



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
UNIDAD ZACATENCO

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE LA PALANCA
DE ARMAR DE UN FUSIL DE ASALTO
MEDIANTE EL USO DE
TECNOLOGÍA DE POLVOS**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
CON ESPECIALIDAD EN
DISEÑO MECÁNICO
P R E S E N T A:

ING. ESIQUIO MARTIN GUTIERREZ ARMENTA

DIRIGIDA POR:

DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA
DRA. BEATRIZ ROMERO ÁNGELES



MÉXICO, ENERO 2016

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

A Dios

Por la oportunidad que me brindó al darme la vida. Por haberme permitido llegar hasta este punto y dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis abuelos

Esiquio Gutiérrez Tavera (Q.E.P.D.) y Minerva Villegas Uribe (Q.E.P.D.) que ya no están conmigo pero siempre estarán plasmados en mis recuerdos gracias por el amor infinito que me brindaron por los cuidados que me dieron los quiero mucho es doloroso que ellos nos vean nacer y crecer y nosotros verlos envejecer y morir.

María Rocha Rodríguez y Ángel Armenta Martínez que me han ayudado cuando tengo algún problema que tengo y enseñado a ser una mejor persona y siempre estaré agradecido con ellos.

A mis padres,

Marco Antonio Gutiérrez Villegas por estar siempre en los momentos importantes de mi vida, por ser el ejemplo para salir adelante y por los consejos que han sido de gran ayuda para mi vida y crecimiento. Esta tesis es el resultado de lo que me has enseñado en la vida, ya que siempre has sido una persona honesta, entregada a tu trabajo y un gran líder, pero más que todo eso, una gran persona que siempre ha podido salir adelante y ser triunfador siempre tratando de ayudar a todas las personas por ello quisiera ser como tú. Es por ello que hoy te dedico este trabajo de tesis. Gracias por confiar en mí y darme la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida.

Margarita Armenta Rocha que con la sabiduría de Dios me has enseñado a ser quien soy hoy. Gracias por tu paciencia, por enseñarme el camino de la vida, gracias por tus consejos, por el amor que me has dado y por tu apoyo incondicional en mi vida. Gracias por llevarme en tus oraciones porque estoy seguro que siempre lo haces por ser la amiga y compañera que me ha ayudado a crecer, gracias por estar siempre conmigo en todo momento. Gracias por la paciencia que has tenido para enseñarme, por el amor que me das, por tus cuidados en el tiempo que hemos vivido juntos, por los regaños que me merecía y que no entendía. Gracias Mamá por estar al pendiente durante toda esta etapa.

Ellos quienes me infundieron la ética y el rigor que guían mi transitar por la vida y enseñarme el nunca darme por vencido.

A mis hermanas

Por confiar en mí a Minerva del Mar Gutiérrez Armenta por ser el ejemplo de una hermana mayor y de la cual aprendí aciertos y de momentos difíciles, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor. A su marido Alane Eloy Zepeda Gómez una persona responsable y amigable que siempre está feliz síguele echando ganas

Belén de Jesús Gutiérrez Armenta que ha aprendido los valores forjados y la humildad inculcada por nuestros padres sigue adelante aun que los obstáculos sean difíciles tu siempre tendrás el apoyo de nosotros para poder afrontarlos.

Minerva Gutiérrez Villegas por su apoyo y cariño sabiendo que nunca hay que rendirnos.

A mis tíos y primos

Israel Issac Gutiérrez Villegas le doy gracias por siempre estarme apoyando y ayudando siempre está cuando lo necesito por darme el ejemplo de estar tranquilos. Angélica Armenta Rocha sin su apoyo no sé qué podríamos hacer, David Armenta Rocha, Ángel Armenta Rocha y Juana Armenta Rocha sin ellos estaría en un camino distinto gracias a ellos que me cuidan siempre que ando mal o me meto en problemas he aprendido mucho de ellos desde chico tratando de estar al cuidado de mis ojos muchas gracias

Miguel Ángel Raigoza Gutiérrez un primo que cambio mucho y me ayuda siempre con mis otros primos que vivimos mucho tiempo juntos y somos como hermanos dando la espalda no se van los problemas ni la impaciencia resuelve los sufrimientos y a pesar de los problemas familia es familia

A las Escuelas e Instituciones

Escuela Primaria Martín Oyamburo, Secundaria 25 Fernando Montes de Oca, Vocacional 11 Wilfrido Massieu Pérez, ESIME Azcapotzalco y ESIME Zacatenco SEPI segundo piso. Siempre serán mis casas y los maestros mis segundos padres que nunca me han faltado al respeto al contrario me forjaron a seguir y tener el temple para cualquier obstáculo que tenga enfrente. CONACYT por la beca para seguir continuando con mis estudios.

A mis amigos

Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y de parrandas que hasta ahora, seguimos siendo amigos: Luis Antonio Salazar Gómez, Oliver Boyas Salazar, Mario Antonio Hernández Morales, Alan Arvizu, Arturo Franco Gonzales, Rosa Alicia Hernández Vázquez, Velásquez Flores Diego, Luis Enrique Gutiérrez Soberanes, Pedro Arturo Vela Esparza, Iván Yusselh López Vitorin, Carlos Augusto Contreras Flores, Alejandro Aguilera Peñaloza, Rodolfo Cureño García, David Chávez, Alejandro Sánchez, Carlos Alberto Felisardo Hernández, José Ángel Avelar Juárez, Fernando Curiel Domínguez, Carlos Ruiz, Francisco Efraín Navarro Uribe, Pablo Lepe Hernández, Francisco Acosta García, Luis Antonio Aguilar, José Luis Nava, Daniel Flores Sánchez y a todos los del área de posgrado de biomecánica que me ayudaron y apoyaron desde que los conocí por pasar a mi lado los momentos malos y felices de mi vida escolar son como mi familia y siempre estaré agradecido con ellos.

A mis Maestros

***Dr. Guillermo Urriolagoitia Sosa** por su gran apoyo, y tener la dicha de que sea mi director de tesis y que me motivo para seguir adelante siempre preocupado por el bienestar de sus alumnos y que siempre esta cuando lo necesite y siempre estuvo para contestar mis preguntas y dudas un gran amigo y una persona que le podría llamar padre con mucho respeto.*

***Dra. Beatriz Romero Ángeles** por su apoyo ofrecido en este trabajo ayudarme y motivarme a seguir luchando, por depositar su confianza en mí, no dejar las cosas a la mitad y por compartir sus conocimientos conmigo gracias.*

***Dr. Guillermo Manuel Urriolagoitia Calderón** gracias por el tiempo, apoyo y consejos brindados el honor de haber tenido clases con él, una persona excepcional quien medio las bases para continuar en la Maestría, él es como mi tercer padre.*

***Dr. Luis Héctor Hernández Gómez** es una persona que me enseñó a ver más allá del porqué de las cosas y que me puso a estudiar por que las cosas no son tan fáciles como creemos, apoyándome cuando más necesitaba ayuda y siempre respondiendo por mi enseñándome a tener una disciplina de trabajo le doy las gracias y cuidados le tengo mucho respeto,*

***Dr. Víctor Fernando Verduzco Cedeño** me acompañó a lo largo de mi tesis mostrándome las cosas de distinta forma y con las bases para hacer esta tesis motivándome a seguir adelante teniendo la oportunidad de ver cosas como se hace el fusil, una gran persona y amigo.*

***Dr. José Ángel Ortega Herrera** le doy las gracias por enseñarme que no hay caminos ni atajos para poder llegar a un conocimiento, a que las cosas no son tan sencillas y hacer que cursara el curso propedéutico así conseguí tener más madurez y poder entregar mis cosas a tiempo considerado también como mi familia gracias por sus consejos y conocimientos una gran persona.*

***Dr. Carlos Torres** por su amistad y amabilidad, el tiempo que me apoyo, es un doctor de gran nivel.*

GRACIAS A TODOS

RESUMEN

El Programa Sectorial de Defensa Nacional (2013 – 2018) destaca la investigación científica, la innovación y el desarrollo tecnológico, que tendrán como objetivo, renovar al Ejército y Fuerza Aérea con la meta de fabricar 121,000 fusiles automáticos FX-05. De tal manera que así surge la necesidad de diseñar y fabricar armamento con nuevos métodos. Por lo que el objetivo de esta tesis es el diseño y construcción de la palanca del fusil FX-05 de asalto realizando un análisis numérico estático con el Método de Elemento Finito (*MEF*) y por el proceso de metalurgia de polvos, empleando el proceso de compactación en frío y sintetizado en un horno con atmosfera controlada seguido de un proceso de fosfatado para así reforzar el material por efectos de la corrosión.

Para el desarrollo y producción de esta palanca es necesario considerar en el diseño entre otros los aspectos técnicos y militares: la reducción de costos en la fabricación, el incremento de la demanda de sustituir fusiles anteriores y depender de piezas y municiones de otros países ya que esto genera un costo. Además de una serie de problemas que se ubican en la palanca de armar que son un factor importante en el uso al accionar del fusil entre los que se encuentran: La resistencia mecánica del material, la resistencia a la corrosión, al desgaste, a la fricción, la seguridad, el peso, el tamaño, la rigidez el acabado superficial y su mantenimiento.

Por lo que en la presente investigación se aplican las teorías de falla y el concepto de concentración de esfuerzos, en la que palanca se ve sometida a un análisis de esfuerzos y se determina el efecto de estos en la geometría de la pieza con el fin de determinar si las propiedades mecánicas de la pieza son óptimas para el uso en el fusil.

El Método de los Elementos Finitos (*FEM*) utilizado para realizar la simulación numérica se basa en la asignación de un cuerpo continuo en un modelo de aproximación discreta. En lo referente a su fabricación la tecnología de polvos y el proceso de sinterización, permite una mayor resistencia al desgaste y un menor costo de fabricación. Acerca de la corrosión el proceso de recubrimiento de fosfato de manganeso (tratamiento que utiliza sal de manganeso, ácido fosfórico y un acelerador) aplicado a altas temperaturas puede llegar a prevenirlas.

ABSTRACT

The program (2013-2018) of the SEDENA highlights scientific research, innovation and technological development, which will have objective, renew the army and air force with the goal of manufacturing 121 000 automatic rifles *FX-05*. In such a way so it is necessary to design and manufacture weaponry with new methods. So the aim of this thesis is the design and construction of the lever of the *FX-05* assault rifle by performing performing an analysis method of finite element (*FEM*) and manufacturing it by powder metallurgy process, using the compaction process cold and synthesized.

For the development and production of this lever is necessary to consider in the design including the technical and military aspects: reducing costs in manufacturing, increased demand for replacing former guns and rely on parts and ammunition from other countries since this generates a cost. In addition to a series of problems that are located in the cocking lever that are an important factor in use when the rifle among them which are: the mechanical resistance of the material, the resistance to corrosion, wear, friction, safety, weight, size, stiffness surface finish and its maintenance.

By what in this research applies the theories of failure and the concept of stress concentration, in which lever is subjected to a stress analysis and determines the effect of these on the geometry of the workpiece in order to determine if the mechanical properties of the workpiece are optimal for use in the rifle.

The finite elements method (*FEM*) used to perform the numerical simulation is based on the allocation of a continuous body in a discrete approximation model. In relation to its manufacture powder technology and sintering process, allows a greater resistance to wear and lower manufacturing costs. About the corrosion process of coating of monocalcium phosphate (treatment that uses salt of manganese, phosphoric acid and a throttle) applied to high temperatures can be reached to prevent them.

OBJETIVO

El objetivo general se enfoca en fabricar la palanca del fusil de asalto por el proceso de metalurgia de polvos utilizando compactado en frío y posteriormente el proceso de sinterizado para obtener un acero grado herramienta CPM® 10V (AISI A11) para llegar a este objetivo se propone los siguientes objetivos particulares para lograr el objetivo se proponen los siguientes objetivos particulares:

- Determinación experimental del trabajo y fuerzas a las que se encuentra sometida la palanca de armar.
- Selección y caracterización del material para su fabricación.
- Simulación mecánica de la palanca con análisis numérico estático de las condiciones reales de trabajo a las que se encuentra sometida la palanca por la combustión del disparo, aplicando el método de elemento finito.
- Establecer el proceso de fabricación de la pieza hasta producto final.

JUSTIFICACIÓN

México ha dependido tecnológicamente de otros países durante décadas; debido al Tratado de Bucareli, firmado en 1923, fue un acuerdo entre los países de México y Estados Unidos. Llamado por los enemigos de Obregón, sin aparecer en el documento se le prohibía a nuestro país desarrollar tecnología propia, en relación a la fabricación de armamento. Alemania ha sido uno de los países, principales del que México ha recibido y comprado la concesión para ensamblar, reparar manufacturar partes de ella, por lo que cada vez que se requiere algún material, herramientas procesos o maquinaria, es necesario recurrir al citado país, lo que origina una pérdida de grandes recursos económicos y una dependencia tecnológica obligada.

La Industria Militar continúa en una etapa de innovación, para lo cual está desarrollando diferentes proyectos tecnológicos, dentro de los cuales contempla el diseño y fabricación de armamento con tecnología y diseño propios, auxiliándose de las herramientas de producción necesarias para lograr tal fin

Dentro de este contexto la Industria Militar requiere la producción de 20,000 fusiles o armas individuales por año para la realización de operaciones de alto impacto en zonas urbanas. El armamento consta de varios sub-ensambles, mismos que se componen de piezas que por su complejidad ocasionan que el proceso de fabricación de cada fusil sea muy largo y costoso.

Actualmente el costo y tiempo de fabricación es elevado, debido a la dependencia tecnológica de los herramientas y dispositivos con que son fabricadas las partes que lo componen, siendo la fabricación de cañones un proceso económicamente, funcionalmente y delicado en la producción del armamento, en virtud de que su calidad depende de la correcta aplicación de las herramientas utilizadas durante el proceso de fabricación.

Al aplicar las técnicas de diseño, análisis de esfuerzos, conformado por sinterizado de polvos para la fabricación de la palanca se proyecta la reducción de costos de producción en un 80% en el concepto de costo por palanca y 50% en el tiempo de fabricación de las mismas. Asimismo, se garantizará la repetitividad de la operación.

ÍNDICE

	PÁGINA
Resumen	i
Abstract	ii
Objetivo	iii
Justificación	iv
Índice	vi
Índice de Figuras	xi
Índice de Tablas	xiv
Simbología	xv
Introducción	xvii
Capítulo I Estado del Arte	
I.1.- Generalidades	2
I.2.- Introducción sobre la Pulvimetalurgia	6
I.3.- Inicios de la Pulvimetalurgia	9
I.3.1.- Otros desarrollos	13
I.3.2.- La evolución del mercado	15
I.3.3.- La evolución de la pulvimetalurgia en la postguerra	19
I.4.- Acontecimientos recientes	21
I.5.- La obra principal de la Pulvimetalurgia en la literatura	23
I.6.- Planteamiento del problema	23
I.7.- Sumario	24
I.8.- Referencias	24
Capítulo II Marco teórico de la metalurgia de polvos	
II.1.- Metalurgia de polvos	29
II.1.1.- Definición	29
II.2.- Descripción de las etapas que constituyen a la metalurgia de polvos	29
II.2.1.- Métodos de obtención de polvos metálicos	30

	PÁGINA
II.2.2.- Molienda mecánica	33
II.2.3.- Molienda por impacto mecánico	33
II.2.4.- Clasificación y mezclado de polvos	35
II.2.5.- Tamizado	35
II.2.6.- Series de tamices o cribas	36
II.2.6.1.- Mezclado	37
II.2.6.2.- Compactación de polvos	37
II.7.- Proceso de sinterización	39
II.7.1.- El conformado pulvimetalúrgico	40
II.8.- Fundamentos teóricos del sinterizado	41
II.8.1.- Estado inicial	45
II.8.2.- Estado intermedio	47
II.8.3.- Etapa final	48
II.8.4.- Compactación previa en el sinterizado	49
II.8.5.- La pieza en verde	50
II.8.6.- Sinterizado de polvos mixtos	52
II.8.7.- Sinterización forzada	52
II.8.8.- Sinterizado con fase líquida	53
II.8.9.- Densificación	55
II.9.- Operaciones prácticas y sus efectos	55
II.10.- Técnicas de conformado en caliente	57
II.10.1.- Compactación isostática (HIP)	57
II.10.2.- Compactación pseudoisostática	58
II.11.- Aplicaciones	58
II.12.- Compactación de polvos	62
II.13.- Compactación en frío	63
II.14.- Compactación en caliente	64
II.15.- Ventajas y desventajas	66
II.16.- Sumario	68
II.17.- Referencias	68

	PÁGINA
Capítulo III Marco teórico de los fusiles	
III.1.- Generalidades	71
III.2.- Nomenclatura general de los fusiles de asalto	71
III.3.- Características generales de los fusiles de asalto	73
III.4.- Panorama internacional de los fusiles 5.56 mm	74
III.5.- Significado del término diseño	79
III.6.- Consideraciones de diseño	80
III.7.- Fases del diseño	80
III.8.- Análisis del problema	81
III.8.1.- Búsqueda de soluciones	82
III.9.- Teorías de falla	82
III.10.- Teoría de falla por esfuerzo cortante máximo	83
III.11.- Teoría de falla por energía de distorsión máxima	83
III.12.- Concentración de esfuerzos	84
III.12.1- Métodos de reducción de concentración de esfuerzos	86
III.13.- Sumario	88
III.14.- Referencias	89
Capítulo IV Análisis numérico de la palanca de asalto	
IV.1.- Generalidades	92
IV.2.- Introducción al Método de Elemento Finito	93
IV.2.1.- Método del Elemento Finito	94
IV.2.2.- Orígenes del Método del Elemento Finito	94
IV.2.3.- Metodología desarrollada para el análisis por el Método del Elemento Finito	96
IV.2.4.- Ventajas en el empleo del Método del Elemento Finito	97
IV.2.5.- Limitaciones en el empleo del Método del Elemento Finito	98
IV.2.6.- Metodología de la investigación	99
IV.2.7.- Diseño conceptual de la aplicación	99
IV.3.- Selección de la geometría para la palanca del fusil	100

	PÁGINA
IV.31 Análisis esfuerzos (magnitud y posición)	101
IV.4.- Principios del análisis de Elemento Finito	105
IV.5.- Herramientas computacionales	108
IV.6.- Geometría y discretización	109
IV.7.- Primer caso de estudio	110
IV.8.2.- Resultados generales del primer caso de estudio	112
IV.8.2.1.- Desplazamientos unitarios en X	112
IV.8.2.2.- Desplazamientos en unitarios en Y	113
IV.8.2.3.- Desplazamientos unitarios en Z	114
IV.8.2.4.- Suma del desplazamiento vectorial	115
IV.8.2.6.- Esfuerzos nominales en X	116
IV.8.2.7.- Esfuerzos nominales en Y	117
IV.8.2.8.- Esfuerzos nominales en Z	118
IV.8.2.9.- Esfuerzos cortante plano XY	119
IV.8.2.10.- Esfuerzos cortante plano YZ	119
IV.8.2.11.- Esfuerzos cortante plano XZ	120
IV.8.2.11.- Primeros esfuerzos principales	121
IV.8.2.12.- Segundos esfuerzos principales	122
IV.8.2.13.- Terceros esfuerzos principales	123
IV.8.2.14.- Factor de intensidad de esfuerzos	123
IV.8.2.15.- Esfuerzos von Mises	124
V.9.- Segundo caso de estudio Análisis elastoplástico de la palanca de armar	124
V.9.1.- Propiedades a utilizar	125
V.9.2.1.- Desplazamiento unitario en X	126
V.10.2.2.- Desplazamiento unitario en Y	127
IV.10.2.3.- Desplazamiento unitario en Z	127
IV.10.2.4.- Suma del desplazamiento vectorial	128
IV.10.2.5.- Esfuerzos nominales en X	128
IV.10.2.6.- Esfuerzos nominales en Y	129
IV.10.2.9.- Segundos esfuerzos principales	130

	PÁGINA
IV.10.2.10.- Terceros esfuerzos principales	131
IV.10.2.11.- Factor de intensidad de esfuerzos	131
IV.10.2.12.- Esfuerzos von Mises	132
IV.10.3.- segundo paso descarga	132
IV.10.4.- tercer paso descarga	133
IV.10.4.1.- Desplazamiento unitario en X	133
IV.10.4.2.- Desplazamiento unitario en Y	133
IV.10.4.3.- Desplazamiento unitario en Z	134
IV.10.4.4.- Suma del desplazamiento vectorial	134
IV.10.4.5.- Esfuerzos nominales en X	135
IV.10.4.6.- Esfuerzos nominales en Y	135
IV.10.4.7.- Esfuerzos nominales en Z	136
IV.10.4.9.- Segundos esfuerzos principales	136
IV.10.4.11.- Factor de intensidad de esfuerzos	137
IV.10.4.10.- Terceros esfuerzos principales	137
IV.10.4.11.- Factor de intensidad de esfuerzos	138
IV.10.4.12.- Esfuerzos von Mises	138
IV.10.5.-Cuarto paso	139
IV.10.5.- Esfuerzos nominales en X	139
IV.10.5.1.- Esfuerzos nominales en Y	139
IV.10.5.2.- Esfuerzos nominales en Z	140
IV.10.5.3.- Primeros esfuerzos principales	140
IV.10.5.4.- Segundos esfuerzos principales	141
IV.10.5.5.- Terceros esfuerzos principales	141
IV.10.5.6.- Factor de intensidad de esfuerzos	142
IV.10.5.7.- Esfuerzos von Mises	142
IV.11.- Sumario	143
IV.12. - Referencias	143

V.- Fabricación de la palanca del fusil de asalto

Diseño y análisis de la palanca de armar de un fusil de asalto
mediante el uso de tecnología de polvos

	PÁGINA
V.1.- Generalidades	146
V.2.- Selección de polvos pulvimetalúrgico CPM10V®	147
V.3.-Mezclado	148
V.4.-Compactacion en frio	150
V.5.-Proceso de sinterización	151
V.6.-Moletiado de la pieza	154
V.7.- Recubrimiento de Fosfato de manganeso	154
V.8- Costos de producción	156
V.9.- Pruebas de funcionamiento	157
V.10.- Sumario	157
V.11. - Referencias	158
Conclusiones	160
Trabajos futuros	162
Glosario	163
Anexos	
Anexo 1 Programa numérico del análisis palanca	165
Anexo 2 Piezas del grupo de cierre completo	166
Anexo 3 Manual de CPM10V	167
Anexo 4 Dimensiones de la panca y tolerancias	168
Anexo 5 Participación en congresos	169

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Capítulo I Estado del arte	
Figura I.1.- La teoría del <i>Big Bang</i> sobre el origen del Universo	2
Figura I.2.- La materia es impulsada en todas las direcciones	3
Figura I.3.- Creación del Sistema Solar	4
Figura I.4.- Planetas del Sistema Solar a escala	5
Figura I.5.- Primeros utensilios y armas con metal	8
Figura I.6.- Trabajos de metalurgia en frío en la India	9
Figura I.5.- Simple prensa de palanca utilizado por <i>Wollaston</i> para hacer polveras de Platino	12
Capítulo II Marco teórico de la metalurgia de polvos	
Figura II.1.- Diagrama de etapas del proceso pulvimetalúrgico	30
Figura II.2.- Etapas básicas del proceso de pulvimetalurgia	31
Figura II.3.- Molino de bolas [II.2]	33
Figura II.4.- Disposición de cribas verticalmente	36
Figura II.5.- Microscopia electrónica de polvos sinterizados de Níquel	42
Figura II.6.- Modelo de dos esferas en contacto	43
Figura II.7.- Transporte superficial y transporte en volumen	44
Figura II.8.- Poros cilíndricos ubicados en la frontera de los granos	47
Figura II.9.- Morfología de las partículas al final del proceso de sinterizado	48
Figura II.10.- Estructura sólido-líquido	54
Figura II.11.- Recipiente con atmosfera controlada	57
Figura II.12.- Engranaje hecho por sinterización	60
Figura II.13.- Cuchillo realizado en tres capas	60
Figura II.14.- Piezas de precisión elaboradas mediante procesos pulvimetalúrgicos	61
Figura II.15.- Etapas de la compactación	63
Figura II.16.-Proceso de compactación en caliente	65

	PÁGINA
Capítulo III Marco teórico de los fusiles	
Figura III.1.- Fusil de asalto 2009	71
Figura III.2.- Esquema de funcionamiento por toma de gases	77
Figura III.3 Palanca de armar	80
Figura III.4.- Analogía de flujo de fluidos contra esfuerzos	86
Figura III.5.- Valor del factor de concentración de esfuerzos a tensión	87
Figura III.6.- Valor del factor de concentración de esfuerzos a flexión	88
Capitulo IV Análisis numérico de la palanca de asalto	
Figura IV.1.-Dios Huitzilopochtli	93
Figura IV.2 Ejemplos de Discretización	95
Figura IV.3.- Geometrías de la palanca de armar modeladas mediante CAD	100
Figura IV.4.- Plano de ingeniería del resorte de empuje	101
Figura IV.5.- Interior del fusil	102
Figura IV.6.- Resorte de empuje	102
Figura IV.7.- Cargando el fusil FX 05	103
Figura IV.8.- Ubicación de la aplicación de la fuerza sobre la pieza en el centro de masa	103
Figura IV.9.- Posición de la palanca en el mecanismo	105
Figura IV.10.- Desplazamiento que hace la palanca	105
Figura IV.11 Separación del domino en elementos	106
Figura IV.12 Formas de elementos	107
Figura IV.13.- Discretizado geometría tridimensional con respectiva numeración	107
Figura IV.14.- Componentes de esfuerzo normal y cortante en cara x del cubo	108
Figura IV.15.- Geometría de la palanca	110
Figura IV.16.- Discretización controlado del modelo	110
Figura IV.17.- Condiciones de frontera y carga	111
Figura IV.18.- Deformación en eje Z positivo y negativo	111
Figura IV.19.- Desplazamiento en el eje X en carga y descarga	112

	PÁGINA
Figura IV.20.- Desplazamiento en el eje Y en carga y descarga	113
Figura IV.21.- Desplazamiento en el eje Z en carga y descarga	114
Figura IV.22.- Suma vectorial del desplazamiento en carga y descarga	115
Figura IV.23.- Esfuerzos nominales en el eje X en carga y descarga	116
Figura IV.24.- Esfuerzos nominales en el eje Y en carga y descarga	117
Figura IV.25.- Esfuerzos nominales en el eje Z en carga y descarga	118
Figura IV.26.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en carga y descarga	119
Figura IV.27.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en carga y descarga	119
Figura IV.28.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en carga y descarga	120
Figura IV.29.- Primeros esfuerzos principales en carga y descarga	121
Figura IV.30.- Segundos esfuerzos principales en carga y descarga	122
Figura IV.31.- Terceros esfuerzos principales en carga y descarga	123
Figura IV.32.- Factor de intensidad de esfuerzos en carga y descarga	123
Figura IV.33.- Esfuerzos von Mises en carga y descarga	124
Figura IV.34.- Grafica de las propiedades mecánicas bilineales del acero CPM10V	125
Figura IV.35.-Condiciones de frontera y carga uniforme mente distribuida	126
Figura IV.36.-Desplazamiento en el eje X con carga distribuida	126
Figura IV.37.-Desplazamiento en el eje Y con carga uniformemente distribuida	127
Figura IV.38.-Desplazamiento en el eje Z con carga uniformemente distribuida	127
Figura IV.39.-Suma vectorial del desplazamiento en carga uniformemente distribuida	128
Figura IV.40.- Esfuerzos nominales en el eje X carga uniformemente distribuida	128
Figura IV.41.- Esfuerzos nominales en el eje Y en carga uniformemente distribuida	129
Figura IV.42.- Esfuerzos nominales en el eje Z carga uniformemente distribuida	129
Figura IV.43.- Primeros esfuerzos principales en carga uniformemente distribuida	130
Figura IV.44.- Segundos esfuerzos principales carga uniformemente distribuida	130
Figura IV.45.- Terceros esfuerzos principales carga uniformemente distribuida	131
Figura IV.46.- Factor de intensidad de esfuerzos carga uniformemente distribuida	131
Figura IV.47.- Esfuerzos von Mises carga uniformemente distribuida	132
Figura IV.48.-La pieza no pasa límite de cedencia	132

Figura IV.49.-Desplazamiento en el eje X con carga distribuida	133
Figura IV.50.-Desplazamiento en el eje Y con carga uniformemente distribuida	133
Figura IV.51.-Desplazamiento en el eje Z con carga uniformemente distribuida	134
Figura IV.52.-Suma vectorial del desplazamiento en carga	134
Figura IV.53.- Esfuerzos nominales en el eje X con carga uniformemente distribuida	135
Figura IV.54.- Esfuerzos nominales en el eje Y con carga uniformemente distribuida	135
Figura IV.55.- Esfuerzos nominales en el eje Z con carga uniformemente distribuida	136
Figura IV.56.- Primeros esfuerzos principales con carga uniformemente distribuida	136
Figura IV.57.- Segundos esfuerzos principales con carga uniformemente distribuida	137
Figura IV.58.- Terceros esfuerzos principales con carga uniformemente distribuida	137
Figura IV.59.- Factor de intensidad de esfuerzos con carga uniformemente distribuida	138
Figura IV.61.- Esfuerzos nominales en el eje X sin carga	139
Figura IV.62.- Esfuerzos nominales en el eje Y sin carga	139
Figura IV.63.- Esfuerzos nominales en el eje Z sin carga	140
Figura IV.64.- Primeros esfuerzos principales sin carga	140
Figura IV.65.- Segundos esfuerzos principales sin carga	141
Figura IV.66.- Terceros esfuerzos principales sin carga	141
Figura IV.67.- Factor de intensidad de esfuerzos sin carga	142
Figura IV.68.- Esfuerzos von Mises sin carga	142

Capítulo V Fabricación de la palanca del fusil de asalto

Figura V.1.-Fusil de asalto FX-05	146
Figura V.2.-Mezclador de polvo	149
Figura V.4.-Dado de compactación o Matriz	131
Figura V.5.-Compactacion de la pieza	151
Figura V.6.-Pieza en verde	152
Figura V.7.-a) ciclo típico de tratamiento térmico durante el sinterizado y b) sección transversal esquemática.	153
Figura V.8.-Calentamiento de las piezas y terminado	153
Figura V.9.-Torno C.N.C.	154

Figura V.10.-Moleteado	154
Figura V.11.-Fosfatado de la pieza	155
Figura V.12.-Horno por gases atmosfera controlada	155
Figura V.13.- Pieza terminada con recubrimiento de fosfatado	155

ÍNDICE DE TABLAS**PÁGINA****Capítulo I Estado del arte**

Tabla I.1.- Acontecimientos históricos importantes en la Metalurgia de Polvos	6
---	---

Capítulo II Marco teórico de la metalurgia de polvos

Tabla II.1.- Posibles formas de polvos y su descripción	32
Tabla II.2.- Parámetros del modelo de crecimiento del cuello	45
Tabla II.3.- Ventajas e inconvenientes del conformado pulvimetalúrgico frente a otros procesos	58
Tabla II.4.- Desventajas de la metalurgia de polvos	67
Tabla II.5.- Ventajas de la metalurgia de polvos	67

Capítulo III Marco teórico de los fusiles

Tabla III.1.- Conformación general del fusil de asalto	72
Tabla III.2.- Panorama internacional de los fusiles de asalto	74
Tabla III.3.- Panorama internacional de los fusiles de asalto 5.56 mm	78
Tabla III.4.- Criterios para aplicación del factor de concentración de esfuerzo	85

Capítulo IV Análisis numérico de la palanca de asalto

Tabla IV.1.- Perturbaciones en problemas ingenieriles	93
Tabla IV.2.- Características de la palanca	103
Tabla IV.3.-Propiedades Mecánicas del material CPM10V	109

Capítulo V Fabricación de la palanca del fusil de asalto

Tabla V.1.- Características del fusil CPM10V	127
--	-----

Tabla V.2.-Materia prima en polvos a utilizar	129
Tabla V.3.-Propiedades físicas de la aleación CPM10V	129
Tabla V.4 Costo unitario de producción del producto final	137

SIMBOLOGÍA

1D	Una dimensión, unidimensional
2D	Dos dimensiones, bidimensional
3D	Tres dimensiones, tridimensional
°C	Grados Centígrados
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y el Acero)
C.N.C.	Computer Numerical Control (Control Numérico Continuo)
CAD	Computer aided design (Diseño Asistido por Computadora)
CAM	Computer aided manufacturing (Manufactura asistida por computadora)
d	Diámetro
ε	Deformación
E	Módulo de elasticidad o de Young
F	Fuerza
FAL	Fusil Automatique Legére. (Fusil Automático Ligero)
HK	Heckler und Koch (Fabricante Alemán de Armamento)
K	Factor de concentración de esfuerzos.
KURTZ	Corto
m	metro
M	Momento
MEF	Método del Elemento Finito
mm	Milímetro
MPa	Mega pascal
ν	Relación de Poisson
N	Newton
OTAN	Organización de Tratado del Atlántico Norte
r	Radio menor
R	Radio mayor
σ	Esfuerzo.
σ_1	Esfuerzo en el eje X
σ_2	Esfuerzo en el eje Y
σ_3	Esfuerzo en el eje Z.

σ_{max}	Esfuerzo máximo
σ_y	Esfuerzo de cedencia
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedad Norteamericana de Ingenieros Automotores)
SMN	Esfuerzo mínimo.
SMX	Esfuerzo máximo
S_1	Esfuerzo principal 1
S_2	Esfuerzo principal 2
τ_{max} $_{abs}$	Esfuerzo cortante máximo absoluto
TTT	Tiempo – Temperatura – Transformación
x	Eje x.
y	Eje y

INTRODUCCIÓN

Durante nuestra historia cada guerra ha aportado grandes descubrimientos a la ciencia cabe resaltar que para poder introducirnos al mercado necesitamos un producto que este al nivel de la tecnología actual, es por ello que todo hace referencia a una mejora en lo que se tiene, así surge la necesidad de poder mejorar piezas de armamento incluso mecanismos completos por medio de estas nuevas tecnologías.

Uno de los mecanismos de interacción de un fusil con el usuario es la palanca de armar, misma que transmite la fuerza de accionamiento del usuario hacía del sistema de cierre, con el objeto de se introduzca el cartucho o munición en la recamara de disparo, e iniciar el ciclo de disparo tiro a tiro o en ráfaga. Otra función que realiza la palanca de armar es la de poder accionar el cierre hacia el frente o parte trasera del sistema en caso de que se presente el fenómeno de encasquillamiento durante el funcionamiento del fusil.

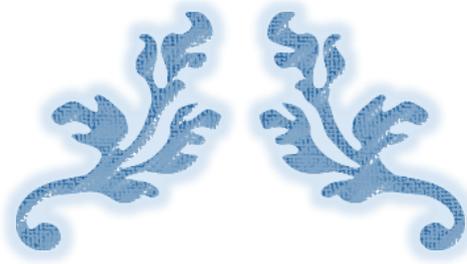
El concepto de funcionamiento y geometría que prevalece sobre el diseño de este tipo de componentes es su tamaño, peso y adaptabilidad de uso para personas diestras y no diestras.

Utilizando la tecnología de polvos se obtiene un mejoramiento en la palanca así como en el estudio numérico realizado por el método de elementos finitos que nos ayuda a comprender mejor las fuerzas que están actuando en la palanca.

Como estudio del estado del arte trata sobre la reseña de los antecedentes históricos de la metalurgia de polvos. El hombre tiene la necesidad de diseñar elementos de mecanismos robustos, funcionales y confiables. Aplicables al desarrollo, dependiendo del tiempo o a el tipo de época teniendo como referencia los polvos en el Universo y copiando los procesos de unión de materia, polvos y gases. Para así poder. Alcanzar avances científicos y tecnológicos que requieren de conceptos de Ingeniería, como; diseño de mecanismos, modelaje, simulación y procesamiento. Con el fin de determinar su comportamiento, mediante el análisis que justifique el desempeño de estos durante el funcionamiento y obtener criterios capaces de predecir el comportamiento de los sistemas involucrados.

Se realizó la compilación teórica sobre la descripción de las etapas que constituyen a la metalurgia de polvos, los distintos Métodos de obtención de polvos metálicos y una amplia descripción de proceso de sinterizado añadiendo las ventajas y desventajas. El uso de polvos metálicos continúa expandiéndose. Además, a medida que los conocimientos de esta materia aumentan, aparecen más aplicaciones para la pulvimetalurgia.

Se analizó ampliamente el funcionamiento de la palanca bajo condiciones de servicio para poder entender su comportamiento e importancia en el fusil. Se realizaron dos casos de estudio, el primer caso de estudio es carga y descarga simulando cuando se está disparando con una carga puntual posteriormente se realiza el análisis elastoplástico el cual se meten dos cargas diferentes primer paso una de 600 N segundo paso se descarga tercer paso se carga con 900 N para pasar el límite de cedencia y por último cuarto paso descargar a cero el análisis nos arroja que quedan esfuerzos. Se fabrica la pieza para obtener un producto final el cual satisface con los requerimientos necesarios para su utilización.



CAPÍTULO I

ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE



Los dos guerreros más importantes son la paciencia y el tiempo.-Leo Tolstoy

I.1.- Generalidades

La Tecnología de Polvos o Metalurgia de Polvos, ha dado oportunidades al desarrollo y aplicación de nuevos materiales. Se encuentra enfocado en auxiliar para la reducción de costos en los procesos de producción y la implementación del conocimiento de nuevos métodos. En los países de menor desarrollo, es vital estudiar e investigar en estos campos. Para estar en posibilidad de reducir la brecha que los separa de los países desarrollados. Para así, estar en posibilidad de adquirir, de la mejor manera posible, las nuevas tecnologías. La aplicación de nuevos materiales y procesos en general, tiene en la actualidad un sin número de aplicaciones. Donde el ser humano ha ido evolucionado a lo largo del tiempo gracias al desarrollo de su tecnología. Sin embargo, en algunas ocasiones el humano ha carecido de la capacidad para implementar mayores logros o avances tecnológicos.

Donde de manera genérica se puede decir que todo procede de la conjunción del polvo. Por ejemplo, si se considera el inicio del Universo según la teoría del *Big Bang* (Figura I.1), se puede concluir que fue un desarrollo a partir de polvos, ya que estos polvos posteriormente evolucionarían a la formación de galaxias, estrellas, planetas, etc. Inmediatamente después del momento de la esta gran explosión, cada partícula de materia comenzó a alejarse muy rápidamente una de otra (de la misma manera que al inflar un globo éste va ocupando más espacio expandiendo su superficie) [I.1]. Los Físicos teóricos han logrado reconstruir esta cronología de los hechos a partir de un 1/100 de segundo después del *Big Bang*.

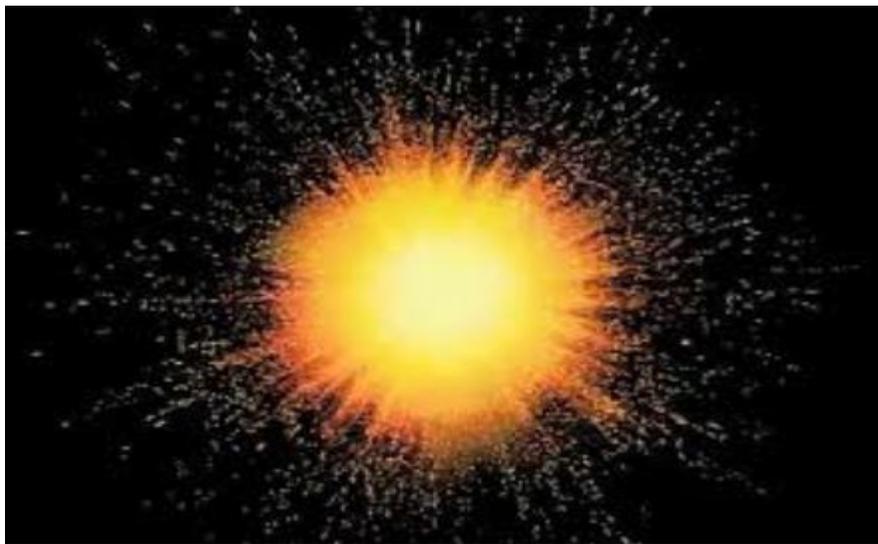


Figura I.1.- La teoría del *Big Bang* sobre el origen del Universo

Donde la teoría hipotética propone que la materia fue impulsada o lanzada en todas las direcciones por la explosión (Figura I.2). Primordial, se supone que lo que fue disparado estaba constituido exclusivamente por partículas elementales; Electrones, Positrones, Mesones, Bariones, Neutrinos, Fotones y un largo etcétera hasta más de 89 partículas conocidas hoy en día [I.2]. Los diversos elementos que hoy se observan se produjeron durante los primeros minutos después de la gran explosión (*Big Bang*), cuando la temperatura extremadamente alta y la densidad del Universo fusionaron partículas subatómicas en los elementos químicos que hoy se conocen [I.3].

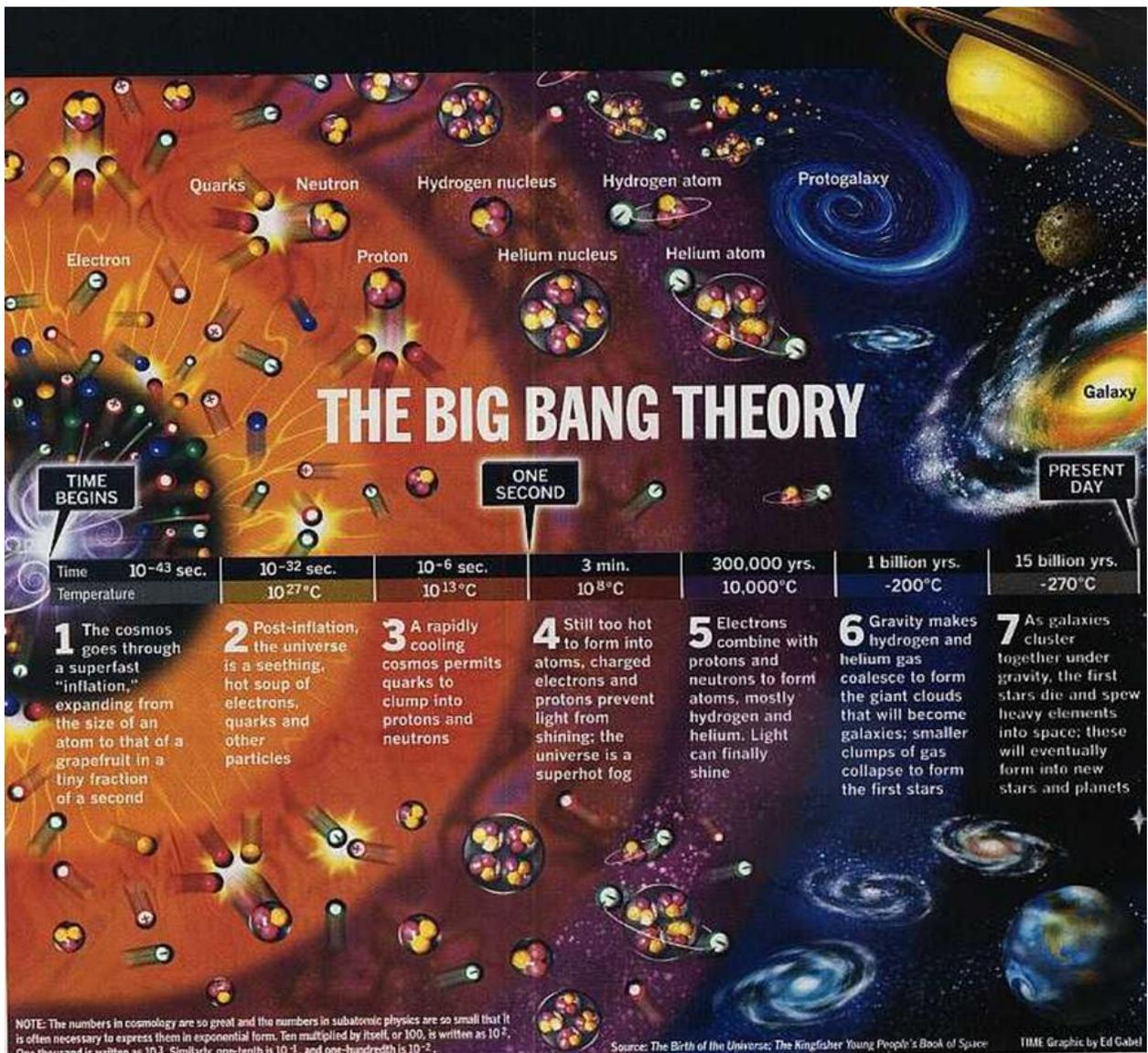


Figura I.2.- La materia es impulsada en todas las direcciones

Cálculos más recientes indican que el Hidrógeno y el Helio habrían sido los productos primarios del *Big Bang* y los elementos más pesados se produjeron más tarde dentro de las estrellas [I.3]. Sin embargo, la teoría de *Gamow* proporciona una base para la comprensión de los primeros estadios del Universo y su posterior evolución. A causa de su elevadísima densidad, la materia existente en los primeros momentos del Universo se expandió con rapidez. Al expandirse, el Helio y el Hidrógeno se enfriaron y se condensaron en estrellas y en galaxias [I.4]. Esto explica la expansión del Universo y la base física de la ley de *Hubble*. Según se expandía el Universo, la radiación residual del *Big Bang* continuó enfriándose, hasta llegar a una temperatura de unos 3 °K (-270 °C) [I.5].

En este sentido de ideas es difícil precisar el origen del Sistema Solar (Figura I.3). Sin embargo, los científicos creen que puede situarse hace unos 4 650 millones de años. Según la teoría de *Laplace*, una inmensa nube de gas y polvo se contrajo a causa de la fuerza de la gravedad y comenzó a girar a gran velocidad. Probablemente, debido a la explosión de una supernova cercana. La mayor parte de la materia se acumuló en el centro y la presión era tan elevada que los átomos comenzaron a partirse, liberando energía y formando una estrella. Al mismo tiempo se iban definiendo algunos remolinos que, al crecer, aumentaban su gravedad y recogían más materiales en cada vuelta. Así como se presentaban diversas y variadas colisiones [I.6].

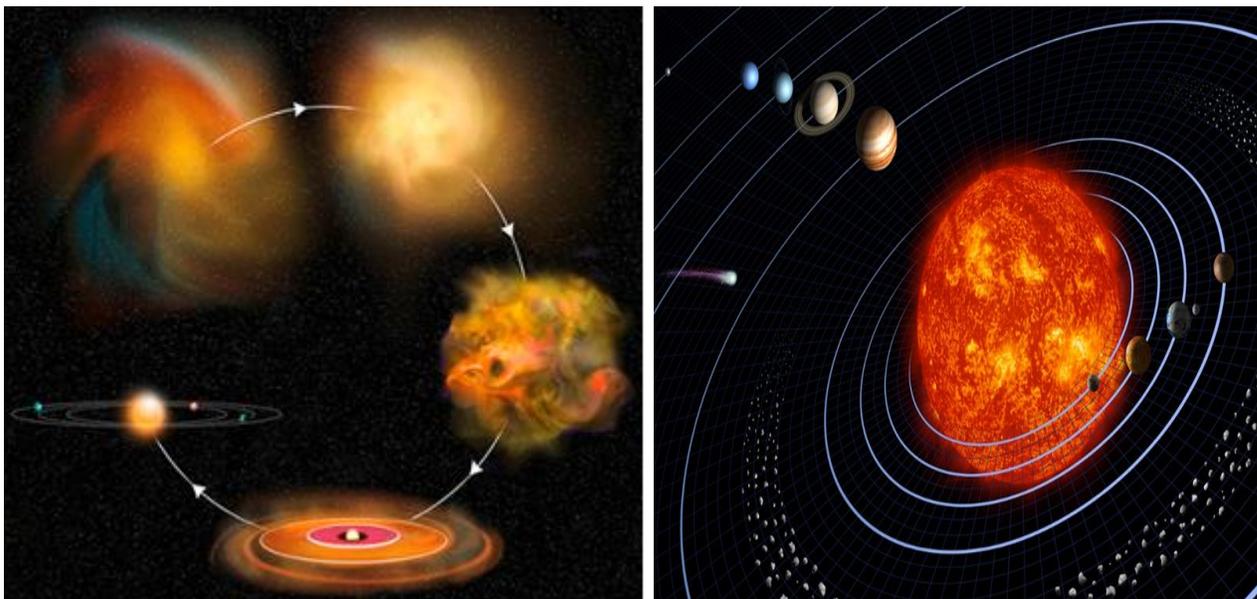


Figura I.3.- Creación del Sistema Solar

Millones de objetos se acercaban y se unían o chocaban con violencia y se partían en trozos. Los encuentros constructivos predominaron y en sólo 100 millones de años, adquirió un aspecto semejante al actual. Después cada cuerpo continuó su propia evolución [I.6].

Existen muchas y diversas teorías sobre la formación del Sistema Solar. La *Teoría de Acreción* asume que el Sol pasó a través de una densa nube interestelar y emergió rodeado de un envoltorio de polvo y gas [I.7]. Mientras que la *Teoría de los Protoplanetas* establece que inicialmente hubo una densa nube interestelar que formó un cúmulo. Las estrellas resultantes, por ser grandes, tenían bajas velocidades de rotación. En cambio, los planetas formados en la misma nube, tenían velocidades mayores cuando fueron capturados por las estrellas (incluido el Sol) [I.8]. La *Teoría de Captura* explica que el Sol interactuó con una *proto* estrella cercana, extrayendo materia de esta. La baja velocidad de rotación del Sol, se explica cómo debida a su formación anterior a la de los planetas [I.6].

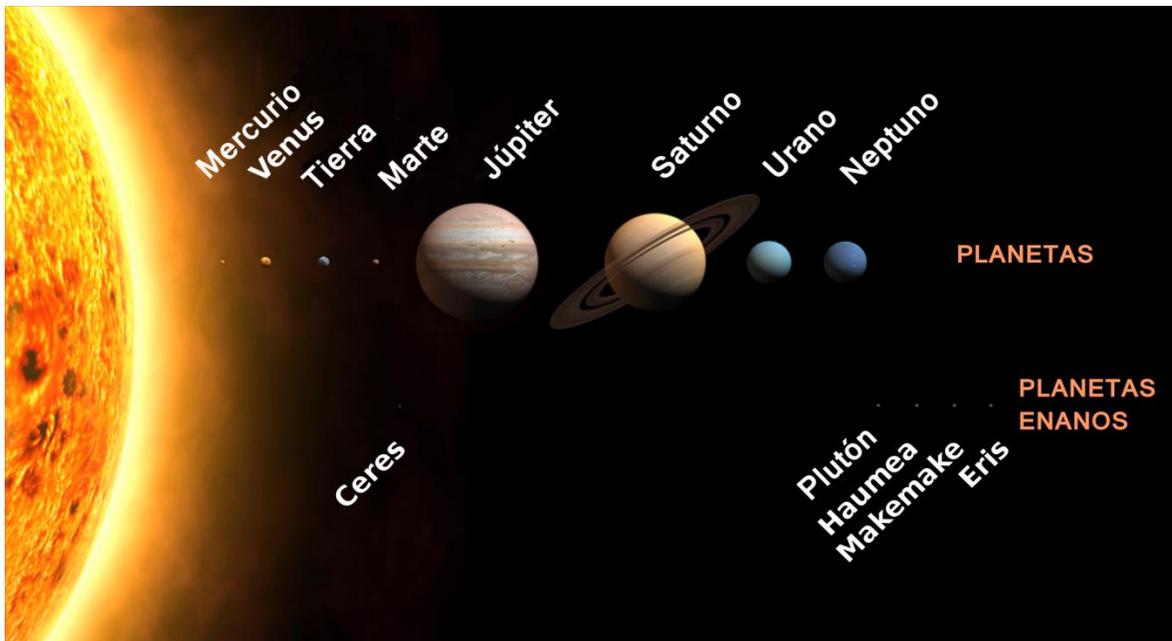


Figura I.4.- Planetas del Sistema Solar a escala

La *Teoría Laplaciana Moderna* asume que la condensación del Sol contenía granos de polvo sólido, que a causa del roce en el centro frenaron la rotación solar. Después la temperatura del Sol aumentó y el polvo se evaporó [I.9]. La *Teoría de la Nebulosa Moderna* por su parte se basa en la observación de estrellas jóvenes, rodeadas de densos discos de polvo que se van frenando. Al

concentrarse la mayor parte de la masa en el centro. Los trozos exteriores, ya separados, reciben más energía y se frenan menos, con lo que aumenta la diferencia de velocidades [I.10]. Donde de cierta forma se puede concluir, que el desarrollo de lo que nosotras conocemos como Universo, es un desarrollo e implantación de Tecnología de Polvos.

I.2.- Introducción sobre la Pulvimetalurgia

La Pulvimetalurgia o mayormente conocida como Metalurgia de Polvos, ha sido llamada un arte perdido. A diferencia de arcilla y otros materiales de cerámica, el arte de moldear y cocer objetos metálicos prácticos o decorativos se aplicó sólo de vez en cuando durante las primeras etapas de la historia registrada. La Sinterización de metales fue olvidada por completo durante los siglos posteriores. Sólo para ser revivida en Europa a finales del *Siglo XVIII*, cuando se registraron diversos métodos de producción de polvo de Platino Tabla I.1 [I.11].

Tabla I.1.- Acontecimientos históricos importantes en la Metalurgia de Polvos [I.11]

Fecha	Desarrollo	Origen
7000 A.C.	Primeros utensilios fabricados por el hombre	Período Paleolítico
6000 A.C.	Trabajos de metalurgia en frío y primeras aldeas	Período neolítico
5000 A.C.	Se inicia un comercio de metales	Península de Anatolia
4000 A.C.	Crear adornos artesanales	Edad del Cobre
3000 A.C.	Hierro esponja para la fabricación de herramientas.	Egipto, África, India
1500 A.C.	Mediante calentamiento de una mezcla de Hierro y Carbón se producía una nueva sustancia más resistente que el propio Hierro, <i>el acero</i> .	Los Hititas
1200 D.C.	Cementación granos de Platino.	América del Sur (Incas)
1501-1600	Las operaciones relacionadas con la minería y la fundición.	Alemania e Italia
1781	Platino Arsénico aleación de un fusible.	Francia, Alemania
1790	La producción de vasos químicos-Platino Arsénico comercialmente.	Francia
1822	Platino en polvo formado en lingote sólido.	Francia

1826	Sinterización de alta temperatura de polvos compactos de Platino sobre una base comercial.	Rusia
1829	Método <i>Wollaston</i> produjo Platino compacto de esponja (base moderna de la técnica de Metalurgia de Polvos).	Inglaterra
1830	Sinterización de varios metales.	Europa
1859	Proceso de fusión del Platino.	Estados Unidos
1870	Patente aplicada a recursos elaborados a partir de polvos metálicos (precursor de los rodamientos auto lubricantes).	Estados Unidos
1878-1900	Filamentos incandescentes de las lámparas.	Estados Unidos
1900-1903	Metales compuestos porosos y filtros metálicos.	Estados Unidos
1920	Cojinetes lubricados para Auto (utilizado en el comercio).	Estados Unidos
1915-1930	Carburos cementados	Alemania
1940	Pulvimetalurgia de Hierro.	Europa central
1950-1960	Pulvimetalurgia forjado y productos dispersión fortaleció, incluyendo piezas forjadas de pulvimetalurgia.	Estados Unidos
1970	Prensado isostático en caliente, aceros de herramientas de pulvimetalurgia, y súper aleaciones súper plásticas.	Estados Unidos
1980	Solidificación rápida y la tecnología de moldeo por inyección de polvo.	Estados Unidos
1990	Inter-metálicos, compuestos de matriz metálica, aerosol formando, polvos nano-métricos y compactación en caliente.	Estados Unidos, Inglaterra

El uso de los metales nace en la Península de Anatolia a partir del 5.000 A.C. De allí se difunde a Mesopotamia y Egipto: carecen de yacimientos minerales y se inicia un comercio de metales a

través del Mediterráneo, en busca de cobre y estaño. Este contacto permite la difusión de su conocimiento y permite el desarrollo cultural de los pueblos que comerciarán con los orientales.

El hombre necesitó de elementos fuertes y resistentes que le permitieran una mejor confección de sus utensilios y armas; ello lo encontró al emplear los metales desde aproximadamente, el año 4 000 A.C. Este nuevo momento en el discurrir de la humanidad toma, por ello, el nombre de edad de los metales que se divide en: Edad de Cobre, Edad de Bronce y Edad de Hierro.



Figura I.5.- Primeros utensilios y armas con metal

Los polvos de metales, tales como el Oro, Cobre, Bronce y muchos óxidos en polvo (óxido de Hierro en particular y otros óxidos utilizados como pigmentos), fueron utilizados para fines decorativos en cerámica, como bases para pinturas, tintas y en cosméticos desde los inicios de la historia. El polvo de Oro se utilizó para ilustrar algunos de los primeros manuscritos. No se sabe cómo se producían estos polvos, pero es posible que algunos de los polvos se obtuvieran mediante granulación después de que se funde el metal. Puntos de fusión baja y la resistencia a la oxidación favorecieron tales procedimientos, especialmente en el caso del polvo de Oro. El hombre primitivo aprendió por la posibilidad de que partículas de metal pueden ser unidos entre sí por martilleo, resultando en una estructura metálica sólida. Con el tiempo, el hombre aprendió cómo construir hornos y desarrollar temperaturas lo suficientemente altas como para fundir metales y para formar aleaciones de fusión más bajas, tales como el Cobre y el Estaño para hacer bronce [I.12].



Figura I.6.- Trabajos de metalurgia en frío en la India

I.3.- Inicios de la Pulvimetalurgia

Mucho antes de que se desarrollaran los hornos que podrían elevar la temperatura al punto de fusión del metal, se utilizaron principios Pulvimetalurgia. Sobre el año 3000 A.C., los egipcios utilizaron un *Hierro esponja* para fabricar herramientas. En este proceso temprano, el óxido de Hierro se calentó en un Carbón de leña y aplastó fuego de artillería. Que fue su intención de tamizar por chorros de aire de los fuelles para reducir el óxido de Hierro metálico a una esponjosa. A continuación, la esponja de Hierro caliente resultante fue elaborada para soldar las partículas juntas. Formas finales se obtuvieron mediante procedimientos de forja simples. Aunque el producto a menudo contenía grandes cantidades de impurezas no metálicas, algunas estructuras muy sólidas y de sonido han sido descubiertos [I.13]. Mientras Jones [I.14], sobre este mismo proceso, describió sobre una modificación desarrollada por las tribus africanas. Después de la reducción, la esponja se rompió en partículas de polvo, se lava y se ordena a mano para extraer la mayor cantidad de escoria posible. El polvo fue entonces o bien compactado o Sinterizado en un material poroso, que se forjó posteriormente.

Otro ejemplo de reducción antigua de óxido de Hierro se llevó a cabo en la fabricación de la Columna Delhi, que pesa 5,9 toneladas métricas (6,5 toneladas). Estas formas crudas de la Metalurgia del Polvo condujeron en última instancia al desarrollo de uno de los métodos comerciales para la producción de polvo de Hierro. Mediante molienda de la esponja de Hierro en partículas finas y calefacción en Hidrógeno para eliminar los óxidos y recocido o suavizar las partículas. Este proceso, es hoy en día una técnica viable para la producción de polvo de Hierro

de alta calidad [I.15]. Prácticas de Metalurgia de Polvos fueron utilizadas por los Incas y sus predecesores en la toma de Platino antes de que Colón hiciera su viaje al *Nuevo Mundo* en 1492. La técnica utilizada se basa en la acción de cementación de un aglutinante de fusión más bajo. Una técnica similar a la práctica actual de hacer carburos Sinterizados. La técnica consistía en la cementación granos de Platino (separados del mineral mediante lavado y selección) mediante la adición de una aleación de Oro y Plata resistente a la oxidación de un punto de fusión bastante bajo para humedecer los granos. Dibujó juntos por el esfuerzo superficial y la formación de una prima lingotes adecuados para la manipulación posterior [I.16]. Un cambio de color desde el amarillo del material Sinterizado a la de Platino blanquecino del metal final fue causado por la difusión durante el calentamiento antes de trabajar. El calentamiento se cree que se han logrado por medio de fuegos de Carbón avivados por cerbatanas. Los análisis de estas aleaciones varían considerablemente. El contenido de Platino varió desde 26 hasta 72% y el contenido de Oro varió desde 16 hasta 64%. Se encontraron adiciones de Plata a variar de 3 a 15%, y se trazaron cantidades de Cobre hasta el 4% Pulvimetalurgia de Platino.

