



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
UNIDAD ZACATENCO

**DISEÑO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO
DE UN SISTEMA DE CIERRE HERMÉTICO, DEBIDO AL
EFECTO DEL PROPELENTE DE UNA MUNICIÓN SIN CASCO**

**TESIS DE DOCTORADO
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

PRESENTA:

M.I.M. USIEL SANDINO SILVA RIVERA

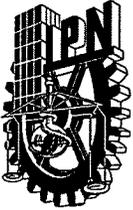
DIRIGIDA POR:

DR. ORLANDO SUSARREY HUERTA

DR. JUAN MANUEL SANDOVAL PINEDA



MÉXICO 2015



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14BIS

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 16:00 horas del día 16 del mes de Junio del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E. S. I. M. E.

para examinar la tesis titulada:

“DISEÑO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN SISTEMA DE CIERRE HERMÉTICO, DEBIDO AL EFECTO DEL PROPELENTE DE UNA MUNICIÓN SIN CASCO”.

Presentada por el alumno:

SILVA

Apellido paterno

RIVERA

Apellido materno

USIEL SANDINO

Nombre (s)

Con registro:

B	1	1	0	8	0	9
---	---	---	---	---	---	---

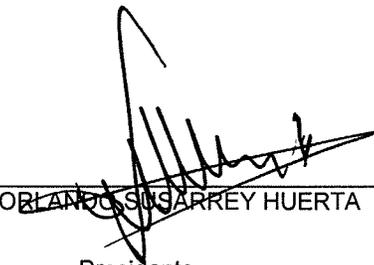
aspirante de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

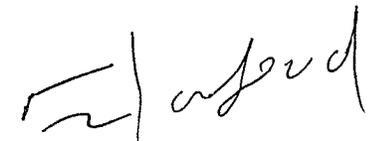
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

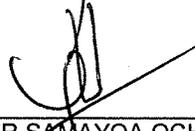
Directores de tesis



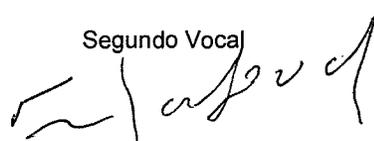
DR. ORLANDO SUSARREY HUERTA
Presidente



DR. JUAN MANUEL SANDOVAL PINEDA
Segundo Vocal



DR. DIDIER SAMAYOA OCHOA
Tercer Vocal



DR. JUAN MANUEL SANDOVAL PINEDA
Secretario

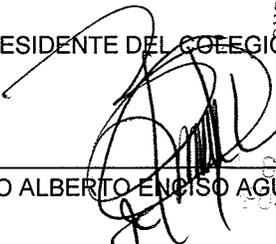


DR. LUIS ARMANDO FLORES HERRERA

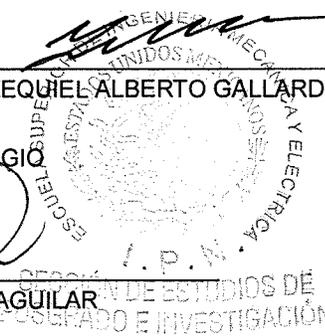


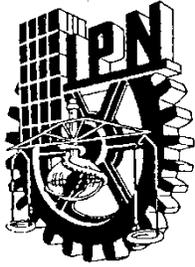
DR. EZEQUIEL ALBERTO GALLARDO HERNÁNDEZ

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO



DR. MAURO ALBERTO ENCISO AGUILAR





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D. F. el día 16 del mes de Junio del año 2015, el que suscribe M.I.M. Usiel Sandino Silva Rivera alumno del Programa Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica con número de registro B110809, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Orlando Susarrey Huerta y el Dr. Juan Manuel Sandoval Pineda y cede los derechos del trabajo intitulado “Diseño y Análisis del Comportamiento Mecánico de un Sistema de Cierre Hermético, debido al Efecto del Propelente de una Munición sin Casco”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección jsandovalp@ipn.mx o usiel31@yahoo.com.mx; Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Nombre y Firma

M.I.M. Usiel Sandino Silva Rivera

RESUMEN

En este trabajo de investigación se diseña y analiza un sistema de cierre para un arma de fuego de municiones sin casco, asimismo se estudia el sistema de cierre de un fusil convencional, en el cual no se requiere de un cierre hermético durante el disparo, pues el casco de latón de la munición coadyuva a contener los gases de la deflagración de la pólvora, sin embargo en municiones que no cuentan con este casco de latón, el sellado sí debe de ser hermético, por lo que se plantea la necesidad de desarrollar un sistema de cierre con estas características, que pueda contener los gases hasta la salida del proyectil y su posterior apertura, la cual se requiere para la introducción de una nueva munición.

A fin de mantener parámetros balísticos eficientes comparables con los de la munición calibre *9 x 19 mm Parabellum*, se analiza el sistema mediante simulaciones numéricas realizadas con la Dinámica de Fluidos Computacional (DFC), y se validan los resultados con pruebas balísticas experimentales realizadas a prototipos del sistema de cierre hermético y la munición sin casco, al compararse con las curvas de presión de cada disparo que se obtienen en el cronógrafo balístico.

En la obtención de este sistema de cierre hermético radica la importancia de este estudio, al generar conocimiento sobre su funcionamiento y desarrollar un nuevo armamento que emplee municiones sin casco, permitiendo tener un mayor volumen de fuego y aumentar la precisión de los disparos con las mismas características de rendimiento que el armamento convencional.

ABSTRACT

Conventional weapons chambers are not hermetic, because the ammunition helps to contain the gases of gunpowder; however there are caseless ammunition which need to have a hermetic chamber, thus there is a need to develop this locking chamber system, which must have efficient ballistic parameters like the *9 x 19 mm Parabellum* ammunition.

The system was analyzed by numerical simulations performed with Computational Fluid Dynamics (CFD), and validated with experimental pressure graphs of ballistic tests that were carried out for locking chamber system and caseless ammunition prototypes.

The performance analysis of the designed locking system is the main goal of this study, which can be used in the development of new weapons for caseless ammunition that allows a greater volume of fire for shooters and to increase the accuracy of their shots.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y evaluar un sistema de cierre cuasi-hermético para un arma de fuego ligera, mediante el análisis de su comportamiento mecánico al operar como cámara de combustión del propelente de municiones sin casco, a fin de disparar un proyectil con resultados balísticos superiores a las especificaciones de las municiones calibre 9 x 19 mm Parabellum.

Para lograr el objetivo general se deben de cumplir los siguientes objetivos particulares.

Objetivos Particulares

- Determinar las condiciones de trabajo a que se someten los componentes del sistema de cierre de un arma, mediante el análisis bibliográfico y experimental de parámetros balísticos como la presión y temperatura, así como del análisis numérico de los campos de esfuerzos que se generan, para identificar las especificaciones en que debe de operar y basar el diseño del sistema de cierre cuasi-hermético.

- Realizar el diseño de un sistema de cierre cuasi-hermético, consolidando diseños conceptuales, empleando el diseño asistido por computadora (CAD) para el modelado de los componentes, su interacción en su ciclo de funcionamiento y analizando los materiales, a fin de cumplir con las especificaciones determinadas para el correcto funcionamiento del sistema.

-
- Definir los materiales necesarios, con el análisis de las propiedades de los materiales y la realización de análisis químicos, físicos y metalográficos, a fin de determinar la factibilidad de emplearlos en los procesos de manufactura de cada uno de los componentes del sistema de cierre propuesto.

 - Analizar los campos de esfuerzos y deformaciones del sistema propuesto con la simulación del Método de Elemento Finito del sistema de cierre y su iteración con los componentes de la munición, durante la realización del disparo, determinando la capacidad del sistema para cumplir con las especificaciones de trabajo en que debe de operar.

 - Manufacturar el prototipo del sistema de cierre cuasi-hermético propuesto, así como la munición sin casco y núcleo parcial correspondiente, mediante los procesos de manufactura metalmecánicos y térmicos necesarios, con objeto de que se evalúe experimentalmente en condiciones controladas.

 - Evaluar el comportamiento mecánico del prototipo del sistema de cierre cuasi-hermético y del proyectil sin núcleo, durante su iniciación en la recámara y su posterior desplazamiento a través del tubo cañón del arma, a partir de la comparación de los resultados de pruebas experimentales contra resultados de parámetros balísticos alcanzados con armas convencionales, corroborando el funcionamiento y eficiencia del diseño propuesto.

-
- Analizar los efectos de la deflagración de la pólvora sobre el sistema de cierre cuasi-hermético, comparando el análisis numérico con el Método de Elemento Finito respecto a ensayos de laboratorio, para determinar la existencia de defectos y/o erosión, que puedan generar posibles fallas en el sistema.

JUSTIFICACIÓN

A nivel mundial existe una muy baja cantidad de armamento que emplea municiones sin casco, debido principalmente a la alta complejidad que implica el desarrollo y aplicación de esta tecnología. No obstante para poder cumplir adecuadamente con los requerimientos de alto desempeño en operaciones militares y policiacas, es necesario tener un aumento en la precisión de los disparos y en el volumen de fuego, lo que es mejorado con el armamento y municiones sin casco.

Actualmente los constantes avances tecnológicos y la necesidad de implementar nuevos sistemas de armamento, ha generado la invención de nuevos tipos de municiones y ojivas, como las denominadas inteligentes que son capaces de atravesar un material y después detonar a determinada distancia. Existen también las ojivas frangibles que atraviesan objetivos blandos y se fragmentan en materiales duros, evitando que puedan rebotar o salir esquivadas que puedan dañar al tirador, personas o equipos aledaños [Cambou, 2003].

Similarmente se han desarrollado diversas investigaciones en las que se ha tratado de aumentar la cantidad de municiones que se pueden disparar (*volumen de fuego*) al reducir su peso, e incrementar la cantidad de municiones que puede llevar un sólo tirador, siendo una solución el empleo de municiones sin casco (*caseless*), las cuales también ayudan a la precisión del tiro al reducir el movimiento del arma, debido a que no es necesario la expulsión del casco después de realizarse el disparo [McGregor, 2009].

Esto se debe a que los disparos de municiones con casco producen vibraciones y movimientos al desplazarse los componentes mecánicos del arma, a fin de expulsar el casco de su interior, lo que afecta la precisión del tiro al generar una mayor dispersión en los impactos sucesivos o automáticos.

Es por ello que el desarrollo de un sistema de cierre hermético que utilice municiones sin casco, permitirá disminuir el movimiento de los componentes mecánicos, mejorando la precisión de los impactos y aumentando la capacidad y volumen de fuego del tirador, ya que este tipo de armamento tiene una mayor cantidad de municiones en relación con la cantidad de peso que un tirador puede cargar de municiones normales.

La presente investigación está enfocada en el diseño y análisis de un nuevo sistema de cierre para municiones sin casco, el cual deberá mantenerse hermético durante el disparo, siendo éste un campo de estudio poco investigado, toda vez que no obstante de la existencia de armamento para municiones sin casco, no presentan un sistema de cierre adecuado para funcionar bajo condiciones o ambientes extremos.

CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
OBJETIVOS	iii
JUSTIFICACIÓN	vi
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xxv
GLOSARIO	xxviii
SIMBOLOGÍA	xxxiv
INTRODUCCIÓN	xxxvi

**CAPÍTULO I.-ESTADO DEL ARTE SOBRE SISTEMAS DE CIERRE, ARMAMENTO Y
MUNICIONES SIN CASCO**

I.1.- Generalidades	2
I.2.- Estado del arte	6
I.2.1- En propelentes sólidos y líquidos	6
I.2.2- En balística interna	7
I.2.3- En balística externa	9

I.3.- Planteamiento del problema 16

I.4.- Sumario 18

CAPÍTULO II.- MARCO TEÓRICO SOBRE BALÍSTICA Y ARMAMENTO

II.1.- Generalidades 20

II.2.- Análisis en balística interna 20

II.2.1.- Gradiente de Lagrange 21

II.3.- Armamento 28

II.3.1.- Armamento para municiones sin casco 28

II.3.2.- Mecanismos de cierre convencionales para armas de autocarga 30

II.3.3.- Procesos de manufactura de sistemas de cierre y cañones 32

II.4.- Dinámica del retroceso del arma 36

II.4.1.- Salto de arma de fuego 42

II.5.- Sumario 42

CAPÍTULO III.- DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA DE CIERRE

III.1.- Generalidades 45

III.2.- Metodología del diseño mecánico empleado 47

III.3.- Investigación de sistemas de cierre de armamento convencional 51

III.4.- Caracterización de sistemas de cierre de armamento convencional 52

III.4.1.- Análisis dimensional de componentes de armamento convencional 54

Contenido	x
<hr/>	
III.4.2- Composición química del material de componentes de armamento convencional	57
III.4.3- Propiedades mecánicas de aceros empleados en componentes de armamento	60
III.5.- Propuestas de sistemas de cierre herméticos	61
III.5.1- Diseño geométrico y conformación de los sistemas de cierre herméticos propuestos	62
III.5.2- Modelo de toma de decisión del diseño del sistema de cierre hermético propuesto	66
III.5.3- Análisis de los ángulos internos de unión del sistema de cierre hermético propuesto	67
III.5.4- Composición química del sistema de cierre hermético propuesto	69
III.5.5- Caracterización mecánica del material del sistema de cierre hermético propuesto	70
III.5.6- Caracterización física del material del sistema de cierre hermético propuesto	71
III.6.- Sumario	72
CAPÍTULO IV.- ANÁLISIS NUMÉRICO APLICANDO EL MEF EN EL SISTEMA DE CIERRE	
IV.1.- Generalidades	75
IV.2.- Metodología	76
IV.3.- Ecuaciones que gobiernan el sistema	80
IV.3.1.- Ecuación de continuidad	80
IV.3.2.- Ecuación de disipación de turbulencia (<i>Eddy-dissipation</i>)	81
IV.3.3.- Compuestos de la reacción química de la combustión	82

Contenido	xi
IV.4.- Simulación tridimensional del sistema de cierre de un cañón de pruebas	83
IV.4.1.- Generación del modelo tridimensional del sistema de cierre de un cañón de pruebas	83
IV.4.2.- Generación del mallado del modelo de elementos finitos del sistema de cierre de un cañón de pruebas	85
IV.4.3.- Establecimiento de las condiciones de frontera del sistema de cierre de un cañón de pruebas	88
IV.4.4.- Solución del sistema de cierre de un cañón de pruebas	88
IV.5.- Simulación del perfil tridimensional del sistema de cierre hermético propuesto	89
IV.5.1.- Generación del modelo tridimensional del sistema de cierre hermético	89
IV.5.2.- Generación del modelo de elementos finitos del sistema de cierre hermético	91
IV.5.3.- Establecimiento de las condiciones de frontera del sistema de cierre hermético	93
IV.5.4.- Solución del sistema de cierre hermético	93
IV.6.- Sumario	93

CAPÍTULO V.- MANUFACTURA DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA DE CIERRE, ANÁLISIS EXPERIMENTAL

V.1.- Generalidades	96
V.2.- Componentes y manufactura del propelente del prototipo de la munición sin casco	99
V.3.- Componentes y manufactura del prototipo de la ojiva sin núcleo	100

Contenido	xii
<hr/>	
V.4.- Ensamble del prototipo de la munición sin casco	105
V.5.- Componentes y manufactura del prototipo del sistema de cierre hermético	106
V.5.1.- Manufactura del cañón prototipo del sistema de cierre hermético	107
V.5.2.- Manufactura de la cabeza de cierre prototipo del sistema de cierre hermético	108
V.6.- Análisis experimental del propelente del prototipo de la munición sin casco	110
V.7.- Análisis experimental de las municiones 7.62 x 51 mm FMJ y 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo	117
V.8.- Sumario	118
CAPÍTULO VI.- ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS	
VI.1.- Generalidades	120
VI.2.- Análisis comparativo de los resultados numéricos.	121
VI.3.- Análisis de los resultados experimentales	143
VI.3.1.- Resultados experimentales de la presión del disparo de la munición estandarizada 7.62 x 51 mm FMJ en un sistema de cierre convencional	143
VI.3.2.- Resultados experimentales de la presión del disparo de la munición 7.62 mm sin casco con proyectil sin núcleo, en el sistema de cierre hermético propuesto.	144
VI.3.3.- Resultados experimentales de la velocidad del disparo de municiones 7.62 x 51 mm FMJ en un cierre convencional y 7.62 mm en el sistema de cierre hermético propuesto	146
VI.4.- Análisis comparativo de los resultados numéricos y experimentales	147

VI.4.1- Análisis comparativo de los resultados numéricos y experimentales de presión y velocidad en los sistemas de cierre convencional y hermético.	147
VI.4.2- Análisis comparativo de las curvas de presión numéricas y experimentales, obtenidas en los sistemas de cierre convencional y hermético propuesto.	149
VI.5.- Pruebas de funcionamiento en armamento modificado con el sistema de cierre hermético propuesto, y la munición Cal. 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo.	152
VI.6.- Sumario	154
CONCLUSIONES	155
DISCUSIONES	158
REFERENCIAS	160
TRABAJOS FUTUROS	167
ANEXOS	
A.- Análisis modal de fallos y efectos del sistema de cierre hermético ampliado	
B.- Artículo publicado.	

ÍNDICE DE FIGURAS
CAPÍTULO I.-ESTADO DEL ARTE SOBRE SISTEMAS DE CIERRE, ARMAMENTO Y MUNICIONES SIN CASCO.

Figura I.1.-	Diagrama de bloques de los principales componentes de un fusil convencional	2
Figura I.2.-	Fusil (carabina) M4 A1 calibre 5.56 x 45 mm [<i>M4A1 Technical Manual, 1997</i>]	3
Figura I.3.-	Identificación de los principales componentes de un fusil M4 A1 [<i>M4A1 Technical Manual, 1997</i>]	4
Figura I.4.-	Esquema del interior de un fusil Steyr AUG, calibre 5.56 x 45 mm tipo <i>bullpup</i> [<i>Steyr AUG cutaway view, 2012</i>]	5
Figura I.5.-	Fusil HK G11 desarrollado por la Sociedad para Sistemas de Armas de Fuego sin casco (<i>GHGS; Gesellschaft für Hülsenlose Gewehr systeme</i>)	12
Figura I.6.-	Munición sin casco (<i>caseless</i>) cal. 4.73 x 33 mm	12
	Disparo múltiple del Metal Storm MK3 36 BRL, [<i>Ezell, 2008</i>].	15

CAPÍTULO II.- MARCO TEÓRICO SOBRE BALÍSTICA Y ARMAMENTO

Figura II.1.-	Relación presión – distancia en el disparo de un arma de fuego [<i>Carlucci, 2008</i>]	21
Figura II.2.-	Sistema de cierre por toma de gases de un fusil	30

Figura II.3.-	Sistema de cierre por retroceso de masas con retardo por rodillo de un fusil	32
Figura II.4.-	Estriado de un cañón de calibre 75 mm, de manufactura francesa	33
Figura II.5.-	Estriado poligonal de un cañón de pistola HK USP calibre 9 x 19 mm, de fabricación alemana	33
Figura II.6.-	Botón de estriado de doble conicidad	35
Figura II.7.-	Herramienta de forma para forja por martillado	35
Figura II.8.-	Cortador para estriado de punto simple	36
Figura II.9.-	Brocha para estriado de cañones de armamento	36
Figura II.10.-	Curva típica de presión – tiempo del disparo de un arma de fuego [<i>Carlucci, 2008</i>]	37
Figura II.11.-	Fuerzas actuantes en un cañón y su reacción en el proyectil [<i>Carlucci, 2008</i>]	38
Figura II.12.-	Diagrama de los desplazamientos del arma [<i>Carlucci, 2008</i>]	40

CAPÍTULO III.- DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA DE CIERRE

Figura III.1.-	Curva del ciclo de vida de un producto [<i>Kalpakjian, 2008</i>]	45
Figura III.2.-	Diagrama de la ingeniería concurrente empleada en el diseño propuesto	48
Figura III.3.-	Esquema del interior de un fusil MK 109, calibre 300 AAC Blackout, tipo convencional [<i>MK 109 cutaway view, 2012</i>].	52
Figura III.4.-	Acercamiento al sistema de cierre de un fusil MK 109, calibre 300 AAC Blackout [<i>MK 109 cutaway view, 2012</i>].	53

Índice de figuras	xvi
Figura III.5.- UZI; subametralladora	54
Figura III.6.- UZI; cabeza de cierre	54
Figura III.7.- M16; fusil de asalto	55
Figura III.8.- M16; cabeza de cierre	55
Figura III.9.- G3; fusil de asalto	55
Figura III.10.- G3; cabeza de cierre	55
Figura III.11.- Marlín XL7; rifle	55
Figura III.12.- Marlín XL7; cabeza de cierre	55
Figura III.13.- Maquina universal de coordenadas empleada en el análisis dimensional	56
Figura III.14.- Espectrofotómetro de absorción atómica empleado en el análisis químico.	58
Figura III.15.- Espectrofotómetro de chispa empleado en el análisis químico cuantitativo	58
Figura III.16.- Sistema de cierre hermético por roscado interno	62
Figura III.17.- Sistema de cierre hermético por roscado interno (corte longitudinal)	62
Figura III.18.- Cabeza de cierre con dentado interno (vista lateral)	62
Figura III.19.- Cabeza de cierre con dentado interno (vista isométrica)	62
Figura III.20.- Sistema de cierre hermético por roscado externo	63
Figura III.21.- Sistema de cierre hermético por roscado externo (corte longitudinal)	63
Figura III.22.- Cabeza de cierre con dentado externo (vista lateral)	63
Figura III.23.- Cabeza de cierre con dentado externo (vista isométrica)	63

Figura III.24.- Sistema de cierre hermético por muelle	64
Figura III.25.- Sistema de cierre hermético por muelle (corte longitudinal)	64
Figura III.26.- Cabeza de cierre para obturación por muelle (vista lateral)	64
Figura III.27.- Cabeza de cierre para obturación por muelle (vista isométrica)	64
Figura III.28.- Sistema de cierre hermético ampliado	65
Figura III.29.- Sistema de cierre hermético ampliado (corte longitudinal)	65
Figura III.30.- Cabeza de cierre para obturación por incremento longitudinal (vista lateral)	65
Figura III.31.- Cabeza de cierre para obturación por incremento longitudinal (vista isométrica)	65
Figura III.32.- Ubicación de los ángulos de la cabeza de cierre y el cañón analizados	67
Figura III.33.- Interferencia de cualquier combinación de los ángulos que sume 270°	67
Figura III.34.- Interferencia de ángulo mínimo de la cabeza con ángulo mínimo del cañón	68
Figura III.35.- Interferencia de ángulo mínimo de la cabeza con ángulo máximo del cañón	68
Figura III.36.- Interferencia de ángulo máximo de la cabeza con ángulo mínimo del cañón	68
Figura III.37.- Interferencia de ángulo máximo de la cabeza con ángulo máximo del cañón	68
Figura III.38.- Máquina de tensión y compresión empleada en las pruebas elásticas	71

Figura III.39.- Fotomicrografía de acero SAE-AISI 4140, a 1,500 x	72
---	----

CAPÍTULO IV.- ANÁLISIS NUMÉRICO APLICANDO EL MEF EN EL SISTEMA DE CIERRE

Figura IV.1.- Cañón y banco de pruebas experimentales	77
Figura IV.2.- Modelo CAD del cañón de pruebas con la munición convencional	77
Figura IV.3.- Corte longitudinal de un cañón de pruebas y una munición convencional	78
Figura IV.4.- Corte longitudinal del mallado 3D del volumen de gases generado en una munición convencional	78
Figura IV.5.- Exterior de la recámara de un fusil de asalto típico	78
Figura IV.6.- Modelo CAD del sistema de cierre propuesto con la munición sin casco	78
Figura IV.7.- Corte longitudinal del volumen del sistema de cierre hermético obturado	79
Figura IV.8.- Corte longitudinal del mallado 3D del volumen de gases en el sistema de cierre hermético propuesto	79
Figura IV.9.- Corte longitudinal del modelo de un tubo cañón de pruebas y de una munición calibre 7.62 x 51 mm instantes después de que se produzca el disparo	84
Figura IV.10.- Corte longitudinal del volumen del cierre del cañón de pruebas (acot. mm)	84
Figura IV.11.- Corte longitudinal del mallado 3D del sistema de cierre de un cañón de pruebas	86

Figura IV.12.- Malla correspondiente a la toma de gases del transductor piezoeléctrico, dentro de la malla del sistema de cierre de un cañón de pruebas (acercamiento)	86
Figura IV.13.- Vista de la unión del estriado con la bala 7.62 mm, dentro de la malla del sistema de cierre de un cañón de pruebas (acercamiento)	87
Figura IV.14.- Volumen que pueden ocupar los gases de la deflagración inicial de la pólvora	90
Figura IV.15.- Corte longitudinal del volumen del sistema obturado (acot. mm.)	90
Figura IV.16.- Corte longitudinal del mallado 3D del sistema de cierre hermético propuesto	91
Figura IV.17.- Espacio de salida para el transductor piezoeléctrico, dentro de la malla del sistema de cierre hermético propuesto (acercamiento)	92
Figura IV.18.- Unión del estriado del cañón con la parte cilíndrica de la bala Cal. 7.62 mm sin núcleo, dentro de la malla del sistema de cierre hermético propuesto (acercamiento)	92

CAPÍTULO V.- MANUFACTURA DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA DE CIERRE, ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Figura V.1.- Goma arábica	99
Figura V.2.- Pólvora sin humo de doble base esférica	99
Figura V.3.- Molde para cilindros de pólvora	99

Índice de figuras	xx
Figura V.4.- Cilindro de pólvora aglutinada	99
Figura V.5.- Proceso de embutido: 1) Inicio de la operación, antes de que el punzón toque la pieza acoplada y 2) Cerca del fin de la carrera [Groover, 2007]	100
Figura V.6.- Máquinas típicas de embutido profundo empleadas en la fabricación de ojivas	101
Figura V.7.- Proceso de fabricación de ojivas sin núcleo Cal. 7.62 mm, primer segmento	102
Figura V.8.- Proceso de fabricación de ojivas sin núcleo Cal. 7.62 mm, segundo segmento	103
Figura V.9.- Proceso de fabricación de ojivas sin núcleo Cal. 7.62 mm, tercer segmento	104
Figura V.10.- Prototipo fabricado de la ojiva calibre 7.62 mm sin núcleo	105
Figura V.11.- Ojiva calibre 7.62 mm FMJ, con núcleo de plomo	105
Figura V.12.- Munición Cal 7.62 x 51 mm FMJ y munición prototipo Cal. 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo	106
Figura V.13.- Máquina típica de brochado vertical para la fabricación del estriado de cañones	107
Figura V.14.- Cañones prototipo calibre 7.62 mm; vista exterior (arriba) y corte transversal de la recámara (abajo)	108
Figura V.15.- Centro de torneado de control numérico por computadora	109
Figura V.16.- Cabezas de cierre prototipo del sistema de cierre hermético ampliado	109
Figura V.17.- Película de goma arábica de 1 mm de espesor	110
Figura V.18.- Prueba de solubilidad de la película de goma arábica en agua	110

Figura V.19.-	Combustión de una película de goma arábica	111
Figura V.20.-	Incombustos generados por una película de goma arábica	111
Figura V.21.-	Cilindro de 1 g de pólvora aglutinada con goma arábica	113
Figura V.22.-	Prueba de solubilidad de un cilindro de 1 g. de pólvora aglutinada	113
Figura V.23.	Deflagración del propelente	113
Figura V.24.-	Incombustos generados	113
Figura V.25.-	Calorímetro Diferencial de Barrido marca Perkin Elmer, modelo Pyris Diamond	115
Figura V.26.-	Termo-grama de pólvora de doble base normal	116
Figura V.27.-	Termo-grama de pólvora de doble base humedecida	116
Figura V.28.-	Banco y cañón de pruebas Cal. 7.62 mm	117

CAPÍTULO VI.- ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

Figura VI.1.-	Presión de los gases cuando el proyectil se encuentra en el cañón a 5 mm de distancia, en los sistemas de cierre (a) convencional y (b) hermético propuesto.	121
Figura VI.2.-	Eje longitudinal en el interior del modelo mallado para la el sistema de cierre convencional Cal. 7.62 x 51 mm FMJ, (a) plano de simetría y (b) vista isométrica del modelo 3D.	123
Figura VI.3.-	Gráfica de la presión en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 5 mm, en el sistema de cierre convencional calibre 7.62 x 51	

	mm FMJ.	124
Figura VI.4.-	Gráfica de la presión en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 5 mm, en el sistema de cierre hermético propuesto calibre 7.62 mm.	125
Figura VI.4.-	Presión de los gases cuando el proyectil se encuentra en el cañón a 446 mm de distancia, en los sistemas de cierre (a) convencional y (b) hermético propuesto.	126
Figura VI.5.-	Gráfica de la presión en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 446 mm, en el sistema de cierre convencional calibre 7.62 x 51 mm FMJ.	127
Figura VI.7.-	Gráfica de la presión en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 446 mm, en el sistema de cierre hermético propuesto calibre 7.62 mm.	128
Figura VI.8.-	Temperatura de los gases cuando el proyectil se encuentra en el cañón a 5 mm de distancia, en los sistemas de cierre (a) convencional y (b) hermético propuesto.	129
Figura VI.9.-	Gráfica de la temperatura en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 5 mm, en el sistema de cierre convencional calibre 7.62 x 51 mm FMJ.	130
Figura VI.10.-	Gráfica de la temperatura en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 5 mm, en el sistema de cierre hermético propuesto calibre	

	7.62 mm.	131
Figura VI.11.-	Temperatura de los gases cuando el proyectil se encuentra en el cañón a 446 mm de distancia, en los sistemas de cierre (a) convencional y (b) hermético propuesto.	133
Figura VI.12.-	Gráfica de la temperatura en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 446 mm, en el sistema de cierre convencional calibre 7.62 x 51 mm FMJ.	134
Figura VI.13.-	Gráfica de la temperatura en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 446 mm, en el sistema de cierre hermético propuesto calibre 7.62 mm.	135
Figura VI.14.-	Vectores de velocidad de los gases cuando el proyectil se encuentra en el cañón a 5 mm de distancia, en los sistemas de cierre (a) convencional y (b) hermético propuesto.	136
Figura VI.15.-	Gráfica de la velocidad en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 5 mm, en el sistema de cierre convencional calibre 7.62 x 51 mm FMJ.	137
Figura VI.16.-	Gráfica de la velocidad en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 5 mm, en el sistema de cierre hermético propuesto calibre 7.62 mm.	138
Figura VI.17.-	Vectores de velocidad de los gases cuando el proyectil se encuentra en el cañón a 446 mm de distancia, en los sistemas de cierre (a)	

	convencional y (b) hermético propuesto.	140
Figura VI.18.-	Gráfica de la velocidad en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 446 mm, en el sistema de cierre convencional calibre 7.62 x 51 mm FMJ.	141
Figura VI.19.-	Gráfica de la velocidad en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 446 mm, en el sistema de cierre hermético propuesto calibre 7.62 mm.	142
Figura VI.20.-	Curva de presión-tiempo experimental para la munición 7.62 x 51 mm FMJ en un sistema de cierre convencional.	144
Figura VI.21.-	Curva de presión-tiempo experimental del disparo de la munición 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo, en el sistema de cierre hermético propuesto.	145
Figura VI.22.-	Curvas de presión experimentales y numéricas obtenidas para el disparo de la munición 7.62 x 51 mm FMJ y la munición 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo.	151
Figura VI.23.-	Pruebas de fuego con el sistema de cierre hermético propuesto, adaptado en un Rifle Marlin XL7 Cal. 7.62 x 51 mm (0.308 WIN).	152
Figura VI.24.-	Disparo de una munición (a) 7.62 x 51 mm FMJ en un sistema de cierre convencional y de una munición (b) 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo en el sistema de cierre hermético propuesto.	153

ÍNDICE DE TABLAS**CAPÍTULO I.- ESTADO DEL ARTE SOBRE SISTEMAS DE CIERRE, ARMAMENTO Y MUNICIONES SIN CASCO.**

Tabla I.1.-	Especificaciones balísticas del Cartucho Cal. 9 x 19 mm <i>Parabellum</i> , [MIL-C-70508]	17
-------------	--	----

CAPÍTULO III.- DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA DE CIERRE

Tabla III.1.-	Metodología de la etapa de investigación empleada en el diseño mecánico	50
Tabla III.2.-	Armamento analizado y caracterizado para el diseño del sistema de cierre	51
Tabla III.3.-	Especificaciones balísticas de cartuchos estandarizados	52
Tabla III.4.-	Resultados del análisis químico de cañones de distinto armamento	59
Tabla III.5.-	Tipos de acero empleado en cañones de distinto armamento	60
Tabla III.6.-	Resultados de pruebas mecánicas en cañones de distinto armamento	60
Tabla III.7.-	Sistemas de cierre propuestos	61
Tabla III.8.-	Resultados del análisis modal de fallos de los sistemas de cierre propuestos	67
Tabla III.9.-	Especificaciones de la composición química del Acero AISI 4140	69
Tabla III.10.-	Resultados de pruebas mecánicas a muestras de Acero AISI 4140	71

CAPÍTULO V.- DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA DE CIERRE

Tabla V.1.-	Metodología empleada en la manufactura y experimentación	97
Tabla V.2.-	Resultados de la prueba de solubilidad de películas de goma arábica	111
Tabla V.3.-	Resultados de la prueba de combustión de películas de goma arábica	112
Tabla V.4.-	Resultados de la prueba de combustión de cilindros de pólvora aglutinada	114

CAPÍTULO VI.- ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

Tabla VI.1.-	Metodología empleada para la comparación de resultados.	120
Tabla VI.2.-	Presión de los gases en el cañón, con una distancia del proyectil de 5 mm.	122
Tabla VI.3.-	Presión de los gases en el cañón, con una distancia del proyectil de 446 mm.	122
Tabla VI.4.-	Temperatura de los gases en el cañón, con una distancia del proyectil de 5 mm.	132
Tabla VI.5.-	Temperatura de los gases en el cañón, con una distancia del proyectil de 446 mm.	132
Tabla VI.6.-	Velocidad de los gases en el cañón, con una distancia del proyectil de 5 mm.	139
Tabla VI.7.-	Velocidad de los gases en el cañón, con una distancia del proyectil de 446 mm	139

Tabla VI.8.-	Presión máxima experimental de las curvas características seleccionadas.	145
Tabla VI.9.-	Resultados de la presión experimental obtenida en 5 pruebas de 10 disparos cada una, medidos en el transductor piezoeléctrico (Recámara del cañón).	146
Tabla VI.10.-	Velocidad experimental del proyectil de los disparos característicos seleccionados.	147
Tabla VI.11.-	Resultados de la velocidad experimental obtenida en 5 pruebas de 10 disparos.	148
Tabla VI.12.-	Comparativo de los resultados de la presión máxima en la recámara.	148
Tabla VI.13.-	Comparativo de los resultados de presión y velocidad a la salida del proyectil Cal. 7.62 mm en el sistema de cierre hermético propuesto.	
Tabla VI.14.-	Comparativo de los resultados de presión y velocidad a la salida del proyectil de la munición Cal. 7.62 x 51 mm FMJ, del sistema de cierre convencional.	149
Tabla VI.15.-	Valores de presión calculados numéricamente para el disparo de la munición Cal. 7.62 x 51 mm FMJ y de la munición propuesta Cal. 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo.	150

GLOSARIO

Avancarga Arma que es cargada desde la boca del cañón.

Arma de

fuego: Aquella en que el disparo se verifica mediante la pólvora u otro explosivo.

- *Automática:* La de fuego en la cual el ciclo completo de cargar, amartillar, disparar y extraer es completamente mecánico.
- *Semiautomática:* La de fuego en la que todas las operaciones son automáticas con excepción del disparo que ha de accionarse por el agente.
- *De chispa:* La de fuego cuyo cebo se inflama con las chispas que da el rastrillo herido por el pedernal.
- *De percusión:* La de fuego cebada con mixto fulminante, cuya explosión se produce por golpe.
- *De precisión:* La de fuego construida de modo que su tiro es más certero que el de las ordinarias.
- *Ligera:* La de fuego manejable con una sola mano y todas las transportables sin auxilio de tracción animal o de motor.
- *Pesada:* La de fuego, que exige ganado o empleo de motores para su transporte.
 - *Mecanizada:* La que dispara desde el propio vehículo que la desplaza.
 - *Motorizada:* La que se desplaza con auxilio de camión o tractor.
 - *Naval:* La que se encuentra en dotación en buques de guerra.

Bala	Ver ojiva.
Calibre	Diámetro interno del cañón del arma, en unidades del Sistema Internacional ó Ingles, bajo el cual comúnmente se clasifican los cartuchos o municiones.
Cápsula	Fabricada por dos componentes (tacilla y yunque), mantiene una carga de estifnato de plomo entre estos, que al momento de recibir el impacto del martillo detona y produce un dardo de fuego que inicia la carga de pólvora.
Casco	Fabricado usualmente de latón 70/30 o de acero, constituye el cuerpo de la munición, alojando la carga de pólvora y ensamblándose en conjunto con la capsula y la ojiva.
Carga	Cantidad de pólvora empleada como propulsor, la cual tiene por objeto deflagrar para producir una gran cantidad de gases, aumentando la presión al expandirse a muy alta velocidad pero sin llegar a detonar, ocasionando el desprendimiento de la ojiva y su impulso a través del tubo cañón.
Cartucho	Conjunto de un proyectil, su sistema de propulsión y todos los componentes necesarios para que se produzca un disparo en armas de pequeño (< 20 mm) y mediano calibre (< 40 mm).
Deflagración	Es la reacción en que los materiales explosivos se descomponen en un rango por debajo de la velocidad sónica del material, siendo esta propagada por la liberación de calor de la reacción, y la dirección de flujo de los productos de la reacción es opuesta a la de propagación de la descomposición. La combustión de una pólvora o de la carga de un cohete, es un proceso de deflagración. El modo

-
- de reacción de un material explosivo (deflagración o detonación), depende de su modo de actuación (para inflamar, para iniciar).
- Detonación** Es una reacción química dada por una sustancia explosiva la cual produce una onda de choque. Altas temperaturas y gradientes de presión son generados en la onda frontal, debido a que la reacción química es iniciada instantáneamente. Las velocidades de detonación se encuentran en el rango aproximado de 1,500 a 9,000 m/s (5,000 a 30,000 ft/s); las reacciones explosivas más lentas, que son propagadas por conducción térmica y radiación, son conocidas como Deflagración.
- Munición** (del latín *munire*, proveer), Término generalmente empleado para describir todos los materiales de guerra que tienen como finalidad el producir una fuerza en contra de un objetivo, pudiendo referirse a productos tan diversos como bombas, misiles, minas y cartuchos entre otros.
- Ojiva** Proyectil disparado desde el arma, existen diversos tipos dependiendo de su aplicación, siendo las más comunes:
- *Tipo FMJ (Full Metal Jacket)*; fabricadas con una capa o cubierta de latón 90/10 con un núcleo de plomo.
 - *Tipo JHP (Jacket Hole Point)*; fabricadas con cubierta de latón 90/10 con un núcleo de plomo, pero con un pequeño orificio en la punta.
 - *Tipo JSP (Jacket Soft Point)*; fabricadas con cubierta de latón 90/10 con un núcleo de plomo, pero sobresaliendo una parte del plomo en la punta.

-
- *Tipo AP (Armor Piercing)*; fabricadas con una capa o cubierta de latón 90/10 con un núcleo de acero.
 - *Tipo SS109 (Armor Piercing)*; fabricadas con una capa o cubierta de latón 90/10 con un núcleo de acero y plomo, principalmente empleadas en los cartuchos cal. 5.56 x 45 mm.
- Parabellum (del latín *parabellum*, para la guerra). Término empleado para designar una ojiva FMJ de 7.90 g de peso empleada en el cartucho calibre 9 x 19 mm, toda vez que existen ojivas de diferentes pesos y tipos para este mismo calibre.
- Pólvora Mezcla explosiva cuya descomposición presenta las características de una combustión o deflagración relativamente rápida (dependiendo de la composición). Existen diversas variantes siendo el principal ejemplo la pólvora negra, constituida de nitrato de potasio, azufre y carbón vegetal, es higroscópica, produce bastantes residuos sólidos al arder y deflagra a velocidades de hasta 400 m/s, teniendo aplicaciones actuales en pirotecnia y minería.
- Pólvora sin humo Las pólvoras sin humo reducen ampliamente la emisión de humos y residuos sólidos, en comparación con el empleo de pólvora negra en las armas de fuego, su principal componente es la nitrocelulosa y dependiendo del resto de sus componentes se clasifica en tres tipos:
- *De simple base.*- la nitrocelulosa se gelatiniza y se le adicionan aditivos para mejorar su estabilidad, propiedades mecánicas, su temperatura de combustión,

etc. Entre estos componentes se citan a la difenil amina, ftalato de dibutilo, sulfato de potasio, dinitrotolueno y solventes como el alcohol y éter.

- *De doble base.*- se les incorpora nitroglicerina con el fin de aumentar su contenido energético. En relación a las de simple base presentan un color más homogéneo, granos más suaves al tacto y son más estables, aunque presentan el inconveniente de disminuir la vida útil del arma al erosionar en mayor grado el cañón por el calor que desprenden.
- *Las de triple base.*- contienen además de nitroglicerina, nitroguanidina, la cual tiene la función de disminuir el fogueo, por lo que se emplea en armas en vehículos y cañones de tiro rápido.

Poder de

parada

También llamado de detención, es la capacidad que tiene un determinado cartucho para producir la incapacitación de un cuerpo vivo de un sólo disparo. Siendo a mayor cantidad de energía contenida en el proyectil en vuelo, mayor la energía que será transferida al blanco, en relación con el área del proyectil.

Propelente

Sustancia combustible que produce calor y partículas de eyección. Propelente de aerosol Gas o vapor a presión contenido en un recipiente que, mediante descompresión y expansión a través de una válvula, expulsa las sustancias contenidas en la mezcla presurizada [Larousse, 2012].

Viscosidad

Propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza. Los fluidos de alta viscosidad presentan una cierta resistencia a fluir; los

fluidos de baja viscosidad fluyen con facilidad. La fuerza con la que una capa de fluido en movimiento arrastra consigo a las capas adyacentes de fluido determina su viscosidad.

Volumen de

fuego Cantidad de disparos que se pueden realizar en un tiempo determinado.

SIMBOLOGÍA

α	Ángulo del estriado
β	Coefficiente de efecto posterior (<i>after effect coefficient</i>)
λ	Fuerza del propelente con unidades de energía / masa
θ	Factor de forma del grano
ρ	Densidad
μ	Coefficiente de fricción
A	Empirical constant equal to 4
B	Empirical constant equal to 0.5
F_R	Fuerza de gas
F_{Pr}	Fuerza de resistencia del proyectil
F_T	Fuerza del estriado
i	Net rate of production of species due to the r reaction
k	Radio de giro del proyectil
l	Longitud inicial de la recamara
P	Presión, Presión estática
p_s	Presión en la base del proyectil (<i>shot</i>)
p_B	Presión en la recamara (<i>breech</i>)
p_R	Presión de resistencia al movimiento del proyectil (fuerza/área del cañón)
\bar{p}	Presión media del volumen detrás del proyectil
S_0	Distancia de la base del proyectil hasta la boca del cañón

T	Temperatura, Temperatura absoluta
t	Tiempo
t_n	Tiempo de la fase de vaciado de gases del cañón
V, V	Velocidad.
V_{boca}	Velocidad del proyectil en la boca del arma
V_{Ra}	Velocidad en que se recorre la distancia S_{Ra}
V_{Re}	Velocidad en que se recorre la distancia S_{Re}
w_p	Masa del proyectil
w_l	Masa efectiva del proyectil, que incluye la fricción que genera el estriado y la resistencia debido a la compresión del aire delante del proyectil
w_{ret}	Masa de retroceso del arma
\ddot{x}	Aceleración del proyectil
x_g	Posición x del centro de masa del gas detrás del proyectil
Y_P	Mass fraction of any product species P
$Y_{\mathbf{R}}$	Mass fraction of a particular \mathbf{R} reactant

INTRODUCCIÓN



“La mala medición del incompetente se debe a un error sobre sí mismo, mientras que la mala medición del competente se debe a un error acerca de los demás”

EFECTO DUNNING-KRUGER

Kruger, J., y Dunning, D., Unskilled and Unaware of It: How Difficulties in Recognizing One's Own Incompetence Lead to Inflated Self-Assessments., *Psychology*, Vol. 1, pp. 30-46, doi:10.1037/0022-3514.77.6.1121, 2009

INTRODUCCIÓN

La defensa es un mecanismo natural por el que un organismo se protege de agresiones externas, que en el caso de los seres humanos la defensa física comúnmente se efectúa a través de un arma que por definición es un instrumento, medio o máquina destinados a atacar o a defenderse. Este trabajo de investigación emplea las características de un arma, de fuego, semiautomática, de percusión y ligera, que también suelen ser conocidas como armas de fuego de pequeño calibre, siendo aplicable en un rifle o fusil de asalto, cuyo ciclo de funcionamiento puede describirse a través de los campos de estudio de los materiales, termodinámica, aerodinámica y balística, entre otras [RAE, 2012].

El desarrollo de las armas de fuego lleva más de 765 años de existencia, desde los primeros registros de su uso entre el 1247 y 1311 en España y en 1313 en Alemania, teniendo su mayor auge durante los conflictos armados y siendo impulsado en la actualidad, principalmente por las industrias bélicas públicas y privadas de países desarrollados [Heard, 2008].

Las primeras armas de fuego, se fabricaron con un pequeño cañón de hierro forjado o bronce, sujeto en un marco con tiras de metal o de cuero [Heard, 2008]. Estas armas empleaban pólvora, iniciada (*encendida*) mediante mechas externas encendidas previamente y disparaban bolas redondas de plomo, las cuales se cargaban por delante del arma (*sistema avancarga*). El principal defecto de estas armas era su baja precisión en los impactos, sin embargo se mantuvieron en uso

durante varios siglos, debido a que eran muy fáciles de fabricar gracias al bajo punto de fusión del plomo ($327.66\text{ }^{\circ}\text{C}$) y de estandarizar por su peso y radio [*Cambou, 2003*].

Durante más de *400* años no hubo cambios significativos en la producción de las armas de fuego, a excepción del sobresaliente sistema de percusión *Flintlock* patentado en *1661* para revólveres, en el que se producía una chispa que iniciaba una carga de pólvora cebada (*cargada*) en el arma y que fuera empleado durante casi *150* años más, hasta la invención del ministro escocés Alexander John Forsyth, que en *1807* revolucionó el encendido de la pólvora mediante el explosivo fulminato de mercurio [*Heard, 2008*].

Las armas de fuego, semiautomáticas, de percusión y ligeras, cuentan con las siguientes cuatro características principales que rigen su funcionamiento:

- El estriado del cañón inventado a principios del siglo XIX, que es un grabado de rayas en su interior, realizado inicialmente recto para evitar la acumulación de residuos y optimizado al producirse con forma de espiral, al darse cuenta de que aumentaba la precisión de los disparos, y emplear ojivas cónicas [*Cambou, 2003*].
- La bala cónica, inventada en *1840* por un oficial de la artillería francesa, con una cavidad posterior que mostraba mejor precisión en comparación con las balas redondas anteriormente empleadas. Lo que se logró al generar menor fricción contra el aire y mantenerse más tiempo

estable durante su vuelo, mediante un movimiento rotacional sobre su propio eje, generado por la fuerza impuesta por el rayado interno del cañón al momento de que su hueco posterior se expandía por la presión de los gases [Cambou, 2003].

- La pólvora sin humo, de *simple base* creada en 1884 por Vieille un químico francés y la de *doble base* desarrollada por Alfred Nobel en 1887, que revolucionó la fabricación de las municiones y el armamento, al aumentar ampliamente la velocidad que puede alcanzarse con la pólvora negra [Heard, 2008].
- El sistema de percusión y un casco metálico, Joshua Shaw (1814) colocó el explosivo fulminato de mercurio en una pequeña taza de hierro, situada sobre un tubo que sobresalía de la parte posterior del cañón, y que al momento de que el martillo golpeaba la tacilla de explosivo, ocasionaba su detonación y se enviaba la flama de fuego a la carga principal en el cañón [Heard, 2008].

Desde la generalización de las armas de fuego con municiones metálicas a partir de 1870 [Heard, 2008], el fulminato de mercurio ha sido reemplazado por estifnato de plomo que es un explosivo más estable, aún persiste el sistema de percusión anular (*rimfire*) en municiones calibre 5.588 mm (0.22 in), aunque en una forma más moderna, y en armamento de mayor calibre se emplea el sistema de percusión central (*centre fire*), con cápsulas tipo *Berdan* o *Boxer*.

