



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

**ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE LOS MARTILLOS DE
FORJA EN FRÍO, DE UNA MÁQUINA ROTATIVA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA
MECÁNICA**

PRESENTA:

ING. ANTONIO HERNANDEZ CERON

DIRECTOR DE TESIS

DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA

DR. VICTOR VERDUZCO CEDEÑO



RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio de análisis de esfuerzos a los martillos de forja en frío de una máquina rotativa, mismos que son usados para la fabricación de cañones de armamento. El objetivo principal es el de conocer el estado de esfuerzos de estas herramientas en el estado actual de producción de los componentes de seguridad antes mencionados para determinar las condiciones que provocan fallas como deformación plástica, desgaste y erosión, en particular en el perfil angulado de la herramienta. Posteriormente se realiza un estudio de optimización geométrica de dichos perfiles que permita una redistribución de esfuerzos en la zona de trabajo de las herramientas. Que deberá reducir los esfuerzos y lograr mayor vida útil de las herramientas de forjado.

Para lograr los objetivos antes mencionados se comienza en una primera etapa con una revisión de los procesos de forjado desde la antigüedad y su evolución hasta la época actual. Se presentan las ventajas y desventajas de estos procesos y las diferentes máquinas que se usan en los procesos de forja en frío y en caliente, para después explicar de manera general el material y el proceso en específico con que son fabricados los martillos de forjado. Ya que son herramientas especiales, se menciona además el proceso de rectificado con muela de diamante, proceso mediante el cual se generan los perfiles angulados de la herramienta.

En una segunda etapa se hace uso de diferentes *softwares* de elemento finito como auxiliares para realizar el análisis numérico y determinar los esfuerzos, desplazamientos y deformaciones unitarias a los que se encuentran sometidos los martillos de forjado, datos que se usan como base para la optimización que se realiza usando diferentes métodos de optimización. Entre los que se encuentran la optimización topológica y paramétrica. Obtenidos los perfiles óptimos, la última etapa consiste en la fase de experimentación, la cual consiste en la fabricación de los nuevos perfiles para realizar las pruebas de funcionamiento fabricando lotes de cañones de armamento lo que permitirá verificar el funcionamiento, así como comprobar el incremento de vida útil en el proceso de fabricación finalizando con la publicación de resultados.

ABSTRACT

In this work, a stress analysis study is presented to the cold forged hammers of a rotating machine, which are used for the manufacture of weapons cannons. The main objective is to know the state of efforts of these tools in the current state of production of the aforementioned safety components to determine the conditions that cause failures such as plastic deformation, wear and erosion, in particular in the angled profile of the tool. Subsequently, a geometric optimization study of said profiles is carried out, which allows a redistribution of efforts in the work zone of the tools. That should reduce the efforts and achieve greater life of the tools of slab.

In order to achieve the aforementioned objectives, a first stage is started with a review of the forging processes since antiquity and their evolution up to the present time. The advantages and disadvantages of these processes and the different machines used in cold and hot forging processes are presented, in order to then explain in a general way the material and the specific process with which the forged hammers are manufactured. Since they are special tools, the process of grinding with a diamond wheel is also mentioned, a process by means of which the angled profiles of the tool are generated.

In a second stage, different finite element software's are used as auxiliary to carry out the numerical analysis and determine the forces, displacements and unitary deformations to which the slab hammers are subjected, data that are used as a basis for the optimization that It is done using different optimization methods. among which are the topological and parametric optimization. Obtained the optimal profiles, the last stage consists of the experimentation phase, which consists of the manufacture of the new profiles to perform the operation tests manufacturing batches of weapons cannon which will verify the operation, as well as check the increase of useful life in the manufacturing process ending with the publication of results.

Capítulo I, Estado del Arte

I.1.- Introducción

I.2.- Breves antecedentes históricos

I.2.1.- La edad de los metales

I.2.1.1.- La edad del cobre

I.2.1.2.- La edad del bronce

I.2.1.3.- La edad del hierro

I.3.- Estado actual del proceso de forja

I.3.1.- Clasificación de los procesos de formado

I.3.2.- Variables a tomar en consideración en los procesos de formado

I.3.3.- Ventajas obtenidas en la fabricación de piezas por el proceso de forja

I.3.3.1.- Integridad estructural en las piezas forjadas

I.3.3.2.- Resistencia a la fatiga e impacto

I.3.3.3.- Alta uniformidad en piezas forjadas

I.3.3.4.- Uniformidad dimensional en las piezas forjadas

I.3.3.5.- Amplia variación de propiedades y materiales

I.3.3.6.- Variación de tamaños y formas

I.3.3.7.- Son compatibles con diversos procesos de manufactura

I.4.- Planteamiento del problema

I.5.- Sumario

I.6.- Referencias

Capítulo II, Antecedentes

II.1.- Introducción

II.2.- El proceso de forjado

II.3.- Procesos de forjado

II.3.1.- Forjado de matriz abierta

II.3.1.1.- Calculo de la fuerza de forjado con matriz abierta

II.3.2.- Forjado con matriz de impresión y matriz cerrada

II.3.2.1.- Calculo de la fuerza de forjado con matriz de impresión

II.4.- Operaciones de forjado

II.5.- Defectos del forjado

II.6.- Maquinas para procesos de forjado

II.7.- Esfuerzo y deformación

II.8.- Teorías de falla

II.9.- Métodos de Optimización

Capítulo III, Análisis del estado de esfuerzos de los martillos de forja

III.1.- Introducción

III.2.- Materiales utilizados en la fabricación de herramientas de forjado

III.2.1.- Producción de carburo

III.2.1.1.- Preparación del polvo granulado

III.2.1.2.- compactación de polvos

III.2.1.3.- Sinterización

III.2.1.4.- Producción de carburo de tungsteno Para la fabricación de matrices y dados

III.2.1.5.- Piezas compuestas

III.3.- Proceso de forjado con martillo

III.4.- Fallas que se pueden presentar en los martillos de forjado

III.4.1.- Mecanismo de fractura por fatiga

III.4.2.-Mecanismos de desgaste

-
- III.5.- Aplicaciones industriales del *MEF*
 - III.5.1.- Fundamentos del *MEF*
 - III.5.2.- Planteamiento del problema para el uso práctico del método
 - III.5.3.- Desarrollo del modelo de elementos finitos
 - III.5.4.- Solución y tipos de análisis
 - III.5.5.- Análisis de resultados
 - III.6.- Análisis numérico de los martillos de forjado
 - III.6.1.- Análisis de resultados del modelo
 - III.7.- Sumario
 - III.8.- Referencias

Capítulo IV, Análisis de esfuerzos y resultados

- IV.1.- Introducción
- IV.2.- Métodos de optimización
- IV.3.- Optimización de los martillos de forjado
- IV.4.- Optimización topológica de los martillos de forjado
- IV.4.1.- Resultados de la optimización topológica de los martillos de forja
- IV.5.- Optimización paramétrica de los martillos de forjado
- IV.5.1.- Resultados martillo tipo A
- IV.5.1.1.- Análisis numérico del martillo de forja tipo A optimizado
- IV.6.- Optimización del martillo de forja tipo B
- IV.6.1.- Resultados martillo tipo B
- IV.6.1.1.- Análisis numérico del martillo de forja tipo B optimizado
- IV.7.- Sumario
- IV.8.- Referencias

OBJETIVO GENERAL.

Análisis de esfuerzos de los martillos de forja en frío, usados en la fabricación de cañones de armamento y componentes de seguridad. Con la finalidad de obtener el mayor rendimiento y aumentar la vida útil de la herramienta logrando reducir los esfuerzos en el perfil angulado de los martillos.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Análisis de esfuerzos a los que se encuentran sometidos los martillos de forjado.
- Simulación numérica de las condiciones reales a las que se encuentra sometida la herramienta.
- Determinación del estado de esfuerzos en el perfil de los martillos de forja.
- Obtención de nuevos perfiles de los martillos de forja, mediante un estudio de optimización de forma.
- Fabricación y pruebas de funcionamiento.
- Publicación de Resultados.

JUSTIFICACIÓN

En la fabricación de cañones de armamento, y de otros componentes de seguridad se usan martillos de forjado en frío. Proceso que se lleva a cabo en máquinas de forjado rotativo, en particular para este trabajo se usa una maquina GFM SK 10 de forjado axial debido a que este tipo de herramientas se encuentran sometidos a varios ciclos de trabajo en la fabricación de miles de piezas de cañones de armamento se tienen problemas como son el desgaste excesivo del perfil angulado, deformación plástica, erosión y en ocasiones problemas de fractura.

Los martillos de forjado en frío objeto de este estudio son utilizados para la fabricación de cañones en particular para el fusil FX05, arma de fabricación nacional y fabricada en las instalaciones de la fábrica de armas dependiente de la Dirección General de Industria Militar, de la Secretaria de la Defensa Nacional. El perfil de los martillos tiene varios ángulos de entrada cuya finalidad es la de facilitar el flujo de salida del material, al estar forjando el cañón del arma antes mencionado, los ángulos provocan concentradores de esfuerzos en la herramienta por lo que al estar en función los martillos estos se encuentran sometidos además de la fuerza de forjado, a esfuerzos muy grandes que no deberán rebasar la resistencia del material con el que se encuentran fabricados los herramientas.

Para reducir al mínimo los problemas mencionados se propone modificar el perfil angulado de los martillos, en una primera fase realizando el análisis del estado de esfuerzos de la herramienta mediante elemento finito para después como segundo paso realizar un estudio de optimización de forma que permita evaluar en varios escenarios los ángulos de entrada del perfil angulado, obtenidos los perfiles óptimos como tercera y última fase se llevara a cabo la fabricación de los nuevos perfiles con lo que espera obtener una redistribución de esfuerzos lo que representa mayor vida útil de los martillos y en donde el beneficio principal radica en la mayor cantidad de cañones forjados reduciendo los costos al tener una mayor duración las herramientas principalmente al reducir el rectificado que se tiene que dar a los martillos de forjado.

Capítulo I

Estado del Arte

I.1.- Introducción

La forja de metales es una de las técnicas más antigua utilizada por el hombre para dar forma a materiales como la piedra de cuarzo y el hierro. Siendo estos los primeros materiales que se utilizaron para crear objetos que servirían al hombre para la caza, agricultura y posteriormente para la creación de armas como cuchillos, lanzas puntas de flecha, espadas etc.

No se conoce una fecha específica de cuando se descubrió la manera de fundir el hierro para obtener metal, de acuerdo con algunas investigaciones los primeros objetos de hierro descubiertos por arqueólogos datan del año 3000 a. c., aunque ya en el año 1000 a. c. se sabe que los griegos usaban objetos de hierro para adornar y además de usar tratamientos térmicos para endurecer los metales. en este trabajo se presenta de manera detallada la evolución de este proceso tan antiguo que inicio como forja manual, trabajando los metales solo con el yunque y martillo. Se explica de manera breve la edad de los metales abordando desde la edad del cobre hasta la del hierro y como llego desde Europa, Asia hasta el continente americano y la influencia que tuvo en Mesoamérica.

I.2.- Breves antecedentes históricos

Si se toman en consideración investigaciones y documentos ya conocidos, la forja es el proceso de trabajar el metal más antiguamente conocido. Tuvo sus principios cuando el hombre primitivo hallo la forma de golpear con mazos de piedra trozos de minerales encontrados. Los cuales convirtió en implementos metálicos (Figura I.1) [I.1].



Figura I.1.- Forja antigua

La Biblia menciona en varios pasajes la existencia de instructores en el arte del Hierro [I.2]. Estos relatados también se encuentran escritos antiguos por medio de inscripciones primitivas en lenguas egipcias, griegas, fenicias chinas, japonesas, persas, así como en hindú [I.3]. Existen indicios históricos de minerales de Hierro martillados en barras y manufacturas de armas hechas de metal [I.4]. Dos naciones de culturas antiguas (India y China) reclaman la paternidad de ser los primeros en el conformado del acero, aproximadamente 2 000 años antes de cristo [I.5].

El conformado de los metales es una de las técnicas más importantes que se utilizan para la fabricación de productos, entre otras técnicas se puede mencionar la metalurgia de polvos y fundición. Los primeros registros del formado de metales describen metales como el Oro y el Cobre formados por medio de un martillo simple en regiones del Medio Este alrededor del año 8000 A. C. [I.6]. Para el año 4 000 A. C. con el auge de la fundición de Cobre, se encontraron métodos para la purificación de los metales por medio de reacciones químicas. Durante la edad de Cobre, se encontró que por medio del formado con martillo se incrementaba la resistencia del metal. Conocido este fenómeno actualmente como endurecimiento por deformación [I.7].



Figura I.2.- Forja de Cobre

La Edad de Hierro no llega sino hasta el año 1 200 A. C. aproximadamente cuando son descubiertos métodos para alcanzar temperaturas necesarias para refinar el Hierro. La mayor parte del trabajo sobre metales se hacía a mano hasta el Siglo XIII, que es cuando se inventa una máquina de martillo para forja de placas y barras. El desarrollo de los molinos de laminado son los que siguen a los equipos de forja [I.8]. Además de que en apuntes de *Leonardo da Vinci*, correspondientes al año 1 480, muestran bosquejos de una máquina diseñada para laminar Plomo. Así como, *da Vinci* reporta haber laminado delgadas hojas de metales preciosos en un molino operado a mano [I.9].

I.2.1.- La Edad de los Metales

Por definición la Edad de los Metales, además de ser una de las dos grandes etapas en las que se ha subdividido la prehistoria euroasiática, es también el periodo que siguió a la Edad de Piedra en la que el hombre empezó a fabricar objetos de material fundido. Es indispensable tomar en cuenta los procesos metalúrgicos para que se pueda establecer como inician los procesos de formado de los metales ya que los metales nativos eran trabajados por martillo desde el inicio del periodo Neolítico [I.10]. A continuación, se presenta un desglose de las diferentes etapas o edades de los metales.

I.2.1.1.- La Edad del Cobre [I. 10 a I.13]

La Edad de los Metales comienza con las primeras evidencias de la fundición de Cobre, que son del Siglo VI a. C. (en Anatolia y montes Zagros). Esta acaba con la progresiva entrada en la historia de cada región. En Europa se produce durante el Siglo I a. C., en Mesopotamia y Egipto coincide con el desarrollo de la escritura por lo que la metalurgia allí es totalmente histórica. Los primeros indicios de la metalurgia en Europa se dan en el área de los Balcanes, esto a mediados del Siglo V a. C. Para el resto del continente las evidencias se dan durante la segunda mitad del Siglo IV a. C. Su generalización y el consecuente abandono de la piedra como elemento para la fabricación de artefactos se da con la llegada del Hierro. Dada la escasez de este material, en Egipto esta sustitución nunca se llegó a producir (Figura I.3).



Figura I.3.- Implementación del Cobre en Egipto

El Cobre, Oro y Plata son de los primeros metales que se utilizaron en la prehistoria. El objeto de Cobre más antiguo encontrado, es un colgante oval que procede de Irán y ha sido datado en tiempo al 9 500 a. C. Esto es a principios del Neolítico. Pero esta pieza es un caso aislado, ya que no es si ni hasta 3 000 años más tarde cuando las piezas de Cobre martillado en frío empiezan a ser habituales. A partir del año 6 500 a. C. en varios yacimientos se han encontrado piezas de

ornamento y alfileres de Cobre manufacturado a partir de martillado en frío de metal nativo, siendo halladas estas piezas tanto en Irán, como en la meseta de Anatolia, en Turquía.

I.2.1.2.- La Edad del bronce [I.13 y I.14]

Resultado de aleación de Cobre y Estaño en proporciones variables, se supone fueron los egipcios los primeros que añadieron Estaño al Cobre. Lo que le daba características de dureza y punto de fusión bajo al bronce. El empleo del bronce se inicia en Mesopotamia y coincide con la transición del Siglo III a. C. al Siglo II en el próximo oriente, donde se establecieron las primeras sociedades complejas mismas que generaron gran demanda de Estaño. Por lo que los metalúrgicos de estas áreas se convirtieron en exploradores en búsqueda de minas para satisfacer esta necesidad.

Respecto de Asia central, se ignora si la metalurgia de bronce se inventó ahí o fue importado desde Mesopotamia. La edad de bronce se inició en Pakistán desde mediados del Siglo III hasta mediados del Siglo II a. C. y carecía por completo de fuentes para este mineral. En China se fundía Cobre arsenical desde fines del Siglo IV a. C., no se considera que haya una Edad de Cobre en China, pasaría directamente del neolítico a la Edad de bronce. La metalurgia llegó con varios milenios de retraso al extremo oriente. La primera cultura de la Edad de bronce en china está relacionada con la *dinastía Xia*.

I.2.1.3.- La Edad del Hierro [I.7, I.10 y I.15 a I.22]

Siendo el Hierro el cuarto elemento que más abunda en la corteza terrestre, su utilización práctica comienza hace 7 000 años más tarde que el Cobre y 2 500 años después del bronce. Los antiguos ya conocían el Hierro y era considerado más valioso que cualquier joya, así que el retraso del Hierro no se debe a su desconocimiento. Además de tratarse de Hierro meteórico, procedente de meteoritos este tipo de Hierro era conocido en Eurasia y en América.

Los minerales como la hematites, limonita o la magnetita los cuales son óxidos de Hierro. Debieron ser las materias primas de los primeros herreros. Estos minerales se usaban para otros fines en la prehistoria. Se piensa que en los antiguos hornos de fundición de Cobre y bronce se generaron pequeños residuos de Hierro casi puro. Es a partir de este momento en que comienza el verdadero conocimiento de la siderurgia dado que se hallaron hallazgos antiguos de Hierro fundido en Siria y Azerbaiyán. Se sabe que los Hititas fueron los primeros en controlar y monopolizar los productos

de Hierro que se fabricaron a mediados del Siglo II y sus objetos eran enviados a los egipcios, sirios, asirios y fenicios. Generalmente eran regalos diplomáticos, ya que el Hierro era diez veces más valioso que el Oro y cuarenta más que la Plata. Los herreros del imperio Hitita se dispersaron por oriente medio cuando este imperio fue destruido hacia el 1 200 a. C. Es así como comienza la Edad de Hierro en el próximo oriente (Figura I.4). El mineral era precalentado en hornos, por medio de golpes se eliminaban algunas impurezas posteriormente se llevaba al estado incandescente. En un segundo horno hasta que se obtenía una masa de Hierro esponjoso, altamente impuro y era nuevamente golpeado en caliente para refinarlo, sin dejar que el Hierro se enfriase y de un largo y repetido proceso de martilleo y calentamiento se obtenía una barra forjada, que era bastante pura, resistente y maleable. Para la fabricación de armas y algunas herramientas, el Hierro se templaba enfriándolo bruscamente en agua, esto provocaba cambios en su estructura molecular y mejor absorción de Carbón.



Figura I.4.- Taller de herrero medieval y sus productos

Los indicios más antiguos del proceso de templado del Hierro se hallaron en Chipre y datan de 1 100 a. C. ya que el Hierro es más abundante que el Cobre y el Estaño y una vez que se dominó la técnica para su producción. Este aumento considerablemente en todo el próximo oriente estos centros siderúrgicos se extendieron hasta el Egeo, Egipto e Italia, por el oeste se extendió hacia

Siria y Mesopotamia, por el sur, hacia Armenia y el Cáucaso por el norte. A su vez hacia las grandes civilizaciones asiáticas por el este. En Europa la edad de Hierro comenzó poco antes del año 800 a. C. es protagonizada por pueblos europeos generalmente belicosos, el Hierro en estos pueblos fue muy utilizado en herramientas agrícolas y artesanales, los artesanos conocían el Hierro carburado, trabajaban las placas de metal al rojo vivo, las calentaban entre carbón de leña para absorber más carbón desprendido de la combustión. Desarrollaron el laminado, alternando láminas superpuestas de Hierro y más Carbón, el calentamiento y el martilleo eliminaba las impurezas mejorando la calidad del metal creando una hoja compacta muy resistente. En la india la Edad del Hierro comenzó en la etapa del *Vedismo* perdido, a comienzos del primer milenio antes de nuestra era. La plenitud de este mineral coincide con los *mahajanapadas* que fueron los 16 reinos en donde se consolidó el sistema de castas (700 a. C. al 300 a. C.). Se dice que es en este periodo en el que pudieron inventar la soldadura autógena por forja y una variante del acero llamado *Wootz* de la india siendo este un acero muy rico en Carbón y casi sin impurezas ni oxidantes [I.16].

En china la transición entre la Edad de bronce y el Cobre es muy larga por un lado la situación social del país y por la otra la inigualable pericia de los bronceístas chinos. Los chinos conocían el Hierro desde la *dinastía Zhou*. En el año de 1949 fueron descubiertas varias espadas *Zhou* que datan de principios del Siglo I a. C. donde se utilizó láminas de Hierro meteórico. Los metalúrgicos chinos usaban el Hierro para mezclarlo con el bronce por laminado y la soldadura autógena por forja para la fabricación de espadas. Los herreros chinos descubrieron también que el óxido de Cromo protegía al metal de la corrosión. Los avances chinos llegaron a descubrir el pudelado llamado por los chinos *chao* que es un sistema que refina el Arrabio en un horno especialmente diseñado para que la oxidación elimine el exceso de Carbón. También aprendieron a mezclar el Hierro fundido con Hierro forjado lo que les permitió obtener acero auténtico (Figura I.5) [I.17].



Figura I.5.- Aplicación del Hierro en China

En Japón con la llegada de los invasores coreanos y chinos desapareció la cultura neolítica llamada *Jomon*. Lo que dio lugar a la cultura *Yayoi* en el 300 a. C. Con lo cual se llegó con numerosos adelantos del continente, con estos adelantos llegaron los metales a Japón llegó el Hierro al mismo tiempo que el bronce. La fase de la cultura *Yayoi* es llamada la Edad de bronce-Hierro.

A excepción de Egipto, en África no existió la edad de bronce. Este se conoció en el Siglo II a. C. Precisamente por la influencia de los egipcios, más allá del Sahara estas influencias desaparecen. La África negra accede así a la metalurgia del Hierro hacia el 1 800 a. C. El Hierro aparece en la África subsahariana en la civilización *Nok*, entre el 600 a. C. y el 200 d. C. de allí se difundió al sur con la expansión *bantú*. Es así como se desarrolla la metalurgia funcional del Hierro y la del bronce. En América se desarrolló la metalurgia del Oro, la Plata, el Cobre y bronce. Pero no existen indicios de que esta tecnología haya incidido en las culturas precolombinas de la región. En los grandes lagos abundaban yacimientos de Cobre nativo desde el 4 000 a. C. Los pueblos locales acostumbraban a golpear las pepitas de Cobre hasta darles la forma de punta de flecha, pero nunca descubrieron la fusión. Los primeros indicios encontrados sobre la metalurgia del Cobre datan de los inicios del Siglo I a. C. en los antiplanos boliviano y peruano. En las actuales Colombia y Perú se efectuaron aleaciones de Cobre con Plata y Oro a partir del 500 a. C. El metal sirvió a estas culturas para fabricar objetos rituales y de prestigio, son pocos los artefactos utilitarios encontrados. La primera gran cultura metalúrgica del continente americano fue la *Chavín de Huantar*, al menos desde el 800 a. C. elaboraba objetos de Oro en forma de placas martilleadas y repujadas. Los mixtecos son la cultura que más destaca de las culturas precolombinas de la baja Mesoamérica.

Los mixtecos conocedores de las técnicas del Hierro y el bronce, inventaron la soldadura, la filigrana, el damasquinado y el chapado en Oro, tal que su orfebrería se equiparaba a la del viejo mundo. Existen numerosos códices que ilustran las técnicas de fundición y de reducción de estos metales. El Hierro solo era conocido por los meteoritos por parte de los indígenas de América del Norte fue utilizado en formas de esquirilas. Otro de los usos comunes del Hierro precolombino fue como colorante de cerámica. En Mesoamérica se desarrollaron las actividades mineras, antes de la era cristiana, para la obtención de compuestos, no metálicos, como ciertas sales, óxidos, etc., a partir de los cuales se logró satisfacer requerimientos económicos y culturales, en cambio, la metalurgia se inició hacia el Siglo VI d. C.

El trabajo de los minerales metalíferos se desarrolló en Mesoamérica, entre los años 600 y 800 d. C. Como consecuencia de una difusión, probablemente por etapas, desde los centros de la alta cultura de América del Sur, introducidas por la costa del Pacífico y por el área Maya. Los mesoamericanos obtuvieron, trabajaron y aprovecharon; Oro, teocuitlatl, nativo, de pureza variable, Cobre, teputztlí, nativo, de pureza variable, Cobre obtenido metalúrgicamente de pureza variable, Plata, teocuitlatl, nativa, de pureza variable, Plata obtenida metalúrgicamente de pureza variable, Plomo, temetztlí, obtenido metalúrgicamente, de metales dóciles de pureza variable, Estaño, amóchitl, obtenido metalúrgicamente, Hierro, temetztlí, meteórico colectado en la naturaleza, Mercurio, nativo (azogue), colectado en las minas o destilado metalúrgicamente. A los procesos de extracción de estos minerales seguían los del beneficio de los metales, fuera ya muchas veces de los recintos de las minas. Los metales con diferentes grados de pureza y también cuando así se deseaba, en aleación, eran sometidos a diversas formas de trabajo que permitían la elaboración de una gran variedad de objetos.



Análisis de esfuerzos de los martillos de forja en frío, de una maquina rotativa

Figura I.6.- Minería y trabajo del metal en América Latina

Los indígenas empleaban hornos u hornillas de barro, en los que se mezclaban los trozos de mineral metalífero con Carbón. Encendido el horno y avivado el fuego, gracias al aire soplado por medio de canutos o tubos que se introducían por los orificios, se lograba la separación del metal que recogían en el fondo del horno. En las antiguas minas de Cobre, para beneficiar el metal, lo purificaban por sucesivas fusiones, en ocasiones hasta tres, empleando canutos o tubos. A los que trabajaban el metal en frío se les llamaba martilladores de metal o batihojas, quienes desarrollaron varias formas de producción, entre las que se encuentran los objetos de Oro, Cobre o Plata laminados, diademas, piezas de Cobre a modo de hachuelas usadas como monedas. El repujado, o sea el trabajo de labrar con martillo las láminas de metal para hacer figuras en una de sus caras. También se practicó en el México Antiguo. Otro tanto puede afirmarse del engastado en metales de distintas piedras como obsidiana y jadeítas. El pulido para lograr acabados mejores, las técnicas del forrado de objetos con láminas de metal. Así como, el templado para dar dureza y elasticidad convenientes a objetos como hachas y *coas*, fueron otros tantos tipos de trabajo practicado en frío.

Durante la *Revolución Industrial* a finales del Siglo XVIII, nuevos procesos fueron ideados para la producción de Hierro y acero en grandes cantidades, en respuesta a la creciente demanda de productos metálicos. Esta necesidad impulsó el desarrollo de martillos de vapor de alta velocidad, prensas hidráulicas, etc. En los últimos 100 años se ha visto el desarrollo de nuevos equipos para el formado de metales, tales como prensas de tornillo, prensas mecánicas, molinos de alta velocidad, etc. y de nuevos materiales con propiedades y aplicaciones especiales. En los últimos 20 años, la aplicación de métodos numéricos para el análisis de los distintos procesos de formado ha conducido a productos de más alta calidad y a un incremento en la eficiencia de la industria del formado de metales.

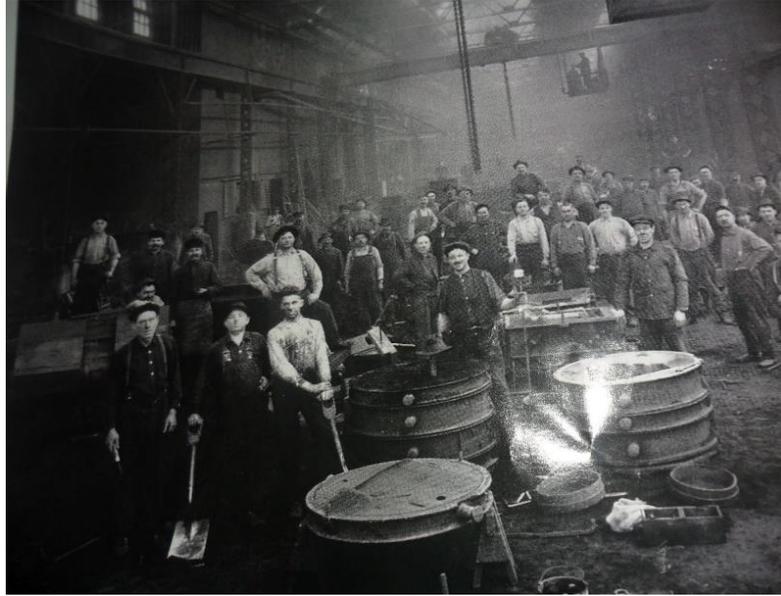


Figura I.7.- Taller de forjado en la *Revolución Industrial*

El proceso de forjado en los tiempos pretéritos consistía en calentar el material para luego modelarlo en la figura requerida por medio de martillado. En la época moderna los metales no siempre son calentados para ser forjados y los trabajos son realizados utilizando varios tipos de maquinaria pesada, para aplicar a las piezas de forja presión por impacto o bien compresión con rápida precisión. El arte de la forja se ha visto fortalecido por la ciencia, ya que actualmente se tienen conocimientos bien cimentados acerca de la metalurgia y un sinnúmero de procesos tecnológicos modernos de forjado, por lo que ha dejado de ser un mero proceso de formado en los metales con figuras diversas y caprichosas, Lo anterior permite que al forjar una pieza se tenga un control para refinar la estructura de los metales ya que esto les proporciona propiedades metalúrgicas muy valiosas. Por consecuencia el forjado produce un flujo de grano continuo en el metal, el cual puede ser orientado para que siga la forma de la pieza lo que viene a fructificar en una eficiencia máxima en la resistencia del material.