La metalurgia del Platino, como se practica en los *Siglos XVIII y XIX* en Europa, se considera una de las etapas más importantes del desarrollo de la Metalurgia de Polvos moderna. Por primera vez, los registros completos estaban disponibles y proporcionó información sobre los diferentes métodos de producción de polvo. Así como, el procesamiento de estos polvos en implementos útiles sólidos. Mientras que entre 1750 y 1825, se le dio una gran atención a la fabricación de Platino [I.12]. Para 1755, *Lewis* [I.17] descubrió que cuando una aleación de Plomo-Platino se oxida a altas temperaturas, una masa esponjosa, se mantiene viable después de que las impurezas de óxido de Plomo se han volatilizado.

Scheffer [I.18] encontró que cuando el Platino se calentó con el Arsénico, el Platino mostró signos de fusión. Este hallazgo fue confirmado en 1781 por *Achard* [I.19] que describe la producción de una aleación de Platino-Arsénico fusible. Probablemente mediante la formación de la mezcla eutéctica que contiene 87% de Pt y punto de fusión de 600 °C (1110 °F). *Achard* formó Platino sólido martillando caliente una esponja, la soldadura de las partículas individuales en un gran macizo. La esponja se obtuvo mediante la alta temperatura de trabajo de la aleación de Platino-Arsénico, lo que causó la volatilización del Arsénico. Este procedimiento forma la base

para un método de producción de Platino que se utilizó por primera vez en 1790 en los vasos sobre químicos fabricado comercialmente por *Jannetty* en París. El Mercurio se utiliza más adelante en un proceso similar por *Moussin-Pousckin* [I.20]. Otros metales trabajados de esta manera incluyen Paladio, mediante el uso de Azufre en lugar de Arsénico e Iridio (utilizando Fósforo). *Ridolfi* [I.21] desarrolló el Platino maleable para los buques químicos, mediante el uso de Plomo y Azufre.

En 1786, *Rochon* [I.22] produjo con éxito Platino sólido sin necesidad de utilizar el Arsénico, lo cual se realizó mediante la soldadura de piezas pequeñas de Platino chatarra. Se produjo Platino maleable uniendo granos de Platino purificados. Por lo que *Knight* [I.23] encontró que, si el polvo de Platino químicamente precipitado se calienta a altas temperaturas en un crisol de arcilla, se ablanda y puede ser comprimido y forjó. Mientras *Tilloch* [I.24] instaló polvo de Platino en tubos de chapa de Platino enrollado, que eran luego se calienta y forjado para producir una masa compacta. Para 1813, *Leithner* [I.25] reportó una producción de Platino, por medio de hojas delgadas maleables, por la desecación de las sucesivas capas de polvo en suspensión en la trementina y el calentamiento de las películas resultantes a altas temperaturas sin presión. En 1882, fue reportado por *Baruel* [I.26] un proceso donde 14 kg (30 libras) de polvo de Platino fue hecho en un lingote sólido por una serie de operaciones. Platino se precipitó en forma de polvo, ligeramente comprimido en un crisol y se calienta a calor blanco. El polvo se puso en una matriz de acero y se colocó bajo presión con un tornillo de acuñar prensa. El Platino compacto se recalentó en varias ocasiones y volvió a presionar hasta que se formó un lingote sólido. Los tratamientos térmicos finales se realizaron en un fuego de Carbón a temperaturas más bajas. Debido a que el polvo de Platino fue colocado en la matriz de acero mientras está caliente, este proceso se basa en la técnica de prensado en caliente. En Rusia en 1826, una operación de sinterización de alta temperatura se aplicó a polveras previamente maíz prensado sobre una base comercial por primera vez. Esto fue en contraste con los métodos basados en el prensado en caliente [I.27]. *Sobolewskoy* [I.28] describió tamizada en polvo de Platino a presión en un cilindro de Hierro fundido que contó con un punzón de acero accionado por una prensa de tornillo. Los resultantes fueron recocidos para aproximadamente 11 días en alta temperatura en un horno de cocción de la porcelana. El producto final fue altamente viable, especialmente si el poder del Platino había sido bien lavado y era de alta pureza. El recocido, sin embargo, causó una

disminución en el volumen. Otro método desarrollado en Rusia fue reportado por *Marshall* [I.29] en 1832. Platino en polvo en un molde de Hierro en forma de anillo fue presionado por una prensa de tornillo. Se calienta a un calor rojo y re-presionado. Después de trabajar en un tren de laminación, los discos compactados fueron utilizados como monedas.

El proceso de *Wollaston* de producir Platino compacto a partir de polvo de esponja de Platino generalmente se considera el comienzo de la Metalurgia de Polvos moderna. Por lo menos 16 años antes de su publicación de 1829 [I.30]. Describe la fabricación de un producto muy superior a la de los fabricantes contemporáneos. *Wollaston* diseñó las bases de la técnica Metalurgia de Polvos moderna. *Wollaston* fue rápido para realizar todas las dificultades relacionadas con la producción de lingotes de Platino sólido a partir de metal en polvo y por lo tanto concentrados en la preparación del polvo. Descubrió que al pulsar el polvo mientras está húmedo en una pastilla dura (que se cuece posteriormente al calor rojo), se realiza mejor bajo una presión considerable. Además, debido a prensas de tornillo disponible no eran lo suficientemente potente. Por lo que *Wollaston* desarrolló una prensa de palanca horizontal de la construcción simple (Figura I.5). Además de que el proceso descubierto por *Wollaston* utiliza los siguientes nueve pasos en la fabricación de metal de Platino compacta [I.30]:

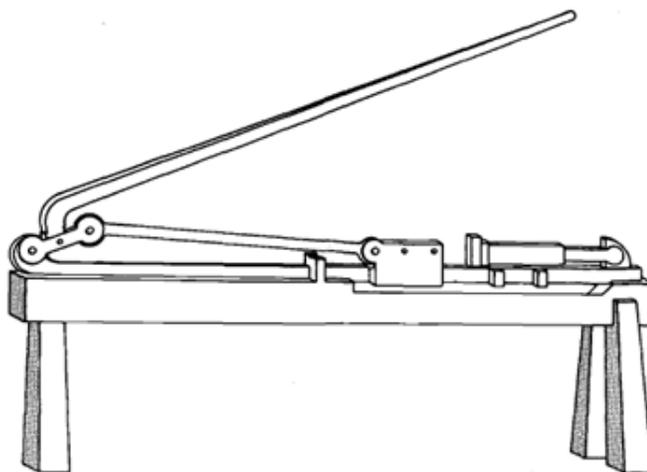


Figura I.5.- Simple prensa de palanca utilizado por *Wollaston* para hacer polveras de Platino

1. Precipitantes de Amonio-Cloruro de Platino a partir de soluciones diluidas.
2. Descomponiendo lentamente el Cloruro de Amonio precipitado de Platino finamente dividido y cuidadosamente lavada en esponja de polvo de floja.

3. Molienda este polvo de esponja sin aplicar presión a las partículas de polvo, evitando así cualquier bruñido de las partículas y la preservación de toda la energía superficial de las partículas.
4. Tamizando del polvo de la esponja.
5. Lavado del polvo de la esponja con agua para eliminar todos los restos de sales volátiles.
6. La separación de partículas finas de partículas más gruesas por sedimentación (sólo se utilizaron las partículas más finas de esponja).
7. Presionar la masa húmeda que contiene las partículas más finas de Platino en una pastilla cilíndrica.
8. El secado de la pastilla húmeda muy lentamente y luego calentándolo a aproximadamente 800 a 1000 °C (1475-1830 °F).
9. La forja del pastel cuando todavía estaba caliente.

Mediante la aplicación de estas medidas, *Wollaston* logró producir Platino compacto, que cuando se rodó en lámina delgada, era prácticamente libre de burbujas de gas. Crisoles hechos de esta hoja fueron los mejores implementos Platino de calidad de su tiempo. El proceso de *Wollaston* fue utilizado por más de una generación y se convirtió en obsoletos sólo con el advenimiento del procedimiento de fusión de Platino desarrollado por *Sainte Claire Deville* y *Debray* en 1859 [I.30]. Tuvieron éxito en la producción de una llama poderosa con la iluminación de gas y Oxígeno. El Oxígeno que se fabrica a partir de Dióxido de Manganeso. Sin embargo, el metal fundido que se producen era superior a *Wollaston* (Platino de calidad y homogeneidad) y el procedimiento de fusión también era menos caro y más rápido que el método de *Wollaston*. Fusión, por lo tanto, pronto fue adoptado por todas las refinerías de Platino. Todavía se considera el método superior para la fabricación de Platino de calidad estándar.

I.3.1.- Otros desarrollos

El uso de la Tecnología o Metalurgia de Polvos para formar piezas moldeadas intrincadamente pulsando y Sinterizado fue introducido en el *Siglo XIX*. En 1830, *Osann* [I.31] encontró que el metal reducido podría ser Sinterizado en un compacto. *Osann* luego desarrolló un proceso para la toma de impresiones de monedas en polvo de Cobre producido por la reducción de Carbonato de

Cobre precipitado (Cu_2CO_3). *Osann* encontró que la deducción se realiza mejor a las temperaturas más bajas posibles que podrían ser utilizados para producir un polvo metálico de la finura conocido en la fabricación de Platino. Las altas temperaturas de reducción resultaron en masas granulares que no sinterizan bien. La contaminación del polvo por la atmósfera fue eliminada mediante el poder inmediatamente, después de la reducción o la guarda en botellas de vidrio cerradas. El polvo se separó en tres grados, determinada por el tamaño de las partículas, antes de su uso. Para hacer una impresión de una moneda, polvo *FEM* se pulverizó sobre la superficie, seguido por capas de grados gruesa. El polvo y una matriz se colocan en un molde en forma de anillo y se comprime por la presión de golpes de martillo sobre un punzón o el uso de una prensa de nudillo. Volumen del polvo de Cobre se redujo a una sexta parte de la original en polvo durante la compresión. La Sinterización se realiza a temperaturas cercanas al punto de fusión del Cobre, después de los compactos fueron colocados en paquetes de Cobre herméticas con arcilla. Una distorsionada produjo 20% de contracción, pero el Cobre Sinterizado fue más duro y más fuerte que el Cobre fundido. *Osann* también produjo medallas de Plata, Plomo y Cobre por el mismo procedimiento. A pesar de que considera su proceso especialmente adecuado como alternativa al método tipo eléctrico de reproducir monedas y medallones. *Osann* defendió su uso como un método de producción inicial de estos artículos. Se cree que la metalurgia en polvo podría ser utilizado para producir el tipo de impresión y para la fabricación de espejos convexos y cóncavos pulsando sobre el vidrio. *Osann* pensó que la medición de la contracción de los compactos de Cobre podría ser utilizado para calcular la temperatura, como se utilizó la contracción de los cilindros de arcilla en el pirómetro *Wedgewood*.

Entre los avances en la industria, los más significativos fueron durante la segunda mitad del *Siglo XIX* y fueron los intentos de *Gwynn* para desarrollar materiales de polvos metálicos. Patentes concedidas a *Gwynn* en 1870 [I.32] fueron los precursores de una serie de novedades en el ámbito de los rodamientos auto lubricantes. *Gwynn* emplea una mezcla de 99 partes de Estaño en polvo, preparados por raspado o presentación y 1 parte de residuo de petróleo. Los dos componentes se agitaron mientras se calentaban. Una forma sólida deseada y luego fue producido por someter la mezcla a una presión extrema mientras introduciéndola en un molde. La patente establece específicamente que las cajas de revistas hechas por este método o revestidas con un material

producido de este modo permitirían ejes para funcionar a altas velocidades sin utilizar ninguna otra lubricación.

I.3.2.- La evolución del mercado

La primera aplicación comercial de la Metalurgia de Polvos ocurrió cuando el Carbón y Osmio. Más tarde, Circonio, Vanadio, Tántalo y Tungsteno, se utilizó para filamentos de las lámparas incandescentes. Se desarrollaron métodos 1878-1898 para hacer filamentos de Carbón por la extrusión y posterior Sinterización de materiales Carbón. Los filamentos de Osmio (Os) fueron utilizados para un corto tiempo desde 1898 a 1900 [I.33]. *Auer Von Welsbach* [I.33] describe la producción de filamentos de Osmio por precipitación química del polvo y formación de una mezcla con el jarabe de azúcar. Que sirve tanto como aglutinante y en caso de Osmio óxido, que se utiliza en lugar del metal, como agente reductor. La mezcla se roció a través de matrices finas y las roscas finas resultantes se dispararon posteriormente en atmósferas protectoras, para carburar y volatilizar el aglutinante, reducir el óxido y sinterizar las partículas de metal en un alambre metálico coherente para uso como un conductor eléctrico.

La lámpara eléctrica de Osmio pronto fue un éxito, por las luces de incandescencia de Tántalo. Que fueron utilizados ampliamente desde 1903 a 1911. El procedimiento general [I.34] fue similar a la utilizada para el Osmio, con la excepción de que el Tántalo tenía que ser purificado mediante un tratamiento de vacío para convertido dúctil. Técnicas similares se utilizaron para la producción de filamentos a partir de Circonio, Vanadio y Tungsteno. Con Tungsteno, especialmente, los cables extruidos se doblan en formas cerradas antes de la Sinterización para darles forma para su uso en forma de filamentos. Debido a la falta de ductilidad fue el principal inconveniente de estos filamentos. Se hicieron intentos para mejorar esta propiedad mediante la adición de un pequeño porcentaje de un punto de fusión inferior, metal dúctil. El Tungsteno se mezcló con 2 a 3% de Níquel, presionado en un compacto y se sinteriza en Hidrógeno a una temperatura ligeramente por debajo del punto de fusión del Níquel. Las barras resultantes se pueden extraer y el Níquel se eliminó de los filamentos finales por un tratamiento térmico al vacío a una temperatura alta [I.35]. Aunque este proceso no fue un éxito comercial, fue un paso importante para el desarrollo industrial de carburos cementados y materiales compuestos. El Tungsteno pronto fue reconocido como el mejor material para filamentos de las lámparas. El

problema, sin embargo, era idear un procedimiento económico para la producción de estos filamentos en grandes cantidades. Un número de procedimientos para producir Tungsteno en polvo había sido trabajado anteriormente [I.36].

En 1783, los hermanos *D'Elhujar* [I.37], primero producen polvo de Tungsteno por calentamiento de una mezcla de ácido Tungsteno y Carbón vegetal en polvo, enfriar la mezcla y la eliminación de la pastilla pequeña. Que se derrumbó a un polvo de partículas globulares. La purificación de polvo de Tungsteno por ebullición, fregar y rozando para eliminar las sales solubles, óxido de Hierro, arcilla y compuestos de Calcio y Magnesio, fue reportado por *Polte* [I.38].

Por medio de los procesos de *Coolidge*, a principios del *Siglo XX* [I.39], se descubrió que el Tungsteno podría ser trabajado en un cierto rango de temperatura y conservaría su ductilidad a temperatura ambiente. Pocos cambios se han hecho en los últimos años sobre el procedimiento de *Coolidge*. Todavía es el método estándar de la producción de filamentos de la lámpara incandescente. En este método, el polvo de óxido de Tungsteno muy fino, se reduce por el Hidrógeno. El polvo es presionado en los compactos, que se Pre sinterizado a 1200 °C (2190 °F) para fortalecer ellos de modo que se pueden fijar en los contactos. Ellos reciben un tratamiento final de Sinterización cerca de 3000 °C (5430 °F) pasando una corriente de alta densidad a corriente de baja tensión a través de los pactos. Durante la Sinterización, los cuerpos compactos se encogen y alcanzan una densidad cerca de 90% de la de Tungsteno sólido. Los compactos Sinterizados se pueden trabajar sólo a temperaturas cerca de 2000 °C (3630 °F). Cuando se calienta a esta temperatura, pueden ser estampadas en rondas. Con cantidades crecientes de trabajo caliente, Tungsteno se vuelve más dúctil, la temperatura de estampación se puede bajar progresivamente y las barras de estampados se pueden dibujar en alambre fino a temperaturas relativamente bajas.

Los procedimientos desarrollados para la producción de Tungsteno a menudo eran adaptables a la fabricación de Molibdeno. *Lederer* [I.40] desarrolló un método de fabricación de Molibdeno usando sulfuro de Molibdeno en polvo. El sulfuro mezclado con Azufre amorfo y se amasa en una pasta, se formó en un filamento. Cuando se expone al aire, los filamentos se hicieron lo suficientemente fuerte como para ser colocado en un horno. Calefacción en Hidrógeno resultó en

la formación de sulfuro de Hidrógeno y la Sinterización del metal en filamentos sólidos. Un proceso similar fue patentado por *Oberländer* [I.41] quien utilizó cloruro de Molibdeno y otros haluros como materiales de partida. Cuando el cloruro se trata con un agente reductor tal como éter, se obtuvo una pasta. Tungsteno, Molibdeno y Tántalo son los tres metales refractarios más importantes utilizados en la actualidad en la lámpara, aeroespacial, electrónica, de Rayos X y las industrias químicas. Otros metales refractarios de menor importancia fueron desarrollados por el método de Pulvimetalurgia en el año 1900. En particular el Niobio, Torio y Titanio. Sin embargo, al mismo tiempo, otro desarrollo, originarios de procesamiento de metales refractarios, tomó forma y rápidamente creció hasta tal importancia que ahora eclipsa el campo padre. Carburos cementados han convertido en uno de los mayores desarrollos industriales del siglo.

Para los carburos cementados, las matrices de dibujos ordinarios no eran satisfactorias para la elaboración de los cables de Tungsteno y filamentos. La necesidad de un material más resistente para soportar un mayor desgaste se hizo urgente. Debido a que se sabe que los gránulos de Tungsteno combinados fácilmente con Carbón a altas temperaturas para dar un compuesto extremadamente resistente, el material durable de la herramienta conocida como carburo cementado. Las partículas de carburo de Tungsteno, presentes en forma de partículas finamente divididas, duro y fuerte, se unen en un cuerpo sólido con la ayuda de un agente de cementación metálica. Los primeros experimentos con un número de metales establecidos que este agente cementante debía poseer las siguientes propiedades para permitir la solidificación del cuerpo de metal duro [I.42]:

- Cerrar la afinidad química de las partículas de carburo.
- Un punto de fusión relativamente bajo.
- Capacidad de aleación con carburo limitada.
- Gran ductilidad (por no verse afectada por la operación de cementación).

Cobalt satisfizo más de cerca por estos requisitos [I.42]. El trabajo inicial se llevó a cabo principalmente en Alemania por *Lohmann* y *Voigtländer* [I.43] en 1914. Por *Liebmann* y *Laise* en 1917 [I.44 y I.45] y por *Schröter* de 1923 a 1925 [I.46]. *Krupp* [I.47] perfeccionó el proceso en 1927 y comercializado el primer producto de importancia comercial, *Widia*. En 1928 este

material fue introducido a los Estados Unidos, por *General Electric Company* que poseía los derechos de patente estadounidense y publicó un número de licencias. El proceso implica controlar cuidadosamente la fabricación de polvo, briqueteado una mezcla de carburo y aglutinante metálico (generalmente de 3 a 13% Co) y la Sinterización en una atmósfera protectora a una temperatura lo suficientemente alta para permitir la fusión de la aleación de Cobalto y parcial con el carburo de Tungsteno. La matriz fundida de Cobalto y carburo de Tungsteno en parte disuelto forma un enlace, la celebración de las partículas duras juntos y dando al cuerpo metálico suficiente tenacidad, ductilidad y fuerza para permitir su uso efectivo como material de la herramienta [I.47].

En cuanto al desarrollo de metales compuestos, la Metalurgia de Polvos fue utilizada para los contactos de carga pesada, electrodos, contrapesos, y contenedores. Todos estos materiales compuestos contienen partículas refractarias de metal. Generalmente de Tungsteno y un material de cementación con un punto de fusión más bajo, presentes en varias proporciones. Cobre, aleaciones de Cobre y Plata se utilizan con frecuencia, Cobalto, Hierro y Níquel se utilizan con menos frecuencia. Algunas combinaciones también contienen grafito. El primer intento para producir tales materiales se registró en la patente de *Viertel y Egly* [I.48]. Los procedimientos utilizados fueron similares a los desarrollados para los metales duros o llamados para la introducción del aglutinante en forma líquida por inmersión o infiltración [I.49, I.50 y I.51]. En 1916, *Gebauer* [I.52] desarrolló un procedimiento de este tipo, el cual fue continuado por *Baumhauer Heinrich* [I.53] y *Gillette* [I.54] en 1924. *Pfanstiehl* [I.55] obtuvo la patente en 1919 por un metal pesado, que consta de Tungsteno y un aglutinante que contenía Cobre y Níquel.

Mientras que, para metales porosos para rodamientos y filtros, se desarrolló metales refractarios y sus carburos. Otra área importante de la metalurgia en polvo que ganó la atención durante la década de 1900 fue el de cojinetes metálicos porosos. Los tipos especiales de estos cojinetes porosos se denominan auto lubricantes. Los tipos modernos de rodamientos, generalmente de Cobre, Estaño, y polvos de grafito e impregnadas con aceite, se desarrollaron por primera vez en los procesos patentados por *Loewendahl* [I.56] y *Gilson* [I.57 y I.58]. El material de *Gilson* era una estructura de bronce, en el que las inclusiones de grafito finamente divididas se distribuyeron de manera uniforme. Se produce mediante la mezcla en polvo de óxidos de Cobre y Estaño con

grafito, compresión de la mezcla y calentando a una temperatura a la que los óxidos se reducen por el grafito, Cobre y el Estaño podían fundirse suficientemente para dar un bronce como la estructura. El exceso de grafito (hasta 40% en volumen) se distribuye uniformemente a través de esta estructura. La porosidad era suficiente para permitir la introducción de al menos 2% de aceite. El proceso fue posteriormente mejorado por *Boegehold* y *Williams* [I.59-I.62], *Claus* [I.63] y muchos otros, principalmente por la utilización de polvos de metal elemental en lugar de óxidos. Los filtros metálicos fueron el siguiente paso en el desarrollo de estos metales porosos y las patentes se remontan hasta 1923 [I.64], cuando *Noel* patentó un proceso y una máquina para moldear cuerpos porosos de polvo granulado.

I.3.3.- La evolución de la pulvimetalurgia en la postguerra [I.65 y I.66]

Las técnicas de infiltración, materiales porosos, núcleos de polvo de Hierro para dispositivos relación de sintonía, pulvimetalurgia de imanes permanentes, y composiciones de metales pesados W-CuNi se desarrollaron durante los períodos comprendidos entre 1900 (*Primera Guerra Mundial*) y finales de 1920. Al comienzo de la *Segunda Guerra Mundial* en Europa, la tecnología de polvo de Hierro comenzó su avance a la viabilidad comercial. El más espectacular desarrollo de piezas de Hierro obtenidas por Pulvimetalurgia fue durante la *Segunda Guerra Mundial* en el centro de Europa. Donde se utilizaron ampliamente las bandas de conducción de Hierro sinterizado impregnado de parafina para proyectiles militares. Metalúrgicos en polvo alemanes encontraron esta técnica eficaz como un sustituto de escasa dorado de metal, una aleación de Cobre-Zinc que contiene de 5 a 10% de Zn. La producción alcanzó un pico de 3.175 toneladas métricas (3.500 toneladas) al mes para esta aplicación.

Por otro lado, el advenimiento de la producción en masa en la industria del automóvil hizo posible el uso de polvos de Hierro y Cobre en grandes tonelajes y dio lugar a muchos de los avances tecnológicos de la industria de la Pulvimetalurgia moderna. El automóvil ha sido la base para la mayoría de las aplicaciones industriales de Pulvimetalurgia. Incluso en campos no relacionados con la industria automotriz. La primera aplicación comercial de un producto Pulvimetalurgico (cojinete auto lubricante), fue utilizado en un automóvil en 1927. Fue hecha de una combinación de polvos de Cobre y Estaño para producir un Bronce poroso, teniendo capas para retener aceite dentro de sus poros, por atracción capilar. Casi al mismo tiempo, los

rodamientos auto lubricantes se introdujeron en el mercado de electrodomésticos como un componente compresor del refrigerador.

A través de la década de 1940 y principios de 1950, el polvo de Cobre y el cojinete auto lubricante fueron los principales productos de la Metalurgia de Polvos. Desde entonces, el polvo de Hierro y Acero de Metalurgia de Polvos se utilizó en componentes mecánicos, como; engranajes, levas y otras formas estructurales y se han convertido en dominante en el mercado. Mientras el polvo de Cobre sigue siendo un material Pulvimetalurgico importante, consumido en el orden de 21 mil toneladas métricas (23.000 toneladas) por año, se ha visto ensombrecida por polvos de Hierro y base de Hierro con los mercados de 318.000 toneladas métricas (350.000 toneladas) por año.

Desde el final de la *Segunda Guerra Mundial* y especialmente con el advenimiento de la tecnología aeroespacial y nuclear, la evolución ha sido generalizada en cuanto a la metalurgia de polvos de metales refractarios y reactivos, como; Tungsteno, Molibdeno, Niobio, Titanio y Tantalio y de metales nucleares tales como el Berilio, Uranio, Circonio y Torio.

Todos los metales refractarios se recuperan de sus minerales, procesa y forma usando técnicas de metalurgia en polvo. Con los metales reactivos, la metalurgia en polvo se utiliza a menudo para conseguir una mayor pureza o combinarlos con otros metales o no metálicos para conseguir propiedades especiales. Las centrales nucleares utilizan elementos de combustible a menudo realizadas mediante la dispersión de óxido de Uranio en un polvo de metal (Aluminio, por ejemplo) de la matriz. Las barras de control y blindaje contra neutrones pueden utilizar polvo de Boro en una matriz de Níquel, Cobre, Hierro o Aluminio. Tungsteno combinado con polvos de Níquel y Cobre se usa ampliamente como un componente de protección en aplicaciones donde se requiere configuración compleja que implica el mecanizado, como el Cobalto-60 en contenedores.

En la industria aeroespacial, el Berilio y Titanio se utilizan ampliamente. *Faldas Rocket*, conos y escudos de calor a menudo se forman a partir de Niobio. El Molibdeno se utiliza ampliamente en componentes de misiles y del motor de cohete. Boquillas para cohetes utilizados en vehículos

espaciales en órbita a menudo están hechos de Tungsteno a través del proceso metalurgia de polvos con el fin de mantener las tolerancias dimensionales críticos.

Los años 1950 y 1960 fueron testigos de la aparición de productos forjados por Metalurgia de Polvos. Estos son completamente sistemas metálicos densos que comenzaron en forma de polvos, calientes Isostáticamente prensados súper aleaciones, forjas por metalurgia de polvos, aceros para herramientas por metalurgia de polvos, compactado con rodillo tira y dispersión fortalecida, Cobre son ejemplos. Cada uno de estos procesos y materiales están cubiertos en artículos separados en este volumen. La comercialización de material de alto rendimiento basado en polvo emergió como un gran avance en la tecnología de la metalurgia en la década de 1970. Con la apertura de nuevos mercados a través de un desempeño superior, junto con el costo de efectividad de la conservación de la vida material y de funcionamiento más largo.

I.4.- Acontecimientos recientes

A finales de 1970, los programas experimentales con metalurgia de polvos de productos forjados comenzaron a extenderse al sector industrial comercial. Principalmente en forma de metalurgia de polvos de aceros de herramientas y metalurgia de polvos de piezas forjadas. Con la llegada de las piezas forjadas en polvo, ya no se ven comprometidas por propiedades de densidad. Componentes totalmente densas capaces de combinar la flexibilidad de aleación y la red y características de diseño acerca de la red de la metalurgia de polvos eran muy comerciales. La década de 1970 y comienzos de 1980 fue testigo de un gran avance metalúrgico significativo en el reconocimiento de las técnicas de Pulvimetalurgia, para la eliminación de la segregación y la garantía de grano fino y estructura de alta aleación libre de poros totalmente homogénea. Categorized como Pulvimetalurgia forjado de metales, que llevaron a la perfección de polvos metálicos extremadamente de alta pureza y mejora de las técnicas de consolidación, como prensado isostático en caliente (HIP). La década de 1980 también vio la comercialización de solidificación ultra rápido y tecnología de moldeo por inyección [I.65].

Metalurgia de polvos comercial ahora abarca el espectro de densidad de los filtros metálicos altamente porosos a través de cojinetes auto-lubricantes y piezas de Pulvimetalurgia con densidad controlada, completamente denso Pulvimetalurgia de forjado en sistemas metálicos. Las piezas y

productos de la industria Pulvimetalurgia en América del Norte han estimado ventas de más de \$ 3 mil millones de dólares. Se compone de 150 empresas que hacen / piezas de Pulvimetalurgia convencionales y productos de polvos de base de Hierro y Cobre. Cerca de 50 compañías que fabrican productos de Metalurgia de Polvos de la especialidad, tales como súper aleaciones, aceros para herramientas, productos porosos, materiales de fricción, tira para aplicaciones electrónicas, altos imanes permanentes de resistencia, núcleos de polvo magnético y ferritas, herramientas de corte de carburo de Tungsteno y piezas de desgaste, productos rápidos, velocidad de solidificación (RSR) y piezas moldeadas por inyección de metales y aceros para herramientas. La Pulvimetalurgia es de alcance internacional con una creciente industria en todos los principales países industrializados. El valor de los envíos de polvo de metal de Estados Unidos (incluida la pasta y en escamas) fue \$ 1 854 millones en 1995. La producción de polvo de metal a nivel mundial anual superior a 1 millón de toneladas [I.65]. Tendencias y nuevas novedades incluyen [I.66]:

- La mejora de los procesos de fabricación como *HIP*, forja con Metalurgia de Polvos, moldeo por inyección de metal (*MIM*) y polvo de laminación directa. Mediante el aumento de la investigación científica de la tecnología de Pulvimetalurgia. Por parte del gobierno, académicos y programas de investigación y desarrollo industrial.
- Metalurgia de polvos de productos totalmente densos para mejorar las propiedades de resistencia y calidad en los automóviles, motores diésel y turbinas, piezas de aviones y de corte industrial y herramientas de formación.
- La comercialización de tecnologías como (*MIM*) solidificación rápida, Forja con Metalurgia de Polvos, rocío de la formación, la Sinterización de alta temperatura de vacío, compactación en caliente ambos Isostáticos frío y caliente presionando.
- El uso de Metalurgia de Polvos en las bielas de automóviles y un árbol de levas, hechos de Metalurgia de Polvos para cuatro y ocho motores de automóviles de cilindro forjado en caliente. El uso de árboles de levas Metalurgia de Polvos en los motores de automóviles y tapas de bancada.

I.5.- La obra principal de la Pulvimetalurgia en la literatura

Una serie de obras literarias son dignas de mención, en relación con el fondo de la metalurgia de polvos. Una de las primeras obras de importancia fue Principios de Pulvimetalurgia por W. D. Jones, publicado en 1937 en Inglaterra [I.67]. Se actualizó en 1960 y publicada como Principios Fundamentales de Pulvimetalurgia [I.68]. La primera publicación de Rusia era por Balshin [I.69] y apareció en 1938. El primer texto integral en alemán, Pulvermetallurgie und Sinterwerkstoffe, fue publicado por R. Kieffer y W. Hotop en 1943 [I.70]. En los Estados Unidos, la primera publicación fue por H. H. Hausner en 1947 [I.71], seguido de cerca por P. Schwarzkopf [I.72]. Dos años después, el primero de cuatro volúmenes de un tratado sobre la metalurgia de polvos, una gran obra de C. G. Goetzel [I.73] fue publicado.

I.6.- Planteamiento del problema

Las fallas repentinas de los elementos sometidos a cualquier tipo de carga, son siempre costosas y en ocasiones resultan en pérdidas humanas. En todas las épocas se ha hecho investigación sobre la manera de mejorar la calidad de los componentes mecánicos y de prolongar su vida útil. Además de conocer el por qué y cómo se comportan estos elementos bajo la influencia de diferentes configuraciones de carga. Para lo cual se han empleado diferentes métodos, como son los analíticos, los numéricos y los experimentales. México ha dependido tecnológicamente de otros países y una dependencia tecnológica obligatoria, así surge la necesidad de desarrollar la fabricación de armamento con nuevos métodos para lo cual por lo cual está desarrollando diferentes proyectos tecnológicos ahorrando tiempo y costo de fabricación. Por lo que se analiza por método de elementos finitos la palanca de un fusil de asalto *FX-05 Xiuhcoatl* y su fabricación por el método de metalurgia de polvos. Como nos ha enseñado la historia en el paso del tiempo las guerras hacen que avancemos tecnológicamente para después aprovechar esos conocimientos y aplicarlos en la vida cotidiana, así podemos utilizar la tecnología de polvos para el desarrollo de nuevas prótesis humanas o de animales mejorar maquinas aprovechando al máximo los conocimientos adquiridos teóricamente y llevarlos a la práctica para mejorar y tener un mejor estilo de vida.

I.7.- Sumario

En este capítulo se desarrolló una reseña de los antecedentes históricos sobre la tecnología de polvos y la metalurgia de polvos. Desde la raíz de sus inicios en el Universo, en el que se proporciona una descripción que se ha intentado que sea lo más amplia posible, hasta el desarrollo de tecnologías de última generación. Que han incorporado partes metalúrgicas a sus mecanismos y sistemas. Se muestran los principales orígenes de la tecnología de polvos como una visión relativa de los avances alcanzados en este campo. Así como, el saber qué ha impulsado el estudio en este tema. A lo largo de este capítulo, se ha visto como el hombre tiene la necesidad de diseñar elementos de mecanismos robustos, funcionales y confiables. Aplicables al desarrollo, dependiendo del tiempo o a el tipo de época teniendo como referencia los polvos en el Universo y copiando los procesos de unión de materia, polvos y gases. Para así poder. Alcanzar avances científicos y tecnológicos que requieren de conceptos de Ingeniería, como; diseño de mecanismos, modelaje, simulación y procesamiento. Con el fin de determinar su comportamiento, mediante el análisis que justifique el desempeño de estos durante el funcionamiento y obtener criterios capaces de predecir el comportamiento de los sistemas involucrados.

I.8. - Referencias

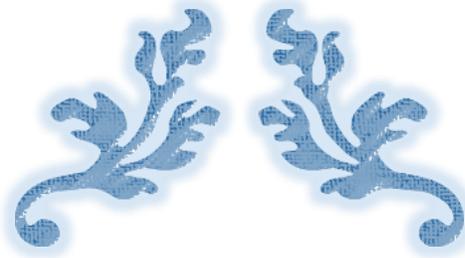
- 1.- Barrow, J. D, *The World Within the World*, Ed. Oxford University Press, pp 342-343, 1990.
2. - Mather, J. C. y Boslough, J., *The Very First Light; The True Inside Story of the Scientific Journey Back to the Dawn of the Universe*, Ed. Basic Books, pp 300, 1996.
- 3.- Alpher, R. A. y Herman R., Reflections on early work on Big Bang cosmology, *Physics Today*, Vol. 41, No. 8, pp 24-34, 1988.
4. - Singh, S. *Big Bang; The Origins of the Universe*, Ed. Fourth Estate, 2005.
5. - Davies, P. C. W. *The Mind of God; The Scientific Basis for a Rational World*, Ed. Simon & Schuster, 1992.
- 6.- Beatty, J. K., Collins-Petersen, C. y Chaikin, A., *The New Solar System*, Ed. University Press, Cambridge University, 1999.
- 7.- Teruggi, M. E., El origen de los granitos, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Vol. VII, No. 4, pp 233-263, 1952.

-
- 8.- del Campo-Amezcuca, J. M., Chagollán-Amaral, F. A., Martín del Campo-Becerra, I. B., López-Aguilar, I., González-Reynoso, F., Romo-Ríos, L. A. y Almaguer-Ramírez, R., *Geografía*, Ed. Umbral, pp 56, 2006.
 - 9.- Nicolau, F., *Introducción a la Cosmología*, Ed. Panamericana, pp 185, 1998.
 - 10.- Martínez, V. J., Miralles, J. A., Marco, E. y Galadí-Enríquez, D., *Astronomía Fundamental*, Ed. Universitat de Valencia, pp 102, 2005.
 - 11.- Lee, P. W., Trudel, Y., Iacocca, R., German, R. M., Ferguson, B. L., Eisen, W. B., Moyer, K., Madan, D. y Sanderow, H., *Powder Metal Technologies and Applications*, ASM Handbook, Volume 7, pp 10-22, 2000.
 - 12.- Kalpakjian, S. y Schmid, S. R., *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Ed. Pearson Education, pp 4-6, 2002.
 - 13.- Carpenter, H. C. H. y Robertson, J. M., The metallography of some ancient Egyptian implements, *Nature*, Vol. 125, pp 859-862, 1930.
 14. - Jones, W. D., *Fundamental Principles of Powder Metallurgy*, Ed. Edward Arnold, London, pp 593 1960.
 - 15.- Molera-Solà, P., *Soldadura Industrial; Clases y Aplicaciones*, Ed. Productica, pp 61-62, 1992.
 - 16.- Bergsöe, P., *The Metallurgy and Technology of Gold and Platinum Among the Pre Columbian Indians*, Ed. Danmarks Naturvidenskabelige Samfund, Vol. 44, 1937.
 - 17.- Lewis, W., Experimental examination of a white metallic substance said to be found in the gold mines of Spanish West Indies, *Philosophical Transactions; The Royal Society*, Vol. 48, pp 638-689, 1753-1754.
 18. - Scheffer, H. T., An addendum to the same metal, *Kongl. Vet. Akad. Handlingar*, Vol, 13, pp 276-278, 1752.
 19. - Achard, F. K., *Nouveaux Mem. Academic Royal Berlin Science*, Vol. 12, pp 20-26, 1781.
 20. - Moussiin-Poushkin, A., Neues allgem, Allgem, *Journal of Chemistry*, Vol, 4, pp 411, 1804.
 - 21.- Ridolfi, C., Purification of platinum, *Quarterly Journal of Science College of Literature Science and the Arts*, Vol 1, pp 259-260, 1816.
 22. - Rochon, A., Molecular and crystal structure of a platinum complex with aquo and sulfate ligands: aquo (N, N'- dimethylethylenediamine) (sulfato) platinumhydrate, *Journal of Physical Chemistry*, Vol 47, pp 3-15, 1798.
-

-
- 23.- Knight, R., A new and expeditious process for rendering Platina malleable, *Philosophical Magazine Series I*, Vol. 6, No. 21, pp 1-3, 1800.
 - 24.- Tilloch, A., A new process of rendering Platina malleable, *Philosophical Magazine*, Vol. 21, No. 82, pp 175-181, 1805.
 25. - Gehlen A. F., Ueberein neues Verfahren das platin zum Verarbeiten geschickt zu Machen, *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 7, pp 309-514, 1813.
 26. - Baruel, M., Process for procuring pure Platinum, Palladium, Rhodium, Iridium and Osmium from the ores of Platinum, *Philosophical Magazine Series I*, Vol. 59, No. 287, pp171-179, 1822.
 - 27.- Kronberg, B. I., Coatsworth, L. L. y Usselman, M. C., Mass spectrometry as a historical probe; Quantitative answers to historical questions in metallurgy, *Archaeological Chemistry II, Advances in Chemistry Series*, No. 205, Ed. American Chemistry Society, pp 295-310, 1984.
 28. - Sobolewskoy P., Ueber das Ausbringen des Platins in Russland, *Annalen der Physik und Chemie*, Vol. 109, pp 99, 1834.
 - 29.- Marshall, W., An account of the Russian method of rendering platinum malleable, *Philosophical Magazine Series I*, Vol. 11 (No. II), pp 321-323, 1832.
 - 29.- Wollaston, W. H., On a method of rendering Platina malleable, *Philosophical Magazine Series 2*, Vol. 6, No. 31, pp 1-8, 1829.
 30. - Streicher, J. S., *Powder Metallurgy*, Ed., American Society for Metals, pp 16, 1942.
 31. - Osann, G. W., *Annalen Physik Chemistry*, Vol. 128, pp 406, 1841.
 32. - Gwynn, S., Improved composition of matter, *U S Patent 101 863 A*, 1870.
 33. - Auer-Von Welsbach, C., Manufacture of Electric Filaments, *U S Patent 976 526 A*, 1910.
 34. - Kuzel, H., Process of Peptisating Colloidal Elements, *U S Patent 899 875 A*, 1908.
 35. - Kuzel, H., Manufacturing alloys, *U S Patent 912 246 A*, 1909.
 - 36.- Smith, C. R., *Powder Metallurgy*, Ed. American Society for Metals, pp 4, 1942.
 - 37.- Deller, A. W., *Powder Metallurgy*, Ed. American Society for Metals, pp 582, 1942.
 38. - Polte, E., Process of making articles of wolfram and lead, *U S Patent 735 293 A*, 1903.
 39. - Coolodge, W. D., Lamp-filament, *U S Patent 963 872 A*, 1910.
 40. - Lederer, A., Manufacture of incandescent bodies of metallic tungsten or molybdenum for electric incandescent lamps, *U S Patent 1 079 777 A*, 1913.
-

-
41. - Oberlaender, O., Metal-filament manufacture, *U S Patent 1 208 629 A*, 1916.
 - 42.- Cogswell, F. N., *Thermoplastic Aromatic Polymer Composites*, Ed. Butterworth-Heinemann Ltd, pp 1-50, 1992.
 - 43.- German, R. M., Ferguson, B. L., Eisen, W. B., Moyer, K., Madan, D. y Sanderow, H., *Powder Metal Technologies and Applications*, Ed. ASM Handbook, Vol. 7, pp 10-40, 2000.
 44. - Liebmann, A. J., Hardened material for use in the arts as substitutes for diamonds, *U S Patent 1 343 976 A*, 1920.
 - 45.- Liebmann, A. J. y Laise, C. A., Hardened material for use in the arts as substitutes for diamonds, &c., and process of making the same, *U S Patent 1 343 977 A*, 1920.
 46. - Schroter, K., Hard-metal alloy and the process of making same, *U S Patent 1 549 615 A*, 1925.
 47. - Clemens, L. A., Alloy and the method of producing same, *U.S. Patent 1 757 846*, 1930.
 - 48.- Viertel, H. y Egly, G., Method of making electrically-conducting bodies for use as contacts, *U S Patent 842 730 A*, 1907.
 - 49.- Clemens, L. A., Alloy and preparation of the same for contact bodies and ignition points, *U S Patent 1 418 081 A*, 1922.
 50. - Clemens, L. A., Alloy and the method of producing same, *U. S. Patent 1 423 338 A*, 1922.
 - 51.- Clemens, L. A., Refractory metallic body of high density and process for making the same, *U S 1 531 666 A*, 1925.
 52. - Gebauer, C. L., Process of producing metal bodies, *U S Patent 1 223 322 A*, 1917.
 53. - Heinrich, B., Hard tool and implement and in process of making, *U S Patent 1 512 191 A*, 1924.
 54. - Gillette, R. T., Welding electrode, *U S Patent 1 539 810 A*, 1925.
 55. - Pfanstiehl, C. A., Compressed tungsten powder, *U S Patent 1 315 859 A*, 1919.
 56. - Loewendahl, V., Process of manufacturing porous metal blocks, *U S Patent 1 051 814 A*, 1913.
 - 57.- Gilson, E. G., Bearing material suitable for internal-combustion engines, *U S Patent 1 177 407 A*, 1916.
 - 58.- Gilson, E. G., *General Electric*, Ed. Reverté, Vol. 24, pp 949-951, 1921.
 59. - Boegehold, A. L. y Williams, H. M., Bearing, *U S Patent 1 642 347 A*, 1927.
 60. - Boegehold, A. L. y Williams, H. M., Alloy structure, *Patent 1 642 348 A*, 1927.
-

-
61. - Boegehold, A. L. y Williams, H. M., Alloy structure, *Patent 1 642 349 A*, 1927.
 62. - Williams, H. M. y Boegehold, A. L., Alloy structure, *Patent 1 766 865 A*, 1930.
 63. - Claus, C., Bearing material and method of making the same, *U S Patent 1 648 722 A*, 1927.
 64. - Claus, C., Pressed-metal article and method of and machine for making same, *U S Patent 1 607 389 A*, 1926.
 - 65.- Morral, F. R., Jimeno, E. y Molera, P., *Metalurgia General*, Tomo II, Ed. Reverté, pp 977-1022, 1985.
 - 66.- DeGarmo, E. P., Temple-Black, J. y Kohser, R. A., *Materiales y Procesos de Fabricación*, Ed. Reverté, pp 371-388, 1994.
 67. - Jones, W. D., *Principles of Powder Metallurgy*, Ed. Arnold, London, 1937.
 68. - Jones, W. D., *Fundamental Principles of Powder Metallurgy*, Ed. Arnold, London, 1960.
 69. - Balshin, M. Y. J., *Metal Ceramics*, Ed. Gonti, 1938.
 70. - Kieffer, R. y Hotop, W., *Pulvermetallurgie und Sinterwerkstoffe*, Ed. Springer, 1943.
 71. - Hausner, H. H., *Powder Metallurgy*, Ed. Chemical Publishing Co., 1947.
 72. - Schwarzkopf, P., *Powder Metallurgy*, Ed. Macmillan, 1947.
 - 73.- Goetzel, C. G., *Treatise on Powder Metallurgy; Applied and Physical Powder Metallurgy*, Vol. 1-4, Ed. Interscience, 1949.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO DE LA METALURGIA DE POLVOS



El éxito es ir de fracaso en fracaso sin perder el entusiasmo.-Winston Churchill

II.1.- Metalurgia de polvos [II.1]

La metalurgia de polvos (*PM*) es una técnica de conformado de materiales que se remonta a la antigüedad en la cual se utilizaba para recubrir algunas joyas con polvos de metales preciosos o para la fabricación de herramientas utilizando polvo de hierro que data del año 300 A. C.

El atractivo de la metalurgia de polvos es la habilidad de fabricar piezas de formas complejas con excelentes tolerancias y alta calidad. En la metalurgia de polvos se utilizan polvos metálicos con ciertas características como; tamaño, forma y empaquetamiento para luego crear una figura de alta dureza y precisión.

El proceso puede ser automatizado con un relativamente bajo consumo de energía, alto porcentaje de utilización de materias primas y bajo costo de manufactura o mano de obra. Esta técnica es flexible y capaz de emplear un amplio rango de materiales y proporcionar un gran número de micro estructuras y propiedades.

II.1.1.- Definición

La metalurgia de polvos es el estudio del tratamiento de polvos metálicos, incluyendo su fabricación, caracterización, y conversión de dichos polvos metálicos en componentes útiles de Ingeniería. Es decir la metalurgia de polvos es el arte y ciencia de producir polvo metálico y de utilizarlo para la producción de materiales macizos y formar objetos [II.2].

II.2.- Descripción de las etapas que constituyen a la metalurgia de polvos [II.1]

En el diagrama de la Figura II.1 se muestran de modo esquemático las etapas más relevantes en el proceso pulvimetalúrgico. El cual consiste en procesar el metal para obtener el polvo metálico, las técnicas empleadas para tal efecto dependerán de las características que se deseen suministrar al polvo final. Subsecuentemente el polvo es mezclado para que ostente una mejor homogeneidad y al ser compactado promueva compactos con pequeños gradientes de densidad lo que conllevará a una mejor resistencia de los compactos y posiblemente a una mejor sinterización de los mismos. Las operaciones *post* sinterizado se emplean para mejorar las propiedades internas y superficiales del producto final Mientras en la Figura II.2 se muestran las etapas básicas del proceso.

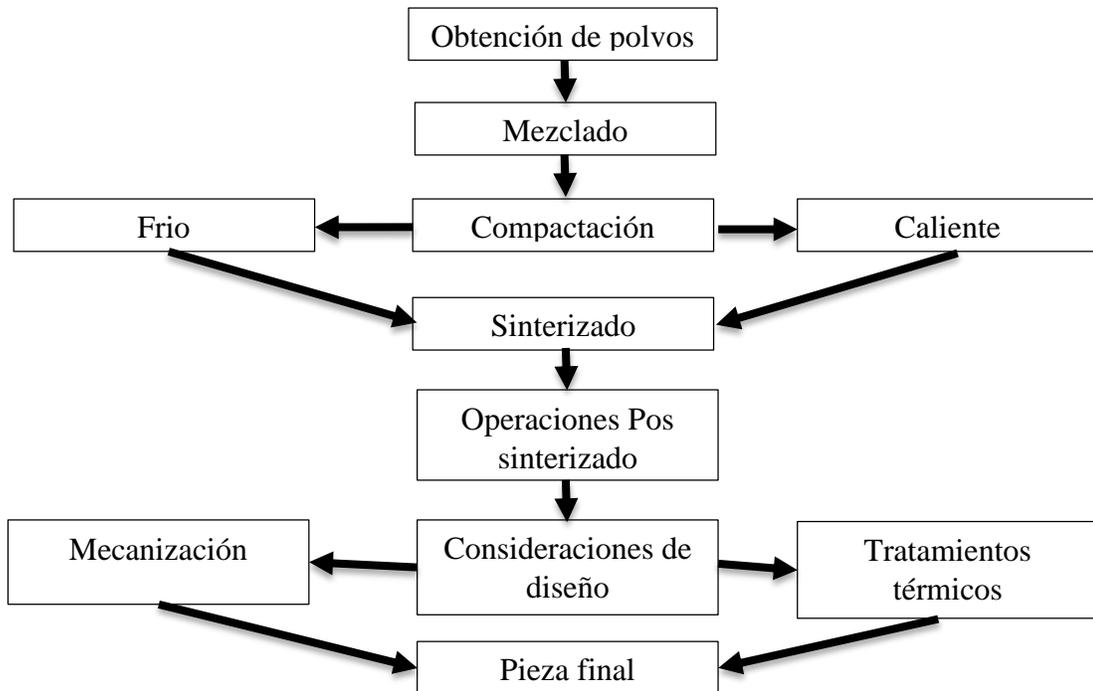


Figura II.1.- Diagrama de etapas del proceso pulvimetalúrgico

La fabricación de componentes *PM* se inicia con la mezcla del polvo metálico con el lubricante y los aditivos. Esta mezcla es compactada como pieza dentro de un molde con la forma deseada mediante la aplicación de presiones, que para el caso de aceros sinterizados oscila entre 400 y 700 MPa. Después de la compactación, el polvo toma las propiedades de un sólido y dicho estado del proceso se denomina usualmente *en verde*. Posteriormente, el sinterizado bajo atmósfera controlada produce la unión metalúrgica entre partículas. Algunas piezas son utilizadas directamente en la condición de sinterizado mientras que otras son sometidas a operaciones secundarias de acabado (mecanizado, calibrado, impregnación de aceite, etc.) o tratamientos térmicos (nitruración, temple, etc.) [II.3].

II.2.1.- Métodos de obtención de polvos metálicos

En los últimos tiempos, se han desarrollado y perfeccionado nuevos métodos de producción de diversos elementos mecánicos que, por la complejidad de sus geometrías o características de sus Aleantes, no se habían podido fabricar mediante los procesos convencionales. Tal es el caso de los procesos Pulvimetalúrgicos. El éxito en un proceso Pulvimetalúrgico depende en

gran medida de las propiedades físicas y químicas de los polvos metálicos empleados, tanto en partícula individual como en conjunto o masa [II.1].

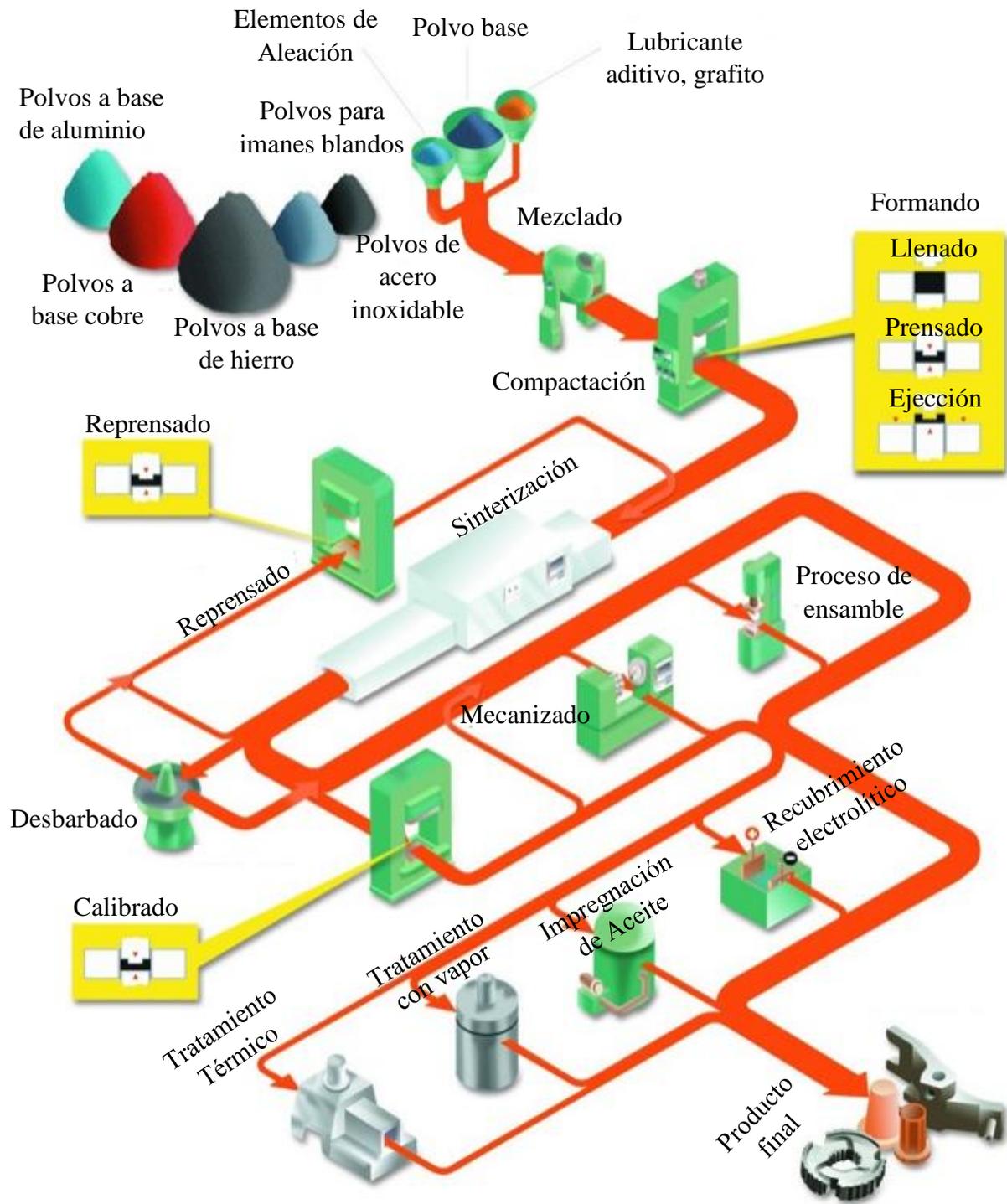


Figura II.2.- Etapas básicas del proceso de pulvimetalurgia [II.3]

Las propiedades físicas del polvo metálico final se ven fuertemente influenciadas por el tamaño de partícula, distribución de tamaño de partícula, forma, microestructura y condición superficial del polvo [II.1]. Que dependerán del método utilizado para la fabricación del polvo ya que existen diversas técnicas de elaboración del mismo, entre las más importantes se encuentran; Atomización, Electrolisis, Procesamiento Químico y la Molienda Mecánica, entre otras. Cada técnica produce polvos con características especiales. En la Tabla II.1 se muestran las posibles formas de polvos y su descripción.

Tabla II.1.- Posibles formas de polvos y su descripción [II.2]

<p>A.-Esféricas</p> 	<p>B.-Gota</p> 
<p>C.-Cilíndrica</p> 	<p>D.-Ligamental</p> 
<p>E.-Irregular</p> 	<p>F.-Esponjosa</p> 
<p>G.-Dendrita</p> 	<p>H.-Agregados</p> 
<p>I.-Cúbico</p> 	<p>J.-Acicular</p> 
<p>K.-Hojuela</p> 	<p>L.-Poligonal</p> 
<p>M.-Erizo</p> 	<p>N.-Angular</p> 

II.2.2.- Molienda mecánica [II.1]

Existen cuatro procesos fundamentales de molienda mecánica; impactación, rozamiento, cizallamiento y compresión. La impactación implica un proceso rápido instantáneo, golpeando el material causando rompimiento y resultando en reducción de tamaño. El rozamiento aplica la reducción en el tamaño de partícula por medio de un movimiento de fricción. El cizallamiento forma un tipo de hendidura o fractura por corte. Los polvos formados por cizalladura son gruesos y a menudo no se encuentran en la metalurgia de polvos a no ser que el material sea extremadamente duro. Finalmente las fuerzas de compresión pueden romper un material convirtiéndolo en polvo grueso, si este es lo suficiente quebradizo o frágil. En muchos casos se pueden dar combinaciones de procesos de impactación, rozamiento, cizallamiento y compresión para formar polvo metálico. La molienda por impacto mecánico es recomendable para polvos en el rango de medida de 1 a $10\mu\text{m}$.

II.2.3.- Molienda por impacto mecánico [II.2]

La molienda por impacto mecánico usa bolas duras y es muy útil para la fabricación de polvos de materiales quebradizos. Esta técnica de molienda, consiste en un recipiente cilíndrico lleno con bolas y el material a ser molido (Figura II.3).

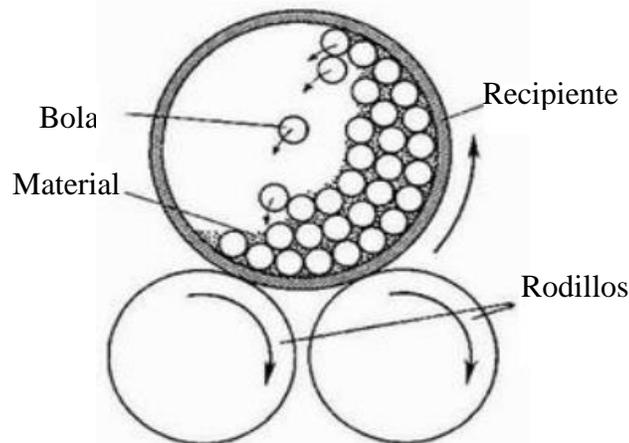


Figura II.3.- Molino de bolas [II.2]

Debido al giro del recipiente, las bolas colisionan constantemente con el material convirtiéndolo en polvo. La fuerza de presión T requerida para fracturar un material quebradizo en el molino está

relacionada con los defectos estructurales y a la sensibilidad de propagación de la grieta según la ecuación:

$$\sigma = \left(2 \frac{Er}{D}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{II.1}$$

Donde E es el modulo elástico, r es el defecto o radio de la punta de la grieta existente y D es la medida de la partícula. Por consiguiente las partículas grandes requieren menor fuerza de impacto para fracturar. A medida que el tamaño de partícula disminuye durante la molienda, la fuerza requerida para continuar reduciendo la dimensión de la partícula se incrementa. Realizar moliendas prolongadas es menos productivo. Existe una relación simple, Ecuación II.2, para estimar la energía relativa requerida para moler un polvo. Comenzando desde una medida inicial de partícula de D_i , la energía W requerida para obtener una medida final de partícula D_f es estimada por la siguiente fórmula empírica [II.2]:

$$W = g(D_f^{-a} - D_i^{-a}) \quad \text{II.2}$$

Con g siendo una constante, que depende del material, las bolas, el diseño del molino y de la operación del molino. El exponente a adquiere valores entre 1 y 2. La energía requerida para reducir un polvo a medidas pequeñas varía con el cambio relativo en la medida de la partícula. De este modo el tiempo de molienda depende del polvo disponible, el cambio de medida de la partícula, el tamaño medio de partícula que se quiera obtener y la velocidad de giro del molino. La molienda mecánica usualmente no es usada para algunos metales dúctiles ya que estos no son fáciles de fracturar.

Debido a que las partículas dúctiles soldan en frío entre sí, dando una baja eficiencia al proceso, con frecuencia en rangos de 1 al 3%. Ya que los materiales quebradizos son más sensibles a la fractura es apropiado realizar moliendas sobre los óxidos previamente a la reducción. Con cierta frecuencia se usan fluidos o atmósferas protectoras para reducir la oxidación y ayudar a la molienda. Por otro lado dos de las principales fuentes de pérdidas de la energía suministrada durante la molienda son el ruido y el calor generado durante el proceso. Cabe señalar que en

general los polvos metálicos formados por molienda sufren trabajo en frío, son irregulares y exhiben baja fluencia y características de empaquetamiento malas [II.3].