Dentro de las armas de fuego ligeras (*small arms*), hay en general cinco categorías en que se pueden clasificar [*Di Maio, 1999*]:

- Pistolas (*Hand guns*), de las cuales se tienen diversos tipos, como:
 - Pistolas de un solo tiro (*Single-shot pistols*),
 - Derringers (*Derringers*),
 - Revólveres (*Revolvers*) y
 - Pistolas automáticas (*Auto-loading pistols 'automatics'*)

- Rifles o fusiles (*Rifles*), que también incluye el siguiente tipo:
 - Rifles o fusiles de asalto (*Assault Rifles*)

- Escopetas (*Shotguns*)

- Subametralladoras (*Submachine Guns / Machine Pistols*) y

- Ametralladoras (*Machine Guns*).

En el caso de los rifles, el término de *asalto* se emplea para designar algunos tipos, no obstante en la mayoría de las ocasiones se usa de forma errónea principalmente por los medios de comunicación, al referirse a todas las armas con capacidad de *auto carga*, a las pistolas *grandes* con cargadores de 20 a 40 tiros, o a versiones semiautomáticas de fusiles ametralladoras como la UZI cal. 9x19 mm [*Di Maio, 1999*].

Para que un arma de fuego se considere como rifle de asalto debe cumplir con las siguientes cuatro características; ser de auto-carga (*abastecer una munición automáticamente*), tener cargadores desmontables con capacidad de 20 tiros o más, capacidad de tiro automático y disparar municiones de pequeño calibre, menores a 20 mm [Di Maio, 1999].

Asimismo, para que un arma de fuego sea automática ó semiautomática, debe aprovechar la energía que se produce por la expansión de los gases durante la deflagración de la pólvora, la cual se produce principalmente entre la obturación transitoria de los siguientes componentes:

- La recámara del arma y el casco de la munición.
- La ojiva de la munición y el tubo cañón del arma.

Esta interacción representa una cámara de combustión en el arma que ha sido ampliamente estudiada a nivel mundial, no obstante en municiones sin casco (*caseless ammunition*), la recámara del arma y la obturación de la ojiva con el tubo cañón, son la cámara de combustión transitoria de este tipo de armamento.

Bajo este concepto se encuentra el tema de investigación propuesto, planteándose el diseño de un sistema de cierre hermético y el análisis de su comportamiento debido al efecto del propelente de una munición sin casco (*caseless*), que pueda ser aplicado en el desarrollo de una nueva arma que aumente la capacidad del tirador. Las municiones sin casco se conforman de un proyectil unido a

un propelente que se encuentra aglutinado a su alrededor, en una pieza sólida, sin casco y teniendo el iniciador en la parte trasera del propelente.

Este armamento y municiones se desarrollan para aumentar la probabilidad de que una ojiva impacte un blanco, es por ello el interés de estudiar y diseñar un sistema de cierre hermético que conforme la cámara de combustión del arma (*recámara*), y que pueda contener los gases resultantes de la deflagración de la pólvora, necesarios para impulsar un proyectil a través del rayado del tubo cañón del arma y alcanzar un objetivo efectivamente. La solución a este planteamiento se desarrolla en el capitulo de esta tesis, efectuándose en el Capítulo I la recopilación bibliográfica del Estado del Arte, en el que se resumen las investigaciones e invenciones más importantes relativas a las condiciones que presentan los propelentes sólidos y líquidos en cámaras de combustión y en contenedores sometidos a altas presiones; en balística interna la fricción generada por el paso de las ojivas en el interior del cañón de las armas; y en balística exterior, las condiciones que presentan diversos tipos de ojivas al salir de la boca de fuego de diferentes sistemas de armamento, así como la descripciones de aplicación sobre sistemas de armamento y municiones sin casco (*caseless*). En el Capítulo II se plantea el marco teórico de los conceptos más relevantes referentes a este trabajo de investigación, siendo las descripciones de balística interior, balística exterior, análisis numérico, armamento y municiones. En el Capítulo III se presenta el diseño del sistema de cierre propuesto para municiones sin casco, resultante de un Análisis Modal de Fallos y Efectos (*AMFE*) enfocado a diseño, para la obtención de un producto de calidad robusta. El Capítulo IV desarrolla el análisis numérico del proyectil en la recámara del

sistema de cierre propuesto, así como su desplazamiento a través del tubo cañón del arma. El Capítulo V describe los procesos de manufactura de los prototipos, así como el método experimental y los ensayos realizados para el análisis de los parámetros balísticos. Posteriormente en el Capítulo VI, se analizan los resultados obtenidos y se hacen las comparaciones correspondientes; para finalizar con las conclusiones de esta investigación.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE SOBRE SISTEMAS DE CIERRE, ARMAMENTO Y MUNICIONES SIN CASCO



*“Lo que llamamos casualidad no es más
que la ignorancia de las causas físicas”*

GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ, Filósofo, lógico, matemático, jurista, bibliotecario y político alemán, se le reconoce como "El último genio universal".
(01 JUL. 1646 – 14 NOV. 1716)

I.1.- Generalidades

En la actualidad, la mayor parte del armamento convencional de pequeño calibre mantiene una estrecha relación con los componentes del armamento creado hace más de 140 años. Cuando se inició el empleo en conjunto de municiones con casco metálico, ojivas cónicas, cañones estriados y principalmente con la introducción de la pólvora sin humo de doble base en 1873 [Heard, 2008], no obstante se ha tenido una evolución y estandarización del armamento, municiones, materiales y procesos, con lo que se ha logrado una mayor eficiencia de las armas de fuego.

En la Figura I.1 se describe una forma general de identificar a los principales componentes de un fusil, toda vez que éstos se fabrican con una gran cantidad de piezas y componentes, que varían conforme los diferentes tipos y modelos existentes en el mercado.



Figura I.1.- Diagrama de bloques de los principales componentes de un fusil convencional.

Conforme a las descripciones descritas en la Introducción y a los aspectos generales de clasificación, un fusil como el mostrado en la Figura I.2, se encuentra comprendido como un *arma de fuego, semiautomática* (con capacidad de abastecer automáticamente una nueva munición después del primer disparo), de *percusión* (que cuenta con un percutor para iniciar la munición), *ligera* (puede ser cargada por un solo individuo) y *larga* (por la forma de empuñar el arma en el hombro).



Figura I.2.- Fusil (carabina) M4 A1 calibre 5.56 x 45 mm [M4A1 Technical manual, 1997].

Asimismo en la Figura I.3 se muestra un fusil M16 separado en los grupos nombrados anteriormente, siendo:

- Cañón y cajón de mecanismos; Comprende el cañón del arma, el cual comúnmente es unido por parte del fabricante a un cajón, en el que el usuario puede ensamblar el resto de los componentes o grupos.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

- El sistema de cierre; comprende el mecanismo de apertura y cierre que permite la introducción de una munición a la recámara del arma, quedando “cargada” y lista para ser disparada. Sus componentes principales son la cabeza de cierre, el percutor y dependiendo del tipo de fusil, un soporte de cierre ó un cerrojo sobre el que se monta la cabeza de cierre.



Figura I.3.- Identificación de los principales componentes de un fusil M4 A1 [*M4A1 Technical manual, 1997*].

- El mecanismo de disparo; es el dispositivo que trasmite la acción del usuario sobre el disparador, para liberar un martillo que golpea el percutor e inicia el disparo de la munición, en muchos casos cuenta con un selector de cadencia de tiro para disparar controladamente en tiro a tiro, ráfagas de tres disparos, o de forma automática.
- Estructura; es el soporte de los diferentes mecanismos del arma, siendo principalmente el guardamano, la empuñadura y la culata.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

- Órganos de puntería; es el sistema empleado para apuntar el arma hacia un blanco, comúnmente son el alza de mira y el grano de mira, aunque pueden ser también sofisticadas miras ópticas ó optoelectrónicas, que emiten un haz de rayo laser.
- Cargador y accesorios; el cargador es el componente que almacena las municiones y permite abastecer el arma, su capacidad normalmente es de 20 a 30 municiones. Asimismo los accesorios son toda la gama de dispositivos que pueden montarse en el fusil, como lo son los bípodes, lámparas, miras adicionales, porta-municiones, etc.

En la Figura I.4. se observa el Fusil de Asalto Steyr AUG calibre 5.56 x 45 mm, que tiene una configuración diferente, aunque mantiene los componentes descritos anteriormente.



Figura I.4.- Esquema del interior de un fusil Steyr AUG, calibre 5.56 x 45 mm tipo *bullpup* [Steyr AUG cutaway view, 2012].

Este fusil fue desarrollado en Austria en el año 1977, dando inicio a una nueva configuración que se denomina *bullpup*, en el que se recorrió el mecanismo de disparo delante de la recámara y el sistema de cierre, con lo que se disminuyó la longitud total y el peso del arma [Hereward, 2006].

I.2.- Estado del arte

1.2.1.- En propelentes sólidos y líquidos

Dentro de las condiciones que se presentan en cámaras de combustión o en contenedores sometidos a altas presiones, existen diversos estudios a nivel mundial cuyos conceptos son representativos de los efectos del disparo, sobre el conjunto de la recámara y el sistema de cierre de un arma, así como en el casco de la munición convencional. Fletcher [2000] investigó sobre la combustión de un flujo retenido en un gasificador de biomasa, modelando las partículas de biomasa con un enfoque de Lagrange y resolviéndolas ecuaciones de transporte mediante el método Computacional de Dinámica de Fluidos (*CFD; Computational Fluid Dynamics*).

Lacaze [2009], realizó un estudio numérico mediante la simulación de gran turbulencia (*LES; Large Eddy Simulation*) de una secuencia de ignición laser y la reacción de un flujo compresible en un cohete, empleando imágenes *Schlieren* y mediciones de presión para caracterizar la propagación de la flama experimentalmente y compararla con los resultados numéricos. Shekhar [2011], analizó los efectos cambios en la temperatura sobre las propiedades mecánicas de los combustibles sólidos de un cohete.

En ese mismo año Werle [2011] realizó una investigación sobre el fenómeno de ignición de combustibles de hidrocarburos como oxidantes de alta temperatura, en una bomba de volumen constante, empleó como oxidantes metano y propano, precalentándolos de 780-890 °C y de 630-680 °C respectivamente, y manteniendo el intervalo de relación del exceso del aire aproximadamente de 1.0 a 1.1, con el fin de lograr el retraso mínimo en el tiempo de encendido (la velocidad máxima de reacción) y el máximo incremento de temperatura.

Werle encontró que aunque el valor óptimo de la temperatura del oxidante es probablemente función del tipo de la cámara de combustión, la intensidad de la mezcla y otros factores, es posible transferir los resultados de su experimentación en un reactor a uno en instalaciones reales. Chen [2014], empleó la simulación de gran turbulencia (*LES; Large Eddy Simulation*) para determinar los efectos de la difusión diferencial sobre una flama de propulsión a chorro.

I.2.2.- En balística interna

Se han identificado investigaciones y publicaciones relacionadas, como la efectuada por Jinyuan Tang [2009] en la que realizó un modelo matemático para determinar las fuerzas de fricción en superficies rugosas, considerando diversos parámetros como el coeficiente de fricción y realizando comparaciones con resultados experimentales. Luděk Jedlička [2008] efectuó un análisis experimental en proyectiles anti-aéreos calibre 30 mm, modelando el gradiente de presión que se genera detrás del proyectil durante el disparo.

Wright [2010], realizó estudios en una cámara de combustión cerrada para un flujo de auto encendido de n-Heptano en un motor diesel. Jaramaz [2011], realizó estudios en el flujo de gases en el interior de un tubo cañón, considerando un flujo de dos fases. Dejan Mickovic [2013] determinó la presión que se genera en la parte posterior de los proyectiles durante el ciclo del disparo en cañones de 100 mm, Heath T. Martin [2013] analizó el efecto de la temperatura inicial en la balística interior de un sistema de mortero calibre 120 mm, y Hyung-Gun Sung [2013] aplicó las ecuaciones de Euler-Lagrange en un flujo de gas-sólido.

Estos estudios consideran los gases producidos por el encendido o combustión del propelente como un flujo turbulento compresible, el cual dada su complejidad comúnmente es resuelto con la Dinámica de Fluidos Computacional (*CFD; Computational Fluid Dynamics*), variando el enfoque de análisis a través de las ecuaciones que gobiernan el sistema, como en los estudios efectuados por Sung [2013], en el que aplicó un modelo de *Euler-Lagrange* en el flujo de gas sólido en balística interior.

Asimismo las ecuaciones *Promediadas de Reynolds Navier-Stokes (RANS; Reynolds-Averaged Navier-Stokes)* fueron empleadas por Balabel [2011], en la evaluación en dos dimensiones del modelo de un flujo de gas de la tobera de un cohete convergente-divergente y por El-Askary [2011], en el cálculo del flujo turbulento compresible en la cámara de combustión de un cohete, considerando una inyección simétrica y asimétrica.

Las ecuaciones de Simulación Numérica Directa (DNS; *Direct Numerical Simulation*) actualmente se consideran el método más exacto, pero también el que requiere de mayor capacidad computacional, ya que la totalidad de las estructuras turbulentas deben de ser consideradas, como en el estudio de Bravo [2013], en el que simuló la combustión cercana a la pared de un flujo turbulento de capa límite y en el realizado por Gorji [2014], en el que comparó los modelos de turbulencia en un flujo de canal transitorio.

No obstante el modelo de *Large Eddy (LES; Large Eddy Simulation)* presenta mejores resultados en algunos casos, ya que resuelve directamente el movimiento a gran escala y aproxima el movimiento del flujo en pequeña escala, siendo empleado por Konopka [2011], al simular una película de enfriamiento supersónica con gradientes de presión finitos; Mathew [2011], estudio diversas aplicaciones de este modelo de simulación; Jung [2012], simuló un flujo turbulento acelerado en un tubo circular; Tu [2013], aplicó estas ecuaciones con un enfoque práctico y Di Mare [2014], modeló el flujo de un motor de combustión interna.

I.2.3.- En balística externa

Zonglin Jiang [2003] realizó dos estudios numéricos de los flujos de choque, producidos por el movimiento de un proyectil supersónico a su salida de un tubo de lanzamiento, los cuales desarrolló mediante la solución de las ecuaciones de *Euler* bajo un esquema de dispersión contralada con condiciones de movimiento límite. Zonglin Jiang determinó que un flujo de choque es caracterizado por los mayores procesos dinámicos de onda, como son: la generación de dos

ondas expansivas, la reflexión de la onda de choque precursora y la principal onda de choque de la segunda onda expansiva.

Asimismo indicó que el proceso dinámico de la onda no cambia significativamente conforme la velocidad del proyectil aumenta, pero sí intensifica las interacciones de la onda induciendo la generación de vórtices y turbulencia en la parte débil detrás del proyectil. Similarmente en su segundo estudio, concluyó que una alta relación de presiones no afecta significativamente el proceso dinámico de la onda, estando principalmente limitado al campo cercano de la boca de un arma, no obstante la aceleración del proyectil si cambia dramáticamente después de su salida del cañón [Jiang, 2003].

Xiaohai Jiang [2008] realizó una simulación numérica del flujo de la expansión de los gases, generados por un proyectil supersónico, basando su cálculo en las ecuaciones *Arbitrarias Lagrange – Euler (ALE; Arbitrary Lagrangian – Eulerian)*, resueltas con una precisión de segundo orden con el método *ROE*, encontrando una intensa interacción entre el flujo precursor, el flujo primario del propelente y el proyectil, lo que genera una onda de choque precursora (*precursor shock*), una onda de choque pequeña (*bow shock*) y una onda expansiva en la boca del arma (*muzzle blast wave*).

En un estudio posterior Xiaohai Jiang en el mismo año, efectuó una simulación numérica similar pero evaluando el lanzamiento del proyectil a mayor número *Mach* (3.0 y 3.6), por lo que empleó

el método *ALE* de las ecuaciones de *Euler* para describir el movimiento a alta velocidad del proyectil, y el esquema *AUSMDV* para resolver las ecuaciones, obteniendo que a una alta relación de presiones la interacción entre la segunda onda expansiva (*second blast*) y el proyectil es más intensa, siendo menor el tiempo para que el proyectil rebasa la onda de choque precursora [*Jiang, 2008*]. Asimismo obtuvo gráficos de sombra computacionales (*numerical shadow graphs*), muy similares a los obtenidos en pruebas experimentales, por lo cual es posible predecir las ondas de expansión del aire y de los gases producidos por la expulsión del proyectil.

Asimismo en el *2011* quien suscribe, investigó sobre el comportamiento del flujo de viento sobre una ojiva con núcleo parcial, determinando mediante un análisis experimental y numérico, que durante el vuelo de las ojiva con estas características, el aire se introduce en su interior, recirculando y permaneciendo constante respecto al régimen de flujo a su alrededor, por lo que su estabilidad no se ve significativamente afectada y su trayectoria de vuelo es parcialmente efectiva en cortas distancias [*Silva, 2011*].

Sobre sistemas de armamento para municiones sin casco (*caseless*); se considera que los primeros desarrollos tecnológicos formales, surgen a partir de la fabricación del fusil *HK G11* (Figura I.5) y de las municiones correspondientes, las cuales no tienen casco (*caseless*) y la pólvora ó propelente presenta un revestimiento especial a fin de mantenerse estable ante la humedad y soportar hasta 100°C sin deflagrar, como la que se aprecia en la Figura I.6 [*Mc Gregor, 2009*].



Figura I.5.-Fusil HK G11 desarrollado por la Sociedad para Sistemas de Armas de Fuego sin casco (GHGS; *Gesellschaft für Hülsenlose Gewehr systeme*).



Figura I.6.-Munición sin casco (*caseless*) cal. 4.73 x 33 mm.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

Esta arma fue desarrollada a partir de 1970, por la *Sociedad para sistemas de armas sin casco* (GHGS; *Gesellschaft für Hülsenlose Gewehr systeme*), de las empresas *Heckler & Koch GmbH*, *Dynamit Nobel* y *Hensoldt/Wetzlar*, que la propusieron en el proyecto de diseño de una nueva arma, solicitado por el Departamento de Defensa de Alemania Occidental y aunque no se aprobó su contratación continuaron su desarrollo culminando sus investigaciones a mediados de la década de 1980 [Mc Gregor, 2009].

Como resultado de estas investigaciones la empresa *Heckler & Koch GmbH*, obtuvo diversas patentes por sus invenciones, como la de Tilo Möller en la configuración de un arma pequeña automática o semiautomática [Möller, 1978], la de Günter Kästner por un arma de hombro con cerrojo giratorio [Kästner, 1976], de igual nombre para la invención de Dieter Ketterer [Ketterer, 1982] y quien tiene otra patente por un medio para abastecer armas de fuego pequeñas incluyendo un cargador y eslabones para municiones [Ketterer, 1979].

Similarmente al proyecto de una nueva arma anterior, en 1986 nuevamente se presentó el fusil *HK G11*, como propuesta para el programa de sustitución del fusil M16 Cal. 5.56 x 45mm del Ejército de los Estados Unidos de América (*ACR; Advanced Combat Rifle*), no obstante tampoco fue posible su adquisición [Spiegel, 2006].

En la década de 1990 la empresa *Heckler & Koch GmbH*, continuó mejorando su desarrollo, siendo ejemplo la obtención de nuevas patentes como la de Raimund Fritz por un arma de fuego

pequeña con receptor [*Fritz, 1992*], Emil Rommel por la configuración del percutor de un arma de fuego [*Rommel, 1993*], Ernst Mauch por un arma de fuego con un puerto para el escape de gases [*Mauch, 1995*], y Helmut Weldle por un rifle automático de peso ligero [*Weldle, 1996*].

James Michael O'Dwyer en Australia realizó diversos estudios sobre armamento, municiones sin casco e iniciación eléctrica, patentando sus invenciones en Estados Unidos, como el montaje de un cañón, un cañón abastecido por tiros axiales con el sellado de la recámara, el montaje de un cañón con proyectiles axialmente apilados, un arma de fuego con municiones apiladas, el sistema de seguridad de un arma de fuego, el montaje de un cañón con alivio de sobrepresión, el montaje de un cañón para armas de fuego, un aparato de disparo de proyectiles y una trampa para la intercepción de misiles mediante la explosión de un conjunto de municiones a una distancia determinada [*O'Dwyer, 2000-2004*], entre otras.

Asimismo O'Dwyer fundó y dirigió la empresa *Metal Storm Limited*, en la que ha manufacturado y comercializado sus invenciones, en el desarrollo de sistemas de lanzamiento confiables de proyectiles que se encuentran apilados por medio de iniciación electrónica, como lanzagranadas montados en plataformas robóticas y armas multi-cañón de diversos calibres, como el mostrado en la Figura I.7, que es un arma calibre 9 mm capaz de disparar más de 1 millón de balas/ min. Actualmente *Metal Storm Limited*, tiene contratos con el gobierno de Estados Unidos como parte de los programas de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (*DARPA; Defense Advanced Research Projects Agency*), así como un acuerdo con la empresa *Singapore*

Technologies Kinetics (el mayor fabricante de municiones cal. 40 mm a nivel mundial) para fabricar y comercializar lanzadores modulares de granadas y sistemas de armamento [*Metal Storm, 2012*].



Figura I.7.- Disparo múltiple del Metal Storm MK3 36 BRL, [Ezell, 2008].

Kori Spiegel [2006] realizó trabajos para el Ejército de los Estados Unidos de América, con el fin de desarrollar una nueva arma bajo el programa Tecnologías para armas ligeras de pequeño calibre (*LSAT; Lightweight Small Arms Technologies*), cuyo objetivo principal era la reducción de peso, manteniendo en balance otras características como letalidad, fiabilidad y costo [Spiegel, 2006]. Se desarrolló entonces una nueva ametralladora ligera y dos tipos de municiones; una con configuración telescópica (*CTA; Cased Telescoped Ammunition*) y una sin casco (*CL; Caseless Ammunition*), la cual se encuentra basada en la munición realizada por la empresa *Dynamit Nobel* en la década de 1980.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

Jan Henrik Jebsen en el 2007 patentó un arma de fuego con características mejoradas de retroceso y control [Jebsen, 2007], con la que logró aumentar la precisión de armamento de pequeño calibre en tiro automático, aplicándolo en la Subametralladora KRISS Vector SMG calibre 11.43 mm (0.45 ACP), fabricada por KRISS USA Inc. en los Estados Unidos, en cuyo mecanismo interno se redirige la fuerza de retroceso del eje axial del arma hacia abajo, con lo que se evita el efecto de elevación del cañón del arma mientras se realizan series de disparos automáticos [Hicke, 2008].

Similarmente Helmut Konicke [2007], inventó un sistema de armamento que permite el disparo de municiones sin casco (*caseless*), requiriendo que estas municiones tengan un sello perfecto en la recámara del arma para evitar que se salgan los gases y se pierda presión.

Finalmente también se tienen estudios de los aglutinantes (*binders*) empleados en este tipo de municiones sin casco (*caseless*), como el realizado por Yang [2014], en el que analizó las características de la combustión de objetos micro-celulares y Hegab [2014], quien modeló la combustión del propelente sólido de un cohete.

I.3.- Planteamiento del Problema

Dadas las condiciones del estado del arte actual, se ha identificado un objetivo muy específico para el desarrollo de esta investigación, la cual considera entonces el diseño y análisis de un sistema de cierre para municiones sin casco, que será la base del posterior diseño de un arma completa para éste tipo de municiones. Por lo que en ese sentido queda abierta la siguiente pregunta:

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

¿El sistema de cierre a diseñar deberá operar *cuasi-herméticamente* para inducir las condiciones y propiedades físicas necesarias que impulsen la ojiva de una munición sin casco, a fin de obtener parámetros balísticos similares o superiores a los del proyectil con núcleo de la munición calibre 9 x 19 mm *Parabellum*?

A este cuestionamiento, se responde con un conjunto de parámetros que delimitarán los alcances del diseño; el cual será evaluado principalmente mediante el análisis de los parámetros balísticos que genere la munición sin casco que se empleará en el sistema de cierre a desarrollar, y que al menos deberá brindar los mismos resultados balísticos del disparo de una munición calibre 9 x 19 mm *Parabellum*, tales como los que se muestran en la Tabla I.1:

Tabla I.1.- Especificaciones balísticas del Cartucho Cal. 9 x 19 mm *Parabellum* [MIL-C-70508].

Especificación	Valor	Notas
Velocidad promedio	385 ± 15 m/s	Registro tomado a una distancia media de 16 m
Presión promedio (recámara)	215 MPa	Establecida en función de las capacidades del tipo de armamento de este calibre
Presión máxima (recámara)	250 MPa	
Alcance máximo efectivo	50 m (54.68 yardas)	En subametralladoras
Precisión (radio medio)	0.038 m (1.50 pulgadas)	Registro tomado en el alcance máximo efectivo

Por lo anteriormente expuesto y debido a que se considera que se tiene poco estudiado el campo de las municiones sin casco, es factible el realizar una investigación sobre un sistema de cierre que opere con estas municiones, la cual será fundamentada y complementada tomando como base los datos, modelos, métodos de prueba y de cálculo, que proceden de fuentes confiables y que fueron realizados bajo un método científico aplicado para armamento de municiones con casco, así como para ojivas con núcleo, ya que estos son en su mayoría calculados para este tipo de municiones y armamento.

I.4.- Sumario

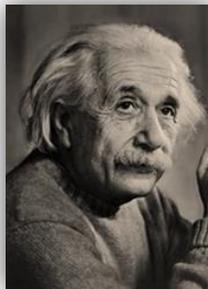
En el presente capítulo se ha mostrado la situación actual de las investigaciones concernientes y que sirven de referencia para la realización de este trabajo, tales como los principales estudios, investigaciones, resultados obtenidos, artículos y patentes relacionadas con el tema de investigación. Además, se ha planteado y delimitado el problema de investigación que será analizado y resuelto en posteriores capítulos, como lo es al describir el marco teórico en el Capítulo II, ya que ahí se definen los conceptos básicos que son aplicados en la determinación del modelo y el desarrollo del método experimental.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

SOBRE BALÍSTICA Y

ARMAMENTO



“No lo se, procuro no cargar mi memoria con datos que puedo encontrar en cualquier manual, ya que el gran valor de la educación no consiste en atiborrarse de datos, sino en preparar al cerebro a pensar por su propia cuenta y así llegar a conocer algo que no figure en los libros.”

Respuesta que le dio a Thomas Alva Edison cuando le preguntó la velocidad del sonido

ALBERT EINSTEIN, Físico alemán de origen judío, nacionalizado suizo, austriaco y estadounidense, desarrollo la teoría de la relatividad general, en la que reformuló el concepto de gravedad.
(14 MAR. 1879 – 18 ABR. 1955)

II.1.- Generalidades

La balística interior se considera una subdisciplina del campo de la balística, y estudia la interacción del arma, proyectil y carga propulsora antes de emerger el proyectil de la boca del cañón. Incluye el proceso de ignición del propelente, su combustión en la recámara del arma, la presurización de la recámara, el primer movimiento del proyectil, el grabado de cualquier banda de rotación y su obturación en la recámara, la dinámica del proyectil en el ánima del cañón y la dinámica del cañón durante el ciclo de fuego. Asimismo dentro de la balística interior, ocasionalmente se emplea una subdisciplina denominada balística intermedia, que comprende desde el movimiento inicial del proyectil hasta su salida de la boca del tubo cañón, incluyendo el flamazo inicial, los saltos del proyectil y del cañón, los efectos de dispositivos rompe flamas (como la supresión del flash y la ventilación en los frenos de boca) y la salida de la ojiva (*sabot discard*) [Carlucci, 2008].

II.2.- Análisis en balística interna

El desarrollo de una carga de propelente que genere en el proyectil de interés la velocidad deseada, dejando el cañón y el arma intactos, sin daños por excesos de presión y con un alta probabilidad de que cargas sucesivas del propelente con los mismos proyectiles produzcan los mismos resultados, es uno de los objetivos del análisis computacional de la balística interna. Por ello se deben de determinar las cargas de propelente necesarias, qué presiones experimentará el arma y el proyectil durante su trayecto a través del cañón, y qué perfiles de velocidad y aceleración se tendrán hasta su salida en la boca del tubo-cañón.

II.2.1.- Gradiente de Lagrange

En la Figura II.1 se puede observar el esquema que sirve de base para representar el movimiento del proyectil a través del cañón, siendo necesarios para determinar el movimiento del proyectil en función del tiempo, hacer algunas suposiciones sobre el comportamiento del gas dentro del arma, las cuales involucran la presión, masa, y la densidad de la distribución del gas [Carlucci, 2008].

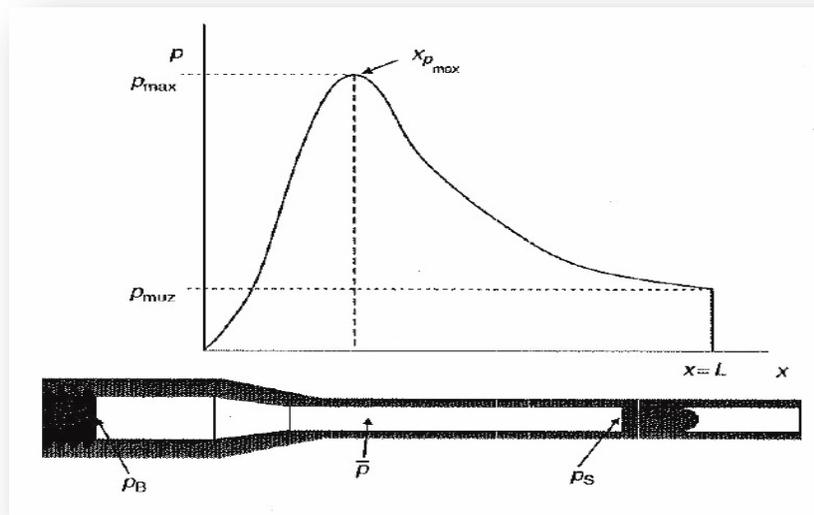


Figura II.1.- Relación presión – distancia en el disparo de un arma de fuego [Carlucci, 2008].

Considerado en este caso en el eje de las abscisas a x , que es la distancia desde la posición del proyectil en su base hasta la ubicación posterior en función del tiempo, es decir el recorrido que hace la ojiva en el interior del tubo cañón, lo que corresponde en el eje de las coordenadas a la presión que se genera conforme se desplaza el proyectil, por lo que se tiene la ecuación II.1:

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = V \quad \text{Ec. II.1}$$

Primero se asume que la densidad del gas es uniforme en el volumen detrás del proyectil en un tiempo t , por lo que se puede escribir para cualquier tiempo:

$$\rho = \rho(x_g, t) \quad \text{Ec. II.2}$$

dónde x_g es la posición x del centro de masa del gas detrás del proyectil.

De la ecuación de continuidad para un fluido compresible se tiene:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_g} (\rho V_{x_g}) = 0 \quad \text{Ec. II.3}$$

Suponiendo la ausencia de un gradiente espacial de densidad y debido a que la densidad no se encuentra en función de x , se pueden remover las derivadas parciales para un término temporal, se tiene:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = - \frac{\partial V_{x_g}}{\partial x_g} \quad \text{Ec. II.4}$$

Si la base del proyectil se ha movido una distancia x , y el área del cañón es A , entonces el volumen del gas detrás del proyectil es:

$$V(t) = Ax(t) \quad \text{Ec. II.5}$$

Ahora se considera que en el punto en que se encuentra el proyectil toda la carga de propelente sólido se ha convertido en gas, entonces el peso inicial de la carga c , es ahora el peso del gas c , por lo que se tiene:

$$\frac{1}{x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial V_{x_g}}{\partial x_g} \quad \text{Ec. II.6}$$

Integrando la ecuación anterior con respecto a x_g y usando las condiciones frontera de $V_{x_g} = 0$, cuando $x_g = 0$, se tiene:

$$\frac{x_g}{x} \frac{dx}{dt} = V_{x_g}(x_g) \quad \text{Ec. II.7}$$

Desde que x es la posición de la base del proyectil en el tiempo t y la $\frac{dx}{dt}$ es la velocidad del proyectil en un tiempo t , entonces:

$$\frac{V}{x} = \frac{V_{x_g}}{x_g} \quad \text{Ec. II.8}$$

Esto implica que la velocidad de las partículas del gas varían linealmente desde la parte posterior de la base del proyectil, siendo fundamental tener una aproximación con el principio de Lagrange, por lo que se puede describir la energía cinética del gas como:

$$KE_g = \frac{1}{2} m_g V_{x_g}^2 \quad \text{Ec. II.9}$$

Considerando que la masa del gas es su densidad multiplicada por el volumen que ocupa en un tiempo t , se obtiene que la energía total cinética del gas, despreciando el retroceso es:

$$KE_g = \frac{1}{6} \rho A x V \quad \text{Ec. II.10}$$

Ahora para la energía cinética del proyectil (*shot*), se tiene:

$$KE_{shot} = \frac{1}{2} w_P V^2 \quad \text{Ec. II.11}$$

dónde w_P es la masa del proyectil

Entonces la aproximación de Lagrange para la energía cinética será:

$$KE_{tot} = \frac{1}{2} w_P V^2 + \frac{1}{6} c V^2 = \frac{1}{2} (w_P + \frac{c}{3}) V^2 \quad \text{Ec. II.12}$$

Lo cual solo es válido considerando que el volumen del gas se encuentra en un área A , de la sección transversal de un cilindro, pero en realidad no es así, pues mientras que el cañón es cilíndrico la recámara no lo es, siendo su diámetro mucho mayor que el del cañón, por lo que se debe de modificar el gradiente de aproximación de Lagrange, siendo estos cambios muy pequeños pero no insignificantes, y que comúnmente son denominados como gradiente de recamareado (*chambrage gradient*).

Para el caso del momento lineal del gas, se define como:

$$Mom_g = m_g V_{x_g} = \frac{1}{2} \rho A x V = \frac{1}{2} c V \quad \text{Ec. II.13}$$

Similarmente el momento lineal del disparo (*shot*), es:

$$Mom_{shot} = w_P V \quad \text{Ec. II.14}$$

Por lo que el momento lineal total del sistema, despreciando el retroceso será:

$$Mom_{tot} = Mom_{shot} + Mom_g = w_P V + \frac{1}{2} cV = \left(w_P + \frac{c}{2} \right) V \quad \text{Ec. II.15}$$

A fin de conocer la presión en la recámara y la velocidad de salida, es necesario desarrollar ecuaciones predictivas de la presión en función de los parámetros de carga y las ecuaciones de movimiento del proyectil. Por lo anterior *Carlucci* empleó un enfoque de Lagrange para seguir el movimiento de una partícula de gas, derivando la ecuación de movimiento para un elemento de gas, y usando la relación entre la densidad y el peso de la carga, obteniendo [*Carlucci, 2008*]:

$$p = -\frac{cx_g^2}{2Ax^2} \ddot{x} + constante \quad \text{Ec. II.16}$$

$$p_S = -\frac{c}{2A} \ddot{x} + constante \quad \text{Ec. II.17}$$

$$p_B = p_S + \frac{c}{2w_1} p_S - \frac{c}{2w_1} p_R \quad \text{Ec. II.18}$$

$$\bar{p} = p_S \left(1 + \frac{c}{3w_1} \right) - p_R \frac{c}{3w_1} \quad \text{Ec. II.19}$$

$$\ddot{x} = \frac{A}{w_1} (p_S - p_R) \quad \text{Ec. II.20}$$

dónde:

p_S = presión en la base del proyectil (*shot*)

p_B = presión en la recámara (*breech*)

\bar{p} = presión media del volumen detrás del proyectil

p_R = presión de resistencia al movimiento del proyectil (fuerza/área del cañón)

\ddot{x} = aceleración del proyectil

w_1 = masa efectiva del proyectil, que incluye la fricción que genera el estriado y la resistencia debido a la compresión del aire delante del proyectil.

Si se grafica la recámara, el espacio medio, y la presión en la base del proyectil, contra la posición de la base del proyectil en x , se observa que existe un gradiente de presión en el que la presión recámara es siempre más grande y la presión de base es más pequeña, siendo este el llamado gradiente de Lagrange, y el cual es fundamental para el modelo del gas propulsor. Hay casos en los que este gradiente se invierte, siendo indicativo de que se tiene una carga propulsora fragmentada causada por una mala ignición, a excepción de las cargas de pólvora progresivas, las cuales están diseñadas para moverse con la aceleración del proyectil.

Ahora es necesario determinar que genera la presión, cuál será la aceleración del proyectil, y cómo la aceleración y el volumen cada vez mayor detrás del proyectil afectan a la presión, empleando las ecuaciones de la combustión de los granos del propelente se obtuvo la ecuación que relaciona la cantidad de propelente que se convierte a gas:

$$\phi = (1 - f)(1 + \theta f) \quad \text{Ec. II.21}$$

dónde θ = es el factor de forma del grano.

Y la razón de la combustión del gas en función de la presión:

$$D \frac{df}{dt} = -\beta \bar{p} \approx \beta p_B \quad \text{Ec. II.22}$$

Asimismo se aplicaron estos datos para obtener el parámetro balístico central denominado M , que es adimensional y está en función del arma, la carga y el proyectil:

$$M = \frac{A^2 D^2}{w_1 c \lambda \beta^2} \left[\frac{1 + \frac{c}{3w_1}}{\left(1 + \frac{c}{2w_1}\right)^2} \right] \quad \text{Ec. II.23}$$

dónde λ = la fuerza del propelente con unidades de energía / masa

La relación entre distancia y la fracción de la malla del propelente restante.

$$\frac{dx}{df} = -M \frac{(x+l)}{(1+\theta f)} \quad \text{Ec. II.24}$$

dónde l = longitud inicial de la recámara

La relación de la velocidad como una función de la malla del propelente restante.

$$V(t) = \frac{AD}{\beta w_1 \left(1 + \frac{c}{2w_1}\right)} [1 - f(t)] \quad \text{Ec. II.25}$$

La trayectoria como una función de la malla restante del propelente, considerando dos distintos casos de θ , uno con $\theta \neq 0$.

$$x + l = l \left(\frac{1+\theta}{1+\theta f} \right)^{\frac{M}{\theta}} \quad \text{Ec. II.26}$$

De manera similar, para $\theta = 0$, la relación de la distancia con la fracción de la malla remanente.

$$x + l = l e^{M(1-f)} \quad \text{Ec. II.27}$$

La presión en la recámara como una función de la malla restante para diferentes funciones de forma:

$$p_B = \frac{\lambda c R_L}{V_i} (1 - f)(1 + \theta f) \left(\frac{1 + \theta f}{1 + \theta} \right)^{\frac{M}{\theta}} \quad \text{para } \theta \neq 0 \quad \text{Ec. II.28}$$

$$p_B = \frac{\lambda c R_L}{V_i} (1 - f)(1 + \theta f) \exp[-M(1 - f)] \quad \text{para } \theta = 0 \quad \text{Ec. II.29}$$

Entonces, sí se quiere conocer la presión en la base del proyectil o la presión del espacio en el volumen detrás del proyectil, sólo es necesario aplicar la aproximación de Lagrange correspondiente a la presión de la recámara.

II.3.- Armamento

Como se describió anteriormente y dada la infinidad de tipos de armamento que existen a nivel mundial, el presente trabajo emplea las características de un rifle o fusil de asalto, que es un arma de fuego, semiautomática, de percusión y ligera, que también suelen denominarse como armas de fuego de pequeño calibre.

II.3.1.- Armamento para municiones sin casco

Este armamento y municiones se desarrollaron para aumentar la probabilidad de que una ojiva impacte un blanco. Las municiones sin casco se conforman del propelente unido alrededor del proyectil en una pieza sólida y sin tener casco, teniendo el iniciador en la parte trasera del propelente.

En teoría, un fusil disparando ráfagas cortas de tiro automático en una tasa muy alta de fuego, tiene una muy alta probabilidad de éxito. El Ejército Alemán determinó [Di Maio, 1999] que permitiendo un error normal de puntería y suponiendo que no hay retroceso, a una distancia de 300 m se debe obtener una dispersión circular de tres tiros que den en un blanco. Con cartuchos y armas de fuego convencionales, esto no es posible debido al retroceso del arma, ya que después del primer disparo la boca del cañón del arma se empieza a elevar sucesivamente cada vez más alto y hacia la derecha. Sin embargo, en armamento y con municiones sin casco, en series de tiro de 2,000 disparos/min, los tres proyectiles saldrían del cañón antes de que el arma comience a retroceder.

El armamento y municiones sin casco cuyo mayor exponente son el fusil Heckler Koch G-11 y la munición 4.73 x 33 mm DM-11, con un peso de 5.2 g, consistente en un bloque de 8 x 8 x 32.8 mm de propelente en el que está contenida una ojiva de 3.2 g de la que solo es visible su punta en uno de los extremos. La ojiva tiene camisa de acero y núcleo de plomo, con una velocidad de salida de 930 m/s y una energía cinética de 1,380 J. El propelente es un moderado alto explosivo mezclado con un aglutinante, que en la parte posterior, tiene un iniciador (*primer*) consistente en una pequeña cantidad de explosivo. Una carga de refuerzo se encuentra entre el iniciador y la ojiva. En la ignición, el iniciador enciende la carga de refuerzo que impulsa la ojiva hacia adelante para que se fije en el rayado del tubo cañón y actúe como sello para los gases del propulsor. Al mismo tiempo, la carga de refuerzo enciende la carga principal y puesto que no hay casco a extraer, el arma sólo tiene que cargar y disparar. En tiro automático efectúa 600 tiros/min y

en series de tres tiros dispara 2,200 tiros/min. La primera producción de armas fue aparentemente entregada a las fuerzas especiales alemanas en 1990. El final de la Guerra Fría, la unificación de Alemania, los cortes al presupuesto de defensa y la disponibilidad de un gran número de armas pequeñas a precios más económicos, al parecer llevaron a la desaparición de este proyecto en la actualidad [Di Maio, 1999].

II.3.2.- Mecanismos de cierre convencionales para armas de autocarga

Existen diferentes sistemas de operación empleados para dar la automaticidad a las armas de fuego, como son:

- **Sistema de toma de gases (*Gas operated*).** En este mecanismo se emplea la energía que producen los gases de la deflagración de la pólvora, como se observa en la Figura II.2.

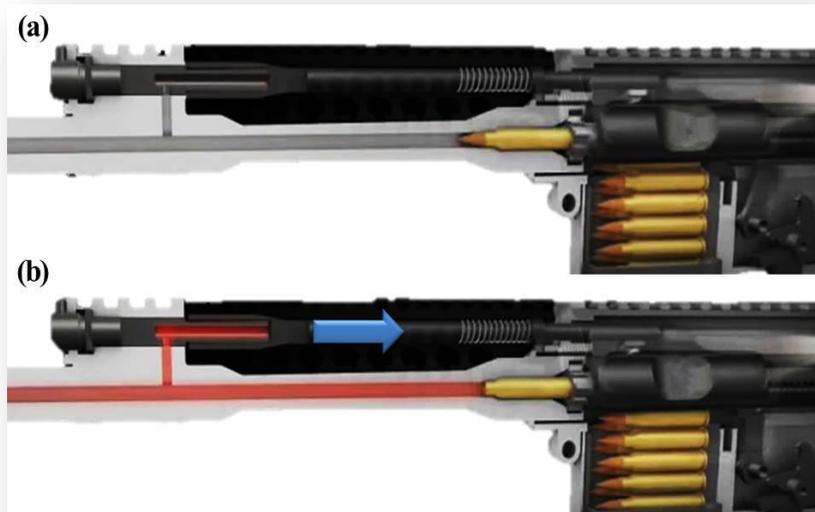


Figura II.2.- Sistema de cierre por toma de gases de un fusil.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

En este mecanismo los gases salen por un pequeño orificio casi a la salida del tubo cañón denominado *toma de gases*, el cual dirige y permite que una pequeña porción de éstos se impacten contra un émbolo, ocasionando su desplazamiento posterior, y éste al estar conectado con el mecanismo de cierre, realiza la apertura del sistema.

- **Retroceso de masas (*Blowback*)**. El retroceso de masas es un sistema de operación que obtiene la energía a partir del movimiento del casco del cartucho cuando es empujado a la parte trasera mediante la expansión de los gases creados por la ignición de la carga propulsora, como se muestra en la Figura II.3. Dentro de este principio de operación, existe un amplio número de variantes que son empleados en la fabricación de armamento:
 - Inercia simple (*Simple blowback*)
 - Inercia de percusión avanzada (*Advanced Primer Ignition blowback*)
 - Retroceso API (*API Blowback*)
 - Inercia retardada (*Inertia Delayed Blowback*)
 - Inercia transferida o Acerrojamiento semirrígido
 - Recámara flotante (*Floating chamber*).
 - Retroceso retardado (*Delayed Blowback*)
 - Retardo por palanca (*Lever delayed*)
 - Retardo por gas (*Gas delayed*)
 - Retardo por anillo de la recámara (*Chamber-ring delayed*)
 - Retardo por activación (*Toggle delayed*)

- Retardo por rodillo (*Roller delayed*)

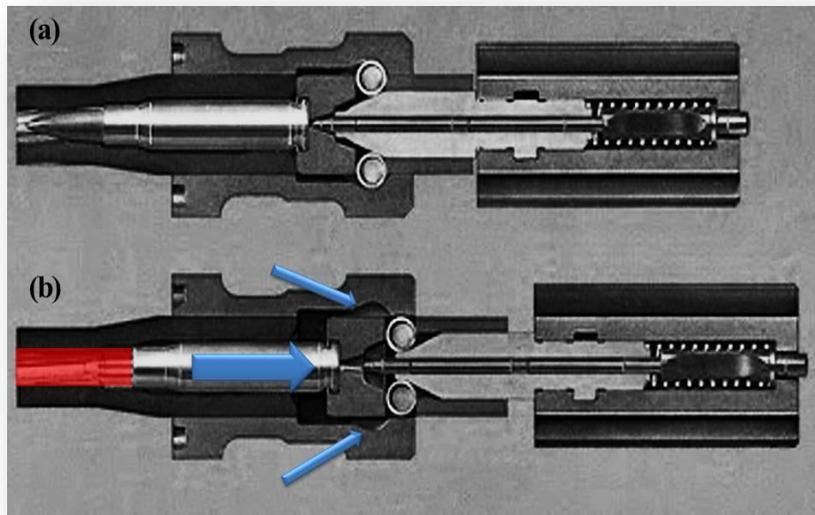


Figura II.3.- Sistema de cierre por retroceso de masas con retardo por rodillo de un fusil.

- **Sistema de Cadena y Gatling.** En estos sistemas la energía para el cierre y obturación de los componentes del arma es proporcionada por un medio externo, en el de la cadena se emplea la energía eléctrica o hidráulica para el funcionamiento, y en el caso de los sistemas *Gatling*, se emplea la energía mecánica a partir del operador que hace girar una manivela.

II.3.3.- Procesos de manufactura de sistemas de cierre y cañones

En armamento de pequeño calibre, a nivel mundial se emplean principalmente centros de maquinado de husillo horizontal, para la manufactura de las superficies externas y acabado final de algunas partes internas de la recámara y del cañón.

El estriado del cañón (Figuras II.4 y II.5) son canales internos en espiral y es empleado principalmente para aumentar la precisión de los disparos, al permitir estabilizar el proyectil durante su trayectoria de vuelo por más tiempo, debido al momento de inercia rotacional que le ocasiona al proyectil el rayado o estriado del cañón del arma.



Figura II.4.- Estriado de un cañón de calibre 75 mm, de manufactura francesa.



Figura II.5.- Estriado poligonal de un cañón de pistola HK USP calibre 9 x 19 mm, de fabricación alemana.

Es entonces considerado, parte crítica en el funcionamiento del arma, y se emplean los procesos de forjado o de formación en frío y los procesos por arranque de viruta, para su manufactura, siendo:

- Estampado con herramienta (*Button swaged*); En los procesos de formación en frío, el metal es movido para producir el patrón de estrías mediante la operación en lugar de desbastar o arrancar el metal.

Un botón de estriado como el de la Figura II.6, es un tapón de metal de doble conicidad, en el que su diámetro mayor está en el centro de la herramienta y está fabricado de un metal

más duro que el del cañón, pudiendo tener un tratamiento térmico o ser de carburo de tungsteno, y que visto en su sección transversal el botón tiene el inverso del patrón estriado deseado. El botón es empujado a través del orificio del cañón con una máquina similar a la utilizada para el brochado o el *estriado de punto simple*, y debido a que el botón es pequeño, no siempre es necesario grabar el giro del estriado sobre el botón, usualmente es empleado en cañones de calibre 5.588 mm (.22 pulg.) o escopetas de perdigones, ya que no elimina por completo las marcas del taladro y fresado hechas para barrenas el orificio inicial del cañón.

- Forjado por martillado (*Hammer forged*); Es uno de los métodos más eficientes, comienza con una herramienta reutilizable como la mostrada en la Figura II.7, que tiene el patrón inverso del estriado deseado en el cañón, una espiral de longitud completa y gira durante la operación de forja. La herramienta se inserta en el orificio del cañón, y este se mueve a una velocidad constante hacia una serie de martillos accionados por levas dispuestas en un círculo, los cuales golpean el tambor giratorio con una gran fuerza, doblando el acero en contacto con la herramienta de forma y moldeándolo en su interior, por lo que los martillos están alineados a 180° para igualar la presión de golpeo.