I.3.- Estado actual del proceso de forja

Técnicamente el forjado puede definirse como un proceso que se realiza en frío o en caliente, para dar forma a un metal aumentando su utilidad refinando sus propiedades mecánicas por medio de deformación plástica controlada, por medio de impacto o presión [I.23].



Figura I.8.- Proceso de forjado manual

En la actualidad los procesos de forjado son llevados a cabo por martillos que son operados por vapor, aire comprimido, gravedad, operación hidráulica, neumática y mecánica. El proceso es complementado por dados o matrices, los cuales pueden tener movimiento. La diferencia entre el forjado con martillo o con prensa, radica en la velocidad de operación de los dispositivos. La forja con martillo se considera como deformación de alta velocidad. Mientras que con la prensa la fuerza aplicada para la operación es lenta. Las piezas forjadas son utilizadas generalmente en vehículos de transporte en general y en diversas máquinas de uso industrial. Estas piezas al tener cualidades como resistencia y flexibilidad son utilizadas en variadas aplicaciones. Además de ser económicamente competitivas contra otros procesos de producción. Se puede decir entonces que el proceso de forja de un metal, parte de someter el material a una deformación controlada, ya sea en frío o en caliente para producir una forma deseada con el mejoramiento de sus propiedades mecánicas. Teniendo en cuenta que la forjabilidad del material es la capacidad de aceptar la deformación plástica sin que sufra roturas [I.1].



Figura I.9.- Martillos de forja hidráulicos

Generalmente, la materia prima que va a ser forjada es pre trabajada, para refinar la estructura dentífica de los lingotes, esto permite remover defectos que se generan en el proceso de vaciado. Lo que mejora significativamente la calidad estructural y mejora la calidad de los materiales de forja. La calidad en la materia prima depende de las compañías fundidoras dependiendo de los pasos que sigan para la fabricación del material a forjar, de entre las etapas se pueden mencionar tres muy importantes [I.24]:

- 1.- Vaciado de un lingote de varias toneladas, las dimensiones dependen de la compañía fundidora.
- 2.- El lingote se calienta y pasa a los molinos de laminado para reducir la sección en varias etapas, según el tamaño del tocho deseado.
- 3.- El tocho vuelve a laminarse en caliente en los molinos lo que deja los biletos en secciones redondas o cuadradas al tamaño deseado por el cliente.



Figura I.10.- Prensa y elevador hidráulico

Lo que se persigue en las etapas para obtener el material de forjado es la eliminación de poros. El refinado de la estructura del material y principalmente orientar cualquier segregación no metálica o aleación en la dirección de trabajo. Estas características son aseguradas mediante la inspección por análisis químico, de micro y macro estructura, pruebas mecánicas con el fin de garantizar que el material esté libre de defectos. La propiedad de alta resistencia en una pieza forjada se alcanza durante el proceso de forjado ya sea en la matriz o en los dados donde alcanza el refinamiento y la recristalización del grano, produciendo un material uniforme este a su vez responderá de manera óptima a los tratamientos térmicos [I.24].

I.3.1.- Clasificación de los procesos de formado [I.25]

En la clasificación de procesos de formado se pueden distinguir dos categorías, el proceso de formado masivo y el proceso de formado por medio de hojas o laminas. En ambos procesos la herramienta y la superficie a deformar están en contacto por lo que la fricción influye de manera importante en el proceso. En el formado masivo se observan las siguientes características:

- 1.- La pieza forjada experimenta una gran deformación plástica, por lo que el cambio de forma en la sección transversal es muy apreciable.
- 2.- La parte de la pieza que es deformada permanentemente es mayor que la parte deformada elásticamente, por lo que la recuperación elástica es despreciable.

En el caso del formado por hojas o láminas se observa:

- 1.- La pieza a forjar generalmente está hecha de una lámina.
- 2.- La deformación en estos casos cambia radicalmente la forma de la pieza, no así en su sección transversal. En algunos casos la magnitud de deformación plástica y elástica son comparables por lo que la recuperación elástica es despreciable.

Si la clasificación se hace por el flujo de material, se puede apreciar dos clases de formado:

- 1.- Formado de flujo no estable. En este caso el campo de velocidad de formado, cambia de manera continua en el tiempo, es el caso de la forja abierta.
- 2.- Formado de flujo estable. Aquí el campo de velocidad durante el formado es constante, esto sucede generalmente en los procesos de extrusión.

De manera más general, en los procesos donde intervienen deformaciones pueden ser clasificados también en base a la energía cinética con respecto a otro tipo de energía como es la energía por deformación plástica, o la energía interna por lo que se pueden mencionar tres clases de procesos.

- 1.- Proceso de formado cuasi-estático. - La mayor parte de procesos se encuentra en esta categoría, ya que la energía interna es de menos del 1% por lo que la energía cinética del sistema es despreciable.
- 2.- Proceso de formado puramente dinámico. - En este caso dada la alta velocidad de deformación en el sistema las ecuaciones constitutivas del material son despreciadas y consideradas como ligeras perturbaciones, siendo el caso de procesos de formado con alta energía en el impacto y en un periodo de tiempo muy corto.
- 3.- En este caso la parte intermedia de la energía cinética y la energía de deformación reversible o irreversible. - Son de órdenes de magnitud similares. Como es el caso de impactos de moderada velocidad como en un choque de automóvil.

La clasificación de proceso de formado por medio de la energía cinética es útil para determinar el proceso a analizar y tomar ventajas de la situación física del sistema mediante la formulación matemática.

I.3.2.- Variables a tomar en consideración en los procesos de formado [I.26]

El éxito en un proceso de formado se encuentra en el control del flujo del metal. El control de la dirección de flujo del material. Así como, temperatura y magnitud de deformación son esenciales y de gran influencia en las propiedades mecánicas del material, ya que de estas depende las deformaciones locales, formación de defectos como son las grietas y a su vez el flujo del material es afectado por variables de proceso que son:

- 1.- Variables del material. - En este caso la composición química el historial de tratamiento térmico así como del esfuerzo de fluencia efectivo. Y la anisotropía que es la formalidad en distintas direcciones son de las variables más importantes a tomar en cuenta en el análisis de un proceso de formado.
- 2.- Equipos y herramienta. - La selección de maquina dependerá de las características requeridas y tipo de material además de variables como son tiempo, exactitud y tipo de carga además del tipo de geometría, acabado, rigidez y las propiedades mecánicas en condiciones de uso.
- 3.- Fricción. - Los mecanismos de fricción entre pieza y herramienta son muy complejos, cuantitativamente se expresa a través de un coeficiente de fricción o de un factor de fricción al corte, para los que existen diversos métodos de evaluar la fricción entre ellos la prueba de compresión en anillos para formado masivo y de estirado en deformación plana para los procesos de formado por laminas.
- 4.- Mecánica de deformación. - Del flujo del material dependen características como la calidad, y propiedades del producto a su vez está influenciado por las características de la herramienta, la velocidad de deformación, condiciones de fricción y características del material. Por lo tanto, el flujo del metal la velocidad de deformación y los esfuerzos generados pueden ser analizados modelando el proceso.

I.3.3.- Ventajas obtenidas en la fabricación de piezas por el proceso de forja [I.25 y I.26]

Como ventaja de este proceso mecánico se tienen los siguientes ejemplos.

I.3.3.1.- Integridad estructural en las piezas forjadas

La integridad estructural para un diseñador es de vital importancia, ya que los factores de seguridad en los diseños son altos y se evitan contingencias por defectos internos en las piezas. Además de las ventajas obtenidas por la deformación plástica del material debido a que la calidad que alcanza el grano es difícil de superar por ningún otro proceso de maquinado. Para un productor es de especial consideración, ya que reduce inspecciones. Además de que las piezas forjadas responden uniformemente a los tratamientos térmicos y tienen una maquinabilidad consistente.

I.3.3.2.- Resistencia a la fatiga e impacto

Los procesos de forja desarrollan la máxima resistencia al impacto y a la fatiga en un material. Esto se logra con la orientación apropiada del flujo del grano. Por lo que las piezas cumplen los requisitos de tenacidad y fuerza. Además de resistir los esfuerzos nominales y de ser dúctiles para resistir cargas de choque.

I.3.3.3.- Alta uniformidad en piezas forjadas

La consistencia en la composición de un material forjado se caracteriza por tener una estructura uniforme de una pieza a otra y de un lote a otro. También en la estructura del material, lo que da a las piezas forjadas una importancia preponderante. Generalmente en todas las piezas que trabajaran a cargas excesivas y altos esfuerzos internos es obligatorio que se fabriquen con un riguroso control de calidad lo que no se daría sobre materiales fundidos.

I.3.3.4.- Uniformidad dimensional en las piezas forjadas

La continuidad de forma del inicio al fin de una pieza forjada se debe principalmente a que las cavidades en los dados o las impresiones en las prensas de forjado están contenidas en cavidades permanentes. Así como, de ser fabricados en bloques de acero especial con la mayor precisión. Por lo que grandes cantidades de piezas forjadas son fabricadas sucesivamente con la misma impresión o dado y si llega a sufrirse una deformación fuera de tolerancia es maquinada nuevamente.

I.3.3.5.- Amplia variación de materiales y propiedades

En cuanto al tipo de materiales que se pueden procesar y dado que casi todos los metales pueden ser forjados, se dispone de una gran variedad de propiedades físicas y mecánicas para los productos forjados y esta variedad tiene rangos muy variados que van de la resistencia a la tensión y punto de cedencia, hasta elongación, reducción de área, dureza y propiedades de impacto y fatiga y depende del material a forjar.

I.3.3.6.- Variación de tamaños y formas

Ya que las piezas forjadas se producen en una variación muy amplia de tamaños y forma se tiene amplia libertad para el desarrollo de componentes mecánicos y de tamaños de forjas para diversas aplicaciones en maquinaria y transporte.

I.3.3.7.- Son compatibles con diversos procesos de manufactura

Las piezas obtenidas mediante forja son iguales o superiores a las obtenidas mediante otros procesos de manufactura, por lo que tienen una adaptabilidad en procesos como el tratamiento térmico, soldadura, maquinado y corte además en el acondicionamiento de superficies y corte de segueta.

I.4.- Planteamiento del problema

Para la fabricación de cañones de armamento, se utilizan máquinas de forjado radiales o en su caso rotativas. Las cuales usan martillos de forjado compuestos de un juego de cuatro martillos, dos de tipo “A” y dos de tipo “B”, la diferencia entre estos martillos radica en el perfil angulado de la herramienta de forjado ya que cada tipo de martillo tiene su propio perfil con ángulos que varían según su función en la caja de forjado de la máquina.

Estos martillos van colocados en la caja de forjado de manera intermitente entre uno de tipo A por uno tipo B y su función es la de forjar el tubo también conocido como barril en blanco para conformar el cañón del arma. El problema que se presenta en los martillos de forjado principalmente es el desgaste y la erosión del perfil angulado, así como la deformación plástica que ocurre después de forjar una cierta cantidad de cañones, la función de los perfiles angulados de la herramienta de forjado es la de permitir el flujo del material en el proceso de conformado del cañón por lo que para el caso de este trabajo es la zona de mayor importancia a ser analizada.

Se realizará un estudio de análisis numérico a los dos tipos de martillo para determinar el estado de esfuerzos al que son sometidos. Para después tratar de modificar el perfil de la herramienta de manera que se suavice el perfil, de esta manera se pretende obtener una redistribución de esfuerzos en el perfil angulado de la herramienta de manera que se optimicen ambos martillos. Con lo que se pretende aumentar el número de cañones fabricados y que la herramienta tenga mayor tiempo de vida y reducción de los problemas de desgaste y deformación plástica.

I.5.- Sumario

En este capítulo se abordan los antecedentes históricos del proceso de forjado, empezando desde que el hombre comenzó a fabricar objetos de piedra a base de golpes para darles forma hasta la edad de los metales, se explica de manera detallada la edad de cobre, bronce, así como la edad de hierro sus orígenes y su llegada al continente americano. De manera particular se aborda el uso de los metales en Mesoamérica hasta alcanzar la revolución industrial, para posteriormente explicar el estado actual de los procesos de forjado, así como de la clasificación de los procesos de formado en la época actual.

En el capítulo II se explicará de manera detallada el proceso de forjado, los diferentes tipos de proceso y las maquinas involucradas en estos.

I.6.- Referencias

- 1.- Vila-Pastor, C., Romero-Subirón, F., Bruscas-Bellido, G. M. y Serrano-Mira, J., *Tecnología Mecánica; Metrología y Procesos de Conformado de Metales Sin Arranque de Viruta*, Ed. Colección Materials de la UJI, No. 233, 2005.
- 2.- Walton, J. H., Matthews, V. H. y Chavalas, M. W., *Comentario del Contexto Cultural de la Biblia, Antiguo Testamento; El trasfondo Cultural de Cada Pasaje del Antiguo Testamento*, Ed. Mundo Hispano, pp 328, 2000.
- 3.- López-Melero, R., *Breve Historia del Mundo Antiguo*, 2da. edición, Ed. Universitaria Ramón Areces, 2010.
- 4.- Hernández, F. X. y Rubio, X., *Breve Historia de la Guerra Antigua y Medieval*, Ed. Nowtilus, pp 165, 2010.
- 5.- Manser, M., *Manual Bíblico Nelson*, Ed. Thomas Nelson, pp 33, 2012.
- 6.- Bianchi-Bandinelli, R. y Torelli, M., *El Arte de la Antigüedad Clásica Etruria-Roma*, Ed. Akal, 2000.
- 7.- Salas-Zamarripa, E., *Simulación del Proceso de Forja de Codos Sin Costura y Evaluación de la Herramienta de Formado por el Método de Elementos Finitos*, M. en C. Tesis, Universidad Autónoma de Nueva León, pp 1-16, 2003.
- 8.- Martínez-Mechén, A., *La Edad de Hierro*, Ed. Epígono, 1998.
- 9.- Pater, W., *Leonardo da Vinci*, Ed. Verdehalago, pp 33-35, 2006.
- 10.- Fortes-Marco, I., *El Complejo Cultural de la Edad de los Metales en Europa; Análisis a Través de los Testimonios de Objetos del Bronce Final hasta la Segunda Edad del Hierro*, Ed. Fórum de Recerca, 2012.
- 11.- Leskinen, L., *4000 Years of Copper Country History; Drawings and Articles*, Ed. Greenlee Printing Company, 1852.
- 12.- de Olaguer Felú y Alonso, F., Consideraciones sobre la influencia de la metalistería islámica en nuestra industria férrica del renacimiento, *Anales de la Historia*, Vol. 2, pp 79–92, 1990.
- 13.- Avilanova, L. L. y Terejova, N. N., Lingotes normalizados de metal en el próximo oriente desde el eneolítico a la Edad del Bronce, *Aula Orientalis*, Vol. 25, pp 183–99, 2007.
- 14.- Anguiano-Ugo Pipitone, E., *China, de los Xia a la República Popular*, Ed. Cide, 2014.
- 15.- Waldbaum, J. C., From bronze to Iron; The transition from the bronze age to the Iron age in the eastern Mediterranean, *The Journal of Hellenic Studies*, Vol. 100, pp 262-264, 1980.
- 16.- Kulke, H. y Rothermund D., *A History of India*, 6ta. edición, Ed. Routledge, pp 25-27, 2016.

-
- 17.- Loewe, M. y Shaughnessy, E. L., *The Cambridge History of Ancient China; From the Origins of Civilization to 221 B. C.*, Ed. Cambridge University Press, 1999.
 - 18.- Lida, K., *Origin and Development of Iron and Steel Technology in Japan*, Vol. 8, Ed. United Nations University, 1980.
 - 19.- Repollés, J., *Civilizaciones y Mitos de la Antigüedad*, Ed. Da Gassó Hermanos, pp 295, 1969.
 - 20.- Van Tuerenhout, D. R., *The Aztecs; New Perspectives*, Ed. ABC Clío, 2005.
 - 21.- Rojas-Rabiela, T. y Murra, J. V., *Historia General de América Latina I; Las Sociedades Originarias*, Ed. Trotta, 1999.
 - 22.- de la Cruz-Zamora Ayala, V., El conocimiento de los metales y su beneficio por los indígenas, *Acta Universitaria*, Vol. 13, No. 1, pp 36-48, 2003.
 - 23.-
 - 24.- Kalpakjian, S. y Schmid, S. R., *Manufactura; Ingeniería y Tecnología*, 4ta. edición, Ed. Pearson Educación, pp 340-368, 2002.
 - 25.- Groover, M. P., *Fundamentos de Manufactura Moderna; Materiales Procesos y Sistemas*, Ed. Pearson Prentice Hall, pp 435-446, 2009.
 - 26.- Pazos-Peinado, N., *Tecnología de los Metales y Procesos de Manufactura*, Ed. Universidad Católica Andrés Bello, pp 221-246, 2006.

Capítulo II

Marco Teórico

II.1.- Introducción [II.1]

El desarrollo continuo de la tecnología de forjado requiere una comprensión sólida y fundamental de las capacidades y características de los equipos. El equipo, es decir, prensas y martillos utilizados en la forja, influye en el proceso de forjado, ya que afecta la tasa de deformación y las condiciones de temperatura, y determina la velocidad de producción. Los requisitos de un proceso de forjado dado deben ser compatibles con las características de carga, energía, tiempo y precisión de una máquina de forjado determinada. Básicamente existen tres tipos de prensas: prensas hidráulicas, mecánicas y de tornillo. Estas máquinas se utilizan para forjar en frío y en caliente, recortar en frío y acuñar. Los desarrollos en la industria de la forja están muy influenciados por los requisitos mundiales para la fabricación de componentes cada vez más grandes y más complejos para materiales más difíciles de forjar. Las necesidades actuales y futuras de la industria aeroespacial, el aumento de la demanda de sistemas de energía estacionarios, motores a reacción y componentes de aeronaves, y la competencia tecnológica extranjera en constante aumento requieren una actualización continua de la tecnología actual. Por lo tanto, el uso más eficiente de los equipos de forjado existentes y la instalación de maquinaria más sofisticada se han convertido en necesidades inevitables. El desarrollo en todas las áreas de forjado tiene los objetivos de (a) aumentar la tasa de producción, (b) mejorar las tolerancias de forjado, (c) reducir costos minimizando las pérdidas de chatarra, reduciendo los pasos de preformado y aumentando la vida útil de la herramienta, y (d) ampliar la capacidad para forjar piezas más grandes y complejas. La compra de nuevos equipos de forjado requiere una comprensión profunda del efecto de las características del equipo en las operaciones de forjado, los requisitos de carga y energía de la operación de forjado específica, y las capacidades y características de la máquina de forjado especial que se utilizará para esa operación. Un mayor conocimiento de los equipos de forjado también contribuiría específicamente a:

- Uso más eficiente y económico de los equipos existentes
- Definición más exacta de la capacidad máxima existente de la planta
- Mejor comunicación entre el usuario del equipo y el constructor del equipo
- Desarrollo de un proceso más perfeccionado como forjado de precisión de engranajes y de turbina y palas del compresor

II.2.- El proceso de forjado [II.2]

El forjado es un proceso en el que la pieza de trabajo es moldeada por fuerzas de compresión que son aplicadas mediante matrices y herramientas (figura II.1). Como se vio en el capítulo I es una de las operaciones más antiguas por medio de la cual se trabajaron los metales. Se remonta al año 4000 a.c. y fue utilizada para fabricar monedas, joyería, armas y muy diversos implementos. Los metales fueron trabajados martillando los mismos con herramientas de piedra para obtener diversas formas, en la actualidad las partes forjadas son muy complejas como rotores para turbina, engranes, tornillos etc. Y para su fabricación se requieren de herramientas más complejas.

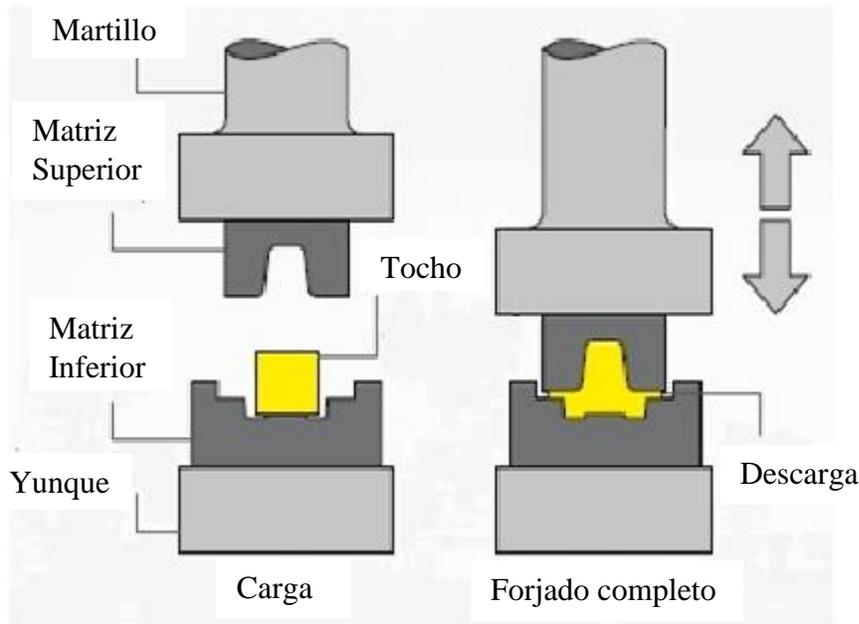


Figura II.1.- Operación de forjado con matrices

A diferencia de operaciones como el laminado que produce partes continuas como son laminas, placas, y secciones transversales para estructuras, el forjado produce partes discretas y en este proceso es posible controlar el flujo de metal en una matriz, así como la estructura del grano del material por lo que las piezas trabajadas obtienen características como son tenacidad, resistencia además de ser confiables para operaciones críticas sujetas a grandes esfuerzos.

En general el forjado simple puede llevarse a cabo con un martillo y un yunque de manera tradicional, aunque actualmente las forjas de piezas complejas requieren de matrices y martillos operados mecánicamente, por otro lado, el forjado puede llevarse a cabo en frío (temperatura ambiente) o en caliente (temperatura media o elevada). Mientras que el forjado en frío requiere de fuerzas muy grandes para poder deformar la pieza de trabajo y además poseer la suficiente ductilidad para que no se agriete, las piezas forjadas en frío tienen buena precisión dimensional y

buen acabado superficial a diferencia de las piezas forjadas en caliente que requieren fuerzas menores pero la calidad en la precisión dimensional y el acabado superficial no es tan buena como en el forjado en frío.



Figura II.2.- Piezas fabricadas por forja en frío

De manera general las partes forjadas son sometidas a operaciones adicionales de acabado como el tratamiento térmico, a fin de modificar sus propiedades estructurales. O en su caso el maquinado para obtener dimensiones exactas y dar la forma final a la pieza para minimizar estas operaciones de acabado se usa el forjado de precisión que da a las piezas su forma neta o casi neta en los procesos de formado.

II.3.- Procesos de forjado. [II.2]

II.3.1.-Forjado de matriz abierta

Una de las operaciones de forjado más simple es el forjado de matriz abierta y generalmente son forjadas piezas de entre 15 kg y 500 Kg, pero también existen registros de piezas forjadas de hasta 300 toneladas. Este proceso puede ser representado por una pieza de trabajo sólida la cual es colocada entre dos matrices planas las cuales reducirán la pieza por medio de compresión por lo que este proceso se conoce también como de recalado o forjado con matriz plana. [II.2] en las

matrices pueden existir cavidades e incorporar rasgos para producción de piezas simples. entre sus ventajas se encuentra que son relativamente simples, poco costosas y cuentan con una gama muy amplia de tamaños y Tienen buenas características de resistencia (figura II.3).

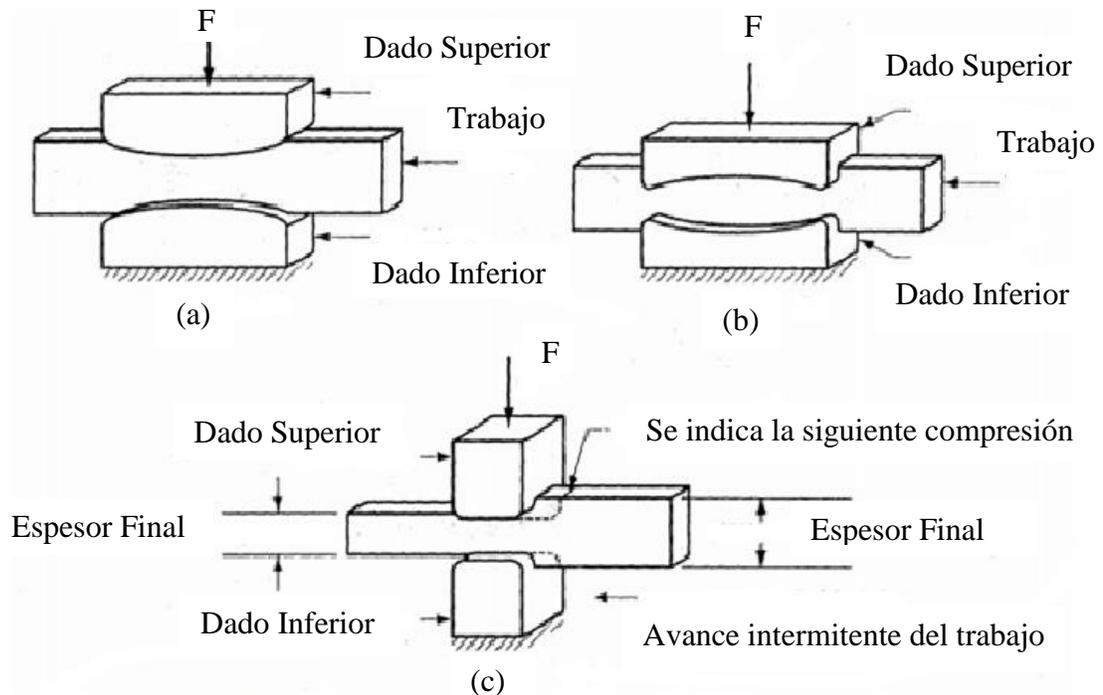


Figura II.3.- operaciones con matriz o dado abierto (a), dados convexas (b) y por secciones (c)

Las desventajas que existen en esta operación de forjado son principalmente las limitaciones a formas simples y lo difícil de mantener tolerancias muy cerradas, así como velocidad de producción baja es además necesario maquinarse para dar la forma final a las piezas.

Uno de los principales problemas en la forja de matriz abierta es el abarrilamiento de la pieza de trabajo que se da por las fuerzas de fricción en la interfaz matriz-pieza de trabajo idealmente la pieza se deforma de manera uniforme (figura II.4. (1b)), en la realidad las fuerzas de fricción se oponen al flujo exterior de los materiales en las interfaces problema que se puede minimizar usando un lubricante adecuado (figura II.4. (2b)), el abarrilamiento también se presenta en piezas calientes forjadas con matrices frías generalmente en operaciones de recalado ya que el material cerca de las superficies de la matriz se enfría con rapidez mientras que el resto permanece caliente por lo que el material en las partes superior e inferior de la pieza de trabajo presenta más resistencia a la deformación que la parte del centro por lo que esta parte central se dilata más hacia los lados que los extremos de la pieza, ya que el abarrilamiento es producido por los efectos térmicos este puede reducirse usando matrices calientes u otros aditamentos como las barreras térmicas [II.2]. entre las

operaciones de forjado de matriz abierta, está la forja de desbaste en la que le espesor de una barra se reduce mediante pasos sucesivos de forjado en intervalos específicos (figura II.3. (c)), ya que el área de trabajo entre la matriz y la pieza de trabajo es pequeña se pueden reducir espesores de secciones largas de barras sin que se requieran grandes fuerzas de trabajo o de maquinaria pesada similar a lo que ocurre con las operaciones realizadas por los herreros en operaciones con martillo, yunque y piezas calientes. En general la forja de desbaste para piezas de trabajo más grande se realiza mediante equipos mecanizados y control mediante computadora para producir la parte deseada.

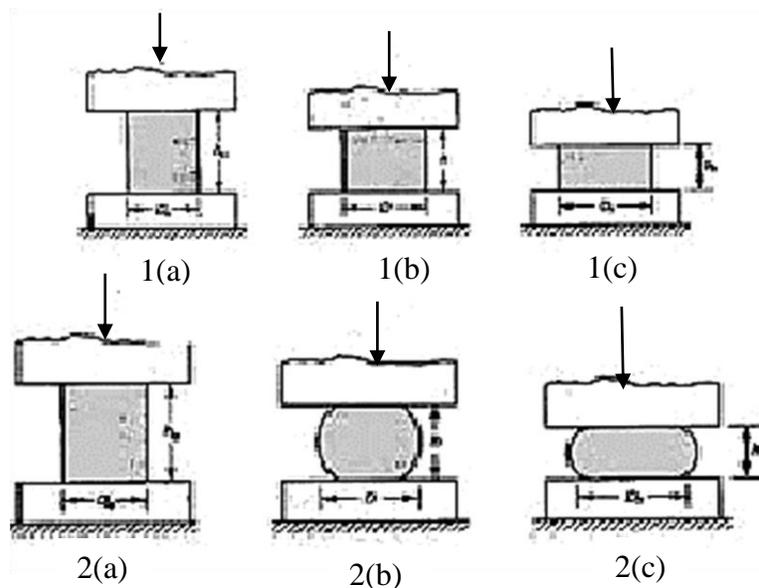


Figura II.4.-Deformación uniforme del tocho sin fricción, deformación con fricción

II.3.1.1- Calculo de la fuerza de forjado con matriz abierta

En una operación de forjado por matriz abierta, para una pieza sólida y cilíndrica puede calcularse la fuerza mediante la ecuación:

$$F = Y_f \pi r^2 \left(1 + \frac{2\mu r}{3\eta} \right) \quad (\text{II.1})$$

Donde Y_f es el esfuerzo de flujo del material, μ es el coeficiente de fricción entre la pieza de trabajo y la matriz, r y η son radio y altura de la pieza de trabajo respectivamente [II.2].

