

# ARTÍCULOS



**BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO**

**ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR**

**OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE  
DE LOS PROYECTILES, MEDIANTE LA  
DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

**MAY. MARCELO GRANDÓN DÍAZ**





# OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE DE LOS PROYECTILES, MEDIANTE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

MAY. Marcelo Grandón Díaz<sup>1</sup>

**Resumen:** El siguiente estudio plantea la utilización de la dinámica de fluidos computacional para la obtención del coeficiente de arrastre de los proyectiles, específicamente del proyectil de artillería de 155 mm. Este estudio busca utilizar la simulación como una herramienta más que permita obtener el coeficiente de arrastre de los proyectiles y, así, poder realizar evaluaciones de la munición e, incluso, modificaciones en su geometría, con una herramienta computacional que utilice modelos matemáticos que permitan predecir el comportamiento del proyectil en vuelo, balística exterior y, además, aportar antecedentes para la creación de las tablas de tiro.

**Palabras claves:** Coeficiente de arrastre, simulación, dinámica de fluidos computacional, balística exterior, evaluación, tablas de tiro.

**Abstract:** The following study proposes the use of computational fluid dynamics to obtain the drag coefficient of the projectiles, specifically the 155 mm artillery one. This study seeks to use simulation as a tool among many others used to obtain projectiles's drag coefficient and, therefore, to be able to perform ammunition evaluations and even modifications in its geometry, using a computational tool that uses mathematical model stop redict the behavior of the projectile in flight, external ballistics and, also, to provide background for the creation of shooting tables.

**Keywords:** Drag coefficient, simulation, computational fluid dynamics, external ballistics, evaluation, shootingtables.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los factores que más influye en la trayectoria de un proyectil es la fuerza de arrastre. Debido a esta fuerza, según la balística exterior, el alcance de los proyectiles

---

<sup>1</sup> Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Armamento.



disminuye en un 60% aproximadamente. Por esta razón, conocer el coeficiente de arrastre, que es la variable más controlable de la fuerza de arrastre en la munición, permitirá la determinación del alcance de la misma y su comportamiento balístico.

El coeficiente de arrastre de un proyectil está relacionado directamente con su geometría (diseño). Debido a esto, cada proyectil, de diferentes calibres y tamaños, describirá una curva de arrastre versus número de *Mach* característico de la munición. Con la finalidad de conocer el comportamiento de la munición a diferentes velocidades, en este trabajo se realizó una relación entre el coeficiente de arrastre y el número de *Mach*, ya que el fluido (aire) experimenta un comportamiento diferente a distintas velocidades, cambiando de un fluido incompresible a bajas velocidades ( $<0,8 \text{ Mach}$ ) a un fluido compresible a altas velocidades ( $>0,8 \text{ Mach}$ ).

El presente estudio busca obtener el coeficiente de arrastre versus número de *Mach* en la munición 155 mm de artillería, mediante la dinámica de fluidos computacional<sup>2</sup> (CFD), para evaluar de manera virtual (simulación) el comportamiento de este proyectil, de uso actual en el Ejército de Chile. Lo anterior permitirá contar con una herramienta más para evaluar parámetros balísticos. A su vez, poder utilizar este tipo de herramientas permitirá diseñar una munición y, de esta forma, aumentar el conocimiento científico en materias relacionadas con la simulación.

La figura N° 1 muestra las distintas fuerzas a la que es sometida una munición, utilizando la simulación. En la paleta de colores se logran apreciar las diferentes velocidades que adopta el fluido en los verdes del proyectil.

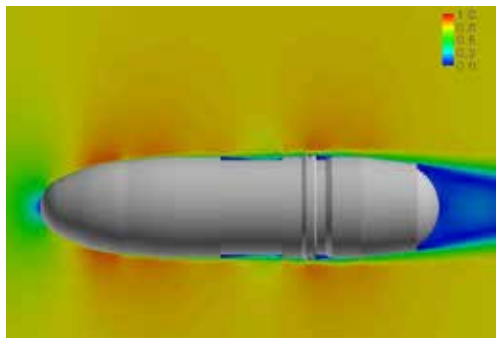


Figura N° 1: "Simulación del proyectil de 25 mm".

Fuente: Army Research Laboratory, 2007.

---

2 Dinámica de fluidos computacional (CFD): campo de estudio de la mecánica de fluidos, dedicado a solucionar ecuaciones de flujo de fluidos con computadora.