Después de la forja, el tubo inicial es más largo, y la superficie externa presenta pequeñas marcas de la superposición de los golpes de los martillos, los cuales son eliminados mediante procesos de maquinado posteriores, asimismo la herramienta de forma puede incluir la forma de la recámara deseada en el arma, a fin de que igualmente se produzca en el interior del cañón durante el proceso de forja.

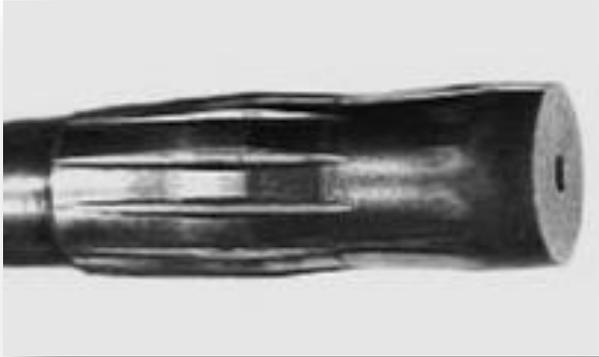


Figura II.6.- Botón de estriado de doble conicidad.



Figura II.7.- Herramienta de forma para forja por martillado.

- Corte de estriado de punto simple (*single-point rifling*); es el método más antiguo de ranurado del interior del cañón del arma, cortándose las ranuras una a la vez y aún continua empleándose hoy en día para la fabricación de algunos cañones, incluyendo algunos de la más alta calidad y productos personalizados hechos por armeros. El proceso inicia con la cabeza de un cortador, que es una pequeña pieza de una aleación endurecida, colocada en forma de cuña en la parte inferior de una base que soporta la herramienta (Figura II.8), y que es un cilindro de acero más pequeño que el diámetro del orificio del tubo, y con una longitud normalmente de seis a diez veces la de la cuchilla para poder alinearse con precisión, y sobresaliendo únicamente la superficie de corte como un diente.
- Brochado (*Broached*); Es empleado en la fabricación de grandes cantidades de cañones idénticos, siendo los costos adicionales de la herramienta y del equipo especial, compensado

por la mejora en la tasa de producción. En esta operación se elimina el metal en pases de poca profundidad con múltiples superficies de corte en línea, cada vez más grandes que los anteriores, y siendo el conjunto total de las superficies de corte de la brocha, lo que crea el cañón estriado terminado, con lo que se proporciona un alto nivel de control dimensional. Las máquinas de brochado jalan o empujan las brochas (Figura II.9) mientras desbastan o arrancan el material, con movimientos lineales verticales u horizontales y fuerzas de tracción de hasta 0.9 MN (100 toneladas), siendo posteriormente maquinados en su geometría externa en centros de torneado.



Figura II.8.- Cortador para estriado de punto simple.



Figura II.9.- Brocha para estriado de cañones de armamento.

II.4- Dinámica del retroceso del arma

El retroceso en un arma se genera por la reacción de sus partes móviles al impulso de la presión del gas, cuando el proyectil se encuentra en el cañón y después de su salida, mientras los gases de

propulsión aún continúan saliendo, siendo esta etapa en la que la presión decrece linealmente con el tiempo, como se muestra en la Figura II.10 y que es llamada efecto del escape del gas (*gas exhaust after effect*).

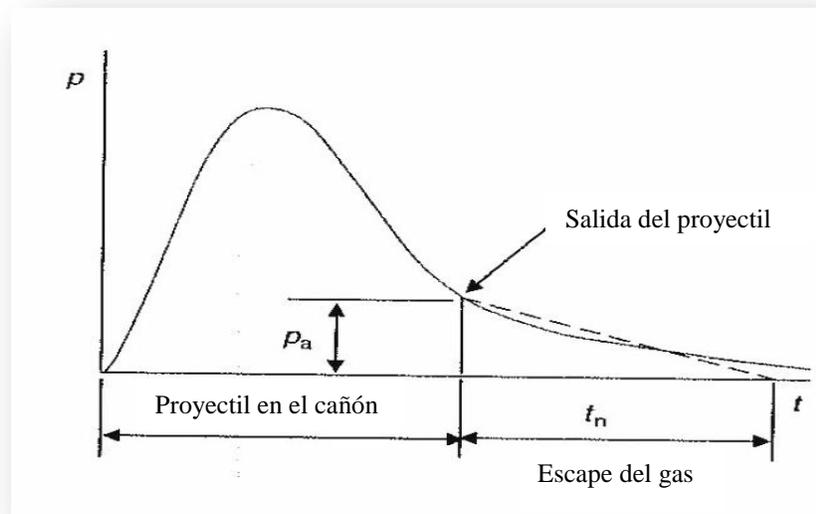


Figura II.10.- Curva típica de presión – tiempo del disparo de un arma de fuego [Carlucci, 2008].

Durante el disparo del proyectil e inmediatamente después de que el proyectil sale de la boca del cañón, puede considerarse que el arma se comporta como una entidad dinámica, siendo necesario analizar el retroceso en términos de las fuerzas y movimientos y la respuesta conocida como salto del arma (*gun jump*). En la Figura II.11 se indican las fuerzas que actúan en el arma, durante el tiempo que el proyectil se está moviendo a través del cañón (incluyendo las fuerzas atribuibles a las estrías).

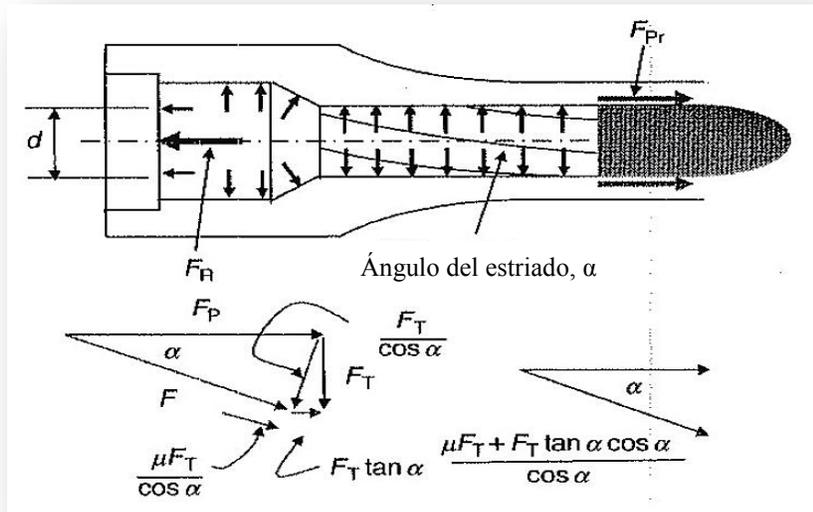


Figura II.11.- Fuerzas actuantes en un cañón y su reacción en el proyectil [Carlucci, 2008].

Durante y después del disparo, las fuerzas desequilibradas en el arma pueden ser categorizadas como la fuerza de gas:

$$F_R = p \frac{\pi}{4} d^2 = F_P \tag{Ec. II.30}$$

dónde:

F_R = la fuerza de gas

F_{Pr} = la fuerza de resistencia del proyectil

F_T = la fuerza del estriado

Siendo que F_P sólo actúa sobre el diámetro del cañón, mientras que F_R actúa en el diámetro de la cara de la recámara, que normalmente es mucho mayor que el cañón. La resistencia de la presión es determinada como:

Para cañones lisos	$F_{Pr} \approx 0.01 F_R$	Ec. II.31
--------------------	---------------------------	-----------

Para cañones estriados	$F_{Pr} \approx (\mu + \tan \alpha) F_T$	Ec. II.32
------------------------	--	-----------

La fuerza del estriado es:

$$F_T = \left(\frac{k}{d/2} \right)^2 F_P \tan \alpha \quad \text{Ec. II.33}$$

dónde:

k = el radio de giro del proyectil, siendo $I_{ZZ} = wk^2$ en términos del momento axial de inercia y masa

μ = el coeficiente de fricción

α = el ángulo del estriado

Para determinar F_P se emplea una aproximación de Lagrange, partiendo del gradiente de presión de la Ecuación II.18, tenemos que:

$$p_B = p_S \left(1 + \frac{c}{2w} \right) \quad \text{Ec. II.34}$$

Considerando en términos de fuerzas y en armas con estriado, tendremos:

$$F_{Pr} = \left(\frac{k}{d/2} \right)^2 (\mu + \tan \alpha) \tan \alpha F_R \left(\frac{w}{w+c/2} \right) \quad \text{Ec. II.35}$$

Ahora respecto al movimiento del arma durante su retroceso, se tiene un balance de momento entre el proyectil, los gases propelentes y la masa del arma, que considerando la aproximación de

Lagrange para el proyectil y el gas, se obtiene la siguiente ecuación para la velocidad final de las partes que retroceden.

$$V_{final} = \left[\frac{w+c\left(\frac{1}{2}+\beta\right)}{w_{ret}} \right] V_{boca} \quad \text{Ec. II.36}$$

dónde:

β = coeficiente de efecto posterior (*after effect coefficient*)

w_{ret} = la masa de retroceso del arma

V_{boca} = velocidad del proyectil en la boca del arma

Por lo que se pueden obtener las distancias recorridas durante el retroceso del mecanismo de cierre, las cuales son representadas en el esquema de la Figura II.12.

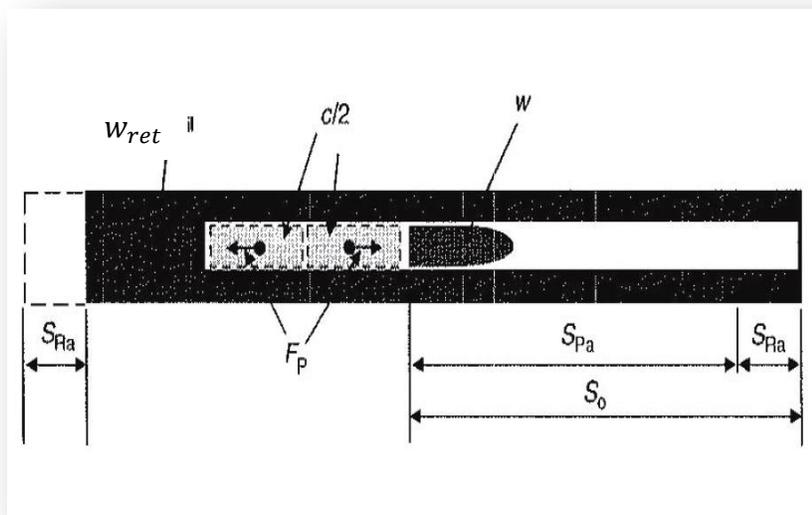


Figura II.12.- Diagrama de los desplazamientos del arma [Carlucci, 2008].

En esta figura se indica el desplazamiento de los componentes del sistema en retroceso libre, siendo S_{Re} la distancia total recorrida, S_{Ra} la suma de la distancia recorrida mientras el proyectil está en el arma y S_{Rn} la distancia recorrida durante la fase de eyección del gas propelente.

Entonces, se tiene que la suma de la distancia recorrida mientras el proyectil está en el arma es:

$$S_{Ra} = S_0 \left(\frac{w + \frac{c}{2}}{w_{ret} + w + c} \right) \quad \text{Ec. II.37}$$

dónde:

S_0 = distancia de la base del proyectil hasta la boca del cañón

y la distancia remanente del recorrido como:

$$S_{Rn} = \left(\frac{V_{Ra} + V_{Re}}{2} + \frac{V_{Re} - V_{Ra}}{2} \right) t_n \quad \text{Ec. II.38}$$

dónde:

t_n = el tiempo de la fase de vaciado de gases del cañón

V_{Ra} = la velocidad en que se recorre la distancia S_{Ra}

V_{Re} = la velocidad en que se recorre la distancia S_{Re}

Los conceptos anteriores, corresponden al supuesto de que el arma se encuentra en retroceso libre, sin frenos de boca y mecanismos de retroceso neumáticos o hidráulicos para frenar y finalmente detener el retroceso dentro en una distancia relativamente corta, por lo que para aumentar la precisión estas fuerzas tienen que ser añadidas al análisis anterior.

II.4.1.- Salto de arma de fuego

Este fenómeno que ocurre durante el retroceso del arma, es debido a que el eje en el cañón del arma, en el cual las fuerzas del gas son aplicadas al sistema, usualmente no es colineal con el centro de masa de las partes que retroceden, por lo que se crea un par frecuentemente llamado *par de pólvora* (*powder couple*) que actúa sobre el disparo, ocasionando una rotación del arma que resulta en una elevación de la boca del cañón, contribuyendo al salto del proyectil, pero sin ser la única causa de este salto.

Existen otras reacciones dinámicas del arma durante el disparo, ya que el arma se comporta como un cuerpo elástico cuando se inicia la carga propulsora, y ocurren también diversas reacciones estructurales, el esfuerzo y las ondas de presión se establecen en la recámara y en la parte del cañón que aún no se encuentra presurizado, sobrecargando transitoriamente el cañón. Asimismo, debido a la presión se presenta una elongación, siendo la banda de rotación del proyectil comprimida y grabada por el estriado causando un sub-esfuerzo local del cañón y un gradiente térmico.

II.5.- Sumario

En el presente capítulo se describieron los principales aspectos sobre balística interna, el armamento con sus tipos y mecanismos, así como los diferentes parámetros, fuerzas y momentos a los que se ven sometidos los componentes del armamento, durante las etapas del ciclo del disparo de un arma.

Esto tiene una importante aplicación en el desarrollo del Capítulo III, toda vez que proporciona los fundamentos que se emplean en el diseño mecánico del sistema de cierre hermético, así como en el desarrollo de los experimentos realizados en el Capítulo V y en el análisis de resultados del Capítulo VI.

CAPÍTULO III

DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA DE CIERRE



*“En igualdad de condiciones, la
explicación más sencilla suele ser la
correcta”*

NAVAJA DE OCKHAM

GUILLERMO DE OCKHAM, Fraile franciscano, filósofo y lógico escolástico inglés, oriundo de Ockham, un pequeño pueblo de Surrey, cerca de East Horsley, realizó obras significativas en lógica, medicina y teología.
(1280 – 1349)

III.1.- Generalidades

La *ingeniería concurrente o simultánea* es un método efectivo para el desarrollo de productos, ya que integra el diseño y la manufactura de un producto, a fin de optimizar todos los elementos incluidos en su ciclo de vida [Kalpakjian, 2008], los cuales se muestran en la Figura III.1 y que consiste en una representación gráfica tradicional de las ventas en función del tiempo. El ciclo de vida típico de un producto nuevo consta de todas las etapas por las que pasa el producto desde el mismo momento en que es lanzado para su venta, hasta que deja de comercializarse, en función del volumen de ventas.

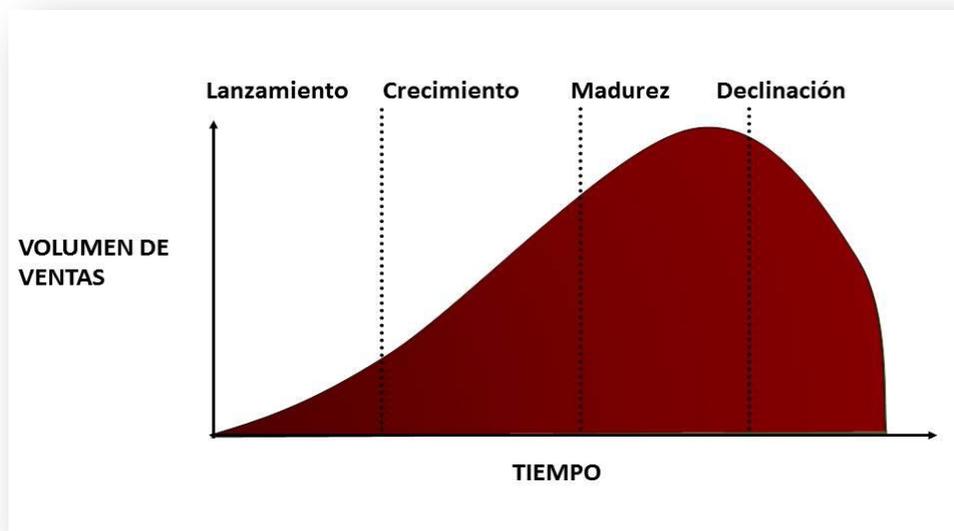


Figura III.1.- Curva del ciclo de vida de un producto [Kalpakjian, 2008].

Las ventas evolucionan generalmente conforme una curva de campana, sin embargo una representación veraz de un producto o servicio puede cambiar bastante su forma, así como la

unidad de tiempo utilizada para medir el ciclo de vida, puede variar también de acuerdo a la naturaleza del sector al que pertenecen.

La ingeniería concurrente podría parecer contraria a una metodología directa, en la que las actividades de diseño y manufactura se efectúen de manera consecutiva, pero en la práctica este método desperdicia recursos de modo extremo, ya que un producto puede pasar de un departamento a otro, producirse y después colocarse directamente en el mercado.

Es común que haya dificultades en cada departamento y en algunos casos pueda requerirse de cambios que obligarían a repetir la etapa de análisis del diseño, a fin de asegurar que el producto funcione satisfactoriamente, lo que ocasiona en una metodología secuencial, que estas iteraciones desperdicien recursos y tiempo.

Actualmente los productos de alta tecnología, son ejemplos de la aplicación de la ingeniería concurrente, ya que estos productos en un mercado tan dinámico pueden tener un ciclo de vida tan corto como el de unos pocos meses, en cambio otros mercados como el de las bebidas gaseosas tienen productos tradicionales que llevan casi cien años sin cambios significativos. Es entonces el diseño de un producto una actividad crítica, estimándose que entre un 70% u 80% del costo de desarrollo y manufactura de un producto está determinado por las decisiones tomadas en las etapas iniciales del diseño [*Kalpakjian, 2008*].

El proceso de diseño comienza con el desarrollo de un concepto para un producto original, siendo en esta etapa altamente deseable, e incluso fundamental, un método innovador de diseño, para que el producto sea exitoso en el mercado y se obtengan ahorros importantes en costos de materiales y de producción.

El diseño de un producto requiere un entendimiento completo de sus funciones y de su desempeño esperado, debiendo definirse claramente el mercado del producto, así como los usos previstos para el mismo. El producto puede ser nuevo o una versión modificada o más reciente de un artículo existente; siendo ejemplo los constantes cambios de diseño y de estilo de los teléfonos celulares, las calculadoras, los aparatos domésticos, los automóviles y las aeronaves, entre otras.

III.2.- Metodología del diseño mecánico empleado

Para realizar el diseño y manufactura del sistema de cierre hermético requerido, se empleó el **método de ingeniería concurrente** [Kalpakjian, 2008], a fin de reducir los cambios en el diseño e ingeniería de los componentes, así como en los tiempos de proceso y los costos comprendidos en llevarlo desde su diseño conceptual hasta la fabricación de los prototipos.

La Figura III.2 muestra las etapas del proceso de diseño y manufactura empleados, las cuales conforme a la ingeniería concurrente se realizaron de manera simultánea, retroalimentándose con los resultados y realizando las mejoras correspondientes sobre el proceso de producción.

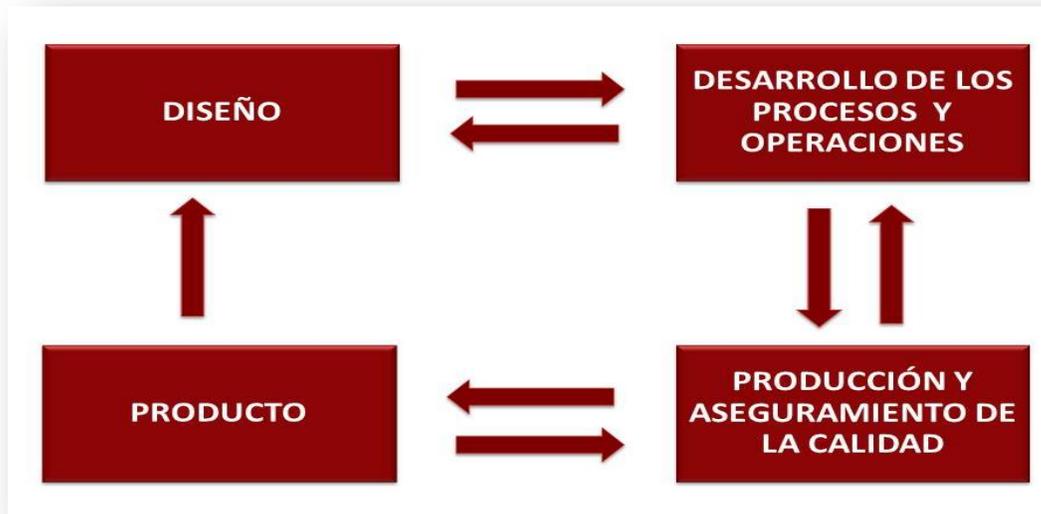


Figura III.2.- Diagrama de la ingeniería concurrente empleada en el diseño propuesto [Groover, 2007].

Estos procesos se efectuaron conforme a lo descrito en este trabajo de investigación, siendo cada una de las actividades y operaciones necesarias realizadas en los talleres y laboratorios del Instituto Politécnico Nacional, en las Escuelas Superiores de ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidades Azcapotzalco, Ticomán y Zacatenco, no obstante su integración corresponde a los departamentos que usualmente se encuentran en fábricas de procesos metalmecánicos.

En las actividades necesarias en estos departamentos para la manufactura de los prototipos, se debe de tener una interacción activa, mediante grupos de trabajo multidisciplinarios de tiempo completo, encaminados a cumplir con los *principios y directrices generales en el diseño para manufactura y ensamble* [Groover, 2007]:

-
- Departamento de diseño; le corresponde el diseño del prototipo, definiendo cada componente, sub-ensambles y ensamble final, especificaciones de materiales, precisión y acabado de cada pieza, detalles iniciales de la fabricación, proceso y operaciones, así como integrar en el diseño las especificaciones del cliente, los datos de campo, de calidad y mercadotecnia necesarios.

 - Departamento de procesos; realiza el desarrollo industrial necesario para la producción de los prototipos, debiendo definir principalmente los procesos a emplear en cada etapa de la manufactura, considerando la ruta crítica del proceso de fabricación, así como el herramental, máquinas, equipos, personal y tiempos necesarios.

 - Departamento de producción; donde se realizan los procesos de manufactura, debiendo controlar la calidad del proceso y de cada producto, efectuar las operaciones de maquinado y ensambles con las especificaciones requeridas, así como proponer las opciones o modificaciones necesarias para optimizar el proceso de fabricación. Habiéndose realizado las operaciones principalmente en talleres de herramientas y maquinado.

 - Departamento de control de calidad; este departamento efectúa en conjunto con el área de producción, el control de calidad de las piezas en cada operación, asimismo propone las medidas necesarias para incrementar la calidad del producto y realiza la inspección y pruebas finales de las especificaciones de los prototipos terminados.

En la Tabla III.1 se indican las actividades desarrolladas únicamente en la etapa del diseño, en las que se determinan las especificaciones y caracterizaron los componentes mediante análisis dimensionales, metalográficos, físicos y químicos.

Tabla III.1.-Metodología de la etapa de investigación empleada en el diseño mecánico.

No.	Fase	Descripción	Resultado
1	Investigación	Armamento y municiones estandarizadas	Especificaciones balísticas
2	Desarrollo	Caracterización <ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis dimensional (vernier / micrómetro) ▪ Análisis químico (espectrofotómetro de absorción atómica) ▪ Caracterización mecánica (Máquina universal de tensión) ▪ Análisis físico (Microscopio de barrido, durómetro) 	Elaboración de planos Composición química Propiedades mecánicas Metalografía
		Definición <ul style="list-style-type: none"> ▪ Geometría y Dimensiones ▪ Materiales 	Especificaciones dimensionales, tolerancias y de materiales
3	Desarrollo	Modelado <ul style="list-style-type: none"> ▪ Software Solidworks® 	Modelo CAD
4	Diseño del proceso de Manufactura	Análisis de procesos de manufactura	Definición del proceso y operaciones
5	Manufactura	Elaboración del prototipo	Prototipo

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

III.3.- Investigación de sistemas de cierre de armamento convencional

Conforme a lo descrito en los capítulos I y II, existe una gran variedad de tipos de armamento y sistemas de funcionamiento, por lo que para los fines académicos de la presente investigación se delimitó la fase de análisis al armamento descrito en la Tabla III.2, que corresponde a un gran porcentaje del armamento de pequeño calibre empleado en fuerzas armadas y de seguridad a nivel mundial.

Tabla III.2.- Armamento analizado y caracterizado para el diseño del sistema de cierre.

Especificación	ARMA			
	UZI	M16	G3	Marlin XL7
Calibre	9 x 19 mm	5.56 x 45 mm (.223 pulg.)	7.62 x 51 mm (.308 pulg.)	7.62 x 51 mm (.308 pulg.)
Bala	M 882	SS 109	M 80	308 WIN
Tipo	Subametralladora	Fusil	Fusil	Rifle
Origen	Israel	Estados Unidos	Alemania	Estados Unidos

En la Tabla III.3 se indican los parámetros balísticos de las municiones de pequeño calibre que emplea este armamento, y que corresponden a las siguientes municiones 9 x 19 mm (*Parabellum*), 5.56 x 45 mm y 7.62 x 51 mm, siendo estos datos en conjunto con la información descrita en los Capítulos I y II, lo que compone el punto de investigación de la metodología empleada para el diseño del sistema de cierre hermético.

Tabla III.3.- Especificaciones balísticas de cartuchos estandarizados.

Especificación	9 x 19 mm MIL-C-70508	5.56 x 45 mm STANAG 4172	7.62 x 51 mm MIL-DTL-46931
Velocidad promedio	385 ± 15 m/s (a 16 m)	911 ± 15 m/s (a 23.77 m)	838 ± 9.14 m/s (a 23.77 m)
Presión promedio en la recámara	215 MPa	380 MPa	365 MPa
Presión máxima en la recámara	250 MPa	Sin especificar	400 MPa
Precisión; distancia	50 m (54.68 yardas)	600 m (656.16 yardas)	548.64 m (600 yardas)
Precisión; radio medio	0.038 m (1.50 pulgadas)	0.225 m (8.85 pulgadas)	0.127 m (5.0 pulgadas)

III.4.- Caracterización de sistemas de cierre de armamento convencional

Como se describió anteriormente en el Capítulo I, el sistema de cierre se encuentra dentro del cajón de mecanismos en el interior del arma, como se observa en la Figura III.3



Figura III.3.- Esquema del interior de un fusil MK 109, calibre 300 AAC Blackout, tipo convencional [MK 109 cutaway view, 2012].

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

Esta integrado principalmente por cuatro piezas, que son el cañón, la cabeza de cierre, el soporte de cierre y la pieza de acerojamiento, las cuales se identifican en la Figura III.4 para un fusil MK 109, calibre 300 AAC Blackout.



Figura III.4.- Acercamiento al sistema de cierre de un fusil MK 109, calibre 300 AAC Blackout [MK 109 cutaway view, 2012].

En el soporte de cierre comúnmente se acopla la cabeza de cierre y similarmente la pieza de acerojamiento se ensambla a la parte posterior del cañón, cuyo interior se denomina recámara y que al unirse con la cabeza de cierre, al momento de cerrarse el sistema, alojan la munición antes de ser disparada.

Los sistemas de cierre que conforman la recámara de las armas descritas en la Tabla III.2, consisten fundamentalmente en la unión del tubo cañón con la cabeza de cierre, los cuales dadas

sus condiciones de funcionamiento, normalmente se fabrican de distintos materiales, toda vez que la cabeza de cierre que es la parte posterior del conjunto de la recámara, no soporta la presión de la deflagración de la pólvora directamente, ya que durante el disparo el casco de latón 70/30 de la munición se expande en la recámara del tubo cañón, por lo que la presión que se genera hacia atrás es menor y no requiere de la misma especificación del cañón. Sin embargo en el caso de un cierre hermético, la cabeza de cierre si debe de ser del mismo material, al tener que soportar los mismos parámetros que el cañón del arma, por lo que en este caso, solamente el análisis dimensional se efectuó a los dos componentes, y la caracterización química y metalográfica se delimitó a muestras del tubo cañón por tener contacto directo con los gases de la deflagración de la pólvora.

III.4.1- Análisis dimensional de componentes de armamento convencional

En las Figuras III.5 a la III.12 se muestran los dos principales componentes que integran el sistema de cierre (la cabeza de cierre y la parte posterior de cañón), del armamento de empleo a nivel mundial que se describe en la Tabla III.2.



Figura III.5.- UZI; subametralladora.



Figura III.6.- UZI; cabeza de cierre.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco



Figura III.7.- M16; fusil de asalto.



Figura III.8.- M16; cabeza de cierre.



Figura III.9.- G3; fusil de asalto.



Figura III.10.- G3; cabeza de cierre.



Figura III.11.- Marlín XL7; rifle.



Figura III.12.- Marlín XL7; cabeza de cierre.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

Estos dos componentes fueron dimensionados, mediante una máquina universal de coordenadas, marca Mitutoyo, como la que se observa en la Figura III.13 en la que se realiza la medición del tubo cañón del Rifle Marlin XL7 Cal. 7.62 x 51 mm, realizándose posteriormente los modelos CAD correspondientes, para el análisis de éstos mecanismos de cierre.

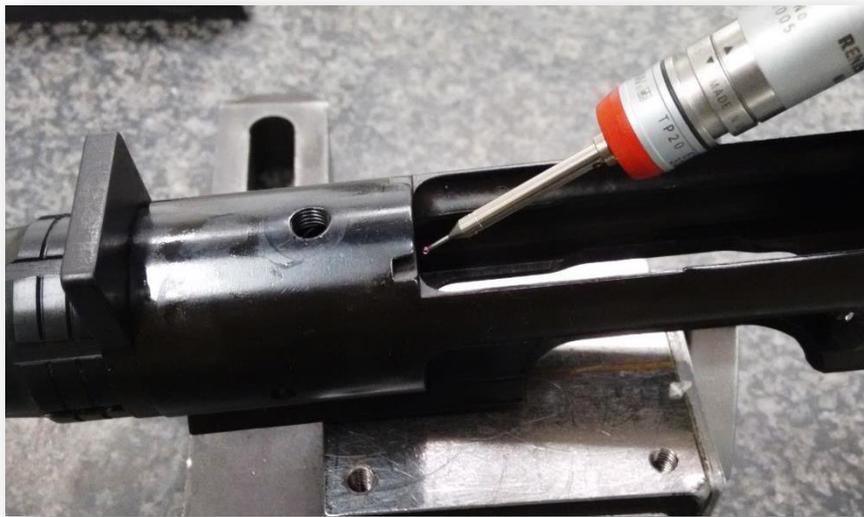


Figura III.13.- Máquina universal de coordenadas empleada en el análisis dimensional

Los mecanismos de funcionamiento de este armamento, corresponden en dos casos a un sistema de cierre por *retroceso de masas*, siendo el de la subametralladora UZI calibre 9 x 19 mm y el del fusil de asalto HK G3 calibre 7.62 x 51 mm, en el caso del fusil de asalto M16 calibre 5.56 x 45 mm a un funcionamiento por *toma de gases* y en el rifle Marlin XL7 calibre 7.62 x 51 mm (0.308 pulgada) a un sistema de cierre de *cerrojo*.

Estos tres sistemas descritos anteriormente en el Capítulo II *Marco teórico sobre balística y armamento*, son los de mayor empleo a nivel mundial, siendo el sistema por *retroceso de masas (blowback)* el de mayor empleo en pistolas, por su simplicidad y menor cantidad de componentes, así como en diversos fusiles y ametralladoras. No obstante el sistema por *toma de gases (gas operated)* tiene la reputación de ser el más confiable, siendo un buen ejemplo el fusil de asalto AK-47 calibre 7.62 x 39 mm, de mayor producción a nivel mundial y con funcionamiento probado en todos los climas extremos del mundo, pues su operación evita el acumulamiento de incombustos en la recámara del arma.

III.4.2- Composición química del material de componentes de armamento convencional

La espectrometría de absorción emplea la interacción de la radiación electromagnética con la materia, para determinar la concentración de un elemento metálico, debido a que los electrones absorben una cantidad de energía determinada para pasar por un instante a un orbital más alto dentro del átomo, lo cual se mide a través de un detector y se obtiene una señal que es proporcional a la concentración del elemento que se mide. Se empleó entonces un Espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer modelo AAnalyst 800 y un espectrofotómetro de chispa, como los mostrados en la Figuras III.14 y III.15 , conforme a la norma NMX-B-001-1988; *Métodos de análisis químico para determinar la composición de aceros y fundiciones*, para analizar tres muestras de acero de cada uno de los dos componentes, del sistema de cierre del armamento indicado en la Tabla III.2, obteniéndose los resultados de composición química descritos en la Tabla III.4.



Figura III.14.- Espectrofotómetro de absorción atómica empleado en el análisis químico.



Figura III.15.- Espectrofotómetro de chispa empleado en el análisis químico cualitativo.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético,
debido al efecto del propelente de una munición sin casco

Tabla III.4.-Resultados del análisis químico de cañones de distinto armamento.

Elemento	ARMA			
	UZI 9 x 19 mm	M16 5.56 x 45 mm	HK G3 7.62 x 51 mm	Marlin XL7 7.62 x 51 mm
Carbono (C)	0.21	0.46	0.32	0.20
Manganeso (Mn)	0.48	0.00	0.58	0.49
Silicio (Si)	0.42	0.29	0.33	0.50
Fósforo (P)	0.00	0.00	0.015	0.00
Azufre (S)	0.01	0.00	0.005	0.02
Cromo (Cr)	1.21	0.86	3.00	1.40
Molibdeno (Mo)	1.09	0.30	0.90	0.30
Vanadio (V)	0.32	0.00	0.32	0.30
Níquel (Ni)	0.23	0.00	0.23	0.00
Aluminio (Al)	0.00	0.00	0.04	0.00
Cobre (Cu)	0.00	0.00	0.18	0.00
Hierro (Fe)	Resto	Resto	Resto	Resto

En la tabla anterior se describieron los promedios obtenidos de las muestras analizadas, por lo que comparando estos datos en tablas se puede definir el tipo de acero que corresponde a cada tipo de cañón, los cuales se indican en la Tabla III.5 y son tomados de referencia para la determinación de las especificaciones del material para el tubo cañón y la cabeza de cierre del sistema de cierre hermético del presente trabajo.

Tabla III.5.-Tipos de acero empleado en cañones de distinto armamento.

Especificación	ARMA			
	UZI 9 x 19 mm	M16 5.56 x 45 mm	HK G3 7.62 x 51 mm	Marlin XL7 7.62 x 51 mm
Acero	SAE-AISI 4820	SAE-AISI 4140	DIN 32CrMoV 12-10	DIN 21CrMoV 5-11

III.4.3- Propiedades mecánicas de aceros empleados en componentes de armamento

Al determinar el tipo de aceros empleados en los cañones de armamento convencional, mediante el análisis químico. Es factible conocer las propiedades mecánicas que deben de cumplir estos tipos de aceros, las cuales se indican en la Tabla III.6 y en las cuales es posible identificar que el acero DIN 32CrMoV presenta una mayor zona elástica y puede soportar una mayor carga sin deformarse. Los valores de los aceros DIN 21CrMoV y AISI 4140 se consideran muy próximos.

Tabla III.6.-Resultados de pruebas mecánicas en cañones de distinto armamento.

Especificación	ARMA			
	UZI 9 x 19 mm	M16 5.56 x 45 mm	HK G3 7.62 x 51 mm	Marlin XL7 7.62 x 51 mm
Acero	AISI 4820	AISI 4140	DIN 32CrMoV	DIN 21CrMoV
Resistencia a la tracción (N/mm ²)	685	650 – 880	950 – 1,050	690 – 830
Límite elástico a 0.2 % (N/mm ²)	460	350 – 550	760 – 870	520
% Elongación	8 – 25	8 – 25	15 – 25	16.00
Dureza (HB)	197	197	280 – 310	229 – 255

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

III.5.- Propuestas de sistemas de cierre herméticos

La caracterización de los sistemas de cierre del armamento convencional que se describió en el punto anterior, la información consultada, la comparación de parámetros balísticos y el método de ingeniería concurrente, permitieron identificar las bases del principio de funcionamiento, forma, dimensiones, materiales, y especificaciones que deben de tener la cabeza de cierre y la parte posterior de cañón. Estos son los dos principales componentes del sistema de cierre, para que se logre la hermeticidad y se soporte la deflagración de la pólvora de una munición sin casco. Por lo que se definieron diversas propuestas y se empleó un método de toma de decisión para determinar la propuesta más viable en cuanto a confiabilidad y seguridad del sistema.

III.5.1- Diseño geométrico y conformación de los sistemas de cierre herméticos propuestos

En la Tabla III.7 se describen las cuatro propuestas finales de sistemas de cierre que se analizaron y en las Figuras III.16 a la III.31 se muestran estos sistemas.

Tabla III.7.- Sistemas de cierre propuestos.

No	Prototipos propuestos
1	Sistema de cierre hermético por roscado interno; efectuado con el dentado interno de la cabeza de cierre y el cañón
2	Sistema de cierre hermético por roscado externo; efectuado con el dentado externo de la cabeza de cierre y la pieza de acerrojamiento
3	Sistema de cierre hermético por muelle; con el ajuste de la cabeza de cierre y el cañón
4	Sistema de cierre hermético ampliado; por el incremento longitudinal de las dimensiones del cierre para su obturación con el cañón

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

La primer propuesta del sistema de cierre hermético por roscado interno, consiste en la obturación del sistema a través de la sujeción entre un dentado interno de la cabeza de cierre y el cañón, lo que permite cerrar el sistema progresivamente a fin de que se detenga en cuanto la base de la cabeza de cierre contacte a la parte posterior del cañón. En las Figuras III.14 a la III.17 se muestran las vistas

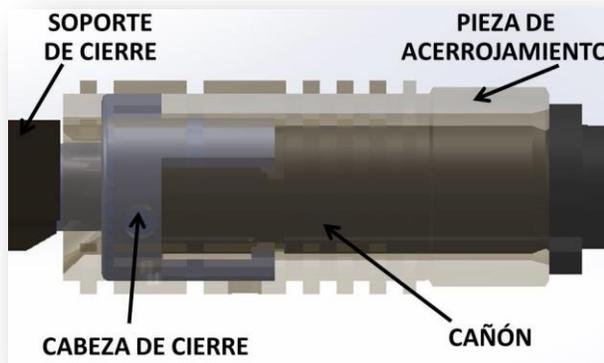


Figura III.16.- Sistema de cierre hermético por roscado interno.

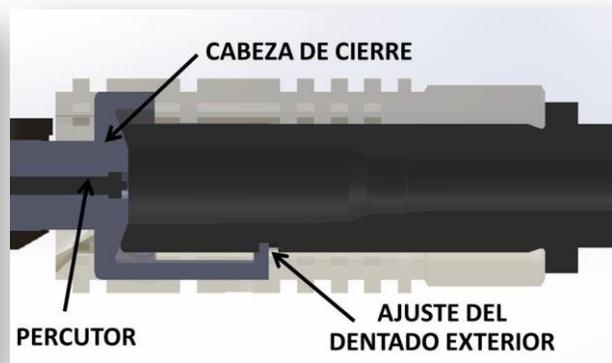


Figura III.17.- Sistema de cierre hermético por roscado interno (corte longitudinal).

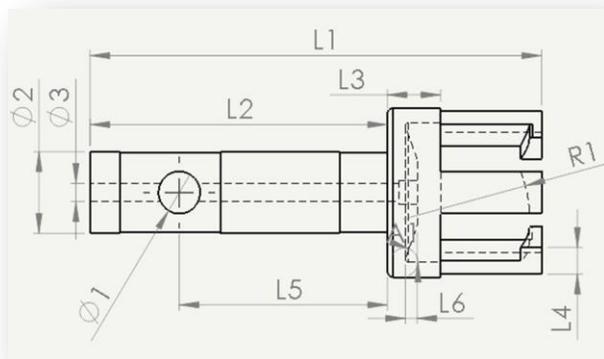


Figura III.18.- Cabeza de cierre con dentado interno (vista lateral).

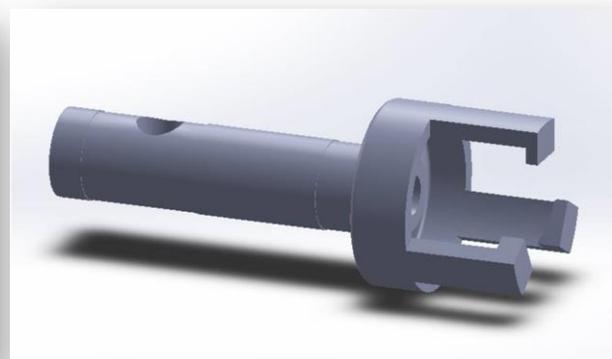


Figura III.19.- Cabeza de cierre con dentado interno (vista isométrica).

Una variante a este sistema, es la orientación del dentado hacia la parte exterior de la cabeza de cierre, a fin de que se ajuste progresivamente con un roscado interno en la pieza de acerrojamiento, hasta que se unan la cabeza de cierre y el cañón a través de sus ángulos internos. Este sistema se denomina sistema de cierre hermético por roscado externo; efectuado con el dentado externo de la cabeza de cierre y la pieza de acerrojamiento.

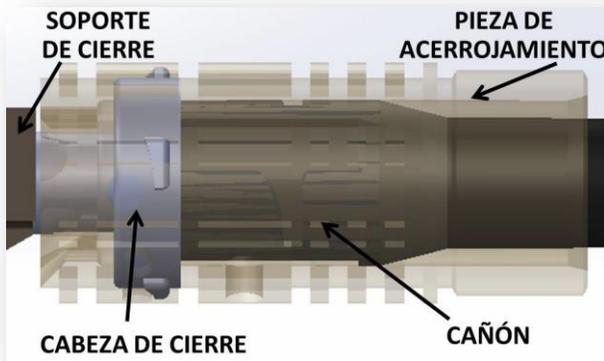


Figura III.20.- Sistema de cierre hermético por roscado externo.

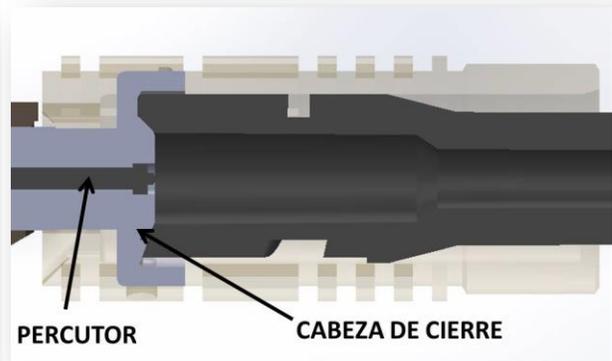


Figura III.21.- Sistema de cierre hermético por roscado externo (corte longitudinal).

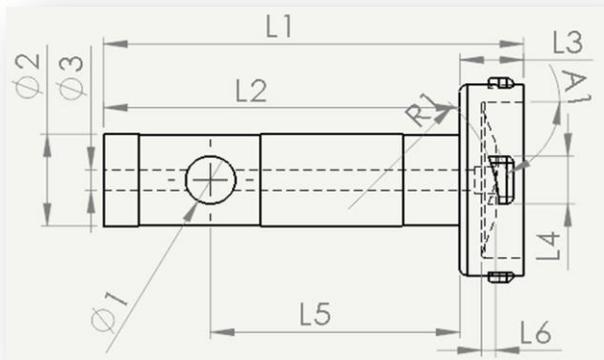


Figura III.22.- Cabeza de cierre con dentado externo (vista lateral).

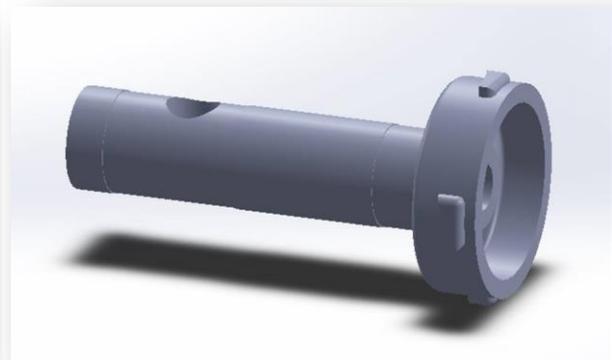


Figura III.23.- Cabeza de cierre con dentado externo (vista isométrica).

La tercera propuesta es el cierre por la acción de muelles, que pueden ser de platillo [DIN 2093] o con arandelas de presión (Bellevilles) [DIN 6796]. Estos muelles son arandelas cónicas con propiedades elásticas, que ofrecen en reducidos espacios una gran resistencia a la carga axial, y que adicionalmente pueden apilarse en paralelo para incrementar la fuerza del muelle ó en serie para aumentar el desplazamiento en proporción al número de unidades.

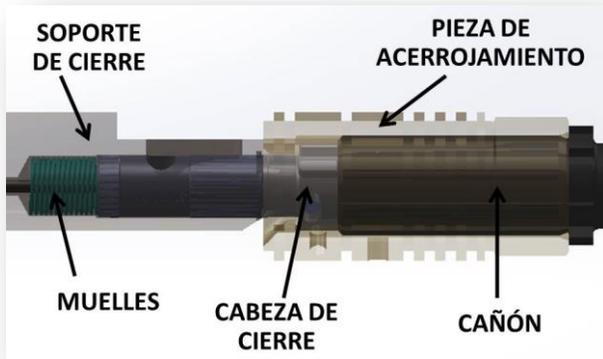


Figura III.24.- Sistema de cierre hermético por muelle.

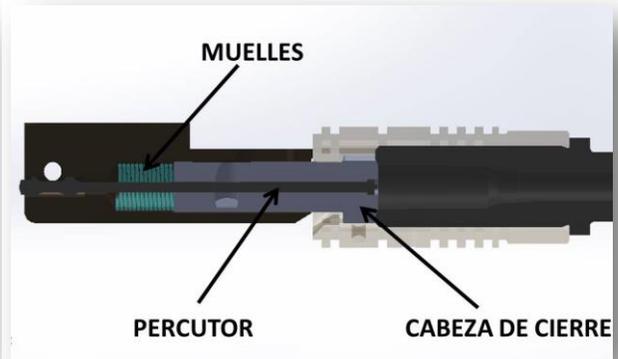


Figura III.25.- Sistema de cierre hermético por muelle (corte longitudinal).

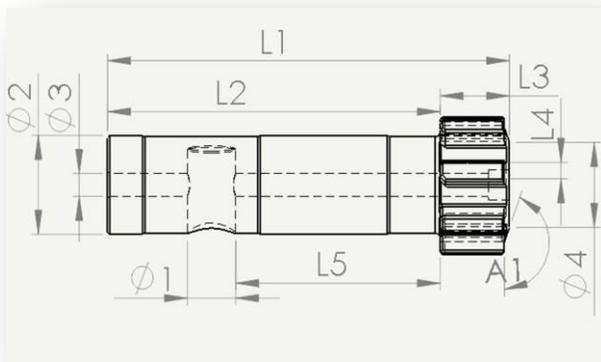


Figura III.26.- Cabeza de cierre para obturación por muelle (vista lateral).

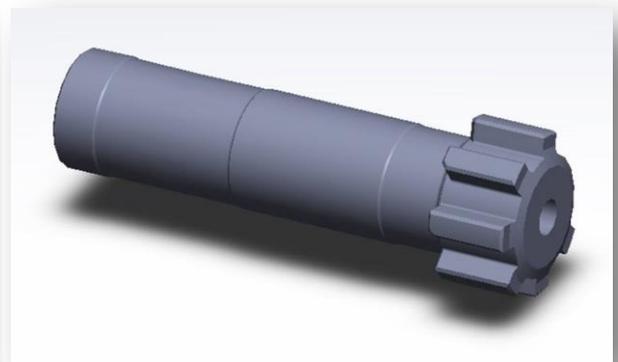


Figura III.27.- Cabeza de cierre para obturación por muelle (vista isométrica).

Finalmente se propuso un sistema de cierre hermético ampliado, el cual se obtiene al incrementar longitudinalmente la distancia interna de la cabeza de cierre, a fin de que se introduzca en el tubo cañón y se obture al unirse la parte posterior del dentado de la cabeza de cierre con el dentado de la pieza de acerojamiento.

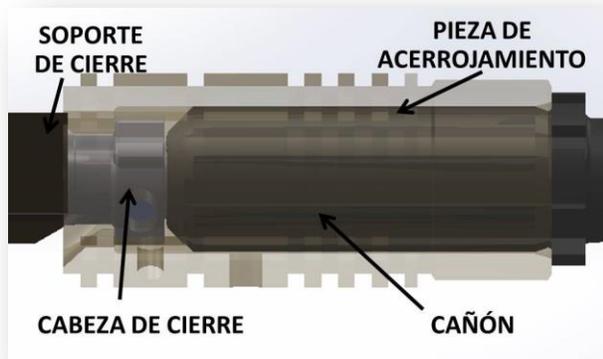


Figura III.28.- Sistema de cierre hermético ampliado.