II.3.2.- Forjado con matriz de impresión y matriz de Cerrada

En el proceso de forjado por matriz de impresión la pieza de trabajo se forja entre dos matrices con una forma determinada, por lo que la pieza toma la forma de la cavidad de la matriz, generalmente este proceso se lleva a cabo a altas temperaturas lo que reduce las fuerzas necesarias para el conformado y mejora la ductilidad del material. durante la deformación el material fluye hacia el exterior de las matrices lo que forma una rebaba que representa una severa restricción al flujo del material en la matriz debido a la elevada temperatura y alta resistencia a la fricción (figura II.5), por lo tanto, las condiciones resultantes de temperatura y resistencia a la fricción en la rebaba son de importancia, debido al principio de que en la deformación plástica de los materiales estos fluyen hacia donde haya menor resistencia ya que se requiere menos energía por lo tanto el material fluye al interior de la cavidad de la matriz llenándola[II.2].

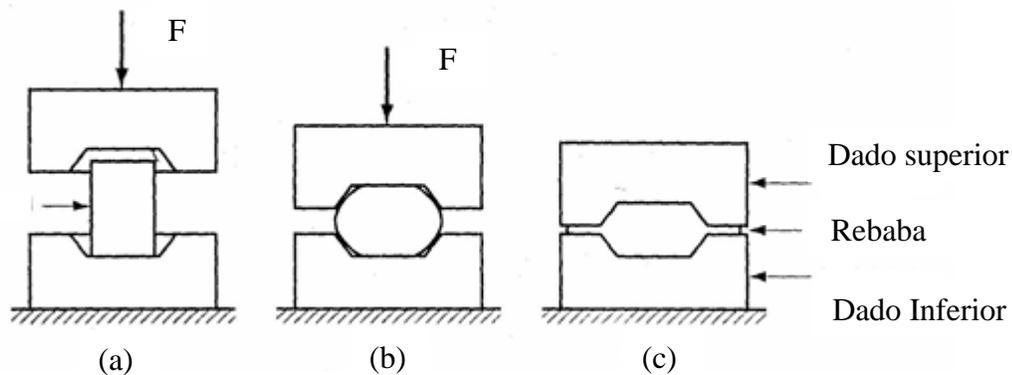


Figura II.5.- Etapas de formado por matriz de impresión cerrada

Este tipo de matrices se pueden fabricar de varias piezas segmentadas y no solo de una pieza, y en el caso de formas complejas pueden incluir insertos de matrices, estos insertos deben ser reemplazados con facilidad ya sea por desgaste o falla además de permitir la extracción de las piezas forjadas con facilidad.

Las piezas en bruto también conocidas como tochos son preparadas por diversos medios antes de ser forjadas como son:

- 1.- Corte de barra de material ya sea estirado o extruido.
- 2.- Una operación de preforma, como por ejemplo la metalurgia de polvos.
- 3.- Por Fundición.
- 4.- Piezas previamente preformadas por alguna operación de forjado.

La pieza de trabajo o tocho se coloca en la matriz inferior y conforme desciende de manera gradual la pieza empieza a cambiar de forma (Figura II.6).

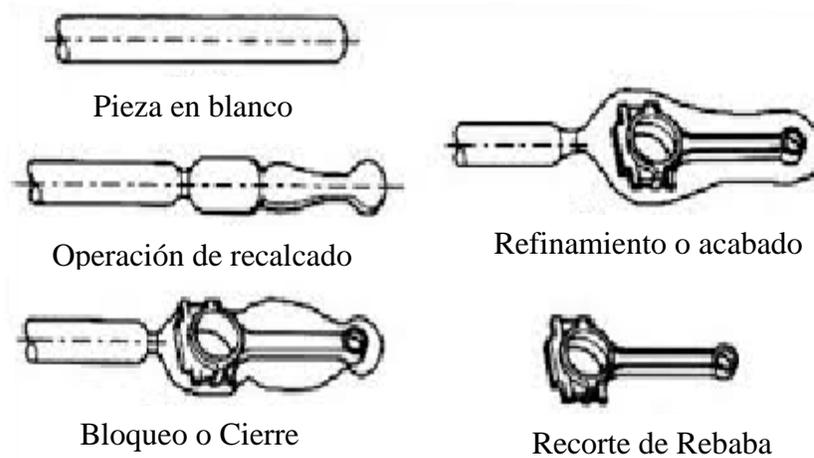


Figura II.6.- Etapas de forjado de una biela por matriz de impresión

Como se observa en la figura II.6 la fabricación de una biela se realiza por medio del proceso de aproximación o bloqueo, usando matrices de aproximación para finalmente en la operación de forjado con las matrices de impresión darle la forma final, eliminando posteriormente la rebaba mediante una operación de recorte de rebaba [II.3].

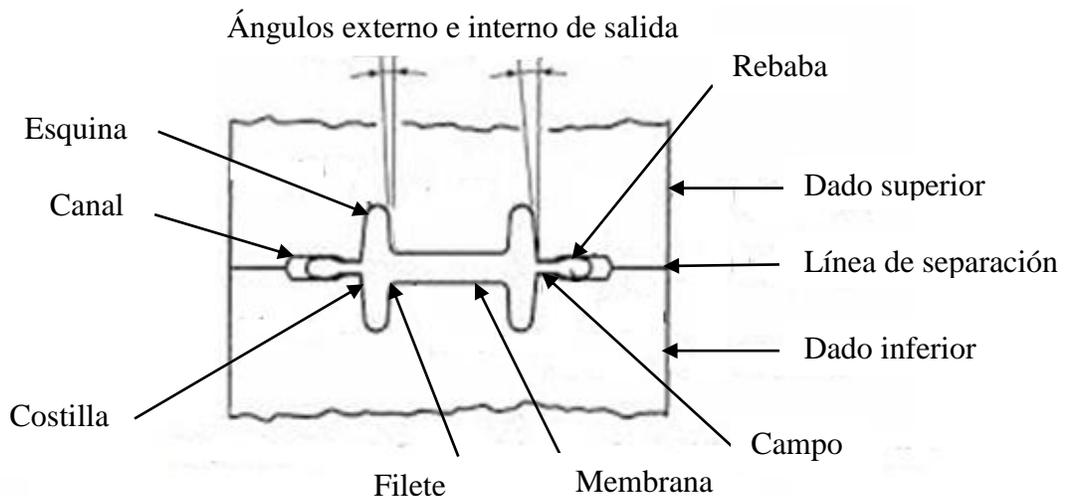


Figura II.7.- terminología convencional para dado de forjado por matriz de impresión

III.3.2.1.- Calculo de la fuerza de forjado con matriz de impresión

En una operación de forjado con matriz de impresión la fuerza que se requiere puede ser calculada con la fórmula:

$$F = kY_f A \quad (\text{II.2})$$

Donde k es un factor multiplicador que se obtiene de la tabla II.1, Y_f es el esfuerzo de flujo del material a temperatura de forjado y A es el área proyectada de la pieza forjada incluyendo la rebaba [II.2].

Nm FORMAS	VALORES DE k PARA ECUACION II.2
Formas simples, sin rebaba	3-5
Formas simples, con rebaba	5-8
Formas complejas, con rebaba	8-12

Tabla II.1.- Intervalos de valores del factor k para cálculo de fuerza de forjado con matriz de impresión

II.4.- Operaciones de forjado [II.4 y II.5]

De manera general, para el mejoramiento de las características y forma de las piezas forjadas se llevan a cabo diversas operaciones que tienen como finalidad mejorar la presentación final del producto forjado de las cuales se pueden mencionar las siguientes:

II.4.1.1.- Forjado orbital

Este tipo de operación de forjado es utilizado para forjar piezas como engranes cónicos, partes con forma de disco y materiales en bruto para engranes, es una operación en donde la matriz superior se mueve en una trayectoria orbital dando forma a la pieza que se este forjando de manera progresiva. Esta operación tiene similitud con la acción de la mano moliendo hierbas en un mortero además de ser una operación silenciosa la fuerza de forjado es menor ya que el contacto entre la matriz y la pieza forjada se concentra en una pequeña área durante un instante determinado.

II.4.1.2.- Forjado progresivo

En esta operación la pieza en bruto es forjada en varios pasos pequeños, la matriz penetra la pieza a diferentes profundidades a lo largo de la superficie. al ser el área de contacto de la matriz relativamente pequeña. Se requieren fuerzas mucho menores que con el forjado convencional y las herramientas son simples y menos costosas.

II.4.1.3.- Forjado isotérmico

En este proceso las matrices son calentadas a la misma temperatura que la pieza a ser forjada, al permanecer caliente se mantiene la baja resistencia y la ductilidad de la pieza de trabajo mejorando el flujo de material en las cavidades de la matriz. y ya que las cargas de forjado son bajas, pueden forjarse isotérmicamente piezas complejas con precisiones dimensionales de calidad y formas casi netas en un solo golpe de la prensa. Entre las desventajas de la forja isotérmica se puede mencionar que es un proceso muy costoso y de velocidad de producción baja por lo que este proceso solo se justifica en costo para casos de forjas especiales en materiales tales como titanio, superaleaciones etc. Y donde además la producción sea muy grande.

II.4.1.4.- Forjado rotatorio

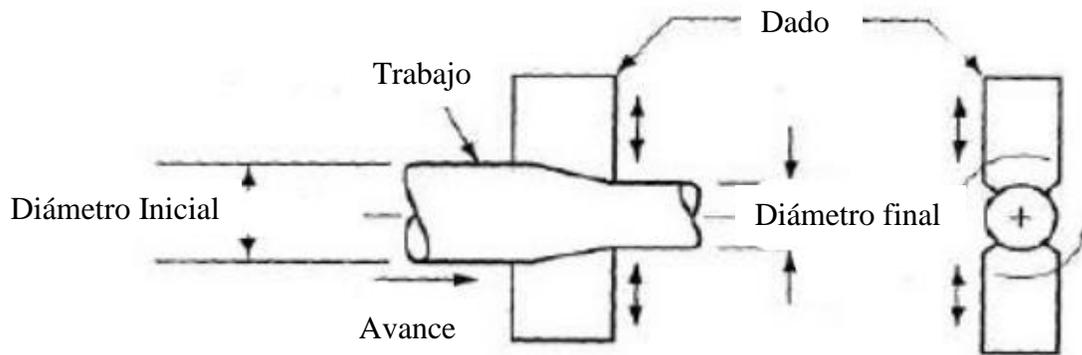


Figura II.8.- Esquema forja rotativa

Este proceso es también conocido como forja radial, en donde una barra o tubo es sometido a fuerzas de impacto radial con una serie de matrices con movimiento reciproco en una caja dentro de la maquina (Fig. II.8). el movimiento de las matrices se obtiene por medio de rodillos en una jaula. La pieza de trabajo se mantiene estacionaria y las matrices giran además de moverse radialmente por la acción de los rodillos golpeando la pieza de trabajo a velocidades muy altas de aproximadamente 20 golpes por segundo este tipo de proceso puede ser utilizado para ensamblar cables y alambres, procesos de punteado y dimensionado además de que, dependiendo de la complejidad de la parte, el proceso se adecua a velocidades medias y altas de hasta 50 partes por minuto.

II.5.- Desventajas en el proceso de forjado [II.5 y II.6]

Entre las fallas que se pueden presentar durante el forjado se pueden mencionar; el agrietamiento de la superficie de la pieza a ser forjada, defectos producidos por el patrón del flujo del material en la matriz el cual se da debido a la falta de material para llenar la cavidad de la matriz, alma torcida durante el forjado lo que produce pliegues en la pieza, grietas internas. si el alma es muy gruesa genera que el exceso de material fluya sobre la pieza ya conformada desarrollando grietas internas, (figura II.9(b)), en este caso también influyen los radios de la cavidad de la matriz de forjado.

Por otro lado, los defectos internos en las piezas forjadas pueden desarrollarse debido a; que la deformación no sea uniforme en las cavidades de las matrices, diferencias de temperatura a lo largo de la pieza de trabajo durante la forja, cambios en la microestructura debidos a la transformación de las fases. Los defectos en el proceso de forjado ocasionan fallas como la fatiga, corrosión y desgaste durante la vida útil de los componentes forjados

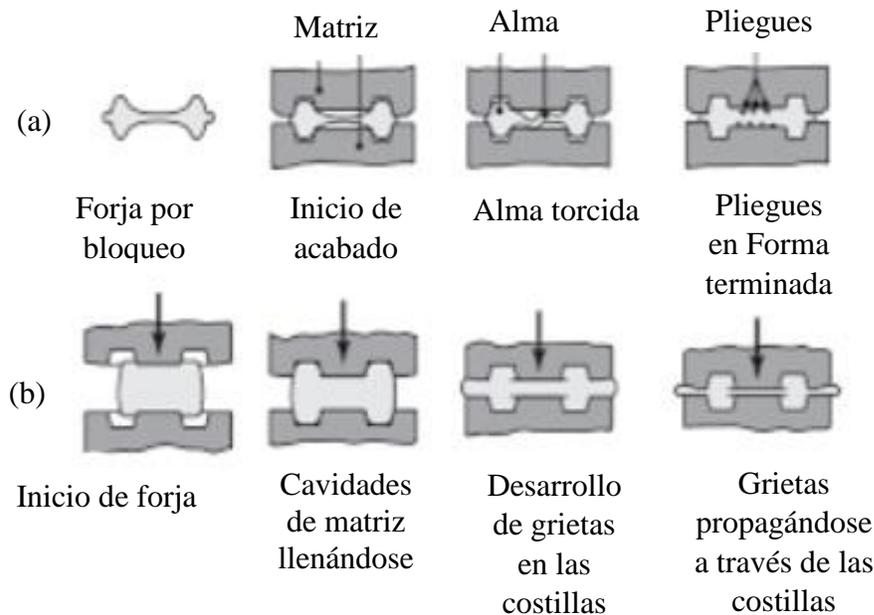


Figura II.9.- Ejemplos de defectos en componentes forjados

II.6.- Maquinas usadas en los procesos de forjado [II.6]

Hay una gran variedad de máquinas para los procesos de forjado tanto en frío como en caliente, además con capacidades diferentes en lo que respecta a capacidad (fuerza en tonelaje), velocidad, así como en relación velocidad-carrera. Entre las que se pueden mencionar las siguientes:

II.6.1.- Prensa hidráulica

Esta máquina consiste generalmente en un bastidor marco de forja, con dos o hasta cuatro columnas además de pistones, cilindros, arietes y bombas hidráulicas. Mismas que son accionadas por motores eléctricos y puede variarse la velocidad del ariete durante el recorrido. La capacidad de estas máquinas es del orden de 14000 Ton cortas para el caso de forja en matriz abierta, y de 72000 Ton cortas para el forjado en matriz cerrada. Una de las desventajas de estas máquinas radica en que el proceso de forjado es más lento que en otro tipo de máquinas lo que en el caso del forjado en caliente puede hacer que se enfríe la pieza de trabajo, lo que puede evitarse calentando las matrices además de que son máquinas de carga limitada o restringida esta limitante para la maquina en caso de exceder la carga.



Figura II.10.- Prensa de forja hidráulica, *Cía. Fagor Arrasate 2013*

II.6.1.1.- Prensa Mecánica

Este tipo de maquina consiste en un mecanismo tipo manivela o excéntrica, la energía para la fuerza de forjado se genera en un volantín grande que es accionado por un motor eléctrico. El mecanismo de embrague acopla el volantín a un eje excéntrico y una biela se encarga de convertir el movimiento giratorio en movimiento lineal alternante. La velocidad varía desde un máximo en la

parte superior del recorrido, hasta cero en la parte inferior de la máquina lo que hace que esta máquina sea de carrera limitada.

Las capacidades en estas máquinas son del orden de 300 a 12000 Ton cortas y generalmente son usadas para forjados de precisión.



Figura II.11.- Prensas de forja mecánicas

II.6.1.2.- Prensas de Tornillo

El mecanismo en esta máquina, para que este tipo de prensa obtenga su energía. Consiste en un volantín por lo que es de energía limitada, la fuerza de forjado se transmite a través de un tornillo vertical grande, el ariete para cuando es disipada la energía del volantín la operación de forjado continua hasta que se hayan cerrado las matrices completamente. La capacidad es del orden de 160 a 31500 Ton cortas esta máquina es adecuada para forja de alta precisión y producciones pequeñas.



Figura II.12.- Prensa de forjado vertical con tornillo de fricción, *Cía. Ficep*

II.6.1.3.- Martillos de forjado

Los martillos convierten la energía potencial del ariete en energía cinética, estos dispositivos de forjado operan a altas velocidades por lo que el tiempo reducido del conformado lo hace ideal para forjas en caliente, ya que el enfriamiento en la pieza de trabajo es minimizado lo que permite forjar piezas complejas. El forjado se realiza mediante varios impactos sucesivos en la misma matriz.



Figura II.13.- Martillos de contragolpe hidráulicos para forjado *Jiangsu Baixie Precision Forging Machinery Co., Ltd.*

II.6.1.4.- Martinetes de forjado

Para el caso de los martinetes el mecanismo es similar al de los martillos, solo que en este caso la energía potencial que se convierte en cinética se obtiene acelerando el ariete hacia abajo con vapor, aire o hidráulica por lo general hasta los 750kPa. El peso del ariete es del orden de los 225 a 22500 kg y capacidad de energía es de hasta 1150 kJ. Este proceso es también conocido también como forjado de caída libre ya que la energía se obtiene del propio ariete en caída libre, por lo que la energía disponible depende del peso del ariete por la altura de caída de este.



Figura II.14.- Martinete de estampación

II.7.- Teorías de falla

De manera general, cuando se diseñan componentes mecánicos se toma en consideración que los esfuerzos internos que se generan debido a las cargas a las que se someten dichos componentes, no rebasen la resistencia del material. de tal manera que, si se diseña con materiales dúctiles es motivo de análisis la resistencia a la fluencia ya que en este caso la deformación permanente del material se considera como una falla. en materiales dúctiles la resistencia a la fluencia es igual en tensión que en compresión [II.7] las fallas en los componentes o elementos mecánicos se refieren a pérdida de funcionalidad, cuando estos han dejado de ser útiles, la falla puede ser por rotura, distorsión permanente o degradación [II.7].

Las fallas antes mencionadas se producen si los esfuerzos inducidos en los elementos mecánicos son mayores a la resistencia del material con el cual fue fabricado. en este caso se produce la falla,

las teorías de falla tienen su base en la comparación del esfuerzo actuante contra el aplicado en pruebas uniaxiales de tensión o compresión.

II.7.1.- Teoría del esfuerzo cortante máximo

Esta teoría es empleada para el caso de estudio de materiales dúctiles, y predecir la fluencia del material. la falla se presenta cuando en un estado de esfuerzos complejo, el esfuerzo cortante máximo es igual al esfuerzo cortante máximo en el punto de cedencia de un espécimen a prueba de tensión [II.7].

Si un material dúctil bajo un estado de esfuerzos cortante en cualquier plano llega a $\sigma_y/2$, entonces la falla bajo la teoría de esfuerzo cortante máximo se representa con la ecuación:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_y}{2}$$

De donde σ_y representa el esfuerzo de fluencia del material del espécimen y τ_{\max} representa el esfuerzo cortante máximo.

II.7.1.1.- Teoría de la energía de distorsión máxima.

Esta teoría es conocida como de energía cortante o de Von Mises-Henki. supone que la fluencia del material se presenta cuando la energía asociada al cambio de forma en cuerpo multiaxial es igual a la energía de distorsión en un espécimen a prueba de tensión cuando la fluencia se presenta en el esfuerzo de fluencia uniaxial σ_y . En otras palabras, el principio de la fluencia en el espécimen se produce cuando la energía de distorsión alcanza valores críticos, este criterio de falla es empleado para el análisis en materiales dúctiles. la densidad de energía de distorsión debida a la acción de la carga multiaxial se determina con la ecuación

$$\bar{U} = \frac{1}{2} [\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3]$$

Parte de la energía de deformación está asociada con el cambio de volumen de la pieza y con el cambio de forma o distorsión. según el criterio de falla por energía de máxima distorsión, los esfuerzos causantes de la fluencia son los que causan la distorsión, y estos son los esfuerzos cortantes. por lo tanto, la fluencia del 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 espécimen cede en una prueba de tensión simple. y puede enunciarse en función de los tres esfuerzos principales según la siguiente ecuación [II.7].

$$\sigma_y^2 = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]$$

II.8.- Rectificación de carburo de tungsteno [II.8]

Los carburos cementados son diseñados para poseer características como. gran dureza, tenacidad y resistencia al desgaste por abrasión lo que mejora el rendimiento de herramientas de corte o en su caso de formación de metales. estas mismas características los hacen muy difíciles de rectificar. Como se estudió en capítulo III, los carburos son fabricados con mezclas de polvos de tamaño micrométrico de carburo y Cobalto que son compactados en un molde, al sinterizar el producto a altas temperaturas se provoca que el Cobalto fluya y llene los espacios entre los granos de carburo lo que reviste en su totalidad los granos, al solidificar el Cobalto tiene una acción de cementado y liga los granos lo que forma un material muy denso.

Este tipo de carburos cementados obtienen dureza de los granos de carburo y la característica de tenacidad se obtiene por las ligas que produce la acción del metal de Cobalto. de ahí que la combinación del carburo con Cobalto tenga gran resistencia a la abrasión.

II.8.1.- Rectificado con diamante

La operación de rectificado de carburos cementados es muy severa en comparación con la rectificación de aceros dúctiles ya que cuando se rectifica acero el mecanismo de remoción de material es la fractura por cizallamiento. es decir, el material se remueve en forma de viruta y bajo consumo de energía, por lo que la tasa de desgaste de la muela de rectificado es relativamente baja.

Los abrasivos de rectificado convencional se destruyen de manera inmediata cuando impactan con los granos de carburo ya que la dureza a la penetración Knoop del carburo de Tungsteno es del orden de 1.880 kg/cm² y en el caso de carburo de silicio la dureza Knoop es de solo 2.480 kg/mm² lo que hace que estos granos se desgasten muy rápido al rectificar granos de carburo de Tungsteno que son mucho más duros.

Por tal motivo se utilizan granos de abrasivo de diamante ya que estos tienen una dureza Knoop del orden de 7.000 a 10.000 lo que hace que sean de tres a cuatro veces más duros que los granos de carburo de silicio, razón por la cual las muelas de diamante son utilizadas universalmente para rectificado de carburos cementados.

II.8.1.1.- Optimización de rendimiento de la muela de rectificado

La productividad y rentabilidad en las operaciones de rectificado de carburos cementados pueden mejorarse mediante la selección de la muela diamante apropiada. tomando en cuenta que los carburos cementados no pueden ser fabricados menos resistentes a la abrasión, pero puede optimizarse el rendimiento según el trabajo a realizarse. en la tabla II.2 se muestra información para rectificado superficial en húmedo, tómesese en cuenta que en una operación de rectificado las propiedades físicas del diamante y la liga que mantiene unidos los cristales abrasivos en el borde tienen una importancia fundamental, si se usa un abrasivo de diamante incorrecto o liga incorrecta los costos de rectificado aumentan significativamente.

Tipo de carburo	Tipo de aplicación	WC %	Co %	TiC %	TaC %	Relación de rectificado
883	Remoción de metal Hierros fundidos Aleaciones de aluminio	94	6	-	-	340
779	Formado de metal	91	9	-	-	225
44A	Remoción de metal Hierros fundidos Aleaciones de aluminio	94	6	-	-	270
55A	Componentes	87	13	-	-	205
370	Remoción de metal Acero	72	8,5	8	11,5	145
350	Remoción de metal	64	6	25,5	4,5	260

Tabla II.2.- Rectificado superficial en húmedo, Muelas tipo 1.A.1

La muela de diamante tiene numerosos puntos cortantes afilados, y estos remueven los materiales de manera eficiente durante el proceso de rectificado, en tanto progresa el rectificado los puntos cortantes se empastan lo que hace que el abrasivo frote en la superficie de contacto con la pieza y que la eficiencia al remover el material sea reducida por lo que gran cantidad de energía se disipa en forma de calor.

De tal manera que se recomiendan muelas de diamante friable, en el caso de rectificado de carburos cementados ya que el cristal friable de la muela sufre microfractura controlada por las tensiones establecidas en los puntos cortantes empastados lo que genera nuevos puntos afilados. de esta

manera con estos abrasivos de diamante autoafilables, y con la liga correcta, se pueden rectificar carburos cementados.

Se recomiendan las ligas resinoides, para muelas de diamante, aunque a veces se emplean ligas metálicas vitrificadas, ya que las ligas resinoides son resilentes lo que amortigua el abrasivo de diamante contra impactos que pudieran causar fractura a gran escala. además, las ligas resinoides se formulan para que tengan desgaste al mismo paso que el abrasivo de diamante friable. de esta manera nuevos cristales en la liga son expuestos si es necesario.

Las muelas de diamante con liga resinoides son capaces de remover material diez veces más rápido que una muela con liga metálica, y de hasta dos veces más rápido que una muela vitrificada, la resistencia al desgaste de las ligas resinoides son un factor importante que considerar en el rendimiento, ya que si la liga resinoides es muy dura evitara que la muela corte libremente por el contrario si la liga es demasiado blanda, el desgaste en la muela será excesivo.



Figura II.15.- Muelas de diamante para perfilado y acanalado de herramientas de corte de alta velocidad y carburo de tungsteno, Diprotex S.A.S

Los factores que determinan el grado de dureza de la muela, es el área de contacto entre la muela y la pieza, velocidad superficial de la muela, así como si se rectificara en húmedo o seco además del tipo de carburo. la eficiencia de rectificado se mejora equiparando la dureza de la muela con el tipo de rectificado específico, la cantidad de diamante de las ruedas se expresa en términos de concentración, por ejemplo, una muela de concentración 100 tienen 4.4 kilates de diamante $\times \text{cm}^3$, una muela de concentración 75 tienen 3.3 kilates $\times \text{cm}^3$.

si la concentración de diamante aumenta, la rueda se hace más resistente al desgaste, ya que tiene una mayor cantidad de granos trabajando de manera simultánea lo que produce menor esfuerzo en

cada cristal. la limitante en el aumento de concentración está en primer lugar determinado por el tamaño de grano ya que granos gruesos admiten mayores concentraciones que en el caso de granos finos. la vida útil de una rueda se puede aumentar si el espesor de la banda abrasiva se aumenta, de tal manera que aumenta el diámetro además de trabajar en húmedo.

II.9.- Sumario

En este capítulo se aborda el marco teórico que servirá de referencia para abordar el problema de análisis de esfuerzos de los martillos de forjado en frío, para la fabricación de cañones de armamento, se aborda el proceso de forja con matriz abierta, así como de matriz de impresión o forja cerrada de los que se explican ventajas y desventajas, se hace mención de los diferentes procesos de conformación y de las máquinas que se involucran en cada de uno de estos procesos. Por otro lado, se abordan los conceptos de teoría de falla en particular para materiales dúctiles, tomando en consideración esfuerzos cortantes máximos y la teoría de falla de *Von Mises*, conceptos que serán de utilidad para el caso de estudio del análisis numérico de los martillos de forjado en el capítulo III de este trabajo.

Por otro lado, se explica el proceso de rectificado del carburo de Tungsteno, material con el que son fabricados los martillos de forja. Así como de las muelas de diamante que se usan para rectificar este tipo de herramientas siendo este proceso de vital importancia para el análisis de optimización que se realiza en el capítulo IV ya que al obtener el estado de esfuerzos de la herramienta en el capítulo III, se procederá a realizar la optimización de los perfiles angulados. Y posteriormente se fabricarán mediante este proceso. resultados que se publicaran en el capítulo V de este trabajo.

II.10.- Referencias

- 1.- Altan, T., Ngaile, G. y Shen, G., *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*, ASM International, pp. 135-139, 2004.
- 2.- S. Kalpakjian., S.R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, quinta edición, Prentice Hall, pp.371-395.2008.
- 3.- Estrada, Diaz L., Ortiz, Prado A., Ramírez Diaz E., *Diseño de estampas para forja*, Departamento de ingeniería mecánica, UNAM, 14 congreso internacional anual de la SOMIM, 2008.
4. - Contreras-Hernandez Adrián. E., *Optimización del proceso de forja abierta, para evitar defectos internos*, M. en C. Tesis, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica, U.A.N.L., pp 25-48 2013.
5. - Groover, Mikell p., De la peña, Gómez Carlos M., *Fundamentos de manufactura moderna*, Procesos y sistemas, 1997.
- 6.- Gerling, H., *Alrededor de las máquinas-herramienta*. Editorial Reverte, 2002
7. - Cedeño-Verduzco, V. F., *Diseño y desarrollo de herramientas de suajeadado para la fabricación de cañones de armamento*, M. en C. Tesis, SEPI ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, pp 25-27, 2010.
8. - Gustavo, Fontela, *Rectificación de carburo de Tungsteno cementado*, Insertos y herramientas de corte 2 máquinas y equipos. Gusdaval, noviembre 2016.

Capítulo III

Análisis del Problema

III.1.- Introducción

En este capítulo se aborda el análisis numérico de los martillos de forja para la fabricación de cañones de armamento. Se considera una máquina de disposición radial en la que el proceso se lleva a cabo por forjado en frío.

