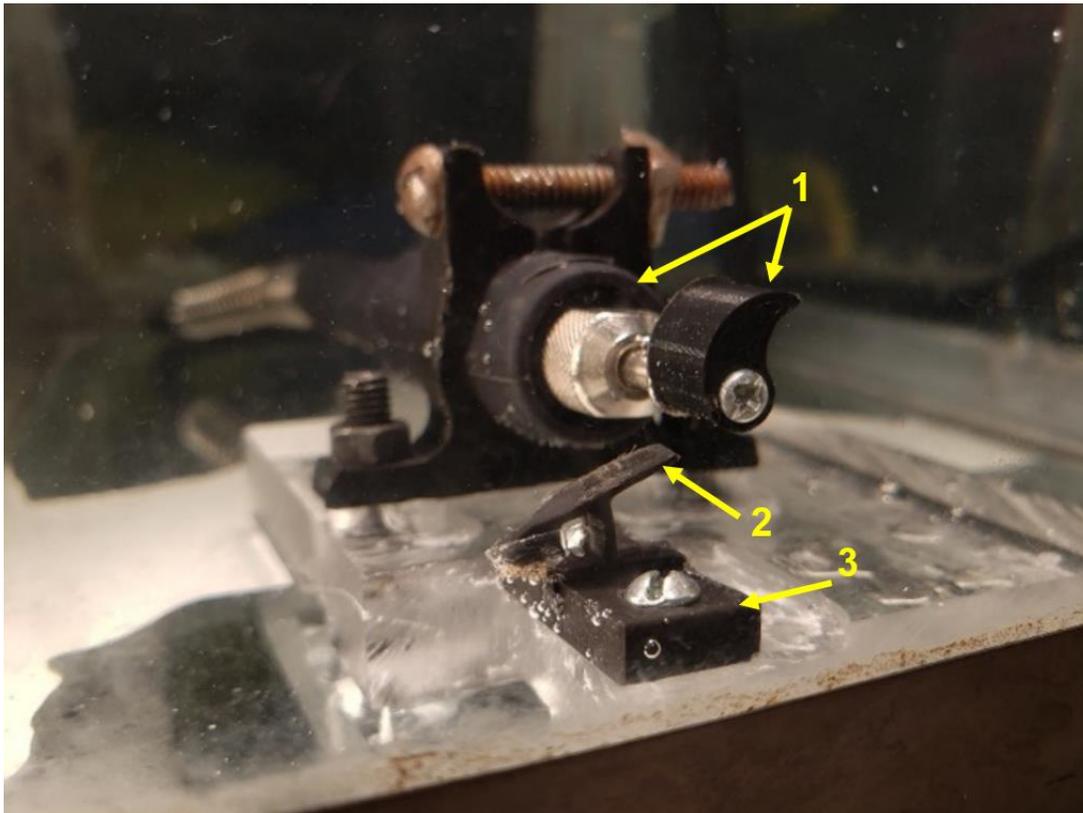


Figura 74. Configuración experimental para realizar las pruebas de desempeño en el prototipo miniaturizado del mecanismo flexible de pinzas. 1) Dispositivo electromecánico de activación remota, 2) Prototipo resultado de la miniaturización, 3) Banco de pruebas.

Debido al tamaño tan pequeño del mecanismo y a que no se contaba con el equipo apropiado, los vídeos capturados de la activación de este mecanismo no son lo suficientemente claros para poder

observar la presencia de cavitación hidrodinámica. Sin embargo, al manipular el mecanismo y analizar cualitativamente su funcionamiento se observa que la velocidad de cierre que se tiene es un buen indicio para poder esperar que el mecanismo sea un prototipo funcional y que sea capaz de formar cavitación hidrodinámica. Posiblemente esto se pueda lograr de mejor forma con el uso de un equipo de MA que cuente con una mayor precisión y calidad en la fabricación de piezas pequeñas, así como una cámara de vídeo que pueda grabar a más cuadros por segundo además de tener un enfoque más grande para poder apreciar la totalidad del fenómeno de forma clara.

Para finalizar este proceso se muestra una tabla comparativa (ver tabla 21) de las características de cada uno de los mecanismos diseñados, partiendo del modelo en CAD del diseño definitivo (mostrado en la figura 56) hasta el prototipo del diseño miniaturizado del mecanismo flexible de pinzas (mostrado en la figura 72). Además, en la figura 75 se muestra una comparación visible del tamaño de cada uno de los prototipos fabricados en este proceso.

Tabla 21. Comparación de características de los distintos modelos y prototipos diseñados en el proceso de miniaturización del mecanismo flexible de pinzas.

Modelo/Prototipo	% de reducción	Dimensiones del modelo/prototipo [mm]	Peso estimado del modelo/prototipo [g]	Material	Comentarios
Modelo CAD	Original	80.61 x 60.67 x 16	17.73	ABS	Modelo en CAD del diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas.
Prototipo experimental final	20	62.7 x 45.5 x 12.8	15	ABS	Prototipo fabricado para validar el diseño del modelo en CAD.
1er Prototipo miniaturizado	73.75	23.7 x 18.0 x 4.2	1	ABS	No hay variación en la

					geometría del diseño, solo una reducción en el tamaño.
2do Prototipo miniaturizado	78.13	13.9 x 11.7 x 3.5	0.02	ABS	Se realizaron modificaciones en la geometría para poder reducir el tamaño del prototipo y poder fabricarlo.

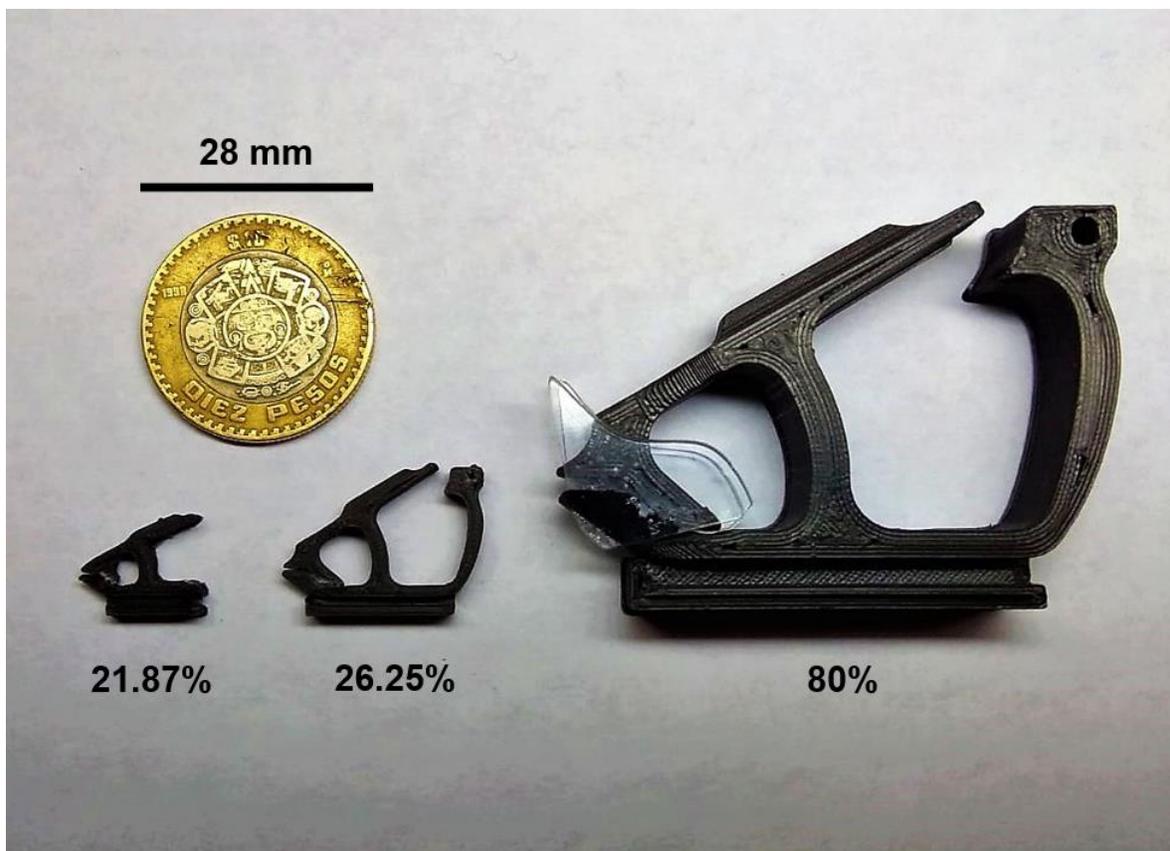


Figura 75. Comparación de tamaños de los distintos prototipos fabricados en el proceso de miniaturización del mecanismo flexible de pinzas. Los porcentajes indican el tamaño de los prototipos con respecto al tamaño del modelo CAD del diseño definitivo.

VI. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran las pruebas de desempeño realizadas al prototipo experimental final del diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas, estas pruebas tienen la intención de validar tanto el diseño como el funcionamiento del mecanismo y poder vislumbrar de forma más clara si se produce cavitación hidrodinámica al momento del cierre de la pinza. Cabe resaltar que a pesar de que anteriormente se realizaron algunas pruebas experimentales, estas se realizaron con la intención de poder evaluar de forma rápida el desempeño de las distintas iteraciones o versiones del proceso de rediseño del mecanismo flexible, por cual se realizaron de forma rápida y con el equipo de vídeo que se tenía a la mano. A diferencia de lo anterior, las pruebas experimentales realizadas en este capítulo tienen el propósito de poder capturar de la mejor forma posible el fenómeno en estudio, controlando las condiciones externas del medio y utilizando un equipo de adquisición de video de más potencia.

6.1 Diseño e instrumentación del arreglo experimental para el estudio de la cavitación por el cierre súbito del mecanismo flexible

Para comenzar con el experimento el prototipo mostrado anteriormente en la figura 68 fue fijado a un banco de pruebas y este a su vez fue colocado dentro de un tanque rectangular con paredes transparentes de 40 [cm] de longitud, 10 [cm] de ancho y 30 [cm] de altura, el cual a su vez se llenó con agua de grifo previamente desgasificada, como se muestra en la figura 76. Esta desgasificación se realizó con el propósito de eliminar lo más posible la presencia de burbujas en los alrededores del prototipo antes de realizar el experimento, el proceso de desgasificación se llevó a cabo hirviendo 12 litros de agua de grifo y posteriormente refrigerarlos hasta que se alcanzara una temperatura ambiente.

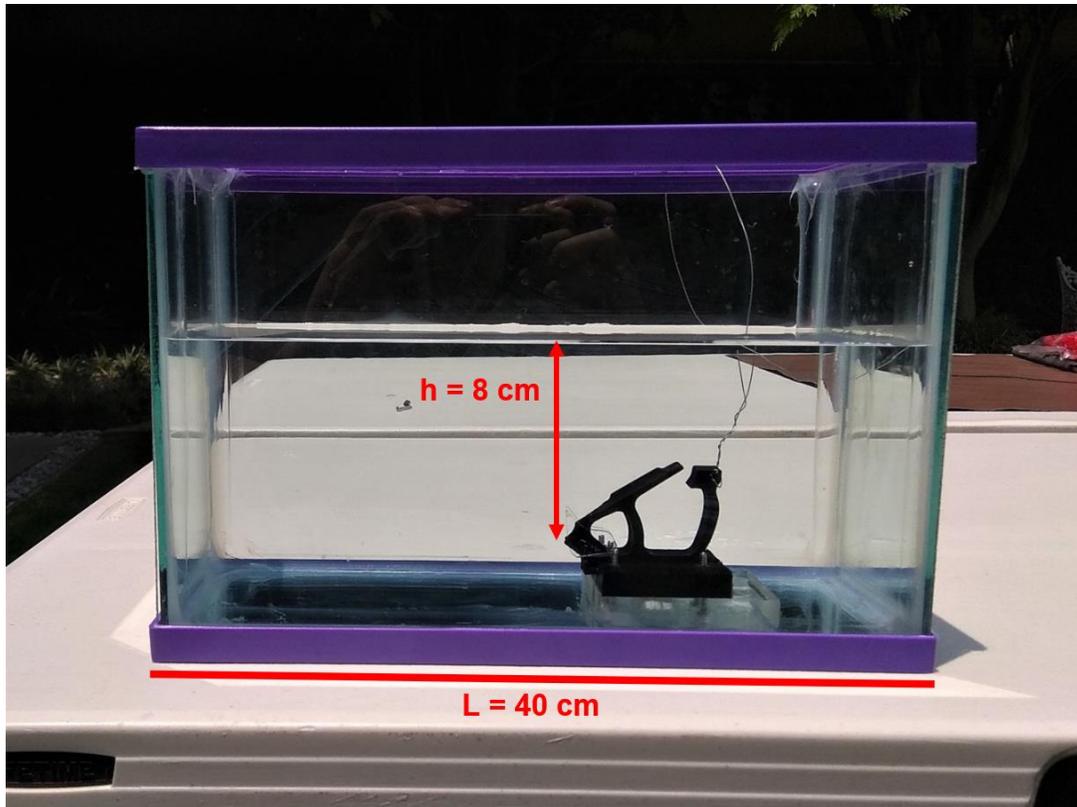


Figura 76. Configuración del arreglo experimental para el estudio de la cavitación por el cierre súbito del mecanismo flexible.

Como se puede observar en la figura anterior, el mecanismo fue sumergido aproximadamente 8 [cm] con respecto a la superficie del agua, además de esto, un alambre fue colocado en el orificio superior del gatillo mecánico con el fin de poder accionar el mecanismo tratando de nos ensuciar o enturbiar el agua.

Para la toma de vídeos se utilizó una cámara digital Phantom V1211 de ultra alta velocidad (ver figura 77), la cual es capaz de capturar 12,000 fotogramas por segundo (fps, por sus siglas en inglés) a una resolución máxima de 1280 x 800.

Las especificaciones y características de esta cámara se muestran a continuación [43]:

- Resolución máxima: 1280x800
- Sensor: CMOS
- Velocidad de procesamiento: 12 [Gpx/s].
- Tasa de fotogramas máxima: 820,000 [fps] a una resolución de 128x16, 12,000 [fps] a resolución máxima.
- Capacidad de memoria: RAM interna de alta velocidad de 24 [GB], 48 [GB] y 96 [GB].
- Tiempo mínimo de exposición: 1 [μ s].

- Montura: Nikon F.
- Dimensiones: 28 [cm] de longitud, 19 [cm] de ancho y 17.75 [cm] de alto.
- Peso: 7.7 [Kg] (sin lentes).
- Temperatura de operación: - 10 [°C] a 50 [°C]
- Voltaje de alimentación: 100 – 240 [Vac] con una fuente de alimentación de 220 [W] incluida.



Figura 77. Conexión y configuración de la cámara Phantom v1211 de ultra alta velocidad para la toma de vídeos del experimento.

6.2 Pruebas experimentales

Para la toma de vídeos, la cámara se colocó en dos posiciones diferentes con el objetivo de captar el fenómeno tanto de forma lateral como frontal a la pinza y con esto poder registrar distintos parámetros, como lo son la velocidad y el tiempo de cierre de la pinza superior, así como la velocidad del flujo alcanzada. Posteriormente el mecanismo se cargó en su posición de apertura y se liberó al mismo tiempo que la activación de la cámara. Este experimento fue realizado utilizando luz natural y a condiciones ambientales de presión y temperatura (23 [°C] y 78.26 [kPa]). Los videos capturados se realizaron a una tasa de muestreo de 6000 [fps] en un tiempo de exposición de 30 [μ s] y con una resolución de 1280x800. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de los videos capturados.

6.3 Análisis y discusión de resultados experimentales

6.3.1 Cinemática del cierre súbito.

El primer análisis que se realizó trato de conocer las características de la cinemática del cierre súbito de la pinza superior de nuestro prototipo y con ello poder saber el tiempo de cierre, así como las velocidades alcanzadas en este proceso.