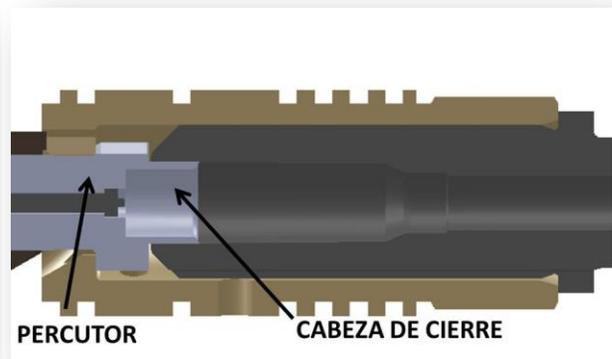


Figura III.29.- Sistema de cierre hermético ampliado (corte longitudinal).

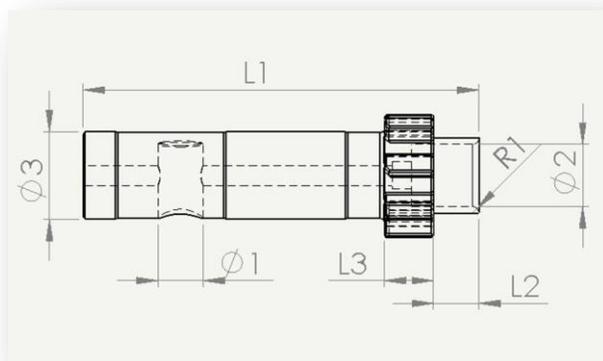


Figura III.30.- Cabeza de cierre para obturación por incremento longitudinal (vista lateral).

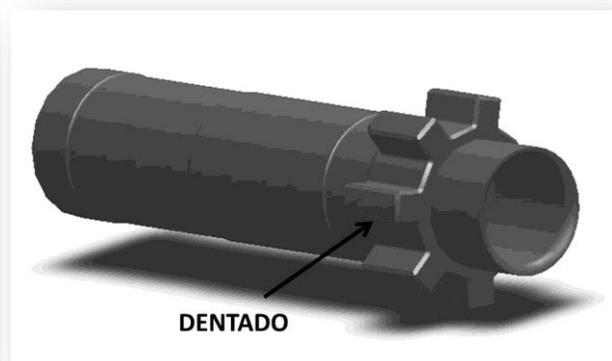


Figura III.31.- Cabeza de cierre para obturación por incremento longitudinal (vista isométrica).

III.5.2- Modelo de toma de decisión del diseño del sistema de cierre hermético propuesto

El Proceso Jerárquico Analítico (*AHP; Analytic Hierarchy Process*) y el Análisis Modal de Fallos y Efectos (*FMEA; Failure Mode and Effect Analysis*) son dos de los principales métodos empleados a nivel mundial para la toma de decisiones. El primero desarrollado por Thomas L. Saaty [*Saaty, 1977*], tiene un mayor empleo en la toma de decisiones para la selección de proveedores, vendedores y productos, que involucren aspectos generales del entorno, sin embargo no es funcional para la toma de decisiones en el desarrollo de productos. El Análisis Modal de Fallos y Efectos [NTP 679], tiene mejores resultados en el diseño de nuevos productos, ya que analiza las partes del sistema que pueden fallar, identifica los efectos posibles, evalúa el riesgo asociado y proporciona una estructura para revisar el diseño y mitigar el riesgo donde sea necesario.

Con el Análisis Modal de Fallos y Efectos, se evaluaron los cuatro sistemas de cierre más funcionales indicados anteriormente, mostrándose en el Anexo A el análisis correspondiente a la cuarta propuesta, que resultó ser la más viable, al ser el promedio de sus índices de prioridad de riesgo (*RPN; Risk Priority Number*) mas bajos, comparados con el resto de las propuestas.

En la Tabla III.8, se indican los promedios de los índices de prioridad de riesgo obtenidos para cada caso, los cuales se realizaron considerando el mismo número de modos de fallo en cada uno de los análisis, a fin de poderlos comparar cuantitativamente, siendo la cuarta propuesta la mejor opción, toda vez que presenta una mayor seguridad en su sistema.

Tabla III.8.- Resultados del análisis modal de fallos de los sistemas de cierre propuestos.

No	Prototipos propuestos	Cant. de partes analizadas	Fallas detectadas	Fallas que dañen al usuario	RPN (Promedio)
1	Sistema de cierre hermético por roscado interno.	13	26	3	186.53
2	Sistema de cierre hermético por roscado externo.	13	26	3	202.40
3	Sistema de cierre hermético por muelle.	13	26	3	160.70
4	Sistema de cierre hermético ampliado.	13	26	3	151.92

III.5.3- Análisis de los ángulos internos de unión del sistema de cierre hermético propuesto

Las Figuras III.32 y III.33 indican la ubicación de los ángulos de la cabeza de cierre y la parte posterior del tubo cañón, así como las interferencias que pueden presentar.

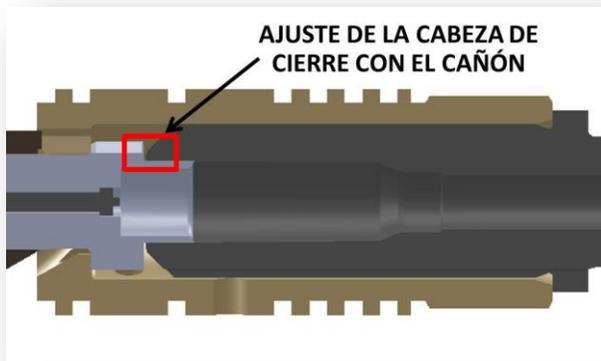


Figura III.32.- Ubicación de los ángulos de la cabeza de cierre y el cañón analizados.



Figura III.33.- Interferencia de cualquier combinación de los ángulos que sume 270°.

En cualquiera de los sistemas de cierre propuestos, es necesario que el sistema obture correctamente entre la cabeza de cierre y el cañón, por lo que se analizaron los ángulos en que se

requiere se fabriquen sus tolerancias internas, a fin de asegurar el cierre hermético del sistema. La cabeza de cierre debe de presentar un ángulo de $150^\circ - 170^\circ$ y la parte posterior del cañón un ángulo de $100^\circ - 110^\circ$, mostrándose en las Figuras III.34 a la III.37 las interacciones que se presentan con las tolerancias máximas y mínimas de estos ángulos.



Figura III.34.- Interferencia de ángulo mínimo de la cabeza con ángulo mínimo del cañón.



Figura III.35.- Interferencia de ángulo mínimo de la cabeza con ángulo máximo del cañón.

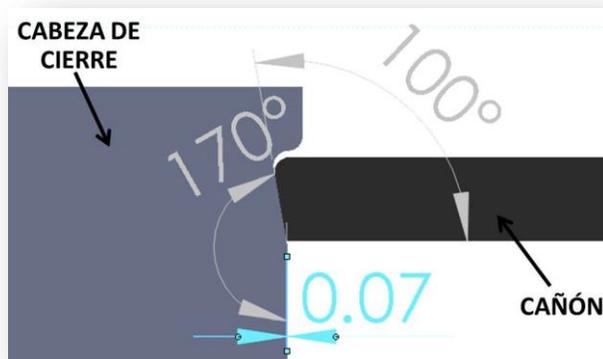


Figura III.36.- Interferencia de ángulo máximo de la cabeza con ángulo mínimo del cañón.

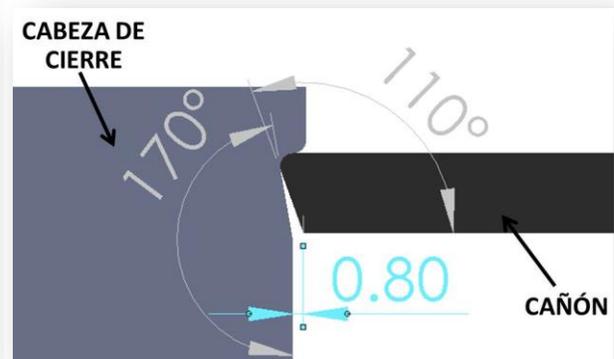


Figura III.37.- Interferencia de ángulo máximo de la cabeza con ángulo máximo del cañón.

Por lo que se identifica que la distancia máxima que puede introducirse la base de la cabeza de cierre en el interior del cañón es de 0.29 mm y la distancia máxima de separación corresponde a 0.98 mm, manteniendo la hermeticidad en ambos casos, asimismo se observa que en cualquier interferencia en la que los ángulos sumen 270° se tendrá un ajuste ó acoplamiento completo.

III.5.4- Composición química del sistema de cierre hermético propuesto

Respecto a las especificaciones de los aceros AISI 4140, AISI 4820, DIN 32CrMoV 12-10 y 21CrMoV 5-11, empleados en la fabricación de cañones de armamento y que se describieron anteriormente, se puede considerar que los aceros AISI 4130, AISI 4140, AISI 4330, AISI 4340, AISI 8620 y AISI 8632, dadas sus propiedades mecánicas de resistencia a la tracción, límite elástico y dureza, pueden ser empleados en la fabricación del tubo cañón requerido. Por lo anterior, se seleccionó el acero AISI 4140 por considerarse más comercial y accesible en el mercado nacional, a través de empresas líderes como *Metales Díaz S.A. de C.V.* y *Aceros ARCA Internacional S.A. de C.V.*, describiéndose sus especificaciones de composición química en la Tabla III.9.

Tabla III.9.-Especificaciones de la composición química del Acero AISI 4140.

ELEMENTO	ACERO AISI 4140
Carbono (C)	0.38 – 0.43
Manganeso (Mn)	0.75 – 1.00
Silicio (Si)	0.15 – 0.35

Tabla III.9.-Especificaciones de la composición química del Acero AISI 4140 (cont.).

ELEMENTO	ACERO AISI 4140
Fósforo (P)	<i>0.04</i>
Azufre (S)	<i>0.05</i>
Cromo (Cr)	<i>0.80 – 1.10</i>
Molibdeno (Mo)	<i>0.15 – 0.25</i>
Aluminio (Al)	<i>0.06</i>
Hierro (Fe)	<i>Resto</i>

III.5.5- Caracterización mecánica del material del sistema de cierre hermético propuesto

Se realizaron pruebas mecánicas a probetas del Acero AISI 4140 seleccionado, apreciándose en la Figura III.38 la Máquina universal de pruebas, marca Shimadzu, modelo AG-IC; AG-250 kN, empleada para determinar el porcentaje de elongación, así como una de las probetas de acero analizadas.

Las pruebas mecánicas se realizaron conforme a la norma ASTM E4-13 *Procedimientos estándar para la verificación de la fuerza en máquinas de ensayo (Standard practices for force verification of testing machines)*, asimismo se determinó la dureza Brinell en un Durómetro marca metromex polmatic modelo B-3, indicándose en la Tabla III.10 los resultados promedio obtenidos de muestras del acero AISI 4140 seleccionado.



Figura III.38.- Máquina de tensión y compresión empleada en las pruebas elásticas.

Tabla III.10.-Resultados de pruebas mecánicas a muestras de Acero AISI 4140.

ESPECIFICACIÓN	ACERO AISI 4140
Resistencia a la tracción (N/mm ²)	850
Límite elástico a 0.2 % (N/mm ²)	550
% de Elongación	24.50
Dureza (HB)	197

III.5.6- Caracterización física del material del sistema de cierre hermético propuesto

La Figura III.39 muestra la fotomicrografía de acero SAE-AISI 4140, con una resolución de 1,500 x, en la que se aprecia la microestructura de granos de ferrita y perlita laminar fina.

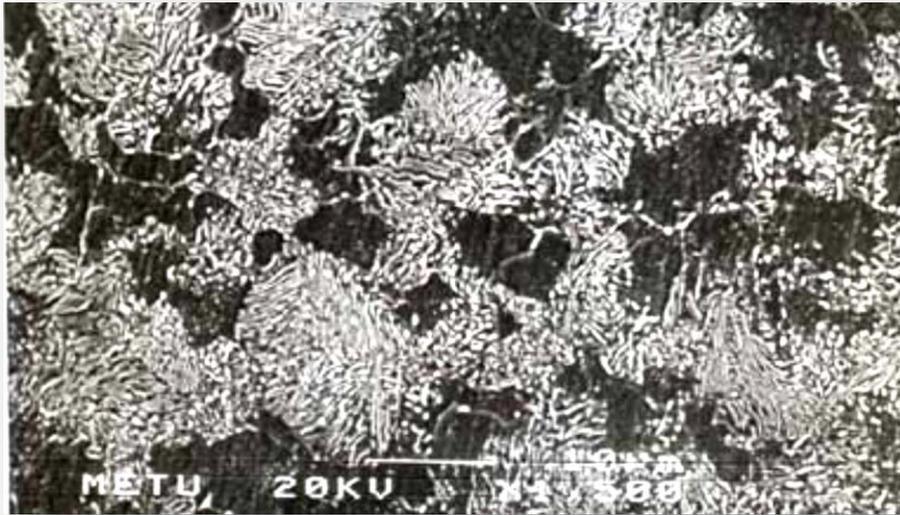


Figura III.39.- Fotomicrografía de acero SAE-AISI 4140 a 1,500 x.

Finalmente los puntos de diseño del proceso de manufactura y la fabricación del modelo del sistema de cierre propuesto, correspondientes a la metodología de diseño empleada, serán descritos en el Capítulo V *Manufactura del prototipo del sistema de cierre y análisis experimental*, considerándose un proceso de mecanizado a partir de una barra de diámetro de 38 mm.

III.6.- Sumario

En el presente capítulo se describen los ensayos de laboratorio realizados a diversas componentes de sistemas de cierre de armamento de empleo a nivel mundial, ya que no obstante de que de forma generalizada se fabrican de acero en diferentes composiciones, es necesario conocer detalladamente las características y condiciones específicas (metalográficas y físicas) que deben cumplir estos materiales, para poder ser sometidos satisfactoriamente a los procesos de

fabricación. También es necesario tener la capacidad de soportar las altas presiones, temperaturas y fricciones que se generan en el interior de un arma durante el disparo, y que forman parte de las pruebas de funcionamiento que se indican en el Capítulo VI. Posteriormente, considerando lo anterior y empleando la ingeniería concurrente para reducir tiempo y recursos, se efectuó el diseño del proyectil sin núcleo; generando su modelo CAD que será analizado numéricamente en el Capítulo IV y proponiendo los materiales y especificaciones a emplear en su fabricación, la cual será descrita en el Capítulo V.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS NUMÉRICO APLICANDO EL MEF EN EL SISTEMA DE CIERRE



“Adquiere en tu juventud lo que disminuirá el daño de tu vejez. Y si tú eres de los que cree que la vejez tiene por alimento la sabiduría, arréglatelas en tu juventud de tal modo que a tu vejez no le falte tal sustento”

LEONARDO DA VINCI, polímata italiano, con destacado talento como pintor, ingeniero e inventor, escribió un sinnúmero de ideas revolucionarias que solo pudieron ser desarrolladas hasta varios siglos después.

(15 ABR. 1452 – 02 MAY. 1519)

IV.1.- Generalidades

Actualmente mediante la simulación numérica con el Método de Elemento Finito (*MEF*) y el empleo de equipos de cómputo y software actualizados, es posible resolver complejos problemas de Dinámica de Fluidos. La simulación es usada en el desarrollo científico y en ingeniería para prever o reconstruir el comportamiento de un producto ingenieril o una situación física bajo condiciones frontera asumidas o medibles (geometrías, estados iniciales, cargas, etc.), teniéndose en años recientes un incremento en el empleo de estas técnicas de simulación, debido a los siguientes aspectos:

- La necesidad de realizar predicciones.
- Costo o imposibilidad de los experimentos
- Aumento de la disponibilidad de velocidad y memoria computacional

Lo anterior ha generado una reducción en la cantidad de experimentos necesarios para el desarrollo de un producto, debido a que cada vez se realizan simulaciones más realistas, como es el caso de los desarrollados por la empresa *Boeing*, la cual estimó que el número de horas en el túnel de viento requeridas para el desarrollo del *Boeing-747 (1963)* fue reducido por un factor de *10* para el *Boeing-767 (1982)* y aún en otro factor de *10* para el *Boeing-777 (1998)*, lo cual es representativo de las tendencias de otras industrias, desde que el campo aeroespacial es uno de los que lideran el uso de simulaciones [*Löhner, 2008*]. La simulación en la Dinámica de Fluidos Computacional, es efectuada mediante la solución numérica de ecuaciones diferenciales parciales, siguiendo la interacción de grandes números de partículas, o una combinación de ambos. El primer

caso es usado siempre que una suposición de continuidad para el flujo pueda ser hecha, mientras que el segundo modelo es empleado en flujos poco comunes, donde un modelo de continuidad no es válido. Las combinaciones de campos y partículas son usados siempre que algunos aspectos de un problema complejo puedan ser mejor modelados como una continuidad y otros como entidades discretas, o cuando el movimiento de las partículas pasivas sea usado para la visualización del flujo, por ejemplo en columnas de flujo con partículas encendidas y flujos ionizados magneto-hidrodinámicos [Löhner, 2008].

Es entonces el Método de Volumen Finito mediante la Dinámica de Flujo Computacional (*DFC; Computational Fluid Dynamics*), una metodología confiable para la solución de problemas de flujo, existiendo pocos programas computacionales en el mercado dedicados a la ejecución de estos métodos. El software *ANSYS 14.1* de la empresa *ANSYS INC.* es uno de los más confiables y que más tiempo tiene en el mercado desde su fundación en 1970, con su sede en Canonsburg, Pennsylvania, EE.UU., y con más de 60 centros estratégicos de ventas en todo el mundo y redes de socios en más de 40 países.

IV.2.- Metodología

El análisis numérico se efectuó aplicando el módulo de Dinámica de Flujo Computacional del software *ANSYS*, en los siguientes dos casos:

- El volumen de gases generados por una munición convencional.
- El volumen de gases generados por una munición sin casco con proyectil sin núcleo.

El primer caso, la representación del volumen de gases generados por una munición convencional calibre 7.62 x 51 mm FMJ, se efectuó en un banco de pruebas con un cañón estandarizado (Figura IV.1), el cual presenta un barreno a 50 mm de su base, que corresponde al punto en que se introduce un transductor piezoeléctrico para realizar obtener las curvas de presión experimentales, asimismo, en la Figura IV.2 se aprecia la perspectiva posterior del modelo CAD del sistema con una munición convencional en la recámara

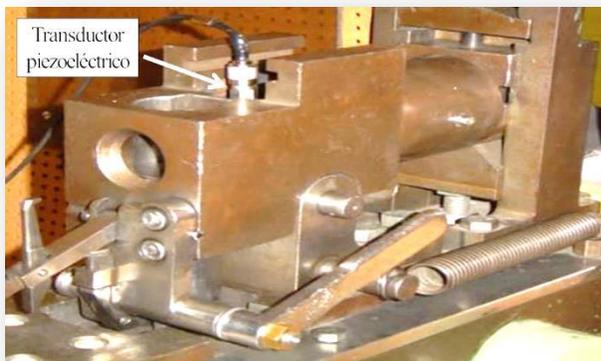


Figura IV.1.- Cañón y banco de pruebas experimentales.

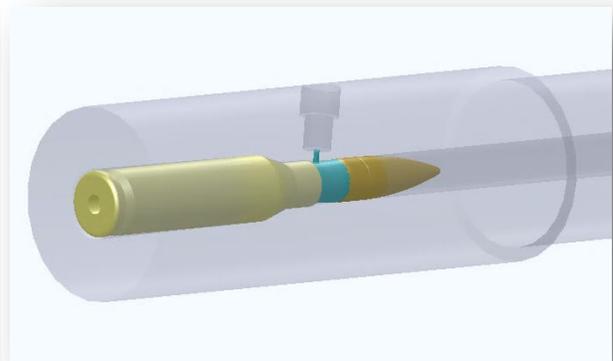


Figura IV.2.- Modelo CAD del cañón de pruebas con la munición convencional.

En la Figura IV.3 un corte longitudinal del cañón de pruebas y la munición, instantes después de que se inició la deflagración de la pólvora y esta alcanza el orificio donde se encuentra el transductor, observándose en color azul el volumen que ocupan los gases iniciales de la combustión de los gases de la pólvora, con los cuales se generó el modelo del sistema (Figura IV.4) que se analizó numéricamente con el MEF.

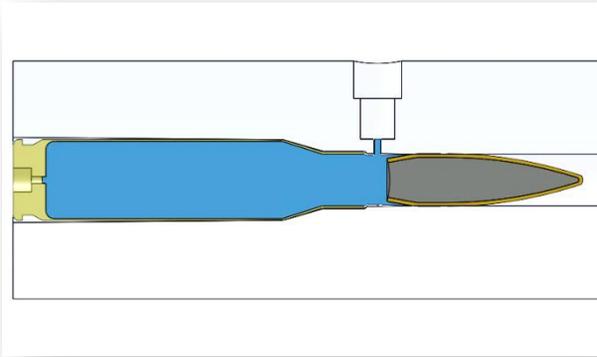


Figura IV.3.- Corte longitudinal de un cañón de pruebas y una munición convencional.

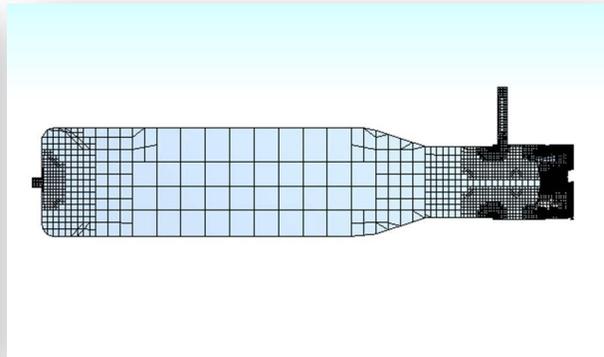


Figura IV.4.- Corte longitudinal del mallado 3D del volumen de gases generado en una munición convencional.

Respecto al segundo caso, la Figura IV.5 es un acercamiento a un fusil de asalto en la parte en que se encuentra su sistema de cierre y el inicio del tubo cañón, lo cual corresponde a la posición en que se encontrará el sistema de cierre hermético propuesto en el Capítulo III, observándose en la Figura IV.6 su modelo CAD con la munición sin casco cargada en su recámara.

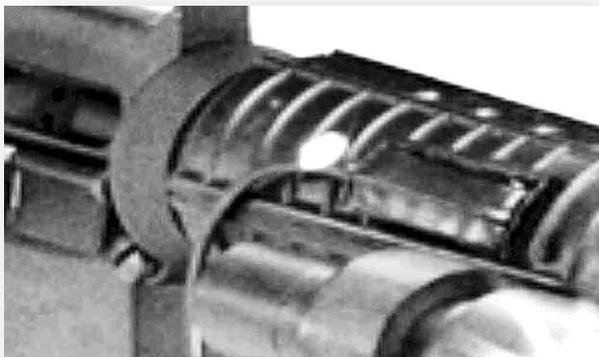


Figura IV.5.- Exterior de la recámara de un fusil de asalto típico.

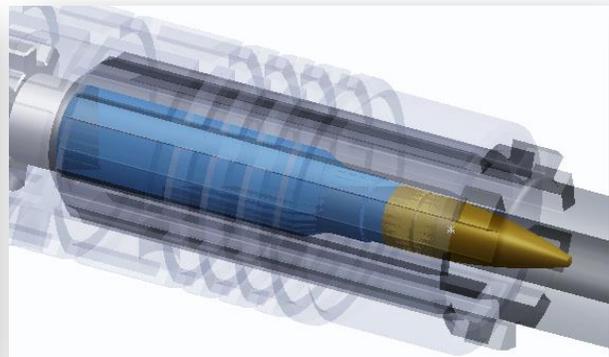


Figura IV.6.- Modelo CAD del sistema de cierre propuesto con la munición sin casco.

En la Figura IV.7 se aprecia la vista de su corte longitudinal, en la que se muestra en azul el volumen de gases generados por la deflagración de la pólvora de la munición sin casco y con ojiva sin núcleo calibre 7.62 mm propuesta, lo cual fue analizado con la simulación numérica en el modelo de este volumen, mostrado en la Figura IV.8.

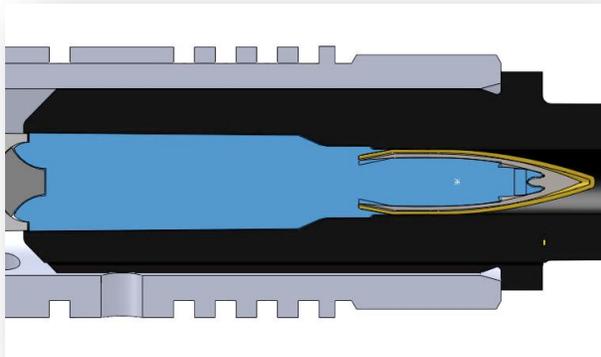


Figura IV.7.- Corte longitudinal del volumen del sistema de cierre hermético obturado.

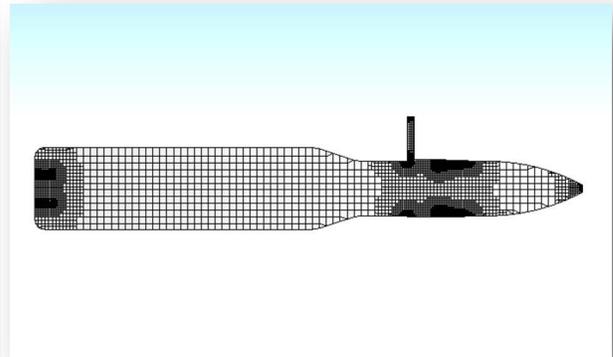


Figura IV.8.- Corte longitudinal del mallado 3D del volumen de gases en el sistema de cierre hermético propuesto.

El primer caso se describirá en el inciso IV.4 *Simulación del perfil tridimensional del sistema de cierre de un cañón de pruebas*, empleando los resultados para validar el análisis numérico, mediante su comparación con resultados de curvas Presión – Tiempo experimentales, lo que se detallará en el Capítulo VI *Análisis comparativo de resultados*. Posteriormente para el segundo caso, se empleará este análisis numérico para conocer los parámetros físicos y térmicos a los que se someterá el sistema de cierre hermético propuesto, refiriéndose estos valores en el inciso IV.5 *Simulación del perfil tridimensional del sistema de cierre hermético propuesto*.

IV.3.- Ecuaciones que gobiernan el sistema

Para el análisis del sistema se consideró un flujo turbulento, de una mezcla de compuestos químicos generados por la deflagración de la pólvora de doble base, resuelto mediante el modelo de disipación de turbulencia (*Eddy-dissipation*), considerando una conversión completa de la reacción. En este caso, el método converge en una solución como función de los cambios de presión y densidad en el fluido, debido a que en fluidos compresibles no viscosos, las ondas de choque son consideradas como discontinuidades de la solución, con un término de viscosidad artificial que tiende a cero para la ecuación de la ley de conservación, por lo que el flujo de gases puede definirse por las leyes de conservación de la masa, el impulso y la energía, las cuales se expresan en términos de ecuaciones diferenciales parciales que se discretizan con una técnica basada en elementos finitos [Silva, 2015].

IV.3.1.- Ecuación de continuidad

De la ley de conservación de la ley de masas, se tiene la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad \text{Ec. IV.1}$$

dónde:

v_x , v_y y v_z = son componentes del vector de velocidad en X, Y y Z, respectivamente

ρ = densidad

x , y , z = plano de coordenadas cartesianas

t = tiempo

La tasa de cambio de la densidad puede ser reemplazado por la tasa de variación de la presión y la velocidad a la que cambia la densidad con la presión:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \quad \text{Ec. IV.2}$$

dónde:

P = presión

La evaluación de la derivada de la densidad con respecto a la presión proviene de la ecuación de estado. Para un algoritmo compresible, el gas ideal se supone:

$$\rho = \frac{P}{RT} \rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{1}{RT} \quad \text{Ec. IV.3}$$

dónde:

R = constante de gas

T = temperatura

IV.3.2.- Ecuación de disipación de turbulencia (*Eddy-dissipation*)

En un fluido compresible, la interacción entre las especies químicas y la turbulencia generada, puede ser descrito por las siguientes ecuaciones de disipación de turbulencia:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \mathbf{R} \frac{Y_{\mathbf{R}}}{v'_{\mathbf{R},r} M_{w,\mathbf{R}}} \quad \text{Ec. IV.4}$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\Sigma_P Y_P}{\Sigma_j^N v''_{j,r} M_{w,j}} \quad \text{Ec. IV.5}$$

dónde:

i = es la tasa neta de producción de especies debido a la reacción r

$R_{i,r}$ = está dada por el valor límite más pequeña de las ecuaciones IV.4 y IV.5

Y_P = es la fracción de masa de cualquier especie producto P ;

Y_R = es la fracción de masa de un reactivo R en particular;

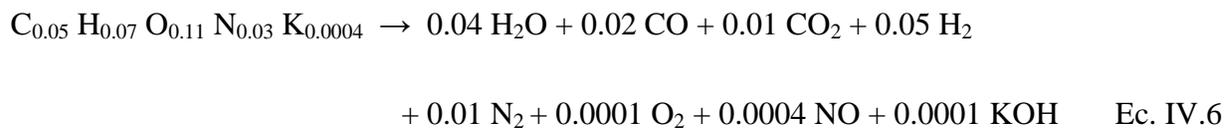
A = es una constante empírica igual a 4

B = es una constante empírica igual a 0.5

IV.3.3.- Compuestos de la reacción química de la combustión

Con el fin de reducir el mayor número de variables que podrían afectar a la comparación de los resultados, se utilizó la pólvora de doble de la munición estandarizada 7.62 x 51 mm FMJ, para realizar los cálculos de la munición propuesta Cal. 7.62 mm sin casco con proyectil sin núcleo.

El cálculo de la reacción química se llevó a cabo con el programa termodinámico “*ICT-Thermodynamic-Code*®”, y los principales compuestos químicos analizados fueron nitrocelulosa (13,25% N), nitroglicerina, nitrato de potasio, Centralita I y etanol, exceptuando el resto de productos gaseosos que por su concentración se consideraron insignificantes. Por lo anterior, considerando el peso molecular de los compuestos, para una reacción de 2.90 g de pólvora de doble base se tiene la siguiente ecuación:



Asimismo se consideró como una reacción global de un solo paso, con el mismo rango de turbulencia, definiendo los coeficientes estequiométricos, la formación de entalpías, la densidad y la capacidad calorífica que son parámetros que influyen en la velocidad de reacción.

IV.4.- Simulación tridimensional del sistema de cierre de un cañón de pruebas

A continuación se describe el modelo del corte longitudinal del sistema de cierre de un cañón de pruebas estándar calibre 7.62 x 51 mm, empleado en la simulación numérica de la Dinámica de Fluidos Computacional (*DFC*), y cuyos resultados se verifican en el Capítulo VI *Análisis comparativo de resultados*, al compararse con los datos de curvas de presión características de las pruebas experimentales que se efectuaron a estas municiones.

IV.4.1.- Generación del modelo tridimensional del sistema de cierre de un cañón de pruebas

Conforme a las dimensiones y especificaciones de un cañón estándar de pruebas de cartuchos calibre 7.62 x 51 mm [*MIL- DTL-46931*], se efectuó el modelado CAD del sistema como se muestra en la Figura IV.9, el cual sirvió de base para el modelo del volumen de los gases que se generan durante el disparo, como se aprecia en la Figura IV.10, en el cual se definieron los puntos necesarios para el análisis numérico y que se encuentra delimitado principalmente por:

- El espacio existente dentro del casco de la munición; incluyendo un pequeño barrenado posterior debido al oído del casco, a través del cual se comunica el dardo de fuego de la capsula del cartucho.

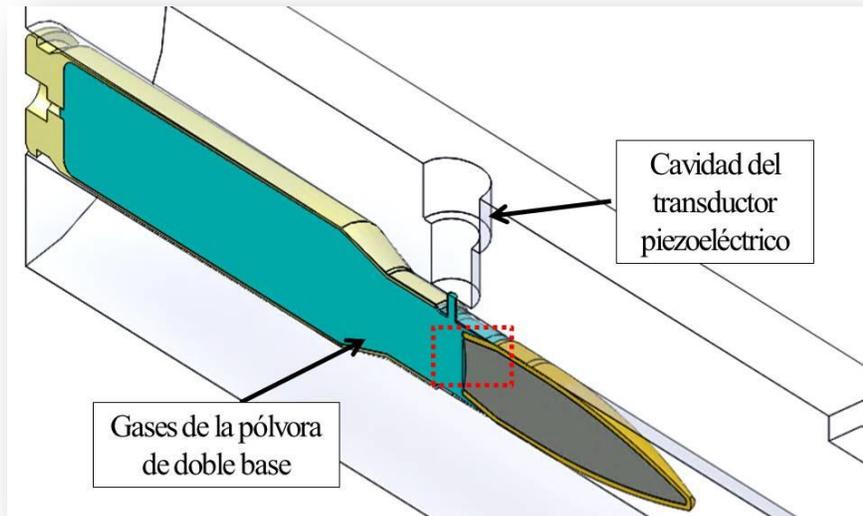


Figura IV.9.- Corte longitudinal del modelo de un tubo cañón de pruebas y de una munición calibre 7.62 x 51 mm instantes después de que se produzca el disparo.

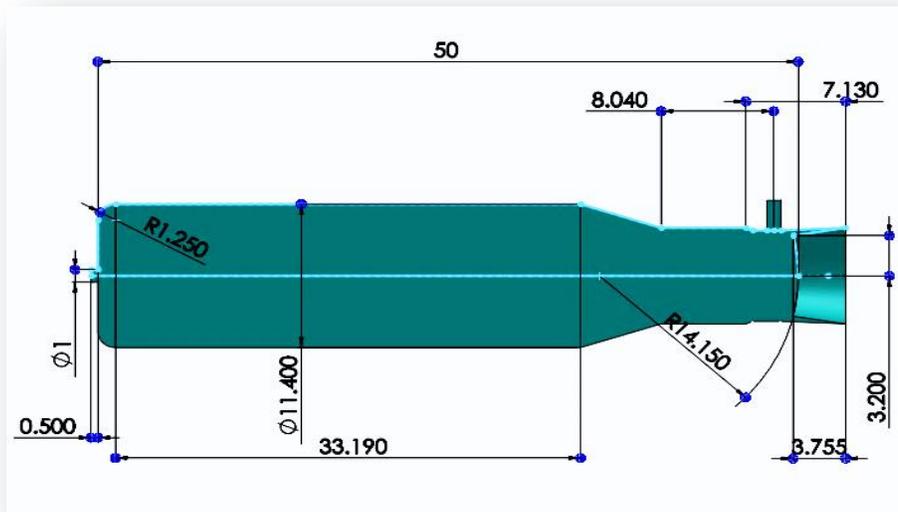


Figura IV.10.- Corte longitudinal del volumen del cierre del cañón de pruebas (acot. mm).

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

- El barrenado de toma de gas del transductor piezoeléctrico; ubicado a 53 mm desde la parte posterior de cañón (Figura IV.9), la cual varía para el caso del volumen de gases generados, por lo que se mide a partir del gollete del casco siendo de 8.040 mm, como se observa en la Figura IV.10.

- La parte posterior de la ojiva; la cual se ubica a 50 mm desde la base del casco, que es la posición que tiene la ojiva instantes después de haberse desprendido del casco de la munición y de haber rebasado el espacio conocido como *vuelo libre*, que tiene una distancia de 7.130 mm y es la parte que se tiene en el tubo cañón antes de iniciar el estriado, por lo que la ojiva no toca esa superficie y *vuela* libremente mientras lo atraviesa, para finalmente obturarse con el inicio del rayado del cañón.

IV.4.2.- Generación del mallado del modelo de elementos finitos del sistema de cierre de un cañón de pruebas

Con el modelo tridimensional, se generó un conjunto de puntos o nodos para construir la matriz numérica que contiene las características físicas del medio, utilizando una forma de malla constituida por elementos de hexaedros y prismas, con un rango de crecimiento lineal de 1.2, generado en el programa ANSYS y utilizando el método *Cutcell* para ajustar apropiadamente en todos los espacios de la malla, incluyendo los bordes e intersecciones. En la Figura IV.11 se muestra la sección longitudinal de esta malla, y en la Figura IV.12 un acercamiento a la zona del transductor piezoeléctrico, en la cual se generó una mayor densidad de nodos a fin de obtener una mayor precisión en los resultados.

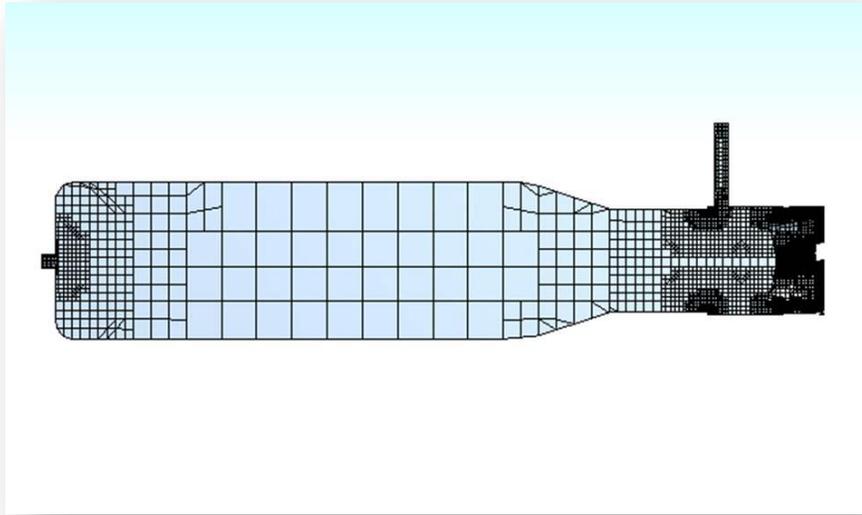


Figura IV.11.- Corte longitudinal del mallado 3D del sistema de cierre de un cañón de pruebas.

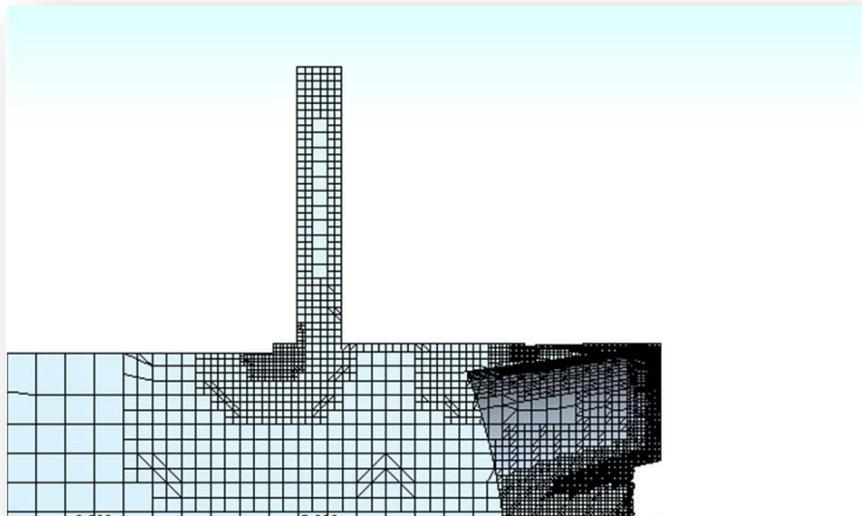


Figura IV.12.- Malla correspondiente a la toma de gases del transductor piezoeléctrico, dentro de la malla del sistema de cierre de un cañón de pruebas (acercamiento).

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

Similarmente en la zona en que se une el estriado del tubo cañón con la parte cilíndrica de la bala también se tiene una mayor densidad de los elementos de la malla, como se observa en la Figura IV.13, con lo que se incrementa la cantidad de cálculos que el programa de simulación realiza en esta parte, obteniendo resultados mas confiables y precisos.

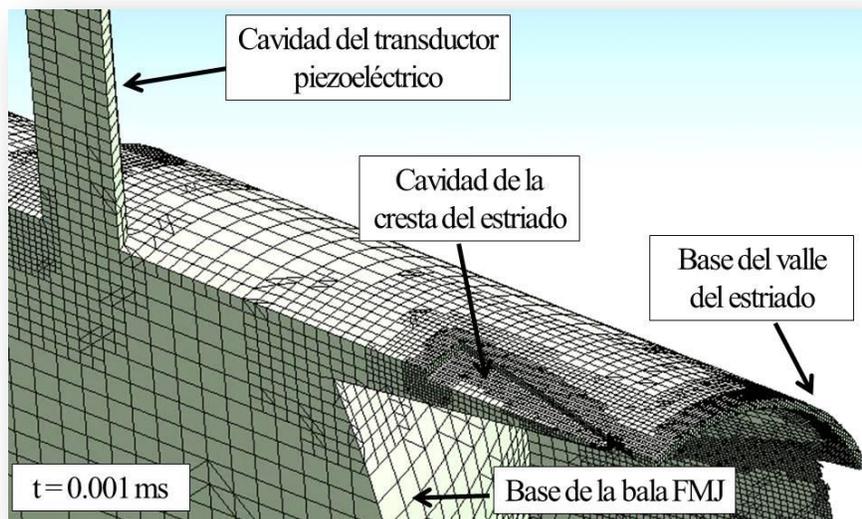


Figura IV.13.- Vista de la unión del estriado con la bala 7.62 mm, dentro de la malla del sistema de cierre de un cañón de pruebas (acercamiento).

En todos los casos el modelo corresponde al volumen interno de los gases generados por la combustión de la pólvora tras el disparo, siendo posible ver el espacio de la capsula de iniciación en la parte posterior (izquierda), el orificio del transductor piezoeléctrico, las primeras ranuras de estriado del cañón y la base de la bala 7.62 mm FMJ (derecha).

IV.4.3.- Establecimiento de las condiciones de frontera del sistema de cierre de un cañón de pruebas

Una vez generado el modelo de elementos finitos, se declararon las condiciones de frontera del medio de análisis, empleando propiedades para los gases de la combustión de densidad, viscosidad, conductividad térmica y calor específico:

- **Pared:** se establecen valores de velocidad en los ejes coordenados X y Y iguales a cero.
- **Entrada:** esta frontera es en la cual el gas de la combustión de la pólvora entra al medio, se deben declarar las velocidades a las que entra y condiciones del flujo.
- **Salida:** se considera a esta frontera como las condiciones a las que sale el flujo del sistema.

IV.4.4.- Solución del sistema de cierre de un cañón de pruebas

Se analizó el volumen de los gases generados en diez sistemas estacionarios, en los cuales se incremento proporcionalmente la longitud del cañón desde 5 mm hasta su longitud final de 446 mm, usando 8 incrementos de 50 mm en cada uno de ellos y el último de 41 mm. Asimismo se incluyeron valores de la pólvora de doble base, como la densidad que se consideró de $210 \text{ kg} / \text{m}^3$, la relación de calor específico de 1.2105 , la presión máxima de 400 MPa y una temperatura de estancamiento de $3,200^\circ \text{ K}$.

En el Capítulo VI *Análisis comparativo de resultados*, se detallan los resultados numéricos obtenidos principalmente para las magnitudes de presión, temperatura y velocidad, incluyendo sus vectores, comparándolos con los resultados de la simulación numérica del sistema de cierre hermético propuesto y de las pruebas experimentales realizadas.

IV.5.- Simulación del perfil tridimensional del sistema de cierre hermético propuesto

Aplicando la metodología del Método de Elemento Finito (*MEF*) descrita anteriormente, así como las condiciones frontera y especificaciones correspondientes, se simuló tridimensionalmente el sistema de cierre hermético propuesto en el Capítulo III *Diseño mecánico del sistema cierre* para una munición calibre 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo.

IV.5.1.- Generación del modelo tridimensional del sistema de cierre hermético

Se generó el modelo a partir de las dimensiones y geometrías especificadas en el Capítulo anterior, empleando el conjunto de puntos coordenados para delimitar la geometría completa y tomándose como base el volumen máximo inicial que pueden ocupar los gases dentro del sistema.

En la Figura IV.14 se muestra en color azul este espacio, que corresponde a un volumen de $4,474.17 \text{ mm}^3$ y resulta de la posición en que se encuentren los diferentes componentes del sistema cuando la ojiva se encuentra obturada, instantes después de que el percutor impactó la munición. En ese momento es cuando se inicia la carga de la cápsula y la deflagración de la pólvora, produciendo el desplazamiento de la ojiva a través de la zona conocida como de *vuelo libre*, dentro del tubo cañón que es de aproximadamente de 7.13 mm de longitud, hasta que la ojiva alcanza el estriado del tubo cañón. En la Figura IV.15 se indican las dimensiones y forma del volumen de los gases de ese instante, el cual fue empleado en la simulación numérica inicial que se realizó de este sistema de cierre.

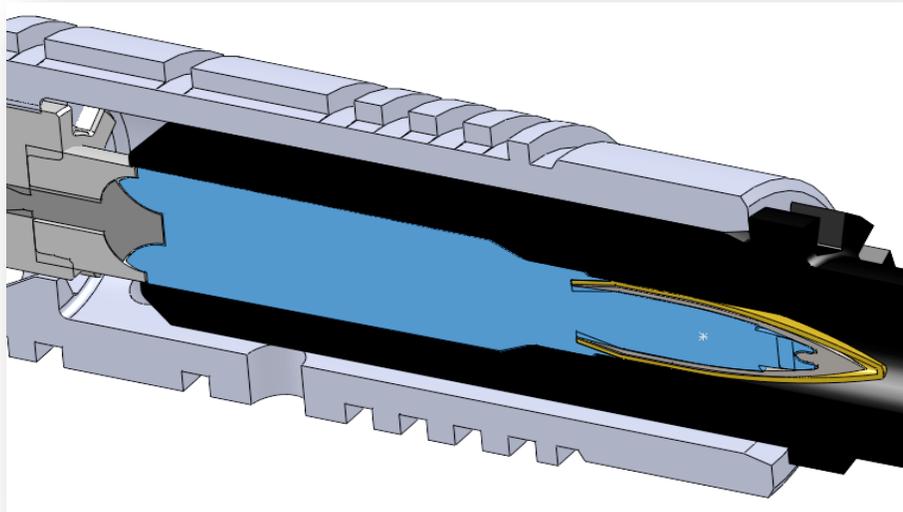


Figura IV.14.- Volumen que pueden ocupar los gases de la deflagración inicial de la pólvora.

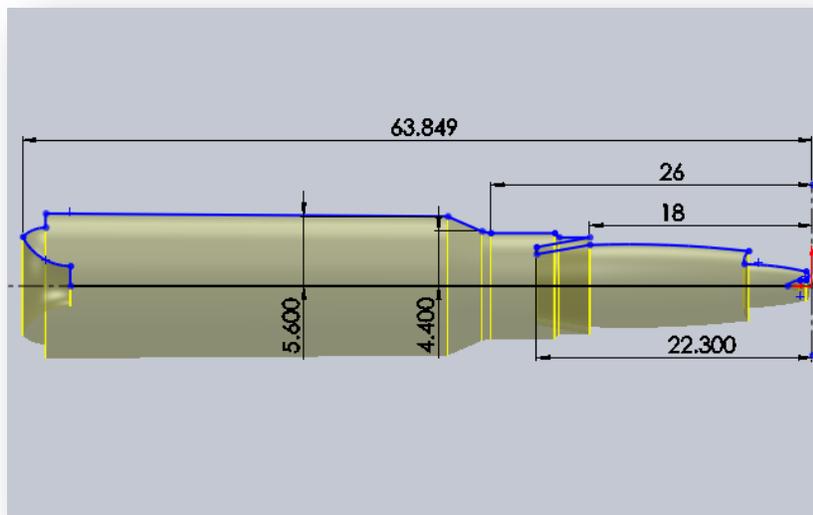


Figura IV.15.- Corte longitudinal del volumen del sistema obturado (acot. mm.).

IV.5.2.- Generación del modelo de elementos finitos del sistema de cierre hermético

El mallado del sistema se indica en la Figura IV.16 observándose la geometría, la distribución y la ubicación de los nodos, en el que similarmente al caso anterior también los elementos de hexágonos y prismas constituyen la malla del sistema, encontrándose incluso dentro del proyectil, pues éste no tiene núcleo y se llena por los gases de la deflagración de la pólvora

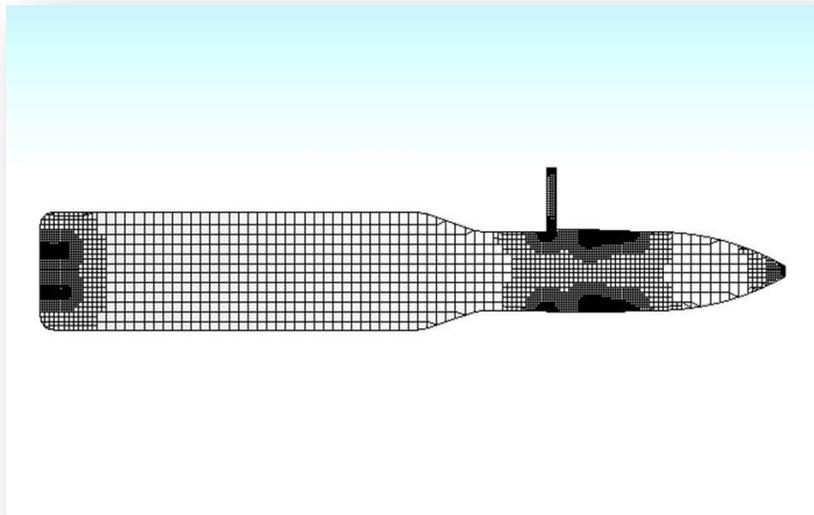


Figura IV.16.- Corte longitudinal del mallado 3D del sistema de cierre hermético propuesto.