El objetivo principal de este estudio es el estudiar el perfil angulado de los martillos de forja, el cual facilita el proceso inicial de forjado en el golpeteo de los martillos. Así como, el flujo de material en el conformado del cañón, ya que durante el proceso de forjado se presentan esfuerzos debidos a la acción de cargas externas en los materiales que provocan la deformación. Por lo que los efectos de la presión en el forjado y la predicción de las cargas de deformación son parámetros de vital importancia en el proceso de deformación en frío. De estos parámetros depende la manera en que se llevara a cabo la deformación plástica de los materiales [III.1]. Se explica también el proceso de forjado con martillo, el cual es llevado a cabo en maquinaria *GFM* de *Sturm, Ruger Co.* conocidas como máquinas de forjado radial, debido a que los martillos se mueven en líneas radiales lineales esta tecnología de forjado se desarrolló en Alemania antes de la segunda guerra mundial continuando después de la guerra con *GFM* de *Steyr*, en Austria. la primera máquina para comercializar barriles forjados fue producida por *GFM* alrededor de 1950 [III.2].

Las máquinas de forjado radial tienen dos tipos de movimiento que influyen en el diámetro de forjado, siendo este el diámetro resultante cuando los martillos se cierran sobre la pieza bruta del cañón. El primer movimiento es excéntrico similar a una punzonadora, la cual abre y cierra los martillos entre 1000 y 1600 veces por minuto. Mientras que la apertura se da de 2 a 5 mm. Estas variables dependen de la máquina específica. El segundo movimiento depende de un sistema de control numérico que controla con precisión la posición y diámetro del forjado resultante. Una de las ventajas de las máquinas radiales se encuentra en la capacidad de cambiar su diámetro de forjado en variedad de tamaños según el rango de la máquina, esto es logrado bajo el control de la computadora [III.2]. Otro método para forjar cañones es el forjado rotativo o giratorio, en este caso los martillos giran en grupo y se mueven radialmente. Este proceso se originó hace más de 100 años y parece que fue *Torrington Machinery* quien inventó el proceso. En los Estados Unidos esta tecnología fue desarrollada por *Winchester* usando el forjado rotativo para la fabricación de cañones, utilizando máquinas fabricadas por *Cincinnati Milling Machine Company* [III.2].



Figura III.1.- Caja de forjado con el juego de cuatro 4 martillos y soporte de contador

En este caso, este tipo de forja es muy similar a la forja radial, la diferencia radica en que unos rodillos que están fijos a una carcasa estacionaria empujan los martillos mientras estos giran, lo que hace que la fuerza centrífuga jale los martillos entre los rodillos (Figura III.2).

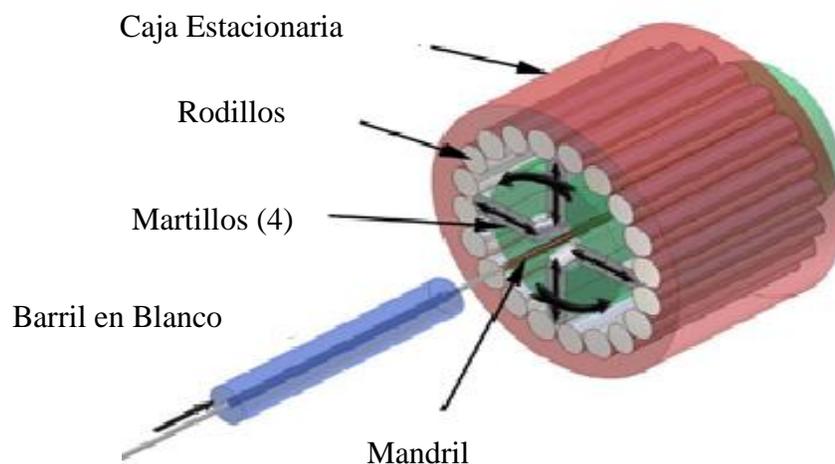


Figura III.2.- Esquema de forjado rotativo

Durante el proceso de forjado en frío se pueden presentar fallas en los martillos de forjado como son el desgaste abrasivo, adhesivo, corrosivo, así como químico y fatiga mecánica. Además de la deformación plástica que pueden sufrir los martillos por lo que es necesario comprender y analizar

los mecanismos que provocan estas fallas ya que estas inciden directamente en el comportamiento y desempeño de la herramienta.

Se aborda además el proceso de metalurgia de polvos, ya que es el método por el cual se fabrican los martillos o dados de forjado objeto de este estudio. Siendo este un proceso de moldeado de forma neta el cual consiste en producir polvos metálicos, mezclarlos para después ser compactados obteniendo piezas en crudo o verdes las cuales serán sinterizadas para proporcionarles propiedades mecánicas como son resistencia, dureza y tenacidad. Por lo que este proceso tiene la capacidad de producir piezas con cierto grado de complejidad, pero económicas con formas netas, de tolerancias dimensionales cerradas usando además una variada selección de polvos de metales y aleaciones [III.3]. Se contempla también el estudio del comportamiento mecánico de los martillos de forjado en frío por medio del análisis del estado de esfuerzos al que se encuentra sometida la herramienta en la fabricación de cañones de armamento. Para lo que se emplea el método del elemento finito (*MEF*), que permite analizar los fenómenos de deformación de manera efectiva en cuerpos con geometrías complejas y de capacidades de deformación múltiples. Este tipo de análisis y simulación ofrece a diseñadores y analistas una importante flexibilidad en una amplia gama de aplicaciones. Así como, un aporte al desarrollo y a la investigación.

III.2.- Materiales utilizados en la fabricación de herramientas de forjado [III.4 a III.8]

En particular los materiales y metales duros ofrecen propiedades interesantes en aplicaciones en donde se requiere una máxima resistencia al desgaste. Los esfuerzos aplicados en las piezas sometidas a desgaste durante su uso se caracterizan por factores como alta presión, temperaturas elevadas, uso de substancias o materiales abrasivos y el mecanizado. Estos son algunos de los factores que deben resistir los materiales y metales duros.

La pulvimetalurgia permite adaptar las propiedades de los materiales para superar los factores de desgaste. Para la fabricación de herramientas por metalurgia de polvos se utilizan diferentes procesos, entre los cuales se encuentra el atomizado por agua o por gas. ya que las partículas atomizadas se solidifican rápidamente eliminando los problemas de segregación, con lo que se retienen porcentajes mayores de aleación que los que permitirían una colada convencional en la fabricación de herramientas de corte o forjado. Se obtienen además microestructuras muy finas de tamaño de grano y carburos uniformes lo que hace posible controlar dureza, homogeneidad en la

pieza además de control dimensional obteniendo así mejoras en las propiedades mecánicas. El proceso de metalurgia de polvos consta de las siguientes operaciones:

- 1.- producción de polvos.
- 2.- Mezcla.
- 3.- Compactación.
- 4.- Sinterizado.
- 5.- Operaciones de acabado.

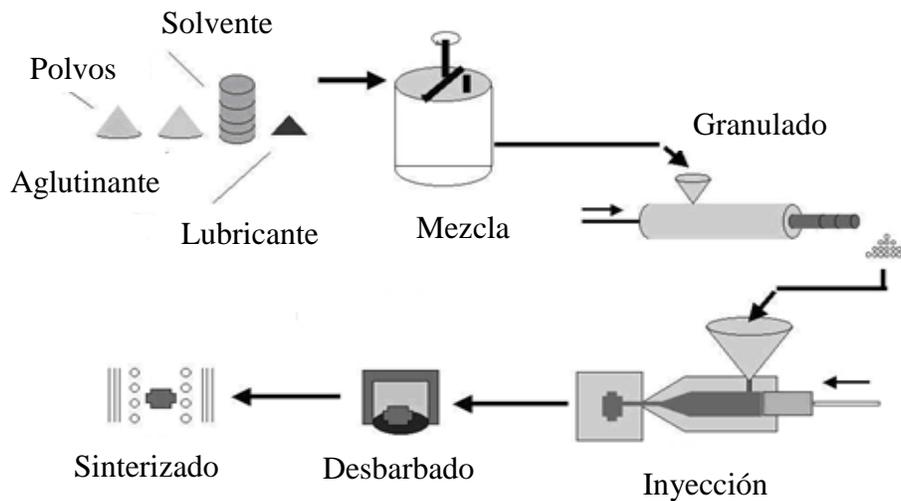


Figura III.3.- Proceso de metalurgia de polvos

III.2.1.- Producción de carburo

El metal duro es un material que se compone de partículas que contienen principalmente carburo de Tungsteno. Este como material duro, además de un aglomerante metálico por su composición con el metal duro se consiguen combinaciones de tenacidad y dureza, lo que no se consigue con otro tipo de materiales.

III.2.1.1.- Preparación del polvo granulado

Ya que el carburo de Tungsteno (WC) tiene un punto de fusión alto, el metal duro que será usado en aplicaciones técnicas exigentes sólo puede ser producido a través del proceso de pulvimetalurgia. Para lo que el material duro (WC) y el metal aglutinante Cobalto (Co). Además de opcionalmente agregar elementos de aleación adicionales son mezclados y molidos en forma de

polvo para después ser secados por pulverización. El producto obtenido de este procesamiento es un polvo granulado pulverizado que en sus propiedades físicas (tal como el tamaño de grano) y químicas ya se encuentra adaptado a la especificación final de carburo.

III.2.1.2.- Compactación de los polvos

La compactación es el proceso mediante el cual son prensados los polvos metálicos a fin de darles las formas de las diferentes matrices. El objetivo de la compactación es obtener forma, densidad y contacto entre las partículas. Lo que permite que la pieza obtenga suficiente resistencia para un proceso posterior, a la pieza compactada se le conoce como compactado crudo o verde debido a su resistencia baja por lo que estas piezas son muy frágiles. Al granulado de metal duro se le da la forma de la pieza en bruto mediante presión, la presión necesaria para el compactado dependerá de la forma de las partículas, método de mezclado. Además del lubricante utilizado la presión requerida va de los 70 MPa a los 800 MPa a esta pieza ya compactada se le da una forma casi final utilizando procesos de mecanizado clásico (corte, taladrado, fresado, torneado). Con este proceso se reduce el tiempo de procesamiento del metal duro ya sinterizado significativamente, la densidad de la pieza ya compactada tiene aproximadamente 50% de la densidad del metal duro sinterizado. por lo que el valor de contracción durante el proceso de sinterizado es de aproximadamente 20%

III.2.1.3.- Sinterización

En el proceso de sinterizado la matriz se convierte en un cuerpo metálico duro compacto de alta dureza. En este proceso los compactados crudos o verdes se calientan en hornos de atmósfera controlada a temperaturas por debajo del punto de fusión, pero suficientemente elevadas para que se permita la fusión de las partículas, las variables a tomar en cuenta en el sinterizado son temperatura, tiempo y atmósfera del horno. La sinterización de carburo es llevada a cabo a temperatura de aproximadamente 1400 °C. Este es un tipo de sinterización en fase líquida, ya que la fase aglutinante (en este caso el Co) se funde recubriendo las partículas de material duro (WC). Los tiempos de sinterizado van generalmente de 10 minutos para aleaciones de Hierro y Cobre, de 8 horas para el caso del Tungsteno y Tantalio. Es importante controlar de manera óptima la atmósfera del horno para una sinterización exitosa. En este caso una atmósfera sin Oxígeno es esencial para controlar el carburado y descarburado en el caso de compactos de Hierro y de base Hierro, evita la oxidación de los polvos por lo que se utilizan diferentes gases para controlar la atmósfera entre los que se encuentran Hidrógeno, Amoníaco disociado, gases de hidrocarburos

parcialmente quemados y Nitrógeno. Después de la sinterización la densidad del metal duro es equivalente al 100 % de la densidad teórica, esto según la calidad de metal duro. En caso de presentarse porosidad residual esta puede ser eliminada a través del proceso de compresión isostática caliente (*HIP*) después del proceso de sinterización.

III.2.1.4.- Producción de carburos de Tungsteno para matrices y dados

El carburo de Tungsteno es un material que, debido a su dureza, y resistencia al desgaste inclusive en una amplia gama de temperaturas, es de muy alta importancia para la fabricación de herramientas, dados y matrices. Para la fabricación de estos carburos es que se utiliza la técnica de metalurgia de polvos. Para lo que como primer paso se mezclan polvos de Tungsteno y Carbón generalmente en un molino de bolas o en un mezclador giratorio, después esta mezcla se calienta en horno de inducción al vacío a 1500 °C, cabe mencionar que esta mezcla está conformada por 94% de Wolframio (*W*) y 6% de Carbón (*C*). Debido al calentamiento el Tungsteno se carboniza con lo que se forma carburo de Tungsteno en forma de polvo fino. Posteriormente a este polvo se le agrega un aglutinante que con frecuencia es Co. Además de un fluido orgánico como el hexano la mezcla es molida en el molino de bolas produciendo una mezcla homogénea. Este proceso tarda bastante tiempo desde horas hasta días, la mezcla se seca y consolida por medio de compactación en frío bajo presiones de hasta 200 MPa. La parte obtenida pasa a ser sinterizada en una atmosfera de Hidrógeno o en horno de vacío a temperaturas de entre 1350 °C y 1600 °C esto depende de la composición debido a que a estas temperaturas el Cobalto se encuentra en su fase líquida es como este elemento actúa como aglutinante sobre las partículas del carburo de Tungsteno. El carburo de Tungsteno sufre un 16% de contracción lineal durante la etapa de sinterización, esto es aproximadamente el 40% de contracción volumétrica. Por lo que el control en el tamaño y forma es de vital importancia en la producción de herramientas con dimensiones y tolerancias requeridas. Puede producirse otras combinaciones con otros carburos como el Titanio y Tantalio usando este mismo método. Lo importante es utilizar partículas cada vez más finas que permitan mejorar las propiedades mecánicas de estos compuestos.

III.2.1.5.- Piezas compuestas

Hay aplicaciones en las que no es conveniente que se fabrique el componente o la pieza en carburo de Tungsteno en su totalidad. en este caso el uso del carburo se limita solo a la zona en donde ocurre desgaste, la herramienta portadora se puede fabricar de materiales que se caractericen por sus propiedades de resistencia relevantes y que puedan procesarse más fácilmente que el carburo de Tungsteno, para unir metal duro con otros materiales existen tecnologías como el soldado, pegado, enganche, atornillado o contracción. Los criterios relevantes para la aplicación de materiales duros en aplicaciones de protección contra el desgaste son:

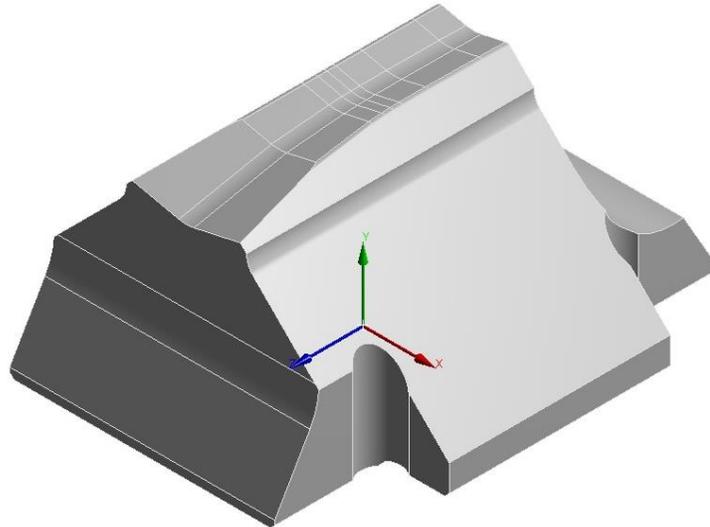
- 1.- La resistencia al desgaste/dureza.
- 2.- Resistencia a la compresión.
- 3.- Resistencia al impacto.
- 4.- Resistencia a la flexión.
- 5.- Propiedades tribológicas.
- 6.- Peso específico.
- 7.- Propiedades magnéticas.
- 8.- Módulo de elasticidad.
- 9.- Propiedades térmicas.
- 10.- Resistencia a la corrosión y a la oxidación.

Tomando en cuenta que estos materiales contienen sustancias en las que las propiedades mecánicas pueden ser reguladas a través de su composición y microestructura con límites muy amplios. El material duro dispone de dureza y resistencia al desgaste mientras que el metal aglomerante de tenacidad. La corrosión en el metal duro se da por la desconexión del metal aglomerante. Esto por causa de agentes corrosivos lo que puede conducir a una rotura prematura por concentración de estrés, o también a un nivel elevado de desgaste para lo que en estos casos los metales duros resistentes a la corrosión con aleaciones de CO/Ni , Ni y composiciones de aglomerante con Cromo (Cr) tienen ventajas significativas.

III.3.-Proceso de forjado con martillo [III.9]

De manera general, en la fabricación de cañones de armamento se comienza con una barra sólida de acero como el Cromo-Molibdeno 4140 o el inoxidable 410, 416 por citar algunos ejemplos. Las barras se perforan a profundidad y posteriormente se fresan. La característica principal en esta parte

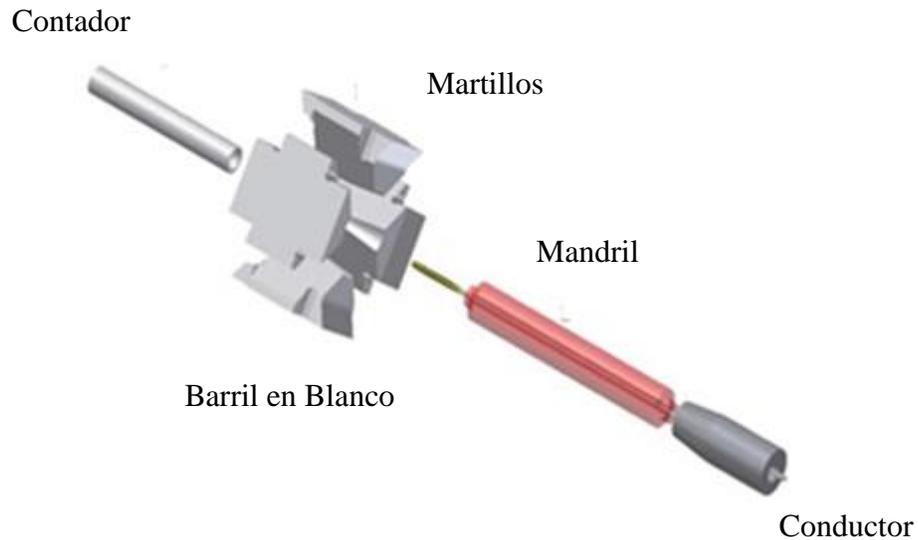
del proceso es que los agujeros son un 20% más grandes que el tamaño final esto se traduce en una clara ventaja para piezas en bruto forjadas con martillo debido a que los costos son mayores en calibres pequeños que en los más grandes debido a que el botón o rayado de corte se comienza con un orificio más pequeño que el que debe tener al final y que es más fácil escariar agujeros más grandes. Los martillos golpean el cañón en blanco alrededor de un mandril que contiene una imagen inversa del rayado formado en su superficie. las líneas helicoidales elevadas que contiene el mandril son las que forman el rayado(surcos) en los cañones terminados, y ya que la máquina de forjado golpea con los martillos las piezas en blanco del cañón alrededor del mandril, estos mandriles deben ser lo suficientemente resistentes al impacto y desgaste por lo generalmente son de carburo y muy caros. El mandril es unido al extremo de una varilla de acero que proporciona la longitud que se necesita para alcanzar a través del cañón (barril) en blanco



Figuras III.4.- Modelo CAD de un martillo utilizado en máquinas de forjado para la fabricación de componentes de seguridad

Los martillos son agrupados en conjunto de cuatro y de forma simétrica alrededor del mandril (Figura III.5). se coloca el extremo de la boca del cañón mientras que el conductor empuja y gira el extremo de la recámara mientras el cañón(barril) se alimenta en la máquina. Mientras en la Figura III.6 se observa una vista de los cuatro martillos, pieza bruta del cilindro y mandril en posición de los martillos apertura y en cierre. Cuando la máquina está en funcionamiento el barril gira alimentándose en la máquina de forja y los martillos golpean en conjunto entre 1000 y 1600 golpes por minuto. El tiempo que tarda el proceso de forjado de un barril depende del calibre, longitud y del tipo de máquina de forjado que se esté manejando. El proceso de forjado en frío tiende a

aumentar la dureza del barril el cambio de dureza dependerá de qué tipo de acero se utilice. si el acero es uniforme la dureza permanecerá uniforme en todo el barril.



Figuras III.5.- Vista isométrica del soporte de contador, martillos, mandril el tubo en blanco y el impulsor en posición abierta para el forjado



Figura III.6.- Vista lateral de los martillos, tubo en blanco, mandril en posiciones de apertura y cierre

III.4.- Fallas que se pueden presentar en los martillos de forjado [III.10]

A continuación, se describen algunas de las fallas más comunes que ocurren en los martillos de forjado.

- 1.- Desgaste. - Considerado como eliminación del material en la superficie de los martillos, también puede incluir acumulación de material en la superficie. Así como, daño en la misma es una de las causas principales de pérdida gradual de las tolerancias en las piezas forjadas. Además de bajo rendimiento de la herramienta, generalmente el desgaste es

producido por fricción y deslizamiento del componente a forjar y los martillos de forja durante el contacto.

- 2.- Fractura por fatiga. - Esta es producida por los ciclos de esfuerzos continuos a los que están sometidos los martillos. Estos ciclos se atribuyen al trabajo de carga y descarga en los martillos incluyendo el trabajo térmico. Siendo la fatiga una de las causas más comunes del bajo rendimiento en las herramientas y se presenta en las zonas donde las concentraciones de esfuerzos son máximas, como por ejemplo esquinas, filos y radios mínimos.
- 3.- Deformación plástica. - Esta se genera al exceder el límite de elasticidad de los martillos de forjado. Esto sucede cuando se aplican las presiones de deformación en el forjado y es la causa del bajo rendimiento de los martillos (Figura III.7).



Figura III.7.- Falla en el martillo por deformación plástica

En la forja en frío la fractura por fatiga es uno de los principales problemas de falla. Mientras que en la forja en caliente es el desgaste de los martillos la causa de las fallas presentadas en la producción. Por lo tanto, los principales modos de falla en el forjado en caliente o frío, son desgaste y fractura por fatiga.

III.4.1.- Mecanismo de fractura por fatiga

La fractura por fatiga inducida mecánicamente se da cuando una grieta se induce y esta debido a la carga mecánica se propaga a través de los martillos de forja. La nucleación de la grieta es producida cuando la carga de la herramienta excede el límite elástico del material de los martillos. Esto sucede en el área de la herramienta donde haya una concentración de esfuerzos. Donde se forma una zona plástica localizada, esta zona se forma en el ciclo de la primera carga volviéndose plástica durante las siguientes cargas y descargas. Los ciclos plásticos son los que producen la iniciación de grietas microscópicas. Estas grietas crecen cuando son sometidas a esfuerzos de tensión durante la carga.

III.4.2.-Mecanismos de desgaste

Pueden mencionarse cuatro mecanismos de desgaste como sigue:

- 1.- Desgaste adhesivo. - Se produce por el deslizamiento de dos superficies entre ellas, por lo que al desprenderse material de una superficie este se adhiere a la otra superficie. Esto sucede debido a que al haber contacto entre superficies ásperas de material a ser forjado y los martillos de forja una porción de la superficie de la pieza puede ser cortado y quedar adherido a la superficie de los martillos.
- 2.- Desgaste por abrasión. - Este tipo de desgaste se produce principalmente por la interacción de partículas de material duras con partículas sueltas que quedan atrapadas entre las superficies de trabajo.
- 3.- Desgaste por fatiga. - Este tipo de desgaste se da por la acción de carga y descarga repetida a la que se someten los martillos de forja, producido por pequeñas grietas que se forman en la superficie o en el interior de la superficie de los martillos y que posteriormente se desprenden como fragmentos de la herramienta dejando huecos en la superficie. De manera general el desgaste por fatiga es afectado por defectos superficiales que actúan como concentradores de esfuerzos.

4.-Desgaste químico o corrosivo en los martillos de forja. - Este se presenta en ambientes corrosivos y ocurre cuando hay rozamiento o fricción, eliminando las películas superficiales por el deslizamiento entre los martillos y la pieza a ser forjada. También se presenta por la presencia de sustancias químicas provocando el desgaste y la corrosión.



Figura III.8.- Desgaste en el perfil de los martillos de forjado

III.5.- Aplicaciones industriales del *MEF* [III.11 y III.12]

Las aplicaciones que de forma mayoritaria se le da al método del elemento finito en la industria recae en el cálculo de esfuerzos y deformaciones unitarias en sólidos y estructuras, del cual un gran porcentaje de usuarios del *MEF* lo emplea para el cálculo lineal ya sea estático o dinámico. Mientras que para el cálculo no-lineal, todavía existen áreas que requieren de mayor investigación. Lo que a su vez exige mayor formación del analista y mayor infraestructura de cómputo, para el caso del cálculo no-lineal se tienen aplicaciones equipos militares, procesos de conformado de metales y vidrio, componentes elastómeros como son las juntas de goma y piezas de caucho-metal, seguridad e impacto de vehículos. Así como, en investigaciones de causas de accidentes, por mencionar algunos ejemplos de aplicación.

En el caso de fenómenos de transferencia de calor aplicados en la Ingeniería Mecánica se podría mencionar ejemplos que se dan tanto en el cálculo lineal, como en el no-lineal y que se dan en los motores de combustión interna y en los sistemas de refrigeración. Otro caso de carácter no-lineal se da en la mecánica de fluidos, en este caso en la geometría de los mismos y que tiene menor importancia, algunos ejemplos de carácter lineal son el flujo en medios porosos, oleaje y difusión

de contaminantes. un ejemplo más de aplicación del *MEF* se da en los fenómenos de electromagnetismo y se aplica en proyectos de máquinas eléctricas y componentes eléctricos.

III.5.1.- Fundamentos del *MEF*

Cuando un número de interconexiones entre un elemento llamado *elemento finito* está rodeado de fronteras imaginarias y los elementos que son vecinos a este es infinito. Es difícil apreciar a simple vista como discretizar problemas de este tipo, pero esa dificultad puede ser superada y efectuar la aproximación a la solución de acuerdo con los siguientes pasos.

- 1.- La estructura a analizar misma que puede ser considerada como un sistema continuo, es dividida mediante líneas, superficies o volúmenes imaginarios, en un número finito de partes, estos conocidos como elementos finitos y su comportamiento será determinado por un número finito de parámetros.
- 2.- Suponiendo que los elementos estarán conectados entre sí por un número de puntos que se llaman nodos, y que estos están situados en sus contornos, los desplazamientos de estos nodos son las incógnitas fundamentales como cuando se resuelve o se analiza una estructura cualquiera.
- 3.- Se tomará un conjunto de funciones que definirán de manera única el campo de los desplazamientos en cada uno de los elementos finitos y estará en función de los desplazamientos nodales del elemento.
- 4.- Las funciones de desplazamientos definirán de manera única los estados de deformación al interior del elemento en función de sus desplazamientos nodales. las deformaciones en conjunto con las deformaciones iniciales y tomando en cuenta las propiedades que constituyen al material, definirán el estado de tensiones en todo el elemento y por lo tanto también en los contornos.
- 5.- Se determina el sistema de fuerzas que se concentran en los nodos, de tal manera que se equilibren las tensiones en el contorno y cualquiera de las cargas repartidas, resultando así la relación entre fuerzas y desplazamientos.

III.5.2.- Planteamiento del problema para el uso práctico del método

En el uso práctico del método del elemento finito, se tendrá que empezar enfocando el problema decidiendo con preguntas como ¿cómo será y que grado de complejidad tendrá el modelo?, ¿qué

precisión es requerida en los resultados?, ¿cuántos elementos va a tener? Estas preguntas parten de que el usuario tendrá varias opciones a la hora de enfrentar el problema. Pero la decisión adecuada dependerá de los resultados que se obtengan, de capacidad y costo de los recursos computacionales, ya que pueden existir limitaciones en licencia o de programa. Lo mismo que limitaciones en el ordenador ya sea de *software* o *hardware* y por otro lado la dificultad que representa generar el modelo y analizarlo. Uno de los factores a tomar en cuenta es como se puede simplificar el modelo ya que esto permite ahorro en tiempo y elementos un ejemplo de estos factores de simplificación son las simetrías y debe de ser una de las consideraciones a tomar en cuenta ya que pueden existir simetrías totales en el modelo. lo que lleva a determinar qué tipos de elementos se usaran y esto a su vez definirá el número de nodos.

III.5.3.- Desarrollo del modelo de elementos finitos

Una vez teniendo el modelo de la pieza a trabajar la siguiente fase será desarrollar el modelo de elementos finitos, que no es más que dividir el sistema continuo en un número finito de partes. Estas serán los elementos y estarán conectados entre sí por un número discreto de puntos que estarán situados en los contornos y que serán los nodos. Posterior a definir el tipo de elemento, se introducirán las propiedades del material, para el caso de materiales elásticos, lineales e isotrópico. Se define el módulo de *Young*, la relación de *Poisson* y la densidad del material. Cabe mencionar que en materiales no lineales como es el caso de los materiales elasto-plásticos o anisotrópicos son necesarios un número mayor de parámetros.