Para realizar este análisis se tomó como base el video tomado en forma lateral de la pinza y se importó al software de análisis de video y construcción de modelos Tracker en su versión 5.1.5. Con este software se pudo hacer el rastreo, cuadro a cuadro, del movimiento de una parte del mecanismo, en nuestro caso, la punta de la pinza superior.

Antes de realizar el rastreo se tuvieron que definir dos elementos principalmente: El primero consta en definir una barra de calibración para dimensionar el mecanismo, esta barra de calibración se refiere a una medida conocida en el video. Para este caso se definió la distancia entre la punta de la pinza superior y la pinza inferior ($d = 12 \text{ mm}$) como barra de calibración.

Posteriormente se tuvo que definir un origen para nuestro sistema de coordenadas. Debido a que en este análisis se está estudiando el proceso de cierre de la pinza, se definió que nuestro origen sería el centro de rotación o pivote de la pinza superior, sin embargo, dado que nuestro mecanismo es un mecanismo flexible, el centro de rotación no se puede definir con facilidad como una junta rotacional entre dos eslabones. Debido a esta problemática se tomó como centro de rotación a la intersección

entre el eje horizontal que forma la pinza superior en su posición de cierre y el eje que define la pinza en su posición de apertura al cual le corresponde a un ángulo máximo de apertura (α) de 18° . La figura 78 muestra la barra de calibración, así como la definición de nuestro origen para el sistema de coordenadas.

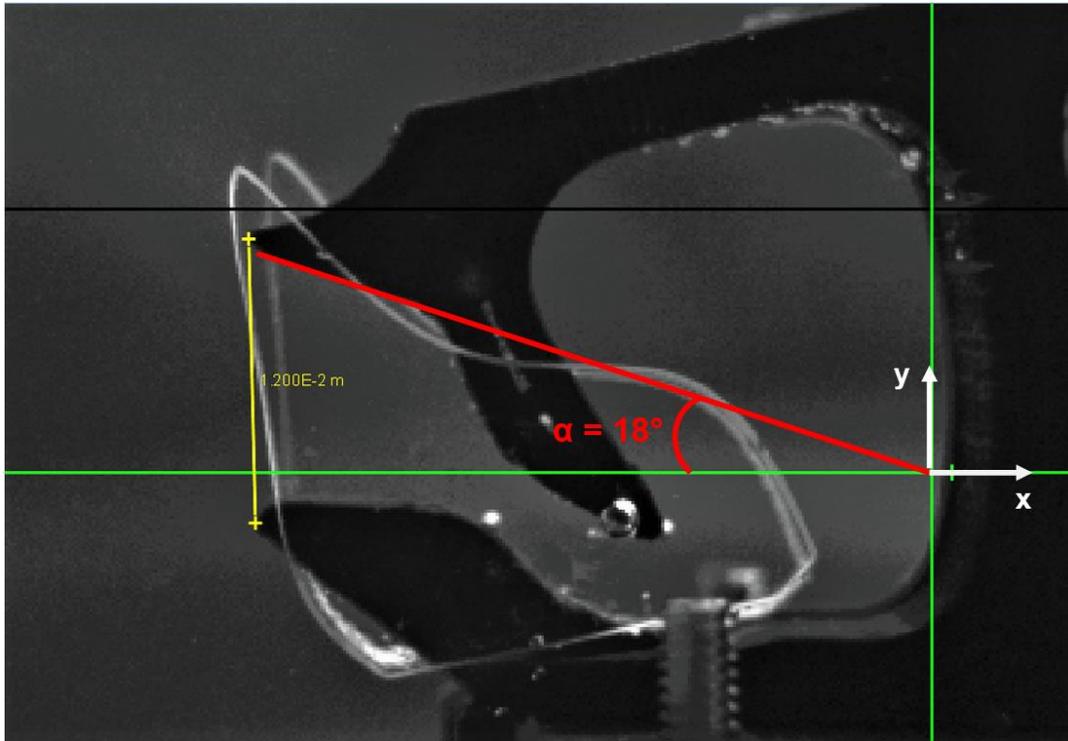


Figura 78. Configuración del mecanismo flexible con la pinza superior en su posición de apertura. La barra de calibración (en amarillo) muestra una longitud de 12 [mm]. La posición del origen del sistema de coordenadas (en verde) se obtiene de la intersección entre dos ejes paralelos a la garganta de la pinza superior en su posición de apertura (en rojo) y cierre. Ángulo de apertura $\alpha = 18^\circ$.

Una vez definidos los parámetros anteriores se dio inicio al seguimiento, cuadro por cuadro, de la punta de la pinza superior como se muestra en la figura 79. De este análisis se pudo conocer que el tiempo de cierre de la pinza desde su posición de apertura hasta su posición de cierre es de $T = 2.167$ [ms] lo que representa una reducción en el tiempo de cierre del mecanismo de aproximadamente el 76% con respecto al mecanismo de referencia desarrollado por Godínez et al. [4]. Cabe mencionar que del análisis del vídeo se observa un retroceso o rebote de la pinza superior al momento de llegar a su posición de cierre, esto debido a que la energía de deformación elástica que se almacena en el elemento flexible no se libera completamente en el instante en que se llega al cierre de la pinza superior, además de a las fuerzas de impacto que se producen entre el émbolo y la

cavidad fija de nuestro prototipo al momento de cierre total. Las implicaciones de este fenómeno se analizarán posteriormente en el modelado del cierre de la pinza.

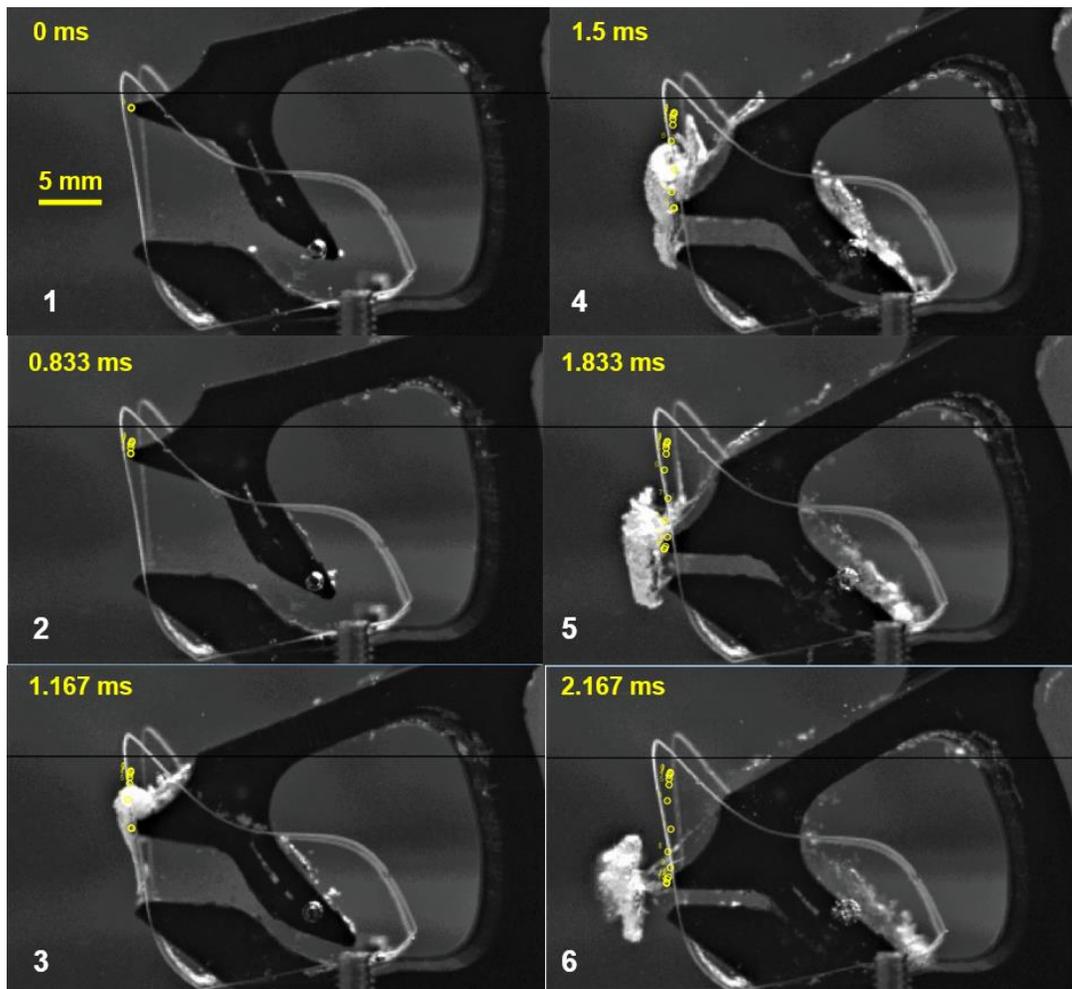


Figura 79. Secuencia de imágenes del proceso de cierre del mecanismo flexible de pinzas. La trayectoria de la punta de la pinza superior se muestra en los círculos amarillos.

Al conocer tanto el ángulo de apertura de la pinza superior, así como el tiempo de cierre se puede determinar la velocidad angular promedio de la pinza la cual tiene un valor de $\omega_{\text{prom}} = 8,306.41$ [$^{\circ}/\text{s}$] o lo que es lo mismo 144.97 [rad/s]. La figura 80 muestra la gráfica tanto de la posición angular, así como de la velocidad angular de la punta de la pinza superior en función del tiempo, desde su posición de apertura en $t^* = 0$ hasta su posición de cierre en $t^* = 1$, dónde $t^* = t/T$ representa una normalización de cada instante de tiempo con respecto al tiempo de cierre total $T = 2.167$ [ms].

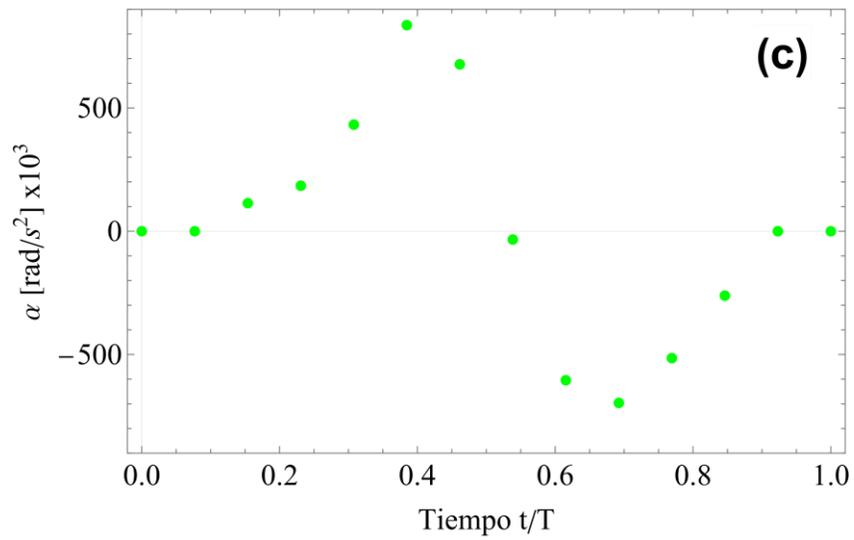
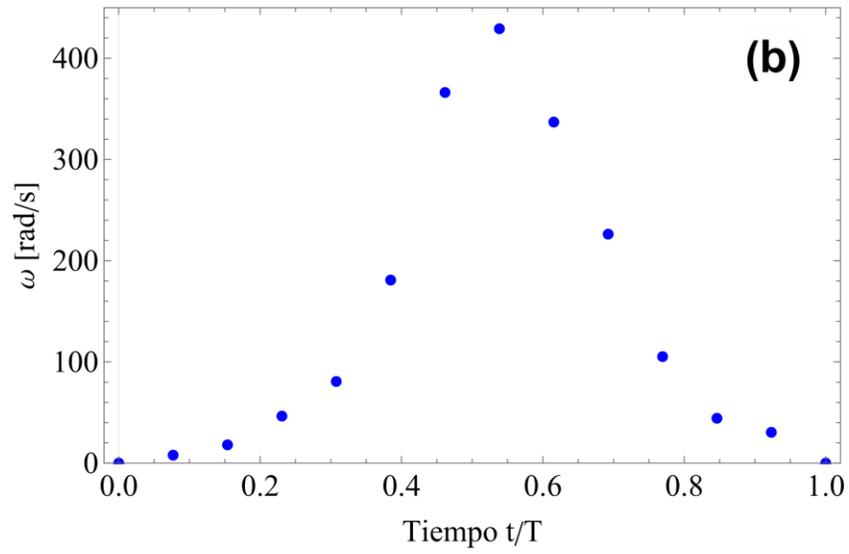
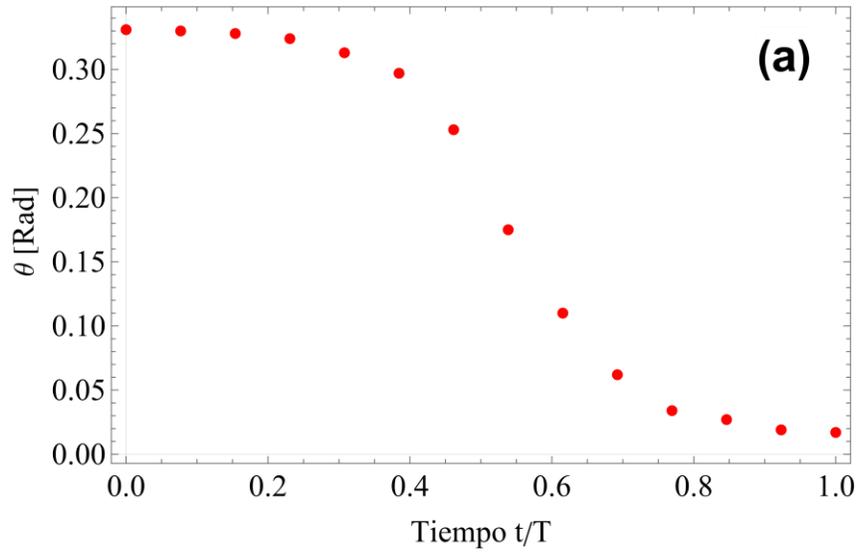


Figura 80. Evolución temporal de la posición angular (a), de la velocidad angular (b) y de la aceleración angular de la punta de la pinza superior desde su liberación en su posición de apertura hasta su posición de cierre.

De las gráficas mostradas anteriormente, principalmente de la gráfica de la aceleración angular, se puede observar que el movimiento es caracterizado por cuatro principales fases: En la primera fase, después de la liberación del mecanismo, se observa un primer incremento en la magnitud de aceleración de la punta de la pinza superior ($0 \leq t^* \leq 0.38$) hasta llegar a una aceleración angular máxima positiva de 835.77×10^3 [rad/s²] en $t^* \approx 0.38$. Posteriormente en la segunda fase, la magnitud de la aceleración empieza a decrecer ($0.38 < t^* \leq 0.54$) hasta cambiar de dirección o signo en $t^* \approx 0.54$. A partir del instante anterior, empieza un nuevo incremento en la magnitud de la aceleración ($0.54 < t^* \leq 0.69$) en donde se alcanza una aceleración angular máxima negativa de -696.15×10^3 [rad/s²] en $t^* \approx 0.69$. Finalmente, en la cuarta fase se presenta una segunda caída en la magnitud de la aceleración ($0.69 < t^* \leq 1$) para llegar al cierre total de la pinza en $t^* = 1$. Cabe destacar que las dos primeras fases de la gráfica de la aceleración angular corresponden a una etapa de incremento en la velocidad angular hasta llegar a un punto de inflexión ($t^* \approx 0.54$) en donde se registra una velocidad angular máxima de 429.20 [rad/s], y es a partir de este instante donde la velocidad angular empieza a decrecer hasta llegar a cero, lo que corresponde a las fases 3 y 4 de la gráfica de la aceleración angular.

Modelado del cierre de la pinza.