Estos puntos o nodos se emplearon para construir la matriz numérica que contiene las condiciones del sistema de cierre hermético propuesto, observándose en las Figuras IV.17 y IV.18 acercamientos a las zonas donde se ubica el transductor piezoeléctrico y donde el proyectil o bala se une al estriado del cañón, siendo en éstas zonas la malla más densa, por ser lugares de geometría compleja y donde es necesario un mayor número de nodos a fin de que el análisis numérico converja correctamente.

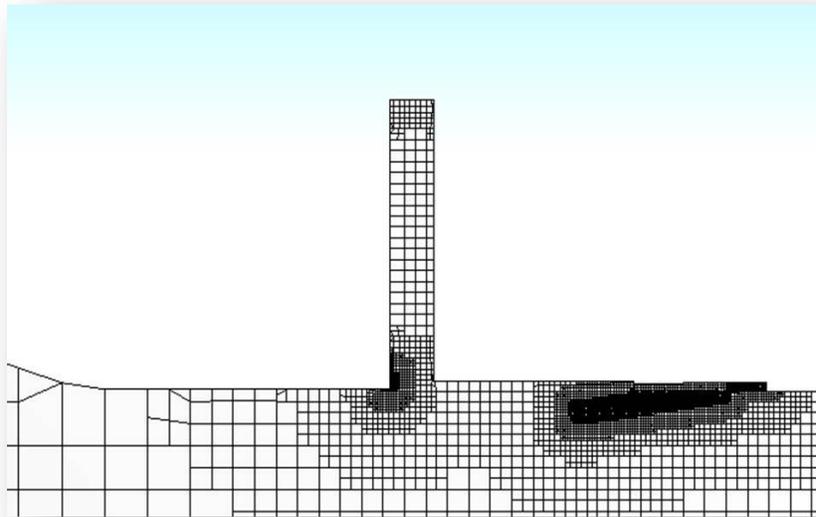


Figura IV.17.- Espacio de salida para el transductor piezoeléctrico, dentro de la malla del sistema de cierre hermético propuesto (acercamiento).

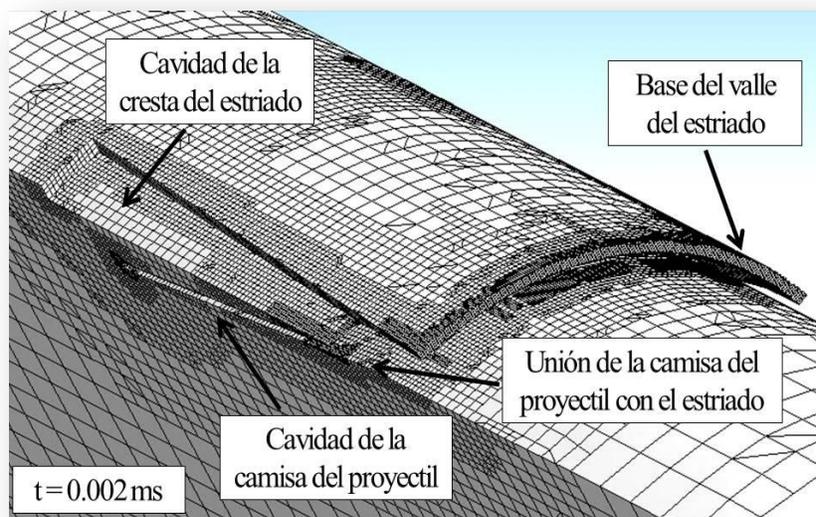


Figura IV.18.- Unión del estriado del cañón con la parte cilíndrica de la bala Cal. 7.62 mm sin núcleo, dentro de la malla del sistema de cierre hermético propuesto (acercamiento).

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

IV.5.3.- Establecimiento de las condiciones de frontera del sistema de cierre hermético

Con base en los resultados de la simulación anterior, se emplearon las mismas condiciones de frontera de densidad, viscosidad, conductividad térmica y calor específico, con la adaptación de la geometría respectiva del cierre hermético propuesto y a la munición Cal. 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo.

IV.5.4.- Solución del sistema de cierre hermético

Similarmente al sistema de cierre empleado en la munición estandarizada Cal. 7.62 x 51 mm, se realizaron en este caso diez sistemas estacionarios, partiendo desde una longitud del cañón de 5 mm, que es la posición en que el proyectil se obtura inicialmente en el estriado, hasta una longitud final del cañón de 446 mm, que es la posición en que se encuentra el proyectil antes de su salida de la boca del cañón.

Asimismo se emplearon las mismas condiciones de frontera y de referencia de la pólvora de doble base sin humo, describiéndose los resultados en el Capítulo VI en el que se comparan con los valores experimentales de las pruebas balísticas realizadas.

IV.6.- Sumario

En el presente capítulo se indicaron las bases de la simulación numérica realizada con el Método de Elemento Finito a los modelos tridimensionales de los sistemas de cierre de un cañón de pruebas y del cierre hermético propuesto.

Con los modelos obtenidos se determinará el comportamiento del gas dentro de los sistemas, adquiriendo diversos datos significativos de su comportamiento, como son la temperatura, presión, energía cinética, viscosidad, densidad, velocidad y número *Mach* entre otros, las cuales no pueden ser medidas directamente de un banco de pruebas o en un arma bajo pruebas experimentales; por lo que la simulación numérica es una solución confiable, que permite realizar modificaciones al sistema y/o condiciones frontera, evaluándolos con una considerable reducción de costos y tiempos.

Los resultados de estas simulaciones se detallan en el Capítulo VI *Análisis comparativo de resultados*, en el que se comparan los valores de presión obtenidos numéricamente en la zona de la toma de gases del transductor piezoeléctrico, contra los resultados de las curvas de presión experimentales, que se obtienen en la misma zona mediante pruebas balísticas realizadas a los prototipos fabricados conforme lo indicado en el siguiente Capítulo V *Manufactura del prototipo del sistema de cierre y análisis experimental*.

CAPÍTULO V

MANUFACTURA DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA DE CIERRE, ANÁLISIS EXPERIMENTAL



*“Si he visto más lejos ha sido porque he subido
a hombros de gigantes.”*

ISAAC NEWTON, físico, filósofo, inventor y matemático inglés, describió la ley de la gravitación universal y estableció las bases de la mecánica clásica.
(04 ENE 1643 – 31 MAR 1727)

V.1.- Generalidades

Dados los componentes, materiales y especificaciones del sistema de cierre propuesto, su manufactura corresponde a un proceso de transformación de la industria metal-mecánica, correspondiendo principalmente a las operaciones de maquinado para la fabricación del sistema de cierre y la de embutido profundo para las municiones.

Para la realización del análisis experimental del sistema de cierre hermético propuesto se manufacturó su prototipo, así como el de la munición sin casco y con proyectil sin núcleo, conforme el diseño obtenido en el Capítulo III *Diseño mecánico del sistema de cierre*, e integrados por los componentes que se describen a continuación:

- **Munición sin casco y con proyectil sin núcleo:** la manufactura de este prototipo se basó en las municiones sin casco existentes a nivel mundial, pero proponiéndose el empleo de un proyectil sin núcleo, lo cual se fundamenta en el estudio realizado por el suscrito en el año 2011 [*Silva, 2011*].
 - **Ojiva / bala:** es el proyectil que se impacta contra un blanco, de forma ojival y sin núcleo de plomo, fabricada mediante diversas operaciones de embutido profundo y corte.
 - **Propelente:** es la carga de propulsión del sistema, siendo una mezcla de *pólvora sin humo de doble base* aglutinada con *goma arábiga*.

- **Sistema de cierre hermético:** Comprende la recámara del arma, donde se efectúa la deflagración de la pólvora y el cañón por donde se desplaza la ojiva, debiendo ser hermético mientras se produce el disparo y posteriormente abrirse para permitir la entrada de una nueva munición.
 - **Cabeza de cierre:** Es el mecanismo de cerrojo del sistema de cierre hermético, ubicado en su parte posterior y fabricado principalmente con operaciones de *torneado* y *fresado*.
 - **Tubo cañón:** Contiene la parte principal de la recámara y proporciona dirección y precisión a los disparos del arma, mediante el desplazamiento de la ojiva de la munición a través del rayado de su interior, fabricándose principalmente con operaciones de *brochado* ó *suajeado*.

En la Tabla V.1 se indican las actividades realizadas para la manufactura y análisis experimental del prototipo del sistema de cierre hermético y de la munición sin casco.

Tabla V.1.- Metodología empleada en la manufactura y experimentación.

Descripción	Proceso	Resultados
Manufactura del prototipo de la munición sin casco	<u>Propelente aglutinado</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis del proceso ▪ Mezcla del propelente ▪ Máquina de carga 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adaptación del proceso ▪ Carga del propelente

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

Tabla V.1.- Metodología empleada en la manufactura y experimentación (cont.).

Descripción	Proceso	Resultados
Manufactura del prototipo de la munición sin casco	<u>Ojiva sin núcleo</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis del proceso ▪ Máquina de embutido 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Revisión de planos ▪ Modelo CAD del herramental ▪ Adaptación del proceso ▪ Embutido profundo
	<u>Ensamble</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis del proceso ▪ Secado del propelente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adaptación del proceso ▪ Carga y ensamble de municiones ▪ Prototipo de la munición
Manufactura del prototipo del sistema de cierre hermético	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis y adaptación del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Revisión de planos ▪ Modelo CAD del herramental ▪ Adaptación del proceso ▪ Maquinado
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Centro de maquinado 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prototipo del sistema de cierre
Pruebas experimentales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dilución en agua ▪ Análisis calorífico ▪ Pruebas balísticas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Higroscopicidad ▪ Capacidad calorífica e Incombustos ▪ Presión, velocidad y precisión ▪ Parámetros balísticos

Estas pruebas experimentales y procesos de manufactura, se realizaron en laboratorios y talleres de las Escuelas Superiores de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidades Azcapotzalco, Ticomán y Zacatenco, y de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del Instituto Politécnico Nacional.

V.2.- Componentes y manufactura del propelente del prototipo de la munición sin casco

El propelente de la munición caseless se fabricó con pólvora de doble base sin humo aglutinada con goma arábica, como se muestran en las Figuras V.1 y V.2, y empleando el molde mostrado en la Figura V.3 se fabricaron cilindros de pólvora aglutinados como el mostrado en la Figura V.4, que corresponden a las dimensiones del tubo-cañón y cargas de 1.0 g de pólvora.



Figura V.1.- Goma arábica.



Figura V.2.- Pólvora sin humo de doble base esférica.



Figura V.3.- Molde para cilindros de pólvora.



Figura V.4.- Cilindro de pólvora aglutinada.

V.3.- Componentes y manufactura del prototipo de la ojiva sin núcleo

La ojiva con núcleo parcial de acero, se fabricó mediante la operación de embutido profundo mostrada esquemáticamente en la Figura V.5, en la que se embute un disco de diámetro D_b y los lados del punzón y del troquel están separados por un espacio c , siendo éste aproximadamente 10% mayor que el espesor del material en embutido

El disco de diámetro D_b , se embute dentro de un troquel por medio de un punzón de diámetro D_p , el punzón y el troquel deben tener un radio en las esquinas determinado por R_p y R_d , si el punzón y el troquel tienen esquinas agudas (R_p y $R_d = 0$), se realizará una operación de perforado de un agujero en lugar de una operación de embutido [Kalpakjian, 2008].

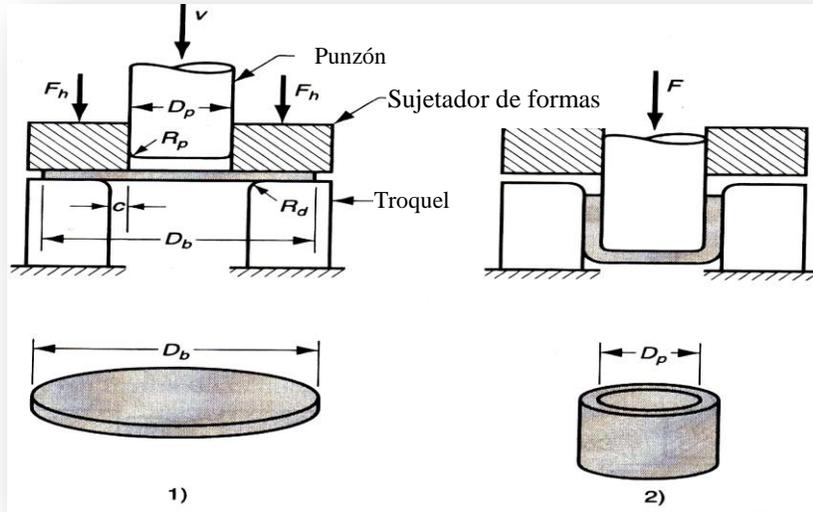


Figura V.5.- Proceso de embutido: 1) Inicio de la operación, antes de que el punzón toque la pieza acoplada y 2) Cerca del fin de la carrera [Groover, 2007].

Este proceso se efectuó en una máquina *Waterbury Farrel* como la mostrada en la Figura V.6, en las que comúnmente se tienen alineados diversos punzones y troqueles para el embutido de las piezas, toda vez que a la fuerza que aplica el punzón se opone la del metal, en forma de deformación y fricción durante la operación, y que una parte de la deformación involucra estiramiento y adelgazamiento del metal al ser jalado sobre el borde de la abertura del troquel.



Figura V.6.- Máquinas típicas de embutido profundo empleada en la fabricación de ojivas.

En total para poder manufacturar el prototipo de la ojiva sin núcleo, se emplearon 9 operaciones secuenciales de embutido mediante los troqueles y punzones mostrados en las Figuras V.7, V.8 y V.9, aplicados a 3,000 Kgf. para poder generar el flujo del latón 90/10 sobre la forma del troquel. [Molina, 1988].

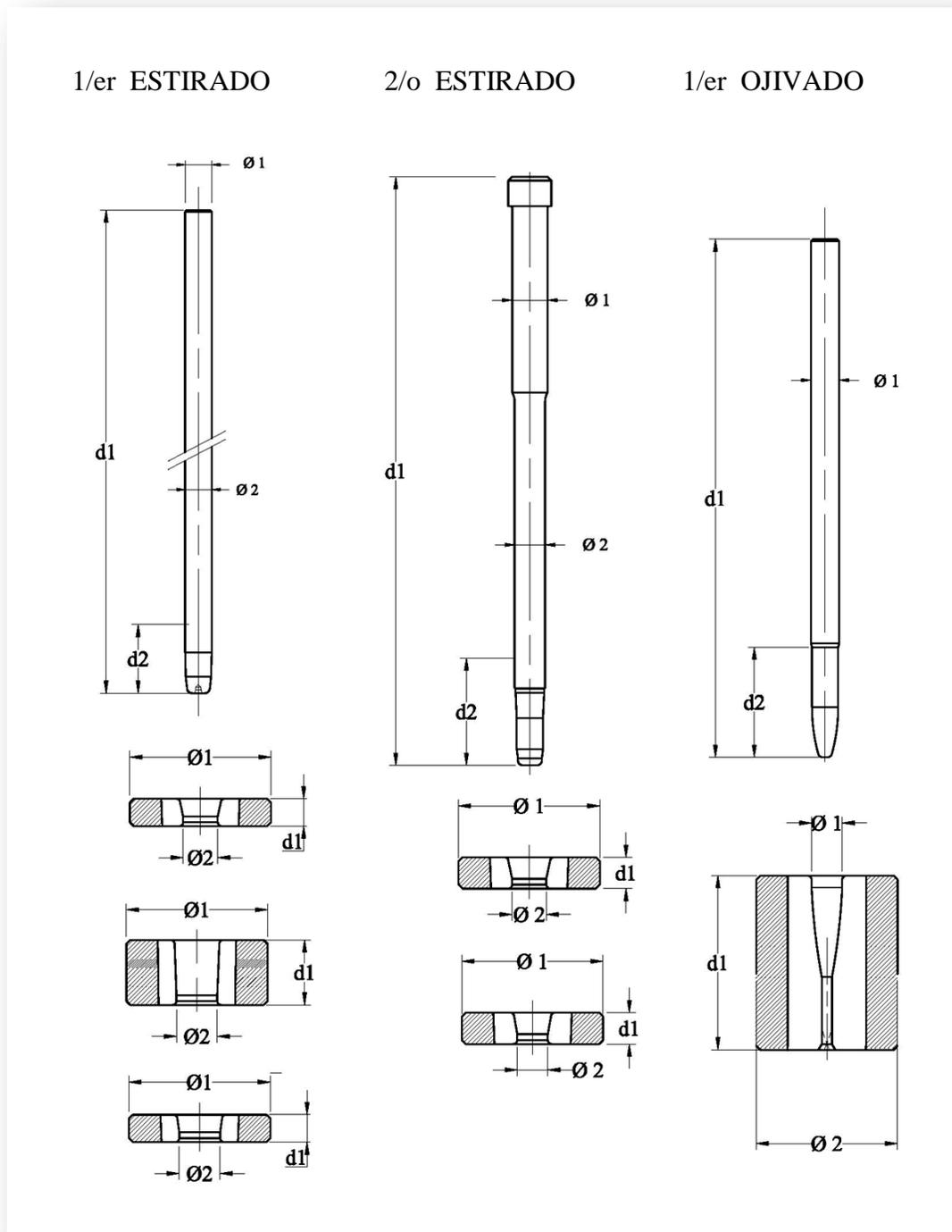


Figura V.7.- Proceso de fabricación de ojivas sin núcleo Cal. 7.62 mm, primer segmento.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

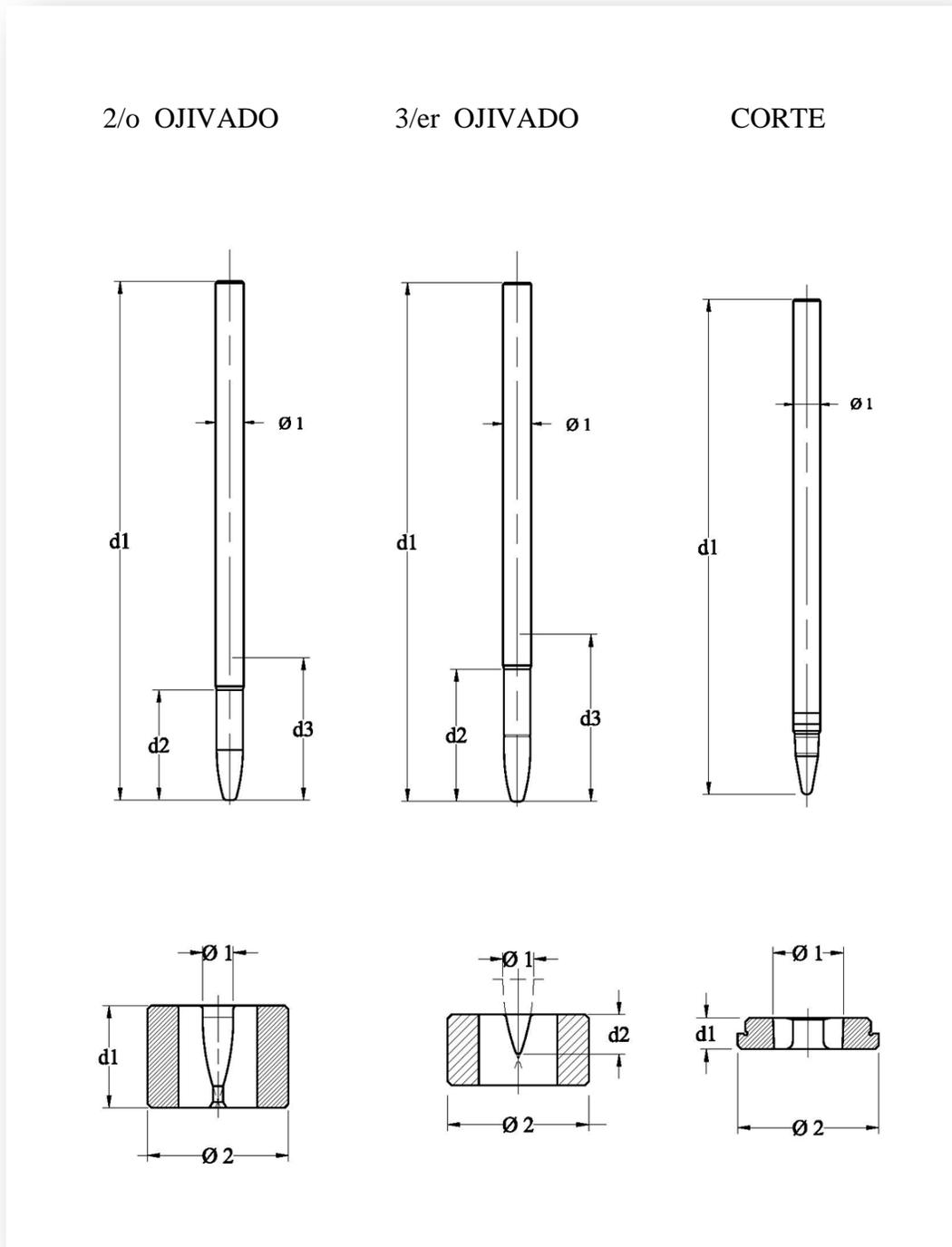


Figura V.8.- Proceso de fabricación de ojivas sin núcleo Cal. 7.62 mm, segundo segmento.

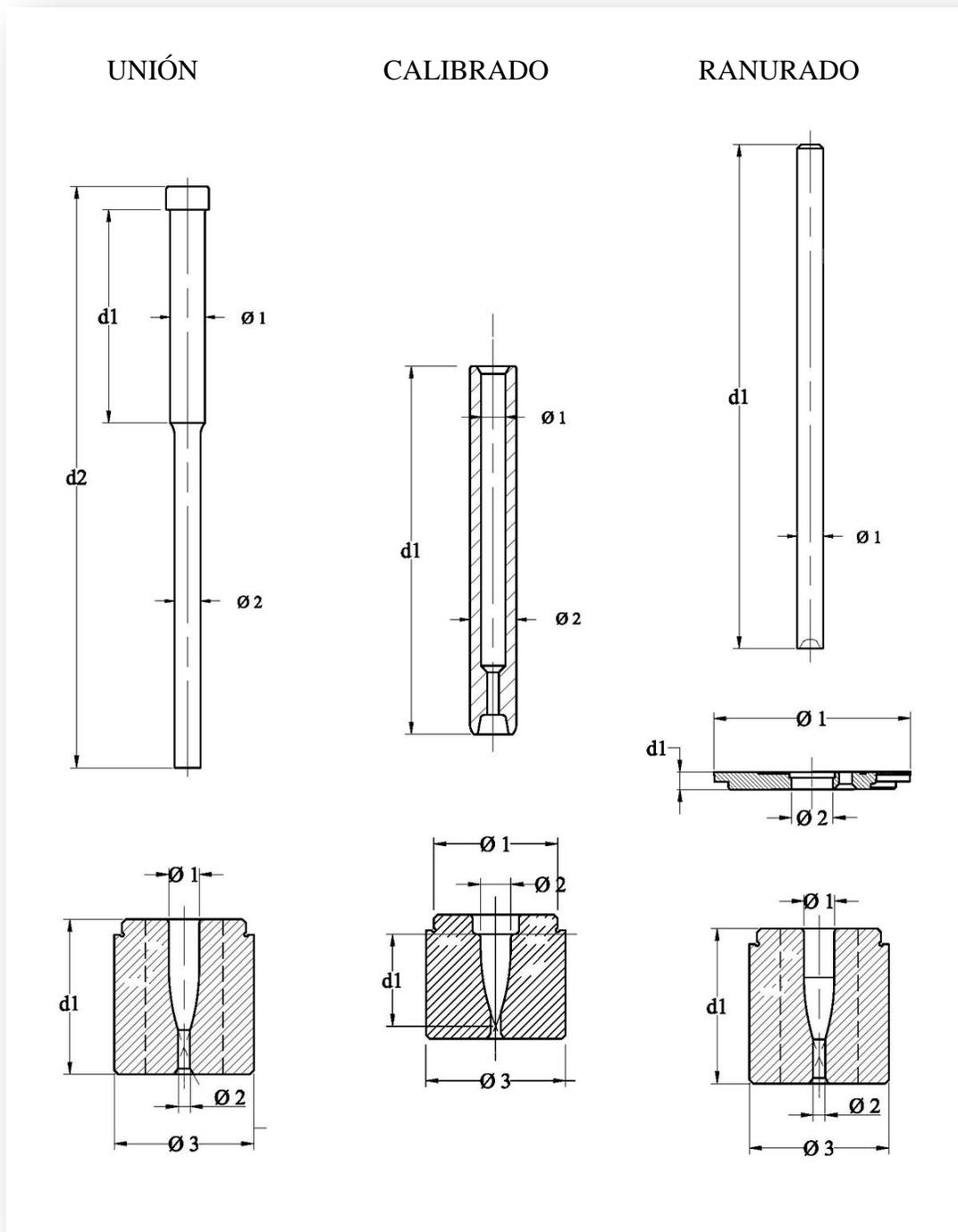


Figura V.9.- Proceso de fabricación de ojivas sin núcleo Cal. 7.62 mm, tercer segmento.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

Debido a las especificaciones y características del diseño de la ojiva sin núcleo, fue necesario el modificar las operaciones de *unión* y *calibrado*, a fin de obtener el prototipo deseado como se muestra en la Figura V.10, en comparación de una ojiva normal indicada en la Figura V.11.



Figura V.10.- Prototipo fabricado de la ojiva calibre 7.62 mm sin núcleo.



Figura V.11.- Ojiva calibre 7.62 mm FMJ, con núcleo de plomo.

V.4.- Ensamble del prototipo de la munición sin casco

El proceso de ensamble de la munición se efectuó con la reunión de la ojiva sin núcleo (Figura V.10) y el cilindro de propelente (Figura V.4), consistiendo principalmente de:

- *Moldeo:* se empleó como molde el casco de la munición calibre 7.62 x 51 mm, toda vez que corresponde a las dimensiones del tubo cañón.
- *Secado:* en un horno de convección mecánica marca Thermo Scientific modelo 0957, se secaron los prototipos bajo condiciones controladas, en un tiempo de 5 horas y a una temperatura de 60 °C.

- *Desmolde:* Previamente con una pequeña capa de desengrasante se recubre el molde, a fin de que una vez seca la pieza, se facilite su separación y se evite la ruptura de los prototipos.

En la Figura V.12 se muestra una munición convencional Cal. 7.62 x 51 mm FMJ comparada con el prototipo de la munición sin casco y con proyectil sin núcleo fabricada, y que se empleó en las pruebas de funcionamiento del sistema de cierre hermético propuesto.



Figura V.12.- Munición Cal 7.62 x 51 mm FMJ y munición prototipo
Cal. 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo.

V.5.- Componentes y manufactura del prototipo del sistema de cierre hermético

Conforme a los procesos de manufactura mencionados en el Capítulo II *Marco teórico sobre balística y armamento*, y dada la infraestructura disponible, se empleó el proceso de brochado para

realizar el estriado del tubo cañón y el maquinado para el exterior del cañón y la cabeza de cierre prototipos del sistema de cierre hermético propuesto.

V.5.1- Manufactura del cañón prototipo del sistema de cierre hermético

El estriado (canales internos en espiral) del cañón prototipo calibre 7.62 mm, se efectuó en una máquina brochadora vertical marca Ty Miles Inc. como la mostrada en la Figura V.13, en la que se empuja la brocha mientras desbasta o arranca el material, con un movimiento lineal vertical, siendo posteriormente maquinados en su geometría externa en centros de torneado.



Figura V.13.- Máquina típica de brochado vertical para la fabricación del estriado de cañones.

Esta brochadora es de accionamiento hidráulico con una fuerza de tracción de hasta 0.9 MN (100 toneladas), para empujar la brocha y avanzar venciendo la resistencia del acero 4140 de la pieza de

trabajo, hasta lograr la profundidad y la anchura total de corte deseadas, en función de la velocidad de corte, el perfil de los dientes y el uso de fluidos de corte, mostrándose en la Figura V.14 los cañones prototipo fabricados para la realización de las pruebas experimentales. Para generar el estriado, el cañón se mantiene en una abrazadera giratoria que rota el tubo cañón mientras se empuja la brocha a través del tambor giratorio, teniendo la brocha 22 discos espaciados de 1 a 1.5 pulgadas de distancia y una sección delantera para alinear la herramienta.



Figura V.14.- Cañones prototipo calibre 7.62 mm;
vista exterior (*arriba*) y corte transversal de la recámara (*abajo*).

V.5.2- Manufactura de la cabeza de cierre prototipo del sistema de cierre hermético

Se empleó un centro de maquinado de husillo horizontal marca DMG Deckel Maho Gildemeister como el mostrado en la Figura V.15, para la manufactura de la cabeza de cierre prototipo indicada en la Figura V.16, así como para algunas superficies externas y el acabado final de partes internas de la recámara y del cañón.



Figura V.15.- Centro de torneado de control numérico por computadora.



Figura V.16.- Cabeza de cierre prototipo del sistema de cierre hermético ampliado.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

V.6.- Análisis experimental del propelente del prototipo de la munición sin casco

Se efectuaron pruebas experimentales de solubilidad en agua del aglutinante, con objeto de verificar el tiempo de solubilidad y determinar su higroscopicidad, observándose en las Figuras V.17 y V.18 etapas de las pruebas realizadas, las cuales fueron efectuadas en un volumen de 30 ml de agua destilada, a 22.8 °C, con la presión atmosférica del ambiente en Azcapotzalco, México D.F. de 102.68 kPa (770.16 mmHg ó 1.01 atm) y sin dispersión mecánica.



Figura V.17.- Película de goma arábica de 1 mm de espesor.



Figura V.18.- Prueba de solubilidad de la película de goma arábica en agua.

En la Tabla V.2 se indican el tiempo promedio en el que se identificó un cambio en las probetas de goma arábica, teniéndose un promedio de 1 hora con 25 min de tiempo necesario para que las muestras de 1.25 mm de espesor presenten solubilidad total, y de 1 hora con 35 min para muestras de 1.50 mm a 2.50 mm de espesor se disuelvan en el agua, asimismo se puede identificar un tiempo mínimo de 30 min en el que sumergidas totalmente no presentan ningún cambio en su espesor ni características.

Tabla V.2.- Resultados de la prueba de solubilidad de películas de goma arábica.

Cant. muestra	Espesor (mm)	Peso (g) probeta	30 min	1 hr	1 hr 25 min	1 hr 35 min	1 hr 50 min
5	1.25	0.083	Insoluble	Insoluble	Soluble	Soluble	Soluble
5	1.50	0.1265	Insoluble	Insoluble	Insoluble	Soluble	Soluble
5	1.75	0.1905	Insoluble	Insoluble	Insoluble	Soluble	Soluble
5	2.00	0.2629	Insoluble	Insoluble	Insoluble	Soluble	Soluble
5	2.25	0.3381	Insoluble	Insoluble	Insoluble	Soluble	Soluble
5	2.50	0.4100	Insoluble	Insoluble	Insoluble	Soluble	Soluble

Asimismo las Figuras V.19 y V.20 muestran las pruebas de combustión efectuadas a las películas de goma arábica, en las que se midieron y compararon los incombustos generados.



Figura V.19.- Combustión de una película de goma arábica.



Figura V.20.- Incombustos generados por una película de goma arábica.

La Tabla V.3 muestra el peso de los resultados obtenidos, a partir de la combustión de las películas de goma arábica a fuego directo, observándose que para una película de 2.50 g se genera un máximo de residuos de 0.0289 g lo que podría considerarse se evacuaría con los gases de la combustión.

Tabla V.3.- Resultados de la prueba de combustión de películas de goma arábica.

Cant. muestra	Espesor (mm)	Peso (g) probeta	Peso (g) residuo
5	1.25	0.083	0.009
5	1.50	0.1265	0.011
5	1.75	0.1905	0.015
5	2.00	0.2629	0.0190
5	2.25	0.3381	0.0221
5	2.50	0.4100	0.0289

Similarmente se realizaron estas pruebas a los cilindros de pólvora aglutinada, verificando la solubilidad del cilindro de pólvora aglutinado, como se observa en las Figuras V.21 y V.22, en las que se prepararon cilindros con 1 g de goma arábica y 1 g de pólvora, los cuales se mezclaron y secaron durante 8 horas en un horno de convección a una temperatura de 70 °C, disolviéndose posteriormente en un vaso de precipitado con 50 ml de agua destilada con una temperatura de 22 °C, en un tiempo de 40 min. De igual forma se preparó otro cartucho con un peso de 2 g de goma arábica y 2 g de pólvora con las mismas condiciones de preparación de secado, temperatura y volumen de agua, requiriéndose de un tiempo de 50 min para disolverse completamente.



Figura V.21.- Cilindro de 1 g de pólvora aglutinada con goma arábica.



Figura V.22.- Prueba de solubilidad de un cilindro de 1 g. de pólvora aglutinada.

De igual forma, se realizó la prueba de combustión de cilindros de pólvora de diferentes pesos y volúmenes, aplicándoseles fuego directo para iniciar su combustión, como se muestra en las Figuras V.23 y V.24.



Figura V.23.- Deflagración del propelente.



Figura V.24.- Incombustos generados.

La Tabla V.4 muestra el peso de los resultados obtenidos, a partir de la combustión de las películas de goma arábica a fuego directo, observándose que para una carga de 2.90 g de pólvora mezclada con 2 ml de goma arábica se generan unos residuos máximos de 0.0928 g lo que podría considerarse despreciable y evacuarse del tubo cañón mediante la misma salida de la combustión de los gases.

Tabla V.4- Resultados de la prueba de combustión de cilindros de pólvora aglutinada.

No. muestras	Peso (g) pólvora	Volumen (ml) Goma arábica	Peso (g) cartucho	Peso (g) residuo
5	1.0010	1	1.3297	0.0245
5	2.0004	1	1.7874	0.0262
5	2.0015	2	3.3723	0.0737
5	2.9100	2	4.3233	0.0928

Finalmente se realizaron pruebas en un Calorímetro Diferencial de Barrido marca Perkin Elmer Instruments, modelo Pyris Diamond, como el mostrado en la Figura V.25, que mide la diferencia del flujo de calor entre una muestra y la trayectoria de una referencia, cuando son expuestas a las mismas variaciones de temperatura, siendo este flujo de calor medido en Watts o mW y que al expresarlo en función del tiempo, resulta en una cantidad de la energía en mWs = mJ, asimismo esta energía transmitida corresponde a un cambio igual en la entalpía de la muestra, que cuando absorbe energía se denomina endotérmico y cuando la libera es llamado proceso exotérmico. Asimismo, prácticamente todos los materiales presentan procesos térmicos que involucran cambios en su entalpía o calor específico, como son la fusión, cristalización, transición sólido-sólido y la reacción química.



Figura V.25.- Calorímetro Diferencial de Barrido marca Perkin Elmer, modelo Pyris Diamond.

La Figura V.26, muestra el termo-grama de la prueba realizada a una muestra de pólvora sin humo de doble base, que es la empleada en municiones calibre 7.62 x 51 mm, en el que se observa un proceso exotérmico, con un inicio de la descomposición en el que se encendió la muestra de $198.295\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondiendo el pico de la gráfica a la temperatura máxima alcanzada por la muestra de $198.903\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una energía de 340.538 mJ . Repitiéndose posteriormente la prueba con la misma pólvora de doble base, pero esta vez después de estar humedecida durante 2 horas en agua destilada a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, obteniéndose el termo-grama de la Figura V.27, en el que se identifica que la muestra requiere de un poco más de temperatura para encenderse de $199.135\text{ }^{\circ}\text{C}$ que es un 0.42% mayor, con un pico de temperatura de $200.329\text{ }^{\circ}\text{C}$ que es 0.72% mayor, y una energía liberada de 98.206 mJ , que fue un 71.16% menor a la energía liberada con pólvora sin humedecer.

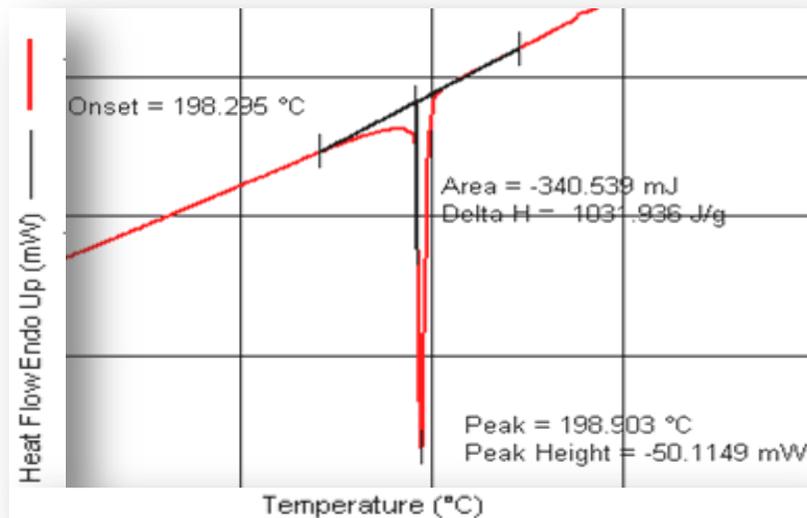


Figura V.26.- Termo-grama de pólvora de doble base normal.

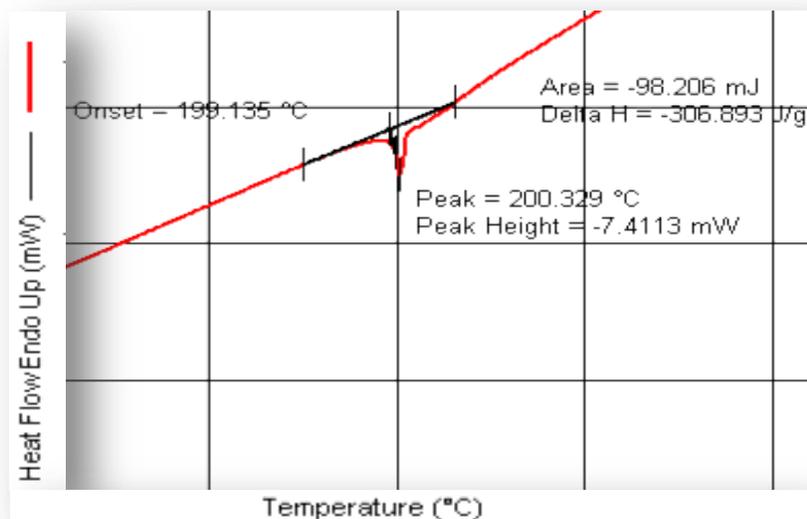


Figura V.27.- Termo-grama de pólvora de doble base humedecida.

V.7.- Análisis experimental de las municiones 7.62 x 51 mm FMJ y 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo

Con el uso de un cañón de pruebas estandarizado montado en un banco de pruebas como el mostrado en la Figura V.28, se realizaron pruebas de presión mediante un transductor piezoeléctrico instalado en la recámara del cañón, así como pruebas de velocidad mediante un cronógrafo balístico y dos sensores ópticos colocados a distancias normalizadas conforme la norma MIL-DTL-46931.

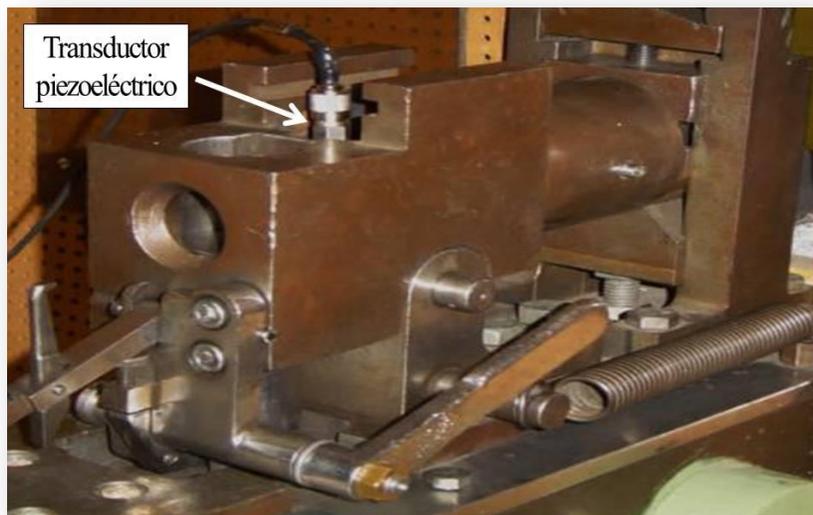


Figura V.28.- Banco y cañón de pruebas Cal. 7.62 mm.

Las pruebas se realizaron en 50 disparos de cada tipo de munición, en 5 series de 10 disparos cada una, siendo:

- Munición Cal. 7.62 x 51 mm FMJ.
- Munición Cal. 7.62 mm sin casco con proyectil sin núcleo.

Mediante estas pruebas experimentales se obtienen para cada uno de los disparos efectuados, curvas de presión – tiempo, con valores de presión máximos y promedio, así como la velocidad medida a una distancia instrumental de 23.77 m, y calcula la velocidad en la boca del cañón, así como la desviación estándar. Los resultados de estas pruebas se indican a detalle en el Capítulo VI *Análisis comparativo de resultados*, a fin de corroborarlos con los resultados numéricos obtenidos para cada tipo de las municiones y sistemas de cierre analizados.

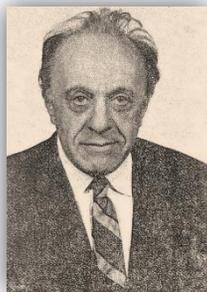
V.8.- Sumario

En el presente capítulo se describió el proceso de manufactura del prototipo del cierre hermético propuesto, compuesto por el cañón y la cabeza de cierre, los cuales fueron diseñados en CAD y fabricados mediante diversos tipos de maquinado. Asimismo, se fabricó el prototipo de la munición sin casco, integrada por una ojiva sin núcleo y el propelente aglutinado, la cual fue manufacturada mediante procesos de embutido profundo y ensamble, así como el sistema de cierre hermético propuesto, con la fabricación del cañón y la cabeza de cierre ampliada.

La metodología experimental consistió fundamentalmente en pruebas al propelente aglutinado de solubilidad, combustión y calorimetría, y se indicó la metodología bajo la que se realizaron las pruebas balísticas de presión y velocidad, de las cuales se indican los resultados en el siguiente Capítulo VI para corroborar la viabilidad del diseño propuesto.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS



*“Las entidades no deben ser reducidas hasta
el punto de inadecuación”*

LEY CONTRA LA MEZQUINDAD

KARL MENGER, Matemático austriaco, realizó estudios en álgebra, geometría, teoría de la curva y la dimensión. Además, contribuyó a la teoría de juegos y a las ciencias sociales.

(13 ENE. 1902 – 05 OCT. 1985)

VI.1.- Generalidades

Los resultados de las simulaciones numéricas fueron comparados contra los resultados de las pruebas balísticas, graficándose las curvas de presión y comparándose los resultados de la velocidad en la boca del tubo cañón. La Tabla VI.1 muestra la metodología empleada en la comparación de los resultados, en el caso del análisis numérico se realizaron 10 simulaciones de sistemas estacionarios, en los que progresivamente se amplió la distancia a la que se encontraba el proyectil dentro del tubo cañón, como se mencionó anteriormente en el Capítulo IV *Análisis numérico aplicando el MEF en el sistema de cierre*.

Los resultados del análisis experimental corresponden al promedio de 5 series de 10 disparos cada una, y debido a que la curva de presión es particular de cada disparo, se tomó una de las más típicas como referencia del resto de los disparos.

Tabla VI.1.- Metodología empleada para la comparación de resultados.

Método		Comparación
Análisis numérico	Análisis experimental	Resultados
Sistema de cierre convencional Cal. 7.62 x 51 mm FMJ. (10 sistemas estacionarios progresivos)	Sistema de cierre convencional Cal. 7.62 x 51 mm FMJ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Curva de presión ▪ Valores de presión desarrollados
Sistema de cierre hermético propuesto Cal. 7.62 mm, con munición sin casco con proyectil sin núcleo. (10 sistemas estacionarios progresivos)	Sistema de cierre hermético propuesto Cal. 7.62 mm, con munición sin casco con proyectil sin núcleo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Valores de velocidad generada a la salida de la boca del cañón.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

VI.2.- Análisis comparativo de los resultados numéricos.

El disparo de las municiones 7.62 x 51 mm FMJ en el cierre convencional y 7.62 mm sin casco y sin núcleo, en el cierre hermético propuesto, fueron simulados inicialmente a una distancia de 5 mm, mostrándose en la Figura VI.1 los cambios de presión del sistema y resumiéndose los resultados en la Tabla VI.2.

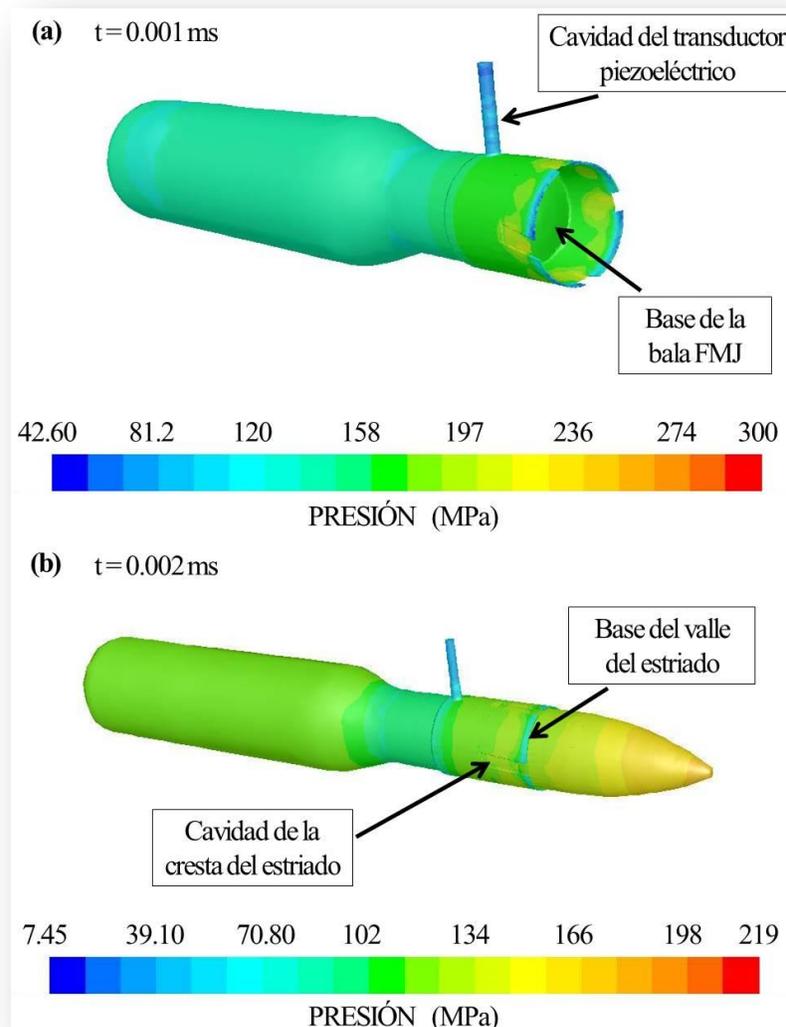


Figura VI.1.- Presión de los gases cuando el proyectil se encuentra en el cañón a 5 mm de distancia, en los sistemas de cierre (a) convencional y (b) hermético propuesto.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

Tabla VI.2.- Presión de los gases en el cañón, con una distancia del proyectil de 5 mm.

Punto de medición	Cierre convencional 7.62 x 51 mm FMJ	Cierre hermético propuesto 7.62 mm
Transductor piezoeléctrico	3.12 MPa	1.50 MPa
Valles del estriado	82.40 MPa	37.94 MPa
Recámara (superficie cilíndrica)	140.00 MPa	118.00 MPa

Estos modelos corresponden al volumen interno del cañón, y pueden observarse las paredes interiores y la cavidad del transductor piezoeléctrico. En la parte derecha se tiene la geometría formada por la unión de la parte cilíndrica del proyectil con el estriado del tubo cañón, como se indicó anteriormente en las Figuras IV.13 y IV.18. La Tabla VI.3 indica los valores de presión obtenidos en los sistemas estacionarios del disparo de los dos tipos de municiones analizadas, pero a la longitud final del tubo cañón de 446 mm.

Tabla VI.3.- Presión de los gases en el cañón, con una distancia del proyectil de 446 mm.