II.2.4.- Clasificación y mezclado de polvos

Las diversas técnicas de producción de polvos generalmente producen un rango de distribución de tamaños de partícula y este incluye tamaños que en muchas ocasiones no son deseables para la aplicación final del polvo, por este motivo se llevan a cabo procesos de clasificación o separación para ajustar la distribución de tamaños de partícula en un rango apropiado. Por otro lado y como una etapa previa a la compactación o consolidación de los polvos se realiza el proceso de mezclado, cuyas funciones principales son homogeneizar la distribución de tamaños de partícula en todo el polvo y en el caso de la producción de aleaciones partiendo de polvos elementales, distribuir las partículas de los elementos de aleación requeridos en el producto final y adicionalmente para incorporar los lubricantes que sirven para reducir la fricción de Interpartículas y con las paredes de los moldes. A continuación se describen las formas más usuales de clasificación y homogenización de polvos [II.3].

II.2.5.- Tamizado

El cribado o tamizado a máquina se usa casi universalmente, ya que el cribado manual es largo y tedioso y su exactitud depende en gran parte del operador. Las cribas seleccionadas para la prueba se colocan en forma de columna, o nidada, con la criba de aperturas más grandes en la parte superior y la más fina en el fondo. Un depósito receptor cerrado se coloca debajo de la criba del fondo para recibir las partículas finales de menor tamaño y se coloca una tapadera sobre la parte superior de la criba más gruesa para evitar el escape de la muestra.

El material que se va a ensayar se coloca en la criba superior, más burda y entonces el juego de cribas se coloca en un sacudidor de cribas que vibra el material en un plano vertical y, en algunos modelos, en plano horizontal. Durante el sacudimiento, el material de menor tamaño cae a través de las cribas sucesivas hasta que es retenido sobre una criba que tiene aberturas que son ligeramente más pequeñas que el diámetro de las partículas. En esta forma la muestra se separa en varias fracciones de tamaño, como se esquematiza en la Figura II.4.



Figura II.4.- Disposición de cribas verticalmente [II.4]

Después del tiempo necesario, el conjunto de cribas se separa y se pesa la cantidad de material retenido en cada una de las cribas. La mayor parte de las partículas de malla próxima, que bloquean las aberturas, se pueden quitar invirtiendo la criba y golpeando suavemente el armazón. Cuando esto falla, se pasa suavemente una brocha de alambre de bronce suave o de nylon por el lado opuesto de la tela. El cegamiento constituye un problema que se agrava mientras más fina sea la apertura; en tal sentido la limpieza, aun con brocha de pelo suave, tiende a distorsionar las mallas de las cribas de aperturas menores a 150 μm . Por lo cual es recomendable limpiarlas con un aparato de ultrasonido [II.4].

II.2.6.- Series de tamices o cribas

Existen diversas series que incluyen la nomenclatura para clasificar los tamaños de apertura de las mallas de los tamices, las más empleadas se encuentran las que a continuación se mencionan [II.1]:

- Serie de tamices *U.S.*
- Serie *Tyler*.
- Serie británica estándar.

II.2.6.1.- Mezclado [II.1]

El mezclado es una operación que tiene como propósito principal la eliminación de segregación de los polvos y la incorporación de un lubricante cuya función primordial es la reducción de la fricción que existe entre el polvo metálico y la superficie de las herramientas (paredes de la matriz; punzón de compactación etc.). De igual manera es importante la lubricación para facilitar la extracción del compacto, minimizando la tendencia a que se fracture. Entre los lubricantes más empleados se encuentran:

- Ácido esteárico.
- Estearina.
- Estearatos metálicos.
- Estearato de Zinc.
- Compuestos orgánicos como las ceras naturales.

La adecuada selección del lubricante es primordial ya que una mala selección puede afectar desfavorablemente a la resistencia en verde así como también a la resistencia mecánica del producto sinterizado.

II.2.6.2.- Compactación de polvos

La compactación es una operación crítica del proceso pulvimetalúrgico, ya que la forma final y las propiedades mecánicas son determinadas en este proceso, debido a que el grado de homogeneidad de la densidad del compacto se ve afectado después de ser prensado (en verde) [II.5].

La compactación de polvos tiene como principales objetivos [II.5]:

- a) Consolidación de polvo en cualquier forma deseada.
- b) Proporciona un alto grado de precisión dimensional. Con la consideración de que algunas dimensiones cambian después de la sinterización.
- c) La posibilidad de obtener diferentes niveles de porosidad y tipos de porosidad.

- d) Aporta adecuada resistencia al polvo compactado (*en verde*) para subsiguientes manipulaciones.

El segundo y tercer factor no son precisamente lo mismo. Las reacciones Químicas o Metalúrgicas durante el Sinterizado pueden efectuar cambios en las dimensiones o la densidad en diferentes grados o niveles de uniformidad, por lo tanto la compactación sería considerada como un proceso que proporciona un significativo control y manipulación de cada uno de estos factores, por separado. Adicionalmente para algunas aplicaciones es conveniente considerar a la porosidad como algo deseable respecto al nivel de densidad. La compactación puede ser usada para controlar selectivamente el grado de porosidad y por lo tanto es muy eficaz para alcanzar propiedades específicas de ingeniería. Además es factible producir una parte en la que el grado de porosidad (o densidad) no sea uniforme intencionalmente [II.6].

Para poder efectuar el proceso de compactación existen diversos métodos entre los cuales se encuentran [II.6]:

a) Técnicas que aplican presión:

- En dado.
- Isostática.
- Conformado a alta energía.
- Forja.
- Extrusión.
- Vibratoria.
- Continua.

b) Técnicas *sin aplicación de presión* (de presión baja):

- Vaciado de suspensiones.
- Por gravedad.
- Continua.

II.7.- Proceso de sinterización [II.7]

El término sinterización describe un proceso de interacción entre partículas, activado térmicamente, durante el cual una masa de polvo, que puede estar compactada de forma más o menos fuerte, o bien un bloque de polvo compactado, se densifica para solidificar con la composición preestablecida. Por extensión, también se refiere a los diversos procesos, generalmente físicos, que tienden a variar la porosidad del conjunto. En el sinterizado, mezclas de elementos con diferentes composiciones se transforman para obtener un material de estado uniforme, comparable a las aleaciones cuyas propiedades pueden explicarse mediante su diagrama de fases.

La sinterización es el proceso fundamental para el conformado en pulvimetalurgia, proporcionando a la pieza la resistencia y estabilidad exigible para su uso posterior. Se realiza a temperaturas levemente inferiores a la temperatura de fusión del elemento mayoritario de la mezcla, lo que provoca un proceso de difusión atómica que intensifica el contacto entre partículas, aumentando de esa forma las interacciones debidas a la tensión superficial. Las partículas forman una pieza uniforme en la cual puede llegar a producirse un proceso de recristalización. El proceso debe realizarse bajo atmósfera controlada y dado que la temperatura de Sinterizado oscila entre el 60 y el 90% de la temperatura de fusión del elemento base, puede suceder, en sinterizados de elementos diferentes, que uno o varios de los elementos minoritarios alcancen la temperatura de fusión. En este caso es primordial controlar la fase líquida para que no altere la forma final buscada.

Durante el sinterizado, el sistema de partículas, que posee un elevado nivel de energía libre, se transforma en un sistema más estable y menos poroso. El mecanismo conductor del proceso es, precisamente, la diferencia de energías entre el estado inicial y el final que se produce al tratar de encontrar las partículas el estado de mínima energía, o sea reduciendo las superficies, tanto internas como son las barreras de polvos encapsulados o las fronteras de grano, como externas entre las que se encuentran las fronteras entre partículas o las superficies de contacto entre poros interconectados. Al mismo tiempo se eliminan defectos estructurales, especialmente mediante el contacto entre partículas adyacentes que se han generado en el proceso de compresión, gracias a la interacción de las fronteras de grano de gran ángulo.

En los sistemas formados por polvos heterogéneos puede existir una, fase líquida ya que la temperatura del proceso viene regida por la de fusión del polvo base y puede haber algún componente que funda a temperatura inferior; sucede entonces que los niveles de energía libre inicial son diferentes, lo que provoca que haya distintos mecanismos de difusión atómica, es decir lo que se denomina una heterodifusión, bien sea a través de las superficies de contacto, o a lo largo de las fronteras de grano o incluso por medio de las vacantes de red. En definitiva, grandes cantidades de materia serán transportadas en la sinterización mediante el aglomerado de polvos y en función del tipo y estado de los mismos, actuarán uno o más mecanismos.

El proceso de sinterización se divide en distintas fases, comenzando por la elaboración de materias primas en sus distintos estados, polvos o granos; siguiendo por la mezcla de las materias primas, teniendo muy en cuenta el producto a obtener; conformando, a continuación, las materias primas a las formas necesarias, pero solo alcanzando las condiciones que permiten su posterior manipulación; finalizando el proceso al obtener las piezas las características Mecánicas solicitadas, mediante su sinterización.

II.7.1.- El conformado pulvimetalúrgico [II.7]

El conformado pulvimetalúrgico es un proceso aplicable a materiales metálicos, al igual que lo son la forja, el laminado o la estampación. Su competidor más directo es el moldeo de precisión o el moldeo a la cera perdida. Sin embargo, el desarrollo reciente de este tipo de conformado se ha visto favorecido por factores tanto técnicos, la demanda de productos de difícil Hechurado por medios tradicionales, como económicos, ya que por una parte la materia prima que se utiliza en estos procesos tiene un valor elevado y si se compara con otro tipo de conformados se producen menos pérdidas de materia, y por otra se eliminan etapas de fabricación que inciden de forma muy favorable en el precio final de la pieza.

Un conformado que puede considerarse pulvimetalúrgico es el de peletización, aunque dado que se reserva para designar la sinterización de minerales de hierro aglomerados en fase líquida o casi líquida, para su posterior procesado en el horno alto, se suele tratar de forma específica.

Un precedente histórico de este tipo de conformado se tiene en los antiguos métodos de compactación, que eran métodos que suplían la carencia de hornos apropiados para alcanzar la fusión del Hierro con la reducción de menas naturales de Carbón vegetal, obteniéndose una esponja metálica que poseía características comparables a la materia pulverulenta que se sinteriza en el conformado pulvimetalúrgico; su elevada superficie interna posibilita la transferencia de materia de forma parecida a como sucede entre partículas de polvo, compactándose mediante forja, el material así homogeneizado. Fue la técnica utilizada por los Hititas en el *Siglo XIII* A.C. para fabricar espadas, con las que derrotaron a un imperio superior, tanto organizativa como culturalmente, como era el Egipto. Una mejora de esta técnica fue la *Farga Catalana* que se utilizó desde la época romana hasta el *Siglo XIII*.

La pulvimetalurgia, como proceso de conformado a escala industrial, se utiliza por primera vez en 1827 cuando el científico ruso *P. Sobolevsky* fabricó monedas de Platino sinterizando y estampando polvos de ese metal [II.2]. Bastante tiempo después, en 1900, *Auer Von Welsbach* aplicó sobre polvos de Osmio la sinterización y prensado para obtener filamentos de lámparas de forma directa ya que los polvos aglutinados se sinterizaban gracias al paso de la corriente eléctrica. En 1910 se sustituyó el Osmio por Olframio, pero el proceso siguió siendo el sinterizado pulvimetalúrgico. Poco después, en 1920, se comenzaron a fabricar bronce porosos auto lubricantes para la industria de la automoción. Sin embargo, el mayor empuje recibido por el proceso de conformado pulvimetalúrgico, tuvo lugar al aplicarlo a las aleaciones de carburo de Wolframio aglomeradas con Cobalto, que bajo el nombre comercial de *Widia* se convirtieron casi en imprescindibles para la industria de corte, siendo de uso generalizado hasta nuestros días.

II.8.- Fundamentos teóricos del sinterizado [II.1]

El sinterizado es la unión de partículas a altas temperaturas, aunque inferiores a las de fusión, mediante mecanismos de transporte atómico en estado sólido. A escala micro-estructural la unión se realiza gracias al crecimiento cohesionado de los cuellos de unión que se forman entre las partículas en contacto. En la Figura II.5 se puede apreciar, en dos imágenes de microscopia electrónica, la evolución de este fenómeno entre dos partículas esféricas sinterizadas que corresponden a polvos de Níquel tratados en vacío a 1 030°C [II.1].

Los cambios estructurales, asociados al crecimiento del cuello de unión durante el sinterizado, se rigen por mecanismos de transporte que corresponden, en su mayor parte, a procesos de difusión. La difusión se activa térmicamente, es decir que se requiere de la energía térmica para el movimiento atómico.

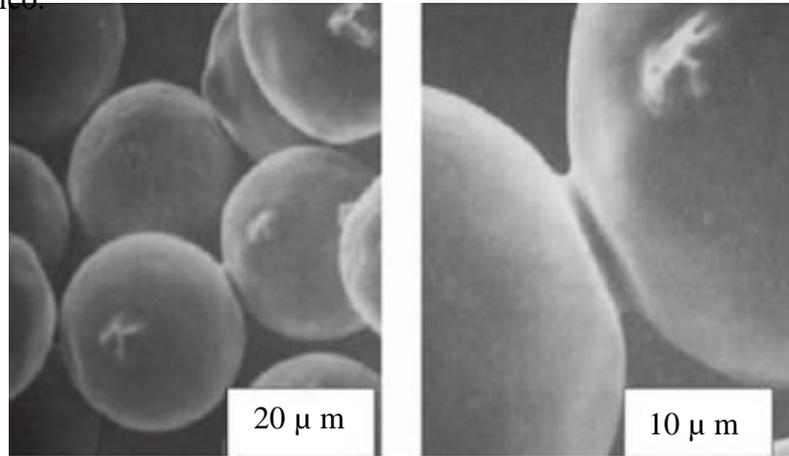


Figura II.5.- Microscopia electrónica de polvos sinterizados de Níquel [II.1]

La migración depende de que los átomos alcancen una energía igual o superior a la energía de activación necesaria para desplazarse a las vacantes de red. La densidad de vacantes y el número de átomos con energía suficiente para ocupar esos espacios viene definida por la ley de *Arrhenius*:

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \text{II.3}$$

Donde $\frac{N}{N_0}$ es la razón de espacios ocupables por átomos activados frente al número total de los mismos, Q es la energía de activación, R es la constante de los gases perfectos y T es la temperatura absoluta.

Se puede explicar el proceso físico real de la interacción de partículas, mediante el modelo de dos esferas en contacto tal y como se muestra en la Figura II.6. La unión entre partículas en contacto actúa sinérgicamente para favorecer el progreso del sinterizado, siguiendo los pasos con los que se esquematiza el proceso de unión de partículas hasta fundirse en una sola partícula. La sinterización se inicia al ponerse dos partículas en contacto, la temperatura y presión hacen que se

forme una zona común, en poco tiempo, que crece de forma relativamente rápida. El segundo paso, que necesita un tiempo más largo, va eliminando aristas en la zona de contacto de ambas partículas a la vez que crece la superficie de la misma y se empiezan a desarrollar, en la zona común, propiedades diferentes a las de las partículas separadas, este cambio puede ir acompañado de un progresivo aislamiento de los poros y una ralentización de la velocidad de sinterizado.

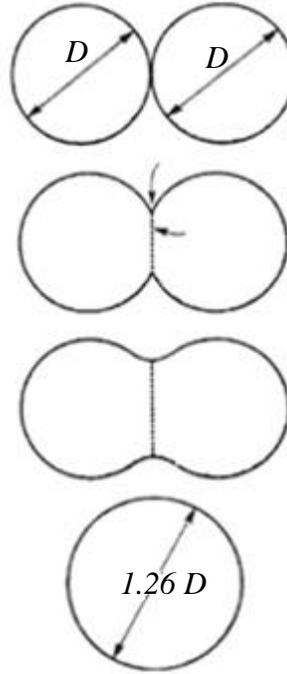


Figura II.6.- Modelo de dos esferas en contacto

Los poros abiertos se hacen inestables y disminuye su volumen relativo de forma que se alcanza el 92% de la densidad teórica. En ese momento los poros cilíndricos se colapsan transformándose en esféricos, la interconexión de poros desaparece y el gradiente de densidad disminuye. El estado final, que se alcanza teóricamente en un tiempo infinito, es el de una sola partícula cuyo diámetro es 1.26 veces el diámetro inicial de las partículas sinterizadas. La energía de sinterizado es relativamente pequeña. Si se considera el material constituido por esferas de diámetro D , con una energía superficial γ_{sv} ; la energía necesaria por unidad de volumen $\frac{E}{V}$ asociada con la pérdida de área total sería:

$$\frac{E}{V} = \frac{6\gamma_{sv}}{D} \quad \text{II.4}$$

Una energía superficial típica es 1 J/m^2 , lo que supone una energía de tan solo 3 J/m^2 para una partícula de $2 \mu\text{m}$, por tanto sólo las temperaturas altas pueden excitar los átomos de forma que se generen uniones entre partículas en tiempos razonables.

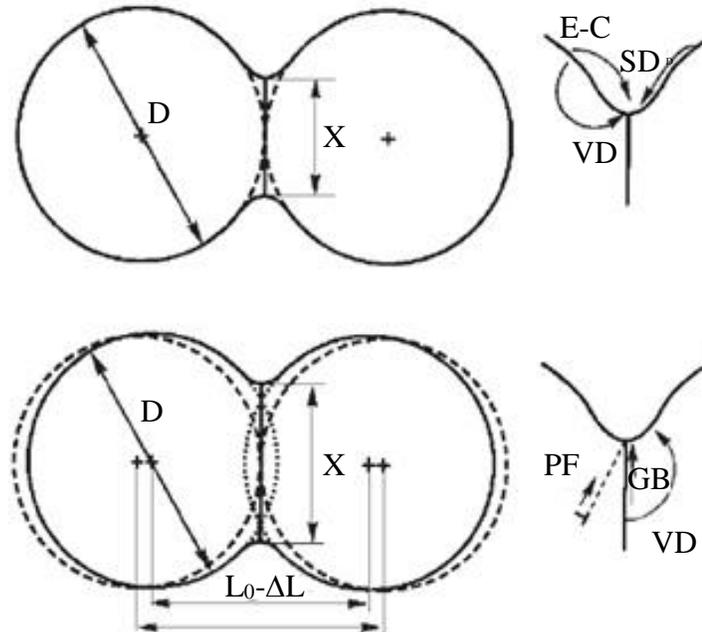


Figura II.7.- Transporte superficial y transporte en volumen

Los procesos de transporte determinan cuanta masa va a fluir de acuerdo con las fuerzas conductoras y pueden ser de dos tipos. Transporte superficial y transporte en volumen, que se esquematizan en la Figura II.7 en la que se detallan los diferentes mecanismos involucrados en cada tipo de transporte. Los procesos de transporte superficiales incrementan la superficie de contacto desplazando la masa por medio de mecanismos de evaporación-condensación (E-C), difusión superficial (SD) y difusión en volumen (VD). Los procesos de transporte volumétricos promueven el crecimiento de la zona de contacto a través de mecanismos internos, tales como fluencia plástica (PF), difusión por fronteras de grano (GB), y difusión en volumen (VD). Solo los procesos de tipo volumétrico implican una contracción simultánea a la aproximación entre partículas [II.1].

II.8.1.- Estado inicial [II.7]

En el momento del contacto entre partículas se puede decir que, en un sistema isotérmico, el crecimiento del cuello de la zona de contacto, definido como la razón $\frac{X}{D}$, puede expresarse según la ecuación:

$$\left(\frac{X}{D}\right)^n = \frac{B t}{D^m} \tag{II.5}$$

Donde X es el diámetro del cuello, D el diámetro de partícula, t es el tiempo de sinterizado y B un parámetro que depende del material y su geometría. Los valores de n , m y B dependen del mecanismo de transporte y se presentan en la Tabla II.2, en la que se presentan los valores de los parámetros del modelo de crecimiento del cuello.

Tabla II.2.- Parámetros del modelo de crecimiento del cuello [II.7]

Mecanismo	n	m	B
Fluencia viscosa	2	1	$\frac{3\gamma}{2\eta}$
Fluencia plástica	2	1	$\frac{9\pi\gamma b D_v}{kT}$
Evaporación condensación	3	1	$\left[\left(\frac{3P\gamma}{\rho^2}\right)\left(\frac{\pi}{2}\right)^{\frac{1}{2}}\right]\left[\left(\frac{M}{kT}\right)^{\frac{3}{2}}\right]$
Difusión de vacantes	5	3	$\frac{80D_v\gamma\Omega}{kT}$
Difusión de fronteras de grano	6	4	$\frac{20\delta D_b\gamma\Omega}{kT}$
Difusión superficial	7	4	$\frac{56D_s\gamma\Omega^{\frac{4}{3}}}{kT}$

El significado de los símbolos es:

γ Energía superficial

D_v Difusividad de volumen

ρ Densidad teórica

D_s Difusividad de superficie

η Viscosidad	D_b Difusividad de borde de grano
b Vector de <i>Burgers</i>	P Presión de vapor
k Constante de <i>Boltzmann</i>	M Peso molecular
T Temperatura absoluta	Ω Volumen atómico
δ Tamaño de frontera de grano	

Aunque no es una ecuación excesivamente precisa, ilustra alguno de los factores que determinan el proceso. Así, la gran dependencia del inverso del tamaño de partícula indica que las partículas más pequeñas facilitan el sinterizado; los incrementos en la temperatura del proceso, aunque sean pequeños, inciden notablemente en su desarrollo; y además, el factor tiempo tiene una influencia inferior a la temperatura del proceso y al tamaño de partícula.

En los procesos regidos por transporte en masa se producen variaciones en el espacio entre partículas, produciéndose una contracción simultánea con la compactación, tal y como se esquematiza en la Figura II.6. La aproximación entre los centros de las partículas puede relacionarse, de forma aproximada, con el tamaño de la zona de contacto mediante la expresión [II.7]:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \left(\frac{X}{D}\right)^2 \quad \text{II.6}$$

La cinética de la contracción, en esta primera etapa del sinterizado, se define por una expresión similar a la Ecuación II.5.

$$\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)^{\frac{n}{2}} = \frac{Bt}{2^n D^m} \quad \text{II.7}$$

Siendo D el diámetro de partícula, Figura II.6, t es el tiempo de tratamiento isotérmico, $\frac{n}{2}$ tiene un valor entre 2.5 y 3 y los valores de B son los de la Tabla II.2, dependiendo, además, de la temperatura según la expresión habitual en procesos activados térmicamente [II.7]:

$$B = B_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \text{II.8}$$

Donde R es la constante de los gases perfectos y Q la energía de activación, cuyo valor da una idea de la mayor o menor dificultad para iniciarse y mantenerse el proceso.

II.8.2.- Estado intermedio [II.7]

El estado intermedio es determinante para alcanzar las propiedades finales del producto sinterizado, está caracterizado por la evolución de los procesos de Esferoidización de poros, densificación y crecimiento de grano.

La geometría del sinterizado se puede asimilar a poros cilíndricos ubicados en la frontera de grano, tal y como se esquematiza en la Figura II.8, que corresponde a la distribución de poros en el estado intermedio de la sinterización, en la que los granos tienen forma de tetradecaedro con una red de poros en las aristas.

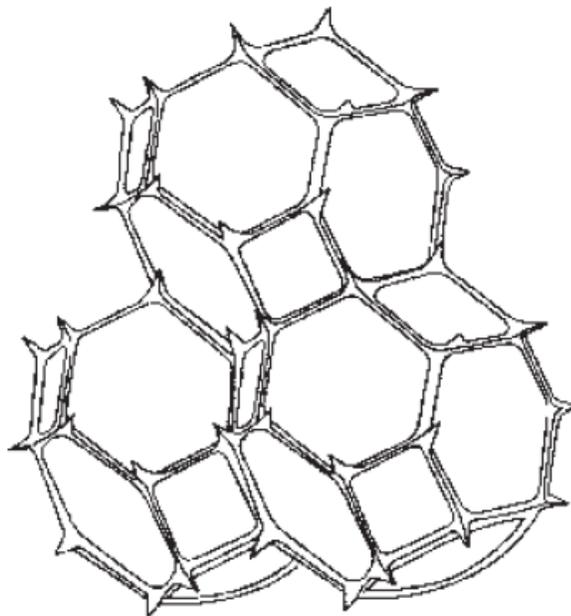


Figura II.8.- Poros cilíndricos ubicados en la frontera de los granos

La velocidad de densificación depende de la difusión de vacantes y se puede expresar como [II.7]:

$$\frac{d\rho}{dt} = JAN\Omega \quad \text{II.9}$$

Expresión en la que J es el flujo de átomos por unidad de tiempo y área, A es el área utilizada en la difusión, N el número de poros por unidad de volumen y Ω el volumen atómico. Si se asume que la eliminación de poros está relacionada con la difusión de volumen por los límites de grano y la destrucción de vacantes, entonces la primera *ley de Fick* permite afirmar que la densidad del Sinterizado evoluciona según la expresión [II.7]:

$$\rho_s = \rho_i + B_i \ln\left(\frac{t}{t_i}\right) \quad \text{II.10}$$

Donde ρ_s es la densidad del sinterizado, ρ_i es la densidad al inicio de la segunda etapa, B_i adopta los valores de la Ecuación II.8 y t es el tiempo de sinterización. B_i varía inversamente con el cubo del tamaño de grano. Es necesario un tiempo prolongado de sinterizado para cambiar significativamente las propiedades del mismo y en general, varía mucho con la morfología específica, tamaño de grano, tamaño de poro y distancia entre poros.

II.8.3.- Etapa final [II.7]

La etapa final es un proceso lento en el que los poros aislados se ubican en los vértices de grano adoptando la forma de la Figura II.9, en la que se presenta la morfología de las partículas al final del proceso de sinterizado.



Figura II.9.- Morfología de las partículas al final del proceso de sinterizado

Los poros, colapsados y ya de forma esférica, se difunden a través de las vacantes continuando la contracción de las partículas. Se puede cuantificar la velocidad de densificación mediante la expresión [II.7]:

$$\frac{d\rho}{dt} = \left(\frac{12D_v\Omega}{kTG^3} \right) \left(\frac{2\gamma}{r-P_g} \right) \quad \text{II.11}$$

donde ρ es la densidad, t el tiempo, Ω el volumen atómico, D_v la Difusividad en volumen, k la constante de *Boltzmann*, T la temperatura absoluta, G el tamaño de grano, γ la energía de tensión de vapor, r el radio del poro y P_g la presión del gas en el poro.

II.8.4.- Compactación previa en el sinterizado

En muchas ocasiones el polvo que va a ser sinterizado se somete a una compactación previa, esta preparación se hace cuando se busca obtener una porosidad fina y uniforme, como por ejemplo en un material destinado a filtros, o también cuando la estructura inicial se alcanza con ligaduras especiales tal y como sucede en el moldeo por inyección. La aparente paradoja de eliminar poros, mediante compactación previa, para obtener una porosidad final mayor se puede explicar fácilmente; los poros iniciales son de gran tamaño y presentan una distribución no uniforme, por lo que sería prácticamente imposible alcanzar una estructura de poros finos distribuidos homogéneamente. Sin embargo, comprimiendo el polvo antes del Sinterizado se reduce la porosidad inicial grosera y además se incrementa la densidad de dislocaciones, con lo que el proceso de compactación puede ser dirigido para obtener una pieza final con la porosidad deseada, tanto en diámetro de poro como en la distribución de los mismos. Por otra parte, la baja porosidad inicial hace que la contracción del sinterizado sea menor y la alta densidad de dislocaciones incrementa la velocidad de Sinterizado [II.5].

La compactación previa proporciona mayor densidad, control de forma y de dimensiones. Valga como ejemplo el incremento en los valores determinantes del sinterizado que experimenta el cobre preparado en partículas esféricas de 63 μm de diámetro. El cociente $\frac{x}{D}$, razón entre el diámetro del cuello y el de la partícula, pasa de 0 a 0.5 cuando se realiza una compactación previa

de 600 MPa. Además, cuando el Sinterizado se realiza a 1.020°C, durante dos horas, la relación $\frac{\Delta L}{L_0}$, definida en la Figura II.6, pasa de 4 a 2.5 cuando se realiza la misma compactación previa.

La compactación previa también contribuye a incrementar la densidad y el nivel de contacto, mientras que reduce la velocidad de crecimiento de cuello y la contracción, que es la aproximación entre centros de partículas. Dado que el tamaño de cuello es determinante en propiedades tales como la resistencia y la ductilidad, se puede afirmar que la compactación previa es beneficiosa.

En los materiales compactados previamente al sinterizado las dislocaciones pueden interactuar con las vacantes y mejorar, de esta forma, el transporte de masa. Algunos autores afirman que la velocidad de densificación mejora debido al trepado de dislocaciones. Las vacantes y las dislocaciones interactúan permitiendo a las dislocaciones pasar a diferentes planos de deslizamiento. El efecto es especialmente activo al inicio del sinterizado, durante el calentamiento inicial.

II.8.5.- La pieza en verde [II.7]

La compactación da forma al material y le dota de una resistencia mínima que facilita su manipulación. Se suele realizar rellenando un molde que, al igual que en el proceso de conformado por moldeo, posee la forma adecuada para que la pieza obtenida se adapte a las dimensiones deseables y sea susceptible de experimentar un tratamiento definitivo.

Una vez que el polvo ha sido compactado de acuerdo con las características del molde y a la presión preestablecida, se extrae lo que se denomina la pieza en verde. Dado que la práctica habitual del conformado pulvimetalúrgico, y por tanto la sinterización, parten de lo que se denomina pieza en verde, será conveniente definir alguna de las características que la determinan y su influencia en el producto final.

En primer lugar se debe mencionar la densidad en verde ρ_v que es la densidad de la pieza en verde y lógicamente será un valor comprendido entre el de un volumen de polvo no compactado y el del material sólido. Se trata de la variable con mayor incidencia en las propiedades finales

del sólido y está íntimamente ligada a la presión de compactación de los polvos. Si para realizar la compactación previa se rellena un molde de volumen V con una masa M de polvo, se puede definir la densidad aparente del material inicial como:

$$\rho_a = \frac{M}{V} \quad \text{II.12}$$

Si la densidad del material es ρ , entonces la densidad de la pieza en verde está ligada a la presión de compactación, p_c , por una expresión del tipo:

$$\rho_v = \frac{\rho}{1 + \left(\frac{\rho}{\rho_a} - 1\right) e^{-K p_c^n}} \quad \text{II.13}$$

Siendo K y n constantes del proceso.

La densidad aparente depende de la forma de los granos, de su tamaño y de la distribución de los mismos; cuando hay tamaños diferentes de grano, la mayor densidad se consigue cuando los granos pequeños pueden ocupar los huecos que quedan entre los grandes; mientras que cuando los granos son del mismo tamaño, la máxima densidad aparente se consigue con formas próximas a la esférica. Se pueden añadir lubricantes que permiten la acomodación de partículas bajo el efecto de la presión de compactación.

Habitualmente, la compactación previa se realiza mediante un émbolo que actúa sobre una zona preferente, si a esto se une el rozamiento entre partículas la densidad aparente no será un valor homogéneo en todo el volumen de la pieza en verde, sino que decrecerá con la distancia del punto de la pieza considerado al punto de aplicación de la presión; variando también con el aumento o disminución del coeficiente de rozamiento del material y, si la forma es complicada, la variación será mayor en las zonas más recónditas.

La temperatura es otra variable que favorece la compactación previa, ya que hay algunos procesos que unen las etapas de compactación previa y las de altas temperaturas con la aplicación

de presiones iguales en toda la masa, este es el caso de la compresión isostática en caliente *H.I.P.* (*Hot Isostatic Pressing*).

II.8.6.- Sinterizado de polvos mixtos [II.6]

Mediante el sinterizado de polvos mixtos se pueden obtener tres tipos de estructuras sinterizadas: estructuras con tamaño de partícula clasificado, soluciones sólidas. La mezcla de polvos de la misma composición, pero tamaño de partícula heterogéneo, da lugar frecuentemente a productos de alta densidad. Dado que la homogeneización simultánea con el Sinterizado puede ser una alternativa al conformado en polvos pre-aleados, la utilización de polvos mixtos puede tener las siguientes ventajas: facilidad para el cambio en la composición; mayor comodidad de compresión ya que el polvo tiene menor dureza frente a tensiones aplicadas; formación de estructuras más homogéneas y densificación mejorada. Aunque como contrapartida, el control de la temperatura debe realizarse de manera muy cuidadosa.

Por otra parte, la intercarra entre fases ayuda a la creación de vacantes que retardan el crecimiento de grano. El sinterizado de fases mixtas se realiza mejor con partículas muy pequeñas y menores distancias de difusión. Si la difusión de los diferentes polvos tiene velocidades muy diferentes, la formación de poros tiene lugar como consecuencia de la diferencia de difusividades, pudiendo aparecer protuberancias, sobre todo si los puntos de fusión son muy diferentes. El sinterizado de polvos mixtos es muy complejo debido a las diferentes reacciones de fase y a los efectos de homogeneización que son difíciles de controlar.

II.8.7.- Sinterización forzada [II.1]

Se conocen por este nombre varias técnicas cuyo fin es disminuir la energía de activación con el objeto de sinterizar a temperaturas más bajas. La forma más eficaz de bajar la energía de activación del proceso es utilizar un dopante, un elemento minoritario cuyas características físicas favorezcan el proceso.

Un caso típico es el del volframio utilizado para conseguir recubrimientos superficiales, que tratados con metales de transición tales como Níquel, Paladio o Platino, se consigue que el proceso de sinterizado tenga un rendimiento muy superior al del Volframio sin aditivos. En

general, el elemento activador no supera, en masa, un 3% del total y para que se considere eficaz debe conformarse a temperatura inferior a la del material base, debe tener una gran solubilidad en el metal base y debe permanecer segregado en las intercaras durante el Sinterizado, además debe tener un bajo punto de fusión. El punto de fusión más bajo influye en que disminuya la energía de activación, mientras que la solubilidad garantiza que el activador no altera la estructura final del producto. Las adiciones químicas, hasta el momento, son el medio más utilizado y con mayor eficacia para activar el proceso de sinterización.

La cinética de una sinterización forzada está determinada por la velocidad de difusión del elemento que actúa como activador. El espesor de las capas de activador es el parámetro más importante, aunque una concentración de activador por encima de la necesaria no mejora la cinética del proceso. Otros tipos de procedimientos activadores, tales como los tratamientos de radiación no han alcanzado, hasta el momento, el interés ni la eficacia de los aditivos químicos.

II.8.8.- Sinterizado con fase líquida [II.8]

En sistemas bifásicos que involucran polvos mixtos puede suceder que se forme una fase de bajo punto de fusión. Esta fase, que debe ser la procedente del polvo minoritario, se transforma en líquido dando lugar a un sistema mixto sólido-líquido. En dicho sistema el líquido puede permitir el transporte rápido de materia y, en consecuencia, agilizar el Sinterizado, sobre todo si concurren ciertas condiciones:

- Se debe producir la humectación, la fase líquida debe formar una película sobre la fase sólida.
- El sólido debe ser soluble en el líquido.
- La difusión de los átomos disueltos del sólido debe ser lo suficientemente rápida como para garantizar una evolución, también rápida, del Sinterizado.

La película líquida proporciona una tensión superficial que facilita la densificación, consiguiéndose velocidades muy por encima de las habituales en el sinterizado en fase sólida. Su eficacia es tal que incluso tiempos inferiores a 15 minutos, a la temperatura más alta posible, proporcionan un sinterizado con una densidad máxima. El líquido humectante debe actuar en

zonas de pequeño ángulo de contacto θ , definido por el equilibrio de las energías superficiales de acuerdo con la expresión:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad \text{II.14}$$

Donde γ_{SV} es la energía sólido-vapor, γ_{SL} la energía sólido-líquido y γ_{LV} la energía líquido-vapor.

Una vez mojado el polvo por la fase líquida, se organiza una estructura sólido-líquido que se puede esquematizar, tal y como se presenta en la Figura II.10, considerando que los dos granos están rodeados de líquido alcanzándose el equilibrio cuando los granos sólidos forman cuellos estables totalmente mojados. Esta condición de equilibrio es diferente a la del sinterizado en estado sólido, en la que el cuello entre granos evoluciona hasta el final del Sinterizado.

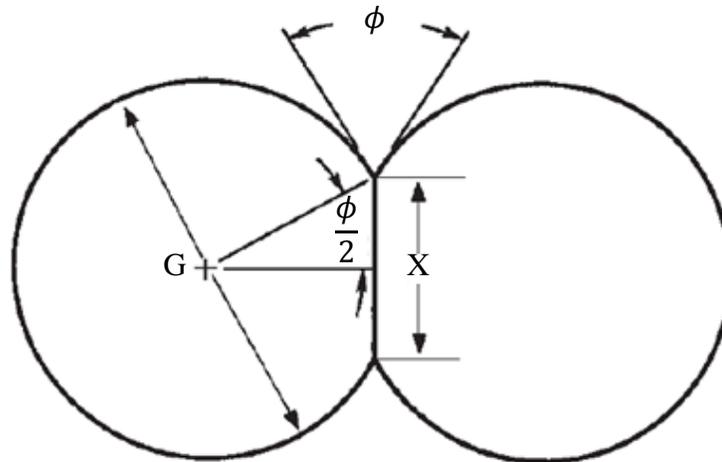


Figura II.10.- Estructura sólido-líquido

En este tipo de sinterizado, el tamaño X de cuello estable viene dado por el tamaño de grano G y el ángulo ϕ de acuerdo con la ecuación:

$$X = G \operatorname{sen} \left(\frac{\phi}{2} \right) \quad \text{II.15}$$

Determinándose el ángulo ϕ por el balance de energía superficial según:

$$\gamma_{SS} = 2\gamma_{SL} \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad \text{II.16}$$

Donde γ_{SS} es la energía de superficie sólido-sólido, correspondiente a la energía de las fronteras de grano.

Dependiendo de la fracción de volumen del líquido y de la magnitud de ϕ hay diferentes estructuras grano-líquido posibles. Habitualmente el ángulo ϕ es pequeño, del orden de 20-40° y el volumen de líquido no supera el 15% del total. Con estas condiciones la estructura resultante consiste en granos sólidos conectados entre sí y una fase líquida intercomunicada. Cuando el volumen de fase líquida disminuye, el material tiende a comportarse como un sinterizado sólido-sólido. Por otra parte, con un exceso de fase líquida, se puede decir que por encima del 35% en volumen, todo el espacio que existe entre partículas es ocupado por el líquido tan pronto como este se forma y el conjunto puede ser excesivamente fluido como para ser compactado.

II.8.9.- Densificación [II.9]

En el Sinterizado con fase líquida, a partir del momento en que se ha formado el líquido fluye y moja las partículas sólidas, reagrupándose y así contribuyendo a su densificación. Con un calentamiento prolongado la cantidad de fase líquida se incrementa, ya que la fase sólida comienza a disolverse en ella hasta que se satura. En ese momento la fase líquida se convierte en la portadora de los átomos en fase sólida. Es un proceso denominado solución-precipitación en el que los granos pequeños se disuelven y, posteriormente, precipitan otra vez, integrándose en los granos mayores.

II.9.- Operaciones prácticas y sus efectos [II.9]

El sinterizado es un proceso muy adecuado para conseguir piezas con propiedades muy específicas a partir de un material en polvo. En la práctica, aproximadamente un 70% de los sinterizados se realizan con fase líquida que supone hasta el 90% del valor final del producto. Los esfuerzos del fabricante se centran en optimizar la unión entre partículas mediante la reducción de óxidos, la homogeneización de polvos y la disminución de la porosidad gruesa inicial.

Diseño y análisis de la palanca de armar de un fusil de asalto
mediante el uso de tecnología de polvos

Dependiendo de las condiciones previas del material, lo que se llama material *en verde*, cuando ha sido compactado o aglomerado, pero antes de iniciar el proceso propiamente dicho de conformación pulvimetalúrgica, y de alcanzar la pieza prevista, el ciclo del proceso es muy variable. Esa es la razón de detallar la influencia de algunas operaciones prácticas previas que facilitan y, en gran medida, hacen viable la fabricación de piezas por vía pulvimetalúrgica.

Las claves se encuentran en el control dimensional, reducción de óxidos, control de aleantes con especial atención del nivel de Carbón en aceros, densificación y tensión de compactado. Para aleaciones compactadas en matriz, los cambios dimensionales debidos al sinterizado deben ser inferiores al 0,1%. Para aceros inoxidable y otros materiales troquelados a altas temperaturas, el cambio dimensional puede llegar a un 2,5%. En algunos procesos para polvos pre-compactados, la contracción del sinterizado puede alcanzar un 15%. El sinterizado es el paso que influye más en las propiedades finales de un producto pulvimetalúrgico. Cuando el sinterizado es más intenso, la resistencia, dureza, ductilidad, conductividad térmica, conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, resistencia a la corrosión y otras propiedades mejoran.

Algunas de las operaciones prácticas más usuales y los efectos que producen se pueden resumir del siguiente modo:

- El control del tamaño de partículas aumenta la velocidad del proceso, pero es más caro y además incrementa el nivel de impurezas.
- Aumentar la temperatura de tratamiento proporciona una mayor densidad y hace más corto el sinterizado, pero es más caro e induce al crecimiento de granos y poros.
- Incrementar la densidad del material en verde disminuye la contracción debida al proceso.
- Aumentar el contenido de Aleantes hace mayor la resistencia final.

Es decir, existen múltiples operaciones prácticas que producen un efecto beneficioso en el procesado, aunque también pueden afectar negativamente a las propiedades finales si no están perfectamente controladas.

II.10.- Técnicas de conformado en caliente [II.9]

A los materiales compactados por metalurgia de polvos se les pueden aplicar procesos secundarios de conformado igual que a cualquier otro material, simplemente teniendo en cuenta los parámetros de temperatura y velocidad de deformación adecuados. Dado que las características de procesos tales como forja, laminado, extrusión, aplicados a estos materiales no difieren de los materiales sinterizados.

II.10.1.- Compactación isostática (*HIP*) [II.9]

Se trata de un proceso de compactación en el que se utilizan troqueles flexibles con presurización isotrópica y se conoce con el nombre de *HIP* por las siglas en inglés, *Hot Isostatic Pressing*. En ocasiones el material pulverulento se encapsula para evitar contaminaciones y pérdidas gaseosas, este material puede ser muy diverso, acero, tántalo, cristal, dependiendo de la temperatura máxima del proceso ya que debe ser deformable en el momento de la consolidación, produciéndose la consolidación en un recipiente con atmósfera controlada a presiones de unos 200 MPa. Generalmente se utiliza gas a alta presión, Argón o Nitrógeno, para calentar las piezas según el esquema que se presenta en la Figura II.11.

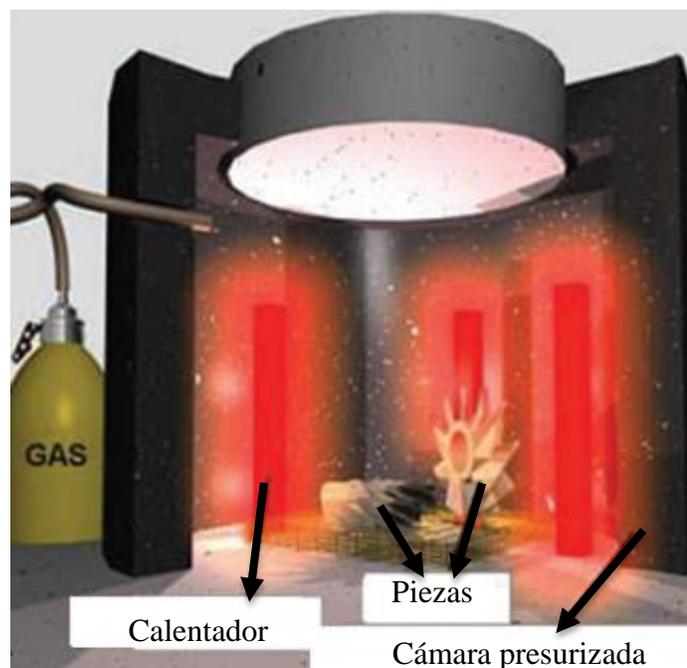


Figura II.11.- Recipiente con atmosfera controlada

Este método es muy utilizado en la fabricación de componentes aeroespaciales con material base de súper aleaciones de Níquel, Titanio y Aluminio, así como para fabricar piezas de materiales compuestos y herramientas de Acero. En los últimos tiempos se está desarrollando una técnica que combina el *HIP* con una reacción auto sostenida de alta temperatura, que se denomina compactación reactiva isostática en caliente (*HIP*). Por ejemplo, el material TiB_2 denso se fabrica por este método a partir de una mezcla de polvos de Titanio y Boro que se encapsulan y procesan a 100 MPa y 700°C, en esas condiciones se activa una reacción que produce TiB_2 y 293 kJ/mol, con lo que la reacción es autosostenida.

II.10.2.- Compactación pseudoisostática [II.9]

La obtención de una presión hidrostática en *HIP* es muy cara por lo que se han desarrollado métodos alternativos para conseguir una presión uniaxial que actúe sobre un sistema de viscosidad media, conteniendo un material en polvo pre-conformado. El elemento que hace posible el proceso es el bajo punto de fusión de algún componente, metal blando o sólido granular. El medio transforma la presión uniaxial en una fuerza pseudohidroestática cuya magnitud es un tercio, aproximadamente, de la tensión aplicada.

II.11.- Aplicaciones [II.4]

La técnica del conformado pulvimetalúrgico se aplicó, en sus orígenes, a materiales avanzados y prácticamente experimentales, pero se ha extendido a casi todas las áreas de la metalurgia. La enumeración de los campos actuales de aplicación sería extremadamente extensa, pero cualquiera que sea la envergadura de un trabajo sobre la pulvimetalurgia, debe detallar su uso en los componentes férreos estructurales, que es el campo de mayor aplicación de esta técnica. Si se tienen en cuenta las razones que dieron origen al uso de la pulvimetalurgia en la tecnología, se alcanza la conclusión lógica de que el abanico de aplicaciones comerciales se abre cada vez más y es cada vez más competitiva hasta el punto de desplazar a tecnologías tradicionales.

Tabla II.3.- Ventajas e inconvenientes del conformado pulvimetalúrgico frente a otros procesos [II.4]

Técnica	Ventajas frente pulvimetalurgia	Desventajas frente pulvimetalurgia
	Producción más rápida	Menor precisión

Diseño y análisis de la palanca de armar de un fusil de asalto mediante el uso de tecnología de polvos

Conformado en frío	Mayor resistencia Mejor acabado	Menor vida útil
Extrusión	Piezas más largas Producción rápida	Sección constante Menor precisión Elevado consumo Geometrías limitadas Vida útil baja
Estampado	Elevada precisión Producción rápida Gran tamaño de piezas	Materiales limitados Exceso de deshecho Aristas toscas Dificultad en piezas pequeñas
Forja en caliente	Altas propiedades mecánicas Tamaños grandes Geometrías complejas Producción rápida	Deshechos excesivos Pobre control dimensional Inclusiones y defectos
Mecanizado	Alta precisión Uso generalizado	Exceso de residuos Baja productividad Propiedades no uniformes Elevado costo

Es por ello, que en este apartado se hace una recopilación, no exhaustiva, de las ventajas e inconvenientes del conformado pulvimetalúrgico frente a otros procesos, recopilación que se encuentra en la Tabla II.3. Por otra parte, hay piezas o materiales que solo pueden fabricarse o procesarse mediante pulvimetalurgia, como es el caso de la producción de Carburos Sinterizados, cojinetes porosos y bimetálicos de capas moldeadas. En el área de los componentes estructurales existe una amplia gama de productos, sobre todo aleaciones férricas, que aprovechan las características de la sinterización. Por ejemplo, el sector de automoción incluye, cada vez más piezas de geometría compleja tales como el engranaje que se muestra en la Figura II.12, que corresponde a un piñón de ataque al cigüeñal, siendo posible el control dimensional con tolerancias inferiores a 0.025 mm y 0.1 g/cm³. La combinación de bajo costo y unas características mecánicas aceptables determinan el tipo de acero a utilizar.



Figura II.12.- Engranaje hecho por sinterización

En general, el campo de utilización de materiales sinterizados se hace más extenso día a día, valiendo como ejemplo, el cuchillo que se presenta en la Figura II.13, cuya hoja está realizada en tres capas, las dos exteriores son de acero inoxidable templado, mientras que la central es de acero sinterizado con un elevado contenido en carburos; esta distribución confiere una elevada dureza al filo y una apreciable tenacidad.



Figura II.13.- Cuchillo realizado en tres capas

En la Figura II.14 se muestran diversas piezas de precisión elaboradas mediante procesos pulvimetalúrgicos. Como se puede apreciar, tienen como factor común la complicada geometría y la precisión dimensional, así como un excelente acabado superficial. Desde filtros metálicos y

cojinetes porosos, hasta herramientas de elevada dureza son susceptibles de fabricarse competitivamente mediante la pulvimetalurgia.



Figura II.14.- Piezas de precisión elaboradas mediante procesos pulvimetalúrgicos

En definitiva, se puede decir que el sinterizado se aplica con éxito en los siguientes campos:

- Materiales de porosidad controlada.- Filtros, difusores, controladores de flujo, absorbentes acústicos, implantes biomédicos.
- Aplicaciones eléctricas en materiales refractarios.- El elevado punto de fusión de filamentos de wolframio, molibdeno o iridio obliga a utilizar técnicas que no conlleven la fusión del material.
- Materiales resistentes a la fricción.- Mordazas, zapatas, discos de freno tanto en automoción como en aviación, pudiendo ser el material base tanto Acero como Cobre. Comparado con los materiales tradicionales, el material Sinterizado posee mayor coeficiente de fricción, mayor estabilidad térmica y mayor resistencia a los cambios debidos a la humedad.
- Materiales resistentes a altas temperaturas.- Componentes para turbinas que se fabrican con superaleaciones.
- Materiales resistentes a la corrosión.- Para piezas de ortodoncia, instrumental quirúrgico. El material base suele ser Acero inoxidable Austenítico o Titanio.

- Materiales de alta dureza.- Suelen ser materiales endurecidos mediante carburos, nitruros o carbonitruros de Vanadio, Cobalto, Cromo, Wolframio; fabricándose con ellos hojas de corte, fresas de precisión y brocas.

Las aplicaciones de los componentes de metalurgia de polvos se congregan en dos grupos principales. En el primer grupo se encuentran los componentes que son de difícil manufactura por algún otro método de conformado de piezas, como lo son elementos hechos de Tungsteno, Molibdeno, y componentes magnéticos elaborados exclusivamente por esta técnica. El segundo grupo está constituido por componentes de metalurgia de polvos que ofrecen un efectivo costo alternativo a elementos maquinados, fundidos y forjados.

Los dispositivos elaborados mediante metalurgia de polvos son utilizados en su gran mayoría en la industria automovilística. Sin embargo el crecimiento de la pulvimetalurgia durante el último cuarto del siglo pasado, ha sido muy grande, por encima de lo que se había especulado con avances importantes en el área del diseño industrial compitiendo con las tecnologías habituales de conformado. Por último, se utilizan para la fabricación de piezas resistentes al desgaste y para piezas de alta o baja densidad, y finalmente se debe destacar que en los materiales compuestos los distintos procesos pulvimetalúrgicos ofrecen un amplio campo de aplicaciones.

II.12.- Compactación de polvos [II.9]

La operación más importante en la metalurgia de polvos es el compactado. La habilidad para obtener una densidad presionada satisfactoria determina a menudo la factibilidad de manufactura de piezas a través de la metalurgia de polvos.

El propósito del compactado es consolidar el polvo en la forma deseada tan cerca de las dimensiones finales como sea posible, teniendo en cuenta cualquier cambio dimensional que resulte del sinterizado; el compactado se ha diseñado también para impartir el nivel y tipo de porosidad deseado y proporcionar una adecuada resistencia para la manipulación.

La compactación uniaxial técnica empleada en este trabajo de investigación puede realizarse con polvos fríos o calientes. Esto afectará la densidad del compacto. La densidad del artículo

presado también depende de la forma de la pieza, el tamaño de partícula del polvo, la presión empleada y el tiempo de permanencia dentro del horno de Sinterización.

II.13.- Compactación en frío [II.5 y II.6]

El compactado uniaxial es el método más ampliamente utilizado. La secuencia usual de operaciones en el compactado uniaxial consiste en llenar la cavidad del troquel con un volumen definido de polvo; la aplicación de la presión requerida mediante el movimiento del punzón superior hacia el inferior; y la expulsión del comprimido verde por el accionar del punzón inferior. La Figura II.15 muestra estas operaciones esquemáticamente. Es importante mencionar que el ciclo de presado uní axial contribuye para que el polvo adquiera la resistencia necesaria para desempeñar su función como componente ingenieril.

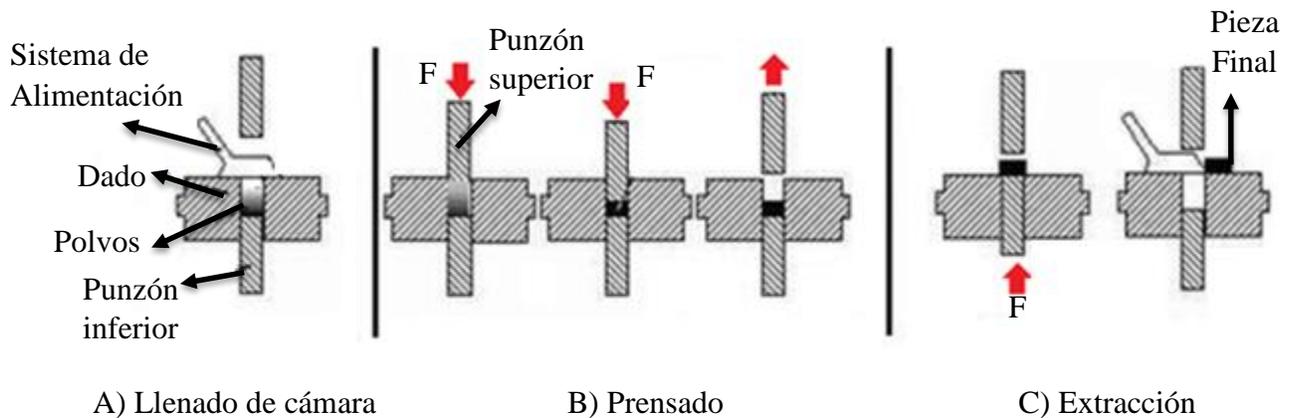


Figura II.15.- Etapas de la compactación

Las presiones utilizadas comúnmente varían de 19 a 50 ton/in². La presión puede obtenerse por prensas mecánicas o hidráulicas. Las prensas mecánicas están disponibles con variaciones de presión de 10 a 50 toneladas y velocidades de 6 a 150 golpes min⁻¹. Las características más importantes de las prensas mecánicas son: la rapidez de producción a alta velocidad, flexibilidad en el diseño, simplicidad en el diseño y costos de inversión y mantenimiento relativamente bajos.

A menudo se utilizan las prensas mecánicas (excéntricas) en la compactación uniaxial de piezas pequeñas. Como regla empírica, la cavidad del troquel debe ser lo suficientemente profunda para contener una cantidad de polvo equivalente a 2 veces al tamaño final de la briqueta. Esta longitud

de carrera elimina el uso de algunas prensas mecánicas cuando las dimensiones de las piezas terminadas son muy largas. Sin embargo las prensas hidráulicas se usan cuando es necesario aplicar golpes para la compactación, para la fabricación de partes de gran tamaño y para piezas de metal de polvo más complicadas que requieren mayor presión. Las prensas hidráulicas pueden desarrollar una fuerza de hasta 5 000 toneladas, a velocidades de golpeo generalmente inferiores de 20 golpes min^{-1} . En general las prensas hidráulicas tienen menores velocidades de operación que las mecánicas, pero para trabajos de golpe corto tales como el reprensado o en la acuñación, se pueden lograr velocidades relativamente altas.

Los troqueles se hacen generalmente de aceros para herramienta endurecidos, esmerilados y pulidos. Cuando el polvo que se compactará consiste en partículas duras abrasivas, el troquel se construye generalmente de dos piezas. Los punzones se hacen de acero para troquel tratado térmicamente a fin de que sean un poco más suaves que el troquel, ya que suelen ser más fáciles de remplazar que el troquel.

II.14.- Compactación en caliente [II.10]

La industria de la metalurgia de polvos continúa creciendo porque los avances en materiales crudos y procesos de producción de partes permiten la manufactura de componentes con gran complejidad y altos niveles de desempeño.

Sin embargo los usuarios finales de partes de pulvimetalurgia están demandando altos niveles de propiedades mecánicas, disponibles solamente a través de partes con alta densidad. Tradicionalmente los métodos empleados para alcanzar altas densidades incluyen el uso de infiltraciones de cobre, doble compresión y doble sinterización y polvo forjado. Lo cual involucra el uso de procesos secundarios, lo que resulta en costos significativamente elevados y por lo tanto ofrecen, malos ahorros en costos de producción.

El proceso de compactación en caliente es una técnica alternativa en la cual las piezas logran alcanzar densidades y propiedades mecánicas similares a las obtenidas en el proceso de doble compresión/ doble sinterización utilizando un proceso de compresión uniaxial [II.5].

El proceso de compactación en caliente consiste en aplicar presión y temperatura simultáneamente. Aunado a esto el compactado y sinterizado tienen lugar al mismo tiempo, para tal efecto el proceso incorpora el uso de polvo caliente y herramental caliente en prensas de compactado uniaxial. Lo que ocasiona densidades mayores en las piezas compactadas. La Figura II.16 ilustra esquemáticamente el proceso de compactación en caliente.

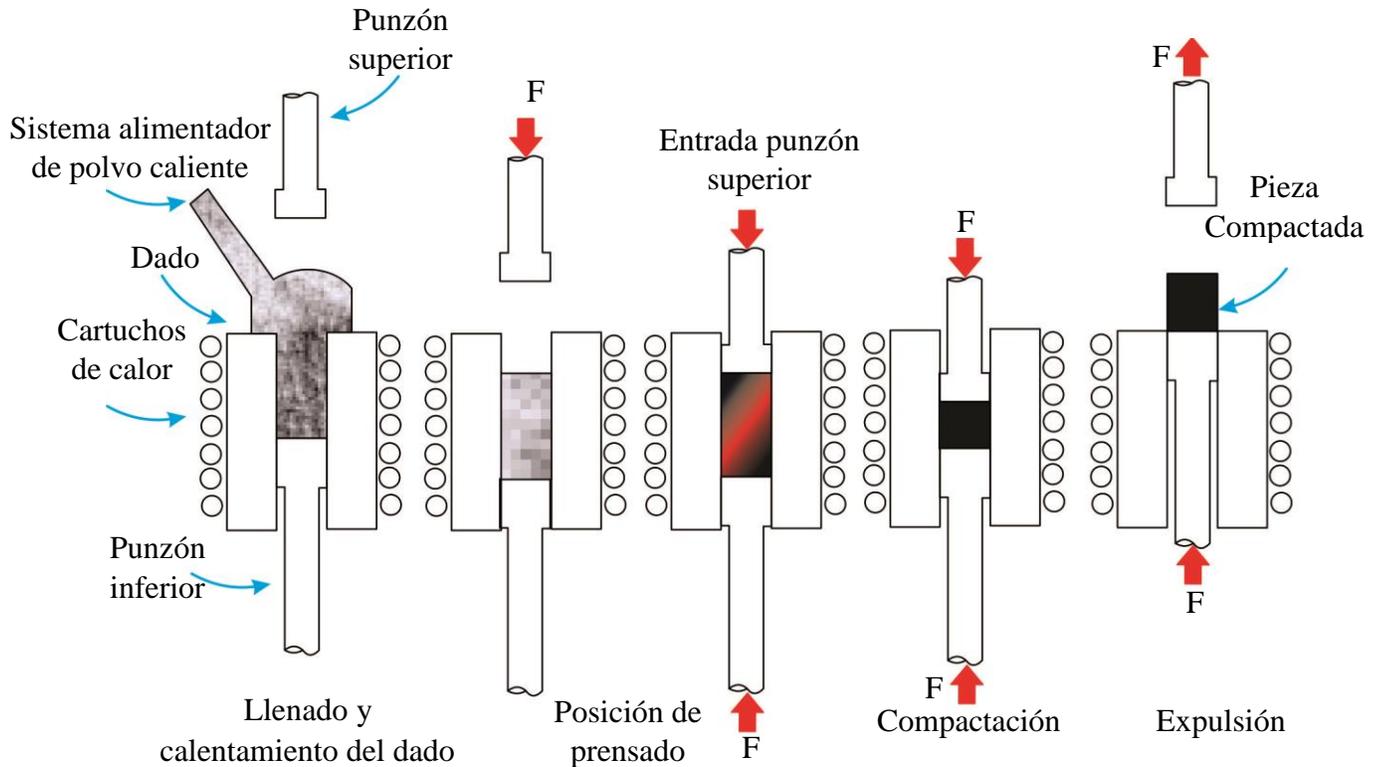


Figura II.16.-Proceso de compactación en caliente [II.3]

Aplicaciones exitosas del proceso de compactación en caliente necesitan que el polvo suministrado y el herramental estén calientes a las temperaturas adecuadas para tal efecto. El control de temperatura recomendado para el calentamiento del polvo y del herramental es de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$. El calentamiento del herramental es llevado a cabo usando cartuchos de calor empotrados en el dado.