Como se mencionó anteriormente, al analizar los videos obtenidos se observó que después del cierre de la pinza se genera un rebote, es decir, un movimiento oscilatorio de la pinza superior que se va atenuando hasta llegar a su posición de equilibrio estático en aproximadamente 7.833 [ms], además de esto, al analizar la imagen número seis de la figura 79 se observa que el cambio de la posición en Y de la punta de la pinza superior realiza una trayectoria casi vertical de forma ascendente y descendente, por lo cual el análisis del movimiento de la punta en este eje nos hace pensar que la dinámica del mecanismo se asemeja a la dinámica de un sistema masa-resorte-amortiguador.

La hipótesis anterior queda confirmada al analizar la curva de la evolución temporal de la posición en el eje Y de la punta de la pinza (ver figura 81) la cual se asemeja mucho al

comportamiento típico de un sistema masa-resorte-amortiguador con vibración libre en el caso sub-amortiguado.

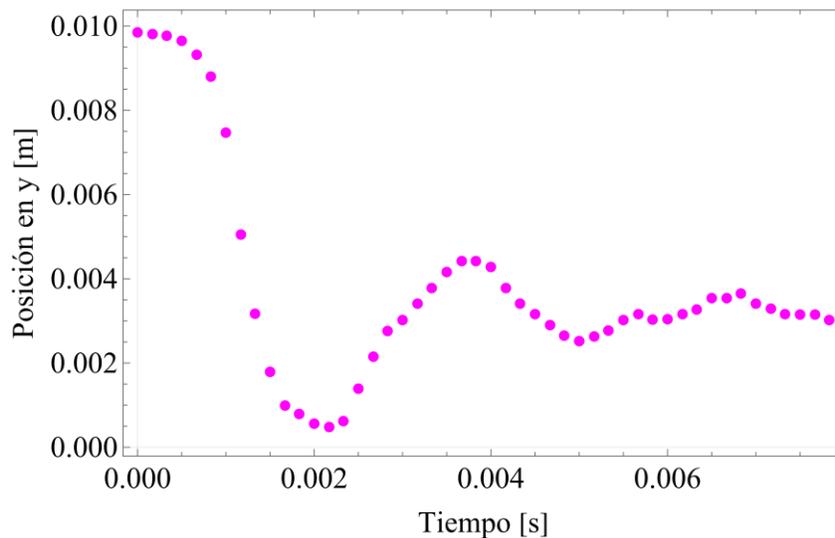


Figura 81. Evolución temporal de la posición sobre el eje Y de la punta de la pinza superior desde su liberación en su posición de apertura hasta su posición de equilibrio estático.

El modelo matemático que describe el movimiento de este tipo de sistemas tiene la forma:

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + ky = 0 \quad (14)$$

Donde:

m = Masa.

b = Coeficiente de Amortiguamiento.

k = Constante de Rigidez.

Debido a que en este caso sólo se tienen las curvas de movimiento, los parámetros m, b y k se tendrán que determinar para que la curva de la solución de esta ecuación diferencial, así como de sus respectivas derivadas, sean las que más se ajusten a la curva experimental obtenida. Para lograr esto se realizó un programa en el software Mathematica 12.2 en donde se obtuvo una solución analítica de la ecuación 14 considerando a los parámetros m, b y k como constantes y con condiciones iniciales $y(0) = 0.00683$ [m], $y'(0) = 0$. Una vez obtenida esta solución se utilizó el comando `NonlinearModelFit`, el cual determina los valores de los parámetros para que la curva de dicha solución se ajuste lo más posible a la curva experimental cuyos datos fueron agregados en el inicio del programa. La figura 82 muestra un primer ajuste obtenido dada la curva solución de la

ecuación 14, para este caso, los valores obtenidos de los parámetros fueron $m = 0.0000571247$ [Kg], $b = 0.0667133$ [N·s/m] y $k = 141.755$ [N/m].

Cabe mencionar que, para este análisis, se tuvo que realizar una traslación del eje X para que el último dato obtenido de la posición se ajustara a una posición de equilibrio en $y = 0$, es decir, que en el instante que se alcanza el equilibrio estático ($t = 7.833$ [ms]) la posición en Y sea igual a cero. Para lograr esto únicamente se restó el valor de la posición original donde se alcanza el equilibrio ($y = 0.00302$ [m]) a cada uno de los valores de las posiciones en Y registradas a lo largo del tiempo.

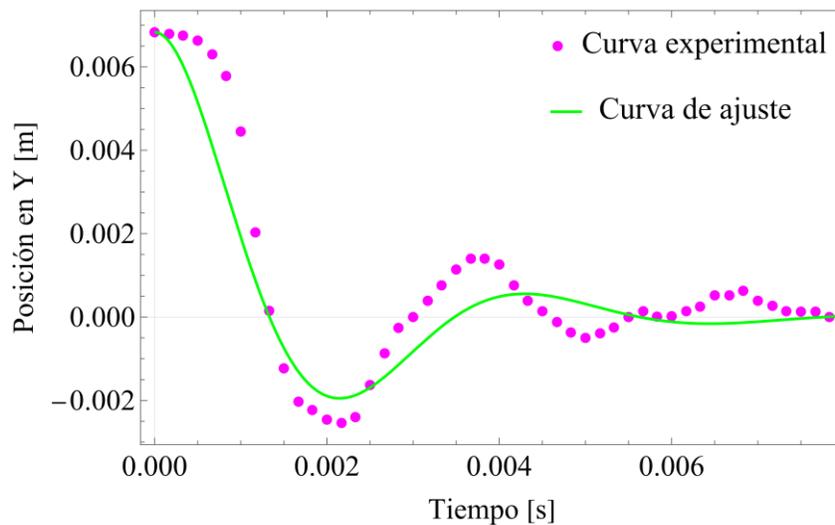


Figura 82. Comparación entre la curva de datos experimentales de la evolución temporal de la posición en el eje Y de la punta de la pinza y una primera curva de ajuste dado un modelo de masa-resorte-amortiguador lineal.

Como se puede observar, la curva del modelo no presenta un ajuste muy bueno de los datos, esto se puede verificar al considerar el coeficiente de determinación, que para este ajuste fue $R^2 = 0.884398$, este coeficiente es un estadístico o indicador que determina la calidad del modelo para replicar los resultados, es decir, lo bien que se ajusta el modelo a un conjunto de datos u observaciones siendo $R^2 = 1$ un ajuste perfecto [44].

Debido a lo anterior se vio a la necesidad de modificar el modelo 14 para obtener un mejor ajuste, esta modificación se basó en considerar que este mecanismo presenta un alto grado de no linealidad debido a la geometría de la pinza y al material de fabricación del prototipo ya que al ser un polímero presenta propiedades viscoelásticas. La fuente de no linealidad en este sistema mecánico se propuso al considerar que la rigidez en el sistema tiene una relación no lineal con respecto a la posición, es decir, que el resorte es un elemento elástico no lineal. Si el sistema se considera simétrico, la relación fuerza-desplazamiento está dada por [45]:

$$F_k = k_1y \pm k_3y^3 \quad (15)$$

Donde:

F_k = Fuerza ejercida por el resorte.

k_1 = Constante de rigidez lineal.

k_3 = Constante de rigidez no lineal.

Sustituyendo la ec. 15 en la ec. 14:

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + k_1y \pm k_3y^3 = 0 \quad (16)$$

Al considerar este modelo en el programa desarrollado en Mathematica se pudo observar que el mejor ajuste se puede obtener cuando $k_3 > 0$ lo cual indica que nuestro resorte es “duro”. Al realizar el equilibrio de fuerzas correspondiente se llega a:

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + k_1y - k_3y^3 = 0 \quad (17)$$

Al ser la ec. 17 una ecuación diferencial no lineal de segundo orden, su solución fue aproximada numéricamente bajo las mismas condiciones iniciales, $y(0) = 0.00683$ [m], $y'(0) = 0$ [m/s] y en un rango de $0 \leq t \leq 0.01$. El valor de los parámetros arrojados por el programa para ajustar el modelo de la ec.17 con los datos correspondientes son $m = 0.0000659312$ [Kg], $b = 0.0594425$ [N·s/m], $k_1 = 323.808$ [N/m] y $k_3 = 5.72382 \times 10^6$ [N/m³]. La figura 83 muestra la curva de ajuste obtenida por el programa al considerar la ecuación 17 como modelo para describir la cinemática del cierre de la pinza. El código fuente de este programa puede encontrarse en la sección de anexos de este documento.

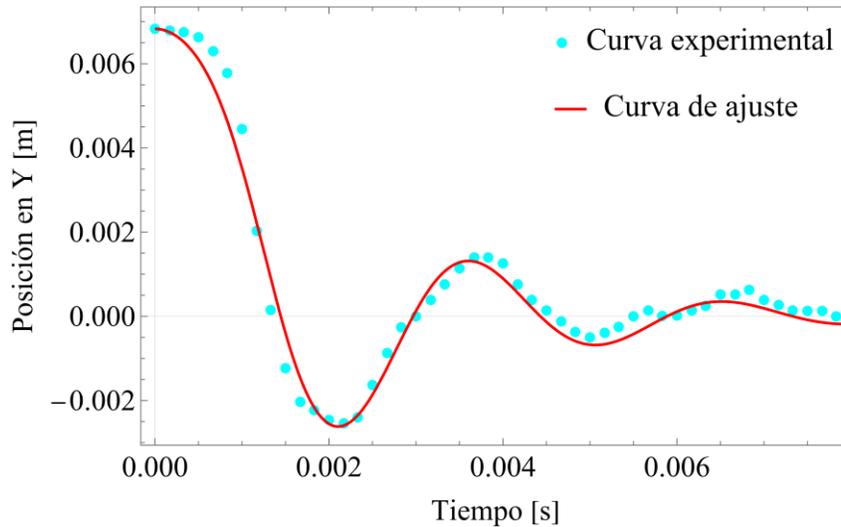


Figura 83. Comparación entre la curva de datos experimentales de la evolución temporal de la posición en el eje Y de la punta de la pinza y la curva de ajuste dado un modelo de masa-resorte-amortiguador no lineal, considerando un resorte “duro”.

Como se puede observar en la figura anterior la curva de ajuste obtenida al considerar un modelo no lineal mejora significativamente en comparación con la curva obtenida al considerar el modelo propuesto en la ecuación 14. Esto se hace evidente al confirmar que, en el caso del ajuste de la figura 83, el coeficiente de determinación es $R^2 = 97902$ lo cual significa un incremento sustancial en cuanto a la bondad del ajuste obtenida anteriormente.

Como última forma de comprobar el ajuste del modelo se decidió obtener la curva de velocidad por medio de derivar la curva de ajuste de la figura 83, esta curva se comparó con la curva de velocidad experimental obtenida a partir del análisis del vídeo, cómo se muestra en la figura 84.

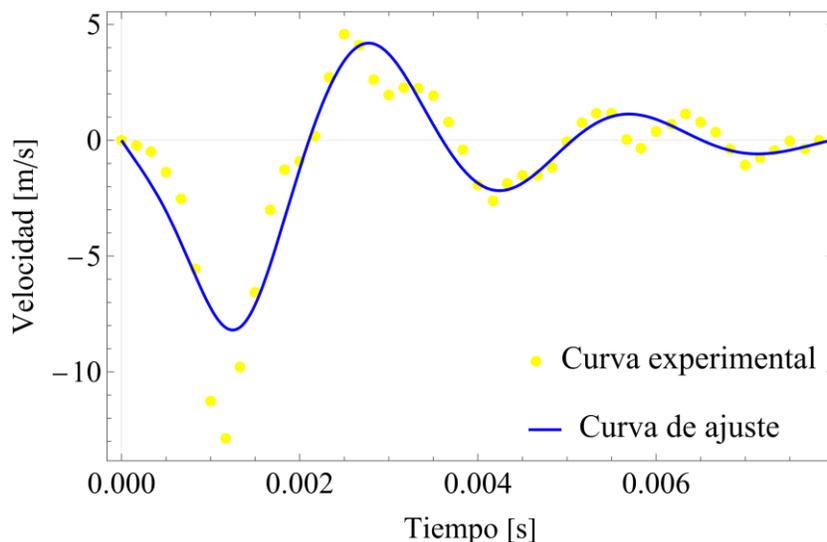


Figura 84. Comparación entre la curva de datos experimentales de la evolución temporal de la velocidad en el eje Y de la punta de la pinza y la derivada de la curva de ajuste dado un modelo de masa-resorte-amortiguador no lineal, considerando un resorte “duro”.

Como se observa en la figura anterior, la curva de velocidad obtenida a través del modelo de ajuste propuesto en la ec. 17 presenta una buena aproximación a la curva de velocidad experimental en forma general, destacando que hay algunas zonas en las que la curva de ajuste no reproduce con fidelidad el comportamiento de los datos experimentales.

Cabe mencionar que este modelo es una primera aproximación para describir la cinemática del cierre de la pinza por lo cual no se consideran otros factores presentes en el fenómeno, como lo es la fuerza de arrastre que experimenta la pinza o el considerar al elemento de amortiguamiento como no lineal, sin embargo, esto supera los alcances de este documento y es sugerido como trabajo a futuro.

6.3.2 Formación de estructuras y patrones de cavitación hidrodinámica.

Para realizar el estudio del flujo y de las diversas estructuras que se presentan a lo largo del proceso de cierre de la pinza, se realizó un análisis, cuadro a cuadro, de los vídeos capturados en el proceso de experimentación descrito anteriormente. Cabe recordar que estos vídeos fueron capturados a una tasa de muestreo de 6,000 cuadros por segundo, con un tiempo de exposición de 30 $[\mu\text{s}]$ y a una resolución de 1280 x 800. La figura 85 muestra un primer lote de secuencia de imágenes obtenidas de los videos y ordenadas cronológicamente desde la liberación de la pinza superior del mecanismo hasta el cierre total de la pinza en $T = 2.167$ [ms], con un intervalo aproximado de 166.66 $[\mu\text{s}]$ entre cada imagen o cuadro.

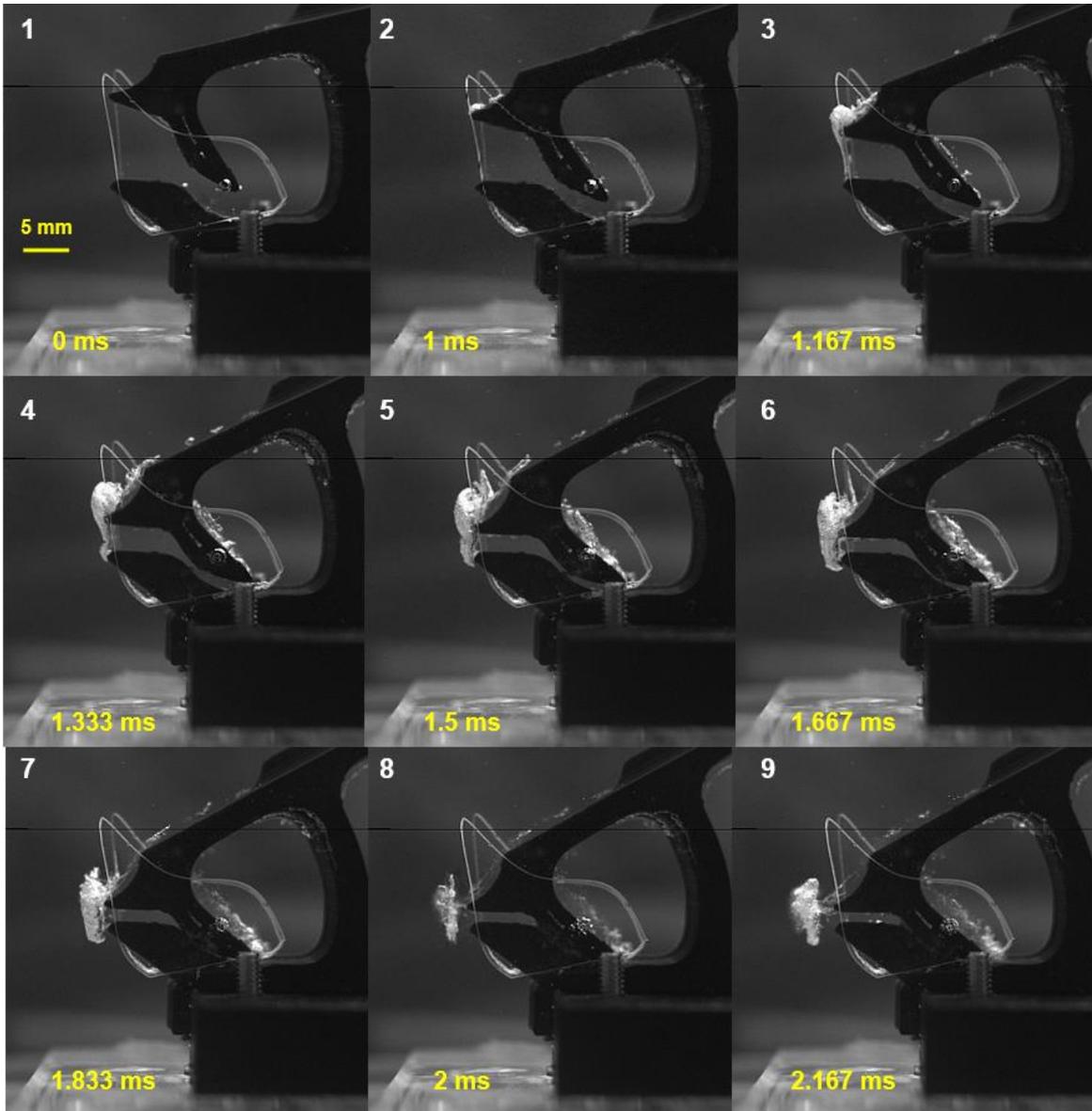


Figura 85. Secuencia de imágenes tomadas de forma lateral por la cámara Phantom a 6,000 C/s de la formación del flujo y de diversas estructuras cavitantes inducidas por el cierre del mecanismo flexible de pinzas en el lapso de $0 \leq t \leq 2.167$ ms.