Punto de medición	Cierre convencional 7.62 x 51 mm FMJ	Cierre hermético propuesto 7.62 mm
Transductor piezoeléctrico	31.37 MPa	46.30 MPa
Valles del estriado	10.80 MPa	27.68 MPa
Recámara (superficie cilíndrica)	284.00 MPa	335.00 MPa

Asimismo, con el fin de obtener una gráfica representativa del comportamiento del flujo respecto a la longitud del cañón, se realizó el análisis sobre el eje longitudinal de cada uno de los modelos, mostrándose en la Figura VI.2 su posición en el mallado del primer sistema para una munición Cal. 7.62 x 51 mm FMJ en un cierre convencional.

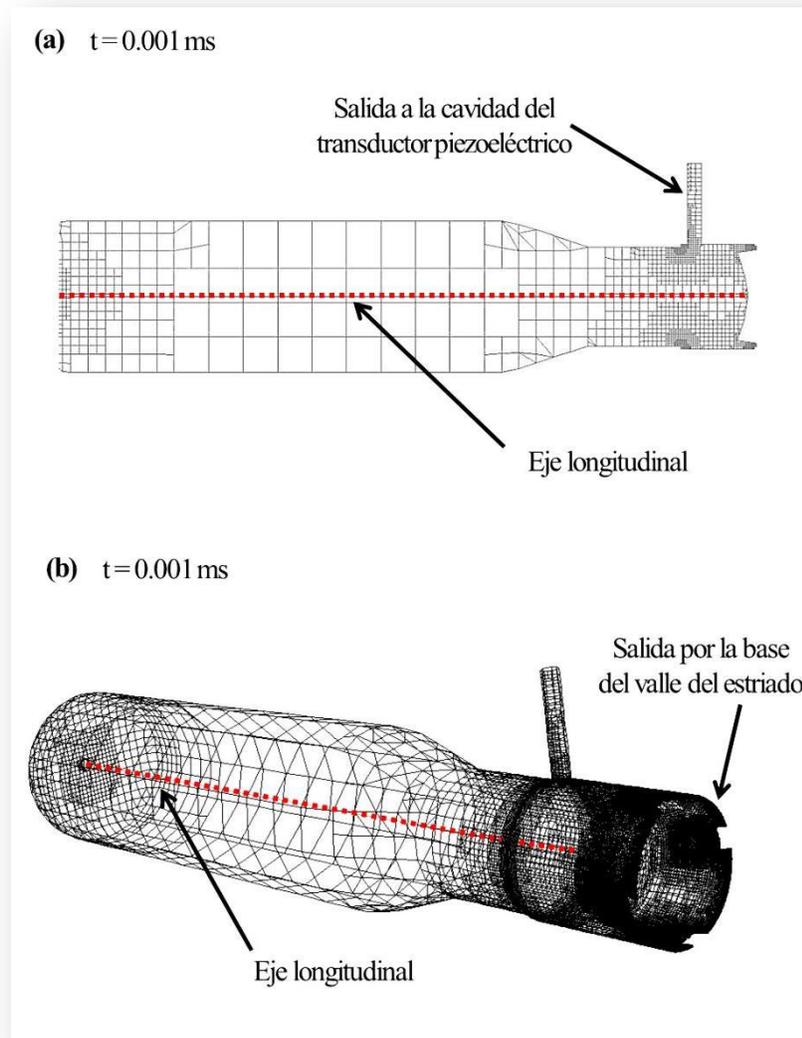


Figura VI.2.- Eje longitudinal en el interior del modelo mallado para el sistema de cierre convencional Cal. 7.62 x 51 mm FMJ, (a) plano de simetría y (b) vista isométrica del modelo 3D.

En la Figura VI.3 se muestra la curva de presión – distancia, obtenida sobre el eje longitudinal del modelo. Este caso corresponde a la simulación de la presión de los gases del cierre convencional Cal. 7.62 mm, mostrado en la Figura VI.1 (a), y se compara con su corte longitudinal de este

modelo, a fin de verificar la posición en que se encuentre la cavidad del transductor piezoeléctrico, y como se afecta el flujo de gases por la forma de la recámara del sistema de cierre y el cañón.

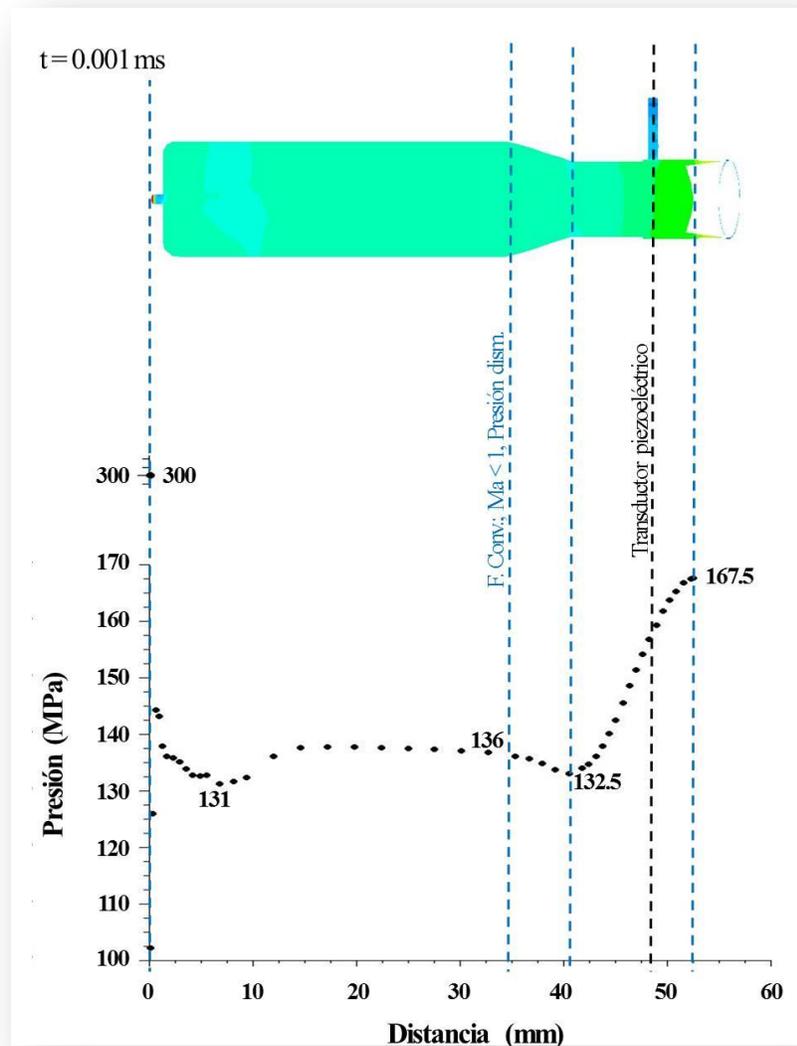


Figura VI.3.- Gráfica de la presión en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 5 mm, en el sistema de cierre convencional calibre 7.62 x 51 mm FMJ.

En forma general se observa una disminución en la presión generada, respecto a la de la Figura VI.1 (a), toda vez que los valores máximos se obtienen principalmente en las salidas del sistema

hacia el transductor piezoeléctrico y a través del estriado del cañón, siendo la presión en el eje longitudinal menor, pero representativa del comportamiento del flujo de gases. En la Figura VI.4 se muestra la curva presión – distancia del sistema de cierre hermético propuesto, la cual presenta una trayectoria similar a la curva del sistema convencional, aunque con magnitudes de presión menores, lo que coincide con los valores descritos en las tablas anteriores.

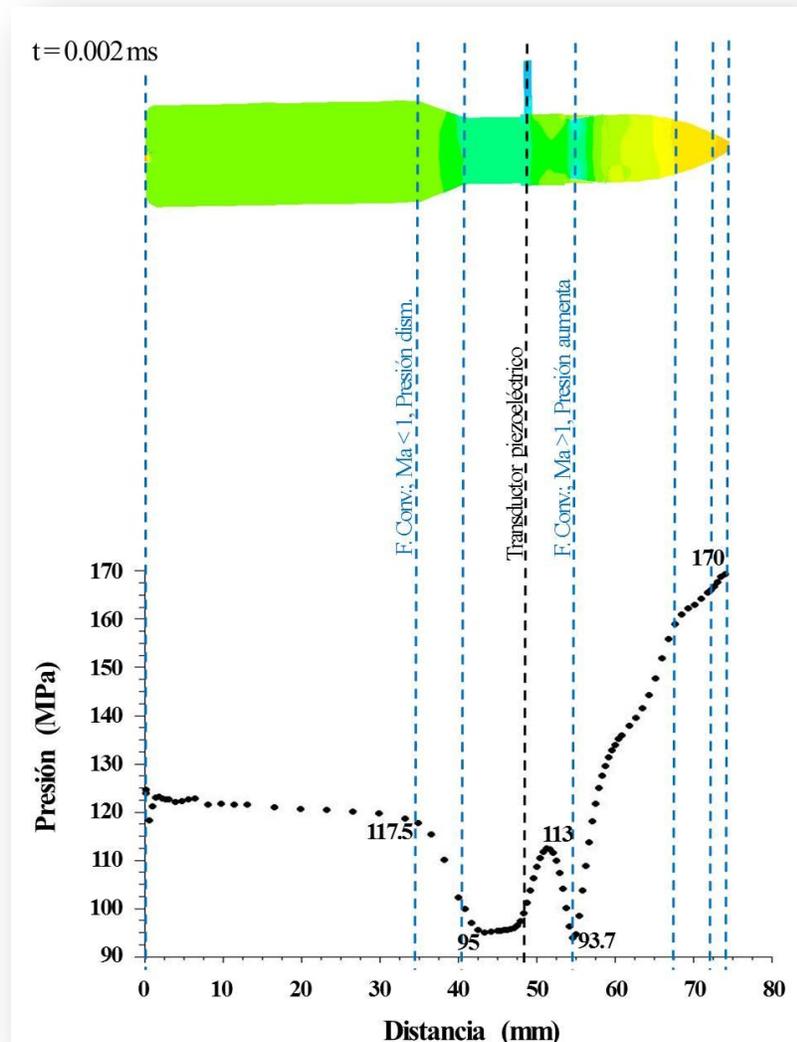


Figura VI.4.- Gráfica de la presión en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 5 mm, en el sistema de cierre hermético propuesto calibre 7.62 mm.

Respecto al instante cuando el proyectil sale de la boca del cañón del arma, en la Figura VI.5 se muestra la distribución gráfica de estas presiones, detectándose una presión de 31.37 MPa en el transductor piezoeléctrico del disparo de la munición 7.62 x 51 mm FMJ y de 46.30 MPa, para el caso de la munición 7.62 mm sin casco y sin núcleo propuesta.

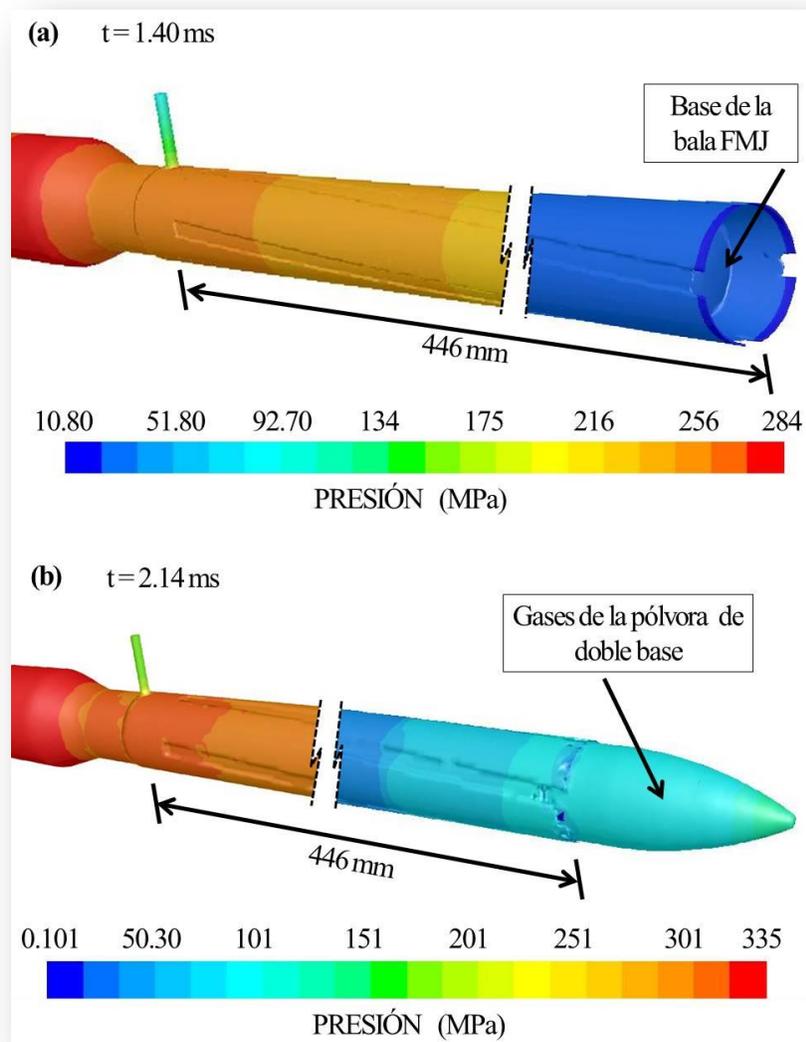


Figura VI.5.- Presión de los gases cuando el proyectil se encuentra en el cañón a 446 mm de distancia, en los sistemas de cierre (a) convencional y (b) hermético propuesto.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

La grafica de presión sobre el eje longitudinal mostrada en la Figura VI.6, indica que en ese instante aún se mantiene una alta presión en la recámara del cañón, con una ligera fluctuación en la parte del transductor piezoeléctrico y posteriormente con una caída constante, teniendo una nueva elevación de la presión al final del cañón debida a la compresión de los gases con el proyectil.

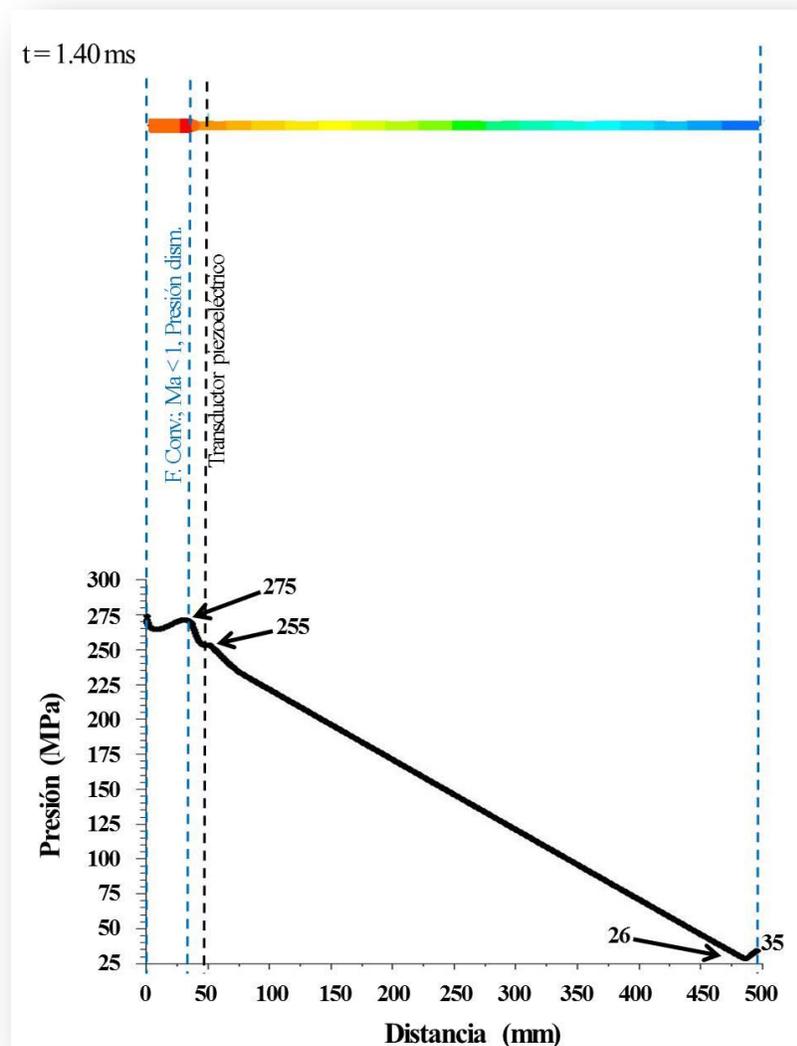


Figura VI.6.- Gráfica de la presión en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 446 mm, en el sistema de cierre convencional calibre 7.62 x 51 mm FMJ.

En la Figura VI.7 se observa la curva del cierre hermético propuesto, con una presión ligeramente mayor que la del cierre convencional en esta distancia, no obstante requirió de mayor tiempo (0.74 ms) para impulsar al proyectil a esta posición, debido a que la presión máxima generada fue más baja, lo que se describirá a detalle más adelante.

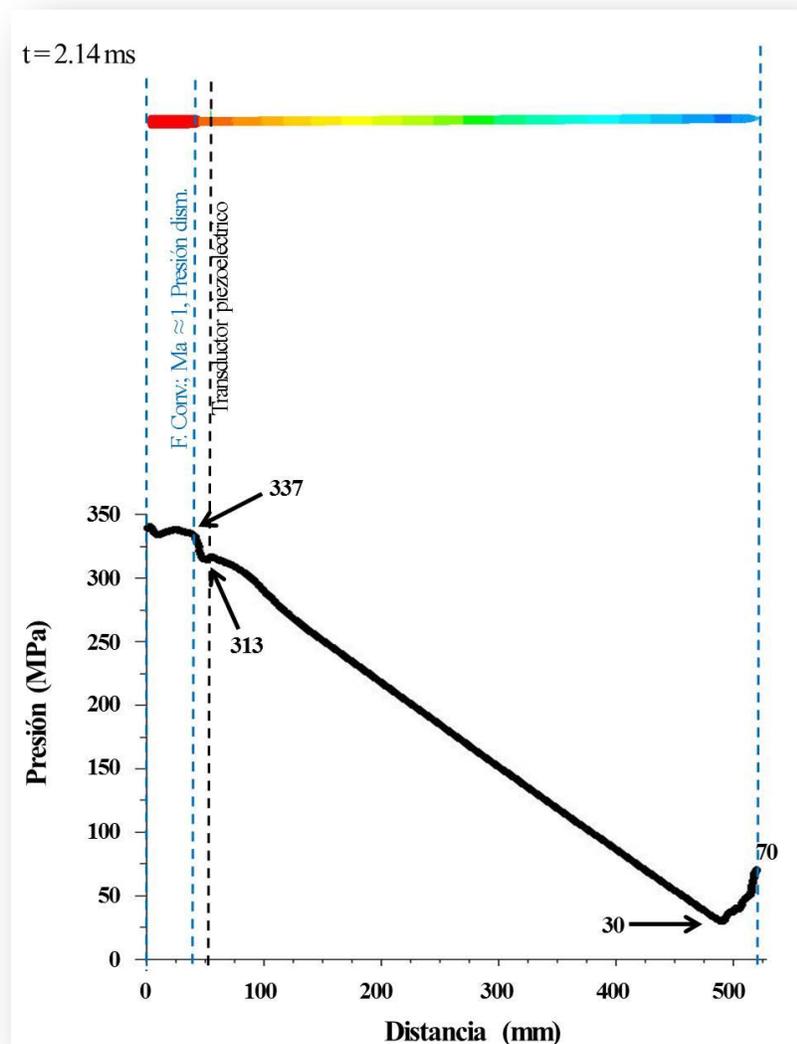


Figura VI.7.- Gráfica de la presión en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 446 mm, en el sistema de cierre hermético propuesto calibre 7.62 mm.

La temperatura de los sistemas iniciales se indica en la Figura VI.8 observándose que la mayor parte del cuerpo de la munición 7.62 x 51 mm FMJ presenta una temperatura de 3,060 °K y en el caso de la munición 7.62 mm sin casco y sin núcleo la temperatura predominante es de 2,945 °K, incrementándose en ambos casos la temperatura al inicio del cañón y en su estriado interno.

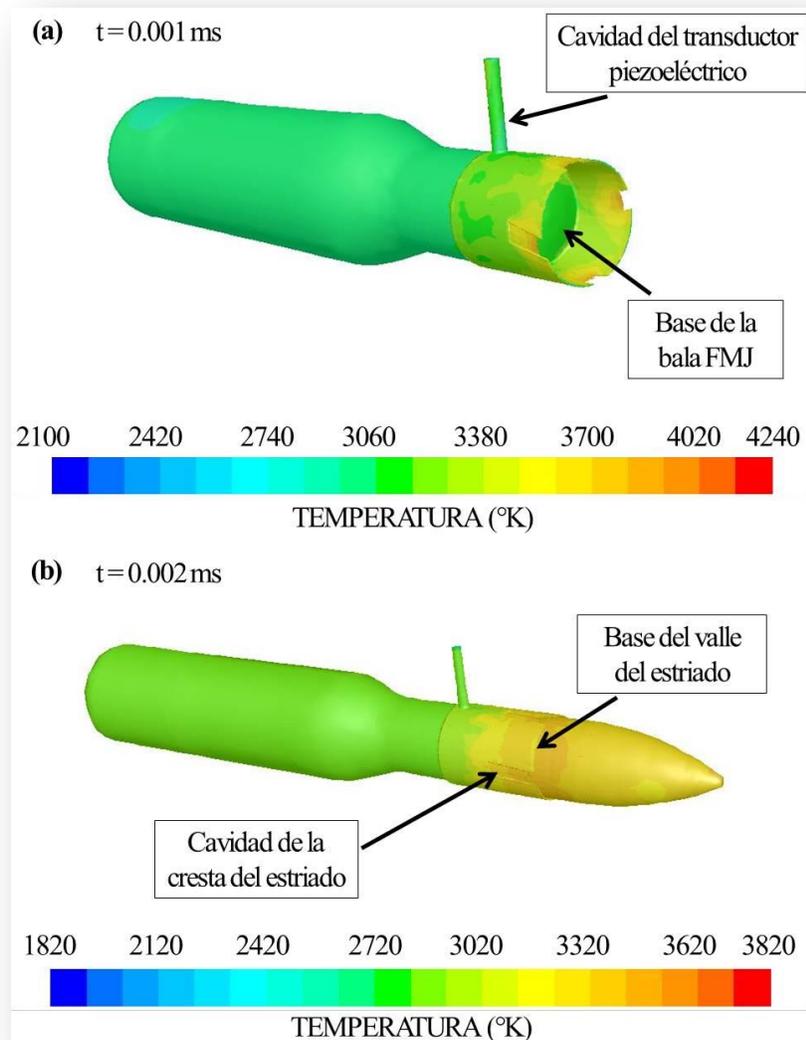


Figura VI.8.- Temperatura de los gases cuando el proyectil se encuentra en el cañón a 5 mm de distancia, en los sistemas de cierre (a) convencional y (b) hermético propuesto.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

En las Figuras VI.9 y VI.10 se aprecian con mayor detalle éstas variaciones de temperatura, las cuales se originan principalmente por la velocidad del flujo de gases y por la forma de tobera convergente que tiene la recámara en los dos sistemas de cierre, ocasionando que al pasar el flujo de gases que en ese instante tiene una velocidad subsónica, se aminore su temperatura y presión momentáneamente.

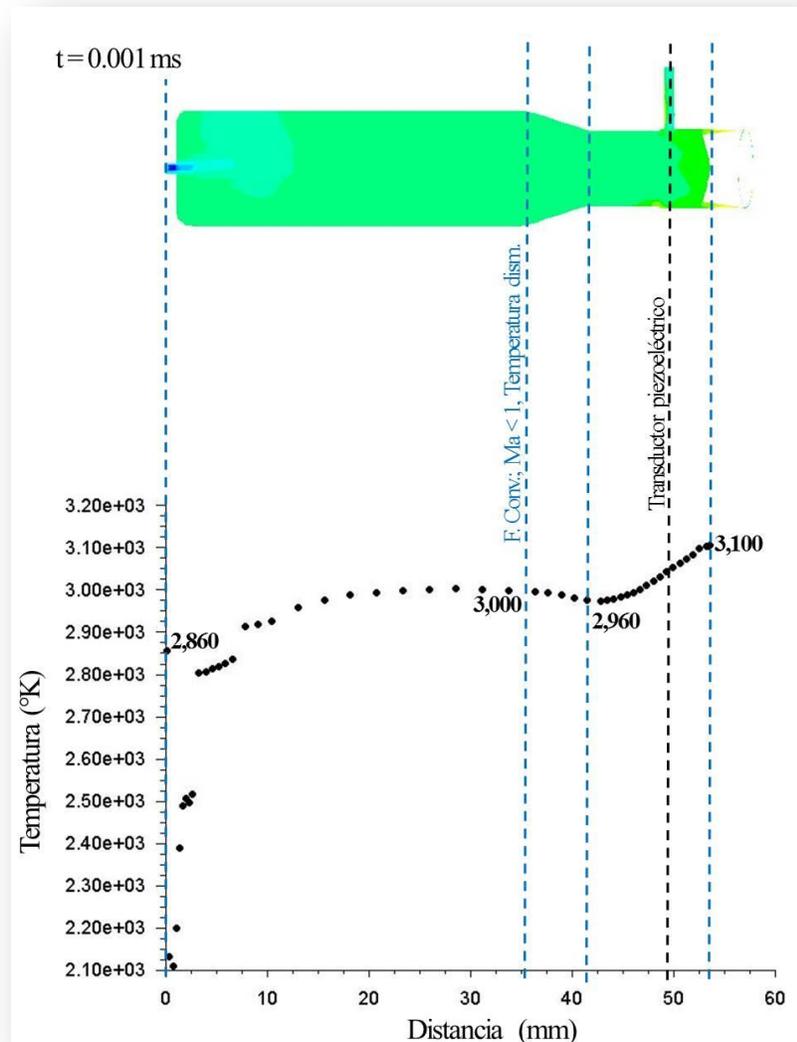


Figura VI.9.- Gráfica de la temperatura en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 5 mm, en el sistema de cierre convencional calibre 7.62 x 51 mm FMJ.

Con el empleo de un proyectil sin núcleo en el sistema de cierre hermético propuesto, se adiciona un cambio de forma que hace converger nuevamente al flujo de gases, como se aprecia en la curva de la Figura VI.10, pero en este instante el flujo de gases ya tiene una velocidad supersónica por lo que el cambio ahora provoca que se eleve la temperatura y presión.

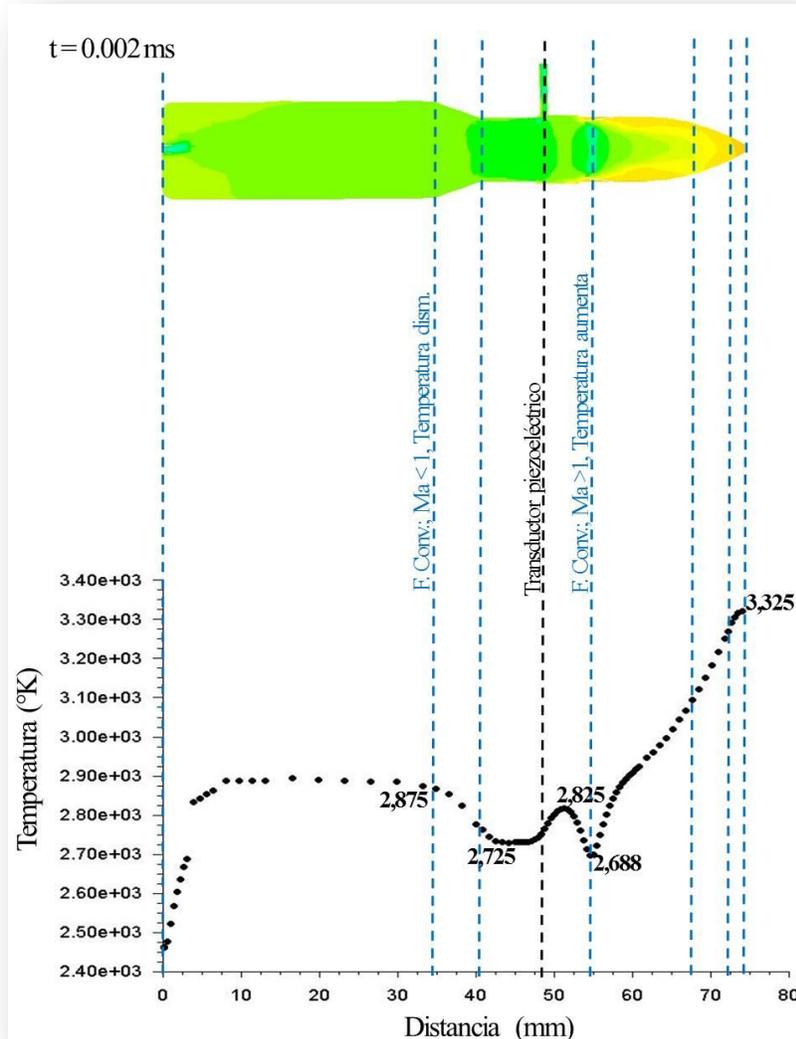


Figura VI.10.- Gráfica de la temperatura en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 5 mm, en el sistema de cierre hermético propuesto calibre 7.62 mm.

La Tabla VI.4 indica los principales valores de temperatura obtenidos para los sistemas estacionarios que se indican en la Figura VI.11, los cuales no pueden ser obtenidos experimentalmente, y comúnmente solo es calculado analíticamente a través de la reacción química de la deflagración de la pólvora, por lo que es relevante el conocer la forma en que se distribuye el cambio de temperatura a través del sistema.

Tabla VI.4.- Temperatura de los gases en el cañón, con una distancia del proyectil de 5 mm.

Punto de medición	Cierre convencional 7.62 x 51 mm FMJ	Cierre hermético propuesto 7.62 mm
Transductor piezoeléctrico	3,100 °K	3,000 °K
Valles del estriado	3,540 °K	3,320 °K
Recámara (superficie cilíndrica)	3,060 °K	2,945 °K

En la Tabla VI.5 y en la Figura VI.11 se observan los resultados de la distribución de temperatura para los dos tipos de municiones, pero en el instante en que la ojiva sale del tubo cañón, a una distancia de 446 mm.

Tabla VI.5.- Temperatura de los gases en el cañón, con una distancia del proyectil de 446 mm.

Punto de medición	Cierre convencional 7.62 x 51 mm FMJ	Cierre hermético propuesto 7.62 mm
Transductor piezoeléctrico	2,930 °K	2,960 °K
Valles del estriado	3,000 °K	3,300 °K
Recámara (superficie cilíndrica)	2,960 °K	3,020 °K

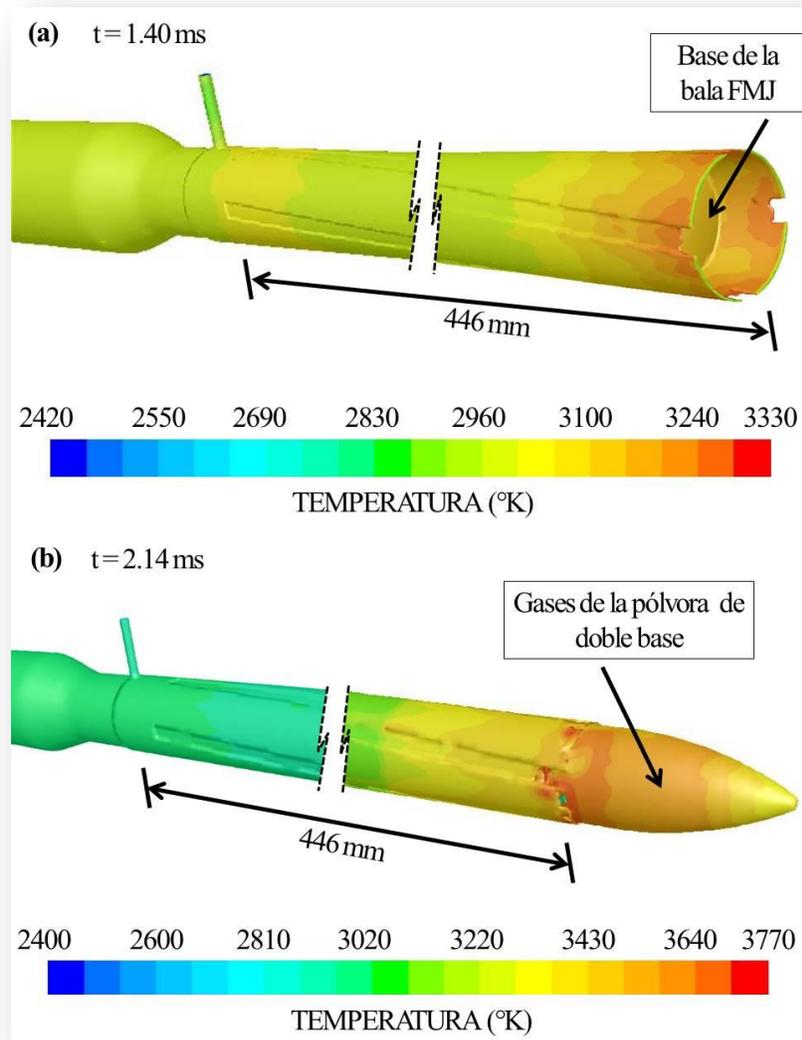


Figura VI.11.- Temperatura de los gases cuando el proyectil se encuentra en el cañón a 446 mm de distancia, en los sistemas de cierre (a) convencional y (b) hermético propuesto.

Las curvas de temperatura – distancia se muestran en las Figuras VI.12 y VI.13, con una tendencia similar que corresponde al instante cuando el proyectil ha sido impulsado hasta una longitud de 446 mm en la boca del cañón. Inversamente al estado indicado en las Figuras VI.8 – VI.10, en este

instante se tiene una menor presión en la curva del cierre convencional, debido a que la deflagración de la pólvora mantuvo un comportamiento progresivo, con mayor temperatura y presión inicial y generando una mayor presión máxima (272.49 MPa), respecto al sistema de cierre hermético propuesto, que tuvo un comportamiento decreciente en la deflagración del propelente.

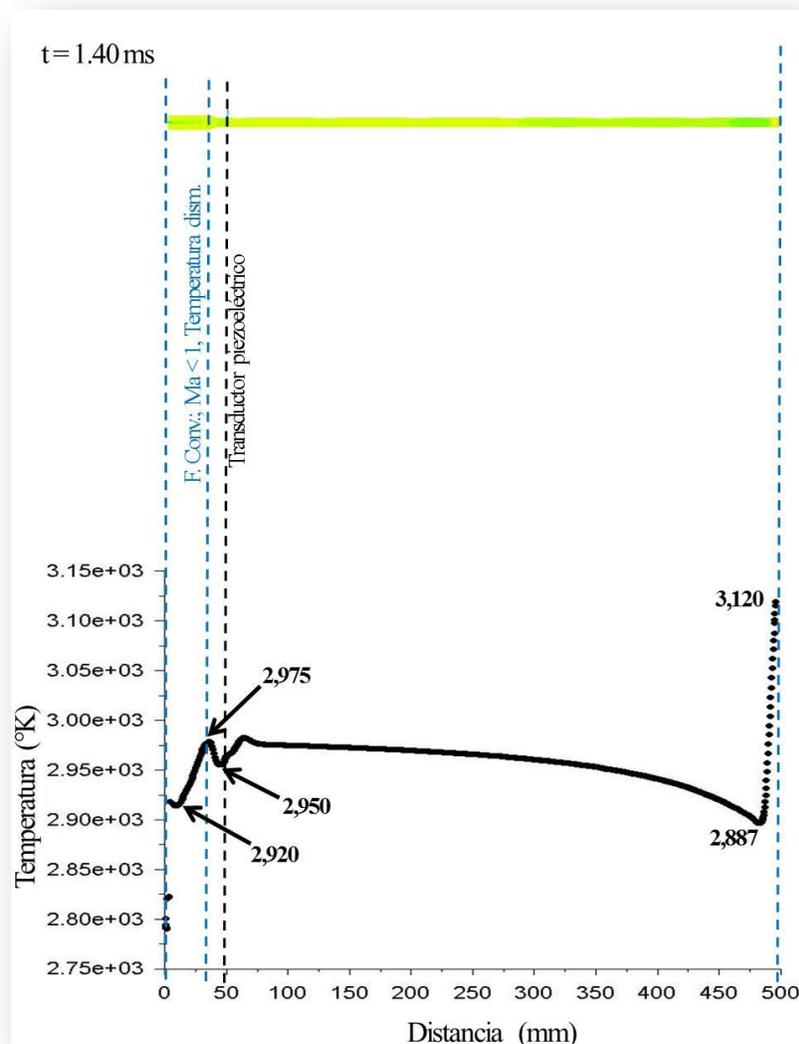


Figura VI.12.- Gráfica de la temperatura en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 446 mm, en el sistema de cierre convencional calibre 7.62 x 51 mm FMJ.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

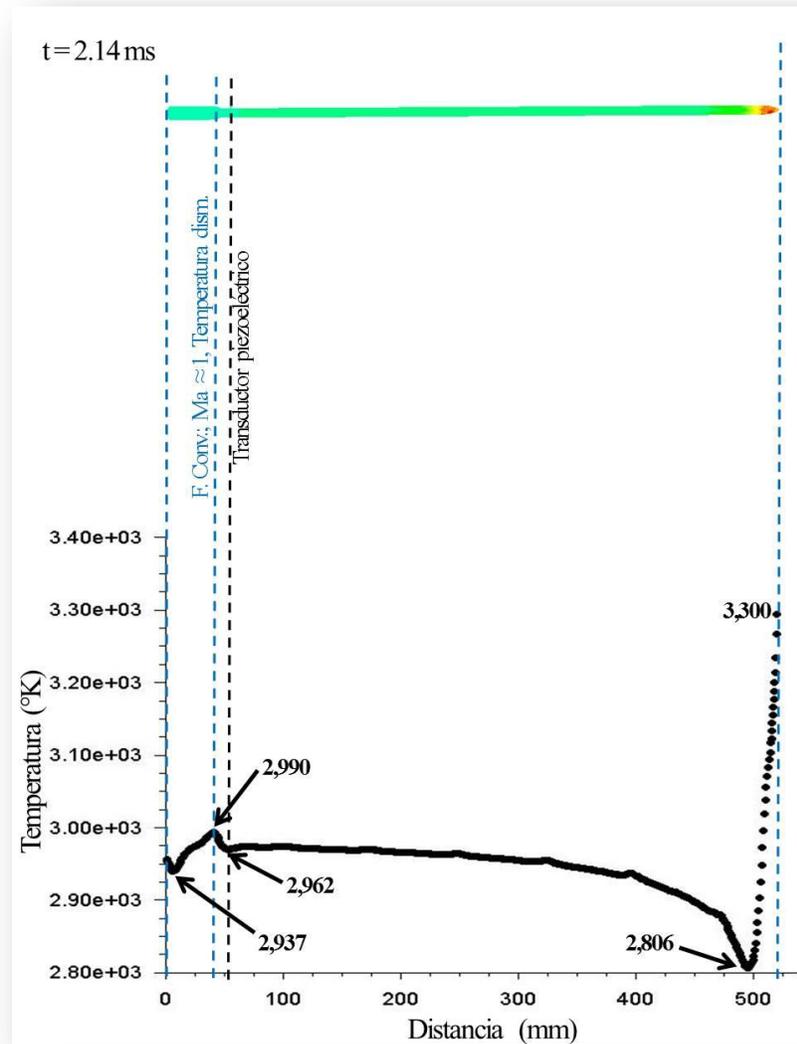


Figura VI.13.- Gráfica de la temperatura en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 446 mm, en el sistema de cierre hermético propuesto calibre 7.62 mm.

Finalmente también se analizó la velocidad que se presenta en las diez simulaciones numéricas estacionarias, realizadas para cada uno de los dos tipos de cierres, mostrándose en la Figura VI.14 los vectores de velocidad de los primeros dos sistemas analizados, cuando el proyectil se encuentra a una distancia de 5 mm en el interior del tubo cañón.

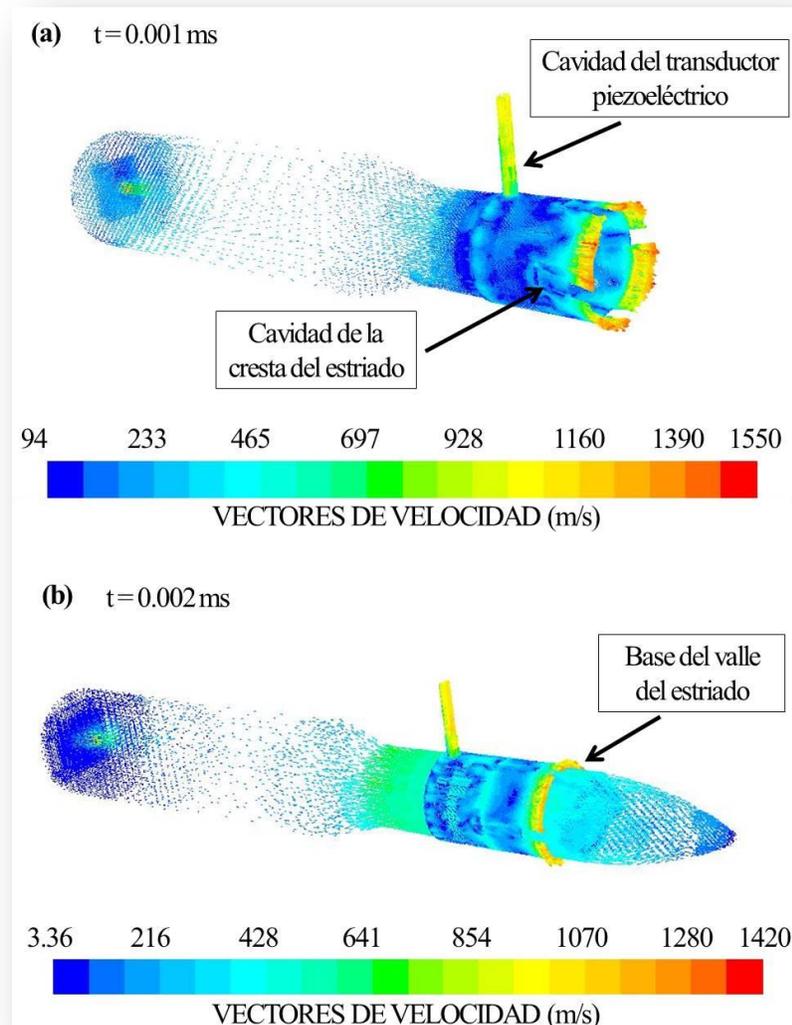


Figura VI.14.- Vectores de velocidad de los gases cuando el proyectil se encuentra en el cañón a 5 mm de distancia, en los sistemas de cierre (a) convencional y (b) hermético propuesto.

Al igual que en las curvas anteriores, en la Figura VI.15 se observa que en este instante se tiene un rápido cambio de los parámetros iniciales, en los primeros 15 ó 20 mm del interior del casco, siendo en este caso una rápida caída de la velocidad de 1,490 a 125 m/s, la cual se incrementa

posteriormente en el régimen subsónico y que pasa a una velocidad supersónica al atravesar la forma de tobera convergente. Los valores de la curva finalizan en cero porque el flujo se detiene momentáneamente al impactarse contra el núcleo del proyectil en el cierre convencional, sin embargo conforme a la visualización de los vectores el flujo de gases recircula constantemente.

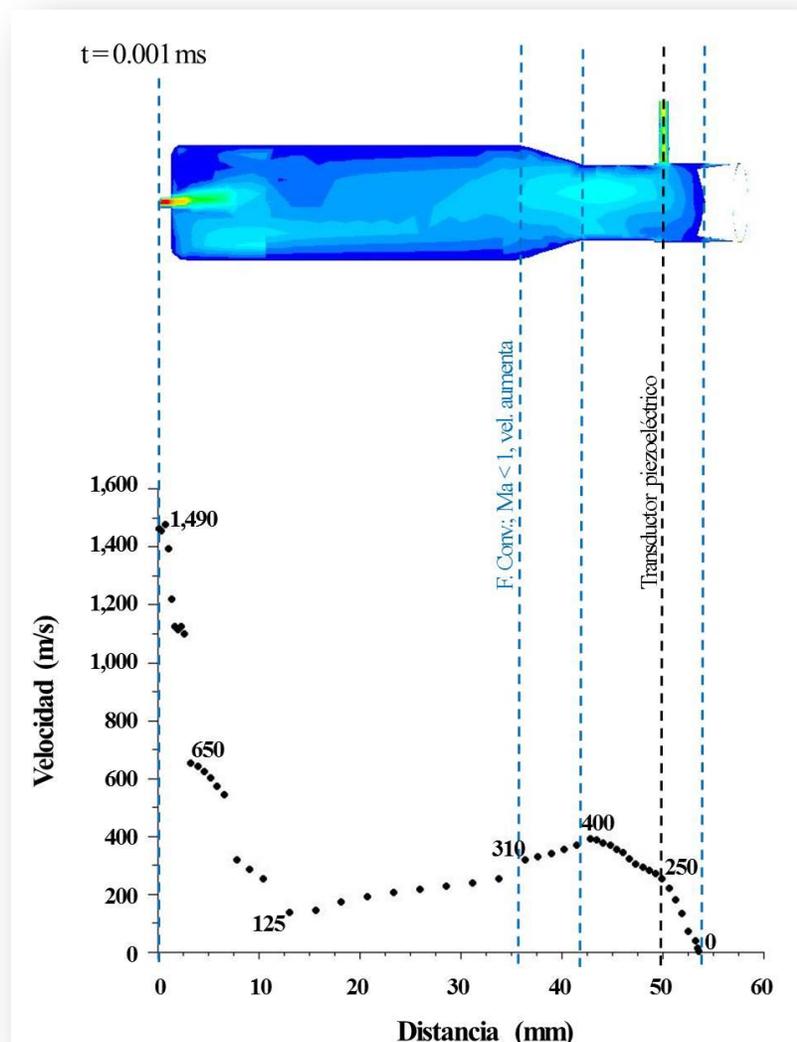


Figura VI.15.- Gráfica de la velocidad en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 5 mm, en el sistema de cierre convencional calibre 7.62 x 51 mm FMJ.

En la Figura VI.16, la curva del sistema de cierre hermético propuesto tiene una tendencia similar, hasta la parte posterior del proyectil, pues en este caso el flujo de gas se introduce en el hueco de éste, provocando un pequeño incremento adicional del flujo en la última parte de la curva, debido a la forma cónica del proyectil, que hace converger nuevamente el flujo de gases.

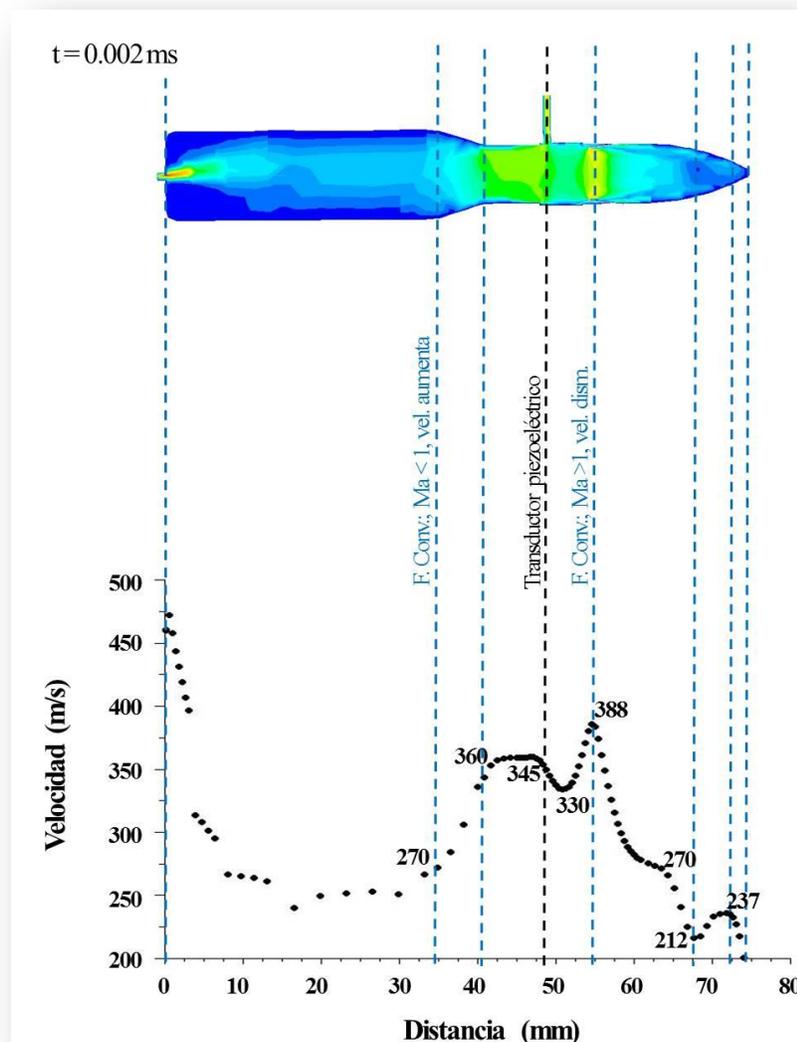


Figura VI.16.- Gráfica de la velocidad en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 5 mm, en el sistema de cierre hermético propuesto calibre 7.62 mm.