## 2. DESARROLLO

### 2.1. Balística exterior

La balística exterior estudia el recorrido que el proyectil realiza desde que sale por la boca del cañón y deja de estar afectado por los gases propulsores hasta que impacta en el objetivo.

Para analizar este movimiento es necesario considerar una serie de factores que afectan a la trayectoria; unos dependen del propio proyectil, como su masa, el calibre, su geometría y la rotación a la que esté sometido; otros, sin embargo, son inherentes al medio donde se mueve, como la densidad, la temperatura, la presión y la viscosidad. Todo ello ha de conjugarse para conseguir que el proyectil impacte en el blanco con gran precisión. Por lo tanto, también dentro del interés de la balística exterior estudiar la estabilización en vuelo, el efecto giroscópico y la resistencia aerodinámica, entre otros.

En lo referido a la resistencia aerodinámica, existen 4 componentes que afectan a los proyectiles, que son:

- Resistencia al avance.
- Resistencia de base.
- Rozamiento superficial.
- Resistencia residual.

#### 2.1.2. Resistencia al avance

Cuando el proyectil avanza, comprime el aire que tiene inmediatamente delante de él creando una perturbación, en forma de onda de presión, que se propaga en el medio a la velocidad del sonido.

Cuando el proyectil es subsónico (se mueve a una velocidad inferior a la del sonido en el aire  $\approx 340$  m/s). La perturbación se traslada más rápido que el propio proyectil y, por tanto, se separa de él. Sin embargo, cuando es supersónico, la perturbación, que viaja a la velocidad del sonido, no se puede separar del frente del proyectil. El resultado es que las ondas de presión se “agolpan” creando una onda de choque en la ojiva, tanto más intensa cuanto mayor velocidad lleve el proyectil.

Estas ondas de presión originan una resistencia al avance del proyectil proporcional a su intensidad, tanto en régimen subsónico como supersónico.



### **2.1.3. Resistencia de base**

La estela que el proyectil deja en la zona del culote crea una región de baja presión, que provoca un “efecto de succión”, el que le resta velocidad. Este fenómeno se conoce como resistencia de culote y se produce porque el aire “no tiene tiempo” de rellenar el espacio que deja el proyectil en su avance.

### **2.1.3. Rozamiento superficial**

La adherencia del aire a la superficie del proyectil genera el rozamiento superficial, que se manifiesta en la zona de aire más cercana a la superficie, llamada capa límite.<sup>3</sup> Se debe a las características viscosas del aire y se manifiesta porque las moléculas de aire en contacto con la superficie del proyectil se mueven a la misma velocidad que este, pero las que se encuentran en capas próximas se desplazan más lentamente; y así sucesivamente, hasta que fuera de la capa límite este efecto desaparece. La resistencia superficial es relativamente poco importante en los proyectiles convencionales, pero en las municiones con gran superficie, como los misiles, debe tenerse presente. Como es lógico, una superficie lisa y pulimentada reduce el valor de este rozamiento.

### **2.1.4. Resistencia residual**

La resistencia residual se debe a las protuberancias que tiene la superficie del proyectil. Para minimizarla es necesario prestar especial atención al diseño de las bandas de conducción y de forzamiento.

Como se describió, las fuerzas antes mencionadas influyen de manera directa en el comportamiento balístico de los proyectiles, y es por eso que cobra tanta importancia el conocer el coeficiente de arrastre de ellos, para reducir al máximo dichas fuerzas, en el caso de los diseñadores y para el caso en que se desee evaluar una munición, conocer cual será su comportamiento en vuelo.

Ahora bien, con el presente estudio se pretende utilizar una herramienta de simulación para poder determinar el coeficiente de arrastre en los proyectiles, con el propósito de lograr resultados más cercanos a la realidad y sin la necesidad de disparar para obtenerlos. El radar de seguimiento de trayectoria, que posee el Ejército, permite obtener el coeficiente de arrastre, pero es necesario disparar.

---

3 Capa límite o capa fronteriza de un fluido es la zona donde el movimiento de este es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto.



La dinámica de fluidos computacional (simulación) resuelve ecuaciones complejas, que gobiernan el comportamiento de los fluidos (aire) y que, a la fecha, no han podido ser resueltas de manera analítica. Es por ello que se utilizan métodos numéricos que pueden ser resueltos por un computador.