Si bien los experimentos donde se capturaron la vista frontal y lateral del mecanismo en acción fueron en eventos separados, el banco de pruebas, el muestreo y las condiciones ambientales se mantuvieron constantes. Debido a esto y a que al analizar los vídeos se observó una concordancia entre las estructuras que se generan en cada uno de los instantes en los que ocurre el fenómeno, se puede decir que se tuvo una buena repetibilidad en el experimento y que se puede analizar el fenómeno desde los dos ángulos o vistas. Esto se observa de forma clara al comparar la secuencia

de imágenes mostradas en la figura 85 con la secuencia de imágenes de la figura 86 que representa la secuencia de imágenes capturadas del cierre de la pinza desde una vista frontal. Un ejemplo de ello se observa al comparar la imagen 8 ($t = 2\text{ms}$) de la figura 85 con la imagen 9 ($t = 1.833\text{ ms}$) de la figura 86 donde se observa un primer colapso en el vórtice anular que se forma en las cercanías de la salida del Venturi al momento del cierre de la pinza.

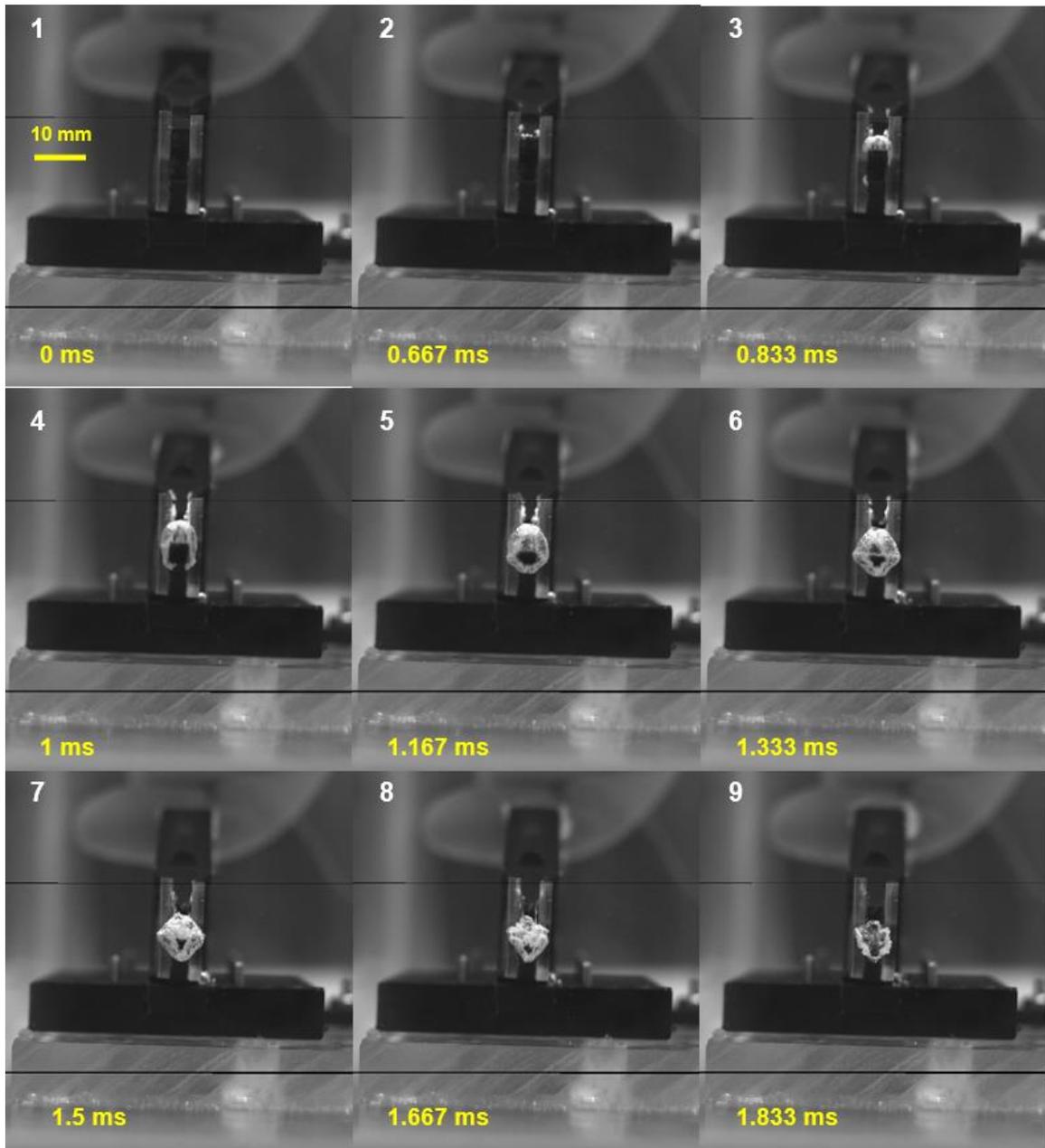


Figura 86. Secuencia de imágenes tomadas de forma frontal por la cámara Phantom a 6,000 C/s de la formación del flujo y de diversas estructuras cavitantes inducidas por el cierre del mecanismo flexible de pinzas en el lapso de $0 \leq t \leq 1.833\text{ ms}$.

La discrepancia o desfase en el instante en el que ocurre la formación de algunas estructuras en cada secuencia de imágenes puede deberse a distintas causas, cómo un retraso en el inicio de la captura del vídeo, ya que la cámara se activó de forma manual por medio de un gatillo, o por la fatiga que presenta la pinza debido a las deformaciones a las que está sometida entre cada accionamiento, sin embargo, las estructuras que se observan en cada uno de los vídeos son muy semejantes.

Formación de cúmulos de burbujas y vórtices de cavitación

Analizando la figura 85 y 86 se observa que a partir de que se inicia el movimiento de la pinza superior, comienza a haber presencia de algunas nubes de burbujas de cavitación en el borde de la punta en $t = 1$ [ms] de la vista lateral y en $t = 0.667$ [ms] de la vista frontal debido a la caída de presión causada por la velocidad del movimiento de cierre, para posteriormente empezar a crecer y girar mientras que la pinza superior continua su movimiento y es en $t = 1.167$ [ms] y $t = 1.333$ [ms] (cuadros 3 y 4) de la vista lateral que se observa la formación de un vórtice en la punta de la pinza superior debido al giro de esta nube de burbujas. En el caso de la vista frontal, en $t = 0.833$ [ms] y $t = 1$ [ms] se empieza a formar un vórtice en los bordes que se tienen entre las paredes laterales y las pinzas en el momento de cierre por lo cual este vórtice adquiere una forma cuadrada. Cabe mencionar que no se descarta que la presencia de estas burbujas al inicio del movimiento de la pinza superior puede ser ocasionadas debido a la porosidad que presenta el material del prototipo, así como a la circulación de flujo entre las capas de extrusión, sin embargo, la presencia de estas burbujas pueden servir como puntos de nucleación para la generación de la nube de burbujas de cavitación y la posterior formación del vórtice. El proceso descrito anteriormente puede observarse de mejor forma en la figura 87.

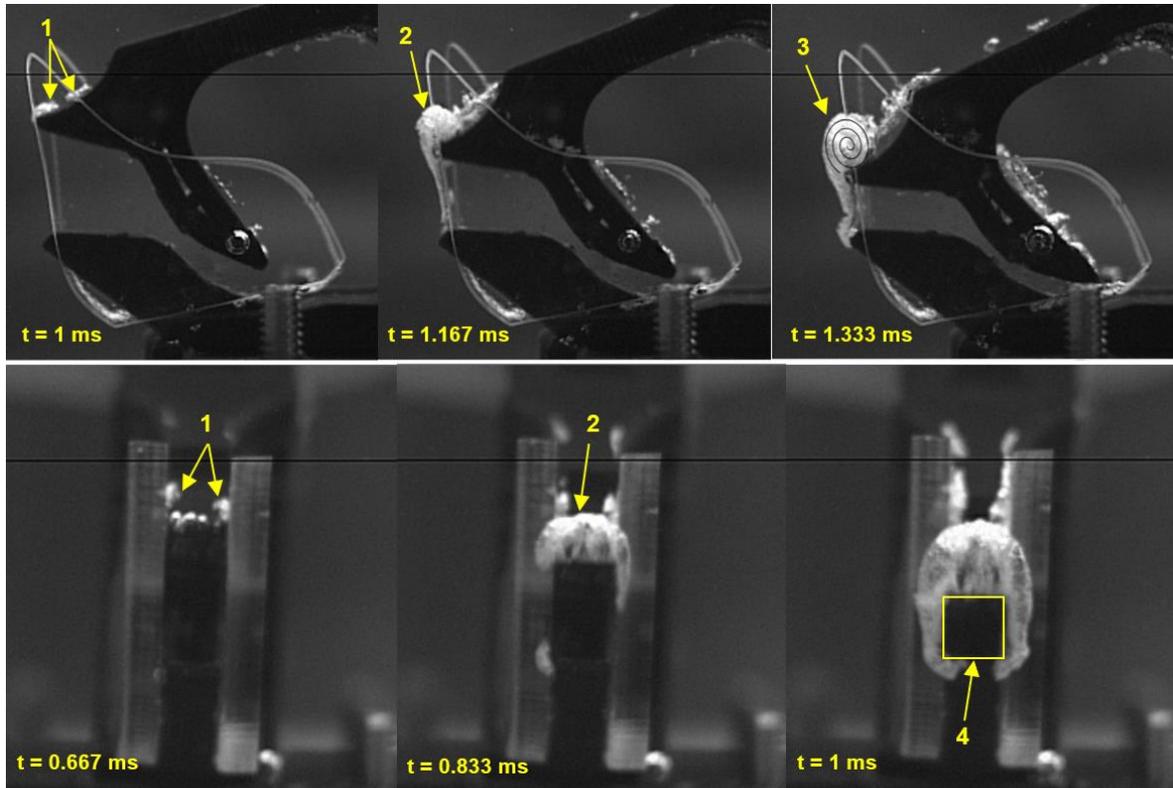


Figura 87. Secuencia de imágenes de la formación de estructuras cavitantes en la punta de la pinza superior desde una vista lateral (arriba) y frontal (abajo). 1) Generación de nubes de burbujas, 2) Crecimiento de la nube de burbujas, 3) Formación de vórtice en la punta debido al giro de la nube de burbujas, 4) Presencia de vórtices cuadrados debido la sección transversal del Venturi que se forma al momento del cierre de la pinza.

Posteriormente, cuando se empieza a reducir el volumen debido al cierre de la pinza, entre $t = 1.333$ y $t = 1.667$ para el caso de la vista lateral, una gran porción de agua es expelida hacia la salida del Venturi, la velocidad del flujo que se presenta en la garganta de Venturi debido a esta expulsión de agua fue determinada a partir de seguir el desplazamiento de una burbuja que se encontraba en la pared perteneciente a la parte superior del Venturi, la velocidad máxima registrada fue en el orden de 12.8 [m/s] . Cabe resalta que el seguimiento de esta burbuja es sólo una forma indirecta para conocer el orden de magnitud de la velocidad del flujo dentro del Venturi y cerca de sus bordes, sin embargo, la velocidad máxima real podría presentar una magnitud mayor en el centro del flujo.

En el momento en el que el flujo pasa por la zona de divergencia del Venturi se induce la formación de un vórtice anular o toroidal de cavitación en los alrededores del flujo debido a la fricción viscosa que se tiene entre el flujo y el fluido estático que se encuentra a la salida del Venturi, los efectos de cavitación que se presentan en este vórtice son ocasionados por la caída de presión (o

despresurización) que se presenta entre el borde y el centro o núcleo del vórtice la cual ronda el orden de los 10^5 [Pa] [46]. La figura 88 muestra el proceso de formación y posterior colapso de este vórtice anular desde una vista lateral a la pinza. En $t = 1.5$ [ms] se observa la presencia de dos lóbulos o cúmulos de burbujas en la parte superior e inferior de la salida del Venturi, se infiere que dentro de estos cúmulos se encuentra, considerando un corte Transversal al anillo, dos vórtices contrarrotantes (ver figura 89), posteriormente, en $t = 1.667$ [ms] se muestra la estructura de anillo completamente formada con un diámetro de aproximadamente 10.5 [mm] y en $t = 1.833$ [ms] se observa la separación del vórtice anular de la salida del Venturi y su movimiento en dirección del flujo a una velocidad máxima de 8.1 [m/s] para posteriormente tener un primer colapso, en $t = 2$ [ms], de las burbujas de cavitación debido al aumento de la presión a las afueras del Venturi. A partir de la velocidad del vórtice anular y tomando como base lo reportado por Koukouvinis et al. [46] sobre que la velocidad de traslación de vórtice anular es aproximadamente la mitad de la velocidad del flujo, así como el cálculo de la velocidad de flujo a partir del seguimiento de una burbuja en la garganta del Venturi, podemos estimar una velocidad de flujo en un intervalo de entre 12.8 y 16.2 [m/s]. Cabe resaltar que a lo largo del cierre de la pinza se observa la generación de un gran cúmulo de burbujas en la parte posterior del émbolo de la pinza superior debido a la alta velocidad de cierre del mecanismo.

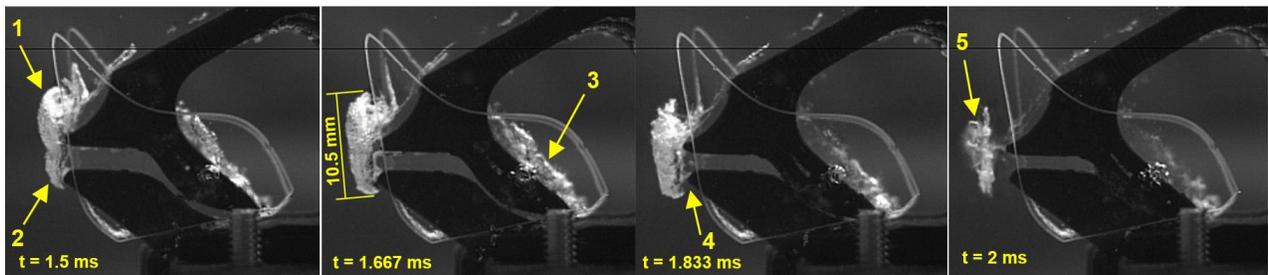


Figura 88. Proceso de formación y colapso del vórtice anular de cavitación debido al cierre súbito de la pinza superior desde una vista lateral. 1) Lóbulo de burbujas superior, 2) Lóbulo de burbujas inferior, 3) Presencia de cúmulos de burbujas en la parte posterior del émbolo, 4) Separación y movimiento del vórtice anular, 5) Primer colapso de las burbujas cavitantes.