Una vez que se tiene definidas las propiedades geométricas, así como las del material, se deben definir los nodos entre los que se sitúan los elementos, ya que en cada elemento existe un sistema de coordenadas de elemento que al introducir materiales ortótropos y al aplicar determinados tipos de carga e interpretar resultados relacionados con esfuerzos y deformaciones en distintas direcciones se vuelve de particular importancia la definición de estos nodos. Partiendo del modelo sólido mismo, que está constituido por puntos, líneas, áreas y volúmenes, se comenzará la discretización en elementos y nodos mediante la operación de discretizado. La cual es una operación semiautomática. Además, se puede controlar el discretizado de manera más fina en ciertas regiones del modelo, como son aristas, chaflanes, redondeos etc., obteniendo así el modelo de elemento finitos. Esta opción de construcción del modelo de elementos finitos con la operación de discretizado es muy práctica para generar modelos complejos y de un gran número de elementos.

Ya que no se necesita decidir el número de elementos ni localización de los nodos, permitiendo además trabajar con modelos *CAD* preexistentes lo que también facilita trabajar cambios de modelización, así como rápidos cambios geométricos y de tipo de elemento.

III.5.4.- Solución y tipos de análisis

Ya que se ha construido el modelo el siguiente paso es que tipo de análisis se va a hacer, como es el caso del tipo de cargas, tipos de restricciones o interacciones que se tengan con otras partes del modelo. Para el caso del análisis de esfuerzos en los martillos de forja que compete a este estudio corresponde el análisis estructural y la herramienta de elementos finitos permite los siguientes tipos de análisis para el caso del cálculo estructural:

- Estático.
- Modal.
- Transitorio.
- Espectral.
- Inestabilidad o pandeo.

Para las solicitaciones y restricciones en el modelo pueden aplicarse varios tipos y están en función del análisis que se realice en este caso las solicitaciones más comunes, así como de restricciones son:

- 1.- Especificación de las fuerzas aplicadas al modelo. que pueden ser concentradas en los nodos, presión en elementos ya sean elementos de área o volumen y las aceleraciones
- 2.- Definición de restricciones del modelo. esto es definir los desplazamientos y grados de libertad que tendrá el modelo en función y con respecto al sistema de coordenadas nodal.

III.5.5.- Análisis de resultados

Una vez resuelto el modelo, en base al sistema de ecuaciones conformado por solicitaciones y restricciones que le son introducidas. se obtienen dos tipos de resultados que son:

- 1.- Resultados primarios. - Estos son los que se calculan para cada nodo y que es la solución de los grados de libertad.

2.- Resultados derivados. - Estos se derivan de los datos primarios como son esfuerzos y deformaciones.

En el caso de estudio de los esfuerzos en los martillos de forja que corresponde a un análisis estructural, los datos primarios son los desplazamientos mientras que los datos derivados serían los esfuerzos, deformaciones unitarias y reacciones. Para analizar los resultados obtenidos por el método de elemento finito se pueden mencionar dos factores que serán determinantes en la exactitud de los resultados y en particular para el cálculo estructural. El primer factor es común en todos los métodos de cálculo y tiene que ver con las distintas hipótesis simplificativas que se usan para el cálculo estructural entre las que se encuentran, las hipótesis sobre la modelización del sistema, sobre la manera en que se aplican las cargas, sobre las propiedades de los materiales y en base a la geometría del modelo. El segundo factor, está relacionado al propio método de elemento finito y tiene que ver con la manera en que se discretiza el modelo ya que esto afecta la convergencia del método hacia los resultados y de estos a la solución teórica exacta. Para el caso de este estudio esta parte es muy importante debido al perfil complejo de los martillos de forja, ya que este es precisamente el área de análisis que es de interés por lo que es de vital importancia, el tipo de elementos finitos utilizados para la discretización y el tamaño de los mismos.

III.6.- Análisis numérico de los martillos de forjado

Se procede a realizar el análisis por medio de método de elemento finito, para lo que se usa un *software* de diseño mecánico en 3D, que además de ser una herramienta muy versátil permite la modificación rápida de operaciones tridimensionales, sin tener que rehacer diseños que ya se encuentren plasmados y asociados con otros documentos. Además de contar con herramientas de diseño de piezas, de ensambles y dibujos este software cuenta también con herramientas de presentación, análisis y simulación que lo hace que sea una herramienta muy importante para el presente estudio. Se analizarán dos tipos de martillos de forjado tipo A y tipo B (Figura III.9), que trabajan en una máquina de forjado rotativo con las siguientes características:

Modelo	Sk-10
Sistema de forjado	Radial
Tipo de forjado	En frio
Golpes por minuto	1000

Fuerza de forjado	784.5 kn
Diámetro máximo de forjado	38 mm
Número de martillos	4
Longitud de la pieza forjada	750 mm
Peso de la máquina	25 t
Nivel de protección acústica	88 db a 10 m
Sistema de automatización	No aplica
Calibres que puede fabricar	9 mm.
	5.56 mm.
	7.62 mm.

Tabla III.1.- Características de la máquina *SK 10* para fabricación de cañones (*SEDENA*)

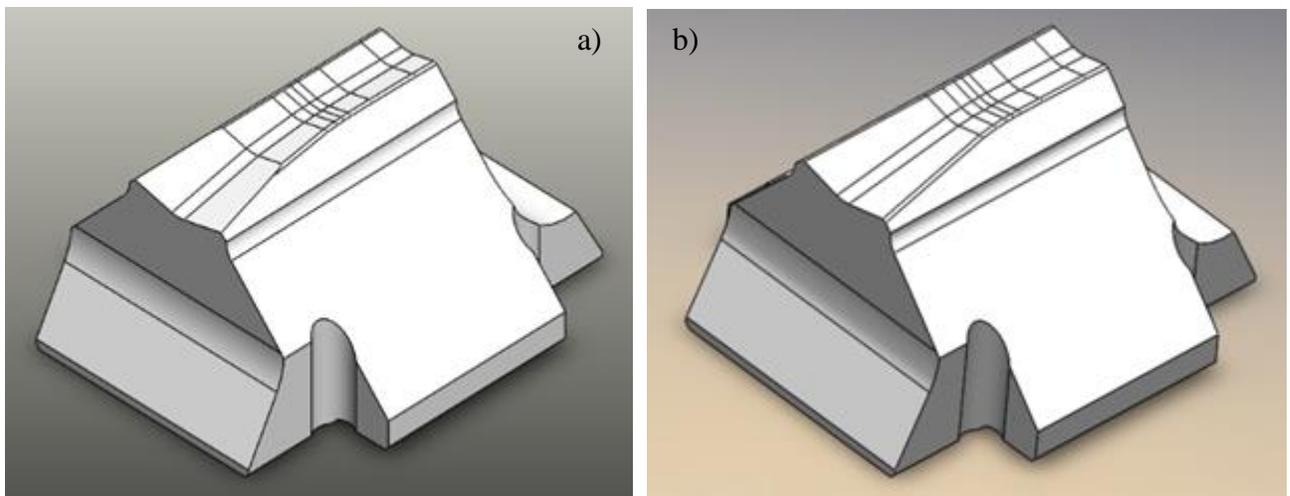


Figura III.9.- Modelo *CAD* de martillo de Forja. a) Tipo A. b) Tipo B.

Las propiedades del material del martillo de forjado se basan en los datos proporcionados por el fabricante de la herramienta, determinando un carburo *CTF40 (WC/Co)* carburo de Tungsteno con un 20 % de Cobalto como aglomerante de tamaño de grano fino y de propiedades mecánicas según se enuncian a continuación:

Módulo de elasticidad (E); 449 GPa.

Relación de Poisson (ν); 0.24.

Densidad de masa (ρ); 13 600 kg/m³.

Coefficiente de dilatación térmica; 6.2/Kelvin.

Para el análisis del modelo se toma un estudio de tipo estructural, estático, isotrópico, elástico y lineal. Con propiedades volumétricas según las características del material de los martillos de forjado de:

Masa; 2.61082 kg

Volumen; 0.000191972 m³

Densidad; 13 600 kg/m³

Peso; 2.61 kg

Las dimensiones de perfil de los martillos tipo A y tipo B se presentan en las siguientes figuras.

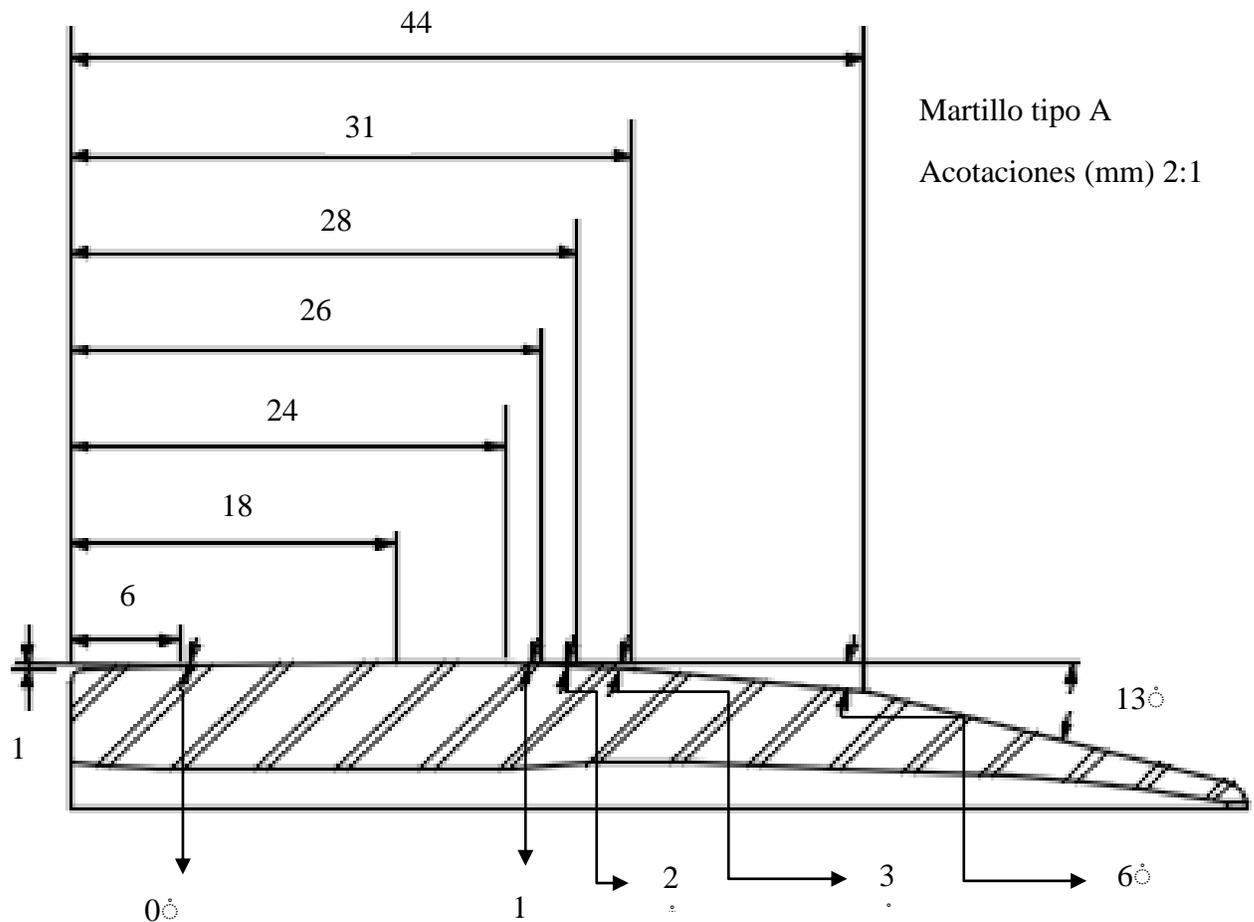


Figura III.10.- Perfil angulado, martillo de forja tipo A

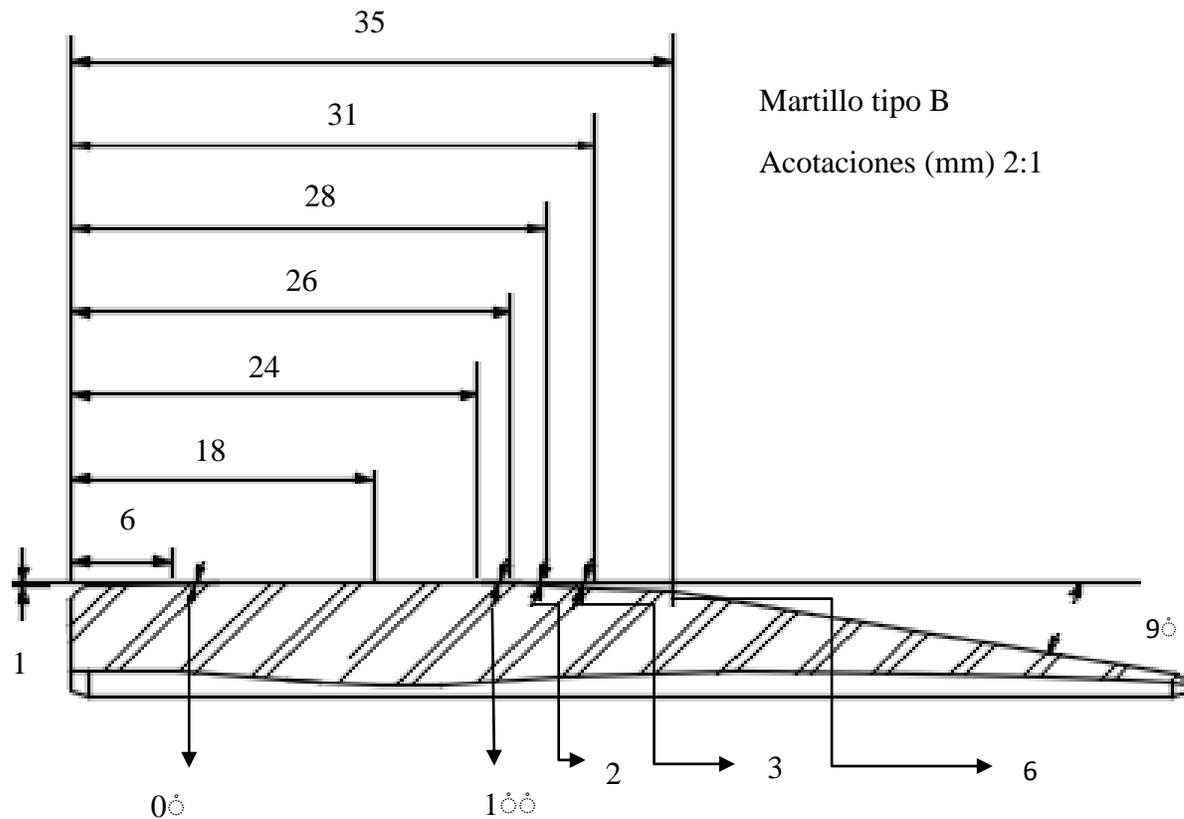


Figura III.11.- Perfil angulado, martillo de forja tipo B

La carga aplicada al modelo del martillo es de 750 kN (0.75 MPa), y se aplica en una zona específica del perfil angulado del martillo que es donde se concentra la carga al estar en operación. Mientras que las restricciones a los grados de libertad se aplican en cinco caras del modelo lo que no permite desplazamientos (Figuras III.12 y III.13).



Figura III.12.- Sujeción del martillo en la caja de forjado

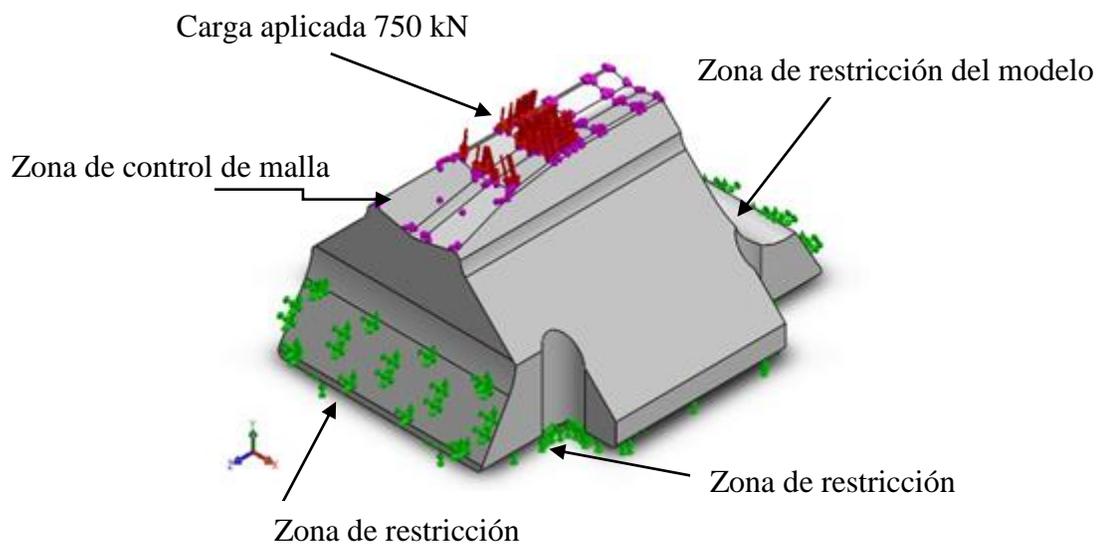


Figura III.13.- Carga aplicada y restricciones en el modelo

Las fuerzas de reacción resultantes que se obtienen en los componentes X, Y, Z son:

$$X = 0.000103997 \text{ N}$$

$$Y = 226.877 \text{ N}$$

$$Z = 16.2005 \text{ N}$$

Obteniendo una fuerza resultante de 227.455 N. La fuerza que se aplica a las caras del perfil angulado del martillo es una fuerza de presión que se menciona es de 750 kN (0.75 MPa), aplicada en 12 caras del perfil angulado y es del tipo normal a la cara seleccionada (Figura III.14 y III.15).

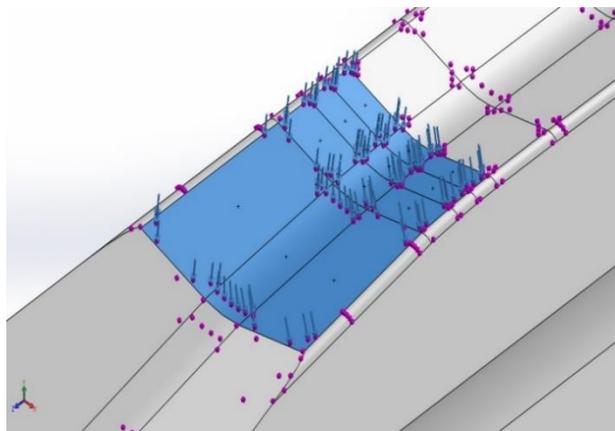


Figura III.14.- Detalle de área de aplicación de carga en el modelo

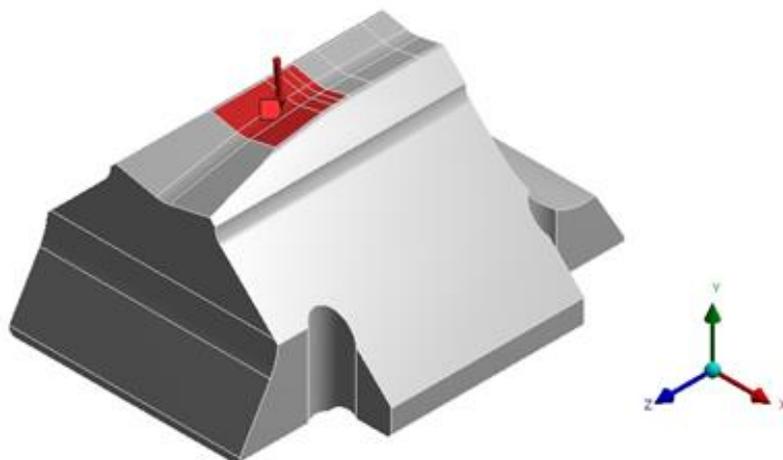


Figura III.15.- Aplicación de la carga en el modelo *CAD* martillo de forja tipo A

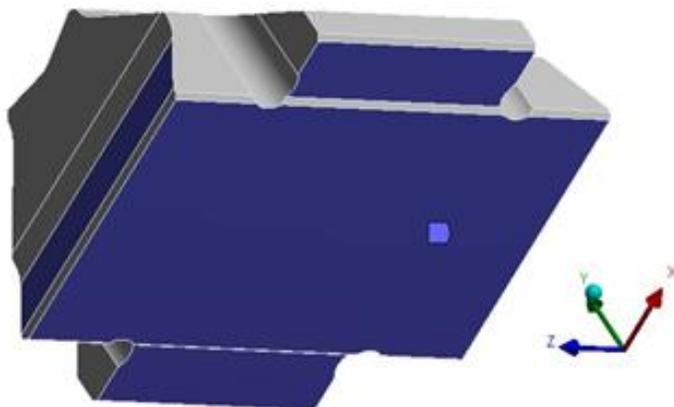


Figura III.16.- Detalle de las restricciones aplicadas al modelo del martillo tipo A

Para discretizar el modelo se utilizó una malla estándar de elementos cuadráticos de alto orden con tamaño de elementos de 0.00288516 m, con 79473 nodos y 54220 elementos (Figura III.17). Cabe hacer mención que se realizó un control de discretizado en 38 caras del perfil angulado con malla fina ya que es esta área del modelo la de mayor importancia para el estudio.

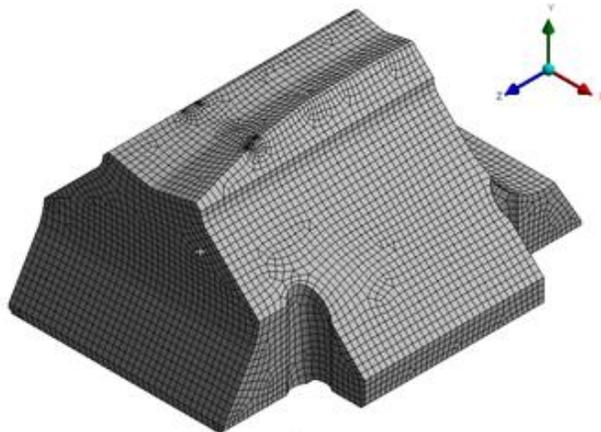


Figura III.17.- Modelo *CAD* con discretizado controlado fino

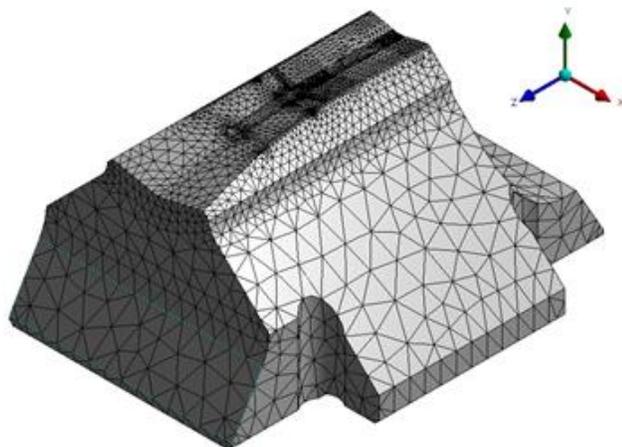


Figura III.18.- Modelo *CAD* discretizado controlado en el perfil angulado del martillo

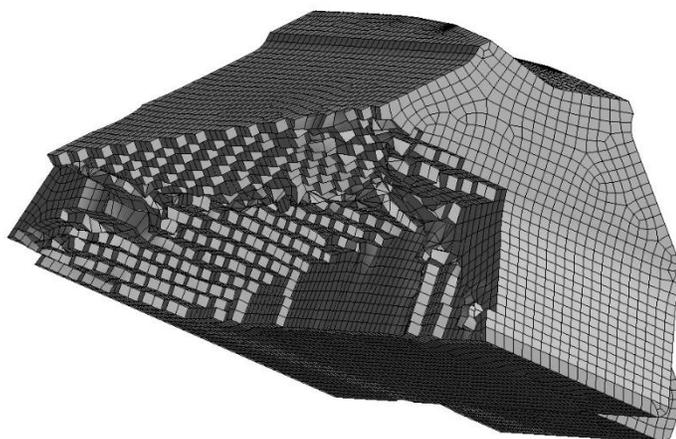


Figura III.19.- Detalle de la calidad de los elementos en modelo del martillo de forjado

A continuación, se presentan los resultados del análisis numérico. Del martillo de forjado tipo A.