### 2.1.5. Dinámica de fluidos

La dinámica de fluidos es el estudio de fluidos en movimiento y la física puede ser descrita por tres leyes de conservación:

- Conservación de la masa, la ecuación de continuidad indica que la cantidad de flujo de masa que entra en un volumen de control debe ser igual a la cantidad que sale de ella. Por lo tanto, el gradiente de volumen es igual a 0, como muestra la ecuación N° 3.1.
- Conservación del momento lineal (Segunda Ley del Movimiento de Newton). Dado un fluido newtoniano, estas ecuaciones se utilizan para obtener una relación entre la presión, el momento y las fuerzas viscosas. Las ecuaciones son llamadas ecuaciones de Navier-Stokes.<sup>4</sup> Ver ecuación N° 3.2.
- Conservación de la energía (primera ley de la termodinámica). La ecuación de la energía es la ley que dice que la cantidad total de energía se conserva dentro del sistema. Sin embargo, puede cambiar entre los diferentes estados. Ver ecuación N° 3.3.

$$\nabla V = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + \rho g \quad (3.2)$$

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 VT + \Phi \quad (3.3)$$

El *software* seleccionado para realizar el estudio es el *Solidworks*, debido a lo “amigable” que resulta su operación y a que se posee la licencia, en el Ejército, para su utilización y una vez obtenidos los resultados, serán comparados con los del *software*

---

4 Ecuaciones de Navier-Stokes: Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes. Se trata de un conjunto de ecuaciones descubiertas por ambos científicos, basadas en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido.



PRODAS para determinar su error. Lo anterior, debido a que hoy el Ejército utiliza el software PRODAS, para la obtención del coeficiente de arrastre de la munición.

### 3. OBJETIVO DEL ESTUDIO

El objetivo del presente estudio es obtener el coeficiente de arrastre versus número de *Mach*, característica de la munición de 155 mm, M 107.

Lo anterior se pretende lograr utilizando la dinámica de fluidos computacional, con el empleo del software *Solidworks* mediante el paquete de simulación (*Flow Simulation*). Los resultados obtenidos, como una manera de validar el programa, serán contrastados con los resultados del software PRODAS, en uso y validado por el Ejército de Chile.

La principal diferencia entre ambos software corresponde a los métodos utilizados para obtener los resultados. En cuanto a PRODAS, es un programa que cuenta con una base de datos, a la que se recurre para la entrega de resultados. Por otra parte, el software *Solidworks* utiliza métodos numéricos para la solución de ecuaciones complejas, que gobiernan el comportamiento de los fluidos, por lo que, dependiendo de los modelos matemáticos, debería ser más exacto.

A continuación, en la figura N° 2 se presentan los resultados obtenidos del coeficiente de arrastre versus el número de *Mach* de la munición de 155 mm, mediante el empleo del software PRODAS. Dichos resultados son los que se desea contrastar con la simulación. Los resultados son obtenidos luego de ingresar las características de la munición al software, además de las características del fluido (no es necesario disparar).

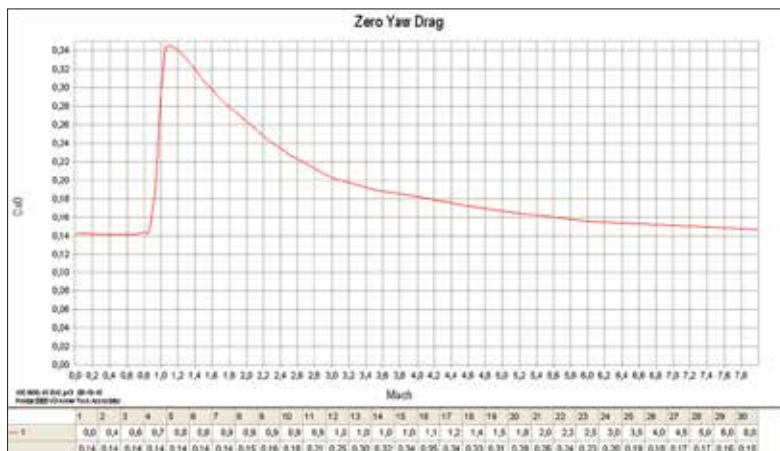


Figura N° 2: “Gráfico del coeficiente de arrastre versus número de Mach, de la munición 155 mm”.