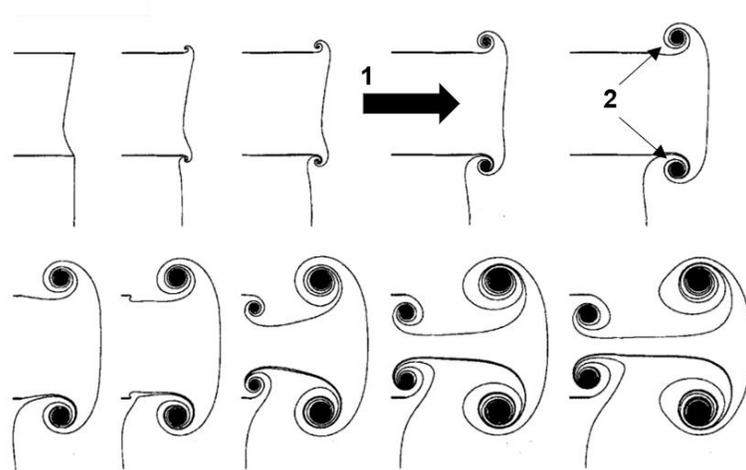


Figura 89. Representación del flujo en la formación de un vórtice anular. 1) Dirección del flujo, 2) Vórtices contrarrotantes [47].

La formación de este vórtice anular también se puede analizar desde una vista frontal, este proceso se muestra en la figura 90. Como se mencionó anteriormente la formación del vórtice comienza adquiriendo la forma del canal del Venturi por el que sale el flujo en $t = 1$ [ms]. Posteriormente el vórtice comienza su crecimiento y separación de la salida del Venturi en $t = 1.333$ [ms], es en este momento que inicia su movimiento en dirección del flujo. Cabe notar que en el momento que se desprende el vórtice su forma comienza a cambiar, pasando a ser más elongada, asemejándose a un rombo, esto debido a una transición entre la forma cuadrada que tiene en un inicio hacia una forma de toroidal característica de este tipo de vórtices, además, según Koukouvini et al. [46] también es debida al campo de flujo asimétrico producido por el movimiento de la pinza superior al momento de cierre. Finalmente, en $t = 1.667$ [ms] las burbujas de cavitación contenidas en el vórtice colapsan para dejar a la vista la forma toroidal del vórtice anular en 1.833 [ms].

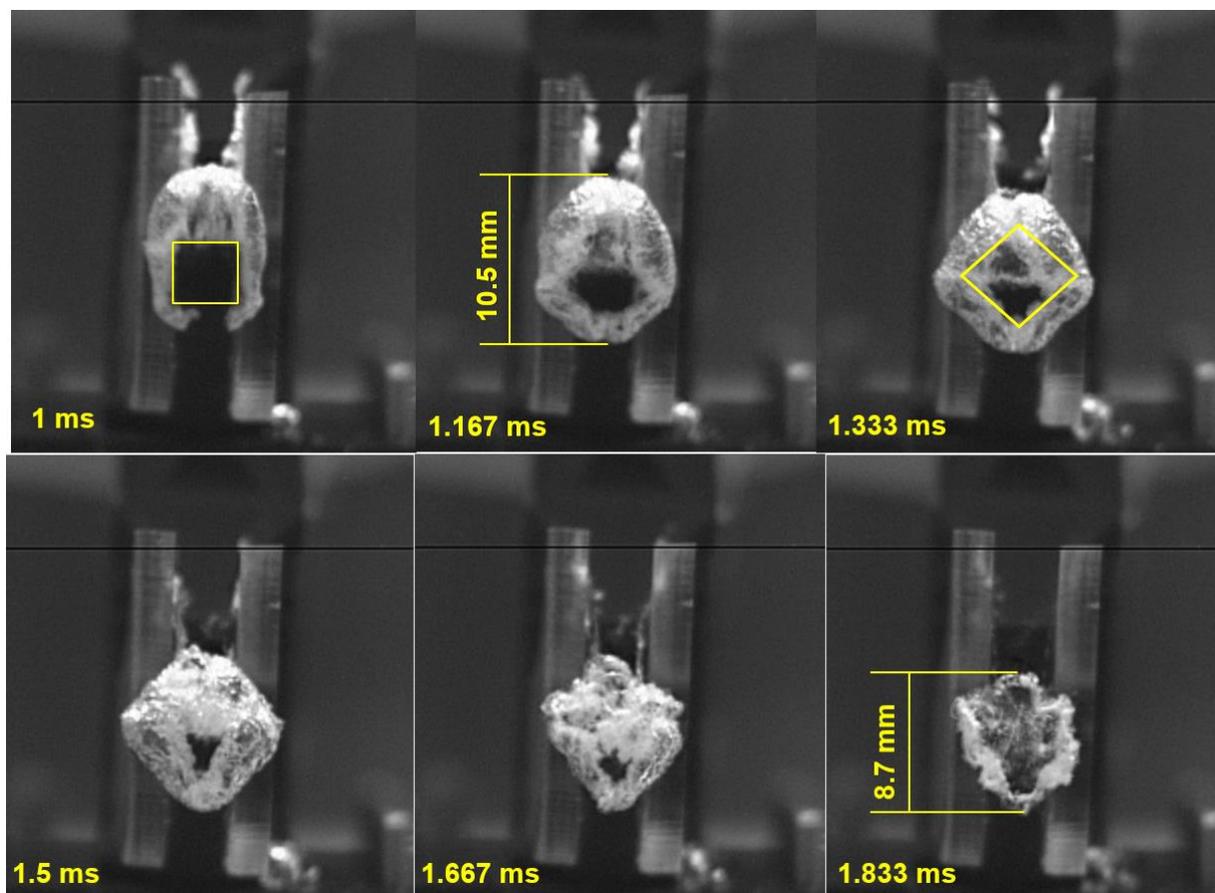


Figura 90. Proceso de formación y colapso del vórtice anular de cavitación debido al cierre súbito de la pinza superior desde una vista frontal.

La secuencia de imágenes mostradas en la figura 90 pueden ser comparadas con las estructuras predichas por la simulación en CFD realizada en 2017 por Koukouvinis et al. [46] del proceso de cierre de la pinza desarrollada por Hess et al. [3] (ver figura 91), sin embargo, en esta simulación el prototipo fue escalado a las dimensiones de una pinza real de camarón pistola y a una velocidad angular máxima de cierre de 7,000 [rad/s] para tratar de reproducir el tiempo de cierre de un espécimen real, en este caso el tiempo de cierre para la simulación fue de 0.3 [ms].

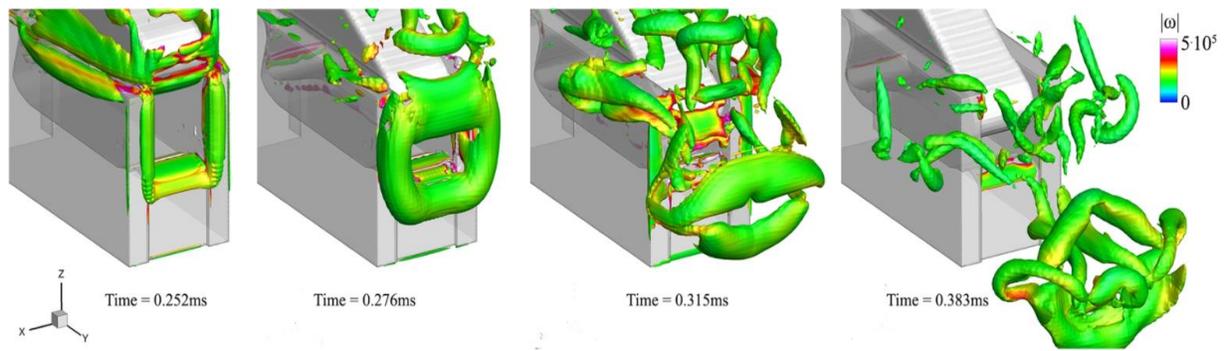


Figura 91. Simulación numérica en CFD del proceso de cierre de un modelo de pinzas con base en el prototipo desarrollado por Hess et al. [3]. El mapa de colores representa la magnitud de vorticidad que se presenta en las estructuras de cavitación generadas por el cierre de la pinza.

Evolución del vórtice anular y flujo reentrante.

A partir del primer colapso de las burbujas de cavitación presentes en el vórtice anular se presenta un proceso oscilante de expansión de estas burbujas y su posterior colapso. Este proceso de colapso – expansión se presenta alrededor de tres veces (ver figura 92) y está relacionado con la conservación del momento angular, ya que, para vórtices cilíndricos o toroidales, la circulación actúa de cierta forma como un resorte no lineal, evitando el colapso completo del anillo ya que la fuerza centrífuga del vórtice tiende a aumentar su tamaño lo que produce su expansión [46], es decir, al momento de colapsar las burbujas se producen fuerzas que comprimen o compactan el anillo, debido a esta compresión el momento angular del vórtice se tiene que conservar por lo cual este tiende a rotar más rápido y a generar una fuerza centrífuga que expande aparentemente el anillo, además, debido al aumento en la velocidad del vórtice la presión cae localmente por debajo de la presión de vapor con lo cual se propicia de nuevo la formación de burbujas de cavitación repitiéndose el proceso.

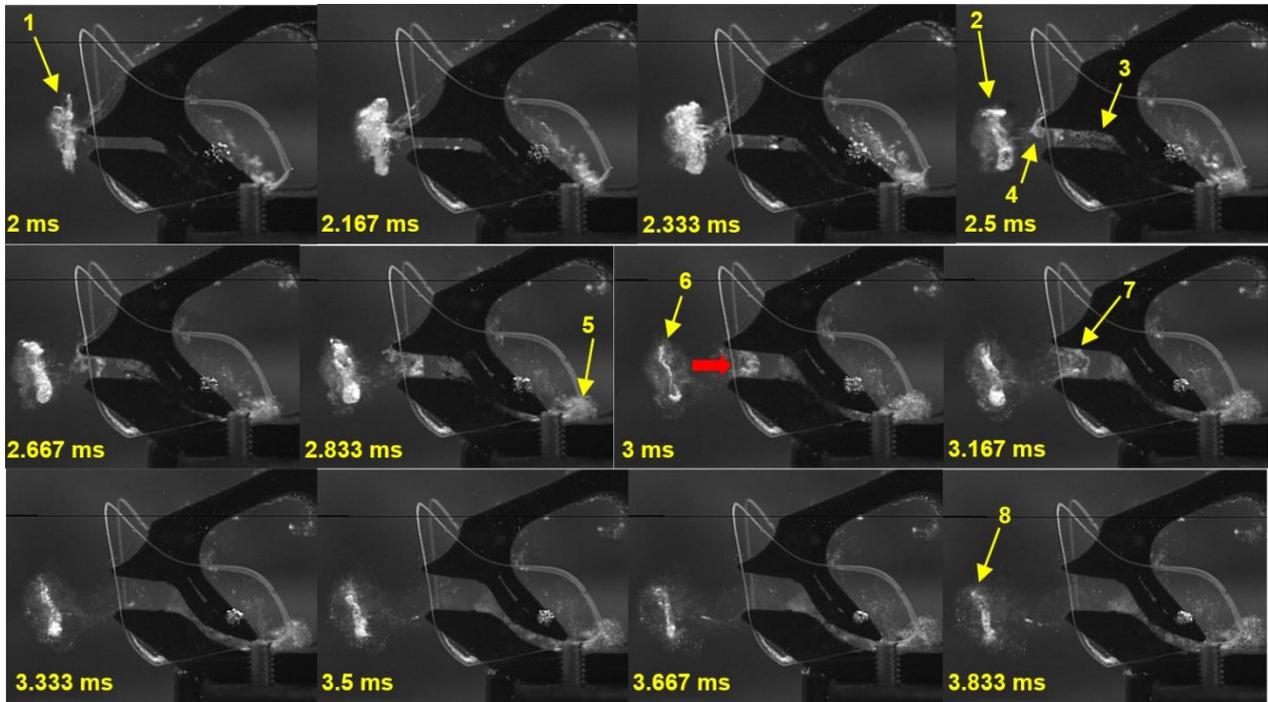


Figura 92. Vista lateral del proceso de colapso y regeneración del vórtice anular de cavitación. 1) Primer Colapso aparente, 2) Segundo Colapso aparente, 3) Presencia de cúmulos de burbujas de cavitación, 4) Formación de vórtices de menor tamaño, 5) Expulsión de nubes de burbujas, 6) Tercer colapso aparente, 7) Flujo reentrante, 8) Degradación del vórtice anular.

Como se observa en la figura anterior, este proceso se va degradando a partir del tercer colapso aparente ($t = 3 \text{ ms}$), ya que en el momento de la regeneración la velocidad del flujo así como la velocidad angular del vórtice no son lo suficientemente altas para propiciar una caída en la presión local que genere burbujas de cavitación y que posteriormente puedan colapsar por lo cual el vórtice anular se traslada libremente por el fluido y se va desintegrando a medida que va perdiendo energía hasta desaparecer. Este proceso también se puede observar al analizar el video tomado frontalmente, como se muestra en la secuencia de imágenes de la figura 93.

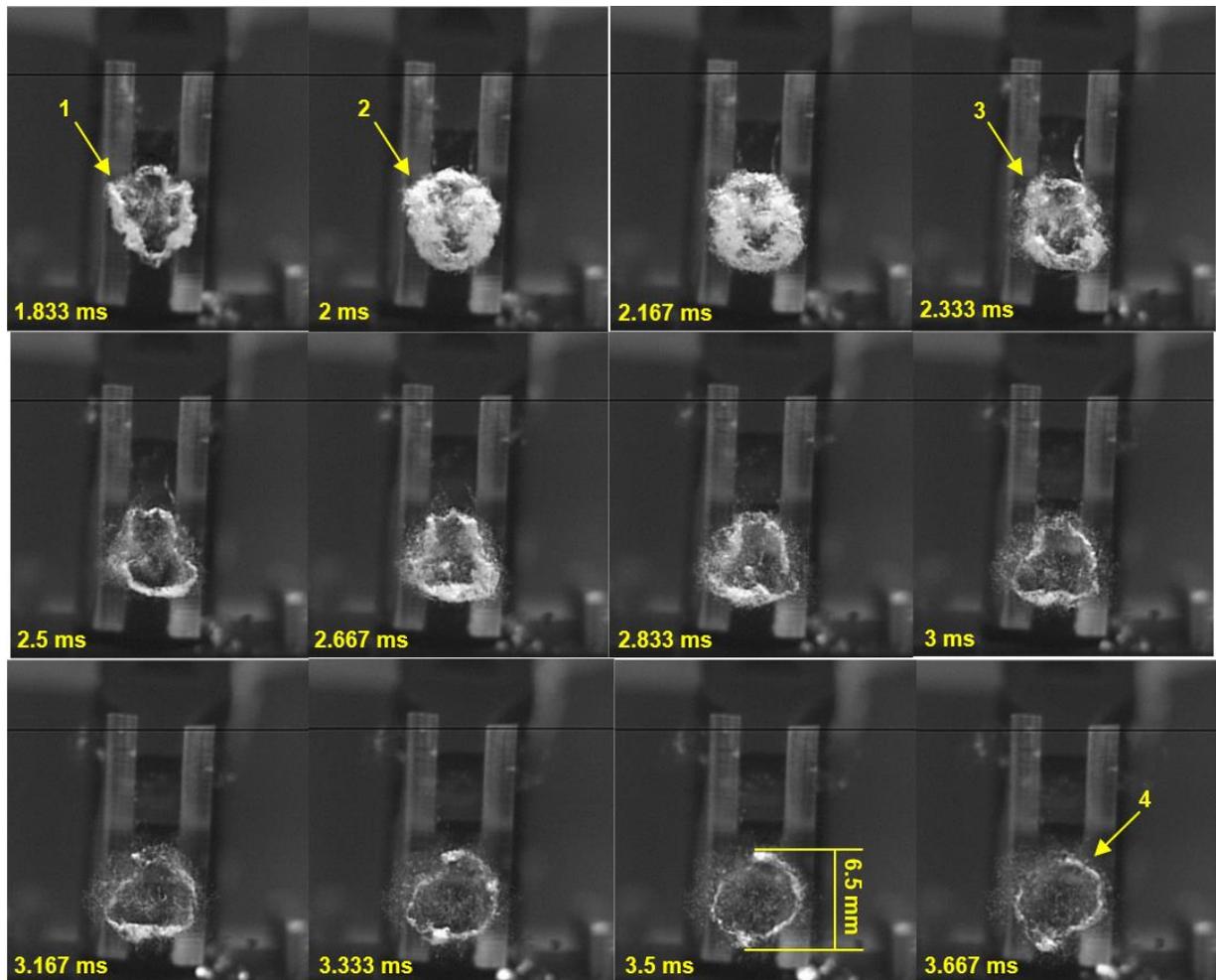


Figura 93. Vista frontal del proceso de colapso y regeneración del vórtice anular de cavitación. 1) Primer Colapso aparente, 2) Regeneración del vórtice anular, 3) Segundo colapso aparente, 4) Vórtice anular simple.