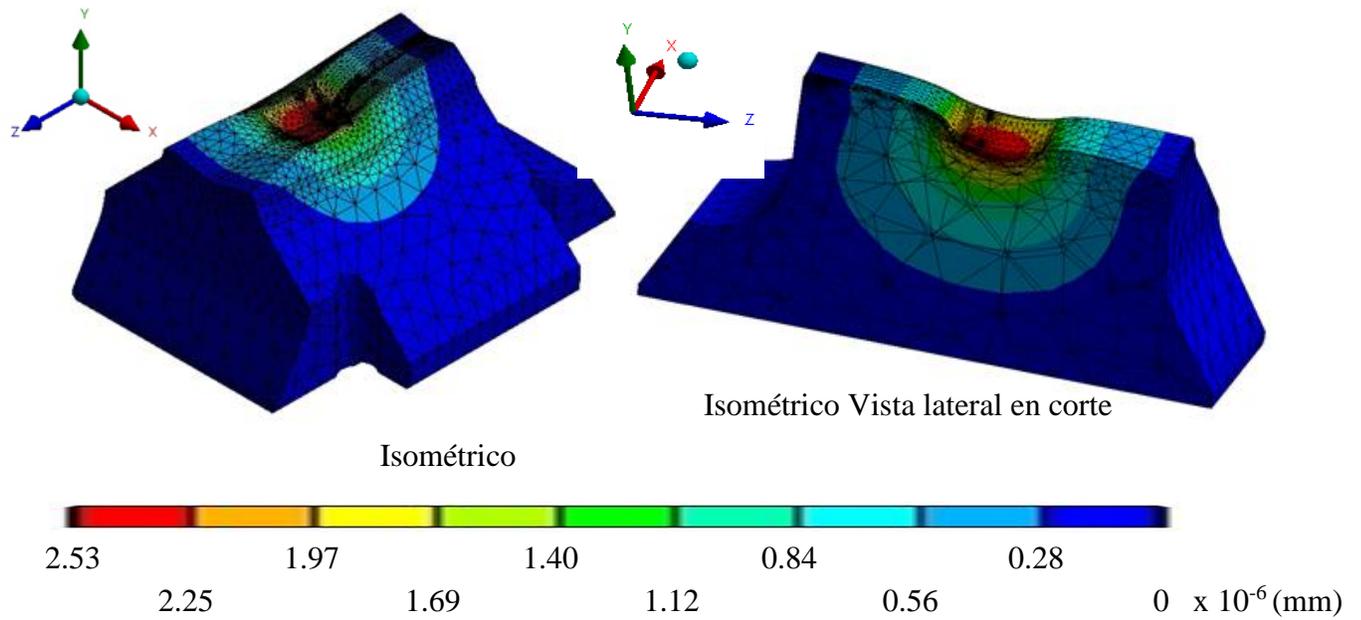


Figura III.20.- Desplazamiento total del martillo tipo A

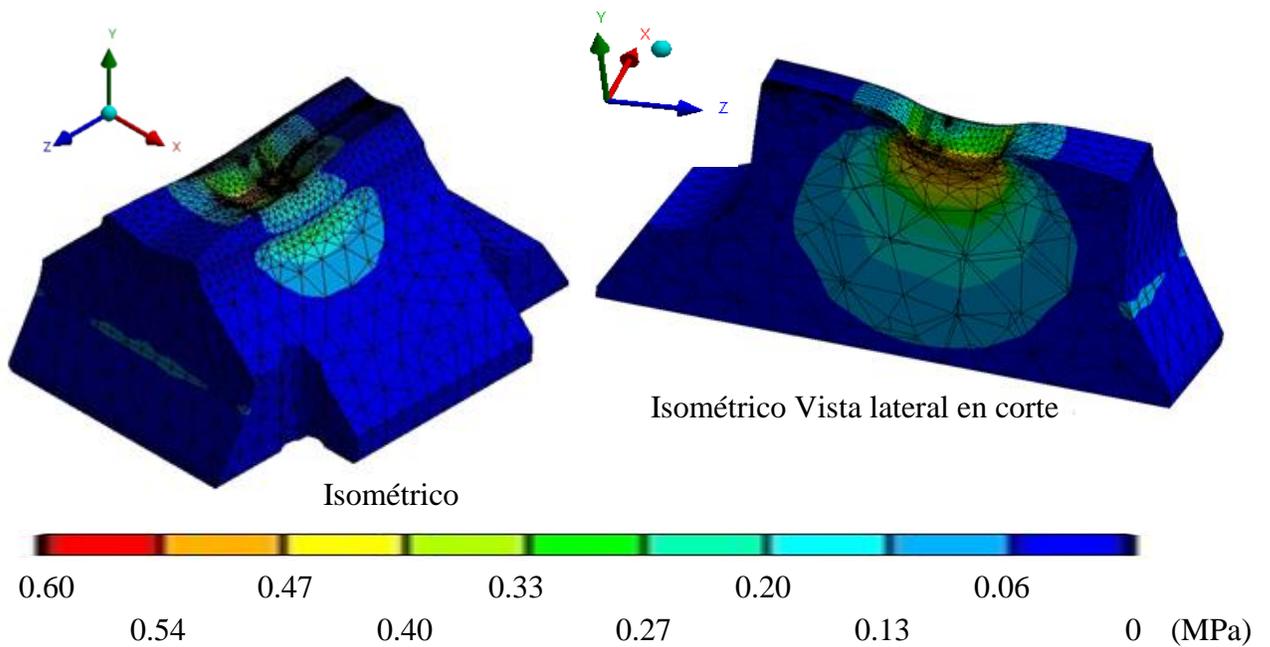


Figura III.21.- Esfuerzos de *Von Mises* Martillo tipo A

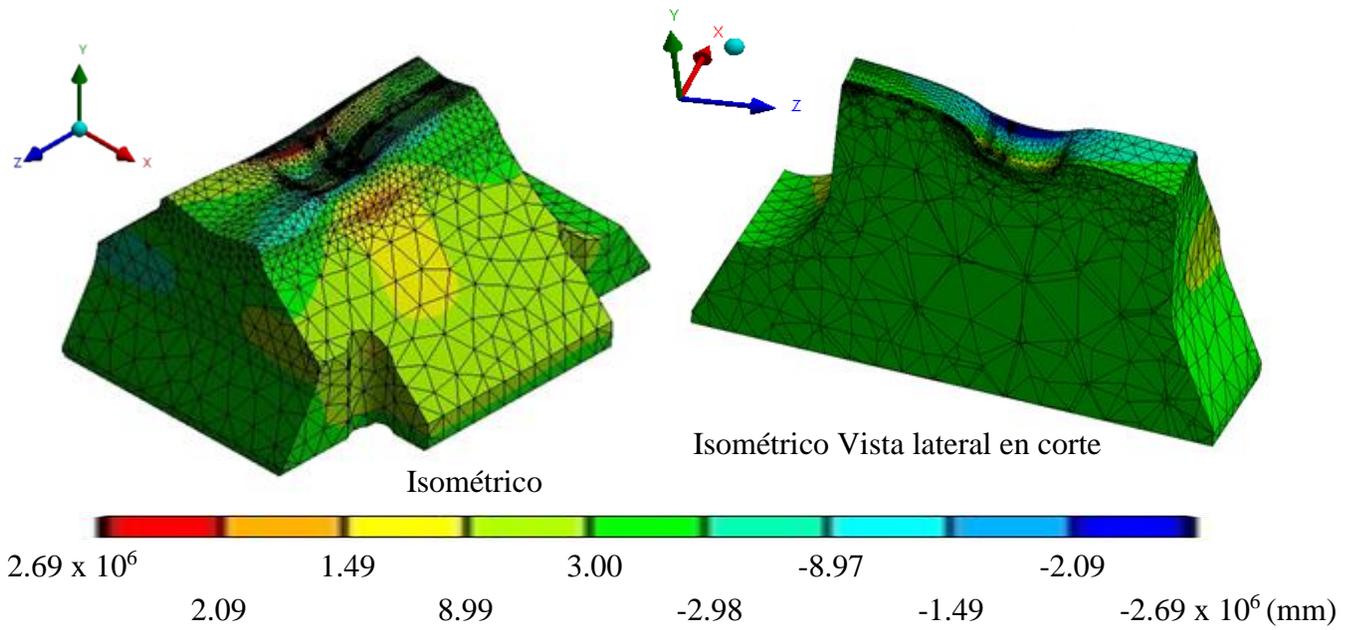


Figura III.22.- Desplazamiento en el eje X martillo tipo A

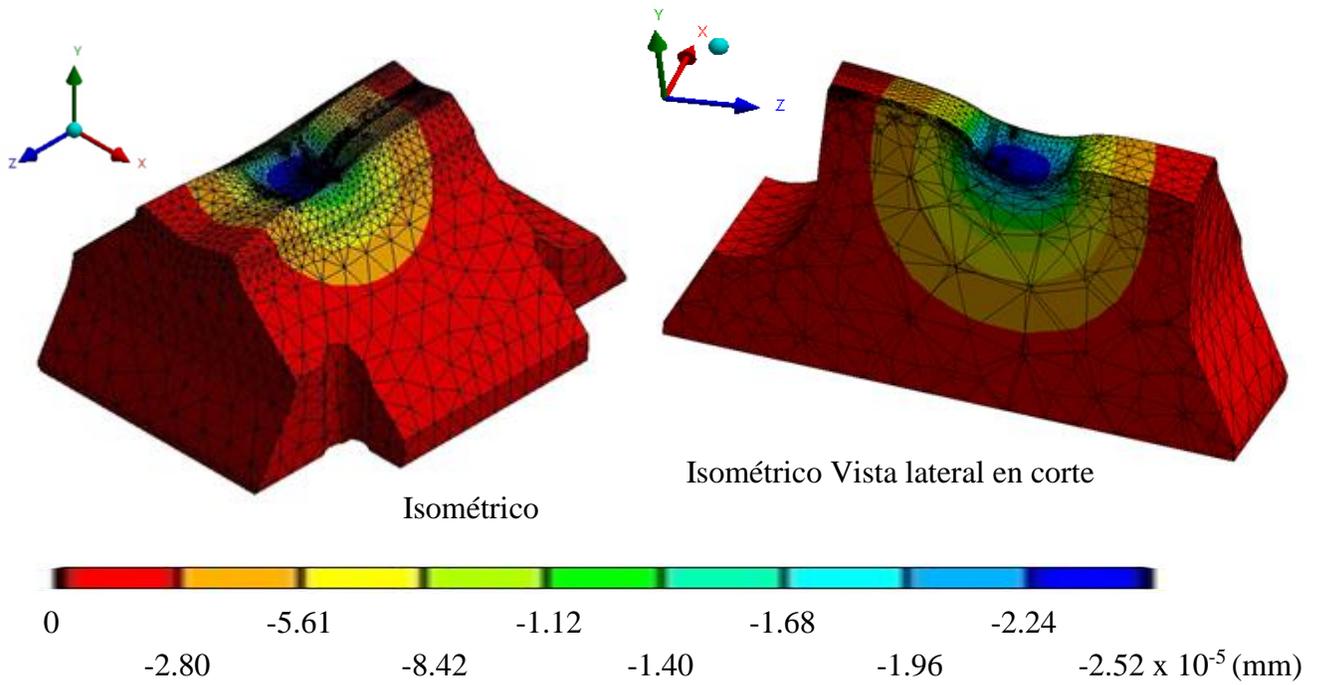


Figura III.23.- Desplazamiento en el eje Y martillo tipo A

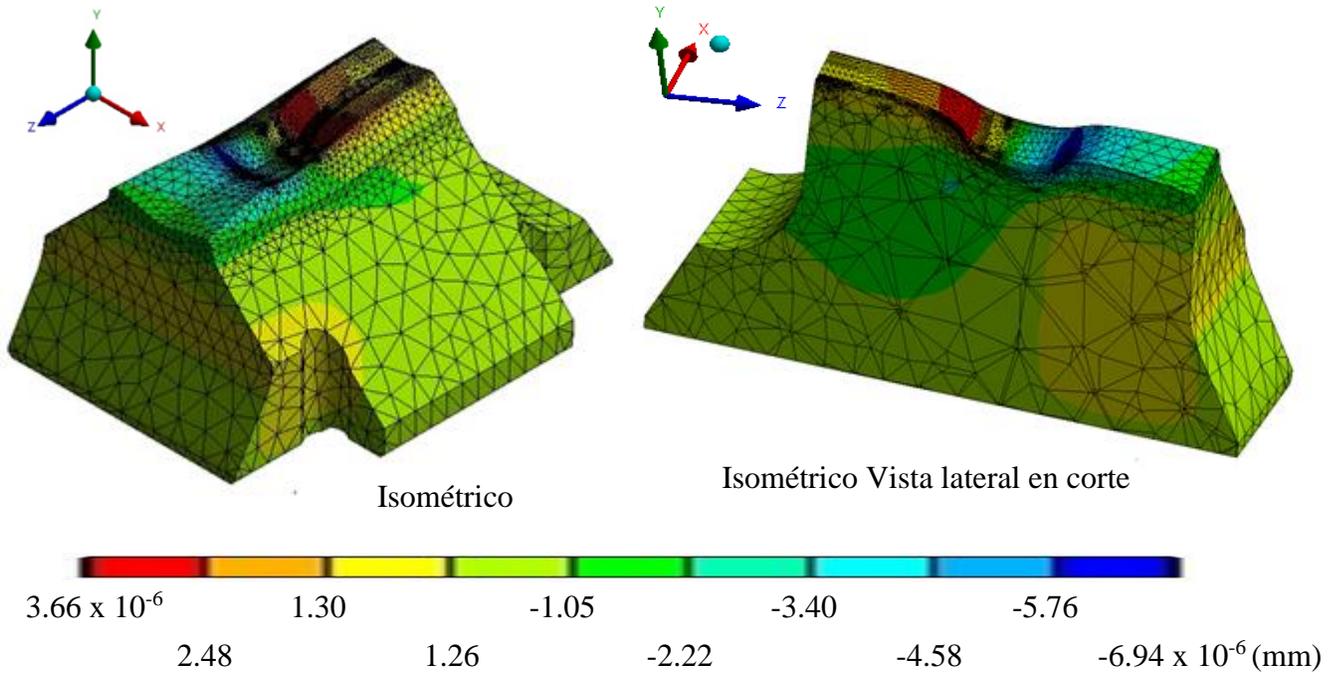


Figura III.24.- Desplazamiento en el eje Z martillo tipo A

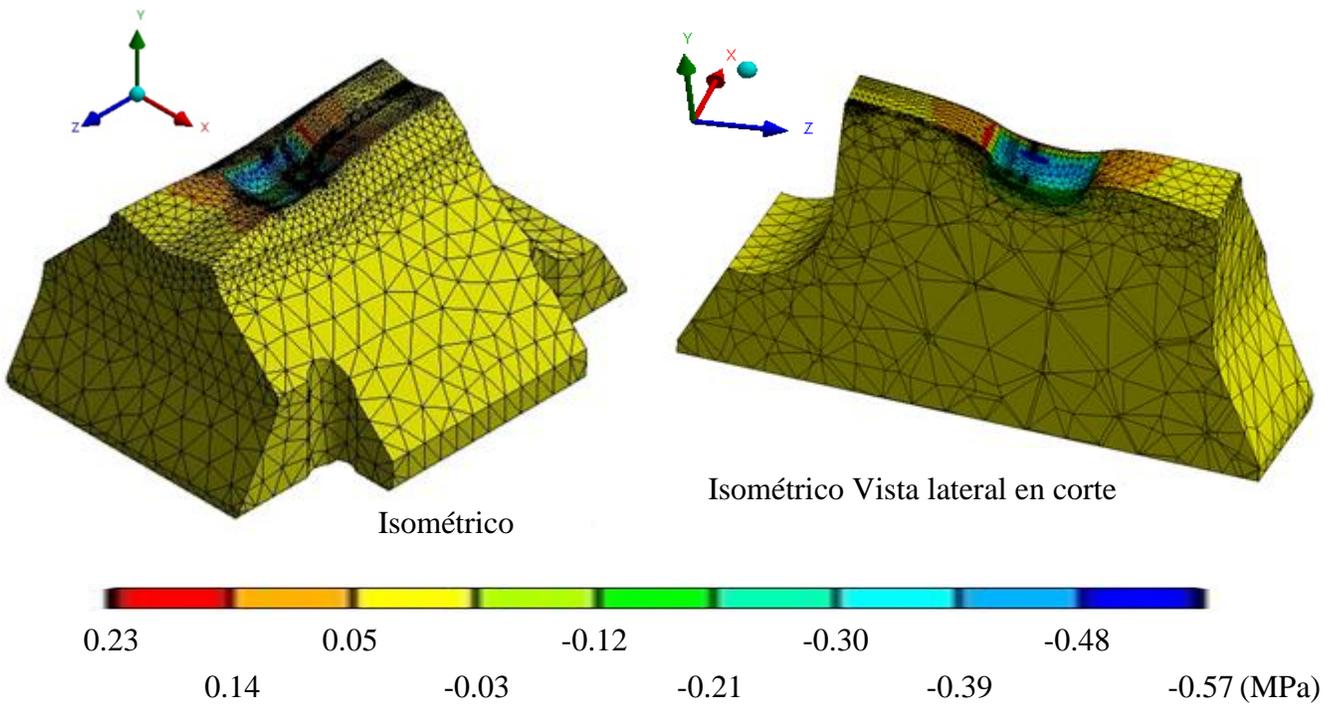


Figura III.25.- Máximo esfuerzo principal martillo tipo A

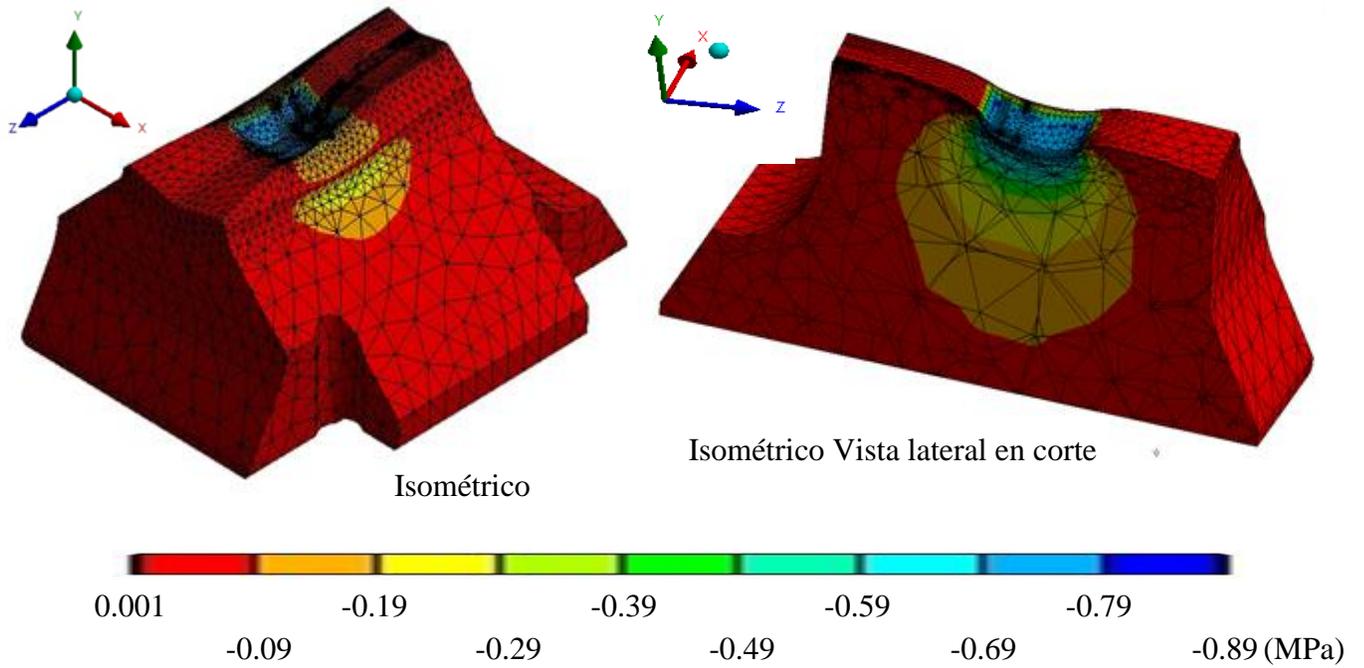


Figura III.26.- Mínimo esfuerzo principal martillo tipo A

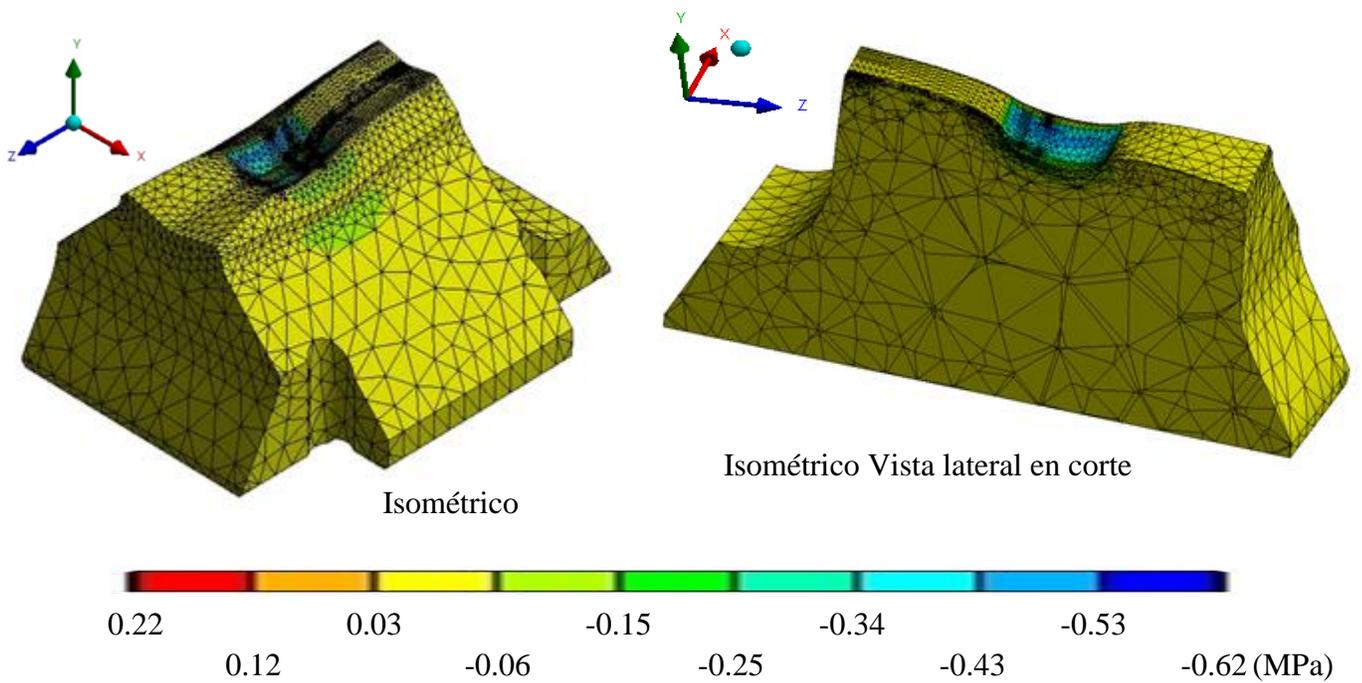


Figura III.27.- Esfuerzo normal martillo tipo A

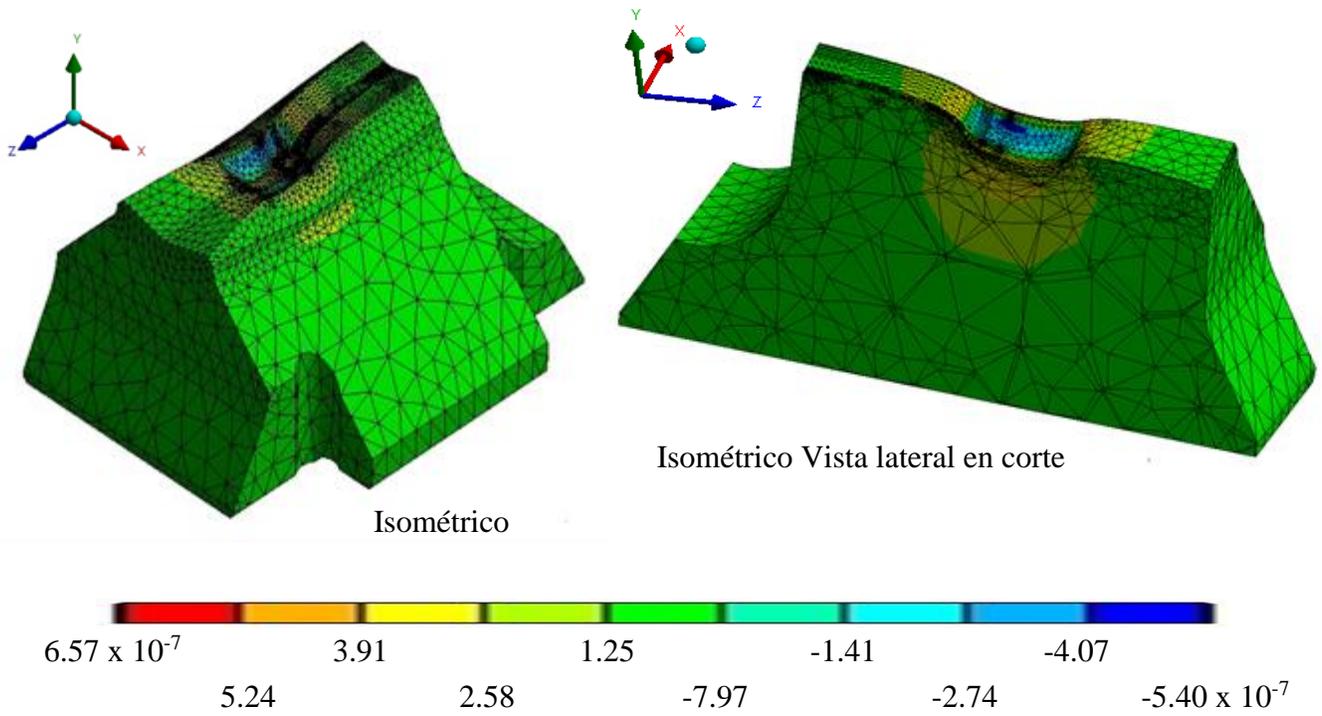


Figura III.28.- Máxima deformación unitaria martillo tipo A

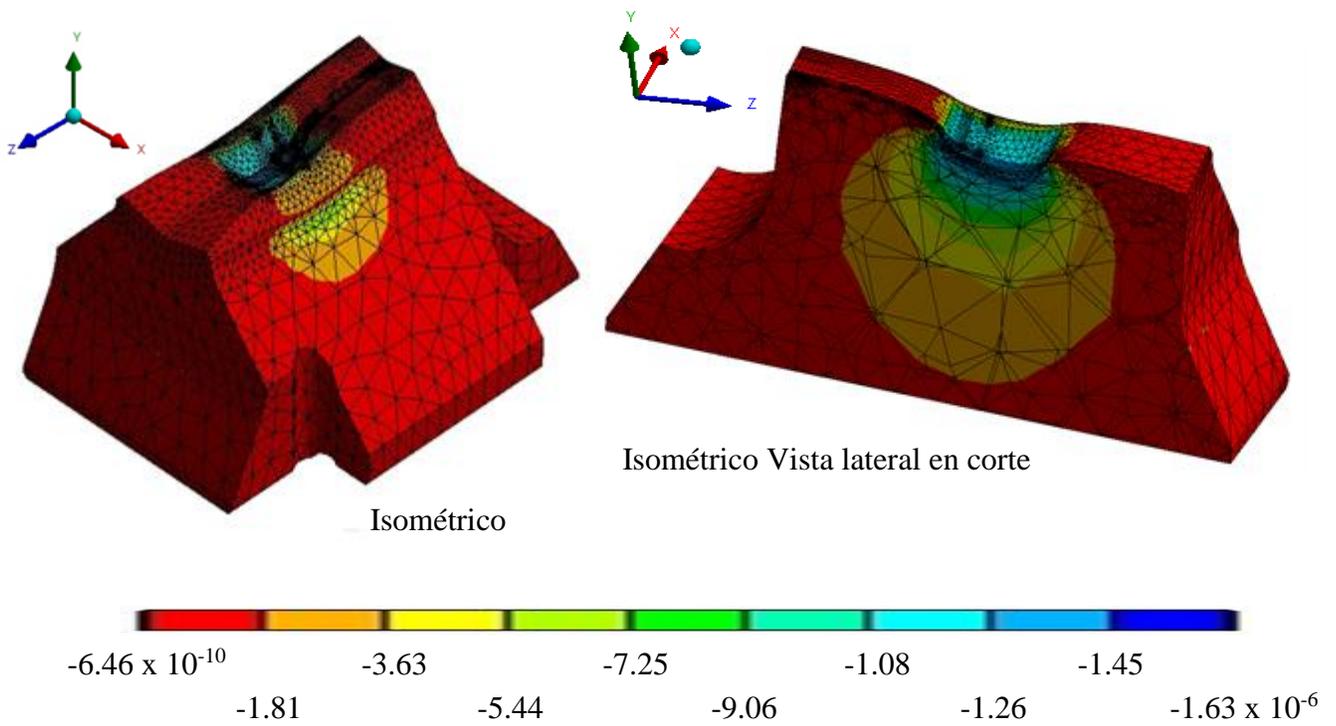


Figura III.29.- Mínima deformación unitaria martillo tipo A

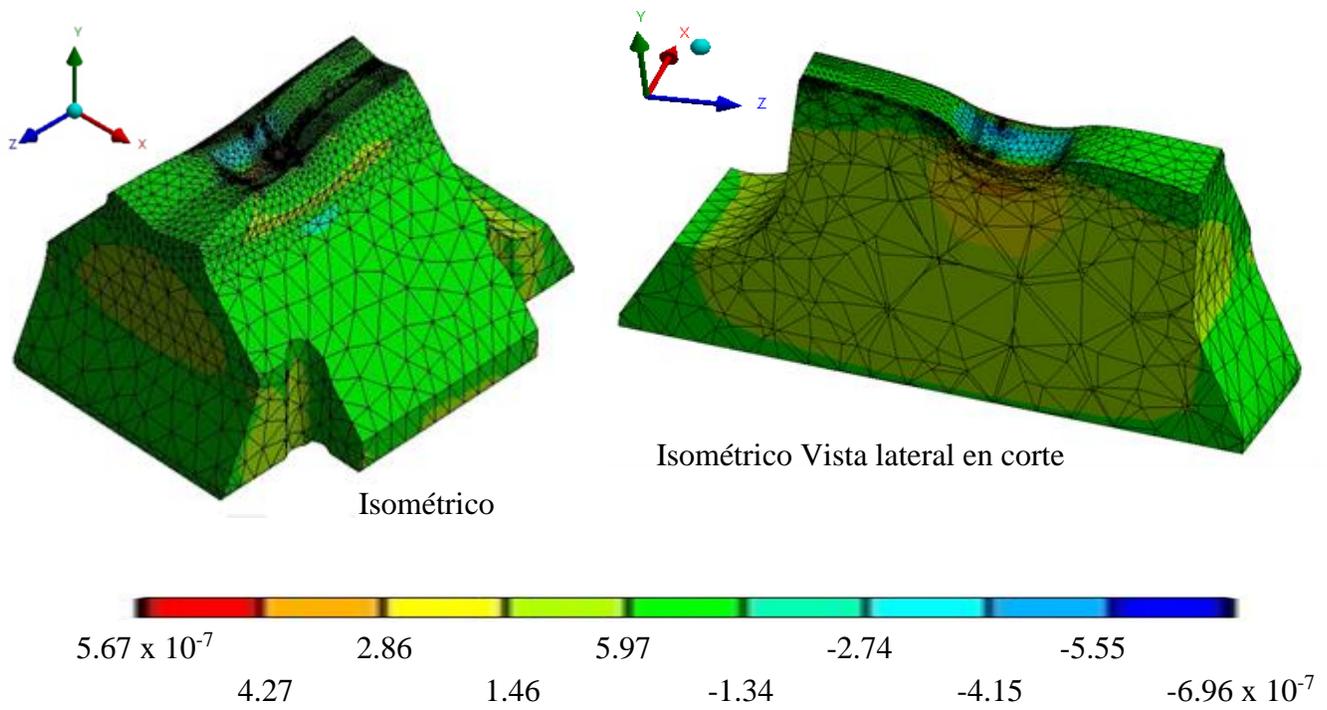


Figura III.30.- Deformación unitaria normal martillo tipo A

Resultado del análisis numérico correspondiente al martillo de forjado tipo B.