Fuente: Software PRODAS, versión 3.2.2, 2017.





Cabe señalar que, con el empleo de la simulación, se obtendrán nueve puntos, en tres zonas diferentes: subsónica, transónica y supersónica. Lo anterior, debido a que el fluido experimenta cambios considerables en cada una de las zonas antes mencionadas, que afectan el arrastre del proyectil.

### **3.1. Procedimiento**

En el presente análisis se comienza con el desarrollo de un modelo CAD, de la munición de 155 mm, M 107. Las medidas (cotas del proyectil) fueron proporcionadas por la Fábricas y Maestranzas del Ejército (FAMAE). Luego de contar con el modelo, se procede a ingresar las diferentes variables al programa, tales como: tipo de fluido, temperatura, presión, velocidad, entre otras; para poder simular el coeficiente de arrastre de la munición, además, se debe realizar un mallado que permita captar el fenómeno lo más real posible (ver figura N° 4).

Una vez que el programa esté en condiciones de simular, se procederá a ejecutar el caso, este procedimiento se debe repetir para cada velocidad (número de Mach) que se desea calcular.

### **3.2. Geometría y mallado del dominio computacional**

El modelo CAD del proyectil es desarrollado en el programa *Solidworks* y sus medidas pueden ser modificadas, de acuerdo con las necesidades del investigador. A su vez, la malla para realizar el análisis también puede ser modificada, para captar de mejor manera el fenómeno, lo que implicará un mayor uso de los recursos computacionales. En el caso del presente análisis, es necesario refinar la malla lo más posible, con el fin de captar de mejor forma el fenómeno.

En este caso, se realizará con un tipo de malla adaptativo y se evaluarán diferentes números de *Mach*, lo que permitirá comparar los resultados de la simulación con los resultados entregados por el *software* PRODAS.

El dominio computacional será un paralelepípedo, que simula un túnel de viento, representado en tres dimensiones (3D) (ver figura N°3), además se realiza una malla adaptativa (ver figura N° 4).

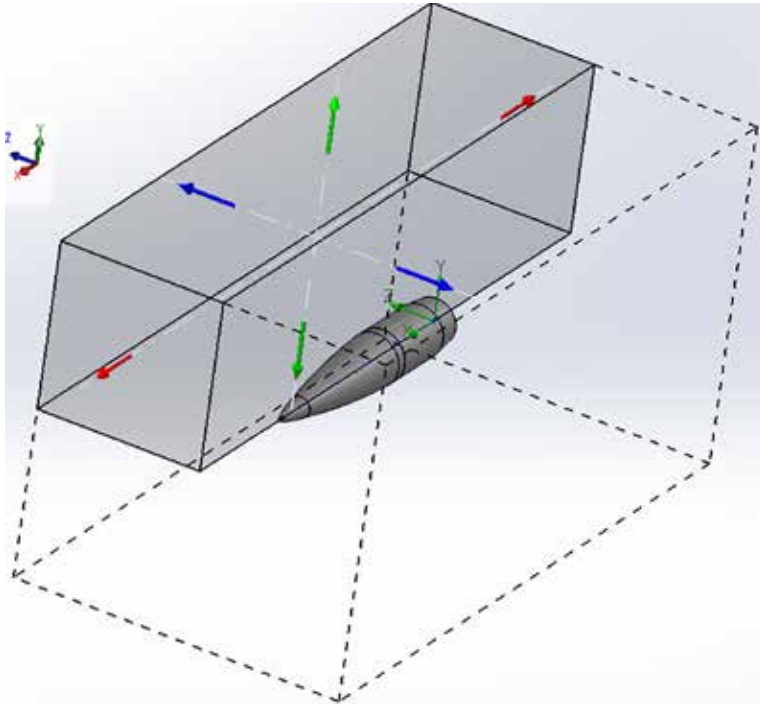


Figura N° 3: "Dominio computacional".

Fuente: Bibliografía [4].