La dirección y magnitud de los vectores de velocidad, y las curvas de velocidad – distancia, corroboran que el flujo de gases se encuentra en constante movimiento, recirculando una parte en dirección contraria, aunque con magnitudes muy inferiores que en el caso de la munición 7.62 x 51 mm FMJ, son hasta un máximo de 233 m/s, comparadas con las velocidades que presenta el flujo a su salida a través de los valles del estriado de 1,390 m/s y de 1,040 m/s en el punto de medición en el transductor piezoeléctrico. En la Tabla VI.6 se indica el resumen de los valores de velocidad obtenidos.

Tabla VI.6.- Velocidad de los gases en el cañón, con una distancia del proyectil de 5 mm.

Punto de medición	Cierre convencional 7.62 x 51 mm FMJ	Cierre hermético propuesto 7.62 mm
Transductor piezoeléctrico (Recámara del cañón)	1,040 m/s	960 m/s
Valles del estriado (Salida del cañón)	1,390 m/s	1,170 m/s
Superficie cilíndrica de la recámara	465 m/s	428 m/s

Esto también puede apreciarse en la Figura VI.6 en la que se representan las últimas simulaciones estacionarias efectuadas para los dos tipos de sistemas de cierre, con una distancia del proyectil en el interior del cañón de 446 mm y en la Tabla VI.7 en la que se dan los valores de la velocidad obtenida.

Tabla VI.7.- Velocidad de los gases en el cañón, con una distancia del proyectil de 446 mm.

Punto de medición	Cierre convencional 7.62 x 51 mm FMJ	Cierre hermético propuesto 7.62 mm
Transductor piezoeléctrico (Recámara del cañón)	900 m/s	650 m/s

Punto de medición	Cierre convencional 7.62 x 51 mm FMJ	Cierre hermético propuesto 7.62 mm
Valles del estriado (Salida del cañón)	877 m/s	354 m/s
Superficie cilíndrica de la recámara	387 m/s	260 m/s

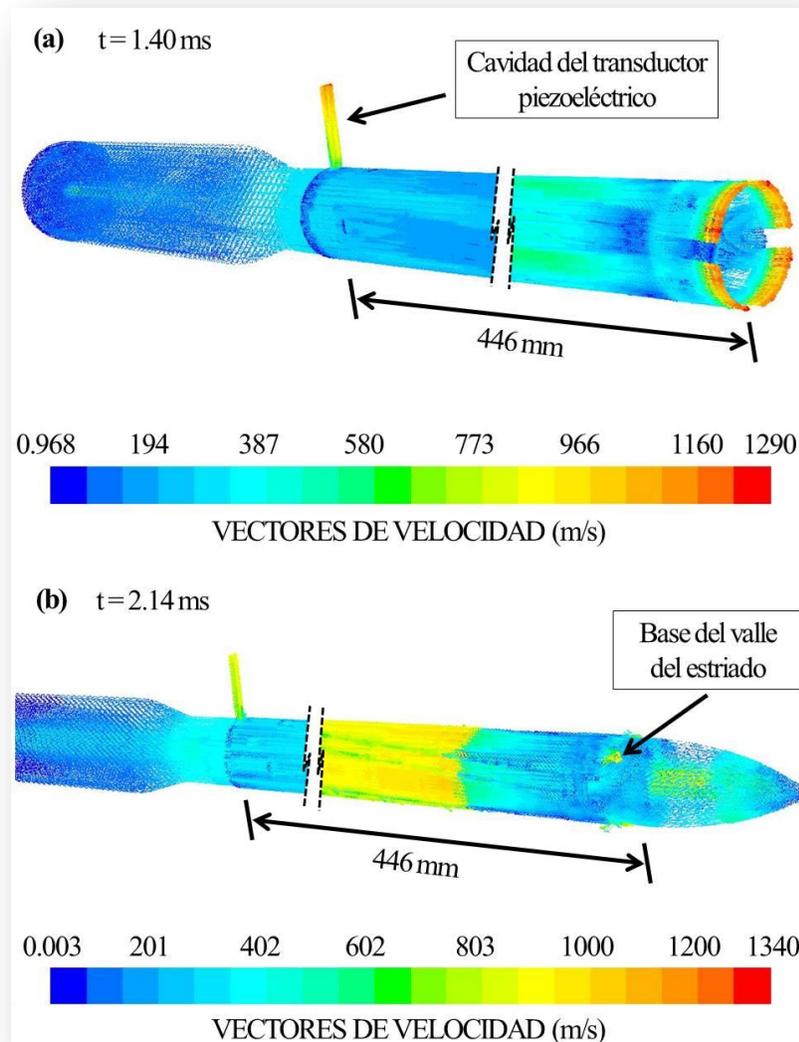


Figura VI.17.- Vectores de velocidad de los gases cuando el proyectil se encuentra en el cañón a 446 mm de distancia, en los sistemas de cierre (a) convencional y (b) hermético propuesto.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del pelopente de una munición sin casco

En este caso la curva de velocidad – distancia (Figura VI.18), presenta un aumento de la velocidad al pasar el flujo con velocidad subsónica en ese instante por la forma de tobera convergente, lo que aumenta su velocidad, después del transductor piezoeléctrico y en el inicio del tubo cañón tiene un decremento de su velocidad hasta llegar a los 213 m/s y posteriormente inicia un incremento constante hasta los 550 m/s.

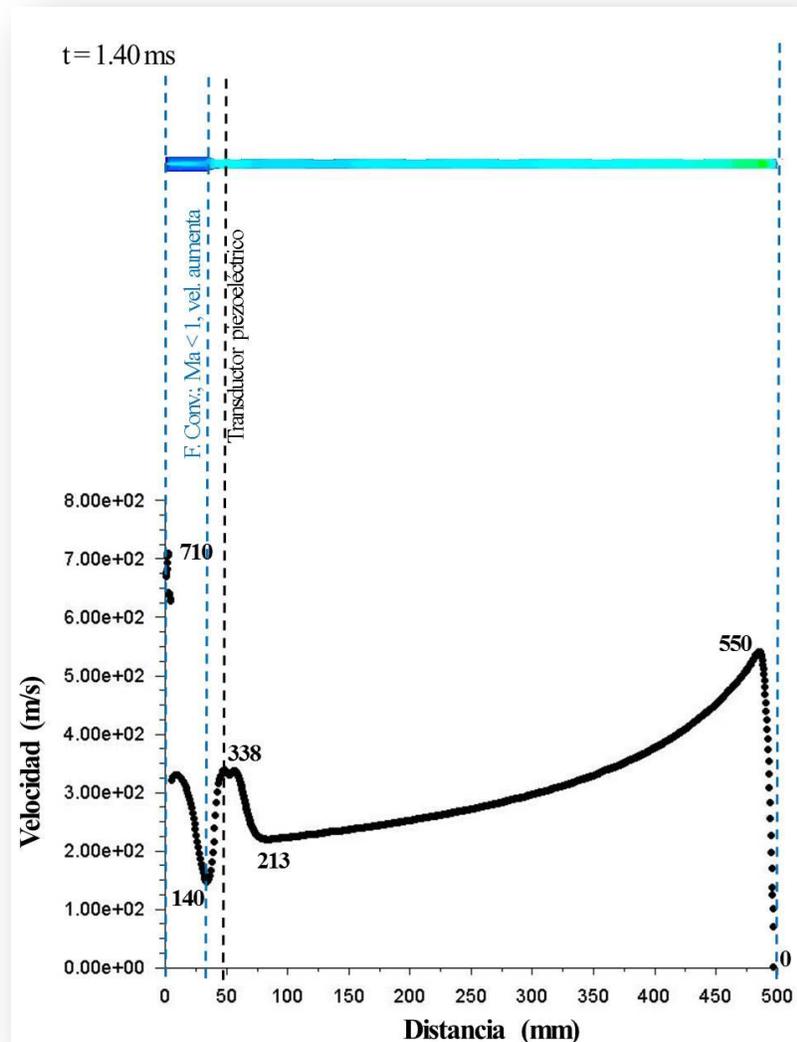


Figura VI.18.- Gráfica de la velocidad en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 446 mm, en el sistema de cierre convencional calibre 7.62 x 51 mm FMJ.

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

En la Figura VI.19 se muestra la curva del sistema de cierre hermético propuesto, la cual tiene una trayectoria similar a la del cierre convencional, con el incremento constante de la velocidad del flujo de gases a través del cañón hasta alcanzar los 275 m/s casi a su final, sobre su eje longitudinal.

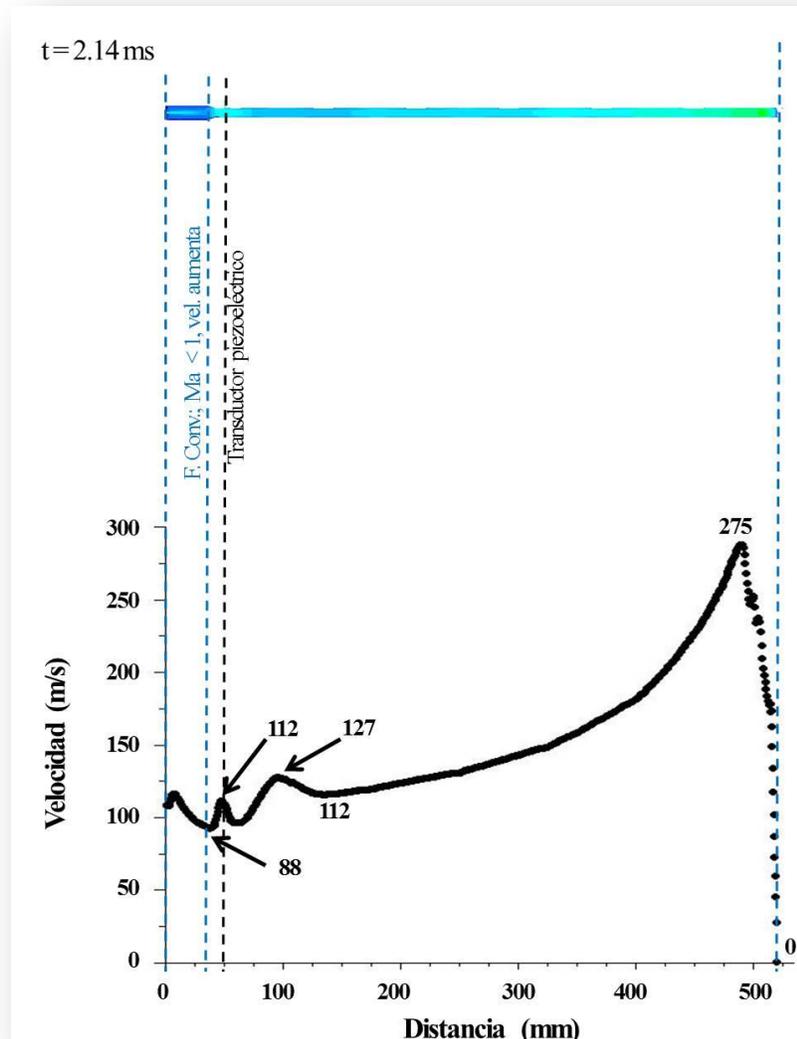


Figura VI.19.- Gráfica de la velocidad en el eje longitudinal, cuando el proyectil ha avanzado 446 mm, en el sistema de cierre hermético propuesto calibre 7.62 mm.

VI.3.- Análisis de los resultados experimentales

En el Capítulo V *Manufactura del prototipo del sistema de cierre, análisis experimental*, se indicaron los resultados de las pruebas realizadas al propelente (pólvora de doble base sin humo) mezclado con el aglutinante (goma arábica), y que son la base de la manufactura de los prototipos de los cartuchos Cal. 7.62 mm sin casco y sin núcleo, para el sistema de cierre hermético propuesto. Asimismo en el citado capítulo se indicó el procedimiento bajo el que se realizaron las pruebas balísticas de presión y velocidad para la munición propuesta y para la munición estandarizada Cal. 7.62 x 51 mm con bala encamisada (*FMJ; Full Metal Jacket*).

VI.3.1.- Resultados experimentales de la presión del disparo de la munición estandarizada 7.62 x 51 mm FMJ en un sistema de cierre convencional

En la Figura VI.20 se muestra la curva de presión–tiempo experimental, obtenida a través de la medición en la recámara del cañón de pruebas, de la deformación que sufre un cristal de Cuarzo ó de Titano de Bario, instalado en un sensor denominado transductor piezoeléctrico. En esta figura es posible observar en el primer tercio de la gráfica (a) un incremento inicial instantáneo de presión que corresponde al encendido homogéneo de la cápsula de iniciación. Posteriormente en el segundo tercio (b), se observa el pico de la curva que corresponde al valor máximo de presión obtenido de 270 MPa para ese disparo, y un comportamiento decreciente de la deflagración de la pólvora. Finalmente en el tercer tercio de la gráfica (c), se observa un decremento continuo de la curva, generado por la disminución de la pólvora que se consume y el incremento del volumen existente, al desplazarse la ojiva a través del tubo cañón de prueba.

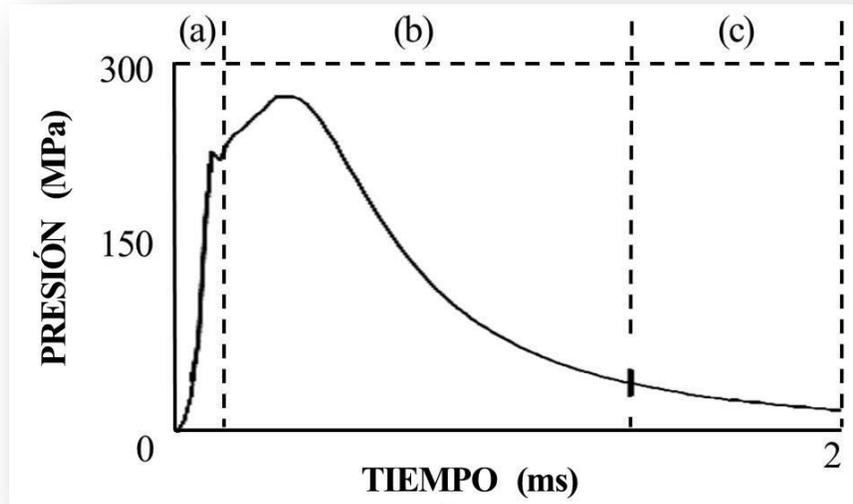


Figura VI.20.- Curva de presión-tiempo experimental para la munición 7.62 x 51 mm FMJ en un sistema de cierre convencional.

VI.3.2.- Resultados experimentales de la presión del disparo de la munición 7.62 mm sin casco con proyectil sin núcleo, en el sistema de cierre hermético propuesto.

En este caso se modificó el sistema de obturación del banco de pruebas, a fin de tener un cierre hermético con el cañón de pruebas y permitir el disparo de los prototipos de las municiones propuestas. En la Figura VI.21 se muestra la curva de presión experimental obtenida para uno de los disparos, que se seleccionó por ser una de las más características y con el fin de poder referenciar el resto de los resultados experimentales y numéricos calculados para la presión. Esta curva de presión presenta en el primer tercio de la gráfica (a), un encendido homogéneo de la cápsula de iniciación con una importante reducción del pico máximo de presión de 270 MPa a 90 MPa. En su segundo y tercer tercio (b), tiene un comportamiento parcialmente progresivo de la

deflagración de la pólvora contrario al caso anterior, lo cual causa una reducción en la velocidad y alcance del proyectil pero que permanece dentro de los parámetros adecuados para operaciones de combate urbano o de corto alcance.

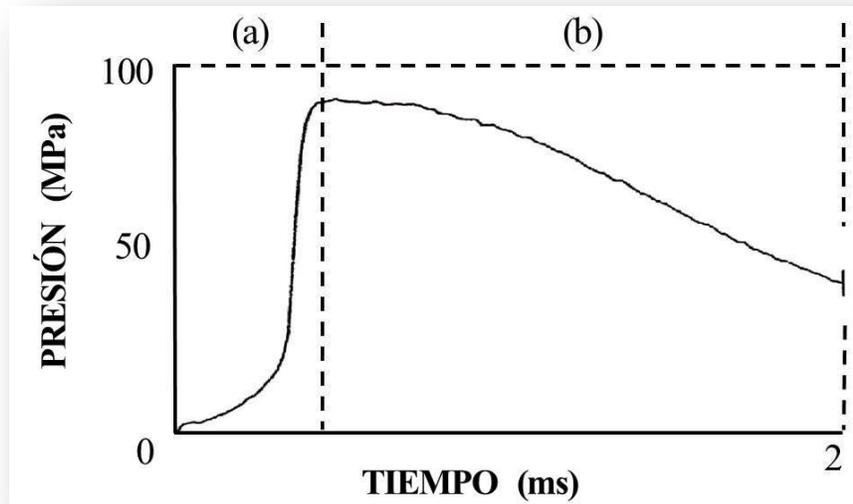


Figura VI.21.- Curva de presión-tiempo experimental del disparo de la munición 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo, en el sistema de cierre hermético propuesto.

En la Tabla VI.8 se muestran los resultados de presión máxima obtenidos para las curvas características seleccionadas, y en la Tabla VI.9 se indican los resultados de presión para el promedio de las pruebas realizadas en 5 series de 10 disparos para tipo de munición.

Tabla VI.8.- Presión máxima experimental de las curvas características seleccionadas.

Punto de medición	Cierre convencional 7.62 x 51 mm FMJ	Cierre hermético propuesto 7.62 mm
Transductor piezoeléctrico (Recámara del cañón)	270 MPa	90 MPa

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

Tabla VI.9.- Resultados de la presión experimental obtenida en 5 pruebas de 10 disparos cada una, medidos en el transductor piezoeléctrico (Recámara del cañón).

Valor	Cierre convencional 7.62 x 51 mm FMJ	Cierre hermético propuesto 7.62 mm
Presión máxima	305 MPa	114 MPa
Presión promedio	276 MPa	88 MPa

VI.3.3.- Resultados experimentales de la velocidad del disparo de municiones 7.62 x 51 mm FMJ en un cierre convencional y 7.62 mm en el sistema de cierre hermético propuesto

Conforme la metodología descrita en el Capítulo V *Manufactura del prototipo del sistema de cierre, análisis experimental*, se empleo un cronógrafo balístico para medir la velocidad a una distancia estándar de 23.77 m que es conocida como distancia instrumental. En la Tabla VI.10 se indican los resultados de los dos tipos de municiones analizadas, mostrándose una disminución en la velocidad del disparo de la munición propuesta Cal. 7.62 mm, debido principalmente a la reducción de la presión máxima, el incremento del volumen de la cámara de combustión y a la disminución de la fuerza de desinserción del proyectil, en comparación con los parámetros de la munición Cal. 7.62 x 51 mm FMJ.

Tabla VI.10.- Velocidad experimental del proyectil de los disparos característicos seleccionados.

Punto de medición	Cierre convencional 7.62 x 51 mm FMJ	Cierre hermético propuesto 7.62 mm
A 23.77 m conforme normatividad (Distancia instrumental)	833 m/s	327 m/s
A la salida del tubo cañón. (En la boca del arma)	851 m/s	345 m/s

Tabla VI.11.- Resultados de la velocidad experimental obtenida en 5 pruebas de 10 disparos.

Valor	Cierre convencional 7.62 x 51 mm FMJ	Cierre hermético propuesto 7.62 mm
Velocidad promedio (Distancia instrumental 23.77 m)	830 m/s	325 m/s
Velocidad máxima (Distancia instrumental 23.77 m)	844 m/s	346 m/s
Velocidad promedio (A la salida del tubo cañón)	850 m/s	348 m/s
Desviación estándar	7	12

VI.4.- Análisis comparativo de los resultados numéricos y experimentales

Como se mencionó anteriormente, los valores de presión experimentales se obtuvieron con la medición que realiza un transductor piezoeléctrico colocado en la recámara del cañón de pruebas, siendo este mismo espacio modelado en las simulaciones y empleado para obtener los valores de presión numéricos del mismo punto. Asimismo cada uno de los disparos realizados en las pruebas experimentales generan curvas particulares de presión-tiempo aunque muy similares, por lo que se seleccionaron dos curvas de presión que son representativas del resto de las gráficas, empleándose sus datos de presión y velocidad en el comparativo que se hizo con los resultados numéricos.

VI.4.1- Análisis comparativo de los resultados numéricos y experimentales de presión y velocidad en los sistemas de cierre convencional y hermético.

En la Tabla VI.12 se muestra la comparación de los valores máximos de presión, observándose una reducción significativa en la presión máxima de la munición propuesta 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo comparada con la munición estandarizada, lo cual es causado porque el

proyectil sin núcleo tiene un menor peso, requiriéndose de una menor presión para que este sea impulsado una mayor distancia en el interior del tubo cañón, ocasionando que la cámara de combustión se expanda y la presión se decremente.

Tabla VI.12.- Comparativo de los resultados de la presión máxima en la recámara.

Prueba	Cierre convencional 7.62 x 51 mm FMJ		Cierre hermético propuesto 7.62 mm	
	Presión	Tiempo	Presión	Tiempo
Numérica	272.49 MPa	0.27 ms	107.66 MPa	0.60 ms
Experimental	270.00 MPa	0.30 ms	90.00 MPa	0.46 ms

En la Tabla VI.13 se muestran los resultados numéricos y experimentales obtenidos para la presión y velocidad del disparo de la munición propuesta Cal. 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo. Los valores experimentales de velocidad se obtuvieron mediante un cronógrafo balístico que calcula la velocidad que tiene el proyectil en la boca del cañón, a partir de la medición que realiza a la distancia instrumental de 23.77 m, que es una longitud establecida conforme a normas internacionales.

Tabla VI.13.- Comparativo de los resultados de presión y velocidad a la salida del proyectil Cal. 7.62 mm en el sistema de cierre hermético propuesto.

Prueba	En la recámara		En la boca del cañón	
	Presión	Tiempo	Velocidad	Tiempo
Numérica	46.30 MPa	2.14 ms	353.92 m/s	2.14 ms
Experimental	37.50 MPa	2.00 ms	345.00 m/s	2.00 ms

Diseño y análisis del comportamiento mecánico de un sistema de cierre hermético, debido al efecto del propelente de una munición sin casco

Los resultados anteriores muestran un decremento en la velocidad, lo cual es atribuido a la reducción de presión en la recámara y la baja fuerza de desinserción de la bala, en comparación con los parámetros de las municiones 7.62 x 51 mm FMJ.

Similarmente en la en la Tabla VI.14, se indican los valores de presión y velocidad obtenidos para el disparo de la munición 7.62 x 51 mm FMJ, la cual tiene conforme a la norma MIL-DTL-46931 una velocidad de 829 – 847 m/s a 23.77 m de distancia, por lo que la variación entre los datos de numéricos y experimentales de velocidad calculados en la boca del arma no se consideran muy amplios, estando esto relacionado con la similitud de sus curvas de presión.

Tabla VI.14.- Comparativo de los resultados de presión y velocidad a la salida del proyectil de la munición Cal. 7.62 x 51 mm FMJ, del sistema de cierre convencional.

Prueba	En la recámara		En la boca del cañon	
	Presión	Tiempo	Velocidad	Tiempo
Numérica	31.37 MPa	1.40 ms	876.65 m/s	1.40 ms
Experimental	38.00 MPa	1.37 ms	851.00 m/s	1.37 ms

VI.4.2- Análisis comparativo de las curvas de presión numéricas y experimentales, obtenidas en los sistemas de cierre convencional y hermético propuesto.

Los resultados numéricos de la presión en la recámara del cañon de pruebas, que se calcularon en los 10 sistemas estacionarios modelados se indican en la Tabla VI.15. Estos resultados

corresponden al rango completo de presiones que se detectan durante el disparo de las municiones 7.62 x 51 mm FMJ y de la munición propuesta Cal. 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo.

Tabla VI.15.- Valores de presión calculados numéricamente para el disparo de la munición Cal. 7.62 x 51 mm FMJ y de la munición propuesta Cal. 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo.

No.	Cierre convencional 7.62 x 51 mm FMJ		Cierre hermético propuesto 7.62 mm	
	Tiempo	Presión	Tiempo	Presión
1	0.001 ms	3.12 MPa	0.002 ms	1.50 MPa
2	0.022 ms	49.81 MPa	0.024 ms	2.32 MPa
3	0.092 ms	215.77 MPa	0.074 ms	6.45 MPa
4	0.273 ms	272.49 MPa	0.178 ms	15.12 MPa
5	0.588 ms	170.96 MPa	0.351 ms	78.95 MPa
6	0.921 ms	82.32 MPa	0.600 ms	107.66 MPa
7	1.184 ms	44.88 MPa	0.895 ms	94.14 MPa
8	1.403 ms	31.37 MPa	1.220 ms	78.30 MPa
9	1.611 ms	22.85 MPa	1.547 ms	53.40 MPa
10	2.179 ms	18.17 MPa	2.143 ms	46.30 MPa

Los resultados anteriores se graficaron en la Figura VI.9, comparándose con las curvas de presión-tiempo obtenidas experimentalmente, siendo posible identificar una afinidad entre los datos numéricos y experimentales, debido a la tendencia similar que presentan las gráficas de cada munición. Mediante las curvas determinadas numéricamente y experimentalmente para el caso del disparo de la munición 7.62 x 51 mm FMJ, se aprecia un encendido homogéneo de la cápsula de iniciación, una presión máxima de 270 MPa y un comportamiento decreciente de la deflagración

de pólvora en la recámara, así como una pérdida de presión continua con respecto al tiempo, a lo largo del cañón de pruebas después de la salida de la bala.

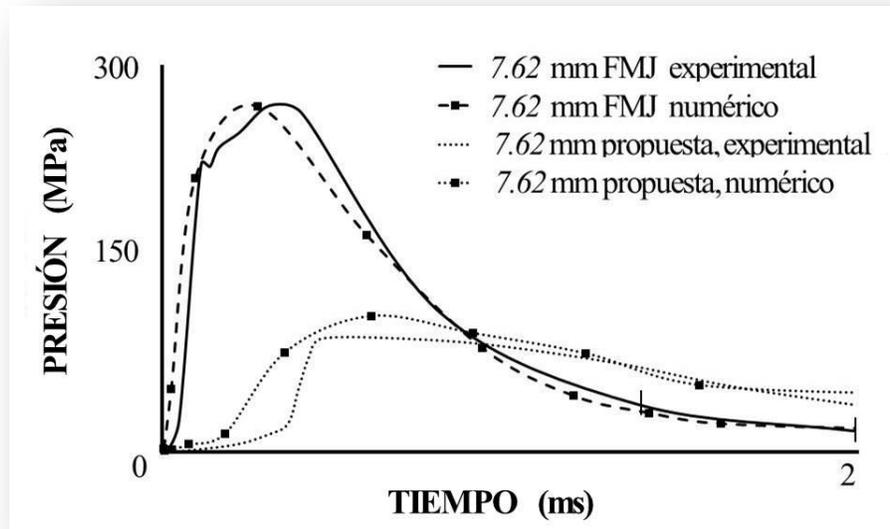


Figura VI.22.- Curvas de presión experimentales y numéricas obtenidas para el disparo de la munición 7.62 x 51 mm FMJ y la munición 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo.

Asimismo, las curvas del disparo de la munición propuesta Cal. 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo, permiten observar similarmente un encendido homogéneo de la cápsula de iniciación, con una reducción del pico de presión máxima de 270 MPa a 90 MPa y un comportamiento progresivo parcial de la curva de presión para la deflagración de la pólvora de doble base, lo que genera una reducción de la velocidad y en el alcance del disparo.

Comparando las curvas de presión-tiempo de los dos tipos de municiones, se observa que la presión generada en la munición propuesta, es suficiente para impulsar el proyectil sin núcleo a través del cañón y mantener una velocidad experimental de 327 m/s a una distancia de 23.77 m, la cual fue indicada anteriormente en la Tabla VI.10 y cuyo resultado se encuentra dentro de los parámetros confiables de las municiones de corto alcance, como lo es la munición Cal. 9 x 19 mm, lo que permite su uso en operaciones de combate urbano.

VI.5.- Pruebas de funcionamiento en armamento modificado con el sistema de cierre hermético propuesto, y la munición Cal. 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo.

En las Figuras VI.23 y VI.24 se muestra las pruebas de fuego realizadas con la adaptación del sistema de cierre hermético propuesto, en un Rifle Marlin XL7 Cal. 7.62 x 51 mm (0.308 WIN), ampliando la cabeza de cierre conforme el modelo desarrollado en el Capítulo III.



Figura VI.23.- Pruebas de fuego con el sistema de cierre hermético propuesto, adaptado en un Rifle Marlin XL7 Cal. 7.62 x 51 mm (0.308 WIN).

Mediante estas pruebas se corroboró la fiabilidad del sistema de cierre hermético propuesto, ya que las municiones calibre 7.62 mm sin casco con proyectil sin núcleo se dispararon sin afectar el funcionamiento del arma, con una dispersión de los impactos similar a la que se obtiene con las municiones calibre 9 x 19 mm *Parabellum*, mostrándose en la Figura VI.24 el instante en que sale el proyectil y los gases de la deflagración, (a) para el caso de la munición estandarizada 7.62 x 51 mm FMJ y para (b) la munición prototipo Cal. 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo.

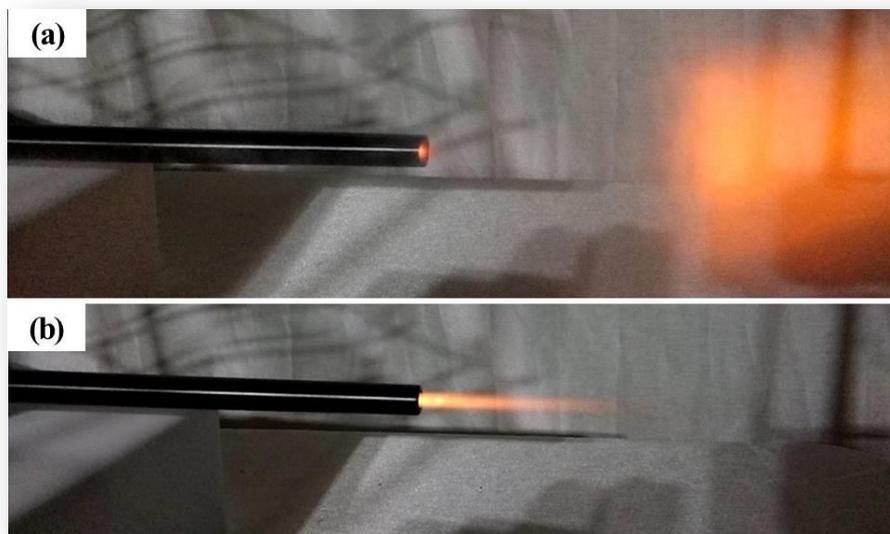


Figura VI.24.- Disparo de una munición (a) 7.62 x 51 mm FMJ en un sistema de cierre convencional y de una munición (b) 7.62 mm sin casco y con proyectil sin núcleo en el sistema de cierre hermético propuesto.

Asimismo, se aprecia que la salida de los gases en el primer caso (a) es mas violenta, pues su velocidad es aproximadamente de 850 m/s en ese punto, siendo en el segundo caso (b) la salida de los gases más lenta, con una velocidad de 345 m/s aproximadamente, lo que permite su aplicación en operaciones de combate urbano.

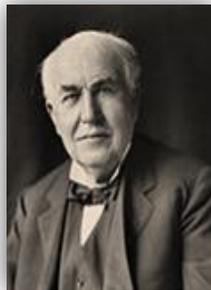
VI.6.- Sumario

En este Capítulo se analizó el flujo de gases compresibles a través de un sistema de cierre convencional y del sistema de cierre hermético propuesto, instalados en un cañón de pruebas y en un arma de fuego adaptada. Realizándose el análisis de los resultados numéricos y experimentales obtenidos conforme la metodología propuesta en los Capítulos IV y V respectivamente. Principalmente se compararon los resultados numéricos de presión, temperatura y velocidad, los cuales se verificaron con los datos experimentales de presión, velocidad y las curvas de presión-tiempo.

Conforme estos resultados, se identificó que el disparo de la munición propuesta, genera energía suficiente para empujar el proyectil y obtener parámetros balísticos de presión y velocidad similares a los de la munición Cal. 9 x 19 mm *Parabellum*, que se utilizan en todo el mundo en operaciones de combate urbano.

Por lo tanto, se determina que es posible emplear proyectiles sin núcleo en municiones sin casco, siendo factible diseñar armas para este tipo de munición, lo que permitiría obtener en este caso, resultados similares de la letalidad de la munición 7.62 mm pero en operaciones de corto alcance, aumentando el volumen de fuego debido a la reducción del peso de la munición y reduciendo los costos de producción, ya que no requieren del casco metálico de latón 70/30.

CONCLUSIONES



“Los que aseguran que es imposible, no deberían interrumpir a los que estamos intentándolo”

THOMAS ALVA EDISON, empresario y prolífico inventor de más de mil inventos, que son base de las actuales industrias eléctricas, telefónicas y cinematográficas, entre otras.
(11 FEB. 1847 – 18 OCT. 1931)

CONCLUSIONES

En esta investigación, se diseñó y analizó numéricamente los componentes de un sistema de cierre hermético, para una munición calibre 7.62 mm sin casco y con un proyectil sin núcleo, analizándose el comportamiento del flujo de gases con objeto de alcanzar los parámetros balísticos de la munición calibre 9 x 19 mm *Parabellum*, conforme al objetivo general planteado.

Asimismo se cumplieron los siguientes objetivos particulares inicialmente programados:

- La determinación de las condiciones de trabajo del sistema de cierre de un arma convencional, mediante el análisis bibliográfico descrito en los Capítulos I y II, las pruebas experimentales de presión y velocidad indicadas en los Capítulos IV y V, así como del análisis numérico de los esfuerzos que se generan, y que se detallan en el Capítulo IV, con lo que se identificaron las especificaciones en que operaran los sistemas de cierre convencionales y que sirven de base para el diseño del sistema de cierre cuasi-hermético.
- El diseño de un sistema de cierre cuasi-hermético, empleando el diseño asistido por computadora (CAD) para el modelado de los componentes y su interacción en su ciclo de funcionamiento, como se describe en el Capítulo III.
- Se definieron los materiales necesarios a emplearse en el sistema de cierre hermético propuesto, al caracterizar y analizar las propiedades de los materiales empleados en

armamento convencional, realizando los análisis químicos, mecánicos y físicos correspondientes.

- Se determinó la capacidad del sistema de cierre hermético para cumplir con las especificaciones de su funcionamiento durante el disparo, mediante el análisis de los esfuerzos y deformaciones con el Método de Elemento Finito indicado en el Capítulo IV y con los resultados descritos en el Capítulo VI.

Por lo que el presente estudio cumplió adecuadamente con los objetivos planteados, realizando una aportación científica relevante al determinar el nuevo diseño de un sistema de cierre hermético y su relación con municiones sin casco y con proyectil sin núcleo, asimismo se publicó el artículo *Numerical modelling of Caseless Ammunition with Coreless Bullet in Internal Ballistics*, en la revista Defence Science Journal, el cual se incluye en el Anexo B.

DISCUSIONES



"La pasión asociada a una discusión es inversamente proporcional a la cantidad de información real disponible"

LEY DE LA CONTROVERSIA

GREGORY BENFORD, Físico y escritor de ciencia ficción, estadounidense, profesor de astrofísica en el Departamento de Física y Astronomía de la Universidad de California, Irvine. Desde 1988 pertenece al Consejo científico de consultores de la NASA.
(30 ENE. 1941 –)

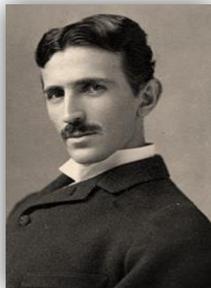
DISCUSIONES

El uso de armas sin casco presenta algunas inconveniencias, respecto al cuidado que el usuario debe de tener del sistema de cierre, a fin de no dañarlo para que no pierda su hermeticidad durante su funcionamiento.

Asimismo las municiones deben de ser manipuladas cuidadosamente con objeto de que no se fracturen y queden inservibles, así como ser almacenadas adecuadamente y en empaques al vacío, para evitar que la carga propulsora se vea afectada por la humedad.

Siendo estos aspectos anteriores, parte fundamental de las consideraciones que debe tener el diseño, a efecto de que sea más robusto, evitando incrementar demasiado el costo final del producto y que se generen condiciones de riesgo en el producto que pongan en peligro a los usuarios.

REFERENCIAS



“El científico no tiene por objeto un resultado inmediato. Él no espera que sus ideas avanzadas sean fácilmente aceptadas. Su deber es sentar las bases para aquellos que están por venir, y señalar el camino”

NIKOLA TESLA, inventor, ingeniero mecánico e ingeniero eléctrico de origen serbio y el promotor más importante del nacimiento de la electricidad comercial.
(10 JUL. 1856 – 07 ENE. 1943)

REFERENCIAS

- ANSYS Release 14.0. ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc., Canonsburg, P.A. 15317, USA, pp. 204–206, 2011.
- Babkovskaia, N., Haugen, N.E.L., y Brandenburg, A., A high-order public domain code for direct numerical simulations of turbulent combustion. *J Comput Phys.*, Vol. 230(1), pp. 1-12, 2011.
- Balabel, A., Hegab, A.M., Nasr, M., y El-Behery, S., Assessment of turbulence modeling for gas flow in two-dimensional convergent–divergent rocket nozzle, *Appl Math Model*, Vol. 35, pp. 3408-22, 2011.
- Bravo, L., Voegelé, A., y Trouvé, A. Direct numerical simulation of near-wall combustion in a momentum-driven turbulent boundary layer flow, *In 8th U.S. Natl. Combust. Meet*, University of Utah, Utah, USA, 2013.
- Cambou, D., Christy, M., Modern Marvels; Bullets, *A&E Television Networks*, 2003.
- Chen, J.Y., y Frederick, D. Effects of differential diffusion on predicted autoignition delay times inspired by H₂/N₂ jet flames in a vitiated coflow using the linear eddy model, *Flow Turbul Combust.*, Vol. 93, pp. 283–304, 2014.
- Cutshaw, C. Q., y Ness, L., *Jane's ammunition handbook 2004-2005*, Jane's information group limited, 34 ed, ISBN 0 7106 2615 0, 2004.
- Çengel, Y. A., *Transferencia de calor y masa; un enfoque práctico*, Mc Graw Hill, ISBN 978 970 10 6173 2, Caps. 1, 12 y 15, 2007.
- Di Maio, V. J. M., *Gunshot wounds; practical aspects of firearms, ballistics, and forensic techniques*, CRC Press LLC, 2/aed, ISBN 0-8493-8163-0, pp. 21–51, Cap. 1, 1999.
- Di Mare, F., Knapstein, R., y Baumann, M., Application of LES-quality criteria to internal combustion engine flows, *Comput Fluids*, Vol. 89, pp. 200-13, 2014
- El-Askary, W.A., Balabel, A., El-Behery, S.M., y Hegab, A., Computations of a compressible turbulent flow in a rocket motor-chamber configuration with symmetric and asymmetric injection, *J Comput Model Eng Sci.*, Vol. 82(1), pp. 29-54, 2011.
- Ezell, V. H., *Metal storm rifle system; breaking the small-arms technology barrier*, Tony Rogers.com, <http://tonyrogers.com/weapons/metalstorm.htm>, 2012.

- Fritz, R., Heckler & Koch GmbH; Small firearm with receiver, *United States Patent No. 5,164,537*, 1992.
- Gorji, S., Seddighi, M., Ariyaratne, C., Vardy, A.E., O'Donoghue, T., Pokrajac, D., y He, S., Comparative study of turbulence models in a transient channel flow, *Comput Fluids*, Vol. 89, pp. 111-23, 2014.
- Groover, M. P., *Fundamentos de manufactura moderna*, Mc Graw Hill, 3 ed, ISBN 978 970 10 6240 1, Caps. 3, 4, 18, 20 y 34, 2007.
- Heard, B. J., *Handbook of firearms and ballistics: examining and interpreting forensic evidence*, Wiley-blackwell, 2/a ed, ISBN 978-0-470-69460-2, pp, 67–70, Cap. 2, 2008.
- Hegab, A.M., Sait, H.H., Hussain, A., y Said, A.S., Numerical modeling for the combustion of simulated solid rocket motor propellant, *Comput Fluids*, Vol. 89, pp. 29-37, 2014.
- Hereward, P., Top ten; Combat rifles, *Discovery communications Inc.*, 2006.
- Hicke, J., y Newman, R., Future weapons; Top guns, Kriss 0.45 ACP, *Discovery communications Inc.*, 2008.
- Jaramaz, S., Micković, D., y Elek, P. Two-phase flows in gun barrel: theoretical and experimental studies, *Int J Multiphas Flow*, Vol. 37(5), pp. 475–87, 2011.
- Jebsen, H.J., KRIS USA Inc.; Firearm with enhanced recoil and control characteristics, *United States Patent No. 7,201,094 B2*, 2007.
- Jiang, Z., Huang, Y., y Takayama, K., Shocked flows induced by supersonic projectiles moving in tubes, *Computers & Fluids*, Vol. 33, pp. 953 – 966, 2004.
- Jiang, Z., Wave dynamic processes induced by a supersonic projectile discharging from a shock tube, *Physics of fluids*, Vol. 15, No. 6, 2003.
- Jiang, X., Fan, B., y Li, H., Numerical investigations on dynamic process of muzzle flow, *Applied mathematics and mechanics*, Vol. 29, No.3, pp, 351 – 360, 2008.
- Jiang, X., Chen, Z., Fan, B., y Li, H., Numerical simulation of blast flow fields induced by a high-speed projectile, *Shock Waves*, Vol. 18, pp, 205-212, 2008.
- Jones, R. D., y Ness, L. S., *Jane's infantry weapons 2006-2007*, Jane's information group limited, 32 ed, ISBN 978 0 7106 2755 1, 2006.

Jung, S.Y., y Chung, Y.M., Large-eddy simulation of accelerated turbulent flow in a circular pipe, *Int J Heat Fluid Fl.*, Vol. 33, pp. 1-8, 2012.

Kästner, G., Heckler & Koch GmbH; Shoulder arm with swivel breech member, *United States Patent No. 3,997,994*, 1976.

Ketterer, D., Heckler & Koch GmbH; Shoulder arm with swivel breech member, *United States Patent No. 4,348,941*, 1982.

Ketterer, D., Heckler & Koch GmbH; Means for loading small firearms including a box magazine and cartridge clips, *United States Patent No. 4,152,857*, 1979.

Konicke, H., Seal in particular for caseless ammunition, *Patent US 2007/0028756 A1*, Diehl BGT Defence GmbH & Co. KG, 2007.

Konopka, M., Meinke, M., y Schröder, W., Large-eddy simulation of supersonic film cooling at finite pressure gradients, *High Perform Comput Sci Eng.*, doi:10.1007/978-3-642-23869-7_26, 2011.

Kriss Vector, Technology; The first major breakthrough in weapons operating systems in more than 120 years!, *KRISS USA Inc.*, http://www.kriss-usa.com/index.php?option=com_content&view=article&id=23&Itemid=109, 2012

Larousse; Diccionario Enciclopédico Vox 1, Larousse Editorial, S.L., <http://es.thefreedictionary.com/propelente>, 2012.

Löhner, R., *Applied computational fluid dynamics techniques; an introduction based on finite element methods*, John Wiley & Sons Ltd., ISBN 978 0 470 51907 3, Caps. 3, 8, y 10, 2008.

Lu, X., Zhou, Y., y Yu, Y., Experimental study and numerical simulation of propellant ignition and combustion for cased telescoped ammunition in chamber, *Journal of Applied Mechanics; transactions of the ASME*, Vol. 77, pp, 051402-1 a 051402-5, 2010.

Martin, H.T., Boyer, E., y Kuo, K.K., Effect of Initial Temperature on the Interior Ballistics of a 120-mm Mortar System, *Journal of Applied Mechanics; transactions of the ASME*, Vol. 80, pp, 031408-1 – 031408-11, 2013.

Mathew, J. Large Eddy Simulation, *Def. Sci. J.*, Vol. 60(6), pp. 598-605, 2010.

Mauch, E., Heckler & Koch GmbH; Firearm with gas-escape port, *United States Patent No. 5,475,940*, 1995.

McGregor, I. A., Telescoped ammunition: a future lightweight compact ammunition?, *Canadian Army Journal*, Vol. 12, No. 2, pp, 75-81, 2009.

Metal Storm; Company history, Metal Storm Limited, <http://www.metalstorm.com/content/view/13/112/>, 2012.

Mickovic, D., Jaramaz, S., Jaramaz, D., y Mickovic, D., Determination of Pressure Profiles Behind Projectiles During Interior Ballistic Cycle, *Journal of Applied Mechanics; transactions of the ASME*, Vol. 80, pp, 031402-1 – 031402-5, 2013.

Military Specification, *Cartridge, 5.56mm: Ball-M193*, MIL-C-9963F, U.S. Department of Defense, Picatinny Arsenal, NJ., 1976.

Military Specification, *Cartridge, 7.62mm: NATO, Ball-M80*, MIL-DTL-46931, U.S. Department of Defense, Picatinny Arsenal, NJ., 2010.

Military Specification, *Cartridge, 9mm: NATO, Ball-XM882*, MIL-C-70508 (AR), U.S. Department of Defense, Picatinny Arsenal, NJ., 1985.

MK 109 cutaway view; Combat rifle cal. 300 AAC Blackout, Primary Weapons Systems, http://primaryweapons.com/store/pc/catalog/mk1_cutaway.jpg, 2012.

Möller, T., Heckler & Koch GmbH; Automatic or semi-automatic small arm, *United States Patent No. 4,078,327*, 1978.

Norma mexicana, Métodos de análisis químico para determinar la composición de aceros y fundiciones, NMX-B-001-1988, México, 1988.

Notas técnicas de prevención, Análisis modal de fallos y efectos AMFE, NTP 679, *Instituto de seguridad e higiene en el trabajo*, España, 2004.

O'Dwyer, J.M., Metal Storm; Barrel assembly, *United States Patent No. 6,123,007*, 2000.

O'Dwyer, J.M., Metal Storm; Cannon for axially fed rounds with breeched round sealing breech chamber, *United States Patent No. 6,123,007*, 2001.

O'Dwyer, J.M., Metal Storm; Barrel assembly with axially stacked projectiles, *United States Patent No. 6,301,819*, 2001.

O'Dwyer, J.M., Metal Storm; Firearms, *United States Patent No. 6,343,553*, 2002.

O'Dwyer, J.M., Metal Storm; Firearms security, *United States Patent No. 6,477,801 B1*, 2002

- O'Dwyer, J.M., Metal Storm; Barrel assembly with over-pressure relief, *United States Patent No. 6,543,174 B2*, 2003
- O'Dwyer, J.M., Metal Storm; Barrel assembly for firearms, *United States Patent No. 6,715,398 B2*, 2004
- O'Dwyer, J.M., Metal Storm; Projectile firing apparatus, *United States Patent No. 6,722,252 B1*, 2004
- O'Dwyer, J.M., Metal Storm; Decoy, *United States Patent No. 6,782,826 B1*, 2004
- RAE; Real Academia Española, *Diccionario de la lengua española*, Real Academia Española, 22/a ed., <http://www.rae.es/rae.html>, 2012
- Rommel, E., Heckler & Koch GmbH; Small firearm with receiver, *United States Patent No. 5,229,539*, 1993.
- Saaty, T.L., A scaling method for priorities in hierarchical structures, *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15, No. 3, pp. 234–281, doi:10.1016/0022-2496(77)90033-5, 1977.
- Shekhar, H. Effect of Temperature on Mechanical Properties of Solid Rocket Propellants, *Def. Sci. J.*, Vol. 61(6), pp. 529-33, 2011.
- Silva, U. S., Sandoval, J. M., Flores, L. A., Muñoz, N., y Hernández, V., Numerical Simulation and Experimental Study of Flowfield Around a Bullet With a Partial Core, *Journal of Applied Mechanics; transactions of the ASME*, Vol. 78, No. 5, pp. 051020-1 – 051020-5, 2011.
- Silva, U. S., Sandoval, J. M., Susarrey, O., Flores, L. A., y Tamayo, P.A., Numerical modelling of Caseless Ammunition with Coreless Bullet in Internal Ballistics, *Defence Science Journal*, Vol. 65, No. 3, pp. 203 – 207, doi: 10.14429/dsj.65.8511, 2015.
- Steyr AUG cutaway view; Combat rifle cal. 5.56 x 45 mm, MilitaryPhotos.com, <http://www.militaryphotos.net/forums/showthread.php?96265-Pic-Request-Cutaway-pics-of-modern-guns/page2>, 2012.
- Spiegel, K., y Shipley, P., Lightweight small arms technologies, *U.S. Army ARDEC Picatinny, NJ 07806*, 2006.
- Sung, H.G., Jang, J.S., y Roh, T.S., Application of Eulerian–Lagrangian Approach to Gas-Solid Flows in Interior Ballistics, *Journal of Applied Mechanics; transactions of the ASME*, Vol. 80, pp. 031407-1 – 031407-8, 2013.