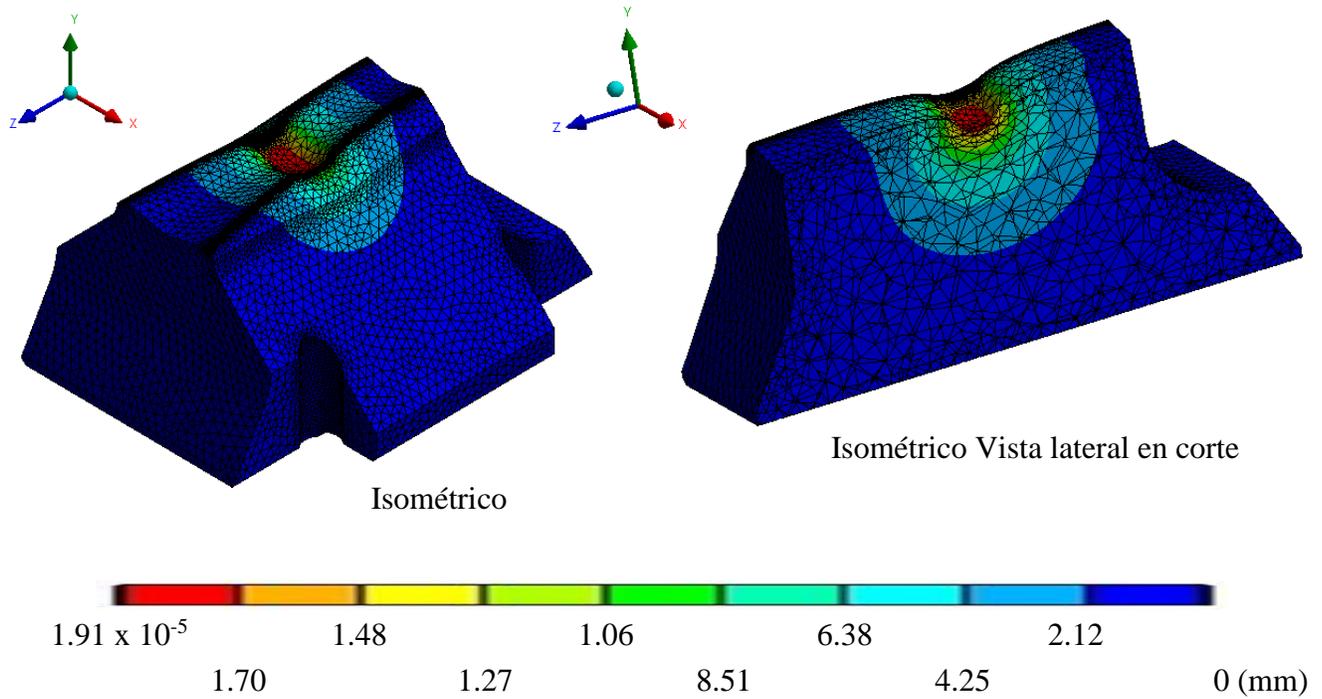


Figura III.31.- Desplazamiento total martillo tipo B

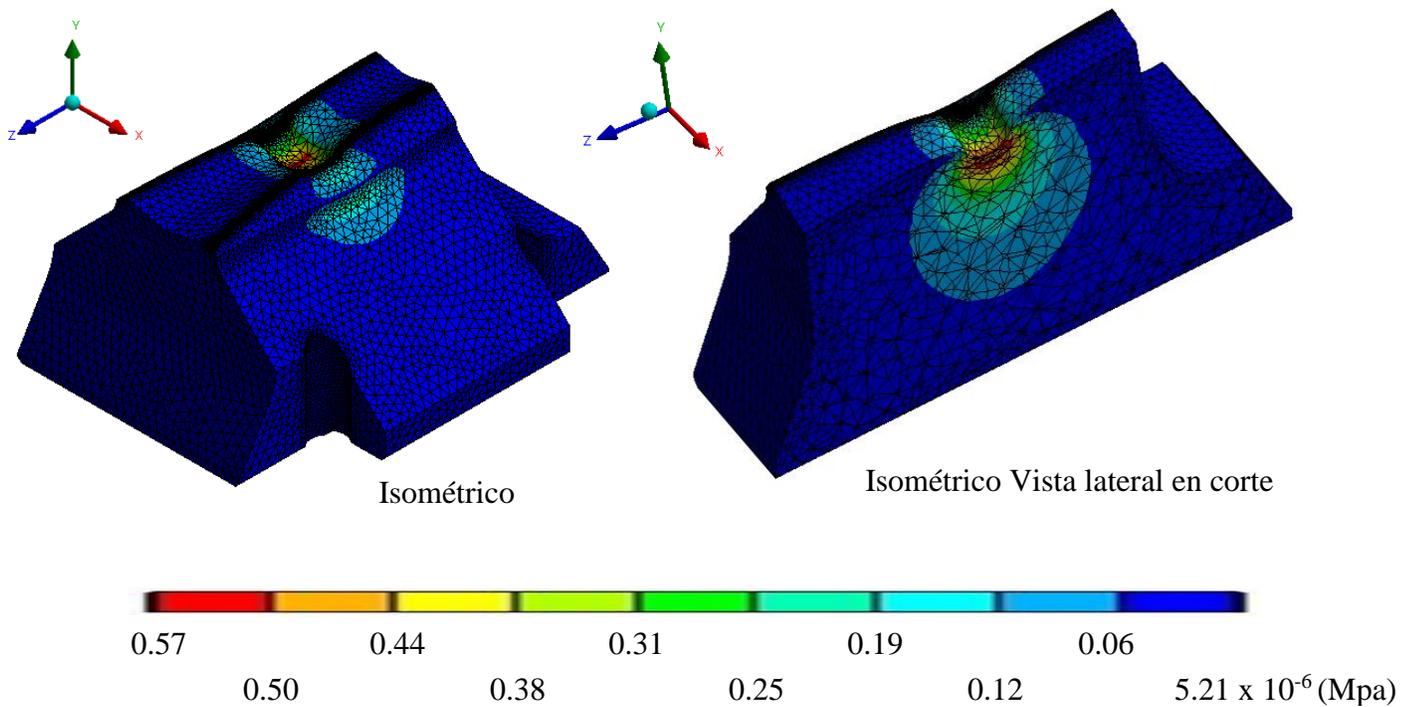


Figura III.32.- Esfuerzos de *Von Mises* Martillo tipo B

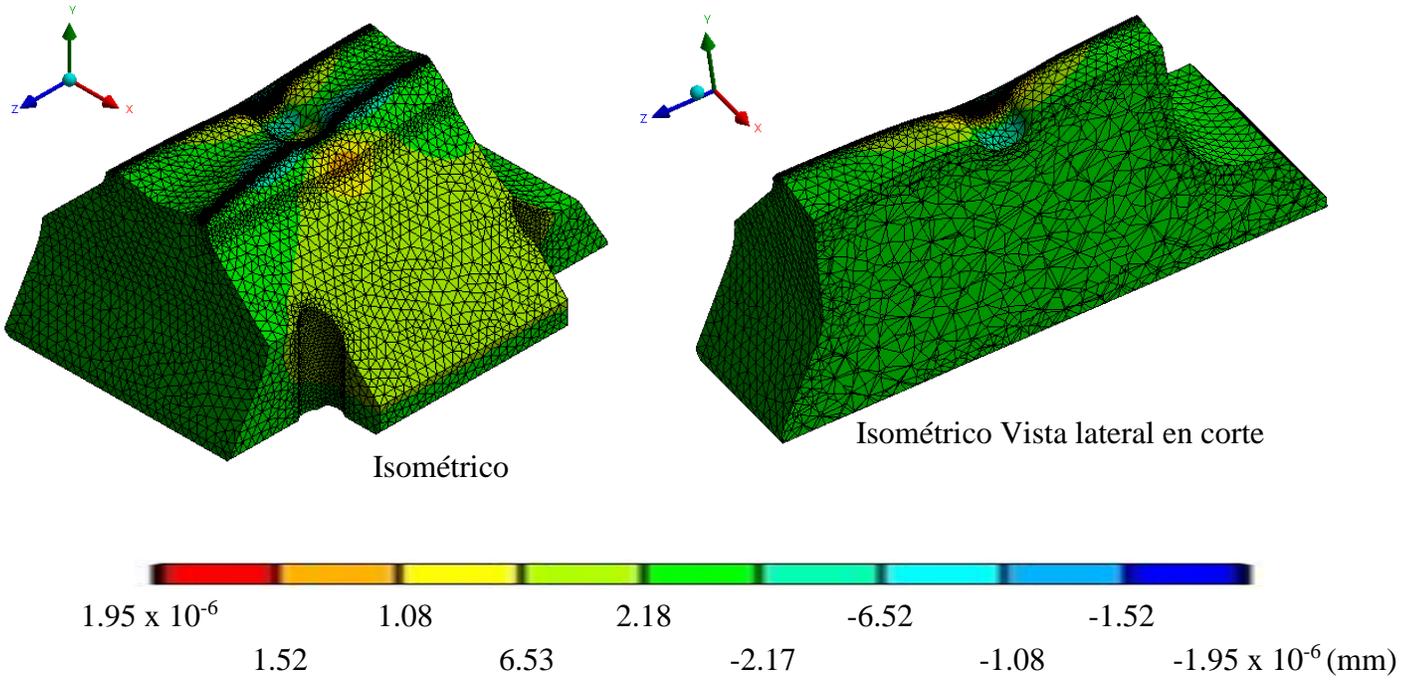


Figura III.33.- Desplazamiento en el eje X martillo tipo B

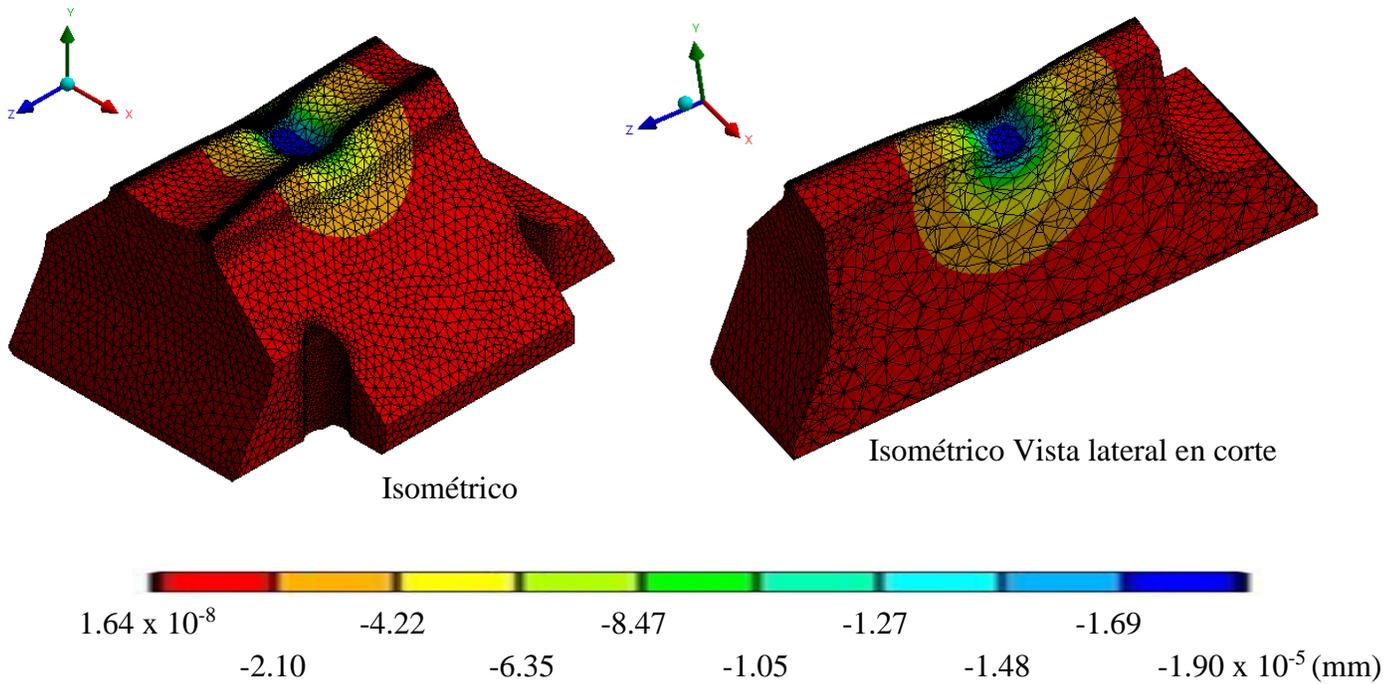


Figura III.34.- Desplazamiento en el eje Y martillo tipo B

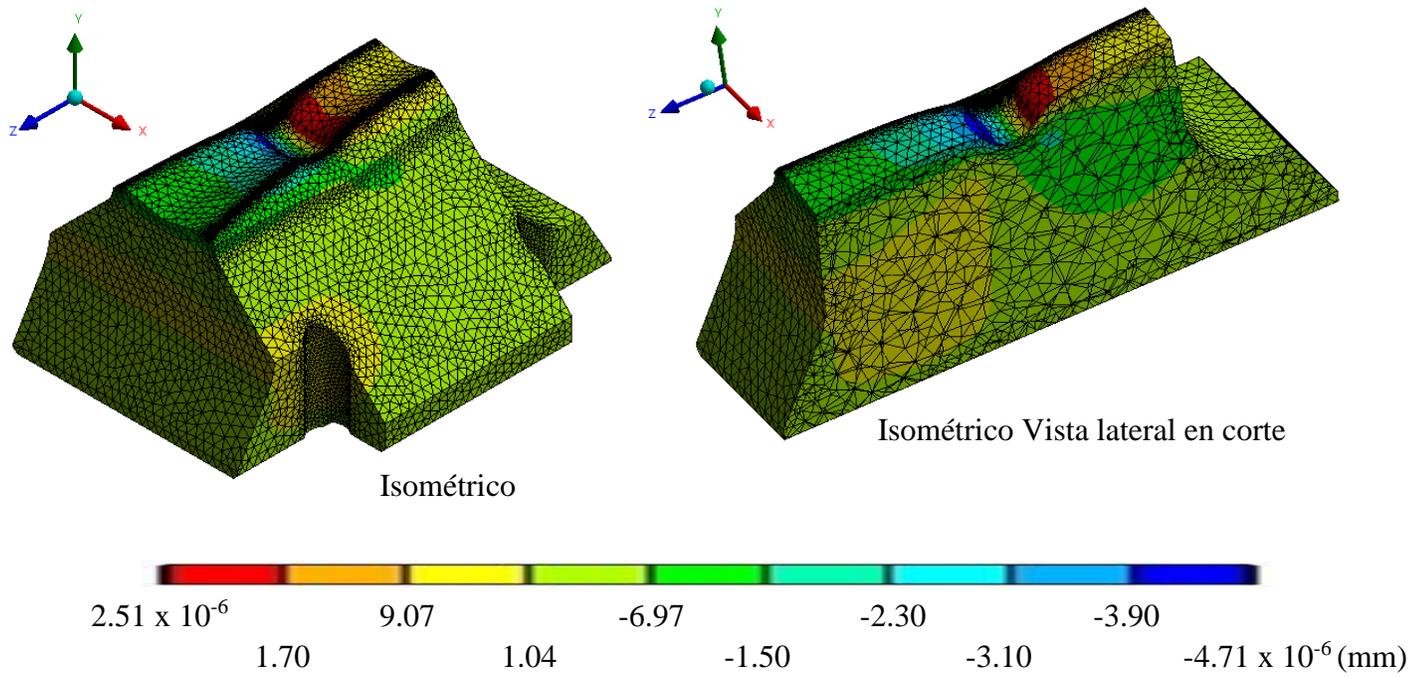


Figura III.35.- Desplazamiento en el eje Z martillo tipo B

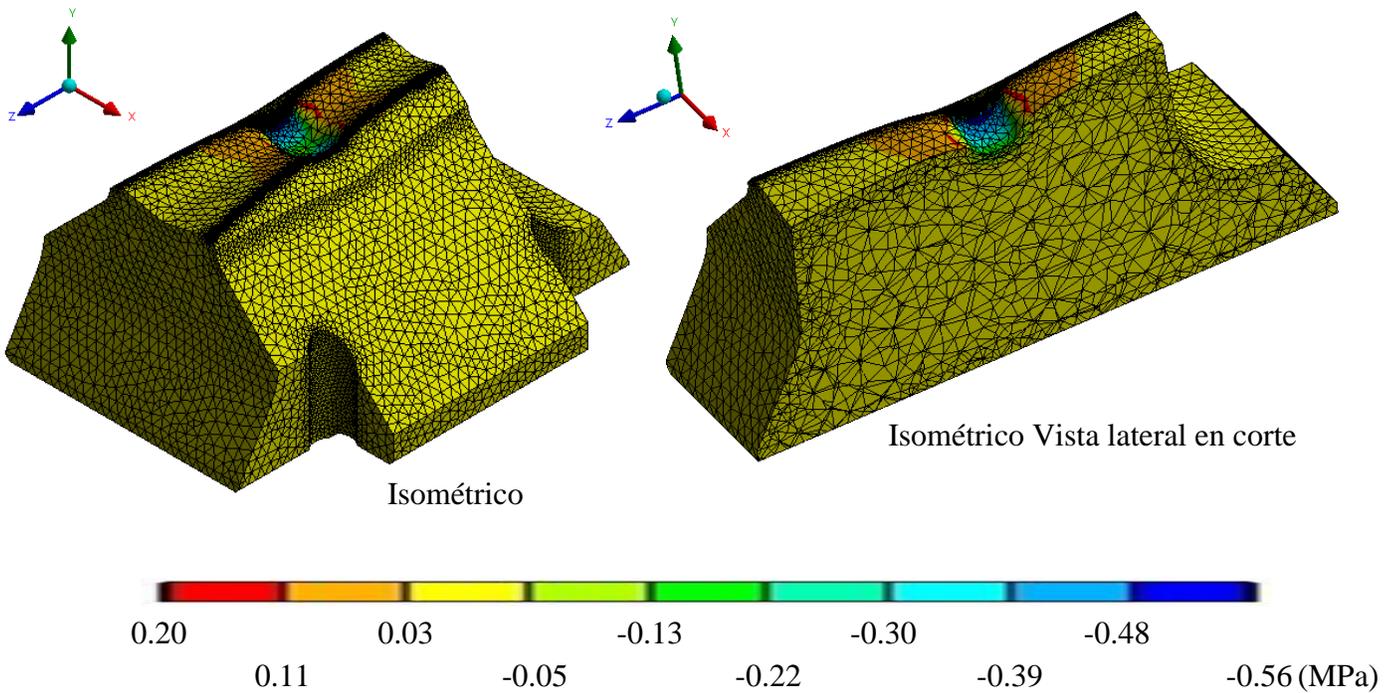


Figura III.36.- Máximo esfuerzo principal martillo tipo B

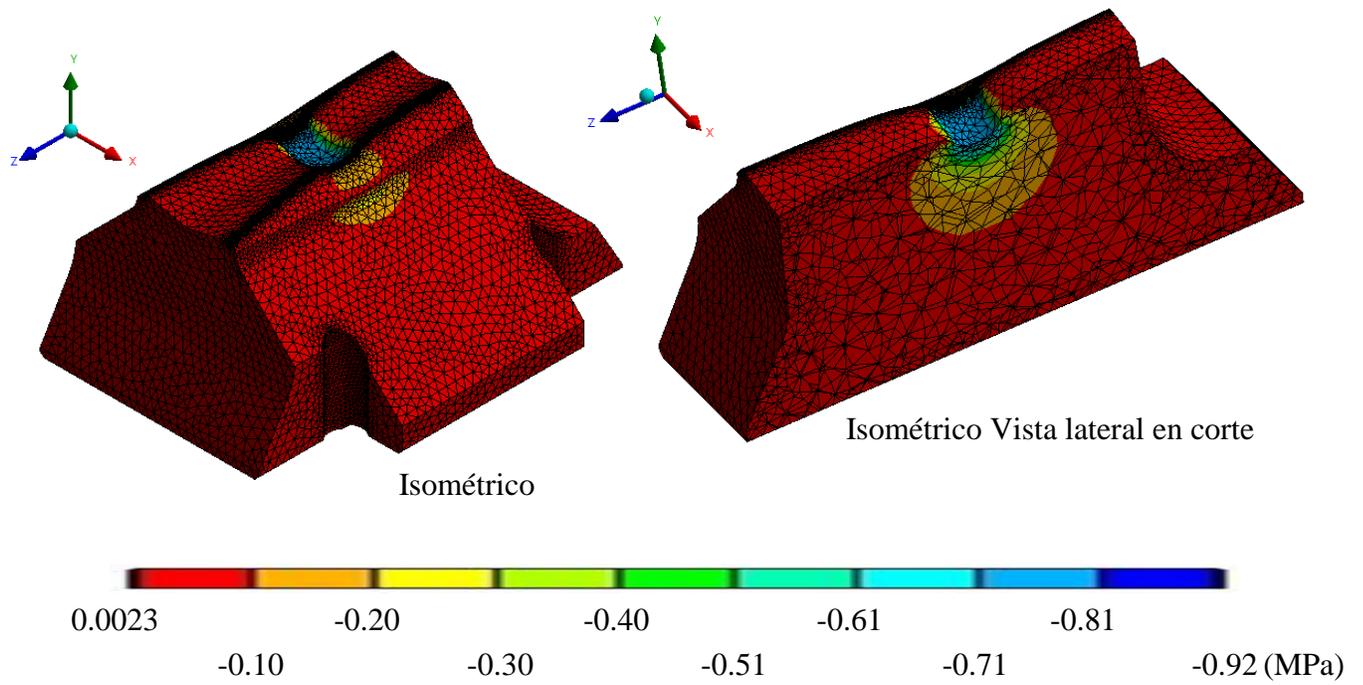


Figura III.37.- Mínimo esfuerzo principal martillo tipo B

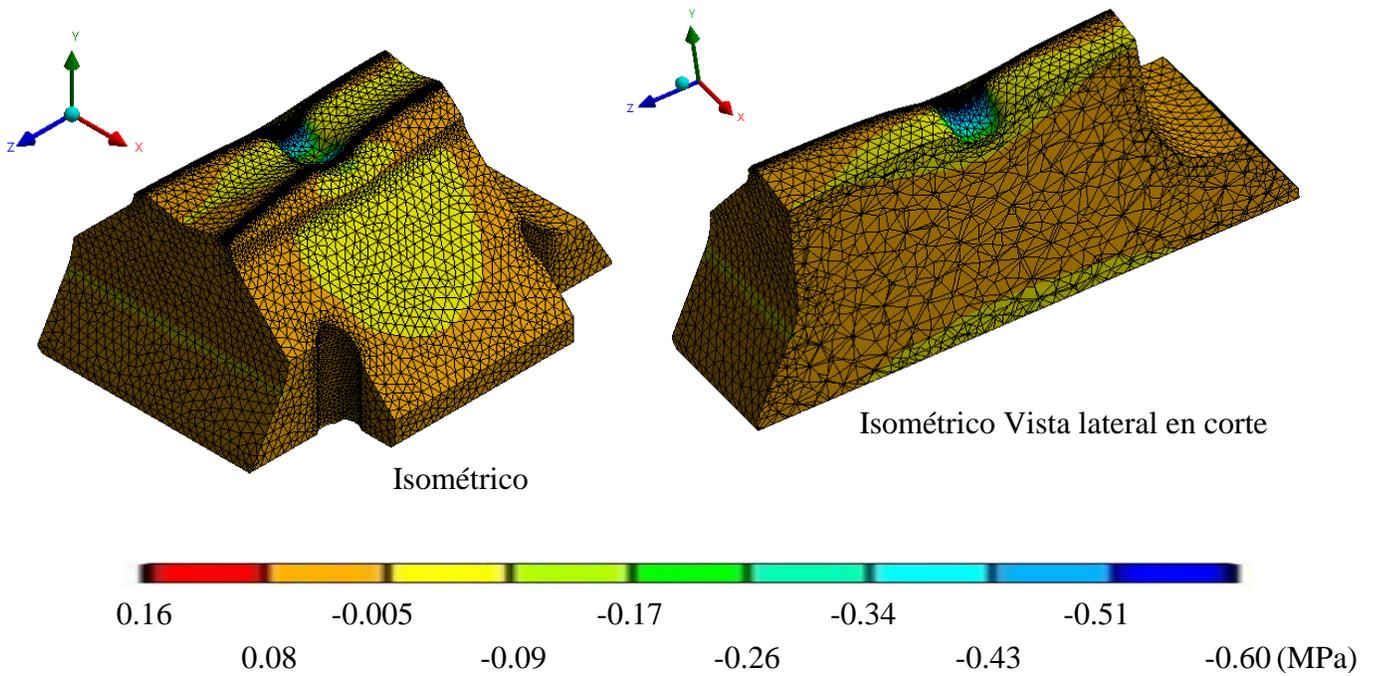


Figura III.38.- Esfuerzo normal martillo tipo B

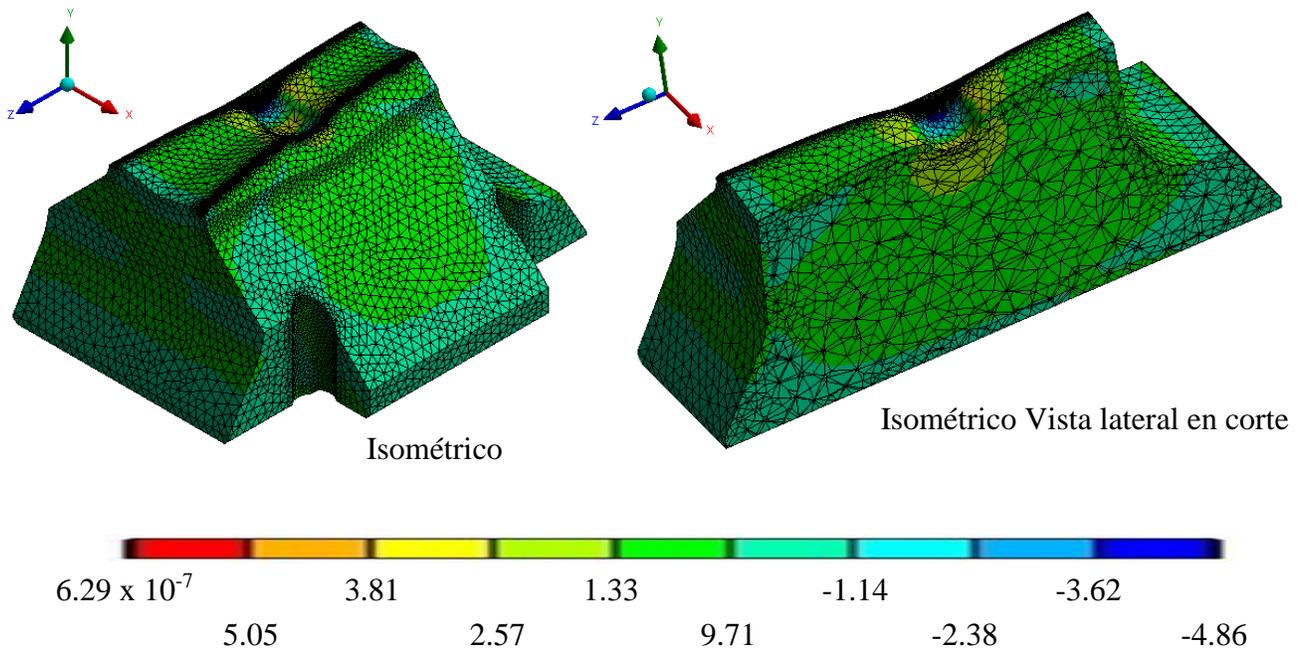


Figura III.39.- Máxima deformación unitaria martillo tipo B

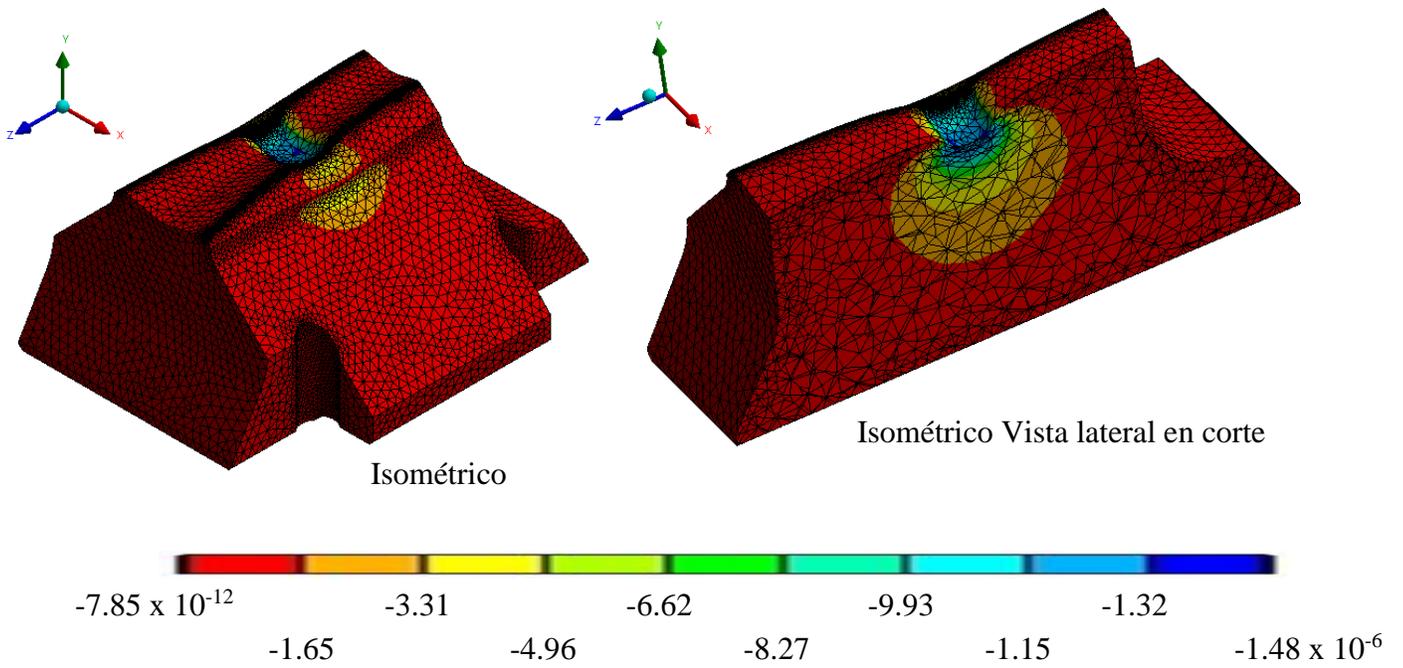


Figura III.40.- Mínima deformación unitaria martillo tipo B

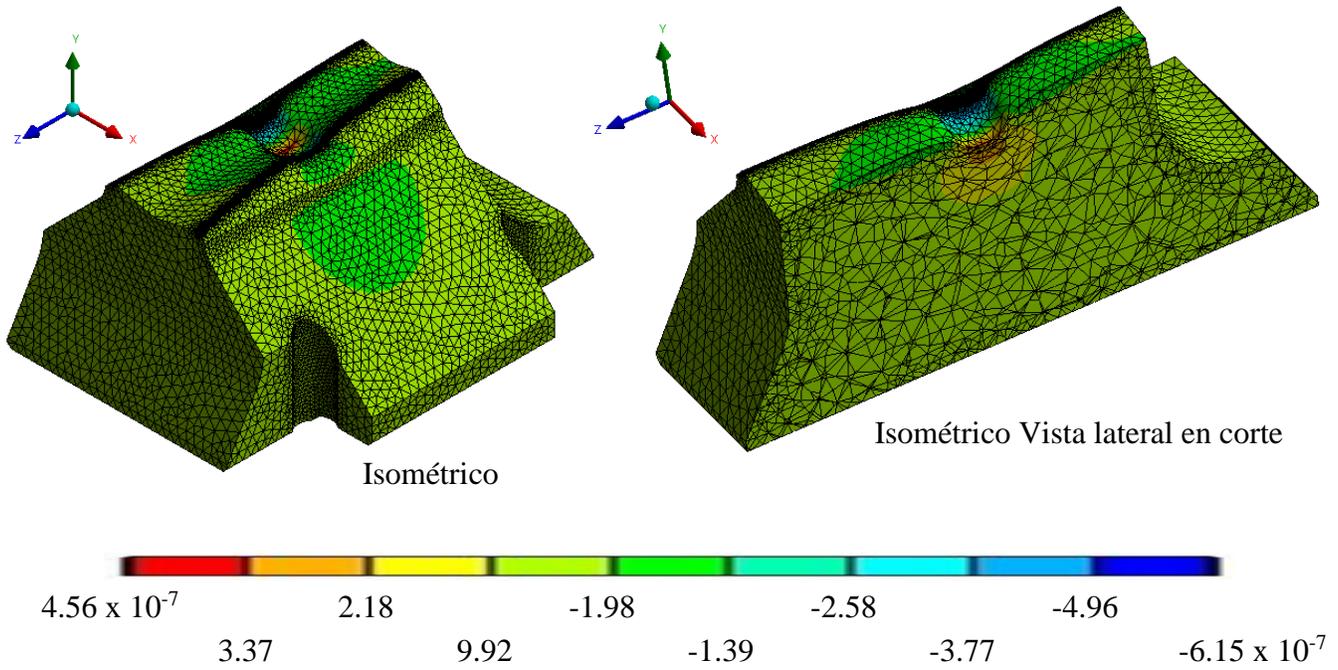


Figura III.41.- Deformación unitaria normal martillo tipo B

III.6.1.- Análisis de resultados del modelo

Se realizaron tres análisis de los martillos de forjado con cargas de 750 kN (0.75 MPa) para lo que se modificó el control de discretizado en la zona del perfil angulado en los tres casos. Con lo que se observó que existiera la convergencia en los resultados según se controló la malla en el área mencionada. Se obtuvieron resultados para esfuerzos de *Von Mises*, desplazamientos en los ejes X, Y y Z, deformaciones unitarias. Además de los esfuerzos principales.