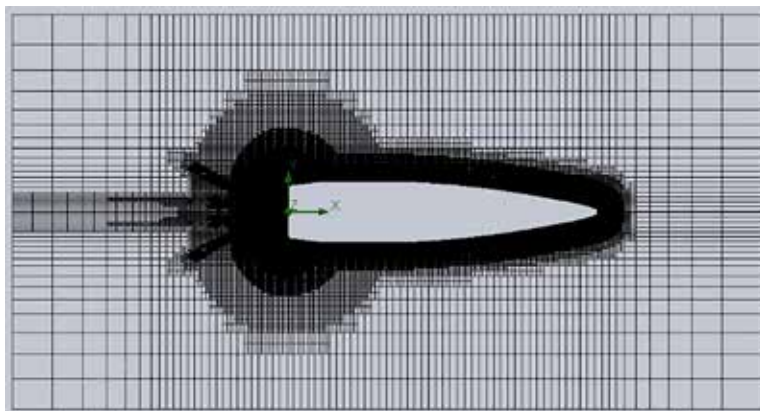


Figura N° 4: "Mallado adaptativo, proyectil de 155 mm, M107".

Fuente: Bibliografía [4].

En la figura N° 3 se aprecia que el dominio computacional abarca  $\frac{1}{4}$  del proyectil. Esto debido a que es necesario disminuir el uso de los recursos computacionales y la simetría del mismo lo permite.



#### 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presenta una tabla de resultados, en la que se muestran los diferentes coeficientes de arrastre en función de los números de Mach seleccionados, lo que determina un error relativo al valor del software PRODA S.

Tabla N° 1: “Resultados obtenidos de la simulación y comparados con PRODA S”

VELOCIDAD [M/S]	N° MACH	FX [N]	COEFICIENTE DE ARRASTRE PRODA S	COEFICIENTE DE ARRASTRE SOLIDWORKS	TIEMPO CPU [HR]	N° DE CELDAS TOTALES EN MALLA	ERROR [%] RELATIVO (PRODA S/ SOLIDWORKS)
70 (subsónico)	0,2	5,4	0,14	0,096	1,07	566.836	31
140 (subsónico)	0,4	21,1	0,14	0,095	1,37	566.836	32
210 (subsónico)	0,6	53,38	0,14	0,1	1,34	567.564	29
309 (transónico)	0,9	126,46	0,14	0,12	20,3	1.147.056	14
343,2 (transónico)	1	388,34	0,25	0,287	5,9	1.281.638	15
378 (transónico)	1,1	548,52	0,35	0,33	4,18	1.167.888	6
480,5 (supersónico)	1,4	860	0,32	0,33	5,6	1.275.952	3
617.76 (supersónico)	1,8	1573	0,28	0,36	43,3	15.146.922	29

Fuente: elaboración propia.

Los resultados presentados en la tabla N° 1 fueron obtenidos con la simulación en el túnel de viento virtual, *software Solidworks*, para luego ser comparados con los resultados que entrega el software PRODA S, de la misma munición.



Además de la obtención de resultados numéricos, también es posible apreciar resultados gráficos, en los cuales se logra ver que los modelos matemáticos empleados por el software son capaces de captar el fenómeno físico que ocurre, manteniendo la ley de la continuidad.

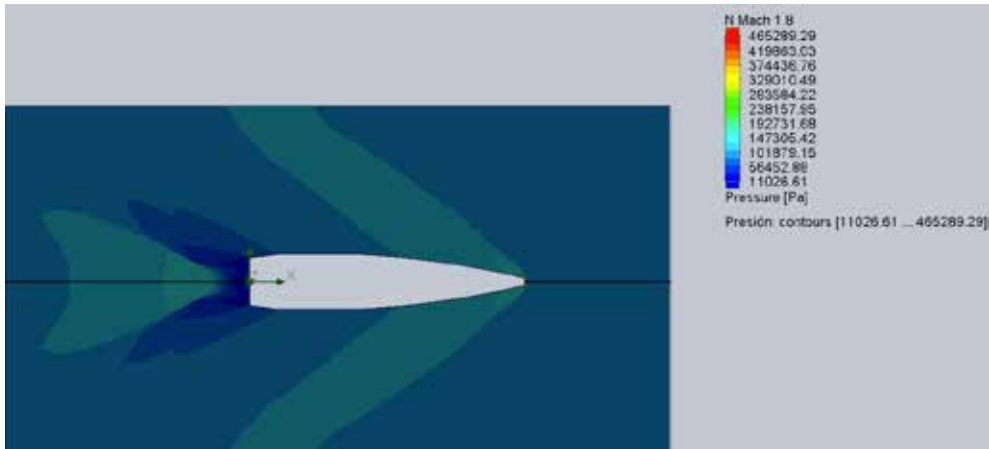


Figura N° 5: "Resultados gráficos de presión a 1,8 Mach".