Las temperaturas de polvo y dados usadas varían, de acuerdo a las propiedades finales que se deseen obtener teniendo en cuenta que por cada incremento en la temperatura de compactación se verá incrementada la densidad *en verde*. Actualmente son 3 sistemas de distribución y

calentamiento de polvo los que se encuentran disponibles en el mercado. Cada sistema es capaz de alimentar y calentar el polvo a la temperatura apropiada [II.5].

Los tres sistemas de alimentación son:

- *Cincinnati Inc. The Temp System.*
- *Abbott Furnace Company Thermal Powder Processor.*
- *Slotheater.*

El herramental diseñado para la compactación en caliente es esencialmente el mismo que el herramental para la compactación uniaxial con una tolerancia radial en herramental de 0.01 a 0.02 mm (0.0004 a 0.0008 in) [II.5]. Sin embargo, el diseño debe ser prudente debido a las diferencias de expansión térmica a las que están sometidos los herramientas. Asumiendo que a medida que la densidad incrementa, la carga en el herramental incrementa rápidamente. Estos incrementos en las presiones del herramental necesitan que los dados sean espesos y con grandes tolerancias para que soporten las grandes deflexiones a las que se ven sometidos. Porque la compactación en caliente es un proceso de simple compactación y simple sinterizado, el proceso es ideal para piezas de Pulvimetalurgia que requieren altas propiedades mecánicas que no pueden ser obtenidas por las densidades alcanzadas en la compactación convencional [II.5]. Futuras aplicaciones del proceso de compactación en caliente se prevé que exploten la habilidad de alcanzar altas densidades en verde a bajas presiones de compactación [II.5].

II.15.- Ventajas y desventajas [II.12]

El proceso de fabricación de piezas metálicas a través de la metalurgia de polvos tiene un 97% de utilización de los materiales de partida, comparando esta técnica con los procesos de conformado de piezas tradicionales, la metalurgia de polvos promueve ahorros de energía debido a su producción de piezas con tolerancias dimensionales estrechas, que contribuyen a evitar maquinados posteriores para obtener la forma última deseada. Sin embargo la forma y el tamaño de las piezas está restringida debido a la capacidad de las prensas disponibles en el mercado, ya que las prensas más grandes no serían capaces de realizar geometrías de gran tamaño [II.11].

Tenemos que las ventajas Tabla II.4 y desventajas Tabla II.5 del proceso Pulvimetalúrgico, desde el interés industrial, frente a las técnicas metalúrgicas convencionales son:

Tabla II.4.- Desventajas de la metalurgia de polvos [II.12]

Desventajas	
Elevado costo de las matrices de compactación.	
Características mecánicas inferiores debido a la porosidad del material	
Limitaciones de diseño: sección uniforme en la dirección de compactado, esbeltez limitada, etc.	

Tabla II.5.- Ventajas de la metalurgia de polvos [II.12]

Ventajas	
Economía	
	Piezas exactas a gran escala - gran versatilidad de formas -piezas complejas (tolerancias muy estrechas). Cumplen requerimientos con los fueron hechos.
	Piezas homogéneas (al evitar segregación de la solidificación).
	Ahorro energético.
	Bajo coste por producción en serie.
	Control de la porosidad-reducción de peso
	Mínimas pérdidas de material.
	Eliminación del mecanizado.
	Posibilita tratamientos térmicos
Singularidad	
	Algunos Composites.
	Materiales Fricción
	Materiales de Corte
	Piezas Estructurales
Exclusividad	
	Refractarios.
	Solidificación rápida

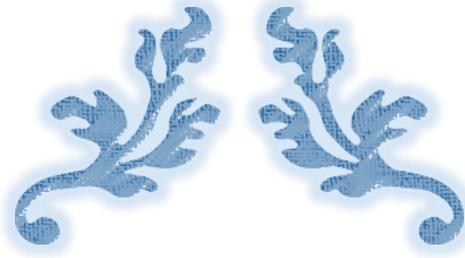
II.16.- Sumario

En este capítulo se realizó la compilación teórica sobre pulvimetalurgia. Mencionando la descripción de las etapas que constituyen a la metalurgia de polvos, los distintos Métodos de obtención de polvos metálicos y una amplia descripción de proceso de sinterizado añadiendo las ventajas y desventajas. El uso de polvos metálicos continúa expandiéndose. Además, a medida que los conocimientos de esta materia aumentan, aparecen más aplicaciones para la pulvimetalurgia. La mayoría de los usos actuales se basan en la economía de los procesos. El futuro promete más desafíos con la combinación de ahorrar costos y ciertos factores como la confiabilidad, calidad, dureza, control de dimensión y la capacidad de formar piezas exclusivas. La apreciación abierta de estas ventajas proveerá oportunidades de crecimiento económico y tecnológico. Investigaciones del uso de polvos metálicos ofrecen esperanza para aplicaciones aún más diversas, incluyendo aleaciones magnéticas de alta solidificación, aleaciones nuevas para aeronaves y estructuras de alta dureza involucrando microestructuras a escalas muy pequeñas.

II.17.- Referencias

- 1.- Oribe, G. D., *Compactación en Caliente de Polvo de Zinalco^{mr}*, Tesis de Maestría en Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, pp 8-29 2006.
- 2.- Bose, A., *Advances in Particulate Materials*, Ed. Butterworth Heinemann, pp 1-51, 1995.
- 3.- German, R. M., *Powder Metallurgy Science*, MPIF, 2 ED. Princenton, pp 20-80, 1994.
- 4.- Willis, B. A., *Tecnología de Procesamiento de Minerales*, Ed. Limusa Noriega Editores, pp 50-127, 1994.
- 5.- Lee, P. W., Trudel, Y., Iacocca, R., German, R. M., Ferguson, B. L., Eisen, W. B., Moyer, K., Madan, D. y Sanderow, H., *Powder Metal Technologies and Applications*, Ed. ASM Handbook, Vol. 7, pp 25-83, 2000.
- 6.- Hirschhorn, J. S., *Introduction to Powder Metallurgy*, Ed. APMI (American Powder Metallurgy Institute), pp 38-150, 1969.
- 7.- Herrero, S. B. y Cebrián, M. C., *Procesado y Puesta en Servicio de Materiales*, Ed. UNED, pp 89-109, 2005.
- 8.- Nelly, J. E., *Metalurgia y Materiales Industriales*, Ed. Limusa Noriega Editores, pp 303-313, 2002.

-
- 9.- Avner, S. H., *Introducción a la Metalurgia Física*, Ed. Mc Graw-Hill, pp 520- 695, 1994.
 - 10.- Kelly, G. y Spottiswood, D. J., *Introducción al Procesamiento de Minerales*, Ed. Limusa Noriega Editores, pp 87-95, 1990.
 - 11.- Vázquez, V. S., *Protocolo de Uso de una Máquina de Termofluencia y Caracterización del Comportamiento Mecánico a Alta Temperatura del Aluminio Aleado Mecánicamente*. Memoria del Proyecto de la Universidad de Sevilla Escuela Técnica Superior de Ingenieros Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales, pp 28-56, 2011.
 - 12.- Bris-Cabrera, J. L., *Comportamiento Mecánico de Aceros Sinterizados de Alta Densidad*, Tesis de Doctorado en Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona, pp 1-6, 2006.



CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO DE LOS FUSILES



Dos caminos terminaban en un bosque , yo tome el menos transitado, y eso ha marcado toda la diferencia.-Robert Frost

III.1.- Generalidades

En los capítulos anteriores se trataron de los inicios de la metalurgia de polvos y el proceso de sinterizado para poder fabricar piezas por medio de polvos y facilitar la manufactura ahorrando costos de trabajo y tiempo. La fabricación de armamento, a nivel industrial, data desde los inicios de la Primera Guerra Mundial, en la cual se desarrollaron las primeras armas individuales para la infantería de combate. Las condiciones bélicas desarrolladas marcaron el desarrollo de fusiles de cerrojo grande, potentes. Pero con escasa capacidad de fuego para contrarrestar los asaltos. Posterior a este conflicto internacional, varios países iniciaron grandes desarrollos e inversiones para el rubro beligerante, iniciando los trabajos de diseño en fusiles más ligeros, capaces de disparar que disparasen cartuchos menos potentes, pero eficaz hasta 400 metros [III.1].

El Estado Mayor del Ejército alemán comenzó, en 1938, a desarrollar el estudio de un fusil ligero, que fue base de su ejército. Las tácticas de combate por la infantería alemana en la Segunda Guerra Mundial, confirmaron la necesidad de un arma de este tipo. La mayoría de los combates tenían lugar a una distancia inferior a 400 metros [III.1].

III.2.- Nomenclatura general de los fusiles de asalto

De manera general, un fusil de asalto como se muestra en la Figura III.1 y en la Tabla III.1 se configura por diferentes grupos de elementos. Entre los que destacan, el grupo del cierre, grupo del cuchillo bayoneta, grupo del cajón de mecanismos, grupo del cañón, grupo de la culata, el grupo de la empuñadura, el grupo del guardamano, grupo del cargador, grupo de los órganos de puntería, grupo del portafusil y grupo del asa de transporte. [III.2].



Figura III.1.- Fusil de asalto 2009

Tabla III.1.- Conformación general del fusil de asalto [III.3]

Grupo del cierre	Este grupo está compuesto por los mecanismos de cierre del arma, mismos que alojan la munición dentro del cañón para ser percutida y enviada hacia el objetivo, generalmente se compone por la cabeza de cierre, soporte de cierre y pieza de acerojamiento.
Grupo del cuchillo bayoneta	Grupo conformado por la bayoneta y su funda; utilizado mayoritariamente como accesorio de supervivencia y aditamento para el combate cuerpo a cuerpo.
Grupo del cajón de mecanismos	Grupo que aloja los mecanismos del arma a fin de conformarlos en un sólo sistema.
Grupo del cañón	Grupo encargado de conducir la munición al objetivo. Dentro de este grupo destaca el tubo cañón, que tiene la función de dirigir el proyectil y de soportar la presión y temperatura de los gases de expansión producidos durante el disparo.
Grupo de la culata	Grupo que proporciona una adecuada postura al tirador y comodidad para efectuar los disparos, sirve también como soporte de apoyo, conformado por la culata y cantonera.
Grupo de la empuñadura	Grupo que desarrolla el mecanismo de percusión del arma, normalmente integrado por el martillo, disparador, empuñadura, y muelles o resortes, además de servir como sistema de sujeción del tirador para accionar el arma.
Grupo del guardamano	Grupo que sirve de apoyo para el tirador a fin de proporcionar una adecuada sujeción.
Grupo del cargador	Permite alojar las municiones que serán disparadas por el arma, compuesto por elevador, resortes o muelles, tapas y cajón del cargador.
Grupo de los órganos de puntería	Grupo destinado a apuntar el arma hacia su objetivo, mediante lentes ópticos que mejoran la visibilidad del objetivo a grandes distancias.
Grupo del portafusil	Grupo destinado al herraje y cintas de transporte del fusil de asalto, normalmente ajustable y desmontable.
Grupo del asa de	Grupo destinado para transportar el armamento de manera manual mediante el empleo de la mano tipo portafolio, normalmente es un

Diseño y análisis de la palanca de armar de un fusil de asalto mediante el uso de tecnología de polvos

transporte	aditamento destinado a alojar la mira óptica, puede o no ser desmontable sobre rieles
-------------------	---

III.3.- Características generales de los fusiles de asalto

Un fusil es un arma de fuego portátil de cañón largo, que dispara balas a largo alcance. Desarrollada con propósitos ofensivos. Es el arma personal más utilizada en los ejércitos desde el final del *Siglo XVII*. El fusil de asalto se origina de la evolución de los mosquetes, gracias a la configuración morfológica del arma, al perfeccionamiento de los mecanismos con los que se percute la munición, a la evolución de las municiones y los efectos que provoca [III.4].

El término fusil de asalto es una traducción de la palabra Alemana *Sturmgewehr*, siendo acuñado este término por *Adolf Hitler* para referirse al arma. En una definición estricta para que un arma sea considerada un fusil de asalto debe tener las siguientes características [III.4]:

1. Un arma individual del tamaño de una carabina que se dispara desde el hombro.
2. Capaz de hacer fuego selectivo (automático o semiautomático).
3. Cartucho de potencia intermedia entre la pistola y el fusil de guerra tradicional.
4. La munición es suministrada por un cargador separable de alta capacidad.

Actualmente el fusil de asalto es el arma común de la infantería y se caracteriza por tener un mecanismo selector de fuego que le permite disparar de modo semiautomático (para mayor precisión a mayor distancia) o disparar a modo automático (para mayor número de balas en menor tiempo durante un combate a corta distancia, con la desventaja de disminuir su puntería). Se consideran fusiles de asalto, aquellos que usan un calibre de menor potencia que los habituales en la Segunda Guerra Mundial (7.62 x 51 mm *OTAN*). Aquellos que usan calibres más potentes no se consideran fusiles de asalto, debido a su falta de control en fuego automático. En los EE.UU. los fusiles con calibre 0.30 (7.62 x 51 mm *OTAN*) como el *FAL*, se les considera ametralladoras. La distancia efectiva de combate de un fusil de asalto es de unos 200 metros, considerándose 100 metros la distancia óptima. Para el calibre 7.62 x 51 mm “*OTAN*”, se definen las siguientes distancias [III.5]:

- *Distancia Normal de Empleo* (400 metros).- Aquella a la que un tirador experimentado tiene una probabilidad de 1/3 de hacer blanco y es la usada para iniciar el combate entre infantería.
- *Alcance Máximo Eficaz* (800 metros).- Aquella a la que si casualmente se hace blanco, aun no siendo letal, provoca heridas que causan baja y determina zonas de prohibición o interdicción, mediante el empleo de ráfagas, a los movimientos enemigos.
- *Alcance Máximo* (3000 metros).- La mayor distancia que puede recorrer el proyectil antes de detenerse por sí mismo y sin alcanzar blanco alguno. Debe entenderse que para cada calibre y carga de proyección distintas, la distancia normal de empleo, el alcance máximo eficaz y el alcance máximo varían, siendo las aquí referidas las correspondiente al estandarizado calibre.

III.4.- Panorama internacional de los fusiles 5.56 mm [III.6]

El termino de fusil de asalto es usual para describir el armamento militar moderno, actualmente, el calibre 5,56 mm ha sido adoptado por casi todos los países del mundo Tabla III.2 se muestran los fusiles más conocidos. La mayoría de los países han migrado del calibre 7.62 mm al 5.56 mm considerando factores de orden técnico y logístico, penetrabilidad y precisión de la munición, a efectos de ser más competitivos y agresivos durante el empleo de este tipo de armamento, ya que mediante un calibre de menor tamaño se reduce el retroceso del arma y se incrementa la velocidad de la salida con la que se mejoran las distancias de alcance y la agrupación de los impactos.

Tabla III.2.- Panorama internacional de los fusiles de asalto [III.6 a III.9]

<p>Primer fusil de asalto <i>MP-44 Maschine pistole</i></p>		<p>Alemania fabricó un cartucho de 7.92 x 33 mm. “Kurtz” con ello aparece el primer fusil de asalto <i>MP-44</i> en 1943.</p>
		<p>En el oriente se desarrolló el <i>AK47</i></p>

Diseño y análisis de la palanca de armar de un fusil de asalto mediante el uso de tecnología de polvos

<p>fusil <i>AK47</i></p>		<p>(Automat Kalashnikov) el cual empleaba un cartucho de potencia intermedia, similar al 7.92 mm en 1946.</p>
<p>fusil de asalto <i>HK G-3</i></p>		<p>El modelo de fusil de asalto europeo, es el alemán <i>G-3</i>, fabricado por <i>Heckler Und Koch</i> (HK) en 1958.</p>
<p>fusil de asalto Bullpup Steyr AUG</p>		<p>Tiene sus orígenes en un programa del Ejército británico en 1970-1978.</p>
<p>fusil de asalto FAMAS G2</p>		<p>El desarrollo comenzó en 1967 bajo la dirección de <i>Paul Tellie</i> es uno de los fusiles de servicio que utiliza el ejército francés y el primer prototipo completado se desarrolló en 1971</p>
		<p>Es un fusil de asalto</p>

<p>fusil de asalto <i>SA80</i></p>		<p>tipo Bullpup de calibre 5,56 × 45 mm <i>OTAN</i>; diseñado y producido hasta 1988</p>
<p>fusil de asalto carabina <i>M4</i></p>		<p>Diseñada por el Fabricante <i>Colt Remington Arms</i> que utiliza munición 5,56 x 45 mm “<i>OTAN</i>” en 1994</p>
<p>fusil de asalto modular ligero <i>XM8</i></p>		<p>Diseñada 2002 Fabricante <i>Heckler & Koch</i> en 2002</p>
<p>fusil de asalto <i>FX-05 Xihcoatl</i> <i>Serpiente de fuego</i></p>		<p>Es un fusil de asalto diseñado y desarrollado por <i>CIADTIM</i> de México en 2006</p>
<p>fusil de asalto <i>FN SCAR</i></p>		<p>Fusil de asalto para combate de las Fuerzas Especiales, Diseñador <i>FN-Herstal</i> y el Fabricante <i>FNH USA</i> es utilizada en México por la</p>

Diseño y análisis de la palanca de armar de un fusil de asalto mediante el uso de tecnología de polvos

		Policía Federal y la Brigada de fusileros paracaidistas 2007.
--	--	---

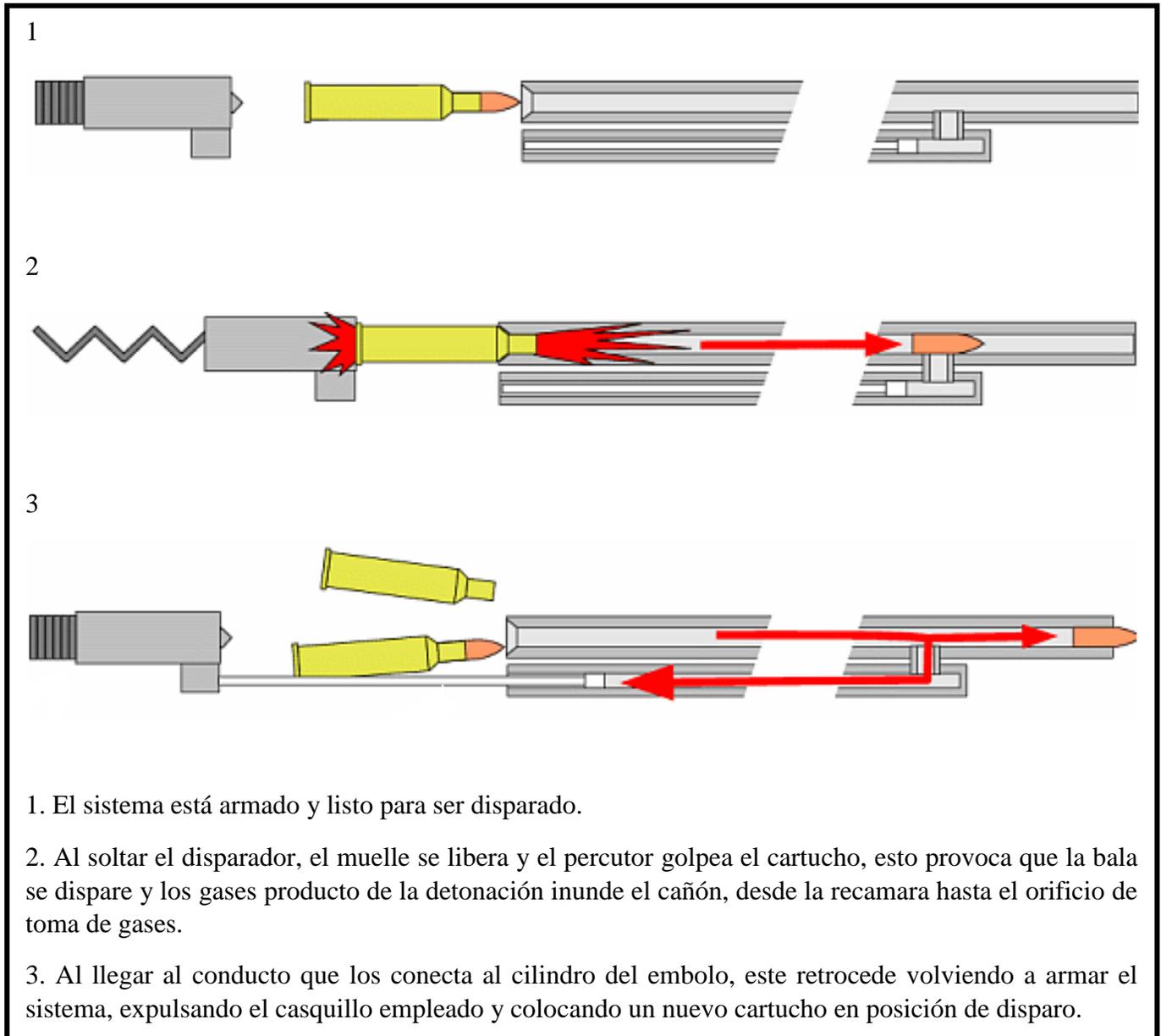


Figura III.2.- Esquema de funcionamiento por toma de gases [III.11]

Respecto de los sistemas de acerrojamiento en las armas, la mayoría de ellos lo hace por rotación del cierre. Mientras que los menos lo hacen por otros sistemas, tales como; rodillos, cierres de 2

piezas o por bloqueo de masa (la masa del cierre se opone al movimiento). En cuanto a los rendimientos balísticos de los fusiles, se puede ver que prácticamente todos se han estabilizados en ciertos rangos de cadencia (entre 600 a 900 tiros por minuto) y de velocidad inicial (entre 800 y 1 000 metros por segundo). En este campo, un aspecto importante y que, tal vez, es donde más han evolucionado los fusiles, es el calibre. Algunos ejércitos de Europa y América, han implementado el calibre 5.56 x 45 mm en sus fusiles de infantería. La *OTAN* aprobó este calibre, para su utilización dentro de la alianza, a partir de 1980 y EE.UU. ya lo usaba desde principios de la década de los sesenta [III.10].

Los sistemas de funcionamiento de los fusiles de asalto, no han evolucionado en lo sustancial en los últimos 30 años. En el 90 % de ellos, el sistema de automatismo funciona por toma de gases. Es decir, una perforación en el cañón permite que parte de la energía de los gases, producidos en el momento del disparo, sea utilizada para accionar un émbolo, el que trasmite su movimiento a los mecanismos del arma ilustrada en la Figura III.2. El resto de los fusiles, funciona por un sistema denominado *Blow Back* retardado. Es decir, se emplea el principio de acción y reacción, el proyectil sale hacia delante y el cierre hacia atrás, siendo retardado el movimiento del cierre por algún sistema mecánico [III.11]. En la Tabla III.3 se muestra una breve descripción del desarrollo tecnológico que diferentes países han generado para la implementación de los fusiles de asalto calibre 5.56 mm en sus ejércitos o líneas de producción de armamento, tomando como base los requerimientos actuales para el desarrollo de las operaciones tácticas que demandan el empleo de este tipo de artefactos bélicos.

Tabla III.3.- Panorama internacional de los fusiles de asalto 5.56 mm [III.12 a III.14]

Alemania	Basándose en el modelo <i>G-3</i> , se realizó el <i>HK 33</i> , una versión en 5.56 mm.
Bélgica	La Fábrica Nacional de Herstald modificó el <i>FAL</i> clásico de 7.62 mm, adaptándolo al calibre 5.56 mm. Así realizó un nuevo fusil de asalto, <i>FN CAL</i> .
Francia	En los 70`s lanzó los primeros prototipos de un fusil de asalto 5.56 mm, para sustituir al sub-fusil <i>MAT 49</i> y al fusil automático <i>MAS 49</i> .
Italia	La casa Beretta, intuyó el cambio que se avecinaba con las municiones de

	pequeño calibre, realizó el fusil <i>AR 70</i> en 5.56 mm para su ejército.
Israel	Comenzó en 1984 a trabajar en un proyecto de fusil de asalto basado en el <i>GALIL</i> . Con el nuevo modelo de 5.56 mm se ha dotado a unidades especiales y paracaidistas en el resto del ejército Israelí.
EE. UU.	El ejército ha adquirido recientemente la última versión del <i>M-16</i> fabricada por “ <i>COLT</i> ”, el <i>M-16 A2</i> , para dotar a sus fuerzas armadas.
Rusia	En 1974, los rusos fabricaron un nuevo modelo derivado del <i>AK47</i> , pero en calibre 5.45 x 39 mm.
México	En el año 2005, cuando se desarrolló un fusil de asalto calibre 5.56 mm, con la propia tecnología mexicana, diseño innovador y apariencia agresiva.

Otro aspecto importante considerado es la ergonometría del arma. Este concepto, considera el estudio de las dimensiones de los elementos que componen el arma basándose en la antropometría del usuario, relacionando la comodidad con la utilización del arma. Dentro de este contexto, se pueden considerar: el peso, las dimensiones y la forma del arma. En este sentido, las diferencias entre los distintos fusiles no son tan significativas y muchas veces pueden, incluso, llegar a ser subjetivas. En relación con los materiales que se utilizan actualmente para la fabricación de fusiles, se puede decir que, en general, ellos son aceros de buena calidad y con tratamientos térmicos adecuados. Como la tecnología en el manejo de aceros ha evolucionado, es posible incorporar piezas (aquellas que no tienen un trabajo mecánico exigente durante el tiro) de acero de microfusión o sinterizado de polvos, lo que disminuye los costos de fabricación e incrementa la capacidad de producción. Las piezas de madera han sido reemplazadas por piezas plásticas, llegando en algunos casos a reemplazar también los cargadores y otras piezas metálicas importantes por componentes plásticos, de alta resistencia, los que generalmente tienen un comportamiento mejor que los metálicos y un costo de fabricación inferior.

III.5.- Significado del término diseño

Existen varias definiciones para el término Diseño Mecánico, siendo algunas de las más comunes las siguientes; Diseño es formular un plan, para satisfacer una necesidad humana o resolver un problema [III.15]. La necesidad particular que habrá de satisfacerse puede estar completamente bien definida desde el principio. El diseño mecánico es el diseño de objetos y sistemas de

naturaleza mecánica haciendo uso de las matemáticas, de la ciencia de los materiales y la ciencia mecánica aplicada [III.16].

III.6.- Consideraciones de diseño

Con el objeto de determinar la configuración geométrica y dimensiones de la palanca de armar (Figura III.3) es de primordial importancia considerar la resistencia mecánica de dicho componente. Además de la geometría que la pieza deberá tener a efectos de ser útil y confortable durante su empleo.

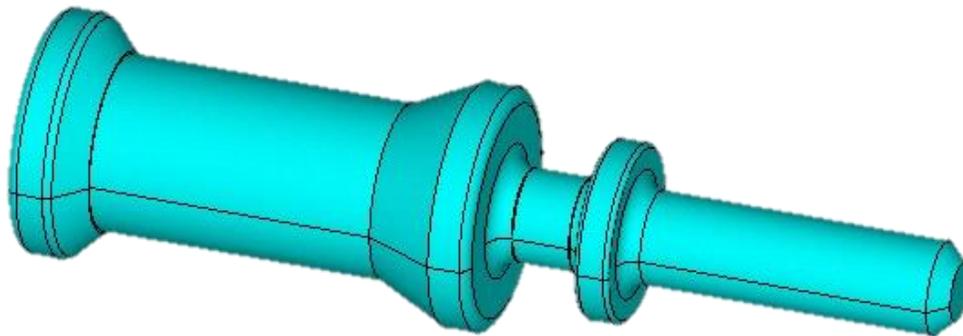


Figura III.3 Palanca de armar

Durante el desarrollo de productos, existen características importantes que influyen en su diseño, debiendo considerar factores como los siguientes: resistencia mecánica, confiabilidad, costo, forma, tamaño, seguridad, peso, material, método de fabricación y el correcto uso.

III.7.- Fases del diseño

Este tipo de proceso puede ser dividido en diez pasos, que incluye; identificación de la necesidad, la definición del problema, realización de diversas investigaciones, reducción de la investigación, análisis de criterios establecidos, búsqueda de soluciones alternativas, analizar las posibles soluciones, tomar una decisión, la presentación del producto, la difusión del producto y la venta del producto [III.17]. Sin embargo para resolver una necesidad de Ingeniería, se desarrolla en base de cinco etapas básicas, con lo cual se generará el Diseño mecánico de cualquier tipo de componente o sistema [III.18]:

- Formulación de la necesidad.- Definición de problema de forma amplia y sin detalles.
- Análisis de la necesidad.- Definición del problema a detalle.
- Búsqueda de soluciones.- Recopilación de posibles soluciones.
- Toma de decisión.- Evaluación, comparación, y selección hasta la obtención de solución óptima.
- Especificación.- Escribir la solución.

III.8.- Análisis del problema

La confiabilidad, funcionabilidad y seguridad en el empleo de artefactos bélicos como la manipulación de fusiles de asalto en los que se expone la vida humana y a la vez sirven para la protección de vidas, es de suma importancia; Valiéndose de ingenios tecnológicos que auxilien en esta tarea, con características que los hacen de utilidad bajo el control del soldado o persona que arriesga su vida a favor de otros, definen el problema de mantener un sistema de armado de cualquier fusil de asalto, que garantice la repetitividad del suceso bajo cualquier circunstancia.

La palanca de armar de un fusil de asalto se define como la palanca que acciona o libera el sistema de cierre de un arma de fuego y es el mecanismo de interacción entre el usuario y el arma, la palanca de armar transmite el movimiento generado por el usuario hacia el sistema de cierre, cargando el arma con un cartucho en la recámara durante la fase de carga manual, mientras que una vez que el arma fue accionada y su ciclo de funcionamiento producido, el sistema se mantiene en movimiento, gracias a la acción del resorte de empuje que a su vez es comprimido por efecto de los gases de combustión del disparo [III.19]. Para el análisis de esta pieza es de suma importancia conocer el trabajo que desempeñará y el sistema en el que interactúa para poder definir la solución del problema. La resistencia de palanca de armar de cualquier fusil de asalto, puede llegar a ser un factor importante de diseño, lo que significa que es una característica importante o consideración que influye en el diseño de este elemento [III.19]. Considerando durante la concepción, análisis y fabricación de la palanca de armar motivo del estudio: la resistencia mecánica, la confiabilidad, la resistencia a la corrosión, al desgaste, a la fricción, la utilidad, el costo, la seguridad, el peso, la forma, el tamaño, la rigidez, el acabado superficial y su mantenimiento.

III.8.1.- Búsqueda de soluciones

La búsqueda de soluciones para el diseño y análisis de los esfuerzos y manufactura de la palanca de armar de un fusil de asalto se basó en las siguientes restricciones de diseño: deberá ser modelo funcional y robusto, resistente y ergonómico, de fácil ensamble y proceso de metalurgia de polvos a bajo costo y eficiente [III.20]. Para satisfacer la restricción de ensamble fácil y funcional para usuarios zurdos y derechos, se plantearon dos propuestas.

Una palanca central pivotante, con mecanismos de resorte que pudiera girar hacia el lado derecho e izquierdo dependiendo de las habilidades de usuario del arma, y una palanca desmontable que deberá ser colocada en función de la destreza del usuario del arma.

Por motivos de rapidez de fabricación y cantidad de componentes que se requerirán para la fabricación de las propuestas, se decidió optar por la palanca de armar de una sola pieza desmontable y adaptable a las costumbres y habilidades del usuario.

Las fuerzas que deberá soportar el diseño de la palanca de armar, son aquellas que se producen por efecto del funcionamiento del sistema de cierre del arma, principalmente la carga del resorte de empuje, que se encarga de desplazar al cierre hacia el frente, y la de los gases de combustión que comprimen al resorte de empuje y mueven el cierre hacia atrás durante cada ciclo de funcionamiento.

Las nuevas metodologías de diseño se basan en la secuencia del modelado, animación, simulación y emulación de los nuevos productos. Actualmente la ayuda de los paquetes computacionales, *CAD*, *CAM* y *MEF* reducen significativamente los tiempos de diseño, debido a la posibilidad de generar prototipos virtuales y validarlos en su diseño, manufactura y funcionamiento, este último es posible comprobarlo a través de módulos de realidad virtual [III.20].

III.9.- Teorías de falla

Al diseñar elementos mecánicos que resistan las fallas se debe estar seguro de que los esfuerzos internos no rebasaran la resistencia del material, si el que se empleara es dúctil, entonces es

motivo de estudio la resistencia de cedencia, ya que una deformación permanente será considerada como falla, siendo esta resistencia a la fluencia casi igual a la tensión que a compresión, en materiales dúctiles [III.21]. La falla de un elemento se refiere a la pérdida de la funcionalidad, es decir cuando una pieza o una máquina dejan de ser útiles; esta falta de funcionalidad se puede dar por rotura, distorsión permanente o degradación. La rotura o la degradación permanente se deben a que los esfuerzos soportados son mayores que la resistencia del material de fabricación. Para poder determinar para qué cantidad de esfuerzo aplicado se producirá una falla, se utilizan algunas teorías de falla. Todas las teorías de falla se basan en la comparación del esfuerzo actuante contra el resultante aplicado en una prueba uniaxial de tensión o compresión.

III.10.- Teoría de falla por esfuerzo cortante máximo

Se emplea únicamente para materiales dúctiles y para predecir la fluencia. Esta teoría afirma que la fluencia se inicia siempre que, en un elemento mecánico, el esfuerzo cortante máximo se vuelve igual al esfuerzo cortante máximo en una probeta de tensión, cuando ese espécimen empieza a ceder [III.21]. Si se postula que un material dúctil bajo cualquier estado de esfuerzo cortante en cualquier plano llega al valor de $\frac{\sigma_y}{2}$ entonces el criterio de falla bajo la teoría de esfuerzo cortante máximo se representa con la ecuación III.1 [III.22].

$$\tau_{max\ abs} = \frac{\sigma_y}{2} \quad \text{III.1}$$

Donde σ_y representa el esfuerzo de cedencia del material de la pieza y $\tau_{max\ abs}$ representa el esfuerzo cortante máximo absoluto.

III.11.- Teoría de falla por energía de distorsión máxima

Es llamada también teoría de la *energía de cortante* o teoría de *Von Misses-Henky* [III.23], siendo una de las teorías más convenientes en aplicaciones de materiales dúctiles. Esta teoría supone que la fluencia se presenta cuando la energía asociada con el cambio de forma de un cuerpo bajo carga multiaxial es igual a la energía de distorsión en un espécimen a la tensión cuando la

fluencia se presenta en el esfuerzo de fluencia uniaxial σ_y . La densidad de la energía de deformación debida a la carga multiaxial se determina por medio de la siguiente ecuación.

$$\bar{u} = \frac{1}{2} [\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3] \quad \text{III.2}$$

Una parte de esta energía de deformación se asocia con el cambio de volumen del elemento y el resto con el cambio de forma, es decir con la distorsión. El criterio de falla por energía máxima de distorsión postula que los esfuerzos que causan la fluencia son los que producen la distorsión, es decir: La fluencia de un material dúctil se presenta cuando la energía de distorsión por unidad de volumen es igual o mayor que la energía de distorsión por unidad de volumen cuando el mismo material cede en una prueba de tensión simple [III.22]. Este criterio se puede enunciar en función de los tres esfuerzos principales como se muestra en la ecuación III.3.

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad \text{III.3}$$

III.12.- Concentración de esfuerzos

En una pieza sometida a esfuerzos, si se llegan a presentar cambios abruptos en la geometría de la pieza, se presenta una concentración de las líneas de esfuerzo en los puntos donde cambia abruptamente la geometría. Este fenómeno es llamado concentración de esfuerzos. [III.23]. Los cambios de geometría se presentan si existen: cambios de forma y tamaño de la sección, agujeros, muescas, chaveteras, estrías, marcas de herramientas, raspaduras, inclusiones y/o defectos en el material. Una medida de severidad de la concentración de esfuerzos viene dada por el factor K y está definido como la relación del esfuerzo local máximo en la región de la discontinuidad al esfuerzo nominal local evaluado por la teoría simple ecuación [III.4]. El esfuerzo nominal puede basarse bien en la sección transversal neta a través de la discontinuidad o en la sección transversal bruta de la pieza ignorando la discontinuidad [III.24].

$$K = \frac{\text{Valor maximo del esfuerzo real en el cambio}}{\text{esfuerzo nominal calculado}} \quad \text{III.4}$$

El esfuerzo máximo en la discontinuidad puede determinarse experimentalmente, por fotoelasticidad o por medición directa de la deformación; se supone que el material de referencia es isotrópico y obedece a la ley de *Hooke* [III.22]. La ley de *Hooke* indica la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria expresada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \tag{III.5}$$

La Ecuación III.5 se aplica cuando $0 \leq \sigma \leq \sigma_y$; donde los subíndices de σ y ε identifican el eje del esfuerzo y la deformación unitaria que manejan. Esta ley es aplicable a tensión y compresión uniaxial dentro de la parte lineal del diagrama de esfuerzo deformación unitaria, siendo E el módulo de elasticidad o de Young. La relación de un esfuerzo simple de tensión aplicada a un material resultante del esfuerzo paralelo de tensión. Es recomendable considerar aplicar un factor de concentración de esfuerzos cuando [III.25]:

- El material es frágil.
- El material es dúctil a temperaturas extremas que lo hacen frágil.
- Hay rápidos cambios de esfuerzos que no permitan que haya una fluencia local (Cargas dinámicas).
- Hay esfuerzos cíclicos (Fatiga).

En la Tabla III.4 se muestran algunos criterios para aplicar o no un factor de concentración de esfuerzo, mismos que en base a la condición de carga aplicada al tipo de material, se puede determinar el tipo de falla que se produce en el componente y sí es o no recomendable aplicar un factor de concentración de esfuerzos.

Tabla III.4.- Criterios para aplicación del factor de concentración de esfuerzo

Material	Condición de Carga	Si o No	K	Tipo de Falla
Frágil	Cualquiera	Si	K	Fractura rápida
Dúctil	Baja Temperatura	Si	K	Fractura rápida
Dúctil	Aplicación Rápida	Si	K	Fractura rápida

Dúctil	Cíclica	Si	Kf	Falla progresiva
Dúctil	Estática a temperatura ambiente	No	1	Ninguna

Existe una contracción transversal asociada con el alargamiento de un elemento bajo tensión axial [III.26] como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\epsilon_{transv} = -\nu\epsilon_{longit} \tag{III.6}$$

Dónde: ν representa la relación de *Poisson*, siendo válida también para esfuerzos de compresión y ϵ representa la deformación o alargamiento del material.

III.12.1- Métodos de reducción de concentración de esfuerzos

Métodos intuitivos como la analogía de flujo pueden ser de ayuda en la fase de diseño y la reducción de factores de concentración de esfuerzos, cuando la situación requiere reducir una sección de la pieza abruptamente, la resultante de concentración de esfuerzos puede ser minimizada por una nueva reducción de material, siendo esto común a la recomendación *Si no es lo suficientemente resistente hazlo más grande* [III.23]. En esta analogía de flujo se relacionan las líneas de flujo de fluidos, velocidad, y los gradientes de presión, por un lado, y las trayectorias de esfuerzo, las magnitudes, y el esfuerzo principal por el otro como se muestra en la Figura III.4.

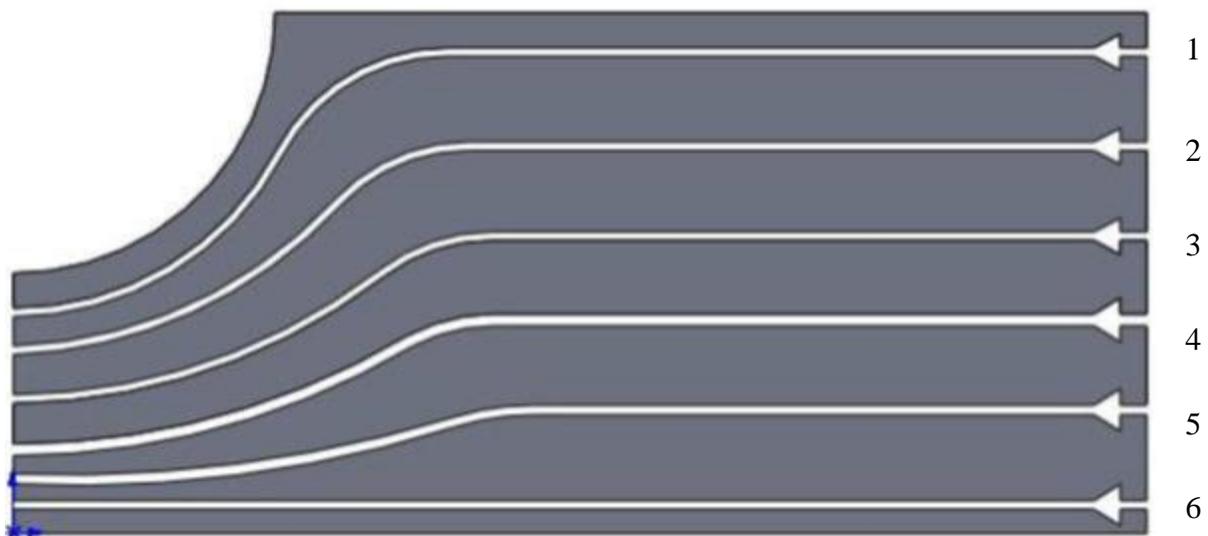


Figura III.4.- Analogía de flujo de fluidos contra esfuerzos

Con el fin de incrementar la resistencia de las piezas se recomienda, seguir las siguientes consideraciones de diseño [III.27]:

- Emplear materiales homogéneos de estructura microgranular, libres de focos de concentración de tensiones.
- Configurar la pieza a modo de evitar concentración de esfuerzos, no se deberá admitir que se pase de una dimensión de la sección a la otra sin curvas de acuerdo intermedias; en algunos casos se recomienda emplear ranuras de descarga especiales, desconcentradores de esfuerzos.
- Mecanizar cuidadosamente la superficie de la pieza, a fin de eliminar superficies burdas.
- Emplear métodos especiales para incrementar su resistencia a la fatiga (aplicación descargas elevadas en periodos cortos de tiempo).

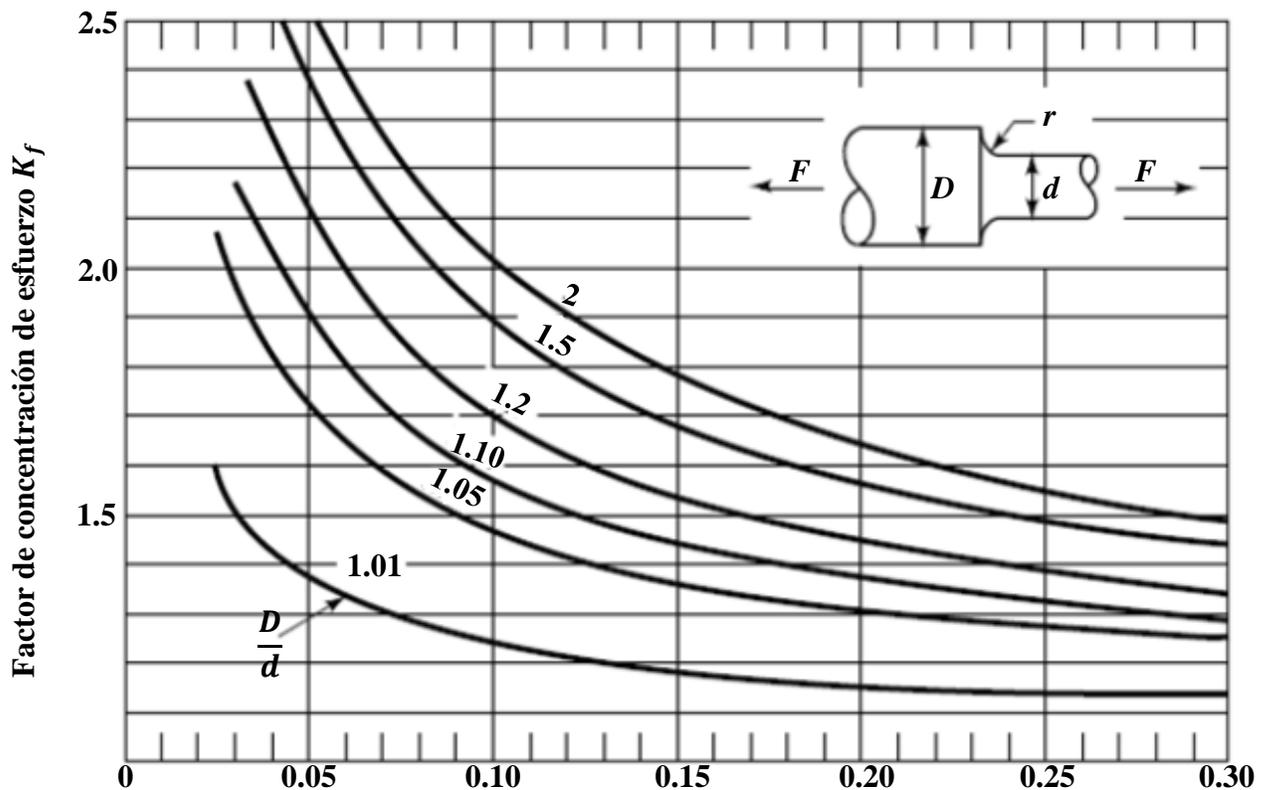


Figura III.5.- Valor del factor de concentración de esfuerzos a tensión [III.28]

Cuando la configuración de la sección transversal o longitudinal de un eje varía bruscamente se produce el fenómeno de concentración de esfuerzos, influencia que debe ser considerada mediante el factor de concentración que se determina experimentalmente o teóricamente por los métodos de la teoría de la elasticidad, que describe cómo un sólido (o fluido totalmente confinado) se mueve y deforma como respuesta a fuerzas exteriores. En la Figura III.5 y III.6 se muestra el gráfico para relacionar el valor del coeficiente teórico de concentración de esfuerzos de una sección circular sometida a tensión y flexión respectivamente, respecto a la relación de diámetros de la sección.

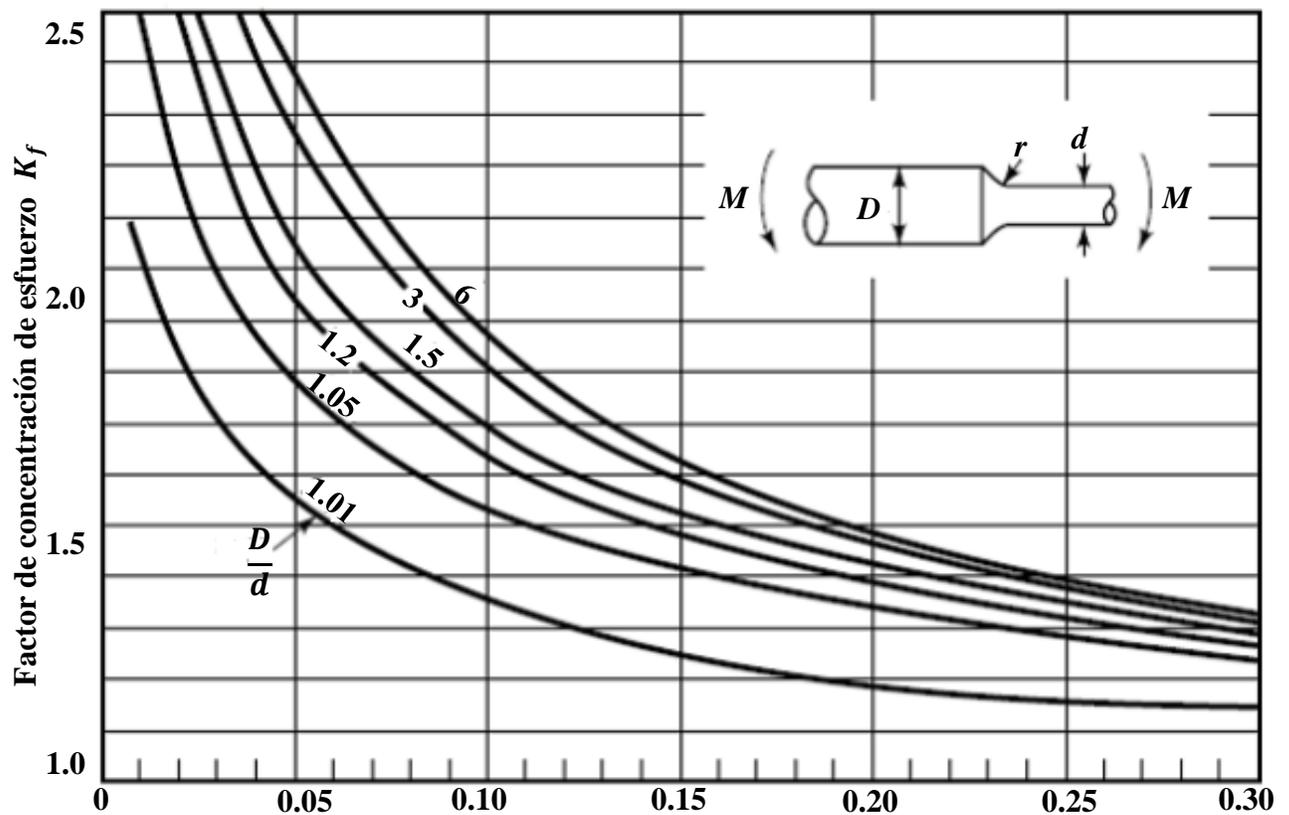


Figura III.6.- Valor del factor de concentración de esfuerzos a flexión [III.28]

III.13.- Sumario

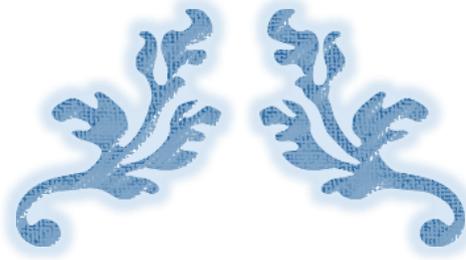
En este capítulo se abordó el marco teórico de referencia que será empleado en la solución de la problemática, desde la fase conceptual del diseño, pasando por el desarrollo del diseño, las consideraciones y posibles soluciones al problema, con fundamentos teóricos. Tales como la teorías de falla de elementos y la concentración de esfuerzos debido al cambio geométrico de una

pieza, y las recomendaciones para minimizar este tipo de origen de falla, que sustentan el desarrollo del Capítulo IV donde se analizará el problema y se especificará la solución al mismo, auxiliándose de métodos computacionales y analíticos de análisis, específicamente el *MEF*.

III.14.- Referencias

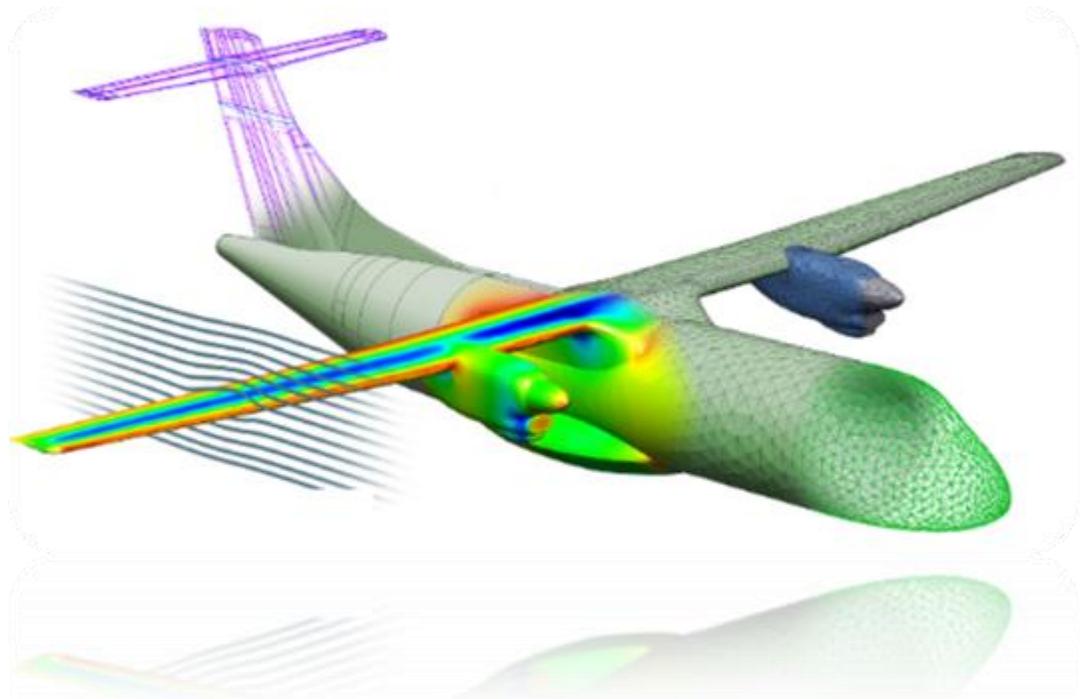
- 1.- Wong, W., *Caracterización y Tratamiento Térmico del Acero 32CrMoV12-10 Empleado en la Fabricación del Tubo Cañón para Fusil Calibre 5.56 mm*, Tesis de Maestría, SEPI ESQUIE Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, pp 9, 2009.
- 2.- Secretaria de la Defensa Nacional, Dirección General de Industria Militar, *Fusil FX-05, Manual de Usuario*, pp 8, 2007.
- 3.- Heckler E. y Koch T., *Sistemas de Armas, Programa de Equipamiento para Agencias y Corporaciones Policiales de la República Mexicana*, Ed. Heckler y Koch, Ident Nr. 968816/V001.04.08, pp 8-9, 2008.
- 4.- Taylor C., *The Fighting Rifle; A Complete Study of the Rifle in Combat*, Ed. Sycamore Island Books, pp 102, 1984.
- 5.- North Atlantic Treaty Organization, Publication *NATO STANAG 4172, 5.56 mm Ammunition*, pp 20-80, 1993.
- 6.- Popenker M. y Williams A., *Assault Rifle; The Development of Modern Military Rifle and its Ammunition*, Ed. The Crowood Press Ltd, pp 9, 2004.
- 7.- Department of Defense USA, *Military Standard Dimensioning of Accessory Mounting Rail for Small Arms Weapons*, MIL-STD-1913, 1995.
- 8.- Frank, I, *AK-47; The Grim Reaper*, 2a. Edition, pp 20-60, 2013.
- 9.- Robert, W. D., *Mauser Military Rifles of the World*, 5a Edition, pp 18-30 y 80-90, 2011.
- 10.- North Atlantic Treaty Organization, *Publication Army Mil-F-2980e Notice 1 Firing Attachments, Blank Ammunition*, 1995.
- 11.- Gould, J. H., *Delayed Gas-Operated Firearm*, United States Patent US8272314 B1, 2012.
- 12.- McNab, C., *Atlas Ilustrado de Armas de Fuego Militares y Deportivas del Siglo XX*, Ed. Susaeta Ediciones S.A., pp 200-267, 2006.
- 13.- Hogg, I., *Jane`s Infantry weapons*, Twentieth edition, Ed. Jane's Information Group, pp. 79, 118, 103, 132, 140, 143,171, 1994.

-
- 14.- Secretaria de la Defensa Nacional, Dirección General de Industria Militar, *Industria Militar Mexicana, Las armas de la paz*, pp. 108, 252- 295, 2006.
 - 15.- Shigley, J. E., Mischke, C. R. y Budynas, R. G., *Mechanical Engineering Design*, Ed. McGraw Hill, pp 4, 2004.
 - 16.- Lewis, F., Abdallah, C. y Dawson, D., *Control of robot manipulators*, Ed. Maxwell-Macmillan, pp. 65-72, 1993.
 - 17.- Ullman, D. G., *El Proceso de Diseño Mecánico*, Mc Graw Hill, 4a Edición, pp 12-67, 2009.
 - 18.- Krick, E., *Introducción a la Ingeniería y al Diseño en Ingeniería*, Ed. Limusa, pp 121, 2006.
 - 19.- Shigley, J. y Mitchell, L., *Diseño en Ingeniería Mecánica*, 4ta Edición Ed. McGraw-Hil, pp 10, 1985.
 - 20.- Verduzco-Cedeño, V. F., *Diseño y Desarrollo de Herramientas de Sujeción para la Fabricación de Cañones de Armamento*, Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica, SEPI ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, pp 39-40, 2010.
 - 21.- Shigley, J. y Mitchell, L., *Diseño en Ingeniería Mecánica*, Ed. Mc Graw-Hill, pp 10, 1985.
 - 22.- Craig, R., *Mecánica de Materiales*, Ed. Patria, pp 48-49 y 737-740, 2007.
 - 23.- Young, W. y Budynas, R., *Roark's Formulas for Stress and Strain*, 7a Edición, Ed. Mc Graw-Hill, pp 771, 2002.
 - 24.-Forrest, P., *Fatiga de los Metales*, Ed. Urmo, pp 145-155, 1972.
 25. - Licker, M., *Dictionary of Scientific and Technical Terms*, Ed. McGraw-Hill, 6a Edición, pp 20-15, 2002.
 - 26.- Askeland, D. y Phule, P., *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, 4a Edición, Ed. Thomson, pp 246, 2006.
 - 27.- Stiopin, P. A., *Resistencia de Materiales*, Ed. MIR. pp 25-97, 1968.
 - 28.- Oberg, E., Franklin, J. D., Horton, H. L. y Ryffel, H. H., *Machinery's Handbook*, 27a Edición, Ed. Industrial Press, Inc., pp 209-215, 2004.



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA PALANCA DE ASALTO



No fracase en la prueba. Encontré 100 formas de hacerla mal.-Benjamin Franklin.

IV.1.- Generalidades

En este capítulo se analizará la palanca del fusil asalto *FX-05 Xiuhcoatl - Serpiente de Fuego Fx-50*. La cual se puede ser fabricada por distintos procesos de manufactura, por lo que tomando como referencia los trabajos futuros de la tesis del *Dr. Víctor Fernando Verduzco Cedeño*, se decidió aplicar la tecnología de polvos para fabricarla. El objetivo principal de la investigación en esta tesis es efectuar un análisis estructural estático utilizando el *Método de Elemento Finito* y fabricarla por medio del proceso de la tecnología de polvos y sinterizado de la pieza. Con lo cual, se determina el campo de esfuerzos a los que se encuentra sometida bajo cargas de trabajo. Complementario en este capítulo se tratarán temas relacionados con los orígenes del *Método del Elemento Finito*, la simulación numérica, la aplicación de la metodología, el campo de aplicación y servicio, ventajas y desventajas del Método del Elemento Finito. Las figuras que se muestran en este capítulo son confidenciales y se tiene que pedir permiso al autor para poder ser utilizadas.

Cuenta la leyenda que Coatlicue, barría su templo en lo alto del cerro de Coatepec, cuando encontró una bola de plumas que provenía del cielo la cual guardó en su regazo, repentinamente quedó embarazada.

Por ello Coyolxauhqui, hija de Coatlicue, consideró el embarazo de su madre como una afrenta e instigó a sus hermanos los Centzon y Huitznahua a matarla. Se dirigió hacia el cerro de Coatepec, donde habitaba la diosa madre, cuando estaban a punto de asesinarla, Huitzilopochtli figura IV.1.- Dios Huitzilopochtli, desde el vientre de su madre, advirtió el peligro y decidió defender su vida y la de Coatlicue.

Entonces, dio a luz al dios Huitzilopochtli, quien emergió vestido como un guerrero y armado con una serpiente de fuego, llamada *Xiuhcōatl*, con la que decapitó a Coyolxauhqui para después, arrojarla desde lo alto del cerro Coatepec. En su caída, la diosa se fue desmembrando en cada giro, y así fue encontrada al pie de la escalinata de Huitzilopochtli en el Templo Mayor. Después persiguió a sus cuatrocientos hermanos, que se dispersaron por el firmamento y se convirtieron en estrellas.



Figura IV.1.-Dios Huitzilopochtli

IV.2.- Introducción al Método de Elemento Finito

Para éste tipo de problemas se puede auxiliar con aproximaciones numéricas. Se acepta que los métodos de análisis numéricos que son más utilizados en Ingeniería se pueden clasificar en dos grupos; diferencias finitas y elementos finitos. Para las diferencias finitas, se escriben ecuaciones diferenciales por cada nodo. Lo cual, proporciona un resultado cercano en un grupo de ecuaciones lineales simultáneas. Aunque este método es fácil de entender y de utilizar en problemas simples, se vuelve difícil al involucrar geometrías o condiciones de frontera complejas. Por otra, parte los elementos finitos utiliza formulaciones integrales para desarrollar sistemas de ecuaciones algebraicas [IV.I].