Tang, J., Du, J., y Chen, Y., Modeling and experimental study of grinding forces in surface grinding, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp, 2847-2854, 2009.

Technical manual, unit and direct support maintenance manual, Carbine 5.56 mm M4 A1 (1005-01-382-0953) (EIC:4GC), U.S. Departments of the Army, Washington D.C., 1997.

Tu, J., Yeoh, G., y Liu, C., Computational fluid dynamics a practical approach, Elsevier, United Kingdom, 2013.

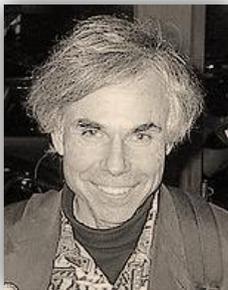
Weldle, H., Heckler & Koch GmbH; Light-weight automatic rifle, *United States Patent No. 5,513,461*, 1996.

Werle, S., y Wilk, R. K., A Constant-Volume Bomb and Co-Flow Reactor Investigation of Ignition Phenomenon of Hydrocarbon Fuels in High Temperature Oxidizer, *International Journal of Thermodynamics*, Vol. 13, No. 2, pp, 43 - 49, 2010.

Wright, Y.M., Margari, O., Boulouchos, K., De Paola, G., y Mastorakos, E., Experiments and simulations of n-Heptane spray auto-ignition in a closed combustion chamber at diesel engine conditions, *Flow Turbul Combust.*, Vol. 84, pp. 49–78, 2010.

Yang, W., Li, Y., y Ying, S., Burning characteristics of microcellular combustible objects, *Defence Tech.*, doi:10.1016/j.dt.2014.03.003, 2014

TRABAJOS FUTUROS



"Hacer algo te va a llevar más tiempo de lo que piensas, incluso si tienes en cuenta la ley de Hofstadter"

LEY DE HOFSTADTER

DOUGLAS RICHARD HOFSTADTER, científico, filósofo y académico estadounidense. Conocido por su libro *Gödel, Escher, Bach (GEB)* que fue publicado en 1979, y ganó el Premio Pulitzer de ensayo en 1980.

(15 FEB. 1945 –)

TRABAJOS FUTUROS

El presente estudio puede ser complementado con la realización de las siguientes actividades e investigaciones:

- Obtener el daño acumulado de los materiales, a fin de conocer como se propagan las fisuras hasta su fractura al no resistir las cargas, con objeto de proponer mejoras en las propiedades del material mediante un tratamiento térmico.
- Fabricación de un lote piloto de 50 piezas para la realización de pruebas de laboratorio y de campo, bajo condiciones controladas.
- Mejora del aglutinante empleado, con objeto de evitar al máximo la higroscopicidad de la pólvora de doble base sin humo, empleada como carga propulsora.

ANEXO A

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)

AMFE DE PROYECTO <input checked="" type="checkbox"/>	DENOMINACIÓN DEL COMPONENTE: PROTOTIPO NO. 1 DE UN SISTEMA DE CIERRE HERMÉTICO, CON CIERRE ROSCADO	CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN: <u>N/A</u>	HOJA: <u>1</u> de <u>8</u>
AMFE DE PROCESO <input type="checkbox"/>			FECHA INICIO: <u>12 ene. 2015</u>
RESPONSABLE Y/O COORDINADOR: (NOMBRE / DEPTO.) M.IM. Usiel Sandino Silva Rivera		MODELO / SISTEMA / FABRICACIÓN:	FECHA REV.: <u>12 ene. 2015</u>

Componente / Función	No. de falla	Fallos potenciales					Estado actual			Acciones recomendadas	
		Modo de falla	Efecto de la falla	Δ	Seve- ridad	Causa del modo de falla	Ocu- rrencia	Método de detección y controles de calidad	Detecta- bilidad		RPN
1 Cabeza de cierre Abastecer una munición en la recámara. Obturar con la parte posterior del cañón herméticamente.	1.1	Fractura	Falla catastrófica con destrucción del arma y heridas al usuario, por no resistir la presión.	Δ	10	Contracción del material por un mal tratamiento térmico Porosidad causada por un material fuera de especificaciones	6	Inspección de los hornos de inducción Pruebas metalográficas a la materia prima	5	300	Iniciar pruebas de líquidos penetrantes y radiográficas a las piezas terminadas.
	1.2	Interferencia	Falla en el funcionamiento del arma		8	Dimensiones fuera de especificaciones	5	Verificar las dimensiones finales	3	120	Iniciar un programa de Control estadístico del proceso para verificar y mantener las dimensiones
1.1 Dientes internos Cerrar a presión con la cuerda en la parte externa del cañón. Abrir el sistema de cierre al girar en la dirección contraria	1.3	Fractura	Falla catastrófica con destrucción del arma y heridas al usuario, por no resistir la presión.	Δ	10	Contracción del material por un mal tratamiento térmico Porosidad causada por un material fuera de especificaciones	6	Inspección de los hornos de inducción Pruebas metalográficas a la materia prima	8	480	Iniciar pruebas de líquidos penetrantes y radiográficas a las piezas terminadas.

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)

AMFE DE PROYECTO <input checked="" type="checkbox"/>	DENOMINACIÓN DEL COMPONENTE: PROTOTIPO NO. 1 DE UN SISTEMA DE CIERRE HERMÉTICO, CON CIERRE ROSCADO	CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN: <u>N/A</u>	HOJA: <u>2</u> de <u>8</u>
AMFE DE PROCESO <input type="checkbox"/>			FECHA INICIO: <u>12 ene. 2015</u>
RESPONSABLE Y/O COORDINADOR: (NOMBRE / DEPTO.) M.IM. Usiel Sandino Silva Rivera		MODELO / SISTEMA / FABRICACIÓN:	FECHA REV.: <u>12 ene. 2015</u>

Componente / Función	No. de falla	Fallos potenciales					Estado actual			Acciones recomendadas	
		Modo de falla	Efecto de la falla	Δ	Seve- ridad	Causa del modo de falla	Ocu- rrencia	Método de detección y controles de calidad	Detecta- bilidad		RPN
									1-10		1-10
1.1 Dientes internos (Cont.) Cerrar a presión con la cuerda en la parte externa del cañón. Abrir el sistema de cierre al girar en la dirección contraria	1.4	Interferencia	Falla en el funcionamiento del arma, al cerrar incorrectamente con la cuerda o roscado en la parte externa del cañón.	Δ	10	Dimensiones fuera de especificaciones	6	Verificar las dimensiones finales	8	480	Iniciar un programa de Control estadístico del proceso para verificar y mantener las dimensiones
	1.5	Obstrucción	Falla en el funcionamiento del arma, al impedir que gire la cabeza de cierre y obture con el roscado	Δ	10	Residuos o suciedad	6	Limpieza del arma antes de su empleo	8	480	Iniciar un programa de capacitación de los usuarios y supervisión de sus actividades
1.2 Angulo interno Cerrar ajustadamente con el ángulo del cañón, con ajuste completo, parcial ó una pequeña introducción.	1.6	Interferencia	Falla en el funcionamiento del arma, al no cerrar ajustadamente con el ángulo del cañón, dejando un espacio o abertura.		8	Dimensiones fuera de especificaciones	5	Verificar las dimensiones finales	3	120	Iniciar un programa de Control estadístico del proceso para verificar y mantener las dimensiones

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)

AMFE DE PROYECTO <input checked="" type="checkbox"/>	DENOMINACIÓN DEL COMPONENTE: PROTOTIPO NO. 1 DE UN SISTEMA DE CIERRE HERMÉTICO, CON CIERRE ROSCADO	CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN: <u>N/A</u>	HOJA: <u>3</u> de <u>8</u>
AMFE DE PROCESO <input type="checkbox"/>			FECHA INICIO: <u>12 ene. 2015</u>
RESPONSABLE Y/O COORDINADOR: (NOMBRE / DEPTO.) M.IM. Usiel Sandino Silva Rivera		MODELO / SISTEMA / FABRICACIÓN:	FECHA REV.: <u>12 ene. 2015</u>

Componente / Función	No. de falla	Fallos potenciales					Estado actual			Acciones recomendadas	
		Modo de falla	Efecto de la falla	Δ	Seve- ridad	Causa del modo de falla	Ocu- rrencia	Método de detección y controles de calidad	Detecta- bilidad		RPN
1.2 Angulo interno (Cont.) Cerrar ajustadamente con el ángulo del cañón, con ajuste completo, parcial ó una pequeña introducción.	1.7	Obstrucción	Falla en el funcionamiento del arma, al no cerrar ajustadamente con el ángulo del cañón, dejando un espacio o abertura.		8	Residuos suciedad	5	Limpieza del arma antes de su empleo	3	120	Iniciar un programa de capacitación de los usuarios y supervisión de sus actividades
1.3 Cavidad de alojamiento del percutor Mantener el percutor en la parte retraído durante el desplazamiento de cierre para que no percuta la munición fuera de la recamara	1.8	Interferencia	Falla catastrófica con destrucción del arma y heridas al usuario, por no contener al percutor y se produzca el disparo hasta que la recamara este sellada	Δ	10	Dimensiones fuera de especificaciones	5	Verificar las dimensiones finales	3	150	Iniciar un programa de Control estadístico del proceso para verificar y mantener las dimensiones
	1.9	Obstrucción	Falla catastrófica con destrucción del arma y heridas al usuario, por no contener al percutor y se produzca el disparo hasta que la recamara este sellada	Δ	10	Residuos suciedad	3	Limpieza del arma antes de su empleo	3	90	Iniciar un programa de capacitación de los usuarios y supervisión de sus actividades

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)

AMFE DE PROYECTO <input checked="" type="checkbox"/>	DENOMINACIÓN DEL COMPONENTE: PROTOTIPO NO. 1 DE UN SISTEMA DE CIERRE HERMÉTICO, CON CIERRE ROSCADO	CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN: <u>N/A</u>	HOJA: <u>4</u> de <u>8</u>
AMFE DE PROCESO <input type="checkbox"/>		FECHA INICIO: <u>12 ene. 2015</u>	
RESPONSABLE Y/O COORDINADOR: (NOMBRE / DEPTO.) M.IM. Usiel Sandino Silva Rivera		MODELO / SISTEMA / FABRICACIÓN:	FECHA REV.: <u>12 ene. 2015</u>

Componente / Función	No. de falla	Fallos potenciales					Estado actual			Acciones recomendadas	
		Modo de falla	Efecto de la falla	Δ	Seve- ridad	Causa del modo de falla	Ocu- rrencia	Método de detección y controles de calidad	Detecta- bilidad		RPN
2 Cañón Resistir la presión de la deflagración de la pólvora Resistir la fricción. del desplazamiento de la bala. Dar dirección a la bala mediante el rayado del tubo cañón.	2.1	Fisura	Falla catastrófica con destrucción del arma y heridas al usuario, por no resistir la presión de la deflagración de la pólvora.	Δ	10	Contracción del material por un mal tratamiento térmico Porosidad causada por un material fuera de especificaciones	6	Inspección de los hornos de inducción Pruebas metalográficas a la materia prima	5	300	Iniciar pruebas de líquidos penetrantes y radiográficas a las piezas terminadas.
	2.2	Interferencia	Falla catastrófica con destrucción del arma y heridas al usuario, por no contener correctamente la munición y producir una sobrepresión	Δ	10	Dimensiones fuera de especificaciones	5	Verificar las dimensiones finales	3	150	Iniciar un programa de Control estadístico del proceso para verificar y mantener las dimensiones
	2.3	Obstrucción	Falla catastrófica con destrucción del arma y heridas al usuario, por sobrepresión	Δ	10	Residuos o suciedad	3	Limpieza del arma antes de su empleo	3	90	Iniciar un programa de capacitación de los usuarios y supervisión de sus actividades
2.1 Recamara del cañón	2.4	Fisura	Falla catastrófica con destrucción del arma y heridas al usuario, por no resistir la presión de la deflagración de la pólvora.	Δ	10	Contracción del material por un mal tratamiento térmico Porosidad causada por un material fuera de especificaciones	6	Inspección de los hornos de inducción Pruebas metalográficas a la materia prima	5	300	Iniciar pruebas de líquidos penetrantes y radiográficas a las piezas terminadas.

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)

AMFE DE PROYECTO <input checked="" type="checkbox"/>	DENOMINACIÓN DEL COMPONENTE: PROTOTIPO NO. 1 DE UN SISTEMA DE CIERRE HERMÉTICO, CON CIERRE ROSCADO	CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN: <u>N/A</u>	HOJA: <u>5</u> de <u>8</u>
AMFE DE PROCESO <input type="checkbox"/>			FECHA INICIO: <u>12 ene. 2015</u>
RESPONSABLE Y/O COORDINADOR: (NOMBRE / DEPTO.) M.IM. Usiel Sandino Silva Rivera		MODELO / SISTEMA / FABRICACIÓN:	FECHA REV.: <u>12 ene. 2015</u>

Componente / Función	No. de falla	Fallos potenciales					Estado actual			Acciones recomendadas	
		Modo de falla	Efecto de la falla	Δ	Seve- ridad	Causa del modo de falla	Ocu- rrencia	Método de detección y controles de calidad	Detecta- bilidad		RPN
2.1 Recamara del cañón (Cont.) Alojarse la munición antes de ser disparada, manteniéndola en la distancia correcta Resistir la presión de la deflagración de la pólvora	2.5	Interferencia	Falla catastrófica con destrucción del arma y heridas al usuario, por no contener correctamente la munición y producir una sobrepresión	Δ	10	Dimensiones fuera de especificaciones	5	Verificar las dimensiones finales	3	150	Iniciar un programa de Control estadístico del proceso para verificar y mantener las dimensiones
	2.6	Obstrucción	Falla catastrófica con destrucción del arma y heridas al usuario, por generarse una sobrepresión	Δ	10	Residuos o suciedad	3	Limpieza del arma antes de su empleo	3	90	Iniciar un programa de capacitación de los usuarios y supervisión de sus actividades
2.2 Angulo de terminado posterior Cerrar ajustadamente con el ángulo de la cabeza de cierre, con ajuste completo, parcial ó detenerse al tocar con las paredes del ángulo posterior del tubo cañón.	2.7	Interferencia	Falla en el funcionamiento del arma, al no cerrarse ajustadamente con el ángulo interno de la cabeza de cierre, dejando un espacio o abertura.		8	Dimensiones fuera de especificaciones	5	Verificar las dimensiones finales	3	120	Iniciar un programa de Control estadístico del proceso para verificar y mantener las dimensiones

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)

AMFE DE PROYECTO <input checked="" type="checkbox"/>	DENOMINACIÓN DEL COMPONENTE: PROTOTIPO NO. 1 DE UN SISTEMA DE CIERRE HERMÉTICO, CON CIERRE ROSCADO	CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN: <u>N/A</u>	HOJA: <u>6</u> de <u>8</u>
AMFE DE PROCESO <input type="checkbox"/>			FECHA INICIO: <u>12 ene. 2015</u>
RESPONSABLE Y/O COORDINADOR: (NOMBRE / DEPTO.) M.IM. Usiel Sandino Silva Rivera		MODELO / SISTEMA / FABRICACIÓN:	FECHA REV.: <u>12 ene. 2015</u>

Componente / Función	No. de falla	Fallos potenciales					Estado actual			Acciones recomendadas	
		Modo de falla	Efecto de la falla	Δ	Seve- ridad	Causa del modo de falla	Ocu- rrencia	Método de detección y controles de calidad	Detecta- bilidad		RPN
									1-10		1-10
2.3 Roscado exterior del cañón Cerrar a presión con los dientes internos de la cabeza de cierre. Permitir y direccionar el paso de gases hacia el frente del arma, encaso de una sobrepresión.	2.8	Interferencia	Falla en el funcionamiento del arma, al cerrar incorrectamente con los dientes internos de la cabeza de cierre		8	Dimensiones fuera de especificaciones	5	Verificar las dimensiones finales	3	120	Iniciar un programa de Control estadístico del proceso para verificar y mantener las dimensiones
	2.9	Obstrucción	Falla en el funcionamiento del arma, al impedir que gire la cabeza de cierre y obture con el roscado		8	Residuos o suciedad	5	Limpieza del arma antes de su empleo	3	120	Iniciar un programa de capacitación de los usuarios y supervisión de sus actividades
3 Pieza de acerrojamiento Posicionar el cañón al cajón de mecanismos del arma, con la distancia correcta Dejar mal la posición y distancia del cañón	3.1	Desalineado	Falla catastrófica en el funcionamiento del arma, al impedir que entre y gire la cabeza de cierre para obturar el sistema		10	Mala alineación de la pieza de acerrojamiento en el cajón de mecanismos. Dimensiones fuera de especificaciones	2	Verificar las dimensiones finales	10	200	Iniciar un programa de Control estadístico del proceso para verificar y mantener las dimensiones
3.1 Tuerca unión Fijar el cañón a la pieza de acerrojamiento, con la distancia correcta	3.2	Desajustado	Falla catastrófica con destrucción del arma y heridas al usuario, al producir una sobrepresión	Δ	10	Dimensiones fuera de especificaciones	5	Verificar las dimensiones finales	3	150	Iniciar un prog. de Control estadístico del proceso para verificar y mantener las dimensiones

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)

AMFE DE PROYECTO <input checked="" type="checkbox"/>	DENOMINACIÓN DEL COMPONENTE: PROTOTIPO NO. 1 DE UN SISTEMA DE CIERRE HERMÉTICO, CON CIERRE ROSCADO	CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN: <u>N/A</u>	HOJA: <u>7</u> de <u>8</u>
AMFE DE PROCESO <input type="checkbox"/>			FECHA INICIO: <u>12 ene. 2015</u>
RESPONSABLE Y/O COORDINADOR: (NOMBRE / DEPTO.) M.IM. Usiel Sandino Silva Rivera		MODELO / SISTEMA / FABRICACIÓN:	FECHA REV.: <u>12 ene. 2015</u>

Componente / Función	No. de falla	Fallos potenciales					Estado actual			Acciones recomendadas	
		Modo de falla	Efecto de la falla	Δ	Seve- ridad	Causa del modo de falla	Ocu- rrencia	Método de detección y controles de calidad	Detecta- bilidad		RPN
4 Soporte de cierre Ensamblar la cabeza de cierre, con el percutor y perno guía, así como con la varilla y el resorte de recuperación. Desplazar el sistema de cierre en la apertura y obturación, para abastecer una nueva munición. Permitir el movimiento del perno guía, para que cuando alcance un espacio interno en el cajón de mecanismos, se introduzca y permita el giro de la cabeza de cierre.	4.1	Interferencia	Falla en el funcionamiento del arma, al cerrar incorrectamente		8	Dimensiones fuera de especificaciones	5	Verificar las dimensiones finales	3	120	Iniciar un programa de Control estadístico del proceso para verificar y mantener las dimensiones
	4.2	Obstrucción	Falla en el funcionamiento del arma, al cerrar incorrectamente		8	Residuos o suciedad	5	Limpieza del arma antes de su empleo	3	120	Iniciar un programa de capacitación de los usuarios y supervisión de sus actividades

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)

AMFE DE PROYECTO <input checked="" type="checkbox"/>	DENOMINACIÓN DEL COMPONENTE: PROTOTIPO NO. 1 DE UN SISTEMA DE CIERRE HERMÉTICO, CON CIERRE ROSCADO	CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN: <u>N/A</u>	HOJA: <u>8</u> de <u>8</u>
AMFE DE PROCESO <input type="checkbox"/>			FECHA INICIO: <u>12 ene. 2015</u>
RESPONSABLE Y/O COORDINADOR: (NOMBRE / DEPTO.) M.IM. Usiel Sandino Silva Rivera		MODELO / SISTEMA / FABRICACIÓN:	FECHA REV.: <u>12 ene. 2015</u>

Componente / Función	No. de falla	Fallos potenciales					Estado actual			Acciones recomendadas	
		Modo de falla	Efecto de la falla	Δ	Seve- ridad	Causa del modo de falla	Ocu- rrencia	Método de detección y controles de calidad	Detecta- bilidad		RPN
4.1 Perno guía Permitir el giro de la cabeza de cierre para su obturación y apertura	4.3	Interferencia	Falla en el funcionamiento del arma, al no permitir que gire la cabeza de cierre		8	Dimensiones fuera de especificaciones	5	Verificar las dimensiones finales	3	120	Iniciar un prog. de Control estadístico del proceso para verificar y mantener las dimensiones
	4.3	Obstrucción	Falla en el funcionamiento del arma, al no permitir que gire la cabeza de cierre		8	Residuos suciedad	5	Limpieza del arma antes de su empleo	3	120	Iniciar un programa de capacitación de los usuarios y supervisión de sus actividades
4.2 Percutor Impactar la capsula de iniciación de la munición, para iniciar el disparo. Impactar muy profundo, perforando la capsula de iniciación. Impactar muy poco o nada, sin producir el disparo.	4.5	Interferencia	Falla catastrófica con destrucción del arma y heridas al usuario, por producir el disparo antes de que se selle la recamara	Δ	10	Dimensiones fuera de especificaciones	5	Verificar las dimensiones finales	3	150	Iniciar un programa de Control estadístico del proceso para verificar y mantener las dimensiones
	4.6	Obstrucción	Falla catastrófica con destrucción del arma y heridas al usuario, por producir el disparo antes de que se selle la recamara	Δ	10	Residuos suciedad	3	Limpieza del arma antes de su empleo	3	90	Iniciar un programa de capacitación de los usuarios y supervisión de sus actividades
TOTAL								4,850 / 26 = 186.53			

ANEXO B



Numerical Modelling of Caseless Ammunition with Coreless Bullet in Internal Ballistics

U.S. Silva Rivera¹, J.M. Sandoval Pineda^{#,*}, O. Susarrey-Huerta¹,
L.A. Flores Herrera[#], and P.A. Tamayo Meza[#]

¹*Instituto Politécnico Nacional, ESIME-SEPI, U. Zacatenco, 07738, México*
[#]*Instituto Politécnico Nacional, ESIME-SEPI, U. Azcapotzalco, 02250, México*
^{*}*E-mail: jsandovalp@ipn.mx*

ABSTRACT

In the search of a new weapon for combat in short range, it is proposed the use of a new experimentally designed 7.62 mm calibre ammunition with a lighter weight (caseless-coreless). This can be used in carbine assault rifles with short barrel or pistols. In this work, the compressible gases flowing through the gun barrel caused by the proposed ammunition were experimentally and numerically analysed. The Large Eddy Simulation was used for the numerical simulation, considering a compressible and turbulent flow, with the chemical species transport model and a complete conversion of the propellant reaction. Variations in pressure and temperature were compared with the results obtained from a conventional 7.62 mm full metal jacket (FMJ) ammunition. Results of ballistic experimental tests and numerical simulations were similar than those of the 9 mm x 19 mm FMJ ammunitions, showing feasibility for the development of new weapons intended for operations of short range shots.

Keywords: Compressible flow, deflagration, Eddy-dissipation model, caseless-coreless

NOMENCLATURE

A	Empirical constant equal to 4
B	Empirical constant equal to 0.5
i	Net rate of production of species due to the r reaction
P	Static pressure
T	Absolute temperature
V	Velocity
Y_p	Mass fraction of any product species P
Y_R	Mass fraction of a particular R reactant

1. INTRODUCTION

Analysis of gas flow occurs within a gun is a complex problem that is studied from several aspects and can be related to some conditions that happen in combustion chambers or in vessels under high pressure. Common analyses are focused on the reaction of the propellants or fuels¹⁻³, and the pressure gradient generated by conventional projectiles and in high-pressure vessels⁴⁻⁶. These studies consider the gases produced by the ignition or combustion of the propellant as a compressible turbulent flow solved with computational fluid dynamics (CFD) by several turbulence modelling approaches such as the Eulerian-Lagrange⁷, the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations^{8,9}, Direct numerical simulation (DNS)¹⁰⁻¹², or with large Eddy simulation (LES)¹³⁻¹⁶. DNS is currently the most accurate method, but it is also the most computationally-expensive, because it requires that all of the significant turbulent structures are properly captured. In some cases, the LES has better results, it directly solves the large-scale motion and approximates the motion in small scale¹⁷. There are also studies

of caseless ammunition, combustible case and binders¹⁸⁻²⁰, these ammunitions and their weapons allow a higher volume of fire-increasing benefits during combat conditions and saving metal cases. It is known that some studies suggest that the use of propellants of nitrocellulose are not the most appropriate for caseless ammunition and combustible cartridge cases, because these are more sensitive to friction and heat¹⁹.

In this study, a new 7.62 mm caseless ammunition with coreless bullet (caseless-coreless) is presented, being the aim of this work to determine whether the generated ballistic parameters are equivalent to the 9 mm x 19 mm FMJ ammunition, to have application in the development of weapons to be used by the enforcement of the law in urban operations or short range shots. This represents a new physical phenomenon, because the behaviour of the gas flow introduced inside the bullet without core is still not well known in interior ballistics. The numerical study of the new 7.62 mm caseless-coreless ammunition was corroborated with experimental tests carried out on manufactured prototypes and compared with standardised experimental tests²¹.

2. PROCEDURE

2.1 Species Transport

The Eddy-dissipation model was used for the internal ballistic simulation¹⁶. It was considered a turbulent flow regime including the chemical species transport, the mixing of double-base gunpowder, a complete conversion of the reaction and a pressure-based solver for the combustion simulation¹⁷. The turbulence-chemistry interaction model can be expressed by

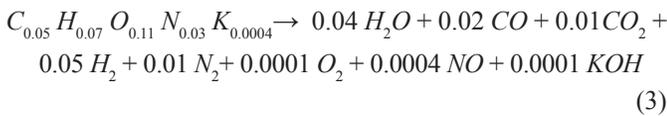
Eqns (1) and (2)²²:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min R \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \quad (1)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_J v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (2)$$

where i , is the net rate of production of species due to the r reaction; $R_{i,r}$ is given by the smaller limiting value of the Eqns (1) and (2); Y_p is the mass fraction of any product species P ; Y_R is the mass fraction of a particular R reactant; A is an empirical constant equal to 4, and B is an empirical constant equal to 0.5.

To have a reduced number of variables that could affect the comparison of results, the same double-base gunpowder was used in the 7.62 x 51 mm FMJ ammunition and in the 7.62 mm caseless-coreless ammunition, performing calculations with the same specifications of chemical composition, density, heat capacity, and enthalpy. The calculation of the chemical reaction was carried out with the ICT-Thermodynamic-Code[®], and the main chemical species studied were nitrocellulose (13.25 per cent N), nitroglycerin, potassium nitrate, centralite I and ethanol, excluding insignificant gaseous products. The reaction for 2.90 g of double base gunpowder is shown in Eqn (3):



2.2 Numerical Analysis

The volume of gases generated by the new 7.62 mm caseless ammunition with coreless bullet in the test barrel was analysed in a set of 10 progressive steady systems. During the simulations, the length of the chamber remained constant, but the model was gradually increased by changing the position of the jacket and extending the length of the barrel from 3 mm up to its final length of 446 mm, using 8 increments of 50 mm each one and the last one of 43 mm. Additional data was also included like the density of double-base gunpowder which was

considered of 210 kg/m³, the specific heat ratio of 1.2105, the maximum pressure of 400 MPa, and a stagnation temperature of 3200 °K.

Figure 1(a) shows a longitudinal slice of the 3-D caseless-coreless ammunition model in the hermetic chamber. In this case, the primer is inserted on the rear side of the agglutinated powder and the coreless bullet is filled with the combustion gases. Figure 1(b) shows a close view of the resulting meshing in the contact zone between the jacket of the coreless bullet and the barrel grooves. This is quite significant because it represents the system at the time of shooting; just at 0.002 ms when the powder gases have reached the piezoelectric transducer.

A numerical simulation for the 7.62 mm x 51 mm FMJ ammunition was performed, to validate the proposed numerical system. Figure 2(a) shows the second case of modelling with a conventional ammunition. This corresponds to the moment when the deflagration of the gunpowder was initiated, and the gases reach the piezoelectric transducer slot located at 53 mm from the rear side of the barrel. Figure 2(b) shows the quality of the cut-cell mesh developed, the hole required for the piezoelectric transducer, and the first barrel grooves with the seal, which is instantaneously formed with the cylindrical part for the FMJ bullet.

2.3 Experimental Analysis

The prototypes of the 7.62 mm caseless-coreless ammunitions were manufactured mixing a charge of 2.90 g of double base gunpowder with the binder, moulded into the case shape with the dimensions of a standard ammunition and assembled with the coreless bullet. After that, these were dried in a convection oven at 333.15 °K for 5 h and then the primer of lead styphnate was placed. The coreless bullet is produced in 90/10 brass with a thickness greater than conventional bullets in order to maintain better stability during its flight path. Figure 3 shows the ammunition prototype and the 7.62 mm x 51 mm FMJ ammunition.

Ballistics tests were conducted for 7.62 mm x 51 mm FMJ ammunition under specific international standard²¹. For the experiment of the 7.62 mm caseless-coreless prototype ammunitions, the piston and the firing pin holder were modified to create a hermetic chamber. In both cases, pressure and

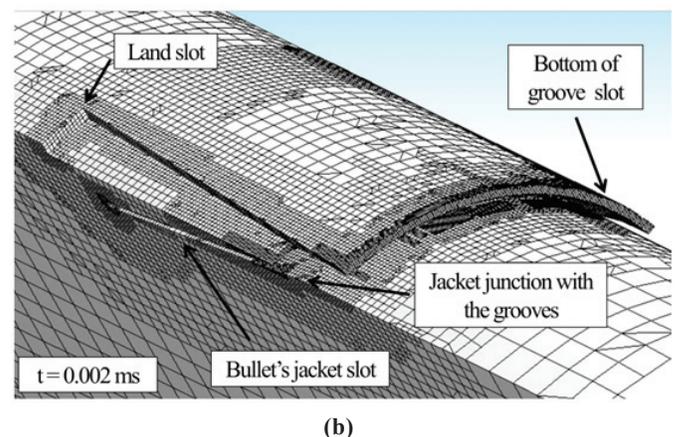
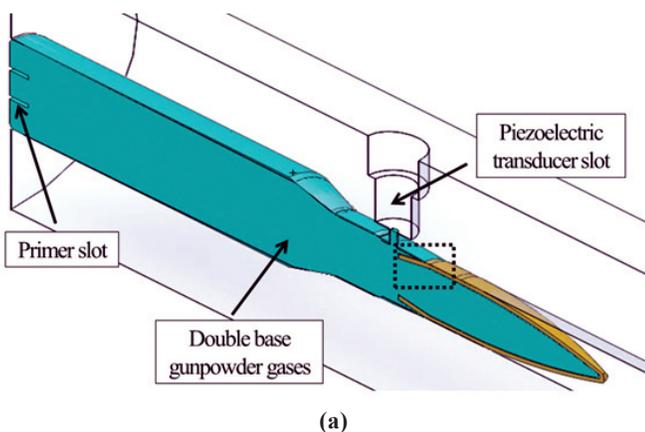


Figure 1. Model of 7.62 mm sealed test barrel chamber (a) with 7.62 mm caseless-coreless ammunition, and (b) close view of the jacket coreless bullet contacting with the grooves.

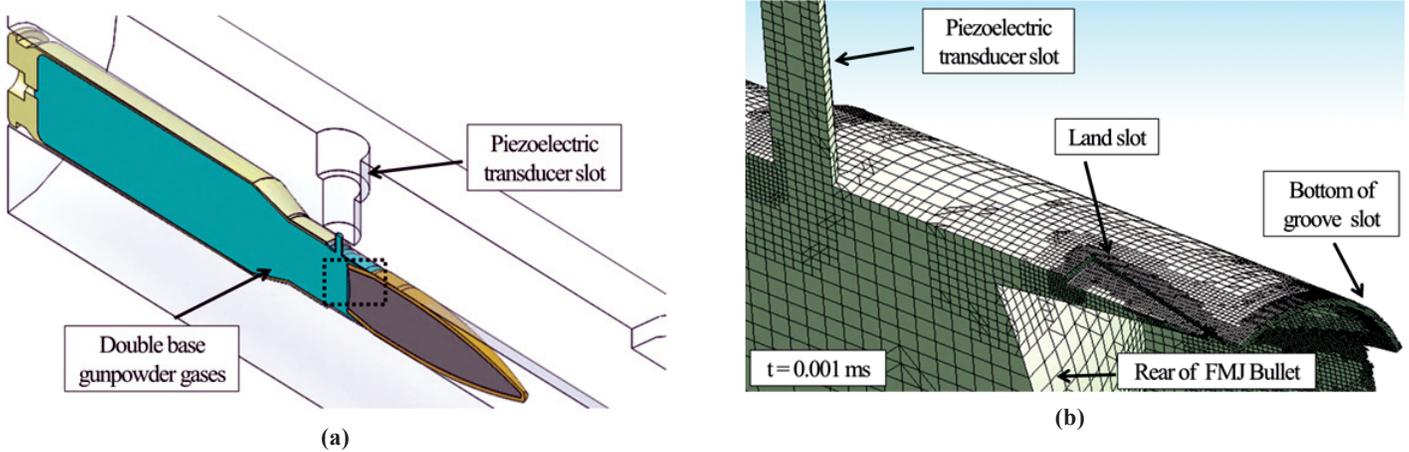


Figure 2. Model of the 7.62 mm test barrel chamber : (a) with FMJ ammunition, and (b) close view of the developed cut-cell mesh.



Figure 3. Ammunitions 7.62 x 51 mm FMJ and 7.62 mm caseless-coreless prototype.

velocity measurements were carried out in 5 series of 10 shots, using a ballistic chronograph and a piezoelectric transducer installed in the chamber of the barrel, as shown in Fig. 4.

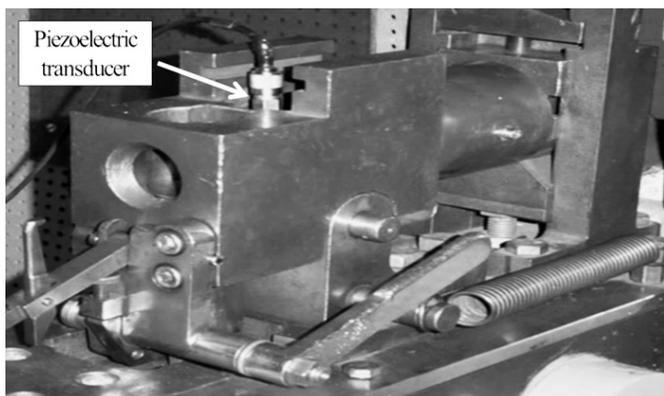


Figure 4. Testing bench with a 7.62 mm x 51 mm barrel.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The maximum pressure values obtained are shown in Table 1. Pressure measurements were experimentally obtained with a piezoelectric transducer located in the chamber of the barrel. The same volume occupied by the transducer

was included in the FEM model. It was located at the same position to read the pressure value in the numerical analysis. A significant reduction in the maximum pressure of the proposed 7.62 mm ammunition compared to the standard ammunition is observed. That is because the coreless bullet having a lower weight, moves through a longer distance into the barrel. That happens at the beginning of the gunpowder deflagration. Because of that, the combustion chamber expands and the pressure decreases.

Table 1. Maximum pressure in the chamber

Test	7.62 mm caseless-coreless		7.62 x 51 mm FMJ	
	Pressure (MPa)	Time (ms)	Pressure (MPa)	Time (ms)
Numerical	107.66	0.60	272.49	0.27
Experimental	90.00	0.46	273.00	0.30

Table 2 shows the numerical and experimental velocity results for the 7.62 mm caseless-coreless ammunition. These were obtained with a ballistic chronograph that measures experimentally the velocity at an instrumental distance of 23.77 m according to international standards and calculates the velocity of the projectile at the muzzle.

Table 2. Results for 7.62 mm caseless-coreless ammunitions

Test	In the chamber		In the muzzle	
	Pressure (MPa)	Time (ms)	Velocity (m/s)	Time (ms)
Numerical	46.30	2.14	353.92	2.14
Experimental	37.50	2.00	345.00	2.00

The obtained results for the 7.62 mm caseless-coreless ammunition, shows a decrement in the velocity. It can be attributed to a reduction of the pressure in the chamber and the low bullet disinsertion force in comparison with the parameters of the 7.62 x 51 mm FMJ ammunitions, that are shown in Table 3. The 7.62 x 51 mm ammunition has a velocity of 829 m/s – 847 m/s to 23.77 m (ref. 21), so the variation between the experimental and numerical velocities in the muzzle is not

Table 3. Results for the 7.62 mm x 51 mm FMJ ammunitions

Test	In the chamber		In the muzzle	
	Pressure (MPa)	Time (ms)	Velocity (m/s)	Time (ms)
Numerical	31.37	1.40	876.65	1.40
Experimental	38.00	1.37	851.00	1.37

considered very wide, which is related to the similarity of their pressure curves.

The pressure distribution caused by the gunpowder deflagration of the 7.62 mm caseless-coreless ammunition is shown in Fig. 5. Pressure variations can be observed by the colour bands, showing that the inner of the bullet without core maintains the same pressure of the last part of the gun barrel. This corresponds to the volume of gases generated at 2.14 ms when the bullet leaves the muzzle barrel. A pressure value of 46.30 MPa in the piezoelectric sensor was obtained, which is close to the experimental value of 37.50 MPa as shown in Table 2.

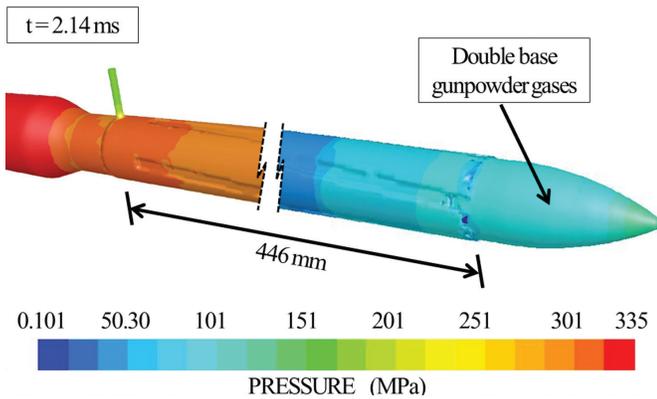


Figure 5. Pressure distribution for the 7.62 mm caseless-coreless ammunition shot.

Figure 6 shows the pressure distribution obtained from the stationary system for the shot of the 7.62 mm x 51 mm FMJ ammunition at 1.40 ms. This model corresponds to the internal volume of the barrel. The interior walls and the piezoelectric transducer slot can be observed. The right end includes the geometry formed in the junction of the groove (see Fig. 2) and the bullet's cylinder. Thus, the outlet of the flow gases in this stationary system goes through the bottom of the grooves.

A pressure of 31.37 MPa in the piezoelectric sensor was detected. That matches with the value of 38.00 MPa of the experimental test (shown in Table 3). On the muzzle barrel, the numerical pressure was measured in the bottom side of the grooves, with magnitudes from 10.8 MPa to 92.7 MPa. These correspond to the instant when the bullet leaves the barrel, which cannot be experimentally measured at this location.

A comparison of the pressure curves between the experimental and numerical results for both ammunitions is shown in Fig. 7. The numerical pressure curves were plotted using the results of 10 progressive steady systems and considering smooth lines. When these are compared with experimental curves, these have some variations in their shapes. This is more remarkable in the initial part of the

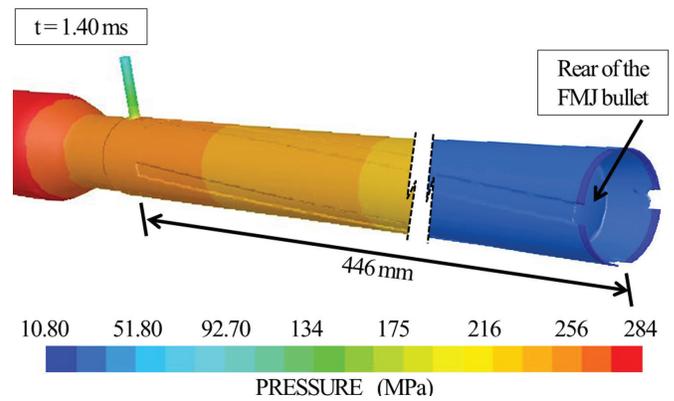


Figure 6. Pressure distribution for the 7.62 mm x 51 mm FMJ ammunition shot.

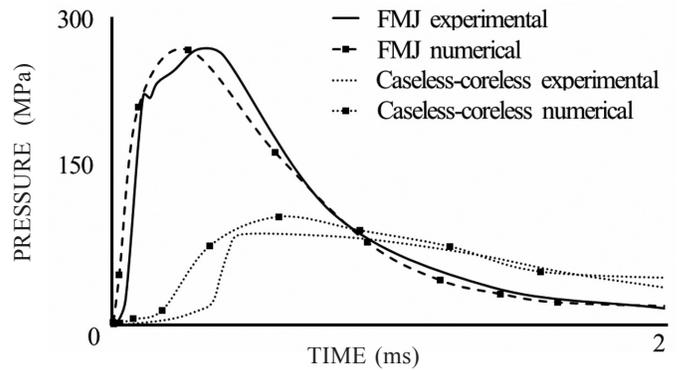


Figure 7. Pressure curves of 7.62 mm caseless-coreless and 7.62 mm x 51 mm FMJ ammunitions.

pressure curves for the caseless-coreless ammunition, because the first portion of the graph corresponds to the ignition of the primer and the beginning of the gunpowder deflagration which has a discontinuous behaviour. However, the curves show a progressive form due to the expansion of the chamber combustion. The 7.62 mm x 51 mm FMJ ammunition has a maximum pressure of 270 MPa, and a digressive curve with a continuous decreasing pressure. The 7.62 mm caseless-coreless ammunition has a reduction of its maximum pressure of 90 MPa. This causes a reduction in the resulting velocity and shot range, but remains effective at a distance of 50 m.

4. CONCLUSIONS

The internal ballistics of the new designed 7.62 mm caseless-coreless ammunition was carried. Numerical and experimental analyses were conducted on a proposed caseless-coreless prototype ammunition and on a standardised 7.62 mm x 51 mm FMJ ammunition. The shot of the proposed ammunition generates enough power to push the bullet and got similar ballistic parameters to those of the ones produced by the 9 mm x 19 mm FMJ ammunition. It was found that the proposed coreless bullets in caseless ammunition can be used in new weapons intended for short-range combat in urban operations. These can replace commonly used weapons, such as the submachine guns like the 5.7 mm x 28 mm and 9 mm x 19 mm calibres by having the advantage of greater lethality due the aerodynamic shape and size of the 7.62 mm calibre.

The volume of fire can also be increased by the reduction of the weight. Also there is a reduction of the production costs because these ammunitions no longer require a metal case of 70/30 brass.

REFERENCES

- Chen, J.Y. & Frederick, D. Effects of differential diffusion on predicted autoignition delay times inspired by H_2/N_2 jet flames in a vitiated coflow using the linear eddy model. *Flow Turbul. Combust.*, 2014, **93**, 283–304. doi: 10.1007/s10494-014-9547-3
- Martin, H.T.; Boyer, E. & Kuo, K.K. Effect of initial temperature on the interior ballistics of a 120-mm mortar system. *J. Appl. Mech. T ASME*, 2013, **80**(3), 031408 1-11. doi: 10.1115/1.4023318
- Shekhar, H. Effect of temperature on mechanical properties of solid rocket propellants. *Def. Sci. J.*, 2011, **61**(6), 529-33. doi: 10.14429/dsj.61.774
- Micković, D.; Jaramaz, S.; Elek, P.; Jaramaz, D. & Micković, D. Determination of pressure profiles behind projectiles during interior ballistic cycle. *J. Appl. Mech. T ASME*, 2013, **80**(3), 031402 1-5. doi: 10.1115/1.4023312
- Jaramaz, S.; Micković, D. & Elek, P. Two-phase flows in gun barrel: theoretical and experimental studies. *Int. J. Multiphas. Flow*, 2011, **37**(5), 475–87. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.01.003
- Wright, Y.M.; Margari, O.; Boulouchos, K.; De Paola, G. & Mastorakos, E. Experiments and simulations of n-Heptane spray auto-ignition in a closed combustion chamber at diesel engine conditions. *Flow Turbul. Combust.*, 2010, **84**, 49–78. doi: 10.1007/s10494-009-9224-0
- Sung, H.G.; Jang, J.S. & Roh, T.S. Application of eulerian–lagrangian approach to gas–solid flows in interior ballistics. *J. Appl. Mech. T ASME*, 2013, **80**(3), 031407 1-8. doi: 10.1115/1.4023317
- Balabel, A.; Hegab, A.M.; Nasr, M. & El-Behery, S. Assessment of turbulence modeling for gas flow in two-dimensional convergent–divergent rocket nozzle. *Appl. Math. Model*, 2011, **35**, 3408-22. doi: 10.1016/j.apm.2011.01.013
- El-Askary, W.A.; Balabel, A.; El-Behery, S.M. & Hegab, A. Computations of a compressible turbulent flow in a rocket motor-chamber configuration with symmetric and asymmetric injection. *J. Comput. Model Eng. Sci.*, 2011, **82**(1), 29-54.
- Gorji, S.; Seddighi, M.; Ariyaratne, C.; Vardy, A.E.; O'Donoghue, T.; Pokrajac, D. & He, S. Comparative study of turbulence models in a transient channel flow. *Comput. Fluids*, 2014, **89**, 111-23. doi: 10.1016/j.compfluid.2013.10.037
- Bravo, L.; Voegelé, A. & Trouvé, A. Direct numerical simulation of near-wall combustion in a momentum-driven turbulent boundary layer flow. *In 8th U.S. National Combustion Meet*, University of Utah, Utah, USA, 2013.
- Babkovskaia, N.; Haugen, N.E.L. & Brandenburg, A. A high-order public domain code for direct numerical simulations of turbulent combustion. *J. Comput. Phys.*, 2011, **230**(1), 1-12. doi: 10.1016/j.jcp.2010.08.028
- Di Mare, F.; Knappstein, R. & Baumann, M. Application of LES-quality criteria to internal combustion engine flows. *Computational Fluids*, 2014, **89**, 200-13. doi: 10.1016/j.compfluid.2013.11.003
- Jung, S.Y. & Chung, Y.M. Large-eddy simulation of accelerated turbulent flow in a circular pipe. *Int. J. Heat Fluid Fl.*, 2012, **33**, 1-8. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2011.11.005
- Konopka, M.; Meinke, M. & Schröder, W. Large-eddy simulation of supersonic film cooling at finite pressure gradients. *High Perform. Comput. Sci. Eng.*, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-23869-7_26
- Mathew, J. Large Eddy simulation. *Def. Sci. J.*, 2010, **60**(6), 598-605. doi: 10.14429/dsj.60.602
- Tu, J.; Yeoh, G. & Liu, C. Computational fluid dynamics a practical approach. Elsevier, United Kingdom, 2013.
- McGregor, I.A. Telescoped ammunition: A future lightweight compact ammunition? *Can. Army J.*, 2009, **12**(2), 75–81.
- Yang, W.; Li, Y. & Ying, S. Burning characteristics of microcellular combustible objects. *Defence Technology*, 2014. doi: 10.1016/j.dt.2014.03.003
- Hegab, A.M.; Sait, H.H.; Hussain, A. & Said, A.S. Numerical modeling for the combustion of simulated solid rocket motor propellant. *Computational Fluids*, 2014, **89**, 29-37. doi: 10.1016/j.compfluid.2013.10.029
- United States Department of Defense. Cartridge, 7.62 mm: NATO, Ball-M80. MIL-DTL-46931, Picatinny Arsenal, USA. 2010.
- ANSYS Release 14.0. ANSYS Fluent theory guide. ANSYS Inc., Canonsburg, P.A. 15317, USA, 2011. pp. 204–206.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Mexican government, the Instituto Politécnico Nacional (SIP-20121014 and SIP-20130729) and the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

CONTRIBUTORS

Mr U.S. Silva Rivera conducted ballistics tests and analysed the results; also he developed the caseless-coreless ammunition and contributed in the numerical simulations performed.

Dr J.M. Sandoval Pineda defined boundary conditions of numerical analysis, developed the hermetic chamber of the barrel test and participated in the ballistic tests.

Dr O.Susarrey Huerta analysed the materials used in the caseless-coreless ammunition, defined the governing equations and he helped in the interpretation of results.

Dr L.A. Flores Herrera modelled the numerical system used for caseless-coreless ammunition, validating the system with 7.62 x 51 mm FMJ ammunition; also participated in determining the equations that govern the system.

Dr P.A. Tamayo Meza participated in the analysis of the heat capacity of propellant used in the caseless-coreless ammunition and contributed in the analysis of results.