Fuente: Bibliografía [4].

En las figura N° 5 se aprecia la evolución del campo de presiones, la que considera un número de *Mach* de 1,8, donde el comportamiento de la presión refleja claramente la formación del cono de *Mach*, fenómeno característico a altas velocidades.

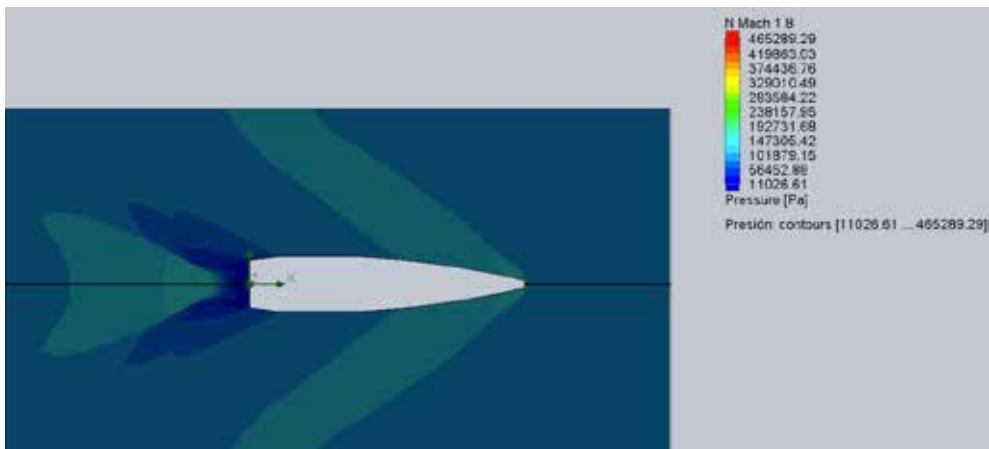


Figura N° 6: "Resultados gráficos de velocidad a 1,8 Mach".

Fuente: Bibliografía [4].



Al igual que el resultado gráfico, presentado en relación a la presión, la figura N° 6, representa el cambio de velocidad alrededor del proyectil, el comportamiento es el esperado, dando cumplimiento a la ley de la continuidad (presión/velocidad).

## 5. CONCLUSIONES

Con el estudio se logró conocer el comportamiento balístico de los proyectiles, a través de la utilización de herramientas computacionales que permitieron evaluar y, a su vez, ser un aporte para futuros diseñadores de munición.

Por otra parte, el contar con computadores con mayor capacidad para disminuir los tiempos de cálculo, permitirá realizar análisis a una mayor cantidad de puntos (diferentes números de *Mach*).

Se estima que los modelos matemáticos empleados por el *software* Solidwork no son los más apropiados para números de Mach elevados, vale decir, zonas muy turbulentas, por lo que se hace necesaria la utilización de otros programas que sean más científicos, como por ejemplo *Ansys Fluent*. Lo anterior, se concluye debido a que los datos del *software* PRODAS –que se utilizaron para comparar– se encuentran validados por el Ejército.

El empleo de la dinámica de fluidos computacional es ampliamente difundido para este tipo de estudios por los ejércitos modernos, por lo que el continuar con estas investigaciones, colaborará con el aumento del conocimiento científico en la materia.

Finalmente, se crea la necesidad de continuar investigando, ya que el tema es de gran importancia, debido a lo potente de la herramienta computacional, al beneficio que le pueda brindar el Ejército y, al mismo tiempo, como una forma de aportar desde el conocimiento a la toma de decisiones.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] GRANDÓN DÍAZ, Marcelo. “Metodología para la obtención de la curva de arrastre versus número de Mach, de la munición 155 mm, mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD)”. Director: Teniente coronel Mario Díaz Godoy. [Memoria para la obtención de Título]. Academia Politécnica Militar, Santiago de Chile, 2017.
- [2] HUGHES, William (1970). *Dinámica de Fluidos*. Bogotá: Norma.



- [3] MONROY ALBORNOZ, Julio (2009). *Nociones de Balística*. Santiago de Chile: Ediciones Academia Politécnica Aeronáutica.
- [4] ÇENGEL, Yunus y CIMBALA, John (2012). *Mecánica de Fluidos*. Segunda Edición. Santa Fe: Mc Graw Hill.