Tabla IV.1.- Perturbaciones en problemas ingenieriles [IV.1]

Tipo de problema	Parámetros causantes de perturbaciones en un sistema
Mecánica de sólidos	Agentes externos (presión, momentos, etc.)
Transferencia de calor	Diferencia de temperatura
Dinámica de fluidos	Diferencia de presión
Redes eléctricas	Diferencia de voltaje

El Método del Elemento Finito es una técnica de análisis numérico que se emplea para obtener soluciones aproximadas para una amplia variedad de problemas de Ingeniería (Tabla IV.1) que involucran esfuerzos, transferencia de calor, fluido, etc.

La inclusión de estos métodos numéricos es de gran ayuda en casos cuando un análisis experimental no puede ser realizado, debido a diferentes razones como, que los componentes sean de gran tamaño. El método de elemento finito se apoya en la discretización de un dominio, en un gran número de elementos para así obtener la solución. Básicamente un problema puede ser dividido en sub-problemas y su solución es obtenida mediante la unión de cada una de las soluciones de estos sub-problemas. En Método de Elemento Finito esto es logrado mediante la división de la geometría a analizar en un gran número de formas simples [IV.1].

IV.2.1.- Método del Elemento Finito

Con anterioridad a la aparición de las primeras herramientas de simulación por el MEF, en torno al año 1950, la definición de estructuras metálicas complejas se realizaba a partir de la resolución analítica de ecuaciones diferenciales, lo cual se convirtió rápidamente en un problema al presentarse casos complejos y difíciles de resolver.

IV.2.2.- Orígenes del Método del Elemento Finito [IV.2]

El empleo de métodos de discretización (Figura IV.2) y aproximación numérica para la obtención de soluciones es conocido desde tiempos antiguos. Los egipcios utilizaban métodos de discretizado para determinar el volumen de las pirámides. *Arquímedes*, de igual manera, utilizaba este principio para calcular áreas y volúmenes. Por otro lado, en oriente el matemático chino *Lui Hui* utilizaba un polígono regular para calcular longitudes de circunferencias. Mientras el matemático chino *Lui Hui* utilizaba un polígono regular para calcular longitudes de circunferencias [IV.2].

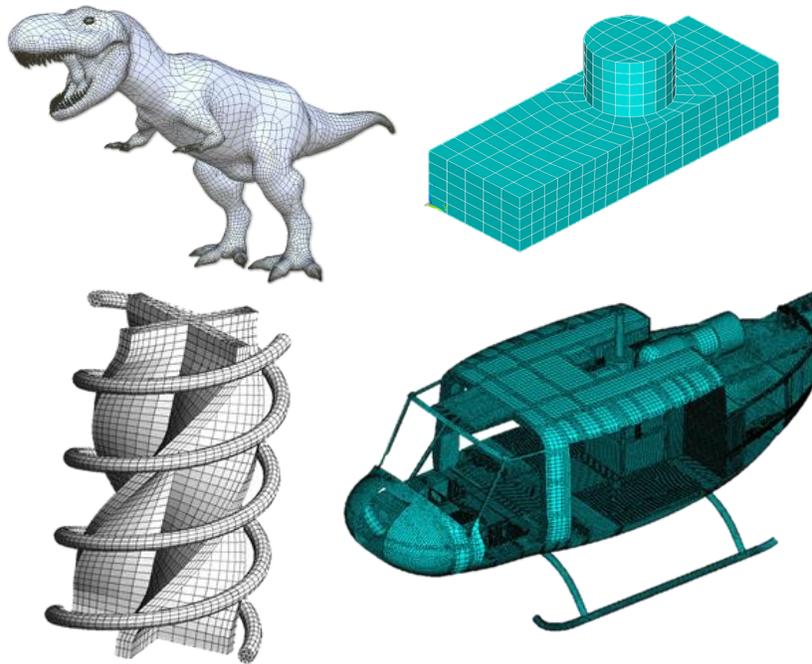


Figura IV.2 Ejemplos de discretización

A comienzos del *Siglo XX* investigadores como *Castigliano*, *Rayleigh* y *Ritz* desarrollaron una metodología para predecir el desplazamiento de una estructura basándose en ecuaciones de funciones de forma de sistemas sencillos de carga, siendo estos resueltos por una minimización de la energía. El trabajo desarrollado por el matemático *Richard Courant* en 1943 permitió sentar las bases de la resolución de sistemas estructurales mediante la implementación de la notación matricial y su resolución algebraica donde propone la utilización de funciones polinómicas para la formulación en subregiones triangulares. Esto para la aproximación de soluciones. Sin embargo no fue hasta el trabajo presentado por *Turner*, *Clough*, *Martin* y *Topp* donde introdujeron la aplicación de elementos finitos simples como barras y placas triangulares, con la aplicación de cargas en su plano, para realizar el análisis de estructuras aeronáuticas que formalmente se utilizó el término de discretizado (Figura IV.1). *Oden*, con su trabajo de revisión a trabajos previos, aportó de manera significativa en el campo de las matemáticas al método. Al pasar de los años han surgido un gran número de aportes al desarrollo del método y sin lugar a dudas esto ha beneficiado a su aplicación [IV.3].

En el año de 1960 fue acuñado el término elemento finito y en 1963 reconocido como método matemático validado que se extendió a una diversidad de aplicaciones estructurales, térmicas, de flujo y otras [IV.4]. A partir de este momento, con el desarrollo que han experimentado las computadoras en el aumento de su capacidad de cálculo, gestión de memoria, capacidad de almacenamiento en disco, unido al uso y desarrollo del *MEF* aplicado al cálculo estructural lineal, no lineal, dinámico, térmico, ha hecho que esta metodología se vaya extendiendo desde las universidades, pasando por las multinacionales y llegando a las pequeñas y medianas empresas. En la actualidad, el uso de este método es amplio en la industria y continúan apareciendo un gran número de investigaciones en este campo. Las herramientas computacionales han aportado un medio eficaz para la aplicación de este método, ya que la unión de métodos de análisis con las técnicas de diseño y fabricación permite la realización de un diseño más confiable [IV.5].

IV.2.3.- Metodología desarrollada para el análisis por el Método del Elemento Finito [IV.6]

La metodología seguida para el análisis del desarrollo de la herramienta contempló firmemente las tres fases empleadas en todas las herramientas informáticas actuales que emplean el MEF para el análisis de problemas altamente no lineales. En los que existan contactos entre componentes, grandes deformaciones de los materiales, modos de fallo de los materiales. Así como efectos dinámicos, mismas que son:

Preproceso.- La tarea consiste en discretizar el modelo real (continuo, pieza física o conjunto) en elementos y nodos. En los cuales se calcularán los desplazamientos, deformaciones, esfuerzos y otras magnitudes, a partir de la realización de las siguientes tareas:

- Modelaje de la pieza o importación si se ha generado por medio de un sistema CAD.
- Selección del tipo de elemento o elementos a emplear. En función del tipo de cálculo a realizar. Estos pueden ser 1D, 2D, 3D, lineales, parabólicos, integración reducida, etc.
- Generación de la malla del componente (Creación nodos y elementos).

- Introducción de las condiciones de contorno, la relación de este componente con el resto de las piezas o componentes que lo rodean.
- Introducción de las propiedades mecánicas de los materiales del espécimen en estudio.
- Aplicación de las cargas exteriores.

Proceso.- Consiste en la creación y resolución del sistema de ecuaciones matriciales:

- Definición y selección del tipo de fenómeno físico que se quiere estudiar.
- Configuración de los parámetros de cálculo. Selección de los intervalos de tiempo, número de iteraciones, etc.
- Inicio y fin del cálculo: el programa transfiere las cargas al modelo, genera las matrices de rigidez, realiza la triangulación de la matriz, resuelve el sistema de ecuaciones y genera la solución.

Post proceso.- Consiste en; una vez resueltas las matrices y generados los ficheros de resultados, analizar éstos de forma gráfica, tabulada, etc. Se realizarán tareas de:

- Toma de decisiones oportunas sobre la bondad o no del diseño en cuestión.
- Analizar la viabilidad respecto a los objetivos marcados al inicio del cálculo (optimizar peso, tensiones, número de ciclos, frecuencias, etc.).

V.2.4.- Ventajas en el empleo del Método del Elemento Finito [IV.6]

Algunas de las ventajas de la aplicación del *MEF* son; la facilidad del entendimiento del comportamiento a nivel estructural, térmico, fatiga, entre otros, del espécimen analizado. Esto es debido a que los resultados se presentan de forma gráfica, haciendo los resultados muy accesibles. La realización de optimizaciones de los diseños en un periodo de tiempo corto y a un costo económico razonable. Esto es posible porque junto a las subrutinas de análisis de esfuerzos y transferencia de calor, se pueden obtener valores máximos y mínimos de los parámetros de interés mediante programación lineal. Asimismo, permite evaluar alternativas de diseño, nuevas funciones o sensibilidades de parámetros e interrelaciones entre los mismos. Además, es capaz de reducir el

Diseño y análisis de la palanca de armar de un fusil de asalto
mediante el uso de tecnología de polvos

número de prototipos y el número de ensayos experimentales requeridos, debido a que se diseñan prototipos optimizados, permitiendo mejorar la calidad y robustez de los diseños y reducir los riesgos de falla en nuevos diseños y en los existentes erradicarlos. Esto es debido a que se tiene un mayor conocimiento del problema analizado. Las nuevas metodologías de diseño se basan en la secuencia del modelado, animación, simulación y emulación de los nuevos productos. Actualmente el empleo y uso adecuado de los paquetes computacionales, *CAD*, *CAM* y *MEF* reducen significativamente los tiempos de diseño, debido a la posibilidad de generar prototipos virtuales y validarlos en su diseño, manufactura y funcionamiento, este último es posible comprobarlo a través de módulos de realidad virtual. Estas ventajas permiten al diseñador, reducir tiempos y costos empleados en el desarrollo de nuevos productos, además de ser más flexible ante los cambios que los mercados exigen en el desarrollo de nuevos productos, pudiendo ser innovadores, porque pueden probar virtualmente nuevas soluciones, sin embargo demandan gran cantidad de recursos computacionales de hardware y software para su materialización.

IV.2.5.- Limitaciones en el empleo del Método del Elemento Finito [IV.6]

Algunas de las desventajas del empleo del MEF se resumen en la necesidad de desarrollar metodologías de simulación MEF aplicables a cada caso o problema de diseño. En las que se conozca el grado de correlación con ensayos experimentales, siendo necesario alimentar los modelos con datos precisos (material, cargas, condiciones de contorno, etc.). Con el fin de obtener resultados precisos. En otras palabras, los modelos deben reproducir con la mayor veracidad posible las condiciones de carga y frontera. De otra manera, el ordenador solo entregará *basura numérica*.

Por otra parte, se debe definir el grado de precisión de la simulación, teniendo en cuenta el tiempo necesario para su ejecución, los datos de partida de que se disponen y los resultados a obtener, así como en qué fase del diseño de producto se va a emplear. Esto definirá la inversión que se requiere en programas, ordenadores y periféricos y mantenimiento de la inversión, además de la utilización de recursos humanos especializados y constante actualización de las nuevas versiones de los programas, metodologías y desarrollos.

Estas limitaciones no son tales, si existe un apoyo especializado en investigación y técnicas de simulación por el MEF, los cuales puede aportar el saber hacer y la experiencia adquirida en la resolución de problemas empleando este método. Además de facilitar la capacitación de sus recursos humanos para la aplicación de estas importantes metodologías y conceptos de análisis.

IV.2.6.- Metodología de la investigación [IV.7]

El desarrollo de la metodología establecida se fundamenta en la necesidad de analizar los esfuerzos a los que se somete el diseño y desarrollar el proceso de manufactura de la palanca de armar de un fusil de asalto, auxiliándose del MEF en su primera fase y de técnicas de procesamiento de materiales durante la segunda etapa, a fin de obtener el costo de producción más bajo, considerando la infraestructura de una planta productora de armamento. El desarrollo del análisis relaciona dos condiciones de trabajo, momento flexionante y tensión, aplicando el concepto de concentración de esfuerzos sobre la geometría establecida y diseñada para la aplicación de la palanca de armar de un fusil de asalto. Asimismo, se podrán analizar las fuerzas que actúan sobre el modelo y predecir su comportamiento durante su funcionamiento, siendo posible seleccionar y caracterizar las propiedades mecánicas del material que sea seleccionado. Lo que servirá, para no tener que evaluar al diseño y los materiales de fabricación de forma física, lo que generaría costos elevados durante la fase de fabricación de prototipos y evaluación del diseño

IV.2.7.- Diseño conceptual de la aplicación

Uno de los principales elementos de interacción entre el usuario de un fusil de asalto y el armamento, es la palanca de carga del armar. Misma que transmite la fuerza de accionamiento del usuario hacia del sistema de cierre. Lo cual se realiza con el objeto de introducir el cartucho o munición en la recamara de disparo e iniciar el ciclo de disparo tiro a tiro o en ráfaga. Otra función que realiza la palanca de armar es la de poder accionar el cierre hacia el frente o parte trasera del sistema en caso de que se presente el fenómeno de encasquillamiento durante el funcionamiento del fusil. El concepto de funcionamiento y geometría que prevalece sobre el diseño de este tipo de componentes es su tamaño, peso y adaptabilidad de uso para personas diestras y no diestras, con el objeto de que su geometría, peso y posición dentro de un fusil de asalto no afecte la operatividad y movilidad del arma durante una operación de alto impacto.

IV.3.- Selección de la geometría para la palanca del fusil

Con el objeto de mantener un diseño elegante y funcional en el fusil, capaz de adaptarse a la antropometría del soldado mexicano y al tipo de habilidades motrices que ha desarrollado durante su evolución (derecho, zurdo o ambidiestro), que sea de bajo peso y geometría compacta, se determinaron varias formas preliminares capaces de realizar la función específica de interacción entre el usuario y el arma durante su operación. A partir de los diseños conceptuales y formas preliminares se trabajaron las geometrías mediante el empleo de un programa computacional de diseño asistido por computadora (CAD), considerando la geometría de la pieza y la interacción con los demás componentes del sistema de cierre (ANEXO 1) y el armamento mismo. Con el usuario del fusil de asalto. Mediante este programa se consideraron las tolerancias geométricas y los ajustes mínimos y máximos de ensamble de los componentes (Figura IV.3).

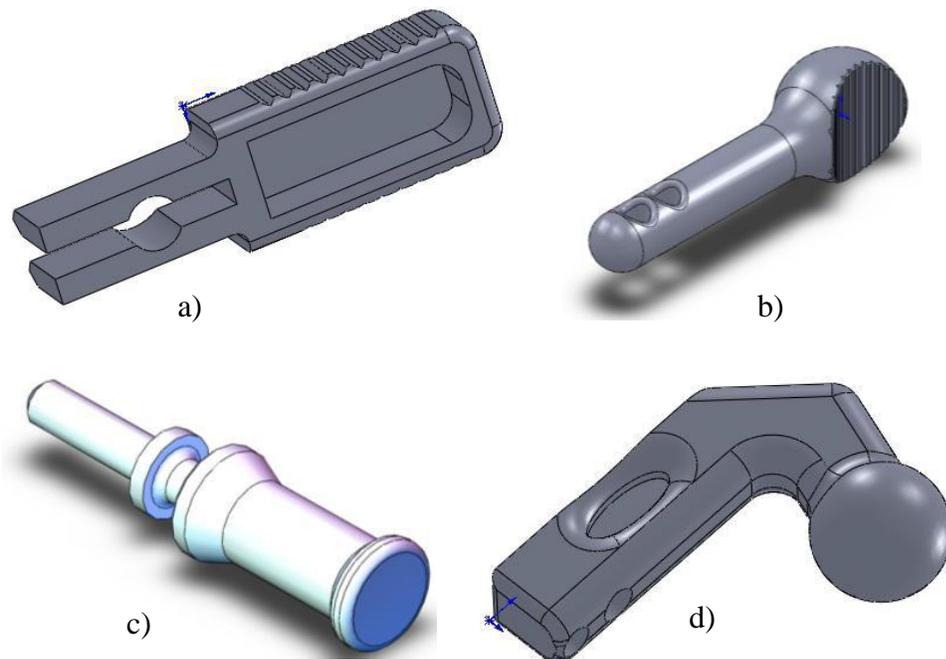


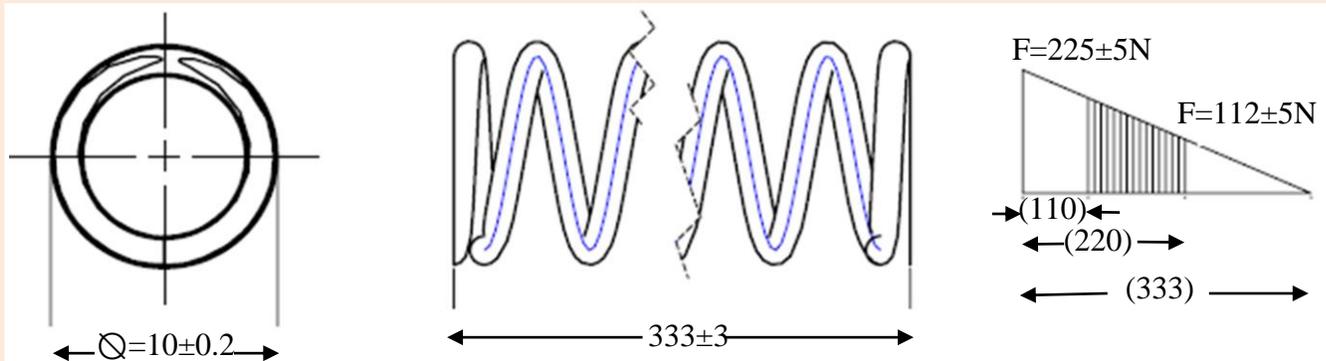
Figura IV.3.- Geometrías de la palanca de armar modeladas mediante CAD

En la Figura IV.3 se muestran los modelos virtuales de las piezas conceptualizadas, en diferentes tipos de fusiles determinándose que la geometría motivo de este trabajo será la Figura IV.3c por convenir a las especificaciones de funcionalidad establecidas por el fabricante por su sencillez y estética de la palanca con el resto del fusil de asalto.

IV.3.1- Análisis esfuerzos (magnitud y posición)

Las fuerzas que interactúan con la palanca de armar se determinan a través del principio de funcionamiento por toma de gases. Donde parte de los gases provocados durante el disparo y deflagración de la pólvora del cartucho mantiene en movimiento al sistema de cierre, provocando que un resorte de empuje del sistema sea comprimido y liberado durante cada ciclo del arma. Lo que representa la fuerza que será aplicada a la palanca de armar. En la Figura IV.3 se muestra el plano de Ingeniería del resorte de empuje y en la Figura IV.5 la colocación del resorte.

La fuerza que se aplica directamente en la palanca de armar es de $22.94 \text{ kg f} = 225 \text{ N}$, esta es la fuerza que mantiene el resorte de empuje cuando está completamente cargado por efecto de los gases de combustión donde se tomaría como carga puntual en el centro de masa de la palanca en el eje Z que es la sección transversal de la pieza o bien la fuerza que el usuario del fusil deberá aplicar para comprimir el resorte hasta una altura de 110 mm con el fin de cargar el arma y sería una carga uniformemente distribuida como se muestra en la Figura IV.4 el plano de ingeniería del resorte Figura IV.7a.



No. total de espiras: 84

Espiras activas: 82

Diámetro del alambre: 1.193 mm. (0.047")

Carga a altura de ensamble 220 mm: $225 \pm 5 \text{ N}$

Carga a altura de trabajo 110 mm: $112 \pm 5 \text{ N}$

Nota: después de las pruebas de fatiga (10,000 ciclos), NO debe presentarse una deformación mayor al 2% en la altura total y en el diámetro exterior, así como las fuerzas deben encontrarse en el rango solicitado.

Figura IV.4.- Plano de ingeniería del resorte de empuje



Figura IV.5.- Interior del fusil

En la Figura IV.5 se muestra la parte interna del fusil de asalto donde la pieza de color rojo es el percutor, cuando se acciona el gatillo este es el que hace que le pegue a la capsul y hace que salga el proyectil, Él tuvo cañón donde se lleva a cabo la combustión al disparar, provocando que salga el proyectil por los gases y el mecanismo de cierre regrese a su posición original, es de aquí donde sale la fuerza de 225 N que es la fuerza que se ocupa para vencer el resorte y las condiciones de frontera que con ayuda de la Figura IV.9. se realiza el análisis numérico.

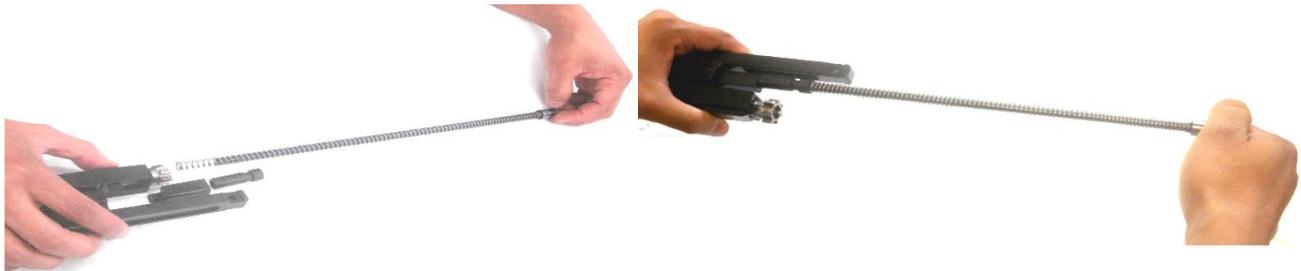


Figura IV.6.- Resorte de empuje



Figura IV.7.- Cargando el fusil FX 05

Esta fuerza se aplicará directamente en el centro de masa de la palanca de armar Tabla IV.2, mismo que se encuentra situado a 17.87 mm desde la parte posterior hacia la punta de la pieza y sobre el eje de la misma. Como se muestra en la Figura IV.6. En Figura IV.7 se muestra la posición de la palanca para poder hacer el *Análisis Numérico* y en la Figura IV.8. El desplazamiento que hace la palanca en el fusil para cargar.

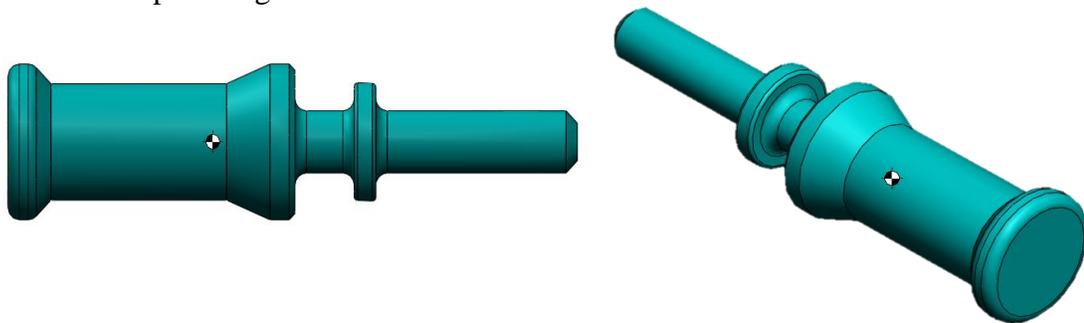


Figura IV.8.- Ubicación de la aplicación de la fuerza sobre la pieza en el centro de masa

Tabla IV.2.- Características de la palanca

CENTRO DE MASA DE LA PALANCA DE ARMAR	
Masa	21.17 gr
Volumen	2680.07 mm ³
Área de la superficie	1539.77 mm ²

Centro de masa	X=30.01mm
	Y=0.00645mm
	Z=0.00mm



Figura IV.9.- Posición de la palanca cuando se pone en el mecanismo



Figura IV.10.- Desplazamiento que hace la palanca

IV.4.- Principios del análisis de Elemento Finito [IV.7]

Considerada como una herramienta computacional muy útil, capaz de ofrecer soluciones a los problemas de Ingeniería, el análisis de Elemento Finito (AEF), *Finite Element Analysis* (FEA) en inglés, puede presentar caminos que lleven a la resolución de dichos problemas con carácter complejo lo más cercano al ambiente real. Lo que hace el AEF es partir en elementos pequeños un dominio, considerado como *el todo*, cuya solución se erige empleando métodos de variación. Cada elemento tiene funciones de aproximación que están en puntos determinados conocidos como nodos, que están confinados en los límites de los elementos y tienen la característica de hacer el enlace de un elemento con otro. Como se menciona antes, los elementos se conectan por medio de nodos y estos a su vez dan detalles acerca de los grados de libertad, que son dispuestos por el tipo de elemento y las características del problema, además significa que al elemento se le concede una variable de nodo y el nodo representa las variables de campo. En la Figura IV.9 se muestra la separación de un dominio en elementos.

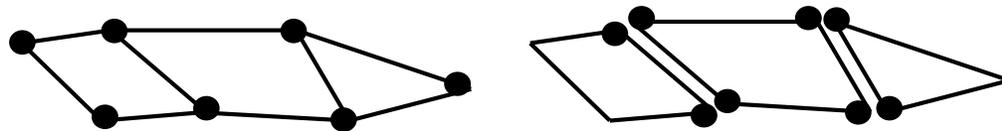


Figura IV.11.- Separación del domino en elementos

Pueden usarse para la separación o discretización líneas, áreas o volúmenes, como por ejemplo triángulos, rectángulos, cuadriláteros y tetraedros, prismas regulares e irregulares también, mostrados en la figura IV.11 [IV.7].

El modo de particionar un sólido en varios elementos es a través del discretizado (mallado), tanto para figuras simples como también para complejas, además se hace uso de los preprocesadores de la herramienta computacional. Una característica de éstos es que otorga a los nodos y elementos números irrepetibles o exclusivos, la conexión entre un elemento y otro, como ya se menciona antes, es a través del nodo. En la figura IV.12 se observa un ejemplo del discretizado numerado.

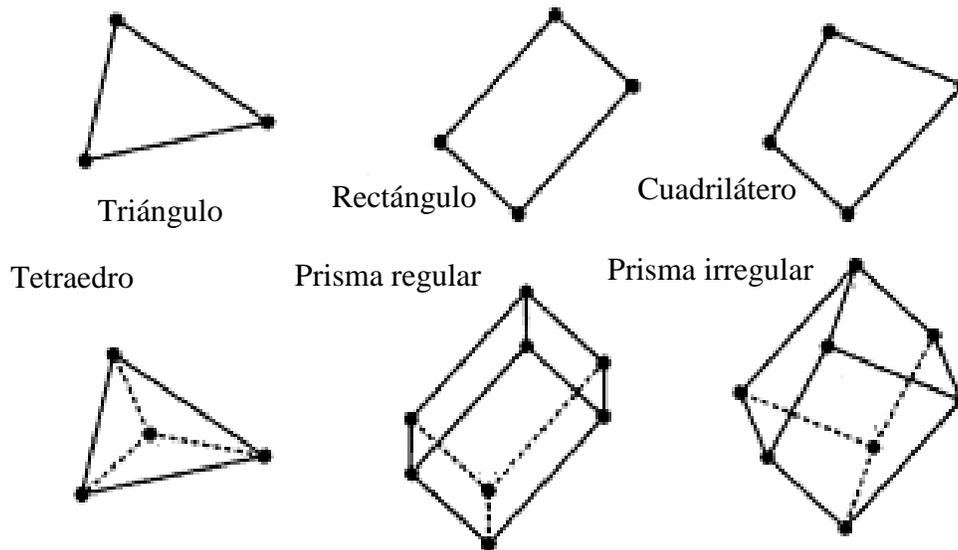


Figura IV.12 Formas de elementos

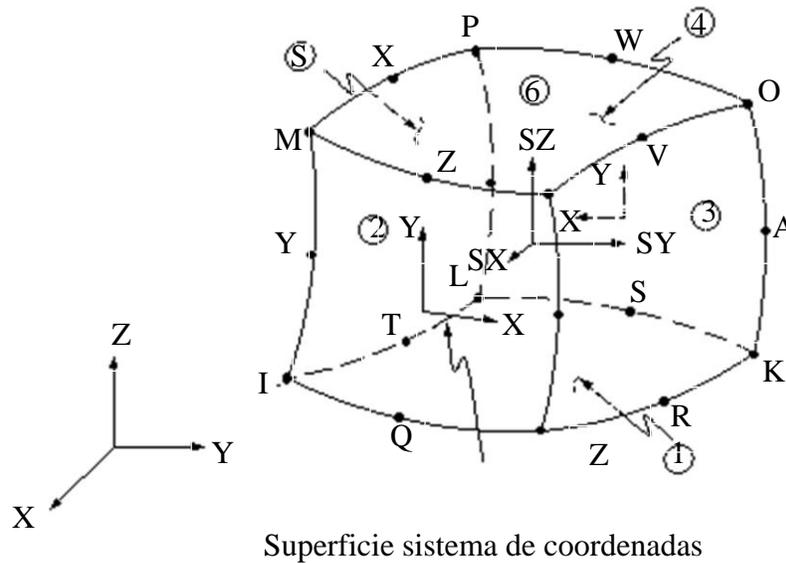


Figura IV.13.- Discretizado geometría tridimensional con respectiva numeración

Mientras se mantenga la compatibilidad entre elementos y nodos en las fronteras colindantes con otros elementos, se pueden tener varias formas de estos. A veces se tiene el caso de la dificultad de tener todos los elementos cuadráticos en la geometría, que para resolver esto se combinan elementos triangulares y cuadráticos. Sumado a esto, la perfección del mallado está sujeta a los recursos computacionales y a la complejidad del análisis a realizar. Una solución es generar un mallado más detallado en las zonas de interés de la geometría [IV.8].

Uno de los programas computacionales para la Ingeniería más aceptados por la comunidad científica es *ANSYS*[®], que ofrece una amplia gama de opciones a elegir en cuanto se refiere a tipos de elementos para análisis en dos y tres dimensiones, que van desde triangulares, cuadriláteros hasta hexaedros y variedad de prismas, algunos son *PLANE 182*, *PLANE 183*, *SOLID 186* y *SOLID 187*. Es importante tener en cuenta algunos conceptos básicos de Mecánica, como son desplazamiento, esfuerzo, deformación, entre otros. Se puede considerar el desplazamiento, que es el vector de posición, como un campo de desplazamiento y por lo general están involucradas tres componentes o funciones de posición como son U_x , U_y y U_z . El vector de posición está establecido como la posición inicial y final de la partícula. Esto quiere decir que la partícula se mueve a otra posición [IV.8].

Aparte del concepto de desplazamiento, también es de interés esclarecer a grandes rasgos qué es el esfuerzo, pues bien, es la magnitud de una presión actuando de manera normal sobre una superficie, cabe señalar a qué superficie uno se refiere y la dirección y magnitud de la presión, a diferencia del esfuerzo normal, el esfuerzo cortante actúa de forma paralela a la superficie del cuerpo en cuestión. Las unidades en el Sistema Internacional de Unidades son Pascales (N/m^2) y cuando se usa el Sistema Inglés las unidades son PSI (Libra/pulg²). Para representar esto mejor, en un eje de coordenadas, se ilustran en un cubo en la Figura IV.13 se muestra las direcciones de los esfuerzos en las caras, para efectos prácticos el ejemplo se concentra en la cara X positiva, donde se tiene la componente del esfuerzo x , la presión ejercida en la cara se puede descomponer en σ_x esfuerzo normal en x , τ_{xy} esfuerzo cortante en y , τ_{xz} esfuerzo cortante en z [IV.9].

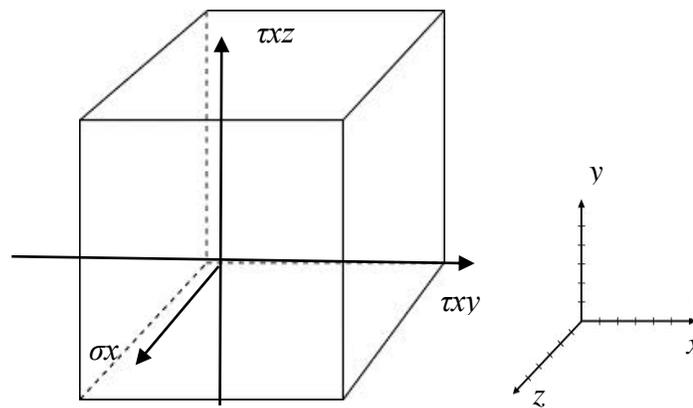


Figura IV.14.- Componentes de esfuerzo normal y cortante en cara x del cubo

IV.5.- Herramientas computacionales

Retomando la utilidad de la herramienta computacional ANSYS[®], mencionada antes, para realizar un análisis mecánico, es importante tener bien definido las características del modelo de estudio y del mismo análisis además de la metodología que se va a tener con el uso del programa para este análisis numérico estático se una computadora ASUS core i7 con 8 Gigabytes de RAM 8 núcleos.

El procedimiento numérico de cómo se realiza el diseño se encuentra en Anexo 2 y las propiedades de la palanca en el Anexo 4; Utilizando la siguiente tabla para poder hacer el análisis. Las propiedades mecánicas del acero CPM10V son las que se muestran a continuación en la tabla IV.4 [IV.13].

Tabla IV.4.-Propiedades mecánicas del acero CPM10V [IV.13]

Características	Valor		
Módulo de Elasticidad (E)	32 X 10 ⁶ psi	221 GPa	221 000 N/mm ²
Densidad	0.268 lbs/in	37418 kg/m ³	
Resistencia al impacto	20 a 35 J		
Temperatura de temple y revenido	2150 °C-540 °C		
Relación de Poisson (ν)	0.28		
Resistencia ultima (σ_u)	1300 N/mm ²		
Punto de cedencia (σ_y)	815 N/mm ²		

IV.6.- Geometría y discretización

El concepto de funcionamiento y geometría que prevalece sobre el diseño de este tipo de componentes es su tamaño, peso y adaptabilidad de uso para personas diestras y no diestras. La geometría de la pieza se delimita a la tomada de la tesis citada cambiando el tipo de material para su mejoramiento haciendo un análisis numérico que se genera en tres dimensiones. Esto para que los resultados obtenidos sean más exactos (en el ANEXO 1, se puede observar el croquis y medidas de la palanca). Utilizando el programa ANSYS® se crea el volumen en (Figura IV.16).

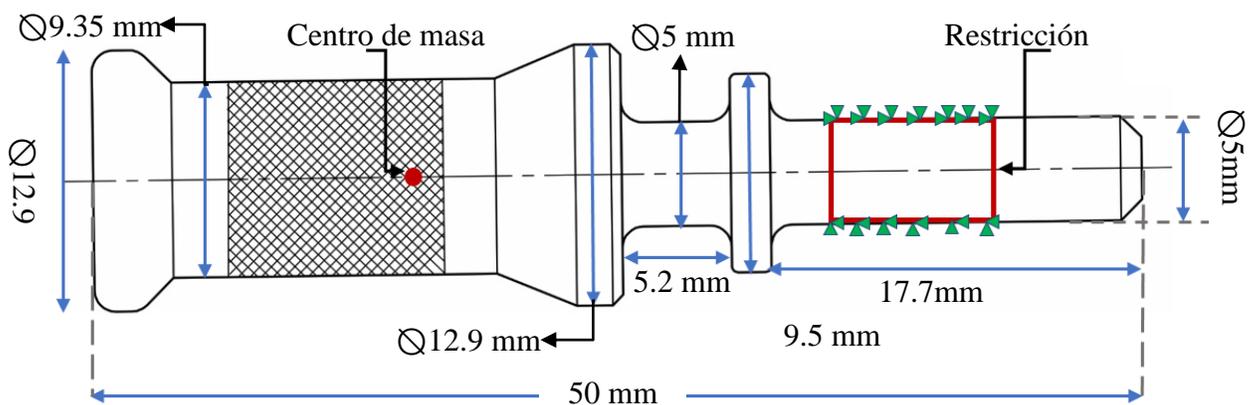


Figura IV.15.- Geometría de la palanca

En lo que respecta a la discretización del modelo, en el programa *ANSYS*[®] se usan básicamente *Solid 186* para el mallado ilustrado en Figura IV.16. El discretizado se realizó de manera controlada aprovechando los recursos computacionales (Figura IV.17) y se aprecia el discretizado de las geometrías con un refinamiento en la zona de mayor prioridad, con 124, 350 elementos y 542, 114 nodos. En el *Pre-proceso* se da de alta el tipo de material (*SOLID 186*), las propiedades mecánicas del material ($E=221000 \text{ N/mm}^2$; $\nu=0.28$).

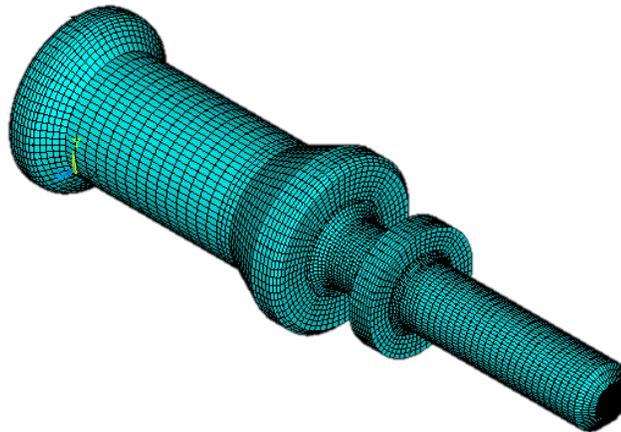


Figura IV.16.- Discretización controlada del modelo

IV.7.- Primer caso de estudio

El modelo fue restringido en el área funcional de la palanca de armar, sección donde interactúa con el conjunto de cierre del arma. Así como se aplica una fuerza de 225 N en la línea que cruza sobre el centro de masa del modelo (Figura IV.17) y se realiza un análisis elástico lineal.

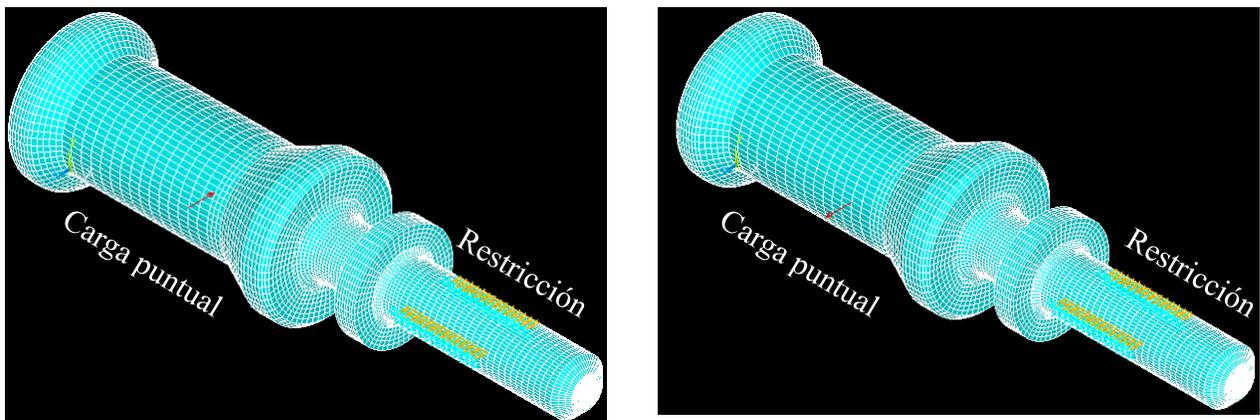


Figura IV.17.- Condiciones de frontera y carga puntual

En las cargas que se muestran en la Figura IV.17 se analiza el esfuerzo y la deformación cuando la palanca terminó su recorrido (Figura IV.8). Los esfuerzos se presentan en el eje Z con cargas de 225 N y -225 N individualmente, dependiendo si es carga o descarga del fusil. En las siguientes figuras se muestran las deformaciones a las que está sometida la palanca.

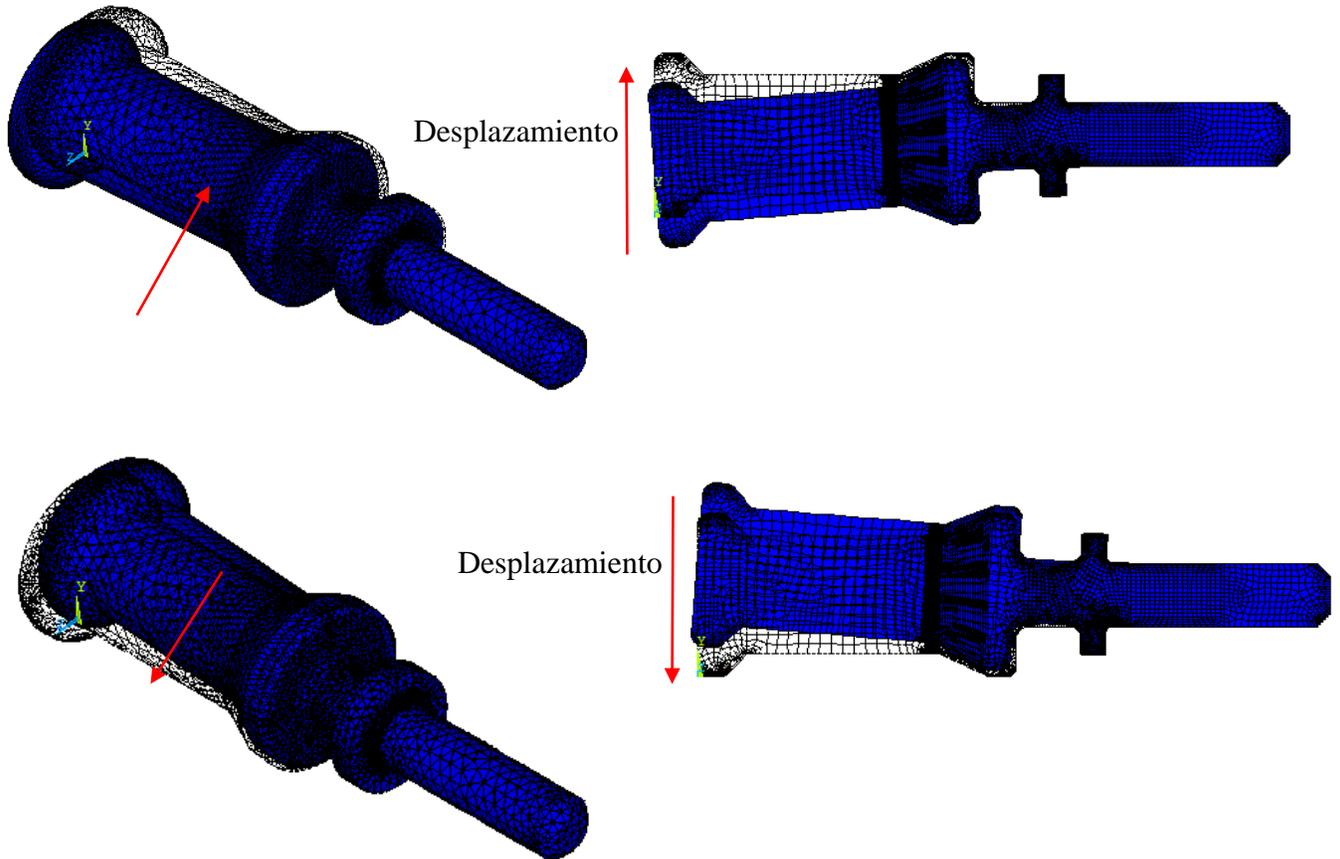


Figura IV.18.- Deformación en eje Z positivo y negativo

IV.8.2.- Resultados generales del primer caso de estudio

En el siguiente estudio numérico se realiza cuando la fuerza está en acción positiva y negativa en el eje Z cuando ya terminó el recorrido simulando que el fusil ha sido disparado.