Cabe mencionar, que además del proceso de colapso – regeneración, en la secuencia de imágenes de la figura 92 se pueden observar otros fenómenos que son interesantes de analizar. El primero de ellos es la presencia de una gran cantidad de aparentemente cavidades o burbujas de cavitación que van desde la garganta del Venturi y que son expulsadas en la salida que se forma entre el émbolo de la pinza superior y la cavidad fija de la pinza inferior. Estas burbujas son producidas propiamente por la caída de la presión local ocurrida a lo largo del Venturi y son arrastradas hacia la salida inferior o aguas abajo por un flujo reentrante que se genera unos instantes después del retroceso o rebote de la pinza y que se cree que es causado por la diferencia de presiones que se tiene entre el fluido en los alrededores de la salida del Venturi (presión alta) y el fluido dentro de la garganta del Venturi (presión baja) semejante a un efecto vació y por lo cual se forma un flujo en dirección opuesta al que se genera al momento de la salida del Venturi.

Para complementar y resumir la secuencia de imágenes captadas a partir de los vídeos, en la figura 94 se muestra la evolución de la posición y orientación del vórtice anular a lo largo del tiempo, esta posición se determinó colocando rectas discontinuas orientadas de extremo a extremo de la máxima longitud que se observa del anillo en cada instante, tomándose registro cada 0.333 [ms]. Además de esto, se señalan los momentos en los que ocurren los diferentes cambios drásticos de forma del anillo provenientes de la implosión de las burbujas de cavitación.

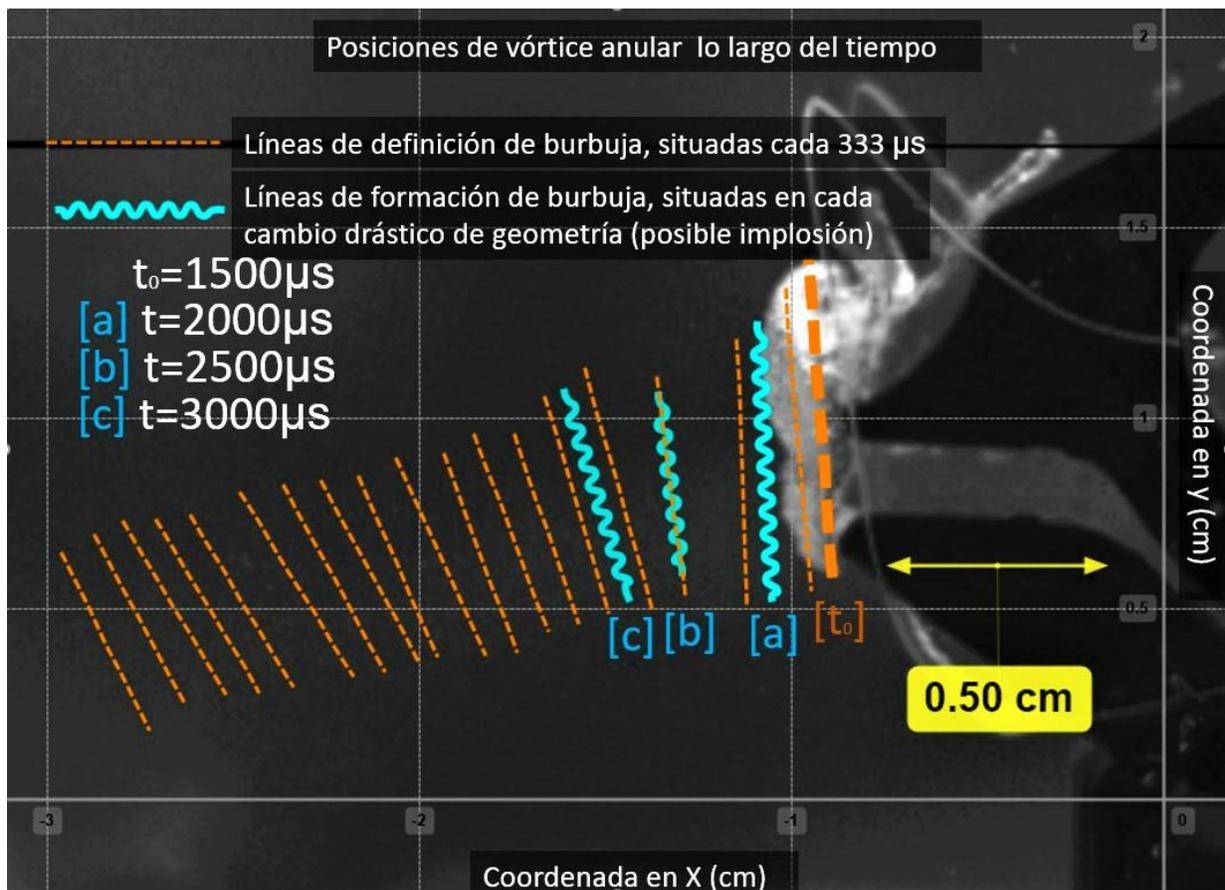


Figura 94. Evolución temporal de la posición y orientación del Vórtice anular de cavitación.

Como se puede notar en la figura anterior, existe una desviación en la dirección de movimiento del vórtice anular, y consecuentemente del flujo, debido al impulso hacia abajo que provoca la pinza superior al líquido circundante al momento de cierre del mecanismo.

A partir del análisis cualitativo de resultados descritos anteriormente, así como su comparación con los resultados obtenidos por la simulación numérica realizada por Koukouvinis et al. [46], se

puede intuir la presencia de diversas estructuras de cavitación hidrodinámica dentro y fuera del Venturi del mecanismo flexible, así como la formación de un vórtice anular que se desplaza en dirección del flujo bifásico (líquido – vapor) expelido por el cierre súbito de la pinza superior.

6.3.3 Deformación plástica de la pinza.

Una vez terminada la experimentación y validación del prototipo funcional se pudo notar algunas evidencias de la deformación plástica a la que está sometida la pinza debido a la concentración de esfuerzos en algunas zonas del mecanismo que superan el esfuerzo de cedencia a flexión del material. Estas evidencias se muestran por medio de líneas o surcos de color blanquecino que aparecen en la superficie del prototipo, como se muestra en la figura 95.

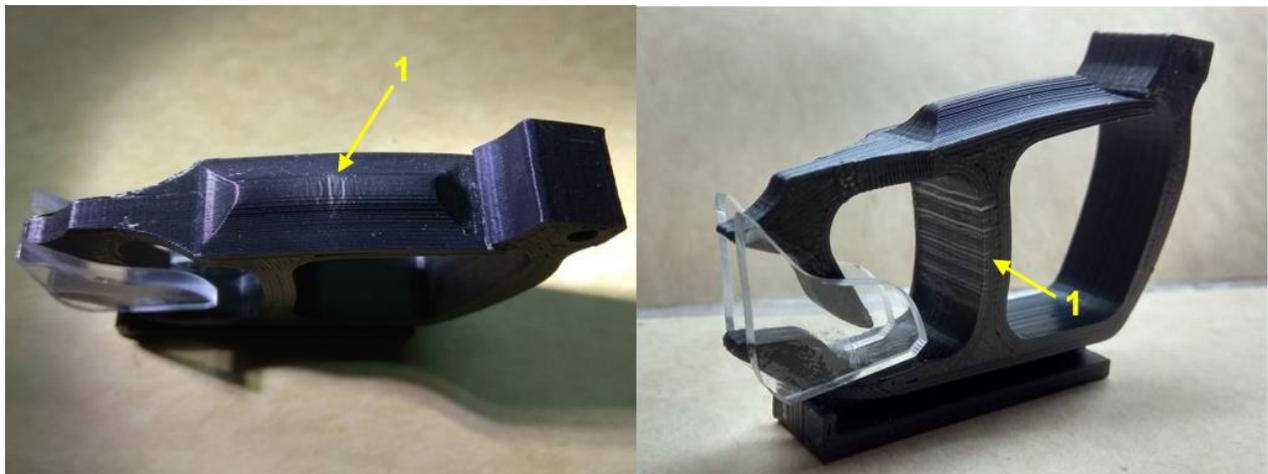


Figura 95. Presencia de deformación plástica en diferentes zonas del mecanismo flexible de pinzas después de su accionamiento repetido. 1) Surcos superficiales.

Como se observa en la figura anterior las zonas en dónde se presentan los surcos en la superficie del mecanismo coinciden con las zonas en dónde se tiene una mayor concentración de esfuerzos obtenidas a partir del análisis de esfuerzos realizado anteriormente (ver figura 66), la magnitud del esfuerzo máximo presente en esta zona (117.5 [MPa]) sobrepasa el esfuerzo de cedencia a la flexión del ABS (72.7 [MPa]) por lo cual se tiene una deformación plástica inducida por la carga del mecanismo. Esto se confirmó ya que se observa que la separación entre la pinza superior y la pinza inferior es su posición de cierre va aumentando a medida que se carga y se libera la pinza en repetidas ocasiones. Si bien, la dirección en dónde se tiene este esfuerzo máximo no se da en una dirección

que provoque la separación de capas del material de la pieza, la deformación plástica que se tiene ocasiona una reducción en la energía de deformación elástica que se puede almacenar en la carga del mecanismo y consecuentemente provoca que a liberar la pinza, el cierre de la pinza superior no sea tan energético disminuyendo las probabilidades de generar cavitación hidrodinámica y comprometiendo la vida útil del mecanismo.

6.4 Caracterización del flujo

A partir de las mediciones realizadas por medio del análisis de los videos capturados, así como de las condiciones ambientales, propiedades del fluido, así como la geometría de la pinza se pueden calcular intervalos del valor del número de Reynolds y el número de cavitación con los cuales se puede caracterizar el flujo.

Para el caso del Número de Reynolds (ver ec. 5) se tomó la densidad del agua con un valor de $\rho = 998 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$, la viscosidad dinámica $\mu = 1.0 \times 10^{-3} \text{ [Kg/m}\cdot\text{s]}$ y una longitud característica establecida como la longitud total del medio Venturi inferior igual a $L = 8.4 \times 10^{-3} \text{ [m]}$, cabe mencionar que esta longitud difiere con la registrada en la tabla 13 debido a que, como se mencionó anteriormente, el prototipo experimental fue fabricado con una reducción de aproximadamente el 20% con respecto al tamaño del modelo en CAD el diseño definitivo del mecanismo flexible de pinzas (ver figura 56). Por último, dado que se infiere que la magnitud de la velocidad del flujo tiene un valor de entre 12.8 y 16.2 [m/s], se decidió tomar el valor medio de este intervalo, es decir, $V \cong 14.5 \text{ [m/s]}$.

Sustituyendo los valores anteriormente mencionados en la ec. 5, se tiene que:

$$Re \cong \frac{(1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3})(14.5 \frac{\text{m}}{\text{s}})(8.4 \times 10^{-3} \text{ [m]})}{1.0 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}} \cong 121,800$$

Dado que $Re \cong 121,800 \gg 4,000$ evidentemente se tiene un régimen de flujo turbulento.

Para el cálculo del Número de Cavitación (ver ec. 9) se consideró una presión de vapor (P_v) de aproximadamente 2,838 [Pa] [7], además, una Presión de descarga o absoluta (P_{abs}) de 79,042.4 [Pa]. Esta presión absoluta se consideró como la suma de la presión atmosférica registrada al

momento del experimento ($P_{atm} = 78,260$ [Pa]) más la presión ejercida por la columna de agua que se tiene sobre la punta de la pinza del mecanismo ($P_{man} = 782.4$ [Pa]).

Sustituyendo valores en la ec. 9 se tiene un número de cavitación aproximadamente de:

$$Ca \cong \frac{2(79,042.4 [Pa] - 2,838 [Pa])}{\left(1000 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]\right) \left(14.5 \left[\frac{m}{s}\right]\right)^2} \cong 0.725$$

A partir de este valor del número de cavitación ($Ca \cong 0.725 < 1$) se puede inferir de forma cuantitativa la presencia de cavitación hidrodinámica durante el proceso de cierre súbito de la pinza superior del mecanismo flexible lo cual coincide con las observaciones realizadas en los experimentos.

Por último, se introduce el número de Strouhal, el cuál es un número adimensional que representa una escala de tiempo del proceso de cierre de la pinza [3]. Este número se usa comúnmente en el estudio de flujos oscilatorios y periódicos permitiendo caracterizar la frecuencia de generación y desprendimiento de vórtices [6]. Este número viene dado según la siguiente ecuación:

$$Sr = \frac{L}{T \cdot V} \quad (18)$$

Donde:

L = Longitud Característica.

T = Tiempo de cierre de la pinza.

V = Velocidad de flujo.

Sustituyendo valores en la ec. 18 y considerando que para nuestro caso $T = 2.167 \times 10^{-3}$ [s], se tiene que el nuestro número de Strouhal es:

$$Sr \cong \frac{8.4 \times 10^{-3} [m]}{(2.167 \times 10^{-3} [s]) \left(14.5 \left[\frac{m}{s}\right]\right)} \cong 0.267$$

En general, se reconoce que el valor del número de Strouhal para un flujo de cavitación desarrollado se encuentra en el rango de entre 0.2 y 0.5 lo que coloca al valor obtenido en los rangos esperados según la literatura [48].

En la tabla 22 se muestra una comparación entre los números adimensionales y algunos parámetros que caracterizan el flujo inducido por el cierre súbito del mecanismo flexible de pinzas, con los producidos por un espécimen real de camarón pistola (*Alpheus heterochaelis*) registrados por Versluis et. al. [1] así como los producidos por el prototipo de referencia desarrollado por Godínez et. al [4].

Tabla 22. Comparación entre parámetros y números adimensionales registrados por diferentes mecanismos o dispositivo de cierre súbito de pinzas. Los datos de la primer y segunda columna fueron obtenidos de [3] y [4], respectivamente.