IV.8.2.1.- Desplazamientos unitarios en X

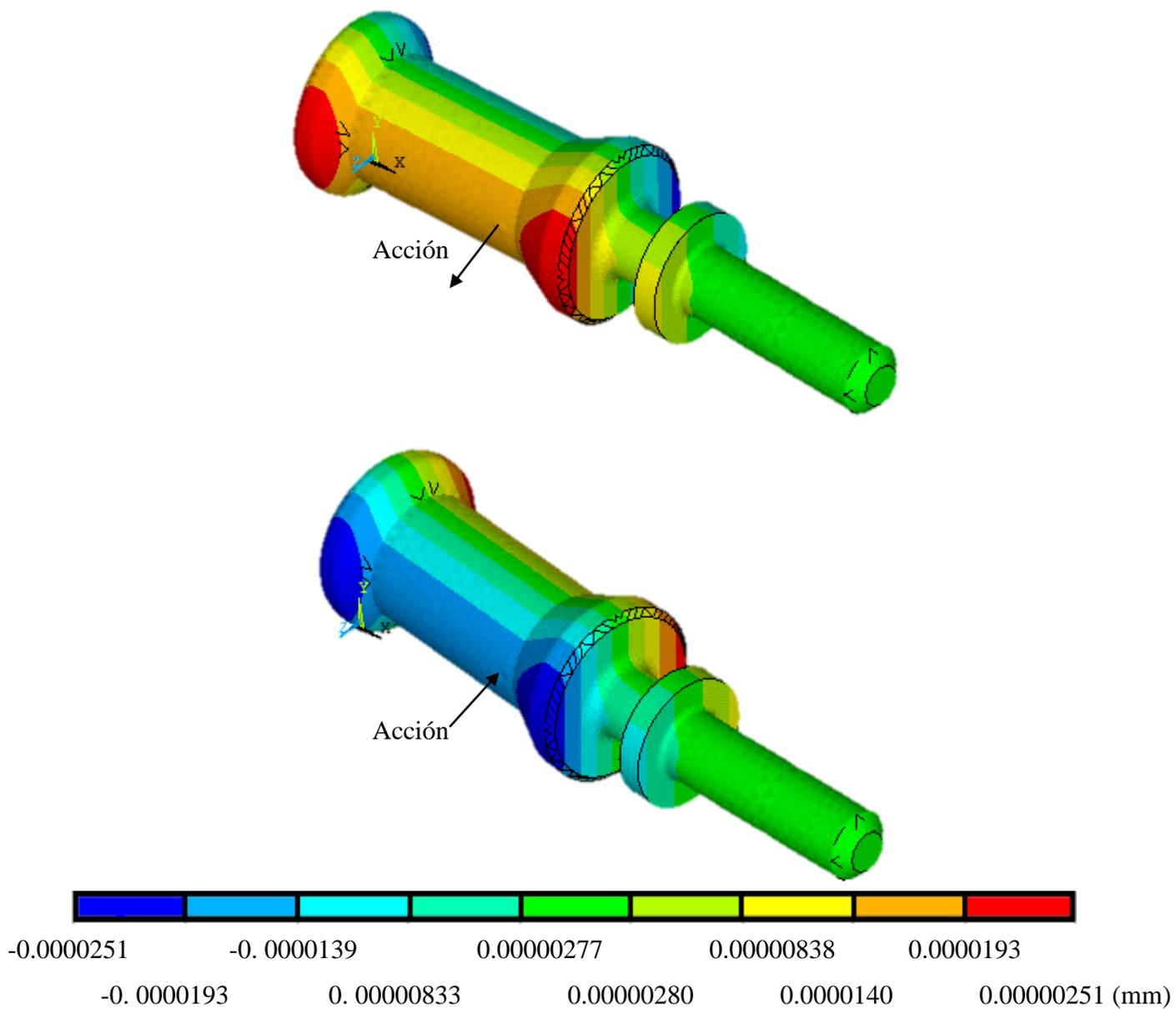


Figura IV.19.- Desplazamiento unitario en el eje X en carga y descarga

IV.8.2.2.- Desplazamientos en unitarios en Y

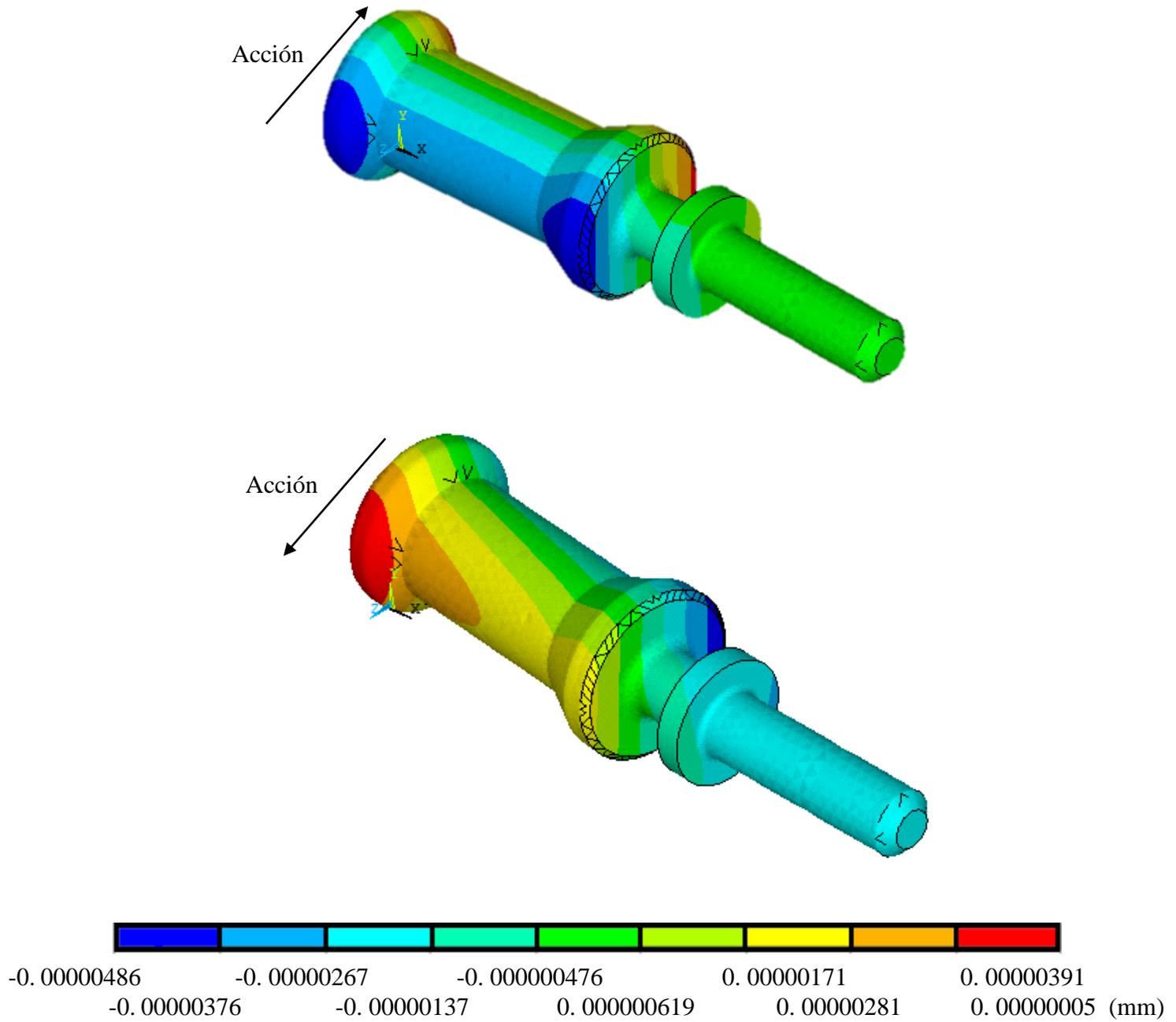


Figura IV.20.- Desplazamiento unitarios en el eje Y en carga y descarga

IV.8.2.3.- Desplazamientos unitarios en Z

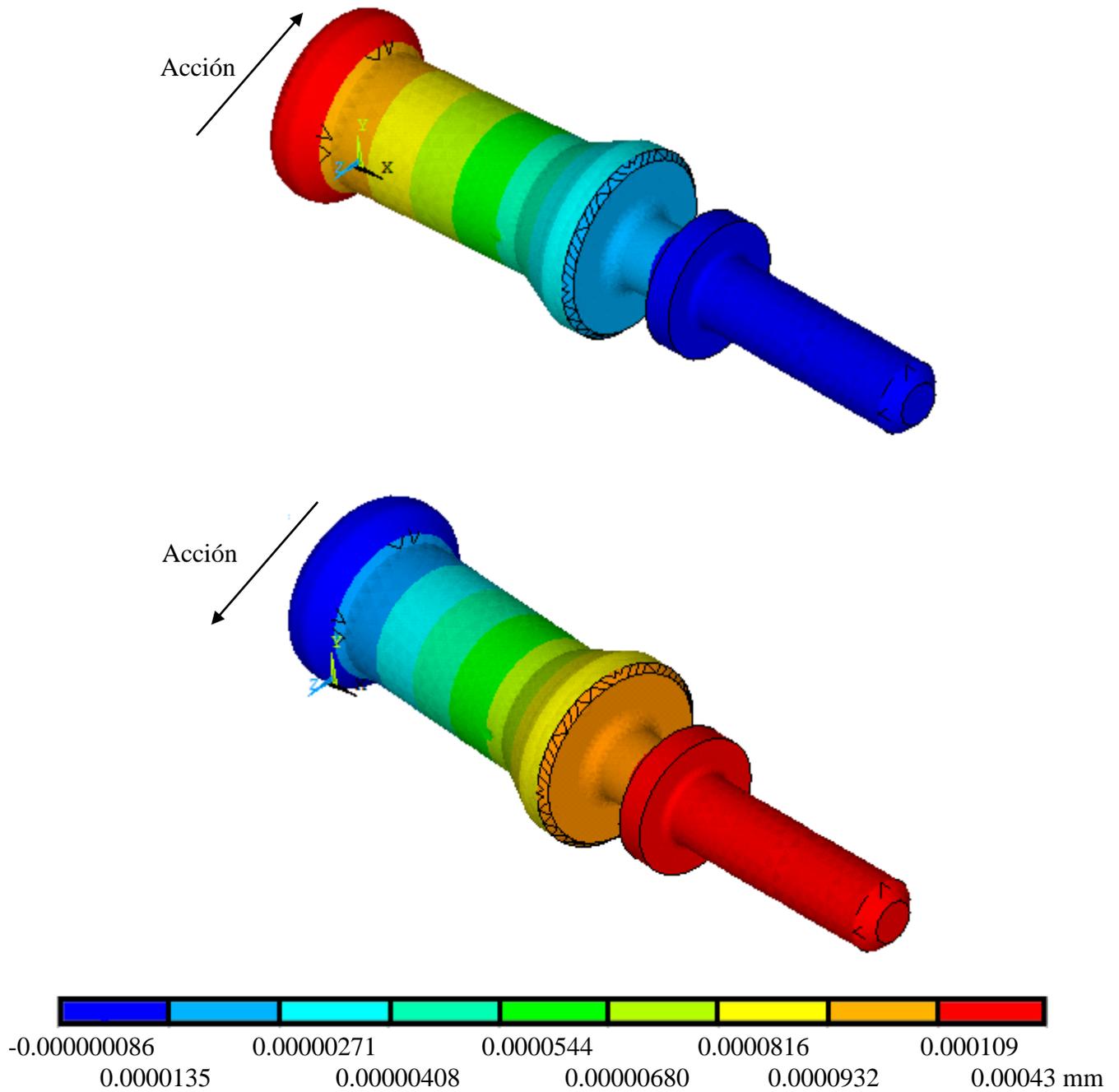


Figura IV.21.- Desplazamiento unitario en el eje Z en carga y descarga

IV.8.2.4.- Suma del desplazamiento vectorial

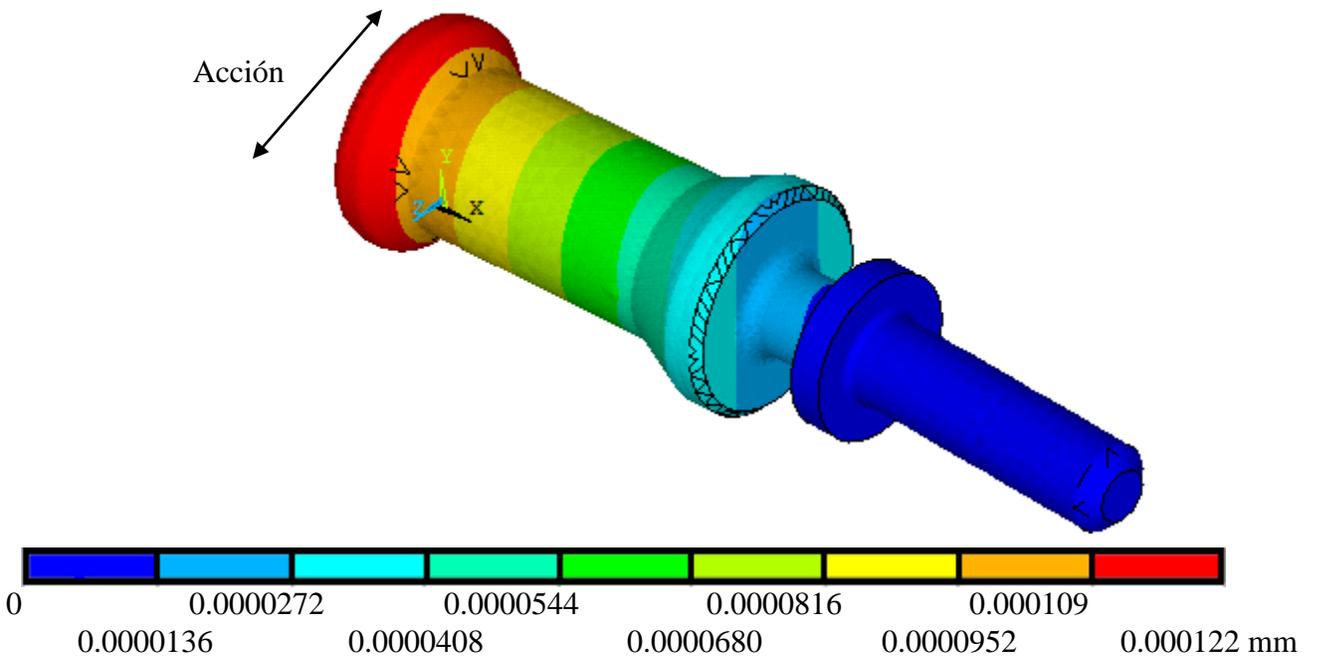


Figura IV.22.- Suma vectorial del desplazamiento en carga y descarga

IV.8.2.5.- Esfuerzos nominales en X

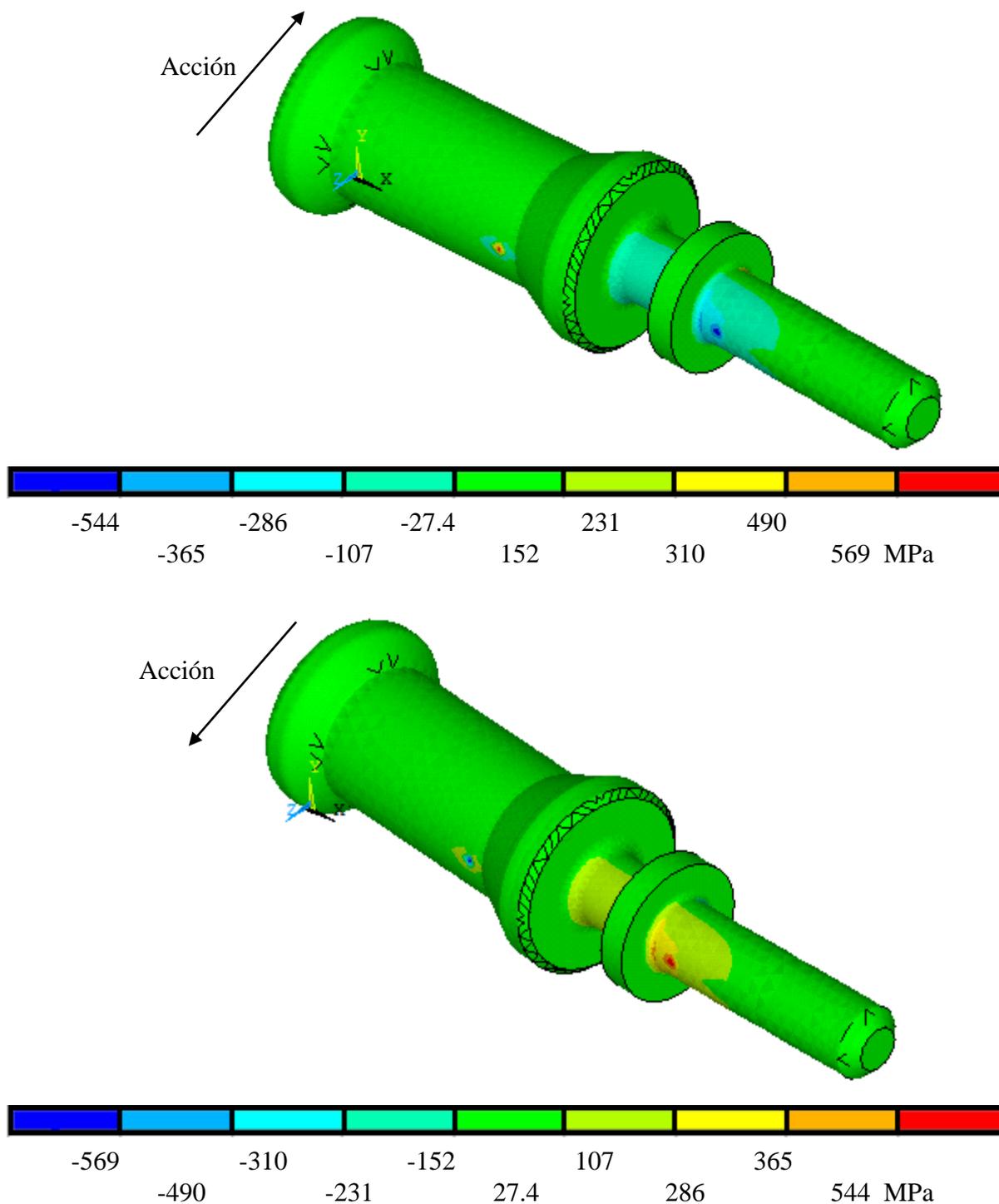


Figura IV.23.- Esfuerzos nominales en el eje X en carga y descarga

IV.8.2.6.- Esfuerzos nominales en Y

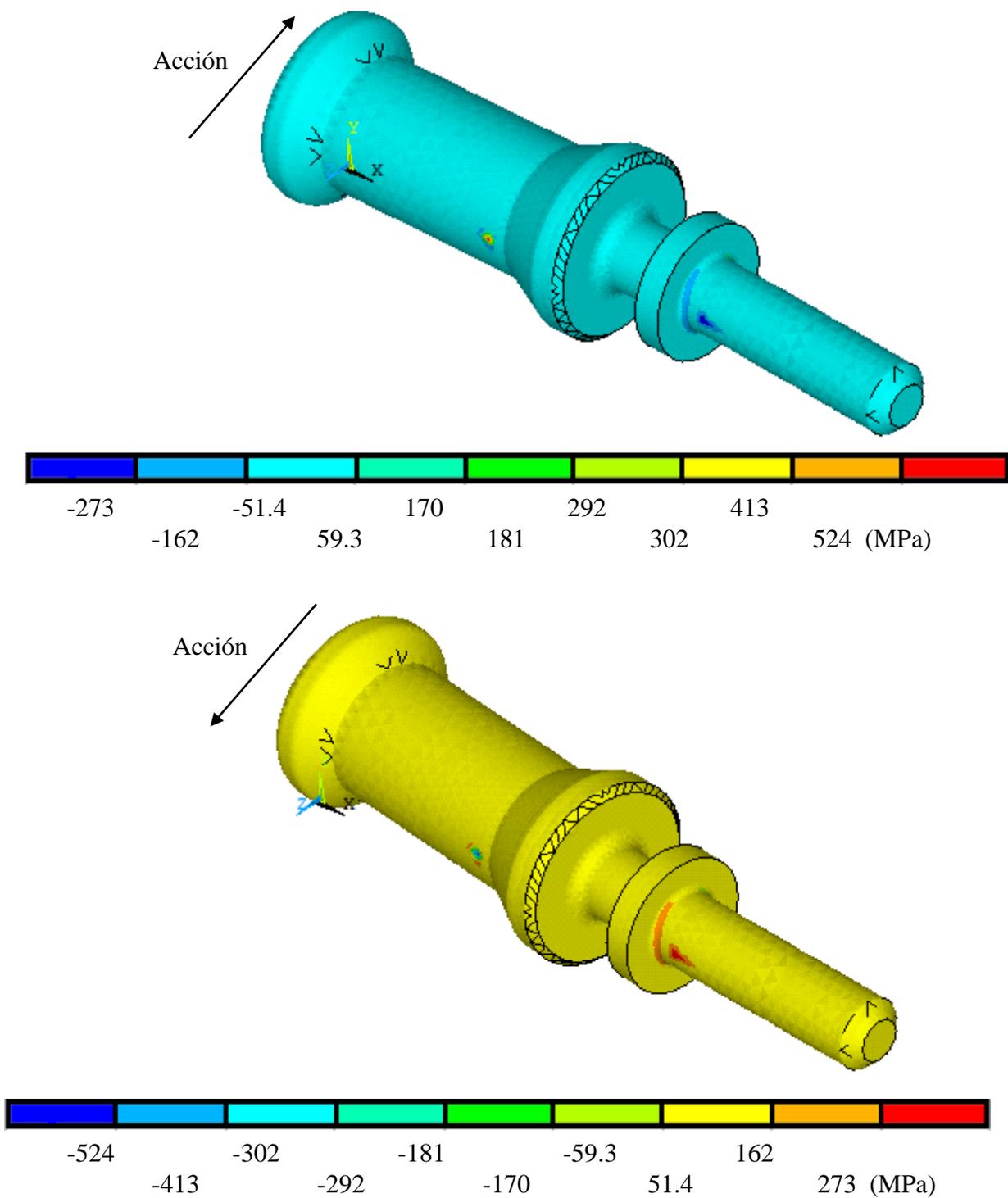


Figura IV.24.- Esfuerzos nominales en el eje Y en carga y descarga

IV.8.2.7.- Esfuerzos nominales en Z

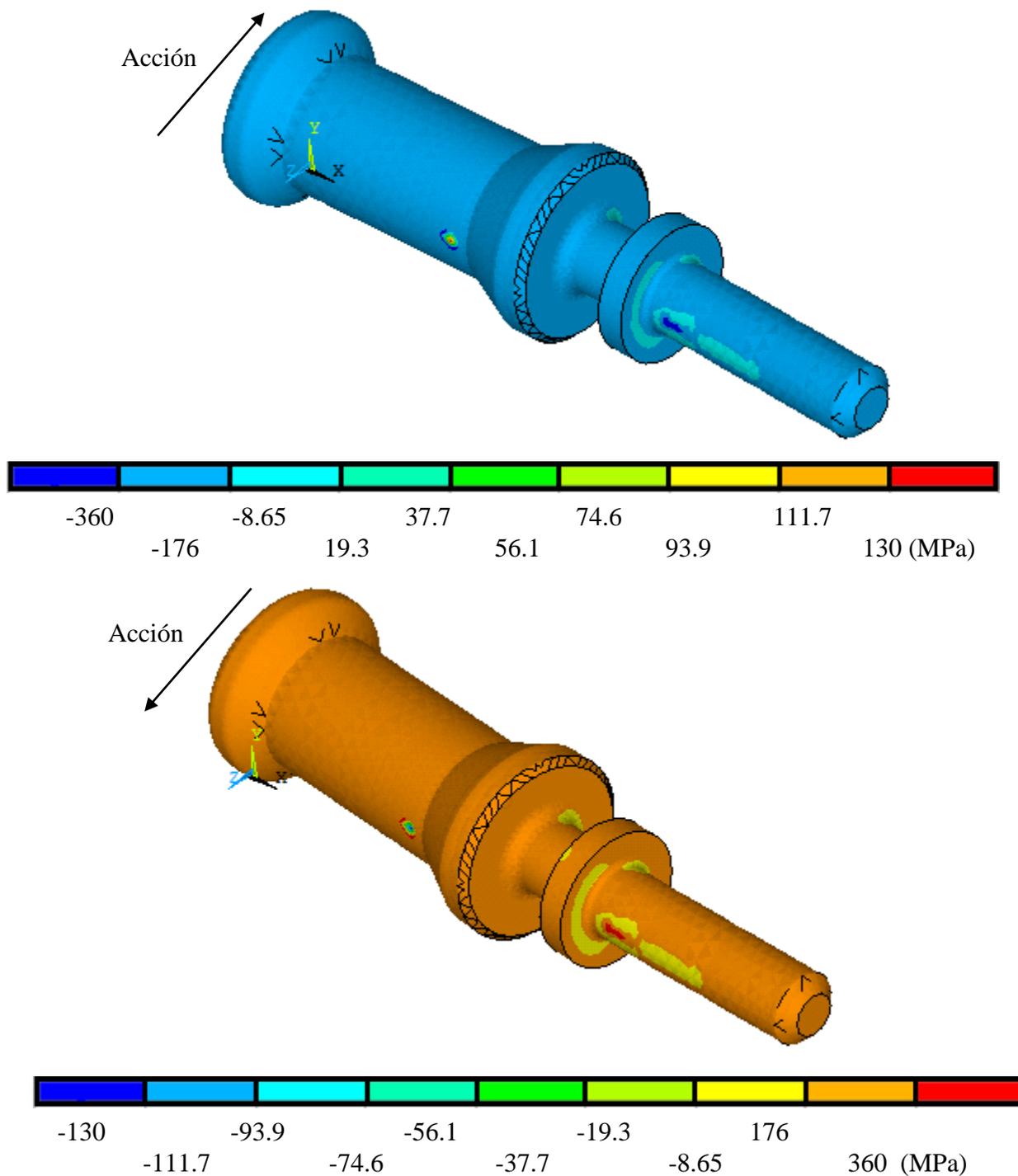


Figura IV.25.- Esfuerzos nominales en el eje Z en carga y descarga

IV.8.2.8.- Esfuerzos cortante plano XY

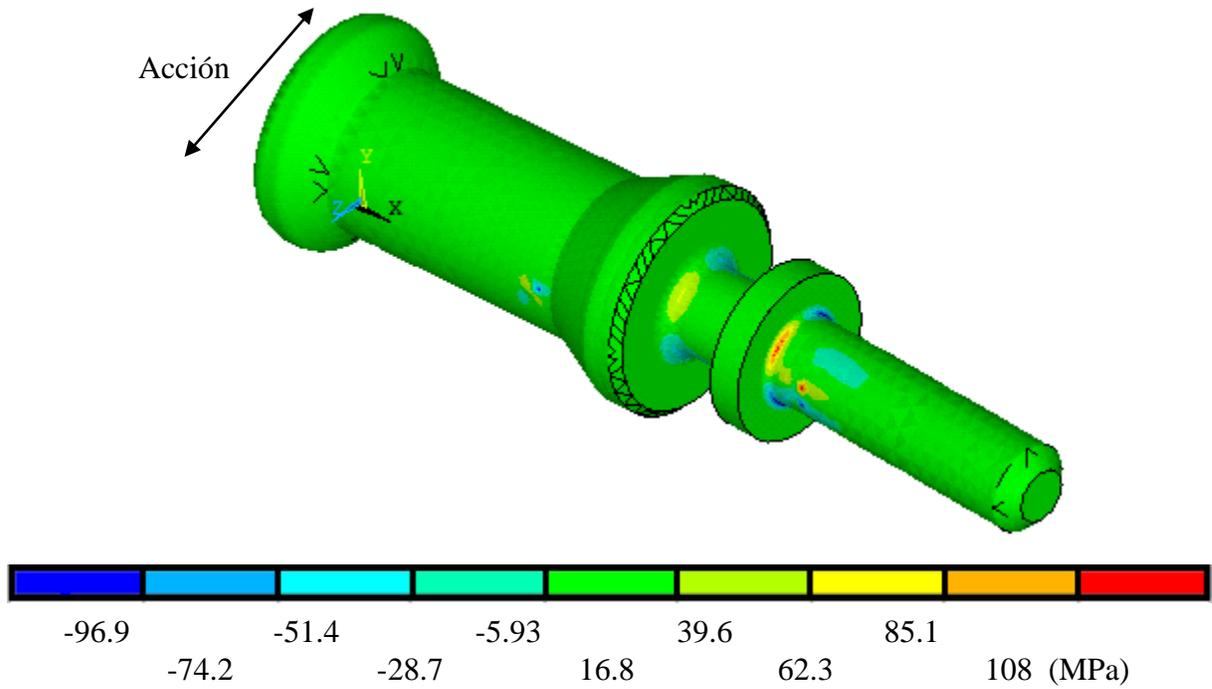


Figura IV.26.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en carga y descarga

IV.8.2.9.- Esfuerzos cortante plano YZ

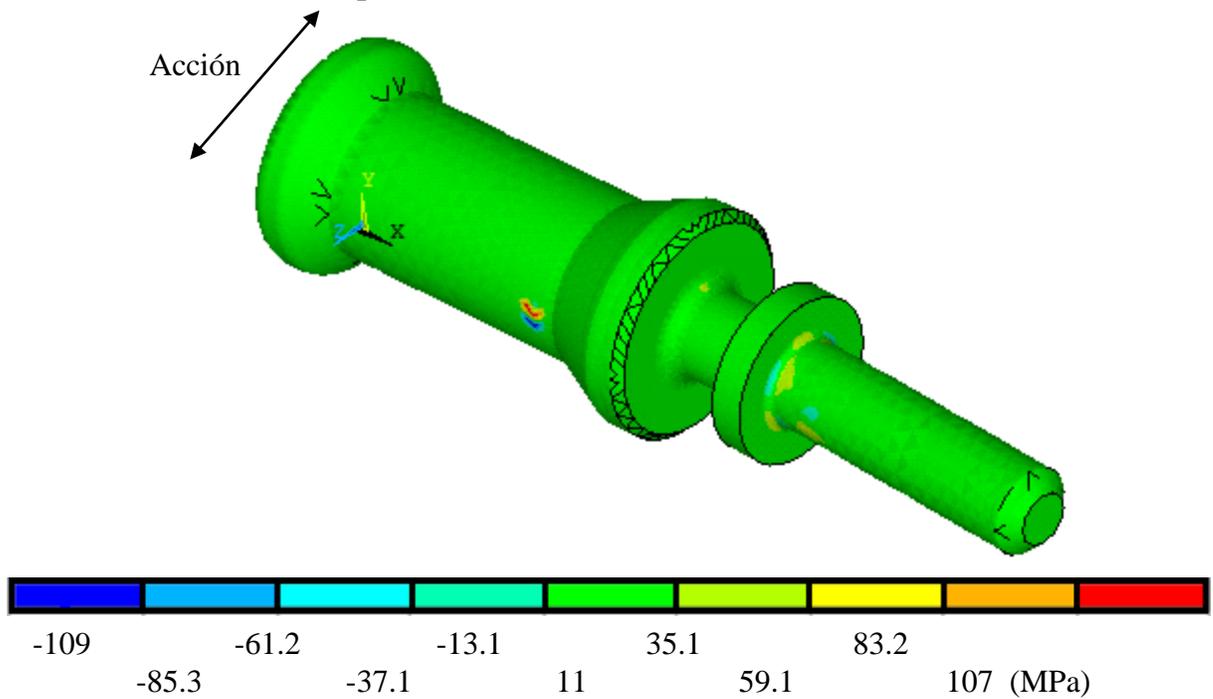


Figura IV.27.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en carga y descarga

IV.8.2.10.- Esfuerzos cortante plano XZ

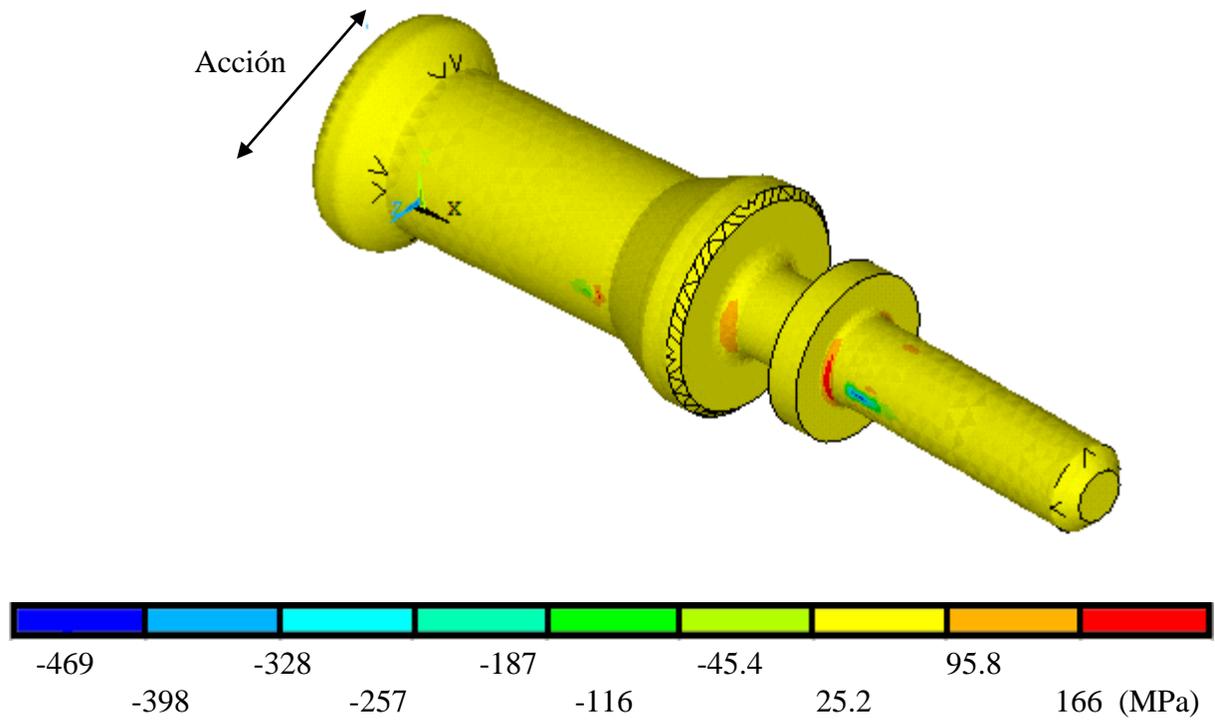


Figura IV.28.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en carga y descarga

IV.8.2.11.- Primeros esfuerzos principales

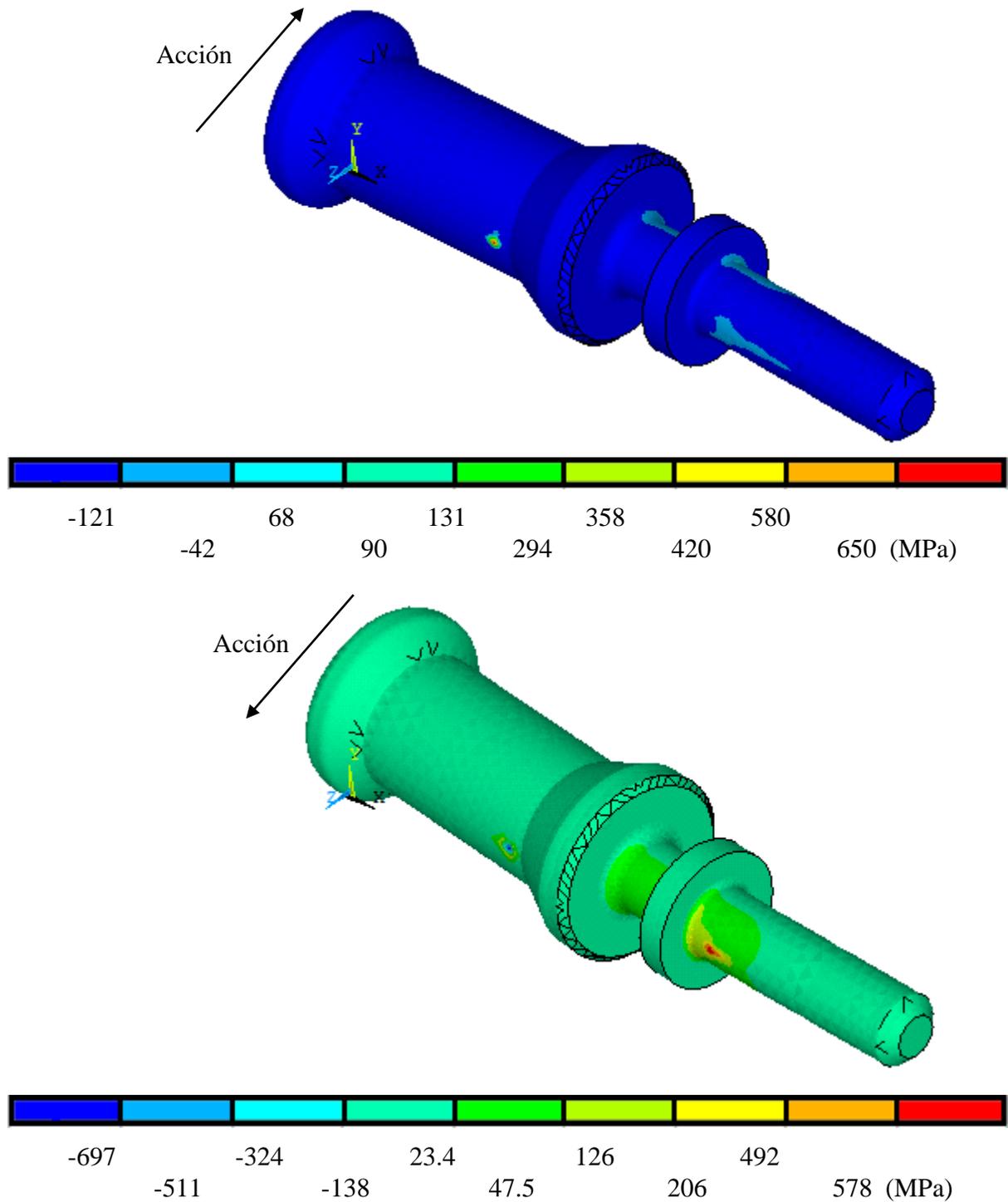


Figura IV.29.- Primeros esfuerzos principales en carga y descarga

IV.8.2.12.- Segundos esfuerzos principales

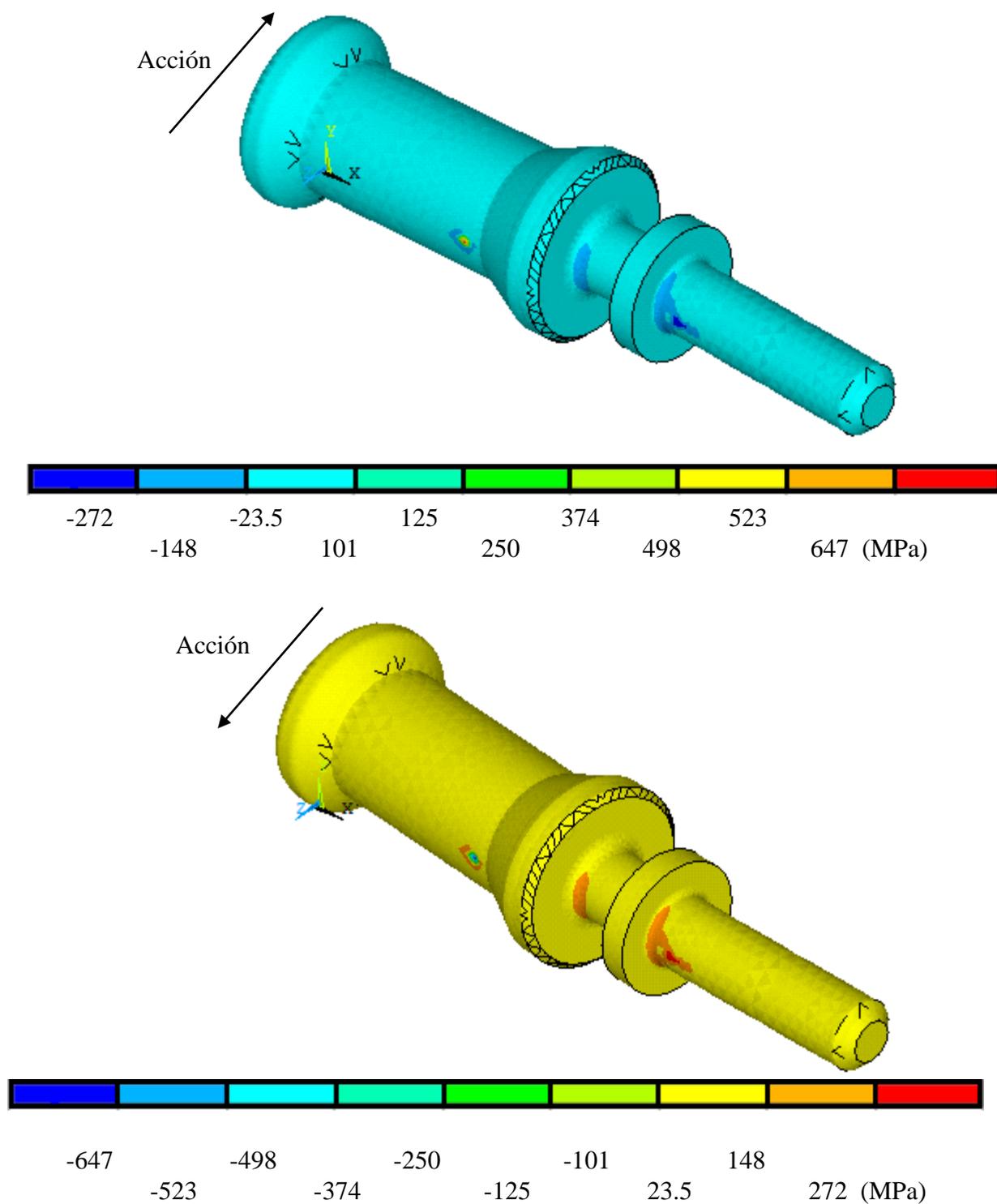


Figura IV.30.- Segundos esfuerzos principales en carga y descarga

IV.8.2.13.- Terceros esfuerzos principales

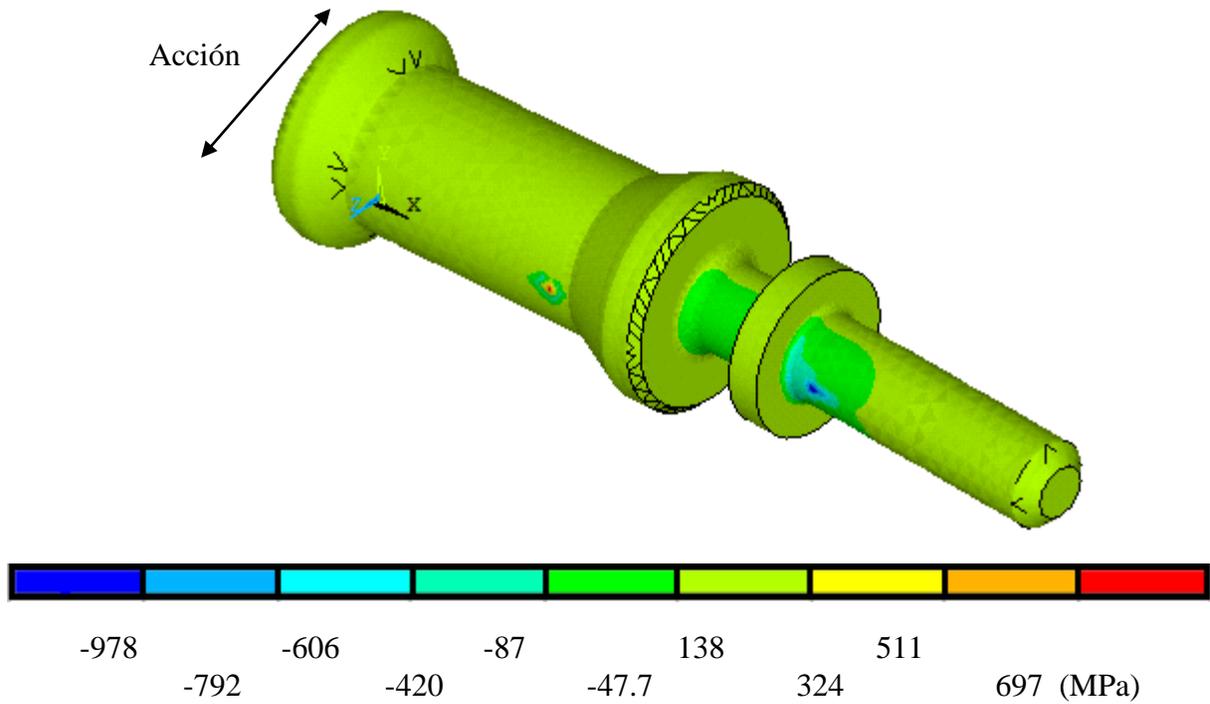


Figura IV.31.- Terceros esfuerzos principales en carga y descarga

IV.8.2.14.- Factor de intensidad de esfuerzos

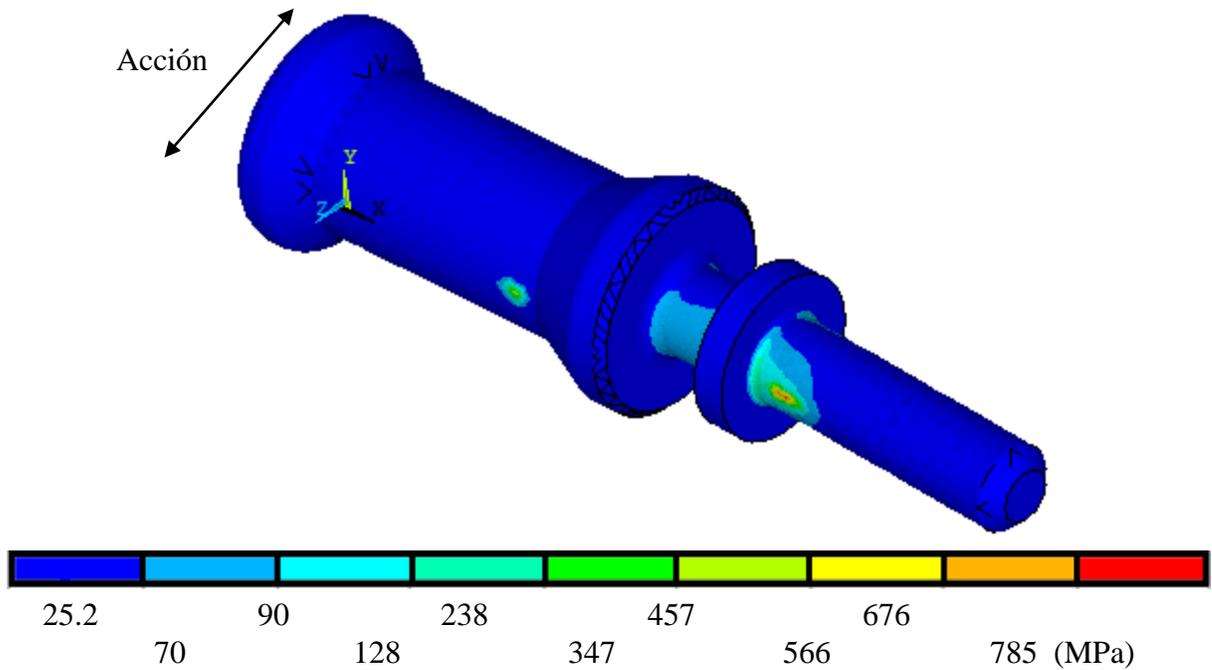


Figura IV.32.- Factor de intensidad de esfuerzos en carga y descarga

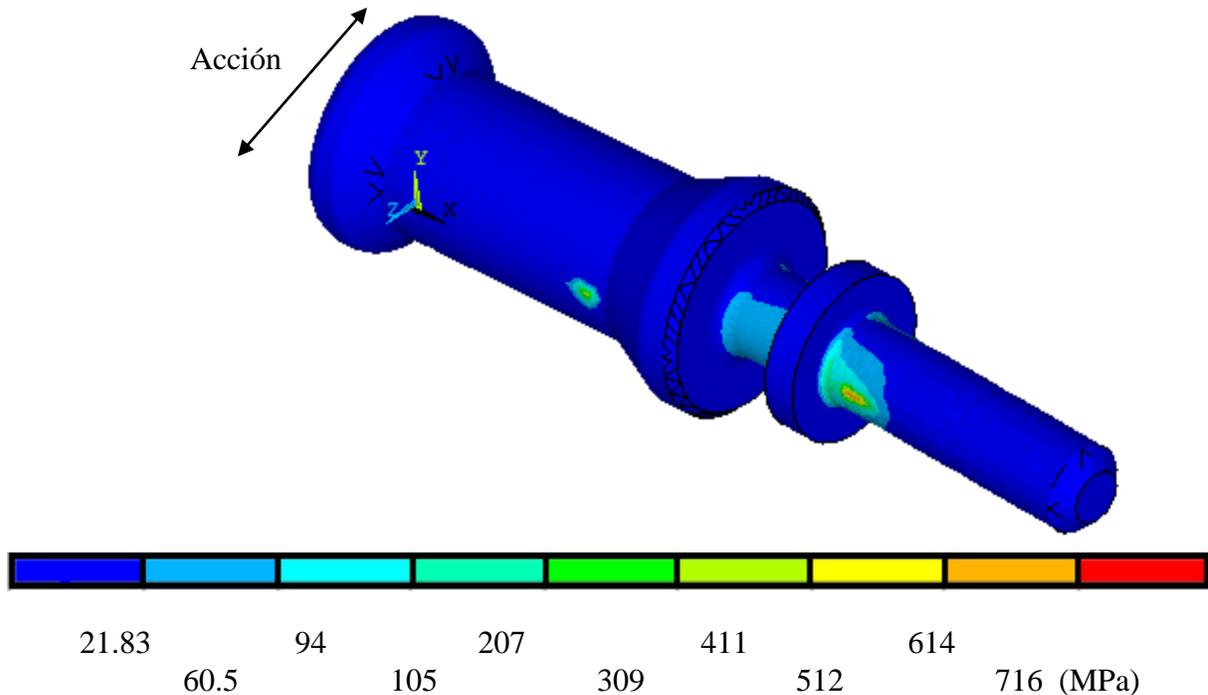
IV.8.2.15.- Esfuerzos von Mises

Figura IV.33.- Esfuerzos von Mises en carga y descarga

IV.9.- Segundo caso de estudio Análisis elastoplástico de la palanca de armar

A través del análisis elastoplástico por medio del Método de Elementos Finitos a la palanca de armar de acero pulvimetalúrgico CPM10V. Donde se pretende determinar los estados de esfuerzos generados en el modelo bajo condiciones de trabajo sobre el área efectiva misma sobre la cual se le aplica una carga uniformemente distribuida de 600 N como primer paso. Como segundo paso es la descarga total del modelo en cuestión de análisis elastoplástico. Para realizar el análisis se tomó únicamente el análisis estático cuando la palanca es cargada con una diferente fuerza ya que de los procesos anteriores este último es donde se generan los mayores esfuerzos en condiciones extremas.

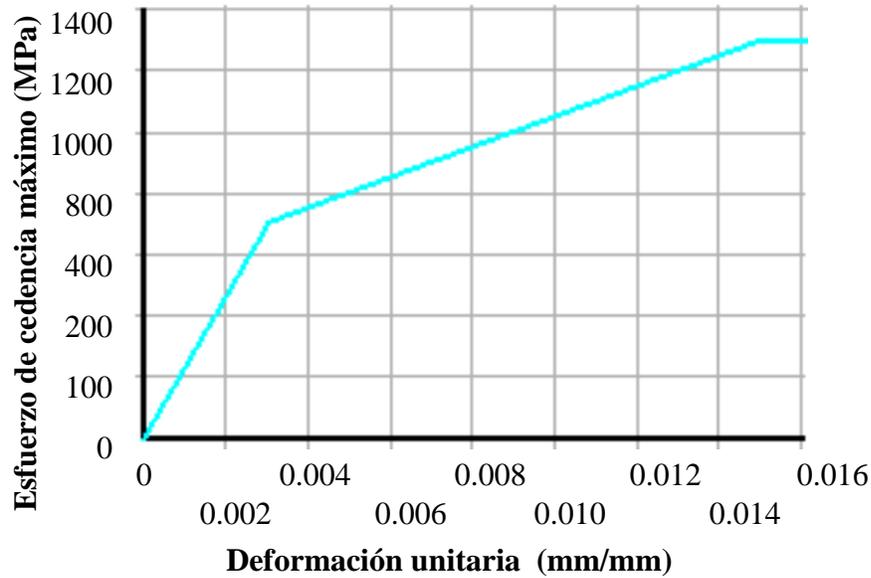


Figura IV.34- Grafica de las propiedades mecánicas bilineales del acero CPM10V

IV.9.1.- Propiedades a utilizar

Análisis elastoplástico con carga de uniformemente distribuida de 600 N f Figura IV.35 por lo que en la palanca, se utilizó el mismo mallado que en los mismos casos de estudio anteriores y los mismos parámetros para la zona elástica teniendo como comportamiento:

- Estructural, No lineal, Elástico e Isotrópico, con un coeficiente de Poisson (ν) de 0.28 y con módulo de Young (E) de 221 GPa. Para el comportamiento no lineal el comportamiento:
- Estructural, No lineal, Inelástico, independiente a la velocidad, Plasticidad con endurecimiento cinemático, Plasticidad de Misses, Multilineal (general) y de acuerdo con las propiedades del material se tiene un esfuerzo de cedencia de 815 N/mm² para el acero pulvimetalúrgico.

En la siguiente tabla se muestran los valores de los esfuerzos de cedencia correspondientes a las deformaciones unitarias Tabla IV.4.

Tabla IV.4.-Valores del comportamiento elastoplástico del acero CPM10V

Deformación unitaria (mm/mm)	Esfuerzo de cedencia máximo MPa
0.002712	815
0.0182	1300

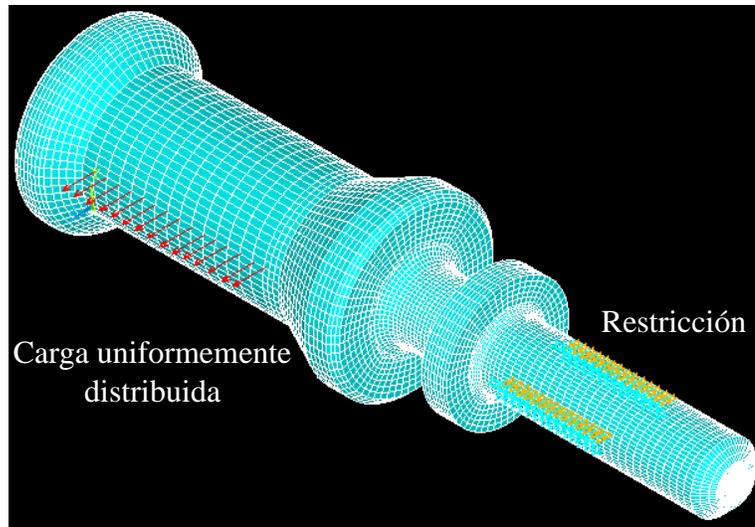


Figura IV.35.-Condiciones de frontera y carga uniforme mente distribuida

IV.9.2.1.- Desplazamiento unitario en X

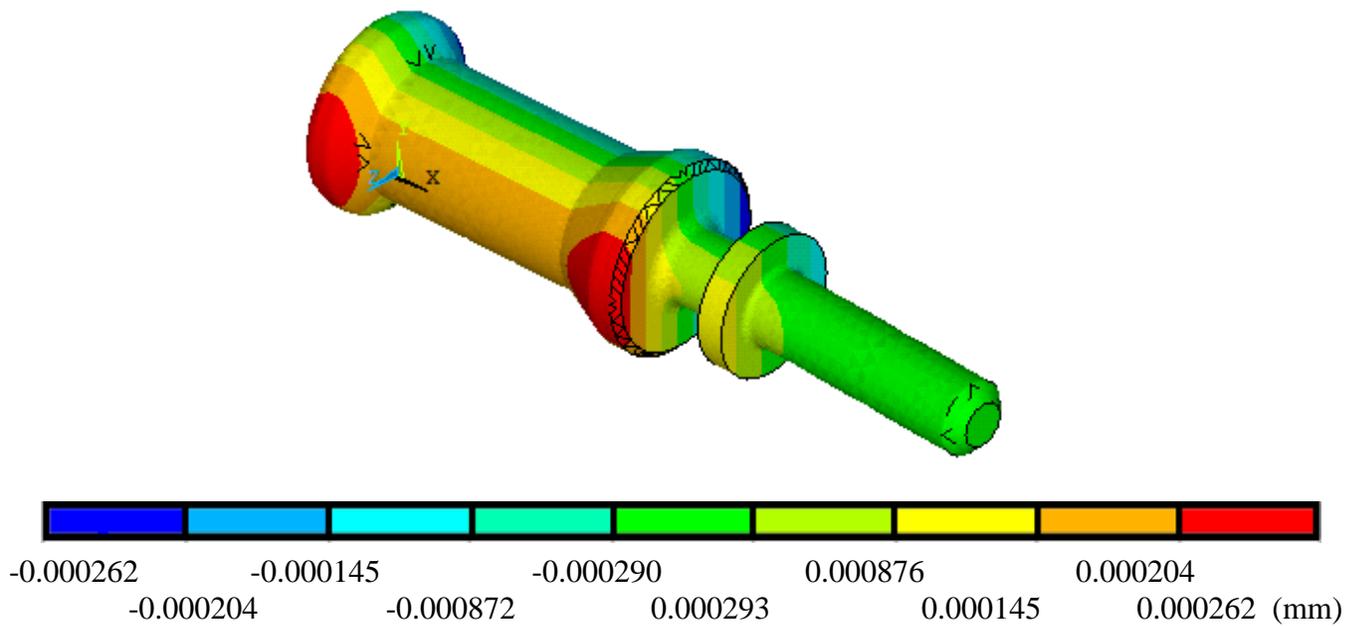


Figura IV.36.-Desplazamiento en el eje X con carga distribuida

IV.10.2.2.- Desplazamiento unitario en Y

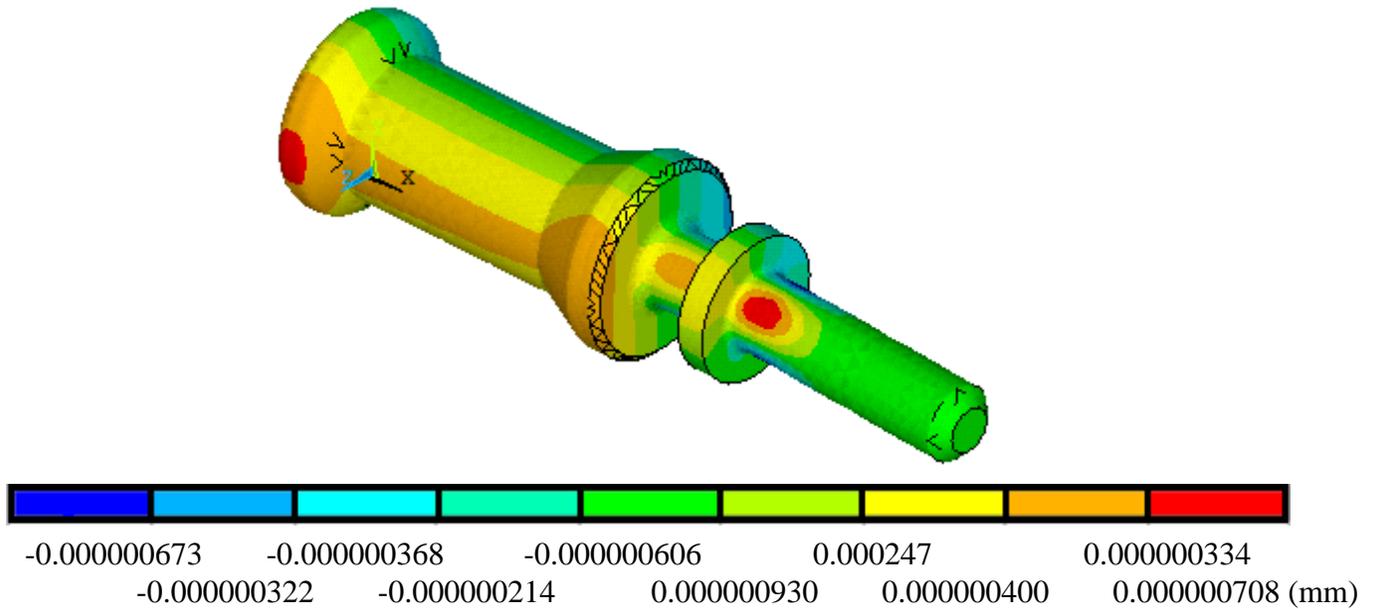


Figura IV.37.-Desplazamiento en el eje Y con carga uniformemente distribuida

IV.10.2.3.- Desplazamiento unitario en Z

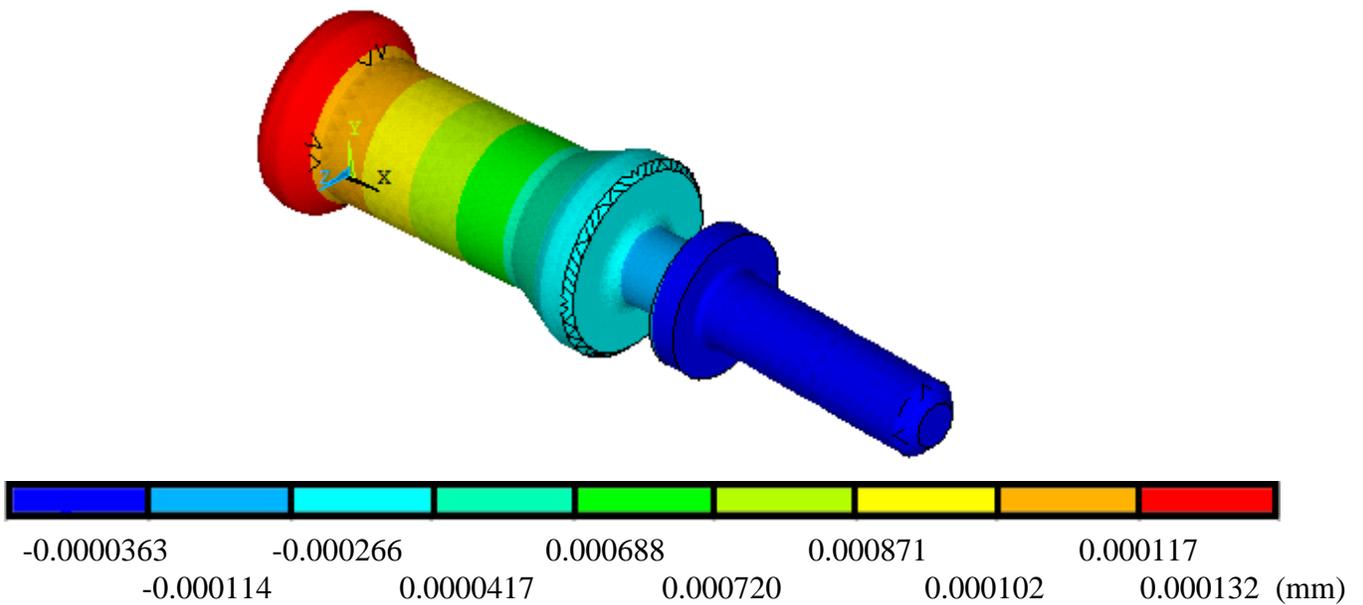


Figura IV.38.-Desplazamiento en el eje Z con carga uniformemente distribuida

IV.10.2.4.- Suma del desplazamiento vectorial

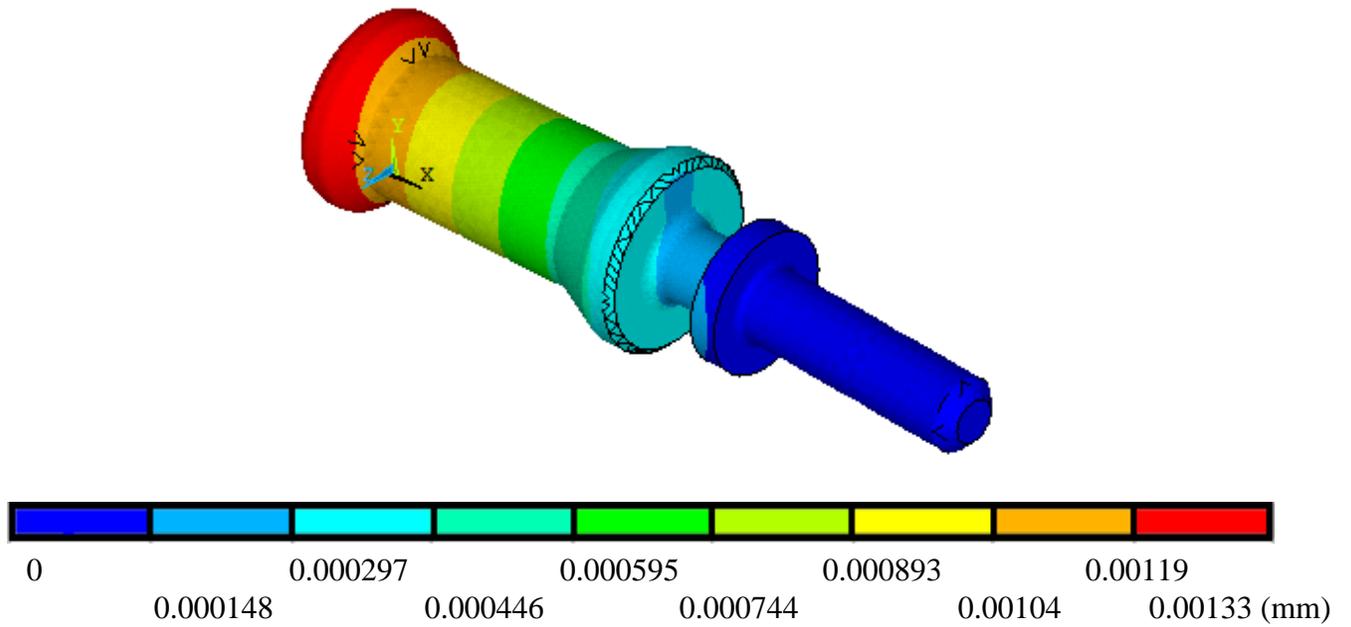


Figura IV.39.-Suma vectorial del desplazamiento en carga uniformemente distribuida

IV.10.2.5.- Esfuerzos nominales en X

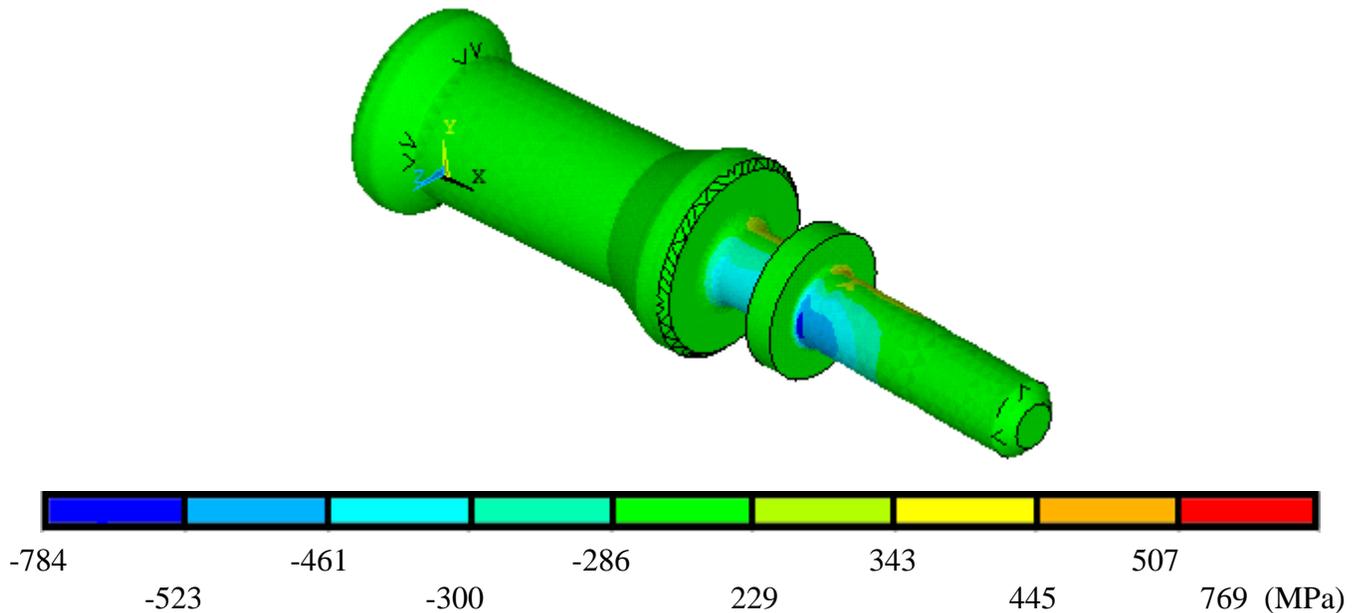


Figura IV.40.- Esfuerzos nominales en el eje X carga uniformemente distribuida

IV.10.2.6.- Esfuerzos nominales en Y

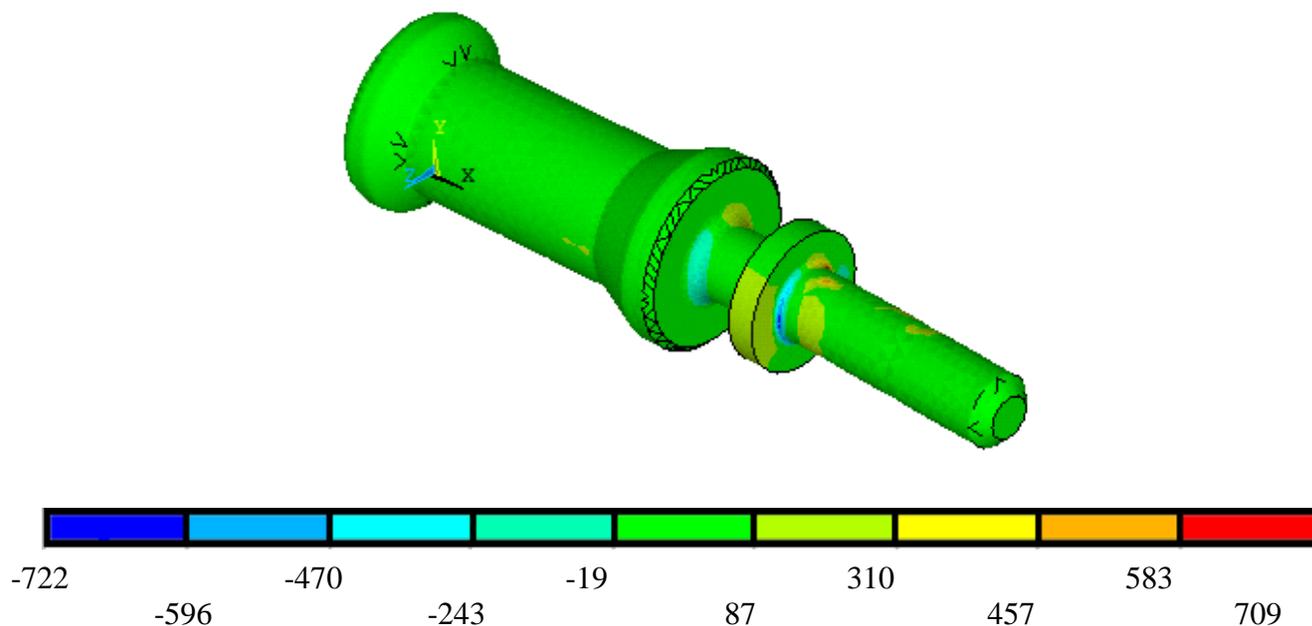


Figura IV.41.- Esfuerzos nominales en el eje Y en carga uniformemente distribuida

IV.10.2.7.- Esfuerzos nominales en Z

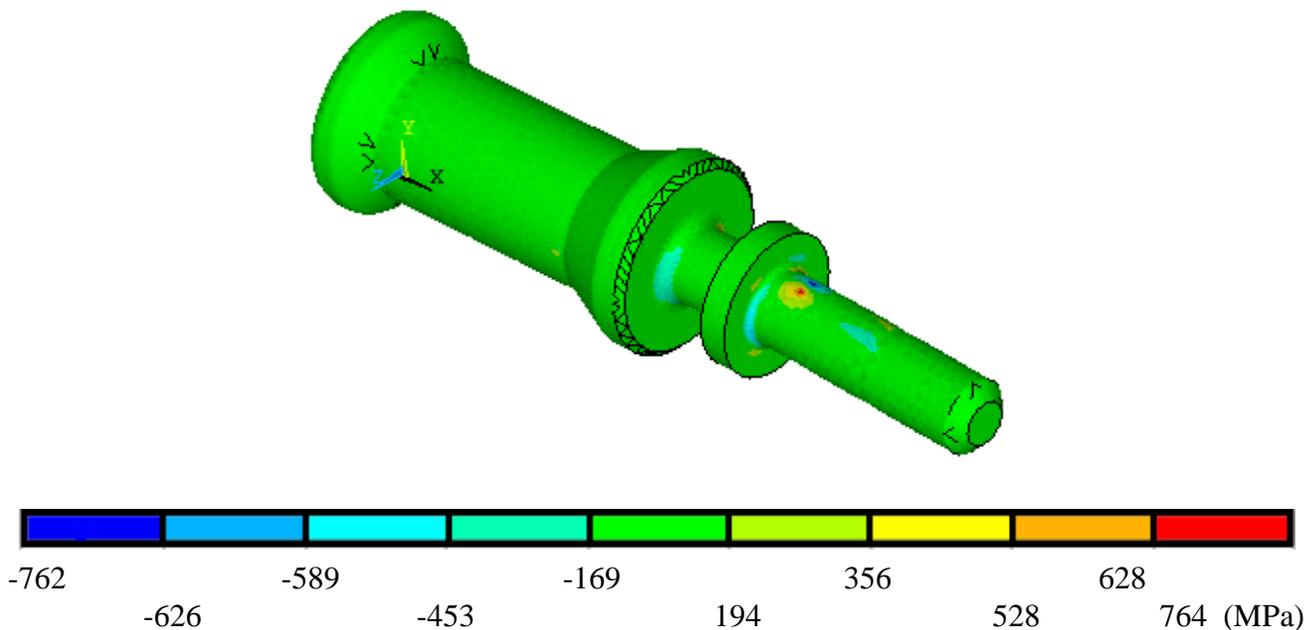


Figura IV.42.- Esfuerzos nominales en el eje Z carga uniformemente distribuida

V.10.2.8.- Primeros esfuerzos principales

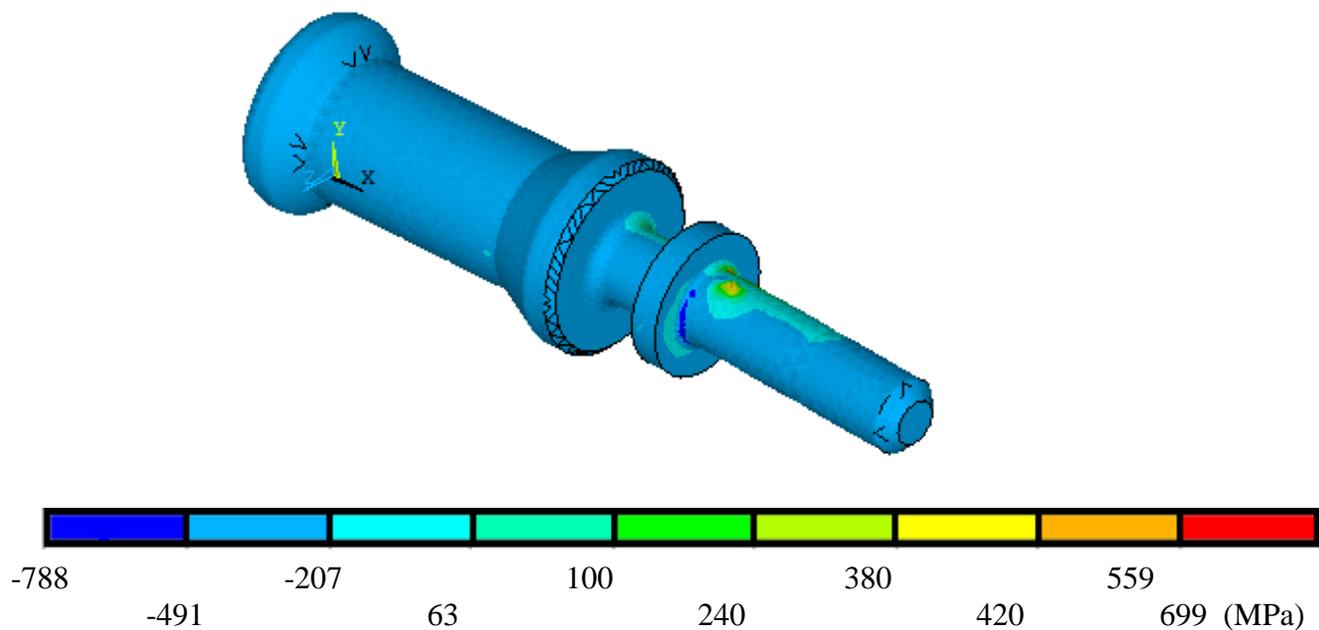


Figura IV.43.- Primeros esfuerzos principales en carga uniformemente distribuida

IV.10.2.9.- Segundos esfuerzos principales

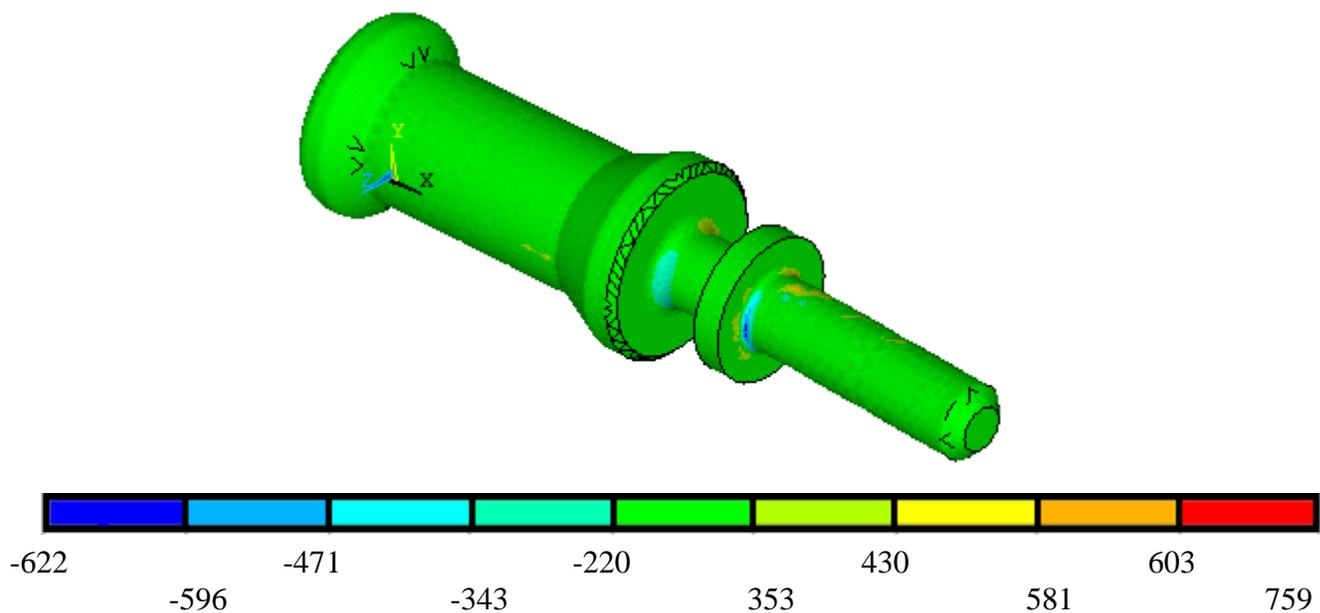


Figura IV.44.- Segundos esfuerzos principales carga uniformemente distribuida

IV.10.2.10.- Terceros esfuerzos principales

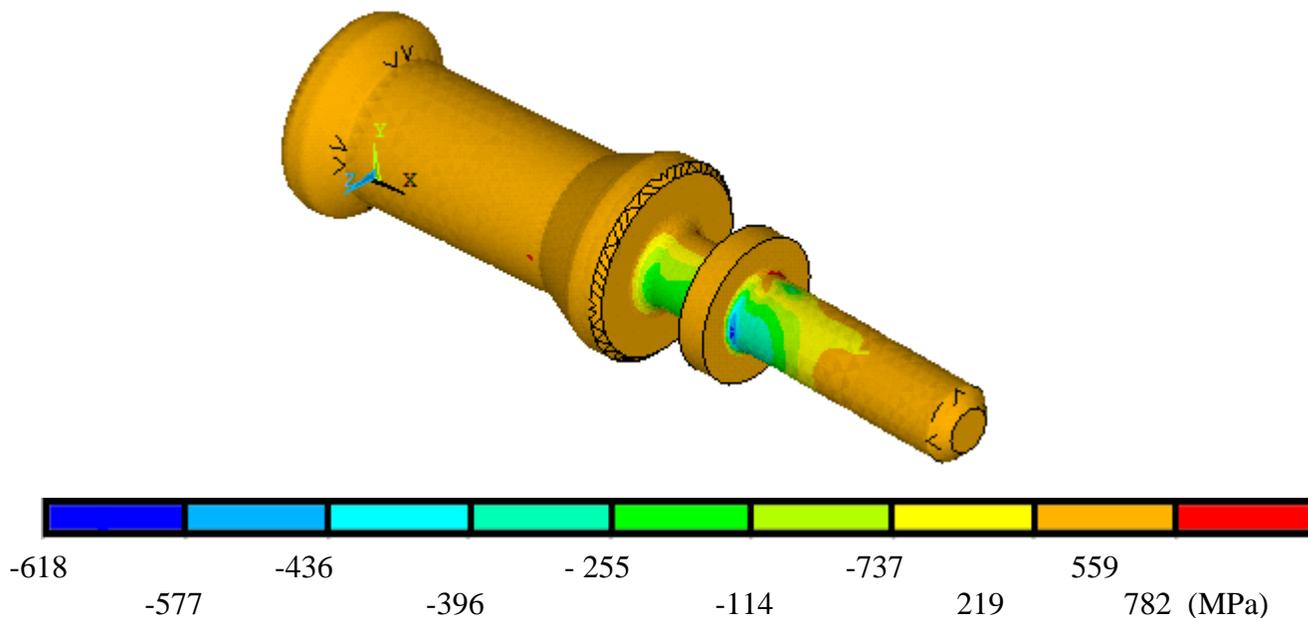


Figura IV.45.- Terceros esfuerzos principales carga uniformemente distribuida

IV.10.2.11.- Factor de intensidad de esfuerzos

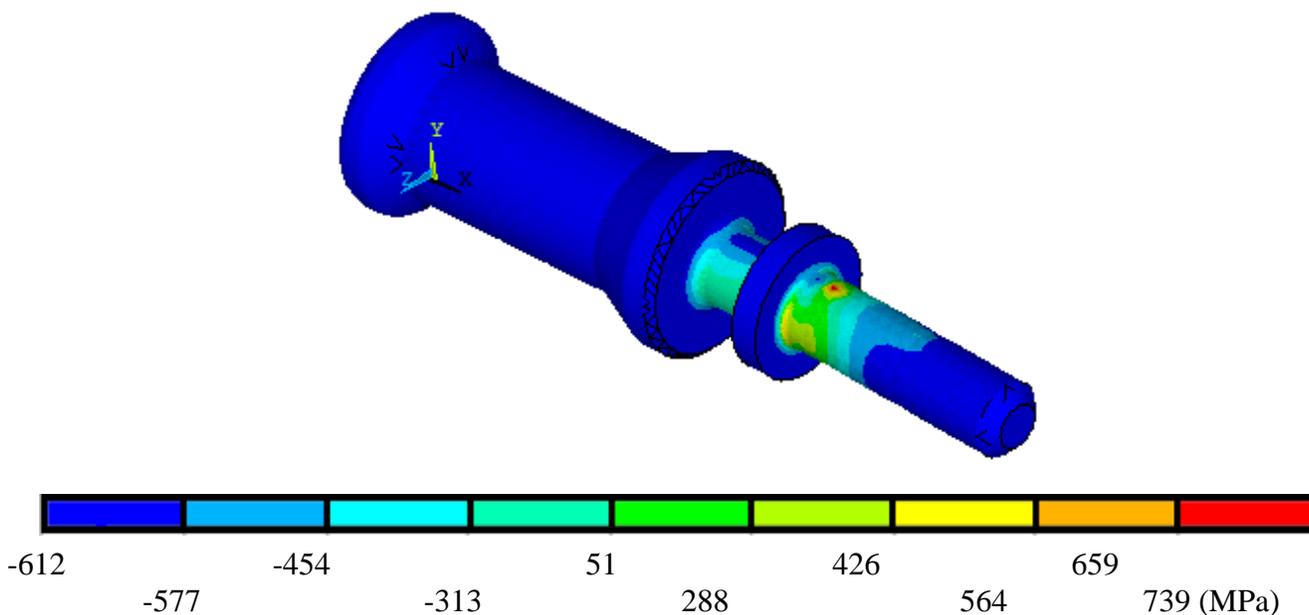


Figura IV.46.- Factor de intensidad de esfuerzos carga uniformemente distribuida

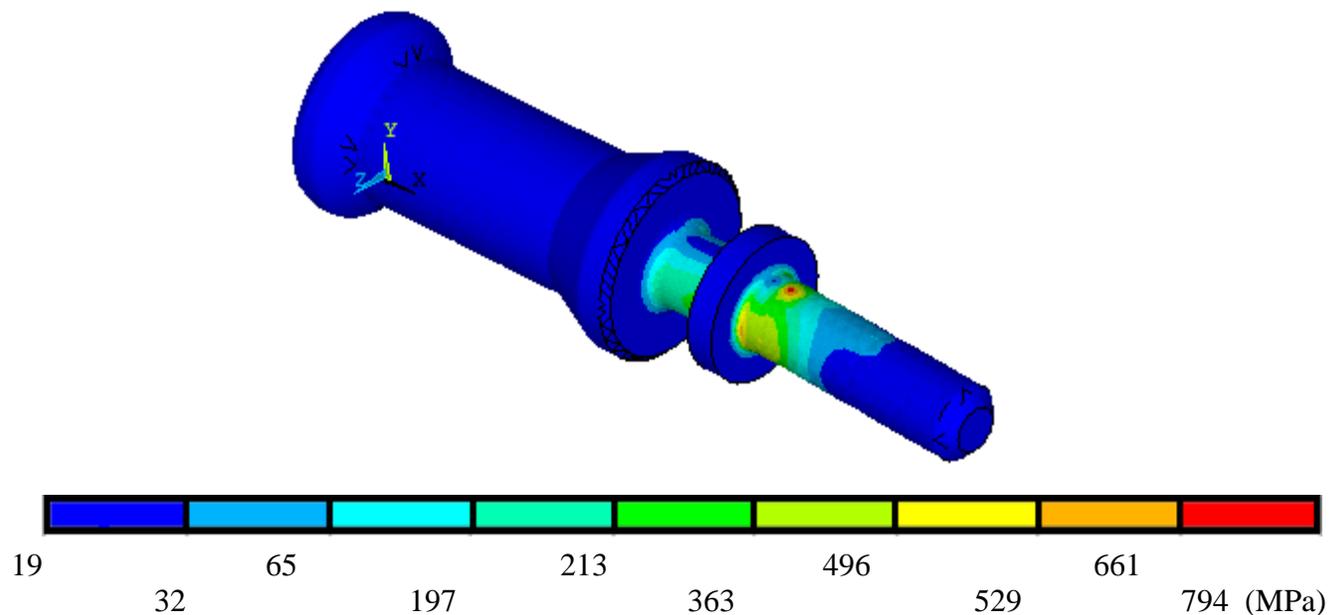
IV.10.2.12.- Esfuerzos von Mises

Figura IV.47.- Esfuerzos von Mises carga uniformemente distribuida

IV.10.3.- segundo paso descarga

En el segundo paso se hace la descarga a cero como no se rebaso el límite de cedencia en la zona elástica los esfuerzos se igualan a 0

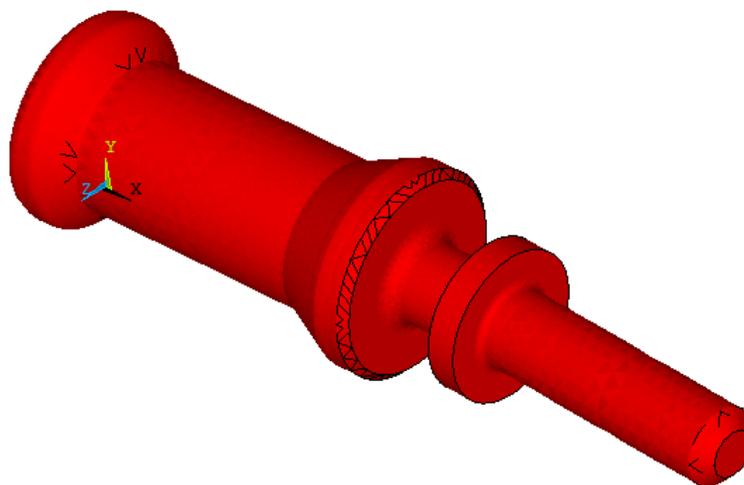


Figura IV.48.-La pieza no pasa límite de cedencia

IV.10.4.- tercer paso descarga

En el tercer paso se procede a poner una carga mayor de 900 N igualmente uniforme mente distribuida.

IV.10.4.1.- Desplazamiento unitario en X

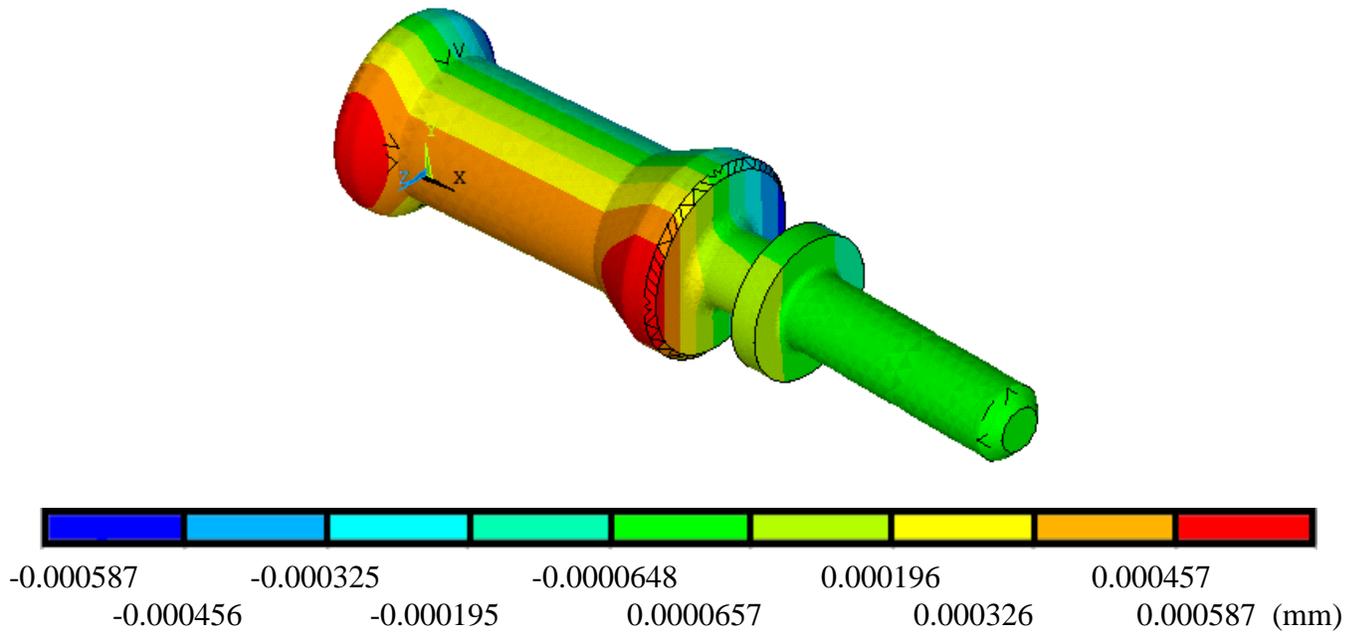


Figura IV.49.-Desplazamiento en el eje X con carga distribuida

IV.10.4.2.- Desplazamiento unitario en Y

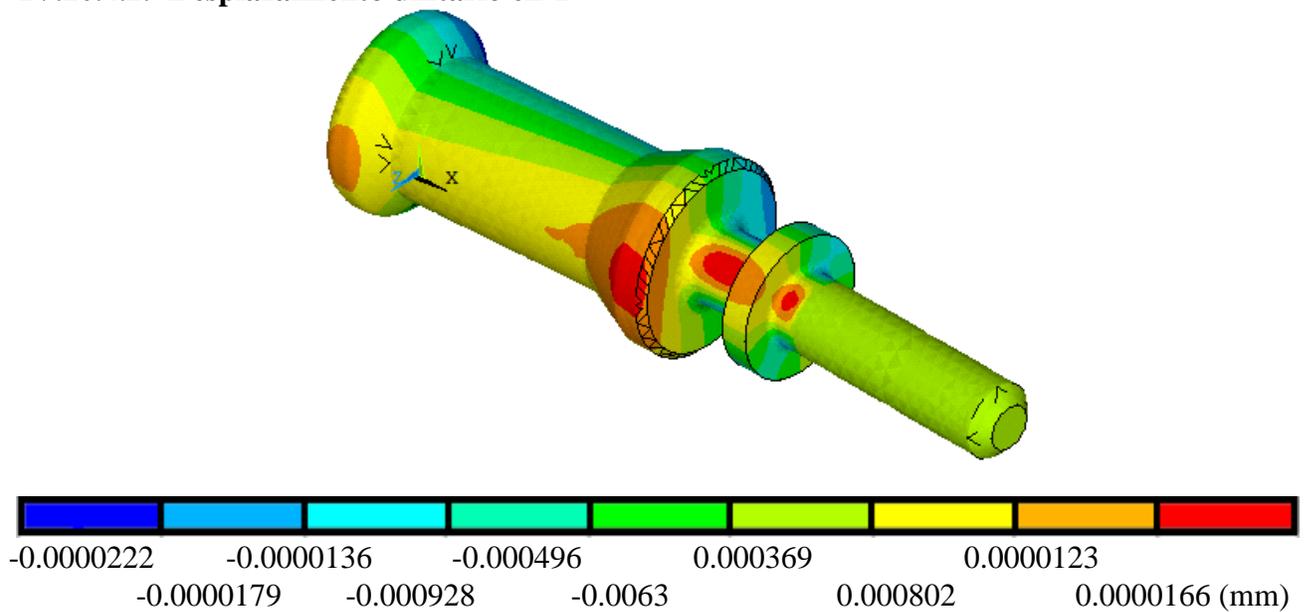


Figura IV.50.-Desplazamiento en el eje Y con carga uniformemente distribuida

IV.10.4.3.- Desplazamiento unitario en Z

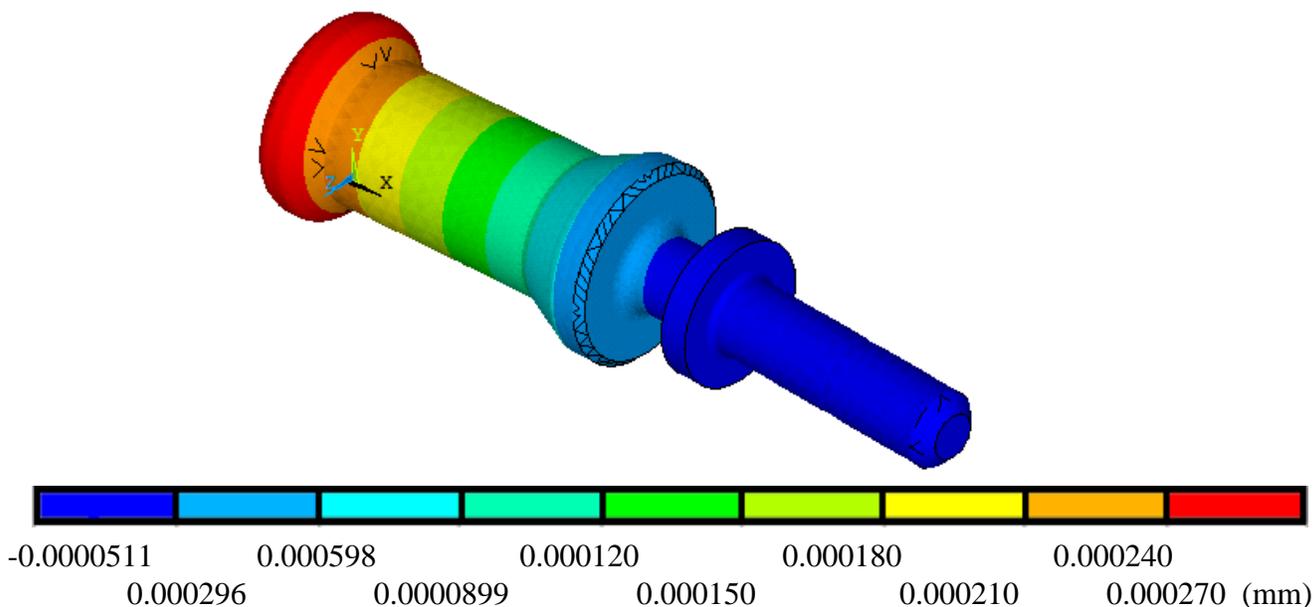


Figura IV.51.-Desplazamiento en el eje Z con carga uniformemente distribuida

IV.10.4.4.- Suma del desplazamiento vectorial

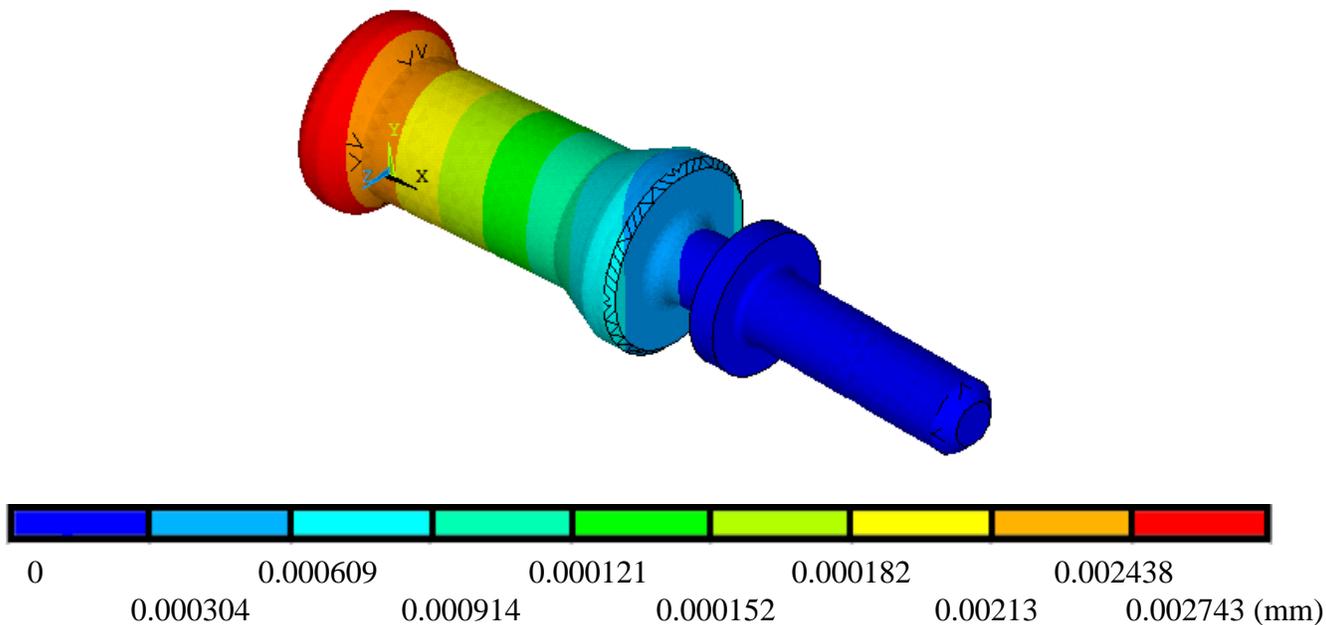


Figura IV.52.-Suma vectorial del desplazamiento con carga distribuida

IV.10.4.5.- Esfuerzos nominales en X

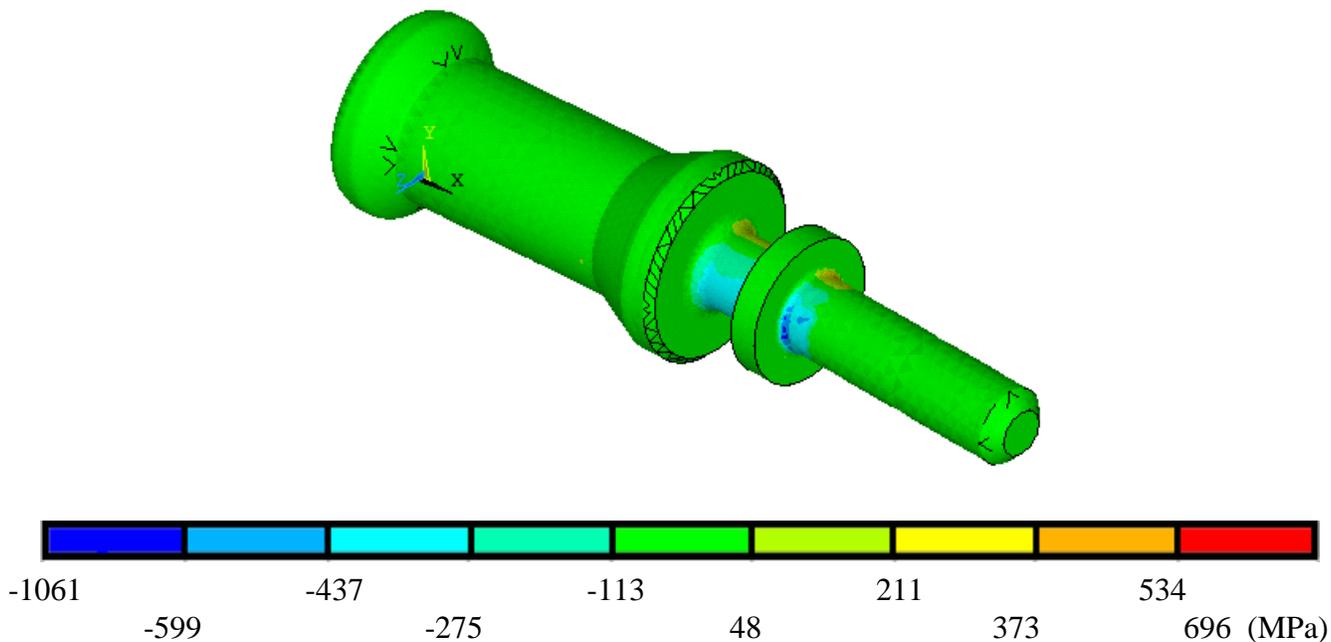


Figura IV.53.- Esfuerzos nominales en el eje X con carga distribuida

IV.10.4.6.- Esfuerzos nominales en Y

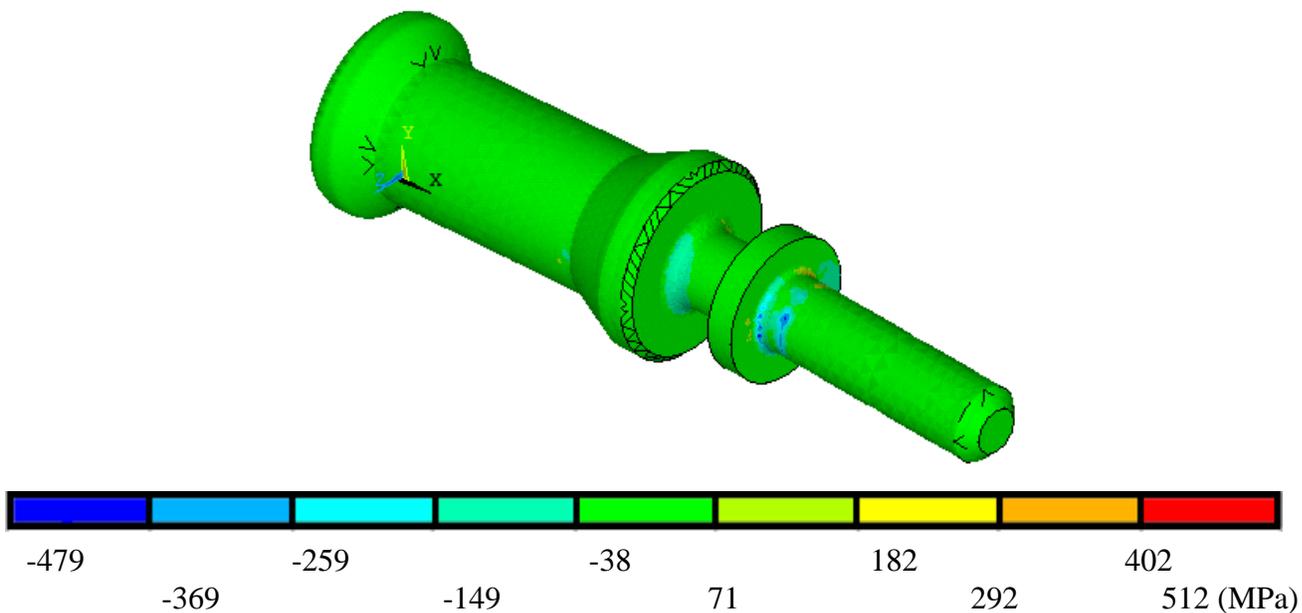


Figura IV.54.- Esfuerzos nominales en el eje Y con carga distribuida

IV.10.4.7.- Esfuerzos nominales en Z

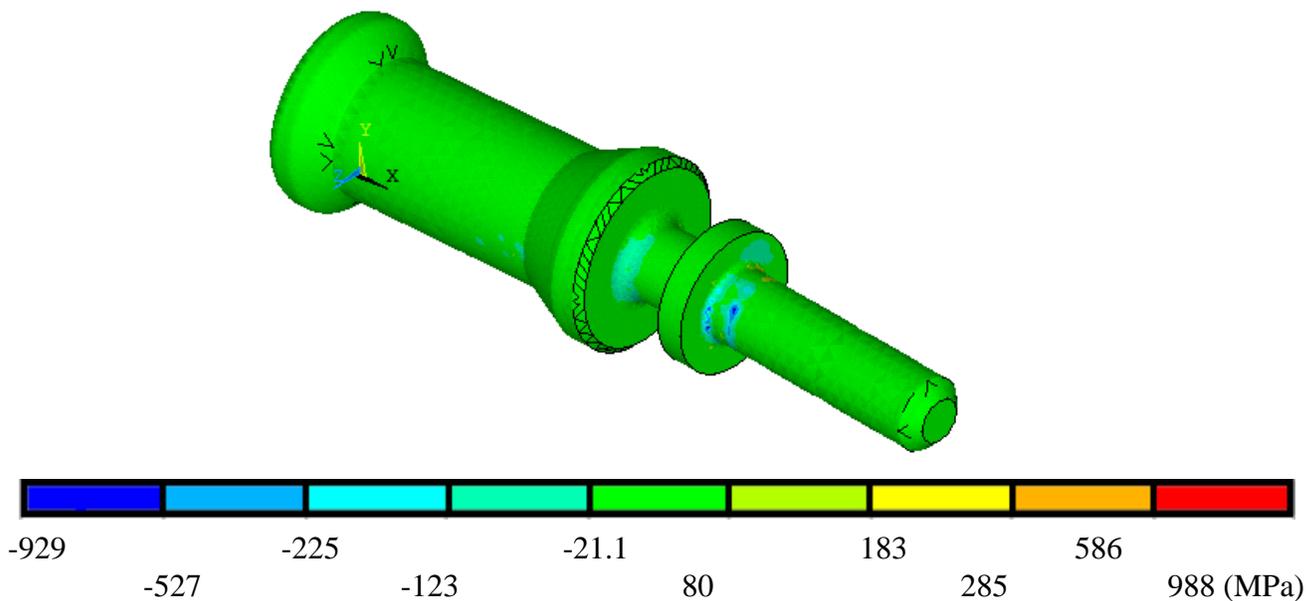


Figura IV.55.- Esfuerzos nominales en el eje Z con carga distribuida

IV.10.4.8.- Primeros esfuerzos principales

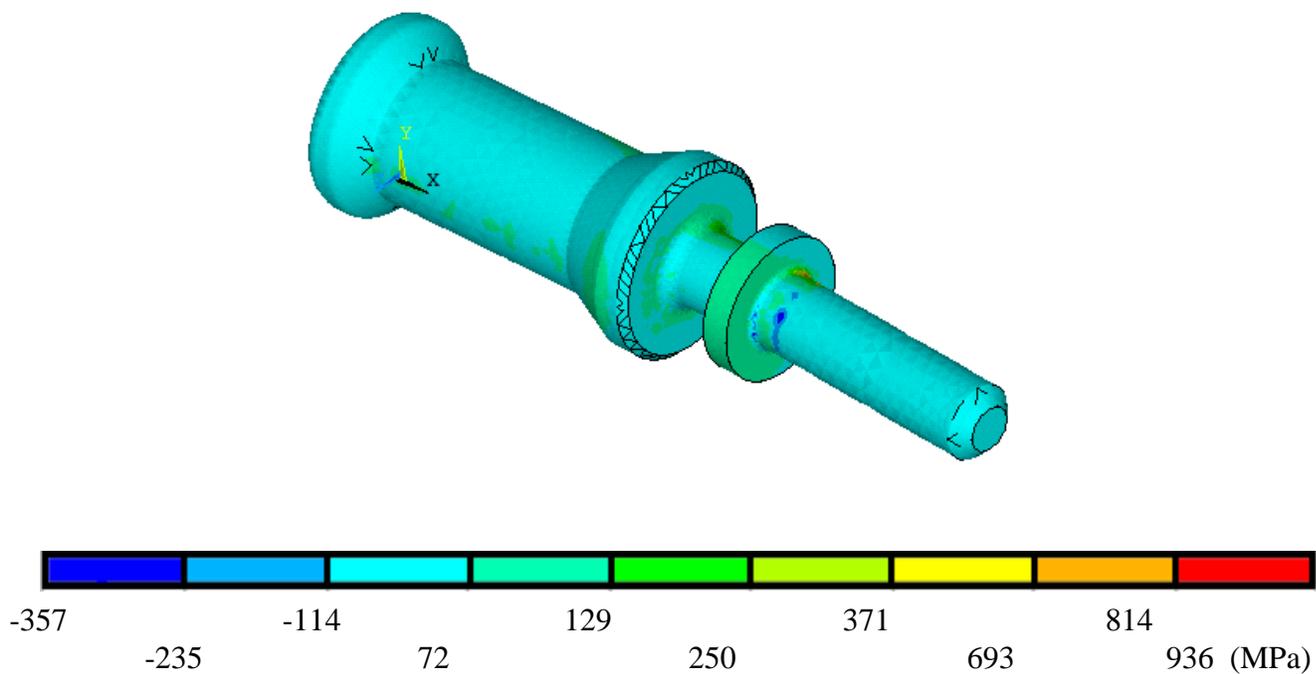


Figura IV.56.- Primeros esfuerzos principales con carga distribuida

IV.10.4.9.- Segundos esfuerzos principales

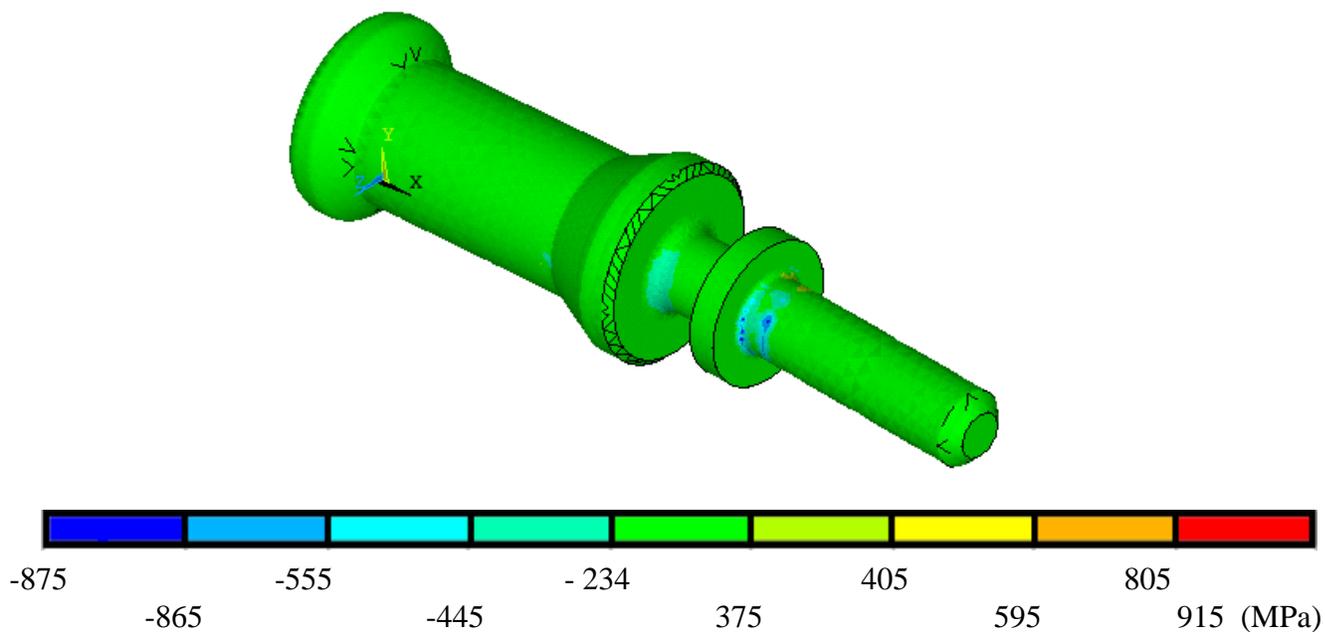


Figura IV.57.- Segundos esfuerzos principales con carga distribuida

IV.10.4.10.- Terceros esfuerzos principales

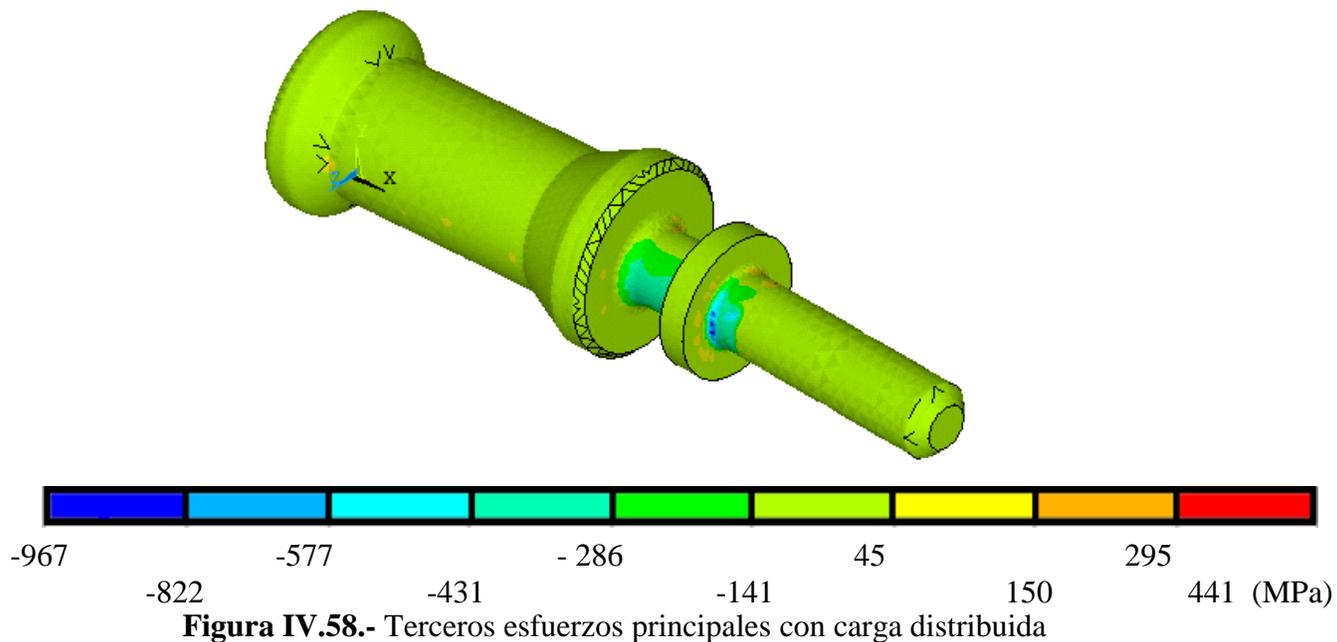


Figura IV.58.- Terceros esfuerzos principales con carga distribuida

IV.10.4.11.- Factor de intensidad de esfuerzos

Diseño y análisis de la palanca de armar de un fusil de asalto mediante el uso de tecnología de polvos

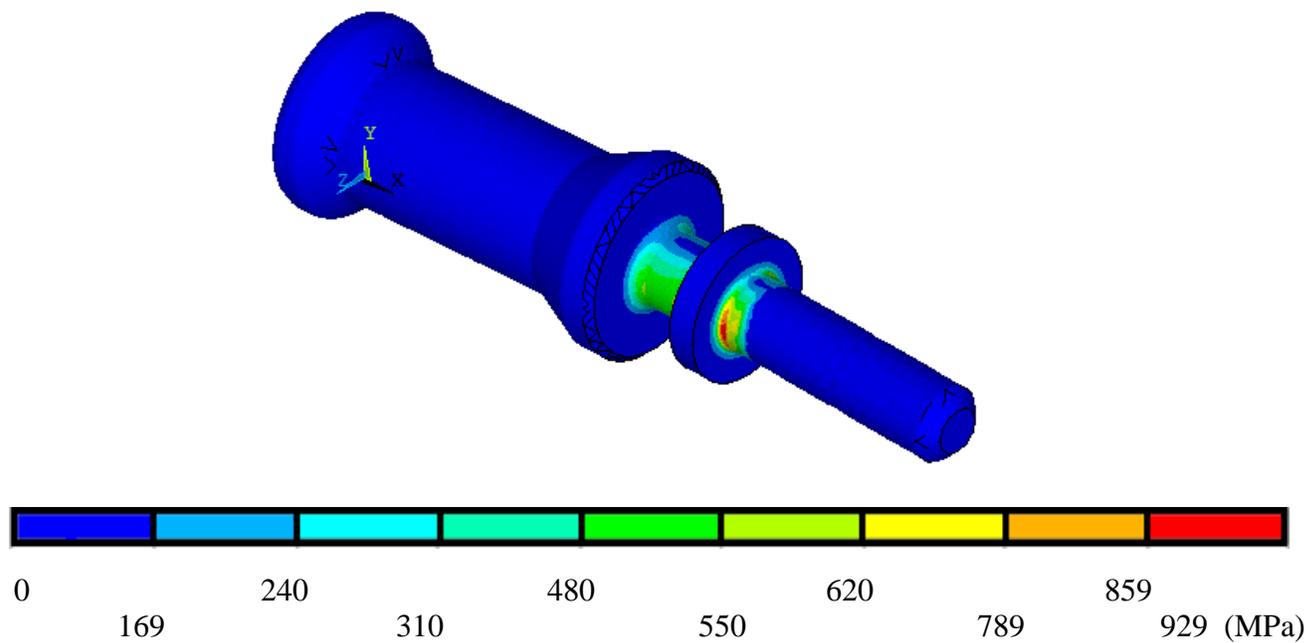


Figura IV.59.- Factor de intensidad de esfuerzos con carga distribuida

IV.10.4.12.- Esfuerzos von Mises

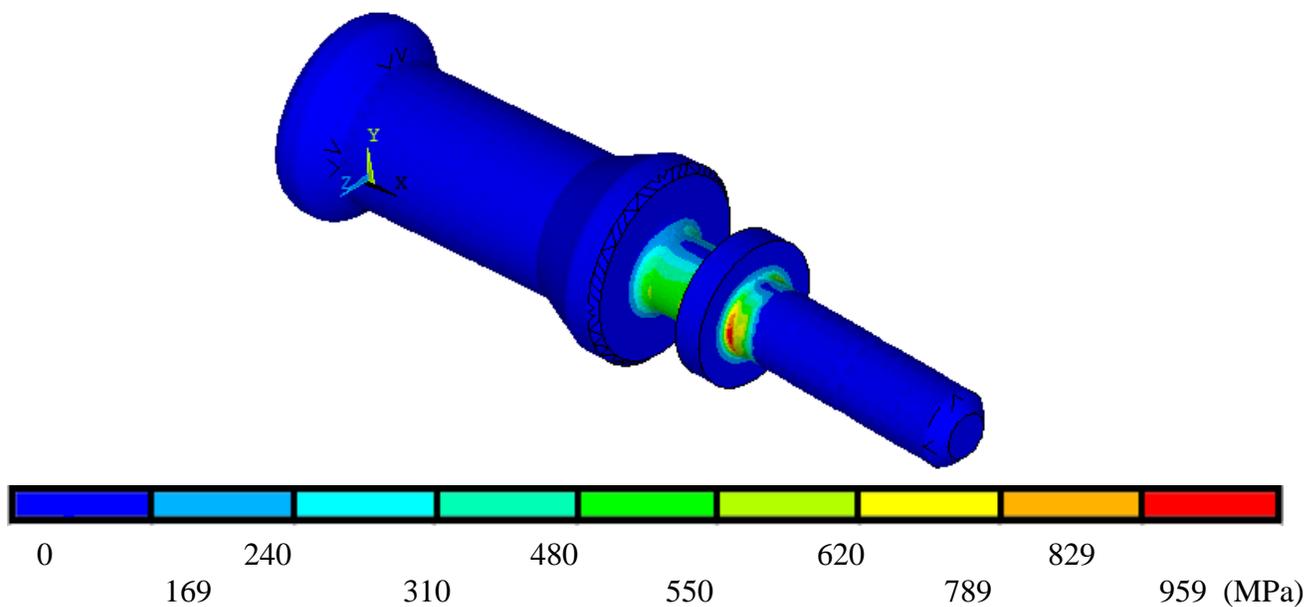


Figura IV.60.- Esfuerzos von Mises con carga distribuida

IV.10.5.-Cuarto paso

Se hace la descarga con cero y se puede observar como en las siguientes imágenes están esfuerzos que surgen por pasar el límite de cedencia.

IV.10.5.- Esfuerzos nominales en X

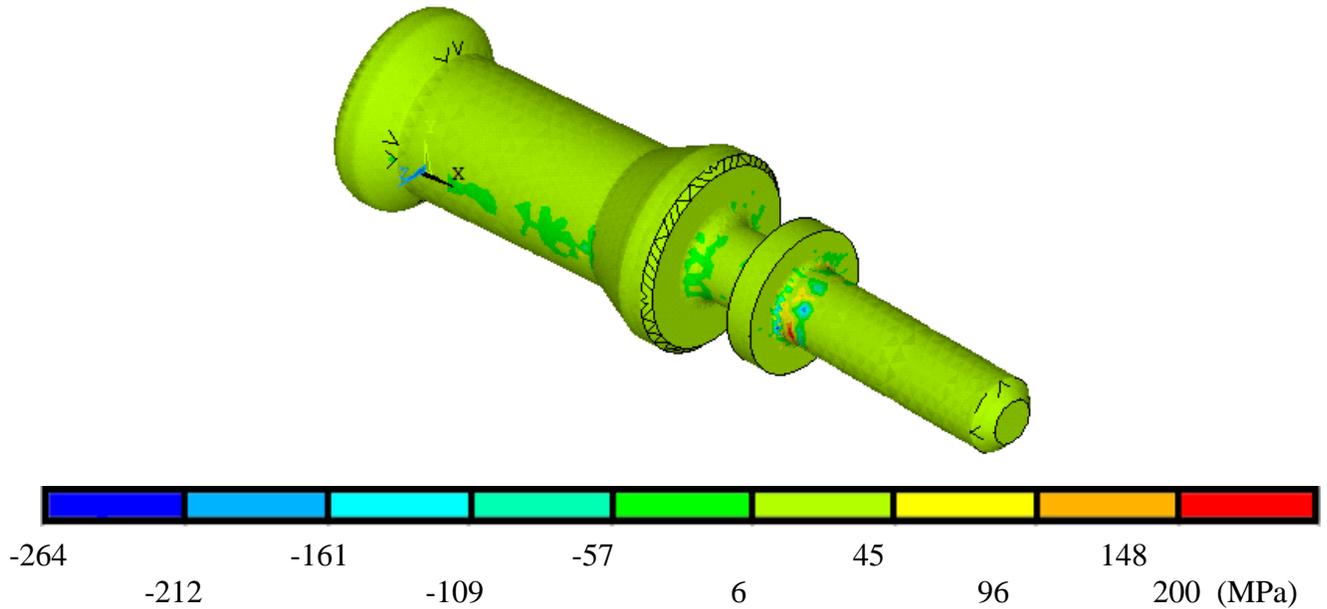


Figura IV.61.- Esfuerzos nominales en el eje X sin carga

IV.10.5.1.- Esfuerzos nominales en Y

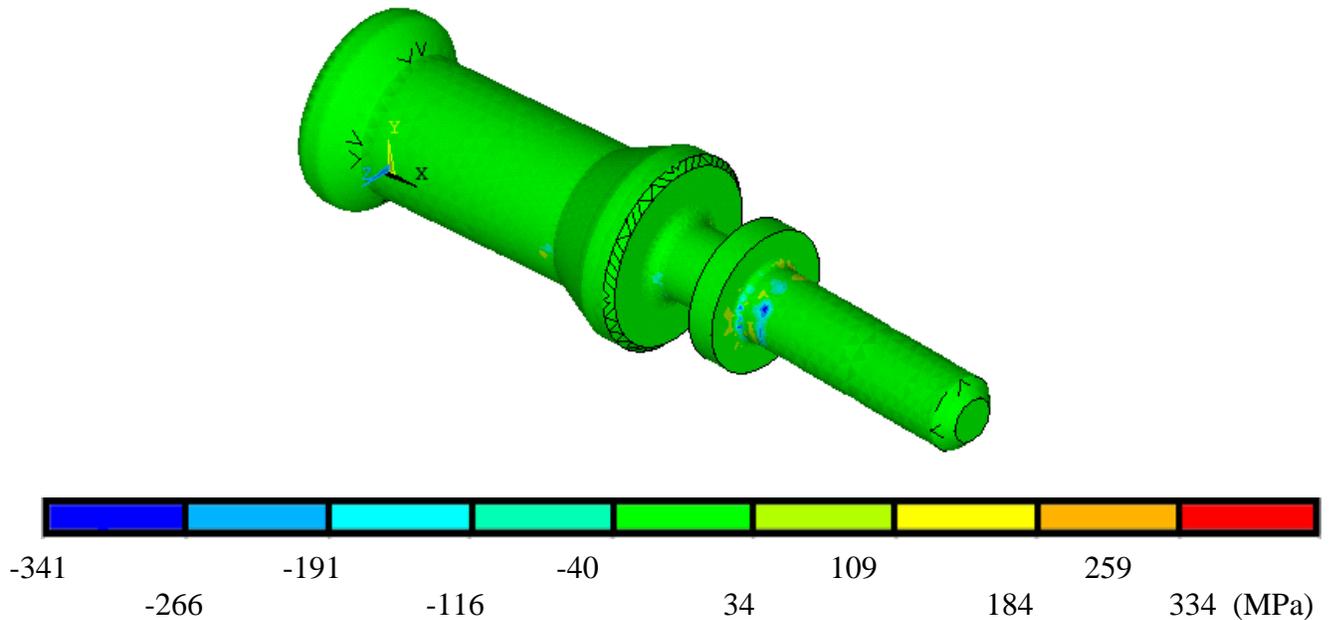


Figura IV.62.- Esfuerzos nominales en el eje Y sin carga

IV.10.5.2.- Esfuerzos nominales en Z

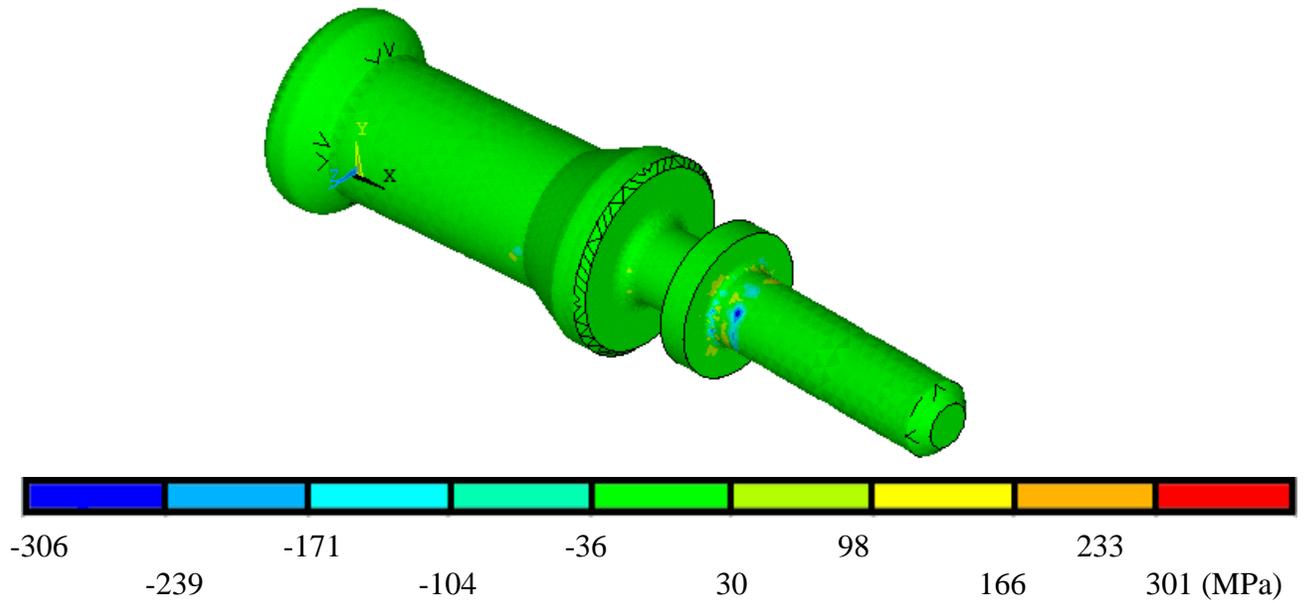


Figura IV.63.- Esfuerzos nominales en el eje Z sin carga

V.10.5.3.- Primeros esfuerzos principales

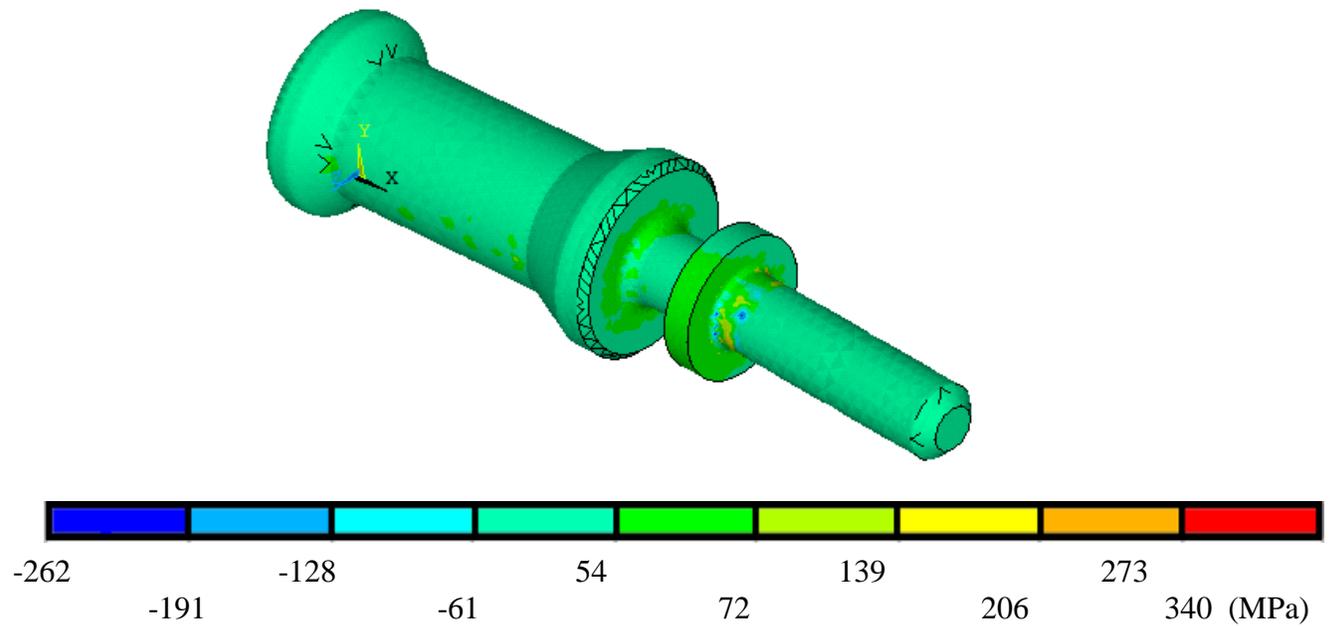


Figura IV.64.- Primeros esfuerzos principales sin carga

IV.10.5.4.- Segundos esfuerzos principales

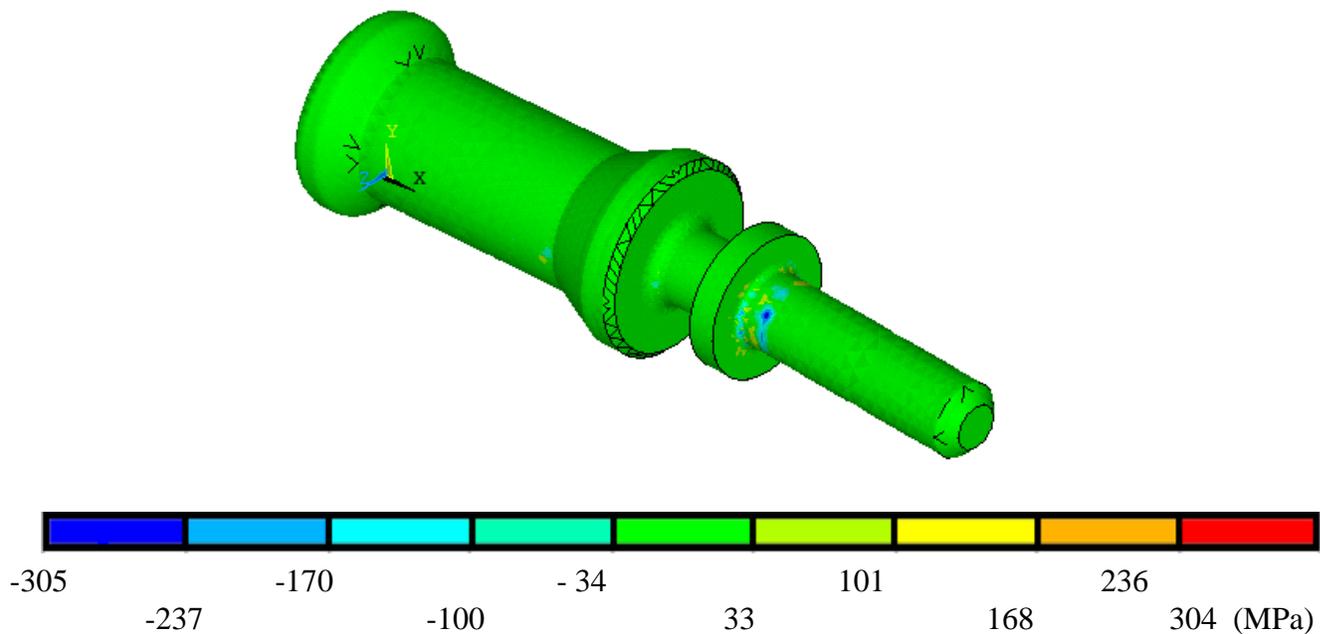


Figura IV.65.- Segundos esfuerzos principales sin carga

IV.10.5.5.- Terceros esfuerzos principales

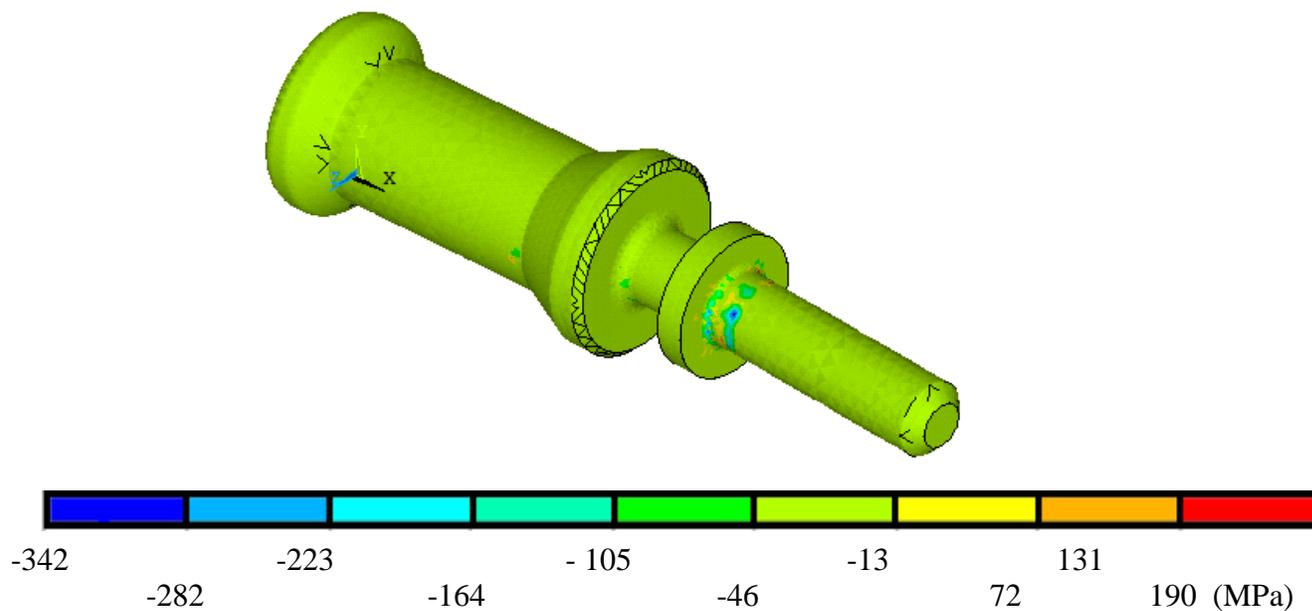


Figura IV.66.- Terceros esfuerzos principales sin carga

IV.10.5.6.- Factor de intensidad de esfuerzos

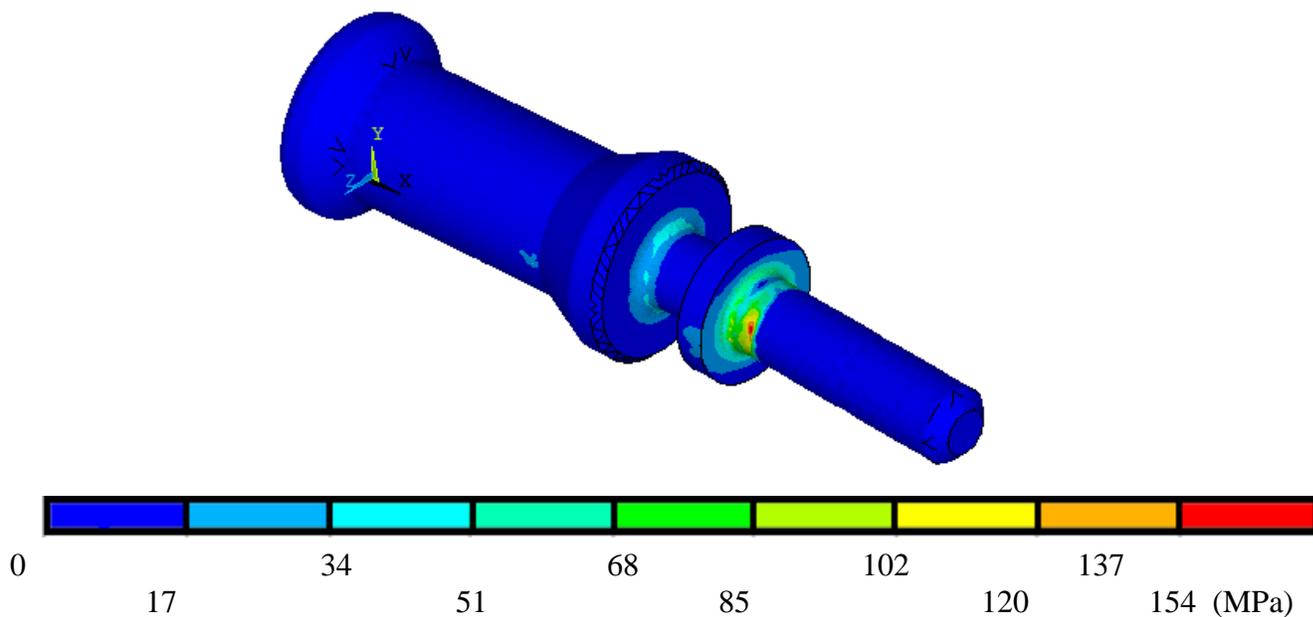


Figura IV.67.- Factor de intensidad de esfuerzos sin carga

IV.10.5.7.- Esfuerzos von Mises

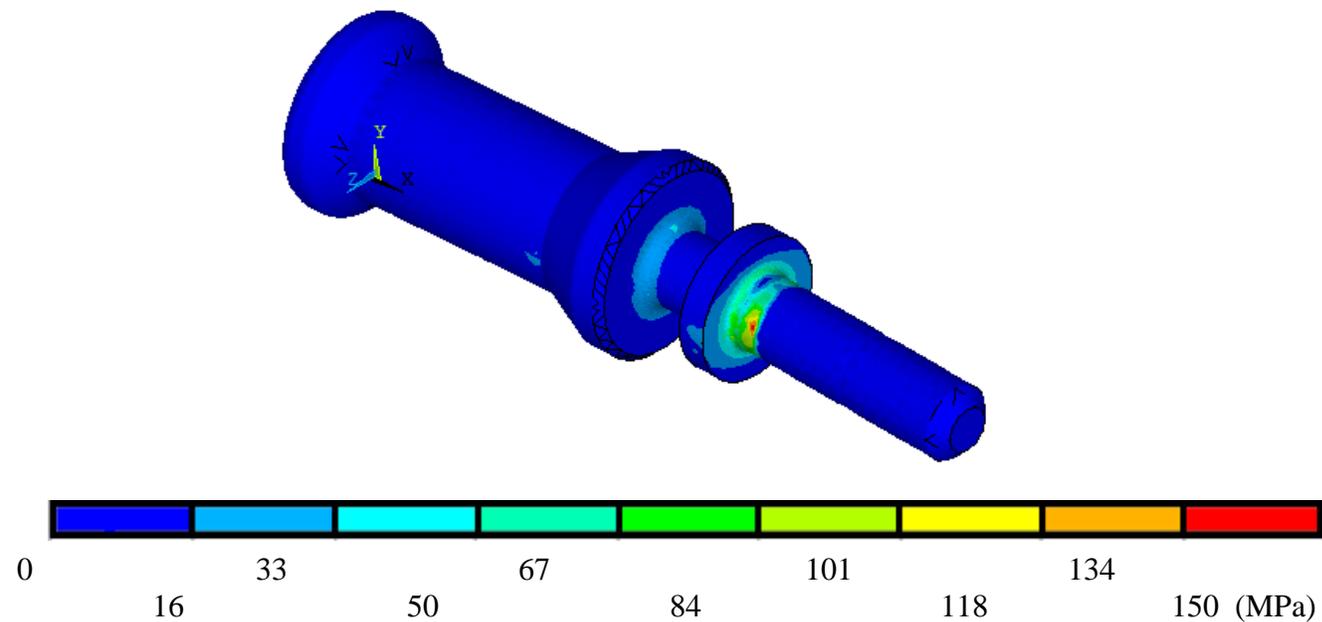


Figura IV.68.- Esfuerzos von Mises sin carga

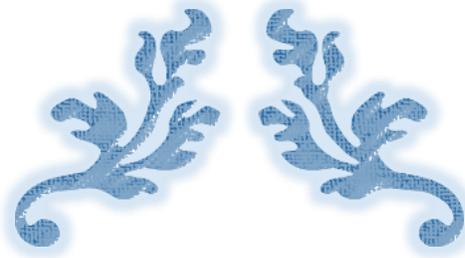
IV.11.- Sumario

En este capítulo se analizó ampliamente el funcionamiento de la palanca bajo condiciones de servicio para poder entender su comportamiento e importancia en el fusil. Se realizaron dos casos de estudio, el primer caso de estudio es carga y descarga simulando cuando se está disparando con una carga puntual posteriormente se realiza el análisis elastoplástico el cual se meten dos cargas diferentes primer paso una de 600 N segundo paso se descarga tercer paso se carga con 900 N para pasar el límite de cedencia y por último cuarto paso descargar a cero el análisis nos arroja que quedan esfuerzos.