Parámetro	Alpheus heterochaelis [1]	Mecanismo rígido desarrollado por Godínez et. al. [4]	Mecanismo flexible
Geometría (L)	$\cong 1.41$ [mm]	$\cong 22.31$ [mm]	$\cong 8.4$ [mm]
Densidad (ρ)	$\cong 1,000$ [Kg/m ³]	$\cong 1,000$ [Kg/m ³]	$\cong 1,000$ [Kg/m ³]
Viscosidad dinámica (μ)	$\cong 0.001$ [Kg/m·s]	$\cong 0.001$ [Kg/m·s]	$\cong 0.001$ [Kg/m·s]
Presión de Vapor (Pv)	$\cong 2,000$ [Pa]	$\cong 2,333$ [Pa]	$\cong 2,838$ [Pa]
Tiempo de cierre (T)	$\cong 0.5$ [ms]	$\cong 9$ [ms]	$\cong 2.167$ [ms]
Velocidad de flujo (V)	$\cong 17$ [m/s]	$\cong 14.5$ [m/s]	$\cong 14.5$ [m/s]
Número de Reynolds (Re _L)	$\cong 24,000$	$\cong 323,495$	$\cong 121,800$
Número de Cavitación (Ca)	$\cong 0.685$	$\cong 0.732$	$\cong 0.725$
Número de Strouhal (Sr)	$\cong 0.17$	$\cong 0.17$	$\cong 0.267$

Cómo se puede ver en la tabla anterior, la velocidad de flujo tanto del mecanismo de referencia como del mecanismo flexible son iguales lo que ocasiona que parámetros adimensionales como el número de cavitación o como el número de Strouhal sean muy similares a pesar de parámetros como la longitud característica o el tiempo de cierre disten unos de otros.

6.5 Especificaciones finales

Para finalizar, en la tabla 23 se muestra un resumen de las especificaciones finales del prototipo funcional fabricado del mecanismo flexible de pinzas y se contrastan con las especificaciones objetivo planteadas en el inicio del proceso de diseño por medio de una lista de métricas (ver tabla 6).

Tabla 23. Comparación entre las especificaciones objetivo y las especificaciones finales del prototipo de pinzas de cierre súbito por medio de una lista de métricas.

No. De métrica	Métrica	Importancia relativa	Unidad	Rango de valores esperados.	Valores Obtenidos
1	Número de cavitación	3	Adim.	<1	0.725
2	Longitud del prototipo.	3	cm	≤ 5	6.27
3	Ancho del prototipo.	3	cm	≤ 5	4.55
4	Altura del prototipo.	3	cm	≤ 5	1.28
5	Velocidad del flujo.	2	m/s	≥ 12.5	~ 14.5
6	Tiempo de cierre de la pinza.	2	ms	0.5 – 9	~ 2.167
7	Peso total del prototipo.	1	g	≤ 100	~ 15

CONCLUSIONES

A partir del análisis de resultados realizado se puede concluir que el diseño del mecanismo flexible de pinzas fue un éxito ya que se tiene evidencia experimental que el proceso de cierre súbito del prototipo fue lo suficientemente rápido para producir cavitación hidrodinámica. Se registró un tiempo de cierre de las pinzas de aproximadamente 2 [ms] el cual produjo un flujo bifásico con velocidades de entre 12 y 16 [m/s], lo cual, dadas las condiciones del medio, hace que se tengan números de cavitación menores a la unidad con lo cual se infiere la presencia de cavitación hidrodinámica. De igual manera, se observó la presencia de estructuras características de un flujo cavitante como la formación y el aparente colapso de cúmulos de burbujas dentro y fuera del Venturi. Asimismo, se generaron vórtices anulares de cavitación, cuya formación y comportamiento dinámico coinciden con predicciones de simulaciones numéricas del proceso de cierre de un prototipo similar.

Por otro lado, la realización de las pruebas experimentales presentó algunas dificultades ya que se llevaron a cabo en un ambiente en dónde no se tenía el suficiente control del fenómeno y del entorno, lo que pudo afectar los resultados obtenidos. Asimismo, si bien la tasa de cuadros de captura de video fue adecuada para la observación de las estructuras de cavitación fue insuficiente para observar por completo su proceso de formación, evolución y colapso debido a que estos fenómenos se desarrollan por debajo de las milésimas de segundo, perdiéndose así información detallada del proceso y reduciendo la precisión en la medición y el cálculo de parámetros importantes. Adicionalmente, se observó la presencia de deformación plástica en algunas zonas del prototipo debido a los esfuerzos a los que fue sometido al momento de ser cargado, lo que dificultó la repetibilidad de los experimentos y con ello la ausencia de una estadística adecuada

Es importante mencionar que la mayoría de los valores esperados para cada una de las métricas de las especificaciones objetivo fueron cumplidos, además de esto, las dimensiones del prototipo final conducen a una reducción de tamaño del 80.24% con respecto al volumen que ocupa el prototipo de referencia seleccionado, con la ventaja de que el prototipo fabricado presenta una reducción significativa de partes y peso sin perder la capacidad de producir cavitación hidrodinámica.

Para finalizar, nuestro prototipo, al ser un mecanismo flexible, presenta la capacidad de ser miniaturizado a escalas muy pequeñas utilizando distintos equipos de manufactura aditiva sin perder características físicas importantes, lo que en combinación con el uso de materiales con mejores propiedades mecánicas y un método de activación remota podría propiciar su aplicación en diversos procedimientos biomédicos e industriales, como la litotricia o la limpia y purificación de agua, así como en la investigación de diversos fenómenos físicos de interés científico como el estudio de vórtices anulares de cavitación y el desarrollo de microventuris para la creación de microflujos cavitantes.

TRABAJO A FUTURO

Como parte del trabajo a futuro se proponen las actividades siguientes:

- Realizar un rediseño del prototipo con el objetivo de disminuir la concentración de esfuerzos presentes en el mecanismo ya que, como se mostró anteriormente, existen algunas zonas donde la magnitud de los esfuerzos sobrepasa el esfuerzo de cedencia a flexión del material ocasionando deformación plástica lo que compromete el funcionamiento adecuado del mecanismo después de algunas activaciones. Aunado a esto, también es recomendable hacer un análisis de fatiga para conocer como repercute la aplicación cíclica de estos esfuerzos en la vida útil del mecanismo.
- Experimentar con distintos materiales y técnicas de Manufactura Aditiva como la inyección de aglutinantes (binder jetting), deposición por energía dirigida (directed energy deposition) o laminación de hojas (sheet lamination), así como otros procesos de manufactura como corte láser, corte con chorro de agua, inyección de plásticos, mecanizado, etc. Con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas (resiliencia, rigidez, resistencia a flexión), reducir las irregularidades (porosidad, anisotropía) así como disminuir los defectos geométricos y la presencia de rebaba al momento de manufacturar prototipos de menores dimensiones.
- Realizar simulaciones numéricas de la dinámica de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) y de la interacción fluido – estructura, considerando la geometría y los parámetros de nuestro diseño para tratar de reproducir y describir la dinámica del flujo presente dentro y fuera del Venturi y con ello predecir las estructuras que se forman debido al cierre de la pinza, así

como obtener el campo de presiones y velocidades y algunos otros parámetros importantes como la vorticidad y la circulación en algunas zonas del flujo, principalmente en la formación de los vórtices anulares.

- Realizar ensayos en un ambiente de laboratorio para poder tener un mejor control de las condiciones del entorno considerando una mejor iluminación y una mayor estabilidad en el banco de pruebas. Asimismo, se recomienda grabar los experimentos a una tasa de cuadros mayor ($>40,000$ [fps]) ya que al grabar a $6,000$ [fps] se perdió mucha información de lo que ocurre en el fenómeno entre cada cuadro. Además de esto, el aplicar técnicas como la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV, por sus siglas en inglés) o el uso de herramientas como hidrófonos serían de gran ayuda para calcular velocidades y señales de presión y con esto caracterizar de mejor forma el flujo presente, así como validar los resultados obtenidos con las simulaciones numéricas. Por último, es importante reproducir los experimentos varias veces para poder construir una matriz experimental y con ello poder realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos.
- Con base en las mediciones realizadas en los experimentos se pretende mejorar el modelo matemático propuesto al considerar agregar algunos términos importantes, como el arrastre que sufre la pinza debido a su movimiento en el agua, para poder describir de mejor forma la cinemática del cierre súbito y con ello poder vislumbrar alguna relación entre la velocidad del cierre de la pinza con la velocidad del flujo, o la influencia del material del prototipo en el tiempo de cierre de la pinza. Asimismo, los resultados experimentales referentes al flujo se podrían comparar con la ecuación de Rayleigh-Plesset de la dinámica radial de nubes para poder proponer un modelo que describa el fenómeno que se presenta tanto dentro como fuera del Venturi a partir del momento de cierre de la pinza.
- Realizar pruebas experimentales del prototipo de pinzas utilizando diferentes fluidos newtonianos y no newtonianos empleados en algunos procesos biomédicos e industriales para observar cómo se comporta el proceso de cierre y la cavitación en estos medios.
- Realizar un análisis teórico y experimental de escalamiento de los parámetros y propiedades del cierre de mecanismos miniatura para poder comprender que efectos físicos (arrastre, esfuerzos de flexión, velocidad de cierre, etc.) tienen más relevancia a medida que se reduce el tamaño de los prototipos. Para el análisis de escalamiento experimental, se pretende

utilizar un lente de cámara adecuado que nos permita captar de forma clara el fenómeno a escalas milimétricas.

- Proponer un sistema de activación remota del mecanismo para poder facilitar su experimentación y evitar la contaminación del entorno (partículas suspendidas, burbujas de aire, etc.) al momento de activar y cargar la pinza manualmente.

REFERENCIAS

- [1] Versluis, M., Schmitz, B., Heydt von der, A., Lohse, D. (2000). *How snapping shrimp snap: Through cavitating bubbles*. Science. American Association for the Advancement of Science. 289. doi:10.1126/science.289.5487.2114.
- [2] Pastor, M. (2011). *Estudio De Patrones Temporales Para La Emisión Acústica De Los Cangrejos Pistola (Orden Decápoda) En La Reserva Marina De Las Islas Columbretes Mediante La Utilización De Unidades De Detección De Acústica Pasiva (T-POD)*. Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica De Valencia.
- [3] Hess, D., Brücker, C., Hegner, F., Balmert, A., Bleckmann, H. (2013). *Vortex Formation with a Snapping Shrimp Claw*. PLoS ONE. 8(11). doi:10.1371/journal.pone.0077120.
- [4] Godínez, F. A., Navarrete, M., Chávez, O., Guzmán, E. (2018). *Transient Cavitation by Quick Closing Pincers*. Procedente del Décimo Simposio Internacional de Cavitación (CAV2018), editado por J. Katz (ASME Press, Baltimore, 2018). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/325908733_Transient_Cavitation_by_Quick_Closing_Pincers.
- [5] Tang, X., Staack, D. (2019). *Bioinspired Mechanical Device Generates Plasma in Water via Cavitation*. Sci. Adv. 5. American Association for the Advancement of Science. doi:10.1126/sciadv.aau7765.
- [6] White, F. (2004). *Mecánica De Fluidos* (5ta edición). Obtenido de https://www.academia.edu/36288013/Mec%C3%A1nica_de_Fluidos_Frank_M._White.pdf
- [7] Cengel, Y. A., Cimbala, J.A. (2006). *Mecánica De Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones* (1era edición). Obtenido de https://www.academia.edu/35477658/Mec%C3%A1nica_de_Flu%C3%ADdos_-_Cengel_Cimbala_-_1ra_Edici%C3%B3n.
- [8] Ortiz, A., Ruiz, O., Ortiz J. (2013). *Introducción a La Mecánica Del Medio Continuo* (1era edición). México, D.F.: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [9] Sagar, H.J., (2018). *Numerical and Experimental Investigation of Laser-induced Cavitation Bubbles and Induced Damage*. Tesis de Doctorado, Universidad Duisburg-Essen.
- [10] Gutiérrez, L.F., Arias, S., Cardona, D.F. (2019). *Hydrodynamic Cavitation: Engineering and Agribusiness Approach*. Scientia Et Technica, 24(2) p.p. 283-304. Obtenido de <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/19921>.
- [11] Kanthale, P.M., Gogate, P.R., Pandit, A.B., Wilhem, A.M. (2005). *Dynamics of cavitation bubbles and design of a hydrodynamic cavitation reactor: cluster approach*. Ultrasonics Sonochemistry.; p.12: 441-452

- [12] Vargas, A., Esquivel, Daniel. (2014). *Disminución de la viscosidad de Líquidos mediante cavitación hidrodinámica*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [13] Carrillo, O., Galindo, G., García, I. (2012). *Reproducción de cavitación hidrodinámica luminiscente para la limpieza de agua a nivel terciario*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [14] Howell, L.L. (2001). *Compliant Mechanisms* (1era edición). New York, N.Y.: John Wiley & Sons, Inc.
- [15] Ramírez-Gil, F. J., Sepúlveda-Orozco, E., Montealegre-Rubio, W. (2017). *Mecanismos flexibles: desde el diseño conceptual hasta su manufactura*. Revista Politécnica, 13(24), pp. 65-78.
- [16] Pucheta, M. A., Gallardo, A. G., Bernad J. A. (2016). *Empleo de teoría de helicoides para el diseño de mecanismos flexibles de precisión tridimensionales*. Mecánica Computacional. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. 34 (2825-2845). Editado por S. Giusti, M. Pucheta y M. Storti (noviembre 2016).
- [17] Ulrich, K.T., Eppinger, S.D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (5ta edición). México, D.F.: Mc Graw Hill
- [18] Dieter, G.E., Schmidt, L.C. (2009). *Engineering Design* (4ta edición). New York, N.Y.: Mc Graw Hill
- [19] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.H. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach* (3era edición). Londres, Reino Unido: Springer.
- [20] Flores, R.I., Juárez, A.M. (2007). *Diseño de prótesis mecatrónica de mano*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [21] Godínez, F.A., Mayén-Mondragón, R., Guzmán, J. E. V., Chávez, O., Gavaises, M., Montoya, R. (2020). *Bioinspired snapping-claw apparatus to study hydrodynamic cavitation effects on the corrosion of metallic samples*. Rev. Sci. Instrum. 91, 066101. doi: 10.1063/5.0007069
- [22] Bashir, T. A., Soni, A. G., Mahulkar, A. V., Pandit, A. B. (2011). *The CFD driven optimization of a modified venturi for cavitation activity*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 89, pp. 1366-1375. DOI: 10.1002/cjce.20500
- [23] Kuldeep, Saharan, V. K. (2016). *Computational study of different venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices*. Journal of Hydrodynamics, vol. 28, pp. 293-305. DOI: 10.1016/S1001-6058(16)60631-5
- [24] Jain, T., Carpenter, J., Saharan, V. K. (2014). *CFD analysis and optimization of circular and slit venturi for cavitation activity*. Journal of Material Science and Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 28-33.

- [25] Cross, N., (2000). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design* (3era edición). New York, N.Y.: John Wiley & Sons Ltd.
- [26] Howel, L.L., Magleby, S.P., Olsen, B.M., (2013). *Handbook of Compliant Mechanisms* (1era edición). Chichester, West Sussex, U.K.: John Wiley & Sons Ltd.
- [27] Aisek. (26 de octubre de 2019). *Compliant Clothespin*. Obtenido de <https://www.thingiverse.com/thing:3939219>
- [28] Zindustries. (26 de Mayo de 2020). *Compliant Clip*. Obtenido de <https://cults3d.com/en/3d-model/tool/compliant-clip#> =
- [29] filament2print. (16 de enero de 2020). *¿Qué es el PETG?*. Obtenido de https://filament2print.com/es/blog/49_petg.html
- [30] Lucia, C. (18 de diciembre de 2019). *El plástico PETG en la impresión 3D*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/el-plastico-petg-en-la-impresion-3d-181220192/#!>
- [31] Material Property Data, MatWeb (2011). *Overview of materials for PETG Copolyester*. Obtenido de <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4de1c85bb946406a86c52b688e3810d0>
- [32] Taylor, A. (15 de noviembre de 2020). *Qué tan fuerte es tu apretón de manos y qué dice sobre tu estado de salud*. Obtenido de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-54613152>
- [33] Zhang, X., Zhu, B. (2018). *Topology Optimization of Compliant Mechanisms* (1era edición). Singapur: Springer Nature Singapore Pte. Ltd.
- [34] Goelke, M. (2018). *Practical Aspects of Structural Optimization: A Study Guide*. (3era edición). Altair University. Obtenido de <https://altairuniversity.com/free-ebooks/free-ebook-practical-aspects-of-structural-optimization-a-study-guide/>
- [35] Cervantes Cabello, J. (2019). *Libro de Manufactura Aditiva (impresión 3D)*. Departamento de Ingeniería de Diseño y Manufactura, Facultad de Ingeniería. UNAM.
- [36] Anycubic, tienda en línea. *I3 Mega s*. Obtenido de <https://www.anycubic.com/collections/anycubic-mega-3d-printers/products/anycubic-i3-mega-s>
- [37] Sanchez Restrepo, S. (17 de Junio de 2020). *Guía completa: plásticos en la impresión 3D*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/#!>
- [38] Formlabs. *Guía de materiales de impresión 3D: Tipos, aplicaciones y propiedades*. Obtenido de <https://formlabs.com/latam/blog/materiales-impresion-3d/>

- [39] Material Property Data, MatWeb (2011). Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Molded. Obtenido de <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=eb7a78f5948d481c9493a67f0d089646>
- [40] Material Property Data, MatWeb (2011). Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer. Obtenido de <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278>
- [41] Beer, F., Johnston, E., DeWolf, J., Mazurek, D. (2010). *Mecánica de materiales* (5ta edición). Obtenido de https://www.academia.edu/29086135/MECANICA_DE_MATERIALES_beer
- [42] Brancheau, J., Goelke, M. (2015). *Practical Aspects of Finite Element Simulation: A Study Guide* (3era edición). Altair University, Academic Program. Altair Engineering.
- [43] Adept Turnkey (2014). *Phantom v2511, v2011, v1611, v1211 Data Sheet*. Obtenido de <https://www.adept.net.au/cameras/visionresearch/Phantomv1211.shtml>
- [44] Steel, R., Torrie, J. (1960). *Principles and Procedures of Statistics with Special Reference to the Biological Sciences* (1era edición). New York: McGraw-Hill.
- [45] Kovacic, I., Brennan, M. (2011). *The Duffing Equation: Nonlinear Oscillators and their Behaviour* (1era edición). Chichester, West Sussex, U.K.: John Wiley & Sons Ltd.
- [46] Koukouvinis, P., Bruecker, C., Gavaises, M. (2017). *Unveiling the physical mechanism behind pistol shrimp cavitation*. Sci Rep 7:13994. doi: 10.1038/s41598-017-14312-0
- [47] Nitsche, M., Krasny, R. (1994). *A numerical study of vortex ring formation at the edge of a circular tube*. Journal of Fluid Mechanics, 276. doi:10.1017/s0022112094002508
- [48] Dular, M., Bachert, R. (2009). *The Issue of Strouhal Number Definition in Cavitating Flow*. Journal of Mechanical Engineering 55:11, 666-674

ANEXOS

ANEXO A. TABLAS DE DATOS EXPERIMENTALES DE LA CINEMÁTICA DEL CIERRE SÚBITO.

En las tablas 24 y 25 se muestran los datos experimentales recabados a partir del análisis de vídeos para describir la dinámica, angular y lineal, del cierre súbito del prototipo funcional del mecanismo flexible de pinzas.

Tabla 24. Datos experimentales de la cinemática angular del cierre súbito del mecanismo flexible de pinzas, desde su posición de apertura en $t = 0$ [ms] hasta su posición de cierre en $t = 2.167$ [ms]

Tiempo t [ms]	Normalización $t^* = t/T$	Posición angular θ [Grados]	Velocidad angular ω [rad/s]	Aceleración angular α [rad/s ²]
0.0	0.00	18.97	0.0	0.0
0.167	0.08	18.89	7.89	0.0
0.333	0.15	18.82	18.09	113,719.60
0.500	0.23	18.54	46.47	184,507.80
0.667	0.31	17.93	80.69	432,235.06
0.833	0.38	17.00	180.87	835,766.81
1.000	0.46	14.48	366.21	676,851.20
1.167	0.54	10.01	429.20	-33,641.19
1.333	0.62	6.28	336.98	-604,363.71
1.500	0.69	3.57	226.24	-696,150.99
1.667	0.77	1.96	105.25	-514,652.18
1.833	0.85	1.56	44.32	-261,186.29
2.000	0.92	1.11	30.42	0.0
2.167	1.00	0.98	0.0	0.0

Tabla 25. Datos experimentales de la cinemática lineal del cierre súbito del mecanismo flexible de pinzas, desde su posición de apertura en $t = 0$ [s] hasta su posición de equilibrio estático en $t = 0.00783$ [s].

Tiempo t [s]	Posición y [m]	Traslación $y^* = y - 0.00302$ [m]	Velocidad v_y [m/s]	Aceleración a_y [m/s ²]
0.0	0.00985	0.00683	0.0	0.0
0.00017	0.00981	0.00679	-0.228	0.0
0.00033	0.00977	0.00675	-0.488	-3,458.81
0.00050	0.00965	0.00663	-1.375	-5,948.39
0.00067	0.00932	0.00630	-2.528	-13,391.41
0.00083	0.00880	0.00578	-5.553	-25,676.39
0.00100	0.00747	0.00445	-11.258	-19,566.49
0.00117	0.00505	0.00203	-12.871	2,285.92

0.00133	0.00317	0.00015	-9.786	19,082.26
0.00150	0.00179	-0.00123	-6.568	20,261.91
0.00167	0.00099	-0.00203	-3.005	15,046.94
0.00183	0.00079	-0.00223	-1.269	7,322.03
0.00200	0.00056	-0.00246	-0.912	4,195.47
0.00217	0.00048	-0.00254	0.175	11,328.34
0.00233	0.00062	-0.00240	2.715	11,846.87
0.00250	0.00139	-0.00163	4.578	4,816.98
0.00267	0.00215	-0.00087	4.104	-5,953.57
0.00283	0.00276	-0.00026	2.620	-5,574.70
0.00300	0.00302	0.00000	1.957	-1,840.19
0.00317	0.00341	0.00039	2.273	1,082.47
0.00333	0.00378	0.00076	2.242	-1,244.84
0.00350	0.00416	0.00114	1.926	-4,383.99
0.00367	0.00442	0.00140	0.789	-6,657.17
0.00383	0.00442	0.00140	-0.410	-8,605.61
0.00400	0.00428	0.00126	-1.926	-5,682.95
0.00417	0.00378	0.00076	-2.620	-487.11
0.00433	0.00341	0.00039	-1.863	3,193.28
0.00450	0.00316	0.00014	-1.515	1,190.71
0.00467	0.00290	-0.00012	-1.515	1,190.71
0.00483	0.00265	-0.00037	-1.168	4,383.99
0.00500	0.00252	-0.00050	-0.063	5,304.09
0.00517	0.00263	-0.00039	0.758	4,113.37
0.00533	0.00277	-0.00025	1.168	811.85
0.00550	0.00302	0.00000	1.168	-3,301.52
0.00567	0.00316	0.00014	0.032	-3,842.76
0.00583	0.00303	0.00001	-0.347	487.11
0.00600	0.00304	0.00002	0.379	3,030.91
0.00617	0.00316	0.00014	0.695	2,597.92
0.00633	0.00327	0.00025	1.137	-432.99
0.00650	0.00354	0.00052	0.789	-1,353.08
0.00667	0.00354	0.00052	0.347	-4,600.48
0.00683	0.00365	0.00063	-0.379	-3,030.91
0.00700	0.00341	0.00039	-1.073	-1,948.44
0.00717	0.00329	0.00027	-0.758	2,273.18
0.00733	0.00316	0.00014	-0.442	1,840.19
0.00750	0.00315	0.00013	-0.032	162.37
0.00767	0.00315	0.00013	-0.379	0.0
0.00783	0.00302	0.00000	0.0	0.0

ANEXO B. CÓDIGO FUENTE PARA EL MODELADO DE LA CINEMÁTICA DEL CIERRE SÚBITO.

A continuación, se muestra el código fuente utilizado para la determinación de los parámetros m , b , k_1 y k_3 necesarios para ajustar el modelo matemático propuesto a los datos experimentales recabados del análisis de videos. Cabe recordar que este código fuente fue programado y compilado en el software Mathematica 12.2.

*(*Se introducen Los datos experimentales de La evolución de La posición en Y de La punta de La pinza superior con respecto al tiempo, desde su posición de apertura en $t = 0$ [s], hasta su posición de equilibrio estático en $t = 0.000783$ [s]*)*

```
data = {{0, 0.00985 - 0.00302}, {0.00017, 0.00981 - 0.00302}, {0.00033, 0.00977 - 0.00302}, {0.00050, 0.00965 - 0.00302}, {0.00067, 0.00932 - 0.00302}, {0.00083, 0.00880 - 0.00302}, {0.00100, 0.00747 - 0.00302}, {0.00117, 0.00505 - 0.00302}, {0.00133, 0.00317 - 0.00302}, {0.00150, 0.00179 - 0.00302}, {0.00167, 0.00099 - 0.00302}, {0.00183, 0.00079 - 0.00302}, {0.00200, 0.00056 - 0.00302}, {0.00217, 0.00048 - 0.00302}, {0.00233, 0.00062 - 0.00302}, {0.00250, 0.00139 - 0.00302}, {0.00267, 0.00215 - 0.00302}, {0.00283, 0.00276 - 0.00302}, {0.00300, 0.00302 - 0.00302}, {0.00317, 0.00341 - 0.00302}, {0.00333, 0.00378 - 0.00302}, {0.00350, 0.00416 - 0.00302}, {0.00367, 0.00442 - 0.00302}, {0.00383, 0.00442 - 0.00302}, {0.00400, 0.00428 - 0.00302}, {0.00417, 0.00378 - 0.00302}, {0.00433, 0.00341 - 0.00302}, {0.00450, 0.00316 - 0.00302}, {0.00467, 0.00290 - 0.00302}, {0.00483, 0.00265 - 0.00302}, {0.00500, 0.00252 - 0.00302}, {0.00517, 0.00263 - 0.00302}, {0.00533, 0.00277 - 0.00302}, {0.00550, 0.00302 - 0.00302}, {0.00567, 0.00316 - 0.00302}, {0.00583, 0.00303 - 0.00302}, {0.00600, 0.00304 - 0.00302}, {0.00617, 0.00316 - 0.00302}, {0.00633, 0.00327 - 0.00302}, {0.00650, 0.00354 - 0.00302}, {0.00667, 0.00354 - 0.00302}, {0.00683, 0.00365 - 0.00302}, {0.00700, 0.00341 - 0.00302}, {0.00717, 0.00329 - 0.00302}, {0.00733, 0.00316 - 0.00302}, {0.00750, 0.00315 - 0.00302}, {0.00767, 0.00315 - 0.00302}, {0.00783, 0.00302 - 0.00302}};
```

*(*Se genera La curva experimental con base en Los datos introducidos*)*

```
p1 = ListPlot[data, PlotRange -> All, PlotStyle -> {Cyan, AbsolutePointSize[6]}, Frame -> True, Axes -> False, FrameLabel -> {"Tiempo [s]", "Posición en Y [m]"}, RotateLabel -> True, PlotTheme -> "Scientific", BaseStyle -> {FontSize -> 17, FormatType -> Bold}, ImageSize -> {Automatic, 300}, LabelStyle -> {FontFamily -> "Times New Roman", GrayLevel[0]}, PlotLegends -> Placed [{"Curva experimental"}, {Right, Top}]]
```

*(*Se define Los parámetros a buscar, el modelo matemático propuesto, así como Las condiciones iniciales y el intervalo para La solución numérica de La ED*)*

```
Clear[model]; model[m_?NumberQ, b_?NumberQ, k1_?NumberQ, k3_?NumberQ] := Module[{y, x}, First[y /. NDSolve[{m y''[x] + b y'[x] + k1 y[x] - k3 y[x]^3 == 0, y[0] == 0.00683, y'[0] == 0}, y, {x, 0, 0.01}]]]
```

*(*Se ejecuta el comando NonLinearModelFit para buscar el valor de Los parámetros que mejor ajusten La solución numérica de La ED con a curva de datos experimentales*)*

```
n1m = NonlinearModelFit[data, model[m, b, k1, k3][x], {m, b, k1, k3}, x, Method -> "Automatic"]
```

*(*Se muestra el valor de Los parámetros que mejor ajustan La solución de La ED con Los datos experimental además de La correlación La curva de ajuste y La curva experimental*)*

```
n1m["BestFitParameters"]
```

```
n1m["RSquared"]
```

*(*Se genera La curva de ajuste con base en La solución de La ED considerando el valor de Los parámetros obtenidos*)*

```
p2 = Plot[n1m[x], {x, 0, 0.01}, PlotRange -> All, PlotStyle -> {Red, AbsolutePointSize[6]}, Frame -> True, Axes -> False, FrameLabel -> {"Tiempo [s]", "Posición en Y [m]"}, RotateLabel -> True, PlotTheme -> "Scientific", BaseStyle -> {FontSize -> 17, FormatType -> Bold}, ImageSize -> {Automatic, 300}, LabelStyle -> {FontFamily -> "Times New Roman", GrayLevel[0]}, PlotLegends -> Placed [{"Curva de ajuste"}, {Right, Top}]]
```

*(*Se visualiza tanto la curva de ajuste como la curva experimental en una sola gráfica*)*

```
Show[p1, p2]
```

*(*Se introducen Los datos experimentales de La velocidad en y de La punta de La pinza con respecto al tiempo y se grafican*)*

```
texp = {0, 0.00017, 0.00033, 0.00050, 0.00067, 0.00083, 0.00100, 0.00117, 0.00133, 0.00150, 0.00167, 0.00183, 0.00200, 0.00217, 0.00233, 0.00250, 0.00267, 0.00283, 0.00300, 0.00317, 0.00333, 0.00350, 0.00367, 0.00383, 0.00400, 0.00417, 0.00433, 0.00450, 0.00467, 0.00483, 0.00500, 0.00517, 0.00533, 0.00550, 0.00567, 0.00583,
```

```
0.00600, 0.00617, 0.00633, 0.00650, 0.00667, 0.00683, 0.00700, 0.00717, 0.00733,  
0.00750, 0.00767, 0.00783];
```

```
vexp = {0, -0.228, -0.488, -1.375, -2.528, -5.553, -11.258, -12.871, -9.786, -6.568, -  
3.005, -1.269, -0.912, 0.175, 2.715, 4.578, 4.104, 2.620, 1.957, 2.273, 2.242, 1.926,  
0.789, -0.410, -1.926, -2.620, -1.863, -1.515, -1.515, -1.168, -0.063, 0.758, 1.168,  
1.168, 0.032, -0.347, 0.379, 0.695, 1.137, 0.789, 0.347, -0.379, -1.073, -0.758, -0.442,  
-0.032, -0.379, 0};
```

```
p3 = ListPlot[Transpose[{texp, vexp}], PlotRange -> All, PlotStyle -> {Yellow,  
AbsolutePointSize[6]}, Frame -> True, Axes -> False, FrameLabel -> {"Tiempo [s]",  
"Velocidad [m/s]"}, RotateLabel -> True, PlotTheme -> "Scientific", BaseStyle ->  
{FontSize -> 17, FormatType -> Bold}, ImageSize -> {Automatic, 300}, LabelStyle ->  
{FontFamily -> "Times New Roman", GrayLevel[0]}, PlotLegends -> Placed [{"Curva  
experimental"}, {Right, Bottom}]]
```

*(*Se obtiene la derivada de la curva de ajuste y se grafica*)*

```
dnml = nlm'
```

```
p4 = Plot[dnml[x], {x, 0, 0.01}, PlotRange -> All, PlotStyle -> {Blue,  
AbsolutePointSize[6]}, Frame -> True, Axes -> False, FrameLabel -> {"Tiempo [s]",  
"Velocidad [m/s]"}, RotateLabel -> True, PlotTheme -> "Scientific", BaseStyle ->  
{FontSize -> 17, FormatType -> Bold}, ImageSize -> {Automatic, 300}, LabelStyle ->  
{FontFamily -> "Times New Roman", GrayLevel[0]}, PlotLegends -> Placed [{"Curva de  
ajuste"}, {Right, Bottom}]]
```

*(*Se visualiza tanto la curva de ajuste como la curva experimental de la velocidad en
una sola gráfica*)*

```
Show[p3, p4]
```