IV.12. - Referencias

- 1.- Rao, S. S., *The Finite Element Method in Engineering*, Ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, pp 3-10, 2005.
- 2.- Carnicero, A., *Introducción al Método de los Elementos Finitos*, Ed. Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, pp 3-5, 2001.
- 3.- Cook, R., *Finite Element Modeling for Stress Analysis*, Ed. John Wiley and Sons Inc., pp 13, 1995.
4. - Clough, R., *The Finite Element Method After Twenty-Five Years; A Personal View, Computers and Structures*, Vol. 12, No. 4, pp 361, 1980.
- 5.- Verduzco-Cedeño, V. F., *Diseño y Desarrollo de Herramientas de Suajeado para la Fabricación de Cañones de Armamento*, Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica, IPN-ESIME SEPI Unidad Zacatenco, pp 39-40, 2010.
6. - Moaveni, S., *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS®*, Ed. Prentice Hall pp 6-10, 1999.
- 7.- Madenci, E. y Guven, I., *The Finite Element Method and Applications in Engineering using ANSYS®*, Ed. Springer, pp 1-20, 2006.
8. – Liu, G. R. y Quek, S. S., *The Finite Element Method*, 2a Edición, Ed. Butterworth Heinemann, pp 43-79, 2014.
- 9.- Lee, H. H., *Finite Element Simulations with ANSYS® Workbench 14*, Theory Applications Case studies, Ed. SDC Publications, pp 23-35, 2012.
- 10.- Gere, J. M. y Goodno, B. J., *Mechanics of Materials*, 8va Edición, Ed. Cengage Learning, pp 28-31, 2013.

-
- 11.- Beer, F. P., Johnston, E. R. y De Wolf J. J. T., *Mechanics of Materials*, Ed. McGraw Hill, pp 49-52, 2004.
 12. - Choudary, R. B., *Introduction to ANSYS® 10.0*, Ed. I.K. International, pp 19-23, 2009.
 13. - ASM International, *Heat treaters` s guide*, Second Edition, pp. 184 y 510, 2006



CAPÍTULO V

FABRICACIÓN DE LA PALANCA DEL FUSIL DE ASALTO



*Haz siempre un esfuerzo total, incluso cuando las posibilidades están en tu contra.-
Arnold Palme*

V.1.- Generalidades

La metalurgia de polvos y el proceso de sinterizado se ve analizado en el Capítulo II donde se explica los distintos procesos que existen para la fabricación de piezas. Retomando esa información partimos de los polvos a la pieza terminada lista para usarse utilizando un acero CPM10V pulvimetalúrgico. Hay tres versiones básicas (rifle, carabina y carabina corta) del FX-05 Figura V.1 que se diferencian en la longitud del cañón. Es un arma de recarga accionada por gas y fuego selectivo. El pistón del gas se encuentra sobre el cañón y el cerrojo es rotatorio. La manija de carga se puede instalar en ambos lados. El cajón de mecanismos está hecho de polímero, al igual que los cargadores translucidos. El selector de fuego se encuentra encima del grupo de la empuñadura en ambos lados. El rifle viene con un riel *Picatinny* encima del cajón que permite añadir multitud de accesorios. La culata ajustable, también de plástico, se pliega a la derecha y queda por debajo del expulsor, lo que permite su uso en modo compacto. Calibre



Figura V.1.-Fusil de asalto FX-05

Tabla V.1.- Características del fusil CPM10V

MODELO	FUSIL FX-05	CARABINA FX-05
Calibre	5.56x45 mm	
Sistema de disparo	Recarga accionada por gas cerrojo rotativo	
longitud	1087 / 887 mm	980 / 780 mm
Longitud del cañón	480 mm	

Cargador	30	
Peso (descargado)	3.89 Kg.	3.22 Kg
Cadencia de tiro	750 disparos por minuto	
Alcance efectivo	200-800 m	

V.2.- Selección de polvos pulvimetalúrgico CPM10V®

Entre los materiales que pudieran servir para la selección en el desarrollo de esta investigación, se encuentran los aceros grado herramienta, carburo de Tungsteno y aleaciones metálicas derivadas del proceso de metalurgia de polvos. En virtud de que este tipo de herramientas utilizados para forjado, normalmente son fabricados de estos tipos de materiales, misma que establece la relación que existe entre la resistencia al desgaste y a la fatiga [V.1].

Se seleccionó la opción de fabricar la herramienta por el método de metalurgia de polvos en virtud de que desempeña un papel importante no sólo como materia prima y alternativa de ahorro, sino también como una técnica de fabricación alterna capaz de sustituir a materiales convencionales como los aceros grado herramienta que presentan bajos costos comparados con los carburos o aleaciones metálicas de polvos.

Sin embargo tienen una desventaja en cuanto a resistencia al desgaste y a la fatiga, o bien de materiales que pese a su buena resistencia a la fatiga, pueden llegar a ser no rentables por su costo, siendo la pulvimetalurgia una opción viable para la fabricación de estas herramientas. Además, este proceso de manufactura es fácilmente controlable, obteniendo beneficios en cuanto a resistencia a la fatiga y un balance adecuado entre el desgaste de la herramienta y los costos de fabricación. Se estiman ahorros sustanciales en la producción de palancas y otras piezas del fusil, sin sacrificar la calidad del producto. Esta selección, se realizó desde el punto de vista de que este tipo de materiales por polvos tiene una gran importancia en la industria armamentista, automotriz y metal-mecánica y más adelante se detallara afondo el material utilizado. El valor del módulo de elasticidad es de 221 GPa y relación de Poisson 0.28.

La materia prima empleada para la fabricación de la palanca que es motivo de esta investigación es producida por el método de la metalurgia de polvos, y será mecanizada a fin de obtener la

geometría deseada, la composición Química % del Acero CPM10V es Carbono, Cromo, Molibdeno, Vanadio, Magnesio, Azufre y Silicio se muestra en la siguiente Tabla V.2 y en Tabla V.3 sus propiedades.

Tabla V.2.-Materia prima en polvos a utilizar

C	Cr	Mo	V	Mg	S	Si
2.45	5.25	1.30	9.75	0.5	0.07	0.90

Tabla V.3.-Propiedades físicas de la aleación CPM10V

Características	T(°C)	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad	20	221	GPa
Coefficiente principal de expansión térmica	593	12.3	10 ⁻⁶ /(°C)
Conductividad térmica	65	24.85	W/m °C
Densidad	2	7.41	Kg/dm ³

V.3.-Mezclado

El mezclado es una operación que tiene como propósito principal la eliminación de segregación de los polvos y la incorporación de un lubricante cuya función primordial es la reducción de la fricción que existe entre el polvo metálico y la superficie de las herramientas (paredes de la matriz; punzón de compactación etc.) Figura V.2. De igual manera es importante la lubricación para facilitar la extracción del compacto, minimizando la tendencia a que se fracture.

Para lograr buenos resultados en la compactación y en el sinterizado, los polvos metálicos necesitan homogeneizarse perfectamente antes del proceso. Para ello, se deben mezclar y combinar los polvos. El mezclado se refiere a la mezcla de polvos de la misma composición química, pero posiblemente con diferentes tamaños de partículas, mientras que la combinación se refiere a la mezcla de polvos con diferente composición química.

El mezclado tiene por objetivo:

- Obtener uniformidad, ya que los polvos fabricados por los distintos procesos tienen diferentes tamaños y formas. La mezcla ideal es aquella en la que todas las partículas de cada material se distribuyen uniformemente.
- Poder introducir polvos de distintos materiales, incluso metales, para impartir propiedades y características físicas y mecánicas especiales al producto. Existen dos categorías bien definidas, tales como aglutinantes y desfloculantes. Los aglutinantes tienen como función lograr una resistencia adecuada en las partes prensadas, pero no sinterizadas. Los desfloculantes inhiben la aglomeración de los polvos para mejorar sus características de flujo durante la alimentación.
- Poder mezclar lubricantes con los polvos, para mejorar sus características de flujo. Se obtiene una menor fricción entre las partículas metálicas, mejor flujo de los metales en polvo hacia los moldes, y una mayor vida de las matrices. Los lubricantes que se usan con frecuencia son ácido esteárico o estearato de zinc, en la proporción de 0,25 a 5% en peso. También para reducir la fricción se agrega también Aluminio, aunque en pequeñas cantidades. El mezclado y la combinación se realizan por medios mecánicos, utilizando tambores rotatorios, o fijos, pero con paletas mezcladoras. El mezclado de los polvos se debe hacer bajo condiciones controladas, para evitar contaminaciones o deterioro. El deterioro se debe a mezclado excesivo, que puede modificar la forma de las partículas y endurecerlas por trabajo, dificultando así la siguiente operación de compactación. Los polvos se pueden mezclar en aire, en atmósferas inertes (para evitar la oxidación) o en líquidos (lubricantes).



Figura V.2.-Mezclador de polvo

V.4.-Compactación en frío

La presión que se aplica en la compactación produce inicialmente un empaclado, elimina los posibles huecos, reduce los poros e incrementa el contacto entre partículas. El compactado uniaxial es el método más ampliamente utilizado. La secuencia usual de operaciones en el compactado uniaxial consiste en llenar la cavidad del troquel con un volumen definido de polvo; la aplicación de la presión requerida mediante el movimiento del punzón superior hacia el inferior; y la expulsión del comprimido verde por el accionar del punzón inferior. La Figura V.4 muestra estas operaciones esquemáticamente. Es importante mencionar que el ciclo de prensado uní axial contribuye para que el polvo adquiera la resistencia necesaria para desempeñar su función como componente ingenieril el costo del dado es de 80 000 pesos o se puede mandar a manufacturar reduciendo el costo.

Se aplica a alta presión a los polvos para darles la forma requerida por prensado, punzones opuestos aprietan el polvo contenido en el molde, a la parte después de prensada se le llama compacto en verde, el termino verde significa que la parte no está completamente procesada.

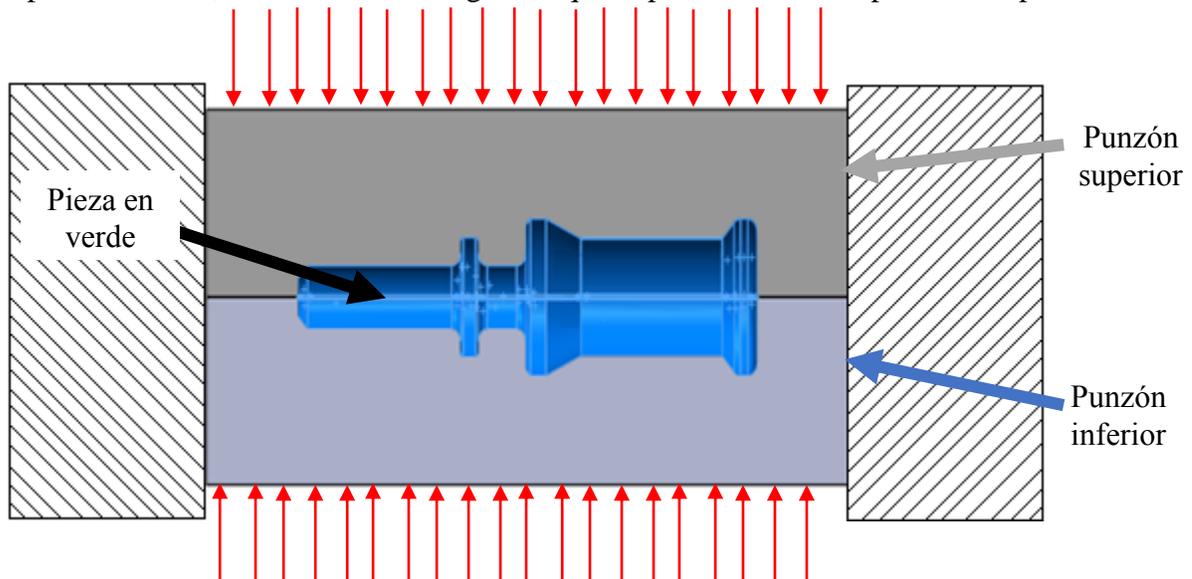


Figura V.4.-Dado de compactación o Matriz

La densidad de la parte, llamada densidad verde, es mucho mayor que la densidad volumétrica inicial. La resistencia verde de la parte cuando es prensada es adecuada para el manejo, pero mucho menor que la resistencia que se logra después del sinterizado.

La presión Figura V.5 que se aplica en la compactación produce inicialmente un empaqueo, elimina los posibles huecos, reduce los poros e incrementa el contacto entre partículas. Al incrementarse la presión, las partículas se deforman plásticamente ocasionando que el área de contacto aumente y entren en contacto partículas adicionales. Se utilizan prensas mecánicas o hidráulicas. La presión necesaria para prensar metales en polvo va de 70MPa para el Aluminio, hasta 800MPa para partes de hierro y acero de alta densidad. La selección de la prensa depende del tamaño y la configuración de la pieza, de la densidad requerida y de la tasa de producción tiempo es de 30 segundos por pieza.

Sin embargo, si aumenta la rapidez de prensado, aumentará la tendencia de la prensa a aprisionar aire en la cavidad de la matriz, evitando una compactación correcta.

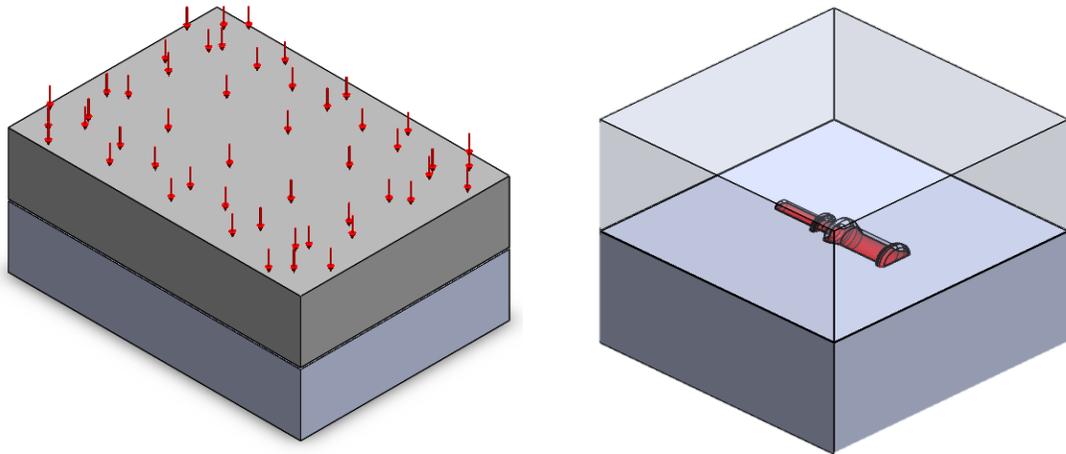


Figura V.5.-Compactacion de la pieza

V.5.-Proceso de sinterización

Después de prensado, el compactado verde carece de fuerza y resistencia, se desmorona fácilmente al menor esfuerzo Figura V.6. El sinterizado, o la sinterización, es el proceso de calentar los comprimidos crudos en un horno con atmósfera controlada, hasta una temperatura menor al punto de fusión, pero lo suficientemente alta (0,7 a 0,9 del punto de fusión) como para permitir la adhesión (fusión) de las partículas individuales, incrementando así su resistencia y su fuerza. Se cree que la fuerza básica que mueve al sinterizado es la reducción de la energía superficial. El compactado verde consiste en muchas partículas distintas que tienen su propia superficie, por tanto la superficie total contenida en el compactado es muy alta. Bajo la influencia

del calor, el área se reduce por la formación y crecimiento de las uniones entre las partículas, implicando una reducción de la energía superficial. Mientras más fino sea el polvo inicial, más alta será la superficie del área total y más grande la fuerza que mueve al proceso.



Figura V.6.-pieza en verde

Las variables principales del sinterizado son la temperatura, el tiempo y la atmósfera del horno. Los tiempos de sinterizado van de un mínimo de 10 min., para aleaciones de hierro y cobre, hasta de 8 horas para tungsteno y tántalo. Los hornos de sinterizado continuo, usados hoy para el grueso de la producción, tienen 3 cámaras figura V.7 y figura V.8 tiempo 1 hora sistema continuo de 100 a 150, 000 piezas.

1. Una cámara de quemado para volatilizar los lubricantes del comprimido crudo, para mejorar la resistencia de adhesión y evitar la rotura elimina 40 % de aire.
2. Tiene una cámara de alta temperatura para el sinterizado.
3. Una cámara de enfriamiento.

En la práctica moderna del sinterizado se controla la atmósfera del horno. Los propósitos de la atmósfera controlada son:

1. Proteger de la oxidación.
2. Proporcionar una atmósfera reductora para remover los óxidos existentes.
3. Suministrar una atmósfera carburizadora.

4. Ayudar a la remoción de los lubricantes y aglutinantes que se usan en el prensado.

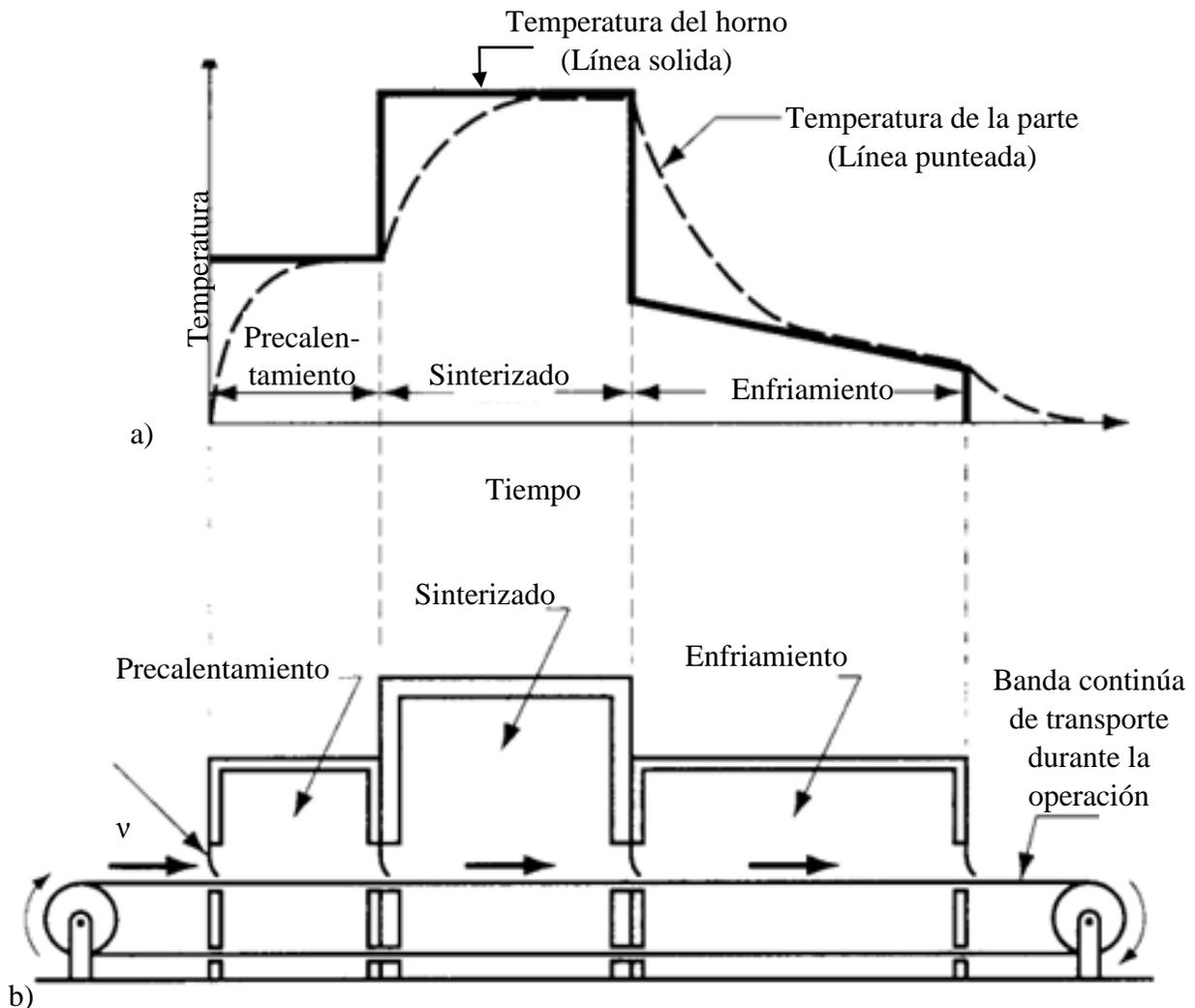


Figura V.7.-a) ciclo típico de tratamiento térmico durante el sinterizado y b) sección transversal esquemática.



Figura V.8.-Calentamiento de las piezas y terminado

V.6.-Moletiado de la pieza

Después del proceso de sinterizado las piezas pasan a un torno C.N.C. figura V.9 para hacer el Moletiado figura V.10.



Figura V.9.-Torno C.N.C.



Figura V.10.-Moletiado

V.7.- Recubrimiento de Fosfato de manganeso

Tratamientos de fosfato de manganeso se utiliza una mezcla de sal de manganeso, ácido fosfórico y un acelerador, aplicado a temperaturas muy altas figura V.11. Este proceso de conversión de recubrimiento implica la disolución del metal base, y posteriormente forma parte de la capa del recubrimiento así ofreciendo excelente resistencia al desgaste. El proceso de fosfato de

Diseño y análisis de la palanca de armar de un fusil de asalto
mediante el uso de tecnología de polvos

manganeso de *M.P.I.* es ampliamente utilizado para evitar la oxidación y corrosión dándole una vida útil mayor con una película máxima de 10μ este tratamiento se puede hacer en dos tipos de hornos pero el mejor es el de fosfatado por gas atmosfera controlada con un tiempo 20 minutos por lotes de 250 piezas figura V.12 pieza terminada figura V.13



Figura V.11.-Fosfatado de la pieza

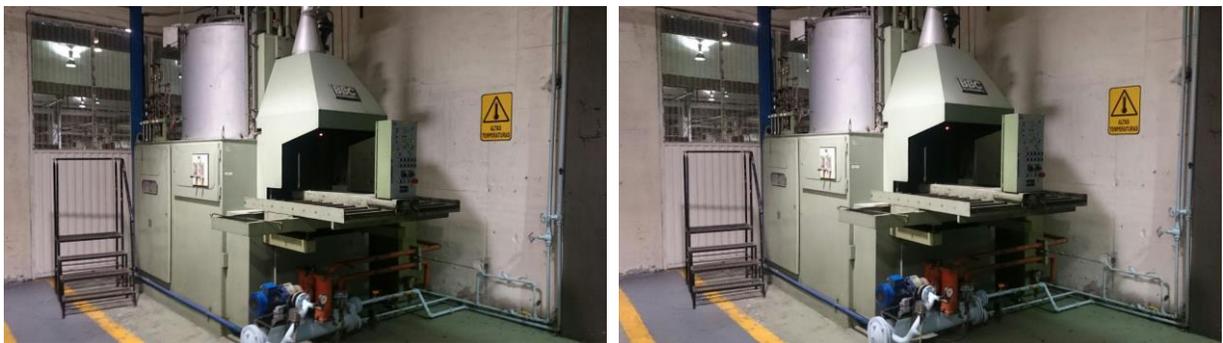


Figura V.12.-Horno por gases atmosfera controlada



Figura V.13.- Pieza terminada con recubrimiento de fosfatado

La pieza luego de ser trabajada se somete a tratamiento térmico para elevar su dureza y dentro de este proceso se requiere un normalizado para homogeneizar los granos y regular la dureza así se evita la concentración de esfuerzos internos.

V.8- Costos de producción

Con el proceso de fabricación de palancas de armar, descrito en este Capítulo V, se proyecta una producción anual de 15,000 palancas para el año 2015 y aumentarla para los siguientes años con el fin de utilizar la tecnología de polvos, lotificados en 150 lotes de 100 piezas cada uno [V.2].

Tabla V.3.- Cálculo de costo unitario de la fabricación de la palanca de armar [V.2].

TALLER	CICLO UNITARIO (MIN)	COSTO MINUTO OPERADOR	COSTO MAQUINARIA (MIN)	MATERIA PRIMA	COSTO MANUFACTURA UNITARIO	COSTO TOTAL UNITARIO
TORNOS	3	\$0.91	\$0,49	\$1,950	\$4,200	\$6,15
LIMADO	0,1	\$0.91	\$0,05	\$0,050	\$0,096	\$0,15
TROWAL	0,3	\$0.91	\$0,29	\$0,500	\$0,360	\$0,86
CONTROL	0,3	\$0.91	\$0,05	\$0,050	\$0,288	\$0,29
TEMPLE	2,05	\$0.91	\$0,58	\$0,120	\$3,055	\$3,55
LAVADO	0.02	\$0.91	\$0,02	\$0,500	\$0,019	\$0,07
DUREZA	0,2	\$0.91	\$0,04	\$0,050	\$0,190	\$0,31
TROWAL	0,3	\$0.91	\$0,29	\$0,120	\$0,360	\$0,86
FOSFATO	0,35	\$0.91	\$0,49	\$0,500	\$0,490	\$0,99
CONTROL	0,2	\$0.91	\$0,05	\$ -	\$0,192	\$0,19
ALMACÉN	0,0	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
TOTAL	6,82	\$.82	\$0,91	\$4,170	\$9,249	\$13,42

En la Tabla V.3 se muestra el cálculo efectuado para la determinación del costo unitario de producción del producto final considerando los costos de materia prima y mano de obra requerida en cada una de las fases de mecanizado propuestas, en el que se consideró: los parámetros de corte optimizados para el rendimiento promedio, estimando un tiempo ciclo, aproximado, del proceso de fabricación de palancas de 125 minutos por palanca. Es importante hacer notar que los costos mostrados fueron cotizados en el año 2013 por lo que es necesario llevar a cabo una actualización a la fecha actual [V.1]. Tomando en consideración que la información

proporcionada es de uso confidencial la cual podría ser solicitada a través del (I.N.A.I.) Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información.

La fabricación de 15,000 palancas se puede evacuar en un periodo de trabajo de 300 días, considerando una productividad promedio del 82%, tomando en cuenta los cambios de turno de los operadores, paros de maquinaria por mantenimiento, cambios de herramientas y ajustes durante el proceso de fabricación, así como los tiempos muertos por verificación de la calidad del producto a fabricar.

V.9.- Pruebas de funcionamiento

Se realizaron pruebas de funcionamiento a 100 muestras de palancas de armar conforme al diseño analizado por método analítico y MEF, mismas que soportaron en promedio 1000 disparos cada una, limite que se fijó como meta en el desempeño de la pieza, obteniéndose resultados satisfactorios durante su desempeño, con lo que se valida el método utilizado para el cálculo de los esfuerzos a los que está sometida la pieza [V.2]

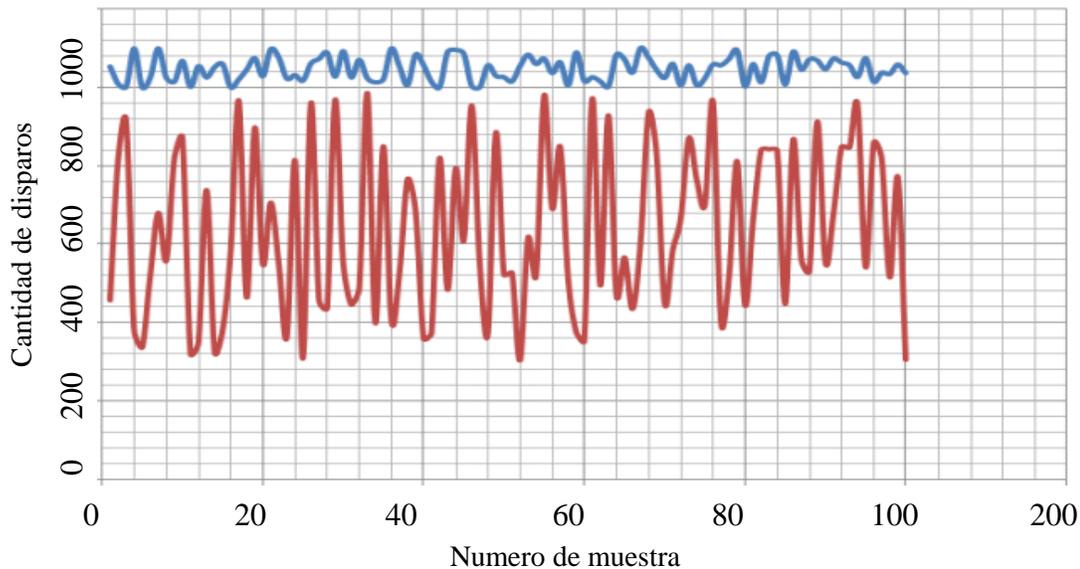


Figura IV.14.- Grafico del desempeño de la palanca de armar en pruebas de funcionamiento

V.10.- Sumario

En este capítulo se trata sobre el desarrollo de la fabricación de la palanca de armar analizada indicando fase a fase las operaciones, herramientas, dispositivos y condiciones generales que

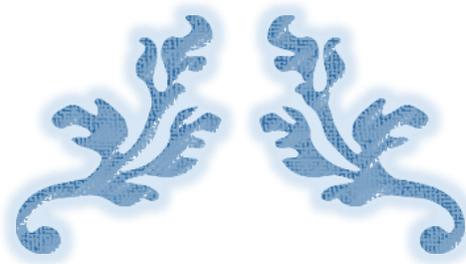
transformarán la materia prima en una pieza terminada, funcional y robusta, capaz de soportar las condiciones de trabajo para la cual fue diseñada, además se muestra un diagrama de flujo que sintetiza todo el proceso de fabricación y el flujo del material a través de los diversos talleres involucrados en la fabricación de este tipo de componentes, este Capítulo complementa el análisis numérico del Capítulo IV.

La principal aplicación de los conceptos mostrados son la rapidez de la fabricación, y el bajo costo de fabricación ya teniendo el dado de compactación o matriz, gracias al empleo de maquinaria de avanzada tecnología, y la rapidez de los procesos que le preceden, facilitando la acumulación y rápida evacuación del material, en cada uno de estos. Pudiendo cumplir la demanda de los fusiles de asalto *FX 05*.

De igual forma, se puede observar que las características de diseño han sido cumplidas satisfactoriamente, siguiendo el contexto del presente trabajo, haciendo un elemento fuerte, robusto y funcional.

V.11. - Referencias

1. - Geiger, M., *Material Adapted Tool Design in Cold Forging Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Industrial Ceramics*, Ed. Springer, pp 410, 2008.
- 2.- Verduzco-Cedeño, V. F., *Diseño y Desarrollo de Herramientas de Suajeado para la Fabricación de Cañones de Armamento*, Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica, IPN-ESIME SEPI Unidad Zacatenco, pp 39-40, 2010.



CONCLUSIONES

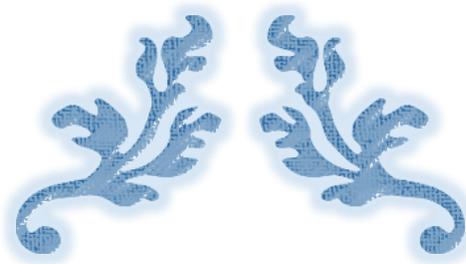


CONCLUSIONES

La diferencias entre aceros de colada continua y materiales por sinterizado es que al final es más controlado porque puedes controlar las mezclas que normalmente no puedes en aceros especiales hechos por colada continua.

La palanca al someterla a diferentes cargas muestra que está sobrevalorada pero esto es porque se expone a exigentes cambios de temperatura, clima, tiempo encasquillamiento y mal uso del operario del arma.

Con el proceso de sinterizado se proyecta una producción en serie de 10,000 palancas, lotificadas en 100 lotes de 100 piezas cada uno, la rapidez en la fabricación, la palanca se sigue torneando en acero convencional porque se tiene mucha materia prima pero en corto tiempo se van a remplazar por la tecnología de polvos y polímeros con el fin de ir mejorando el fusil. Este tipo de procesos es para piezas en serie ya que es muy costoso el dado o matriz.



TRABAJOS FUTUROS



TRABAJOS FUTUROS

Es importante resaltar que en este trabajo de investigación se enfoca en el proceso de sinterizado y en el análisis estático del funcionamiento de la palanca de armar se complementa con trabajos que deberán realizarse a futuro entre los cuales se recomienda:

- Simular por medio de *FEM* un estudio dinámico que contemple el coeficiente de fricción y el tiempo de recorrido de la palanca con el mecanismo de cierre tomando en cuenta la temperatura que se genera.
- Simular todos los componentes del mecanismo de cierre con las fuerzas de los gases y con la fuerza que se le aplique cuando se carga manualmente.
- Plantear nuevas propuestas de nuevas tecnologías como las impresoras tridimensionales como también diseñar un nuevo diseño de palanca más homogénea y que la pieza soporte la cargas a la que son sometida.
- Realizar un estudio experimental de la pieza cuando está actuando en funcionamiento real, para una mejor ergonomía hacer un estudio de los dedos (anular y meñique) de los militares para tener un mejor análisis numérico y experimental, medir la fuerza de los militares con un dinamómetro para seguir modernizando el arma.

GLOSARIO

Análisis lineal. - Cuando un cuerpo está sometido a tensión o compresión sobre la línea de la zona elástica.

Briqueteado. - Operación de aglutinar minerales pulverizados, tal como polvo de carbón, en briquetas bajo presión, a menudo con ayuda de un aglutinante, tal como el asfalto.

Carga. - Es la fuerza exterior que actúa sobre un cuerpo.

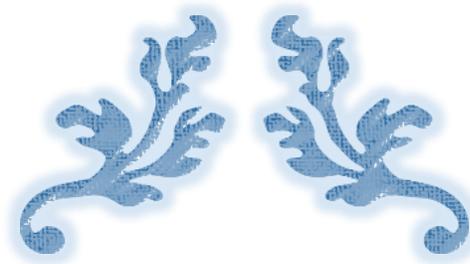
Concentrador de esfuerzos.- Es una zona geométrica en donde concurren los esfuerzos y se deriva de la geometría del propio cuerpo

Esfuerzos. - Fuerzas internas resultantes de un agente externo que se aplica a un cuerpo.

Elasticidad. -Propiedad que hace un cuerpo que ha sido deformado regrese su forma original, después que se han movido las fuerzas que lo deforman.

Límite de proporcionalidad o de cedencia. - Valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada.

Pulvimetalurgia. - Es el proceso de mezcla de materiales en polvo fino, comprimirlos en una forma o forma deseada, y luego calentando el material comprimido en una atmósfera controlada para unir el material.



ANEXOS



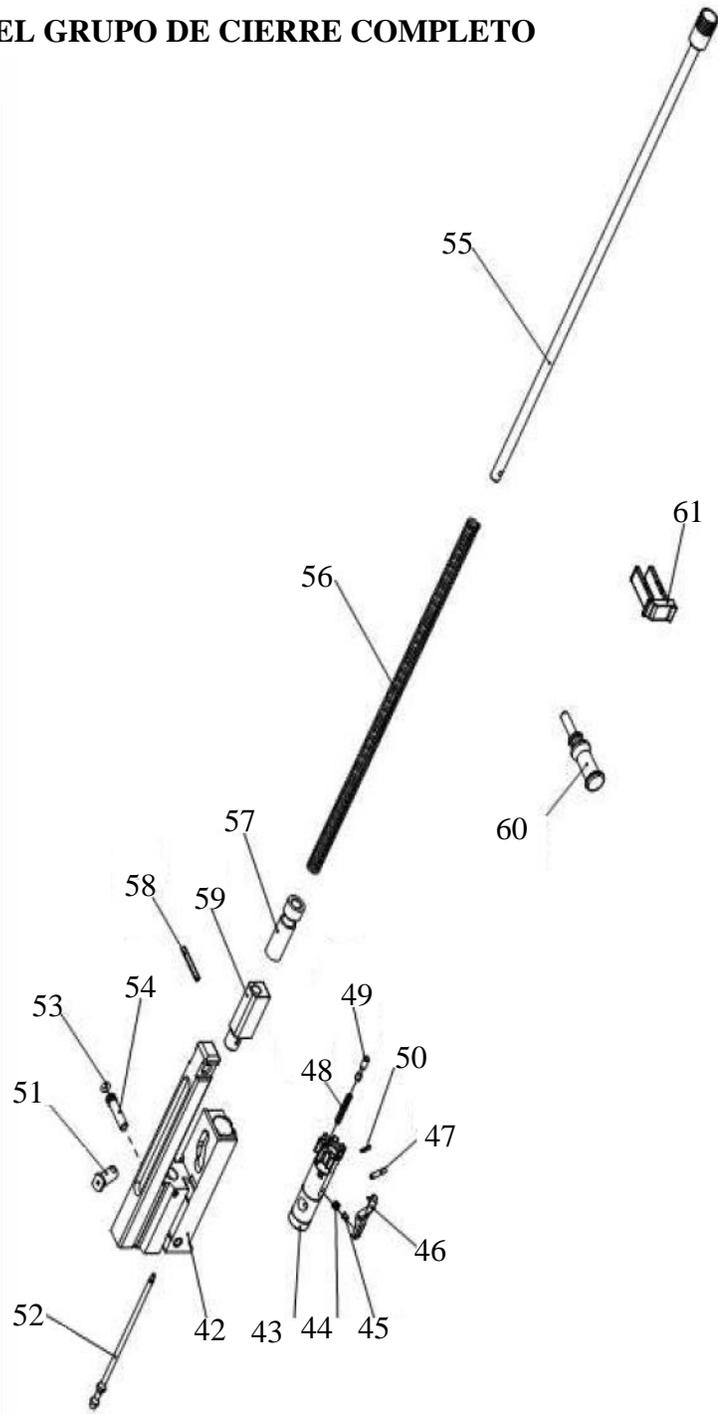
PROGRAMA NUMÉRICO DEL ANÁLISIS DE LA PALANCA		
/PREP7	k,90,0,0.00645,0.0	LARC,26,27,45 ,0.001
k,20,0.05,0.00795,0.0	k,91,0.05,0.00645,0.0	LARC,28,29,46 ,0.001
k,21,0.049,0.00895,0.0	L,20,21	LARC,35,36,47 ,0.001
k,215,0.0417,0.00895,0.0	L,21,215	LARC,37,38,48 ,0.001
k,216,0.0343,0.00895,0.0	L,215,216	k,81,0.0247, 0.00645,0.0
k,22,0.0328,0.00895,0.0	L,216,22	k,82,0.023, 0.00645,0.0
k,23,0.0323,0.00945,0.0	L,23,24	k,83,0.0192, 0.00645,0.0
k,24,0.0323,0.0112,0.0	L,24,25	k,84,0.003975, 0.00645,0.0
k,25,0.0304,0.0112,0.0	L,25,26	k,85,0.00249289 ,0.00645,0.0
k,26,0.0304,0.00995,0.0	L,27,28	k,835,0.018, 0.00645,0.0
k,27,0.0294,0.00895,0.0	L,29,30	k,86,0.00178579 ,0.00645,0.0
k,28,0.0262,0.00895,0.0	L,30,31	k,87,0.001, 0.00645,0.0
k,29,0.0252,0.00995,0.0	L,31,32	k,84,0.0325, 0.00645,0.0
k,30,0.0252,0.0124,0.0	L,32,33	k,85,0.0294, 0.00645,0.0
k,31,0.0247,0.0129,0.0	L,33,335	k,86,0.0262, 0.00645,0.0
k,32,0.023,0.0129,0.0	L,335,34	k,87,0.00178579 0.00645,0.0
k,33,0.0192,0.011125,0.0	L,34,35	k,34,0.003975, 0.006455,0.0
k,34,0.003975,0.011125,0.0	L,36,37	k,35,0.00249289 0.00645,0.0
k,35,0.00249289	L,38,1	k,74,0.003975, 0.006455,0.0
,0.01260711,0.0	L,32,7	k,75,0.00249289 0.00645,0.0
k,335,0.018,0.011125,0.0	L,335,505	k,84, 0.0328, 0.00645,0.0
k,36,0.00178579 ,0.0129,0.0	L,216,175	k,81, 0.00645,0.00895,0.0
k,37,0.001,0.0129,0.0	L,215,176	k,815, 0.00645,0.00895,0.0
k,38,0.0,0.0119 ,0.0	LARC,1,2,39,0.001	k,816,
k,44,0.0325,0.00915,0.0	LARC,3,4,40,0.001	0.006450.0343,0.00895,0.0
k,45,0.0294,0.00995,0.0	LARC,10,11,41 ,0.001	k,81, 0.00645,0.00895,0.0
k,46,0.0262,0.00995,0.0	LARC,12,13,42 ,0.001	k,815, 0.00645,0.00895,0.0
k,47,0.00178579 ,0.0119,0.0	LARC,16,17,43 ,-0.0005	k,816, 0.00645,0.00895,0.0
k,48,0.001,0.0119,0.0	LARC,22,23,44 ,-0.0005	k,81, 0.00645,0.00895,0.0

k,815, 0.00645,0.00895,0.0	LSTR, 29, 2200	FLST,8,2,3
k,816, 0.00645,0.00895,	LSTR, 85, 2200	FITEM,8,75
k,815, 0.00645,0.00895,0.0	LSTR, 28, 86	FITEM,8,74
K,81,0.00645,0.00895,,	LSTR, 2200, 86	,P51X, ,360, ,
K,81,0.00645,0.00895,,	LSTR, 86, 85	APLOT
k,851, 0.00645,0.00895,0.0	LSTR, 2165, 2151	FLST,2,1,5,ORDE,1
k,8155, 0.00645,0.00895,0.0	LSTR, 2151, 2155	FITEM,2,4
k,8165, 0.00645,0.00895,0.0	LSTR, 2155, 91	FLST,8,2,3
k,2155,0.049, 0.00645,0.0	k,2201,0.0304, 0.00645,0.0	FITEM,8,74
k,2151,0.0417, 0.00645,0.0	k,2202,0.0323, 0.00645,0.0	FITEM,8,835
k,2165,0.0343, 0.00645,0.0	LSTR, 25, 2201	VROTAT,P51X
LSTR, 38, 90	LSTR, 2201, 2202	P51X, ,360, ,
LSTR, 90, 91	LSTR, 2202, 24	LPLOT
LSTR, 91, 20	LSTR, 23, 2202	APLOT
LSTR, 21, 2155	LSTR, 2202, 84	FLST,2,1,5,ORDE,1
LSTR, 215, 2151	LSTR, 26, 2201	FITEM,2,5
LSTR, 216, 2165	LSTR, 2201, 85	FLST,8,2,3
LSTR, 22, 84	FLST,2,1,5,ORDE,1	FITEM,8,835
LSTR, 27, 85	FITEM,2,1	FITEM,8,83
LSTR, 29, 86	FLST,8,2,3	,P51X, ,360, ,
LSTR, 33, 83	FITEM,8,90	LPLOT
LSTR, 335, 835	FITEM,8,87	APLOT
LSTR, 34, 74	,P51X, ,360, ,	/VIEW,1,1,2,3
LSTR, 35, 75	APLOT	/ANG,1
LSTR, 36, 87	FITEM,2,2	/REP,FAST
LSTR, 835, 83	FLST,8,2,3	FLST,2,1,5,ORDE,1
LSTR, 32, 82	FITEM,8,87	FITEM,2,6
LSTR, 83, 82	FITEM,8,75	FLST,8,2,3
k,2199,0.0247, 0.00645,0.0	,P51X, ,360, ,	FITEM,8,83
k,2200, 0.0252, 0.00645,0.0	FLST,2,1,5,ORDE,1	FITEM,8,82
LSTR, 30, 2200	FITEM,2,3	VROTAT,P51X,

,P51X, ,360, , APLOT FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,7 FLST,8,2,3 FITEM,8,82 FITEM,8,2199 VROTAT,P51X, ,P51X, ,360, , FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,8 FLST,8,2,3 FITEM,8,2199 FITEM,8,2200 VROTAT,P51X,P51X, ,360, , APLOT FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,9 FLST,8,2,3 FITEM,8,2200 FITEM,8,86 VROTAT,P51X, ,P51X, ,360, , APLOT FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,10 FLST,8,2,3 FITEM,8,86 FITEM,8,85 VROTAT,P51X, ,P51X, ,360, ,	APLOT FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,11 FLST,8,2,3 FITEM,8,85 FITEM,8,2201 VROTAT,P51X ,P51X, ,360, APLOT FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,12 FLST,8,2,3 FITEM,8,2201 FITEM,8,2202 VROTAT,P51X ,P51X, ,360, , APLOT /REP,FAST FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,13 FLST,8,2,3 FITEM,8,2202 FITEM,8,84 VROTAT,P51X, ,P51X, ,360, , APLOT FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,14 FLST,8,2,3 FITEM,8,84 FITEM,8,2165	VROTAT,P51X,,P51X, 360,
---	---	----------------------------

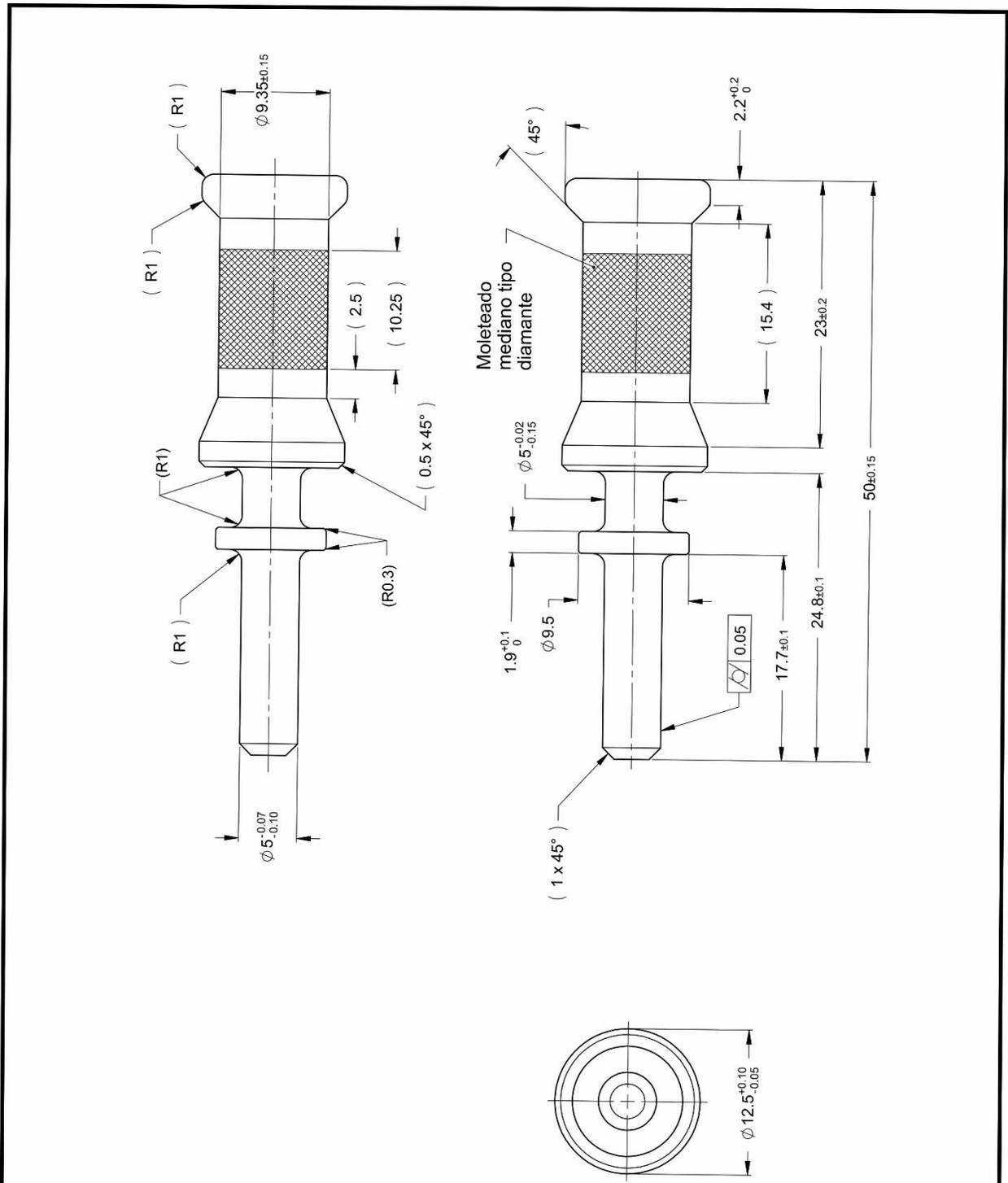
PIEZAS DEL GRUPO DE CIERRE COMPLETO

No.	DESCRIPCIÓN
42	Soporte de cierre grabado
43	Cabeza de Cierre
44	Resorte del extractor
45	Perno de goma
46	Extractor
47	Pasador cilíndrico
48	Resorte del eyector
49	Perno eyector
50	Pasador espiral 1/16"x5/16"
51	Perno de mando
52	Percutor
53	Anillo de junta de cierre 1.85x Ø2.50
54	Perno de seguridad Ø5.00
55	Vástago pistón
56	Resorte de empuje
57	Camisa de vástago
58	Pasador espiral ISO 8748 M3x22
59	Tope del perno de mando
60	Palanca de armar
61	Seguro lateral



DUREZA: 42+5 HRC	NOMBRE DEL PROYECTO: FX-05	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA UNIDAD ZACATENCO SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN	
NO. DE DISEÑO: FX05.03-M.320	TREATAMIENTO SUPERFICIAL: FOSFATADO	FECHA: 1/12/2015	TÍTULO: Diseño y análisis de la palanca de armar de un fusil de asalto mediante el uso de tecnología de polvos
NOMBRE DE LA PIEZA: PALANCA DE ARMAR	MATERIAL: CPM10V	COTAS: MILIMETROS	MATERIA: TESIS DE MAESTRIA
ESCALA: 2:1			N.º DE DIBUJO: 01

Diseño y análisis de la palanca de armar de un fusil de asalto
mediante el uso de tecnología de polvos



DUREZA: 42+5 HRC	NOMBRE DEL PROYECTO: FX-05	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA UNIDAD ZACATENCO SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN		
Nº DE DISEÑO: FX05.03-M.320	TRATAMIENTO SUPERFICIAL: FOSFATADO	FECHA: 1/12/2015	TÍTULO: Diseño y análisis de la palanca de armar de un fusil de asalto mediante el uso de tecnología de polvos	
NOMBRE DE LA PIEZA: PALANCA DE ARMAR		MATERIAL: CPM10V	DOTAS: MILIMETROS	
ESCALA: 2:1		MATERIA: IPN		TESIS DE MAESTRIA
				N.º DE DIBUJO: 02

Diseño y análisis de la palanca de armar de un fusil de asalto mediante el uso de tecnología de polvos

PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS

CONGRESOS INTERNACIONALES

1. 2015 *ESTUDIO ANALÍTICO-NUMÉRICO DE COMPONENTES CON Y SIN RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL EN CONDICIÓN CONDICIONES DE CONTACTO*, Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica.
2. 2015 *DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE FRENADO REGENERATIVO PARA UN VEHÍCULO HÍBRIDO* Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica.
3. 2015 *LA TUTORÍA COMO HERRAMIENTA PARA EVITAR LA DESERCIÓN ESCOLAR EN LA EDUCACIÓN MEDIA SUPERIOR*, XVI Simposium International.
4. 2015 *HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LA PRÓTESIS DE MIEMBRO INFERIOR*, XVI Simposium International
5. 2015 *NUMERICAL ANALYSIS FOR THE OPTIMIZATION OF A REVERSE SHOULDER ENDOPROSTHESIS MADE OF VITALLIUM ALLOY*, XXIV International Materials Research Congress.
6. 2014 *DISEÑO DE BOQUILLA PARA LIMPIEZA DE RODILLOS CON ARENA METÁLICA*, 7º Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas.

CONGRESOS NACIONALES E INSTITUCIONALES

7. 2015 *ANÁLISIS ESTRUCTURAL DINÁMICO DE UN AUTOMÓVIL HÍBRIDO MEDIANTE MEF*, XII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia
8. 2015 *MÉTODO DE KANTOROVICH EN LA SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE CALOR EN ESTADO ESTACIONARIO CON CONDICIONES DE CONTORNO DEL TIPO DIRICHLET*, X congreso científico y tecnológico de las carreras de ingeniería (IME, INDUSTRIAL E ITSE).

-
-
9. 2014 *PROPUESTA DE UN CABEZAL DIVISOR PARA UNA FRESADORA UNIVERSAL*, 3er Congreso Nacional de Innovación y Vinculación Científico-Tecnológica de Nivel Medio Superior, Superior y Posgrado.

 10. 2014 *PROPUESTA DE UN MOLINO PARA ENVASES DE PET Y REDUCCIÓN DEL RUIDO, NACIONAL*, 3er Congreso Nacional de Innovación y Vinculación Científico-Tecnológica de Nivel Medio Superior, Superior y Posgrado.

 11. 2014 *ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRUEBAS DE IMPACTO EN CASCOS DE FUTBOL AMERICANO*, 3er Congreso Nacional de Innovación y Vinculación Científico-Tecnológica de Nivel Medio Superior, Superior y Posgrado.