Desplazamiento total (mm)	Desplazamiento en el eje X (mm)	Desplazamiento en el eje Y (mm)
0,000025391	2,5659E-06	0
0,000025361	2,6973E-06	0
0,000025386	2,6259E-06	0
Esfuerzos Von Mises		
(MPa)	Max esfuerzo principal (MPa)	Min esfuerzo principal (MPa)
0,59182	0,18634	0,00070535
0,60907	0,23061	0,0016838
0,57176	0,23948	0,00041798
Max deformación unitaria		
unitaria	Min deformación unitaria	Deformación unitaria Normal
5,2788E-07	-3,7175E-10	3,6462E-07
6,5742E-07	-6,4659E-10	5,6777E-07
5,7394E-07	-3,0602E-10	3,8657E-07
Desplazamiento en el eje Z (mm)		
0,00000359		
3,6607E-06		
3,7186E-06		

Desplazamiento en el eje Z (mm)

0,00000359

3,6607E-06

3,7186E-06

Caso 1
 Caso 2
 Caso 3

Esfuerzo normal(MPa)
0,036537
0,22189
0,090994

Tabla III.2.- Valores obtenidos por análisis numérico en los tres casos de estudio del martillo de forja tipo “A”

Desplazamiento total (mm)	Desplazamiento en el eje X (mm)	Desplazamiento en el eje Y (mm)
0,000019151	1,9593E-06	0
0,000019154	1,8343E-06	0
0,000019152	1,75E-06	0

Esfuerzos Von Mises (MPa)	Max esfuerzo principal (MPa)	Min esfuerzo principal (MPa)
0,57115	0,20258	0,0023559
0,56723	0,18077	0,012589
0,58551	0,18492	0,0010528

Max deformación unitaria	Min deformación unitaria	Deformación unitaria Normal
6,2962E-07	-7,8596E-12	4,5688E-07
4,9985E-07	-1,4577E-10	4,0886E-07
4,7392E-07	-1,6559E-10	3,9608E-07

Desplazamiento en el eje Z (mm)	
2,5123E-06	 Caso 1
2,52E-06	 Caso 2
2,4854E-06	

Esfuerzo normal(MPa)
0,16563
0,046394
0,034895

Tabla III.3.- Valores obtenidos por análisis numérico en los tres casos de estudio del martillo de forja tipo “B”

Se muestran los valores máximos obtenidos en los tres casos de estudio ya que son estos los de particular importancia para el análisis del estado de esfuerzos actual de los martillos de forjado.

III.6.1.2.- Graficas correspondientes al martillo tipo A

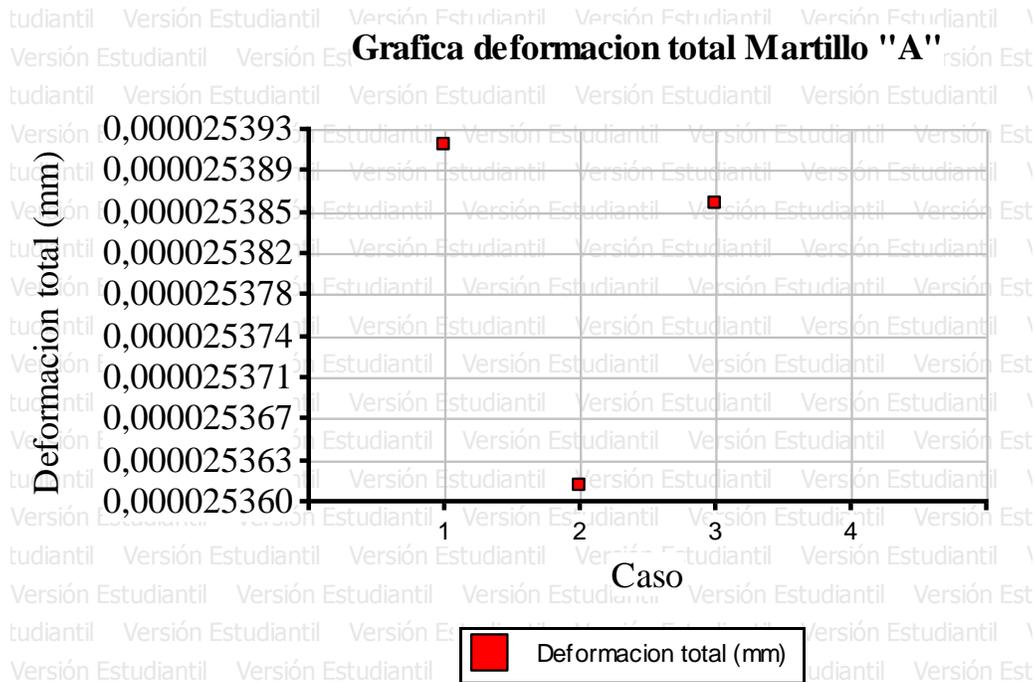


Figura III.42.- Grafica de deformaciones totales martillo tipo “A”

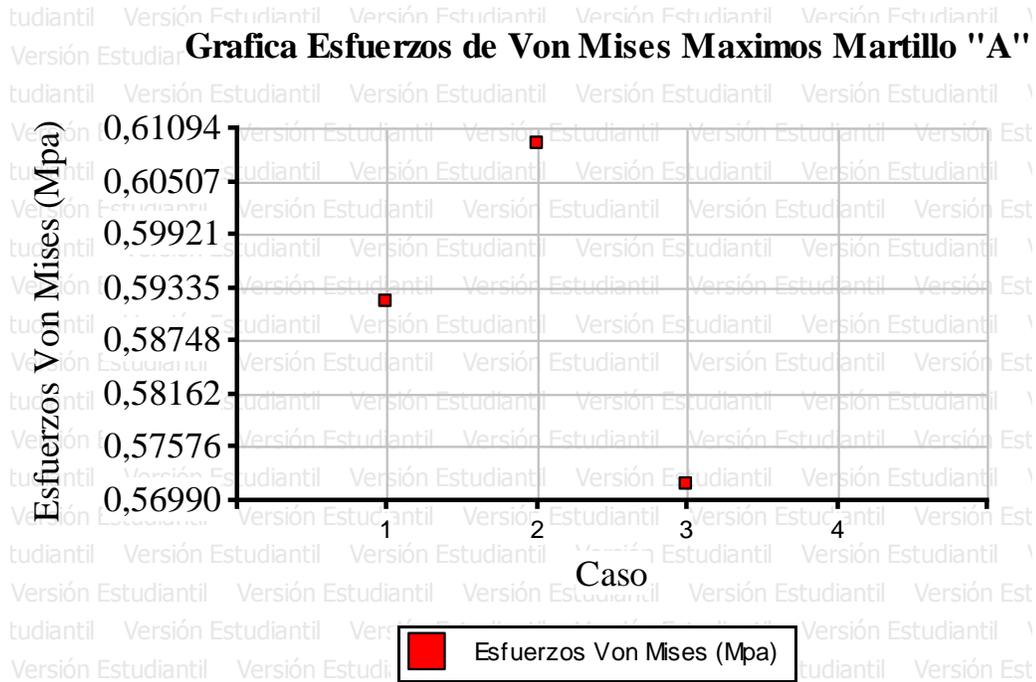


Figura III.43.- Grafica de esfuerzos de Von Mises martillo tipo “A”

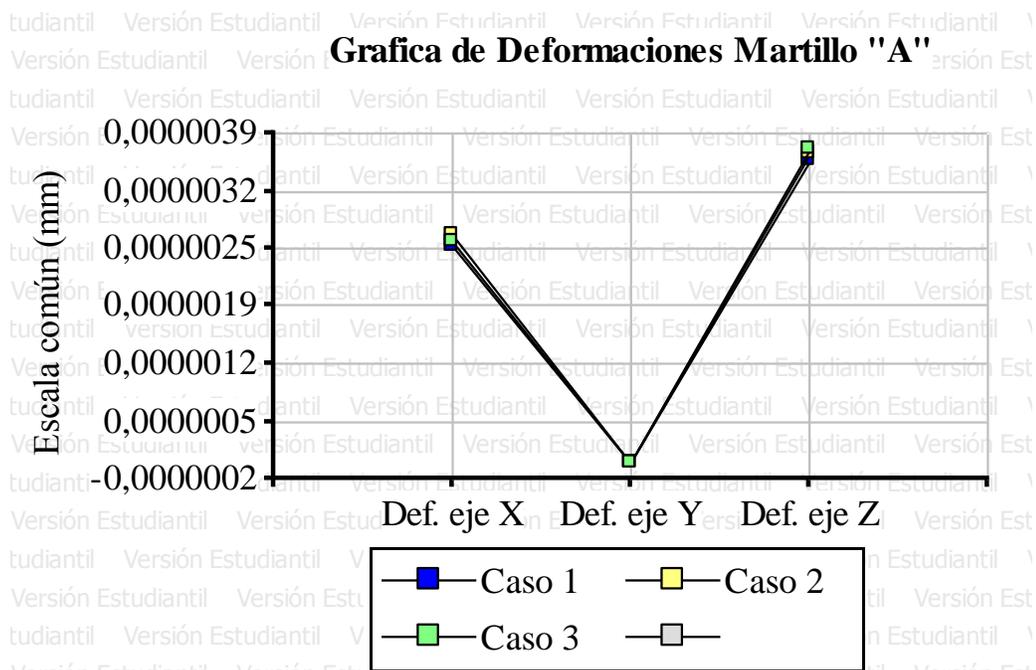


Figura III.44.- Grafica de deformaciones en los ejes X, Y, Z. martillo tipo “A”

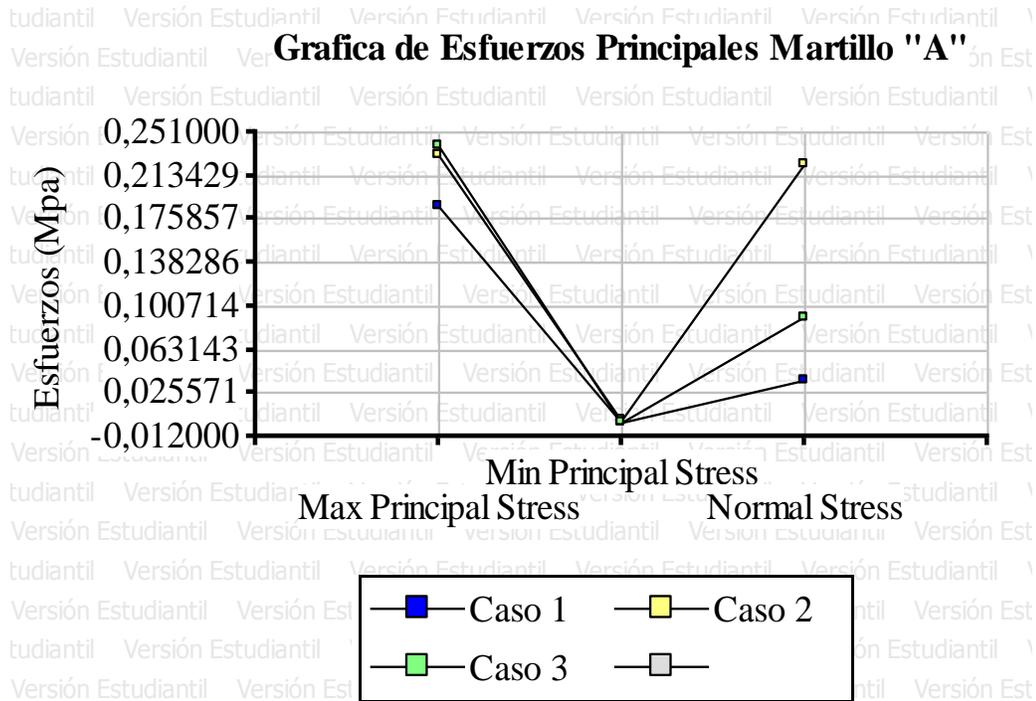


Figura III.45.- Grafica de esfuerzos principales martillo tipo "A"

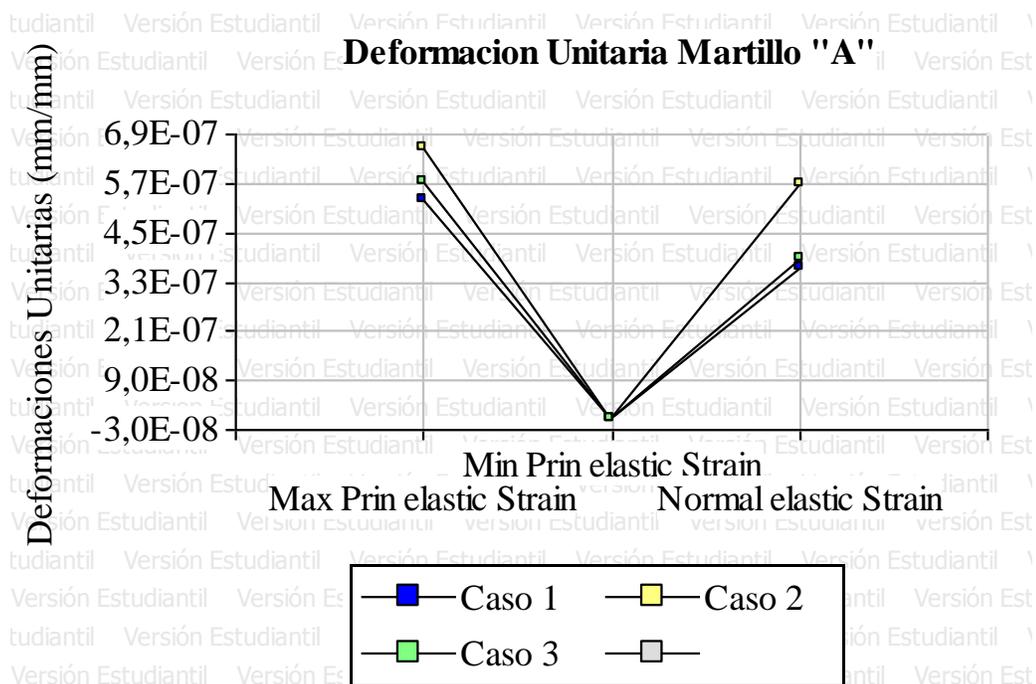


Figura III.46.- Grafica de deformaciones unitarias martillo "A"

Variables	Casos	Media	Desviación estándar
Deformación Total (mm)	3	0,00002538	0,00000002
Deformación en eje X (mm)	3	0,00000263	0,00000007
Deformación en eje Y (mm)	3	0,00000000	0,00000000
Deformación en eje Z (mm)	3	0,00000366	0,00000006
Esfuerzos de Von Mises (MPa)	3	0,59088333	0,01867263
Max. Esfuerzo Principal (MPa)	3	0,21881000	0,02846744
Min. Esfuerzo Principal (MPa)	3	0,00093571	0,00066361
Esfuerzo Normal (MPa)	3	0,11647367	0,09526722
Max. Deformación Unitaria	3	0,00000059	0,00000007
Min. Deformación Unitaria	3	0,00000000	0,00000000
Deformación Unitaria normal	3	0,00000044	0,00000011

Tabla III.4.- Valores promedio y desviación estándar de los casos analizados, correspondientes al martillo tipo A

III.6.1.3.- Graficas correspondientes al martillo tipo B

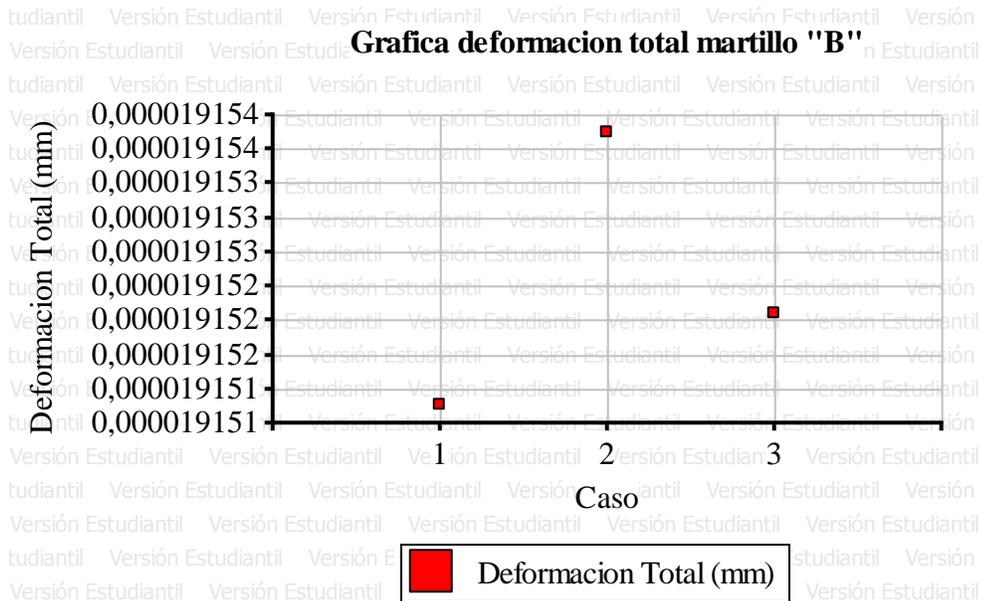


Figura III.47.- Grafica de deformaciones totales martillo tipo "B"

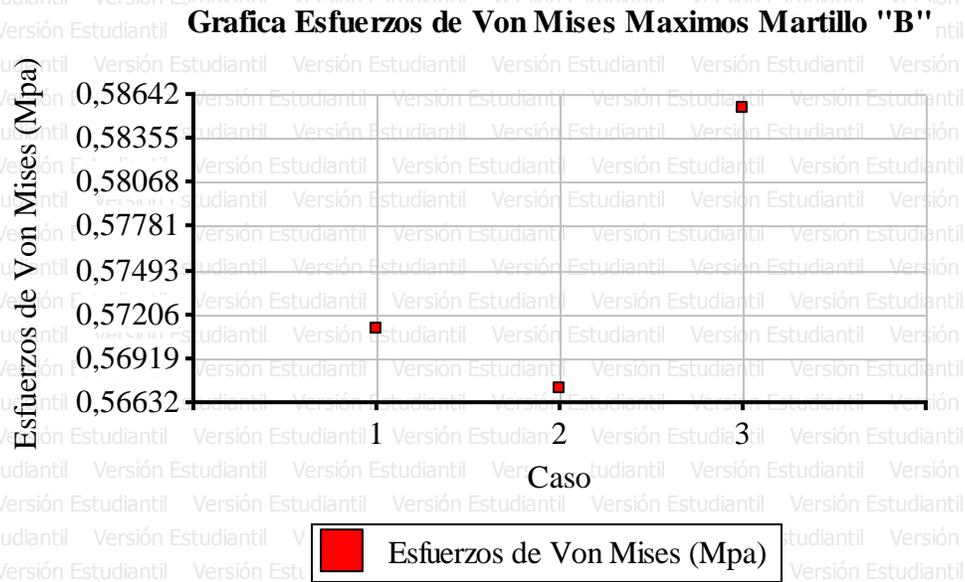


Figura III.48.- Grafica de esfuerzos de Von Mises martillo tipo “B”

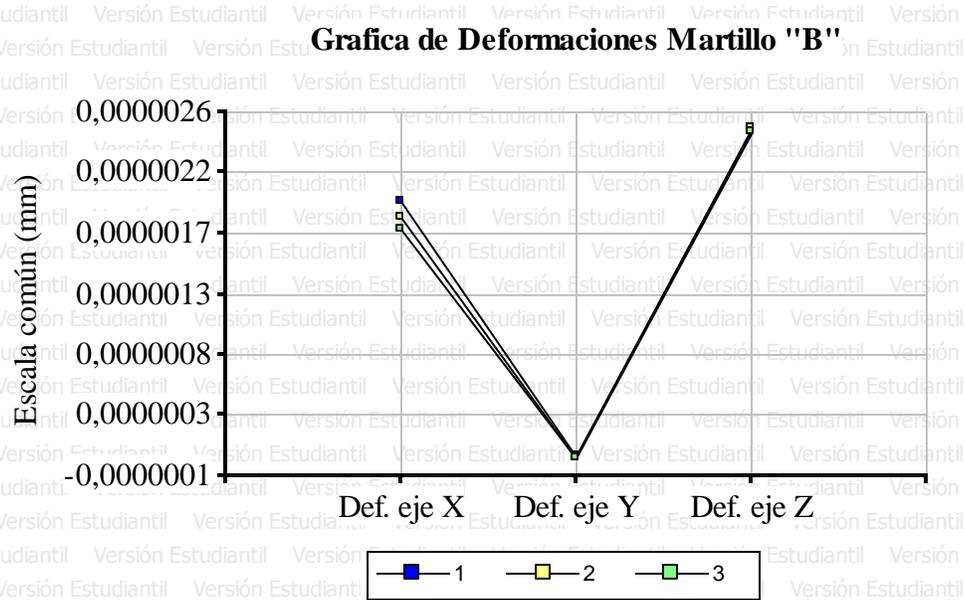


Figura III.49.- Grafica de deformaciones en los ejes X, Y, Z. martillo tipo “B”

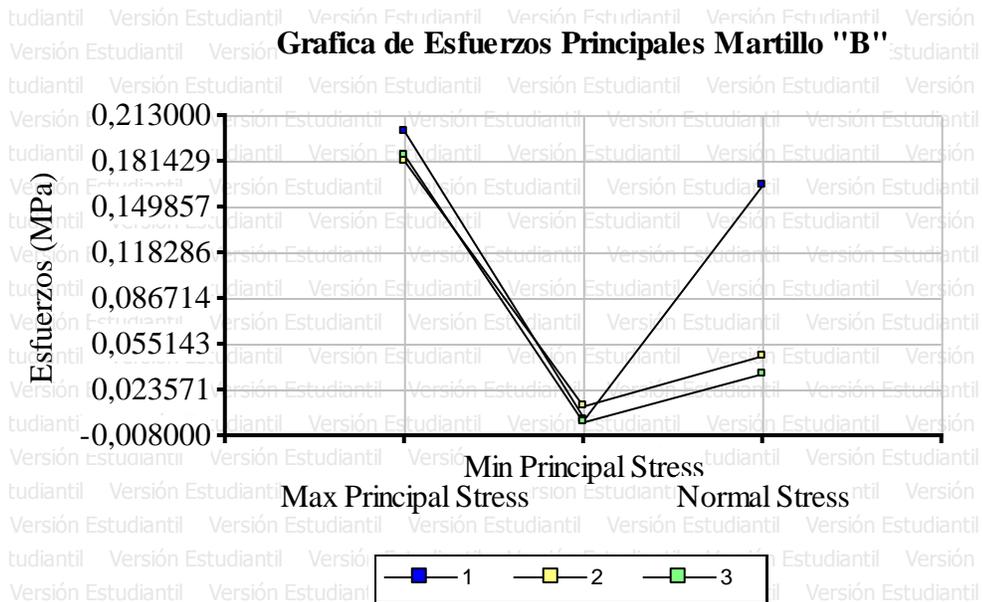


Figura III.50.- Grafica de esfuerzos principales martillo tipo "B"

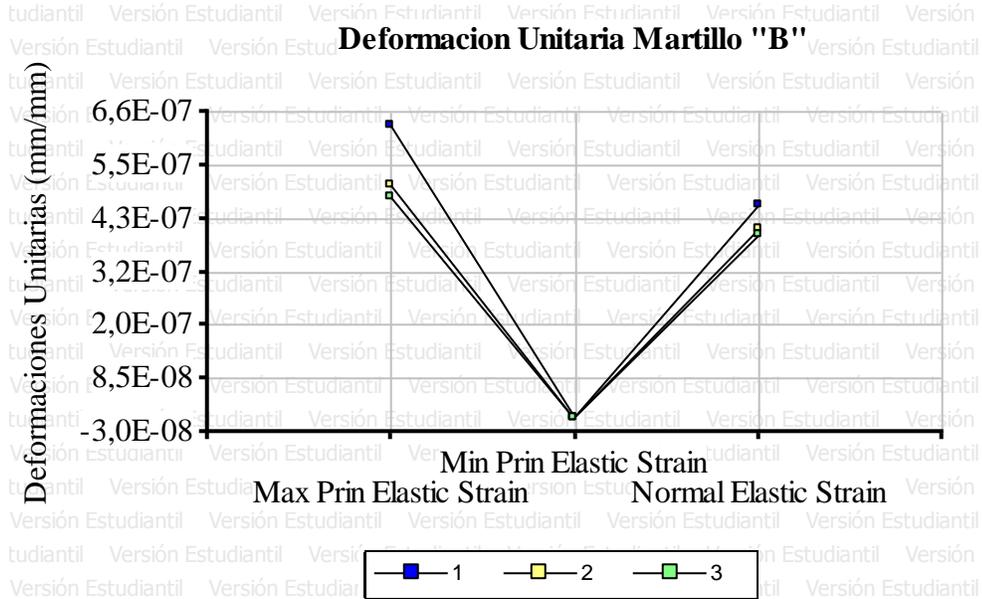


Figura III.51.- Grafica de deformaciones unitarias martillo "B"

Variables	Casos	Media	Desviación estándar
Deformación Total (mm)	3	0,00001915	1,5275E-09
Deformación en eje X (mm)	3	0,00000185	0,00000010
Deformación en eje Y (mm)	3	0,00000001	0,00000001
Deformación en eje Z (mm)	3	0,00000250	0,00000002
Esfuerzos de Von Mises (MPa)	3	0,57463000	0,00962405
Max. Esfuerzo Principal (MPa)	3	0,18942333	0,01158141
Min. Esfuerzo Principal (MPa)	3	0,00533257	0,00631794
Esfuerzo Normal (MPa)	3	0,08230633	0,07238910
Max. Deformación Unitaria	3	0,00000053	0,00000008
Min. Deformación Unitaria	3	-1,0641E-10	8,5918E-11
Deformación Unitaria normal	3	0,00000042	0,00000003

Tabla III.5.- Valores promedio y desviación estándar de los casos analizados, correspondientes al martillo tipo B

Se muestran los resultados obtenidos en los 3 análisis dando prioridad a los valores máximos en los tres casos. además de mostrar el valor promedio y la desviación estándar (Tabla III.4 y III.5), ya que con estos valores que representan el estado de esfuerzos actual de la herramienta se procederá a suavizar el perfil angulado de los martillos, lo que gradualmente modificará la geometría y por lo tanto se buscará reducir y optimizar el estado de esfuerzos de los martillos de forjado. se considera además que, en el caso del análisis numérico debido al control de malla aplicado a zonas donde existen aristas y redondeos, así como en el área de las aristas del perfil angulado se logra mayor convergencia en los resultados obtenidos.

En base a los estudios realizados con anterioridad sobre el diseño y desarrollo de herramientas para fabricación de cañones de armamento [III.10], y la manera en que interactúan los martillos de forjado con las herramientas de suajeado se valida el presente estudio en la obtención del estado de esfuerzos al que se encuentra sometida la herramienta en este tipo de operaciones.

La siguiente fase del estudio consistirá en modificar el perfil de trabajo de los martillos de forjado a fin de reducir los esfuerzos y desplazamientos en esa zona especialmente, con lo que se buscará además de la optimización de la herramienta una redistribución de esfuerzos en el área del perfil angulado de los martillos. trabajo que se desarrollará en el siguiente capítulo.

III.7.- Sumario

En este capítulo se explicó el proceso de forjado en frío con martillo para la fabricación de componentes de seguridad, para el caso de este estudio, de cañones de armamento por lo que se menciona el tipo de forjado tanto radial como rotativo, así como sus ventajas y desventajas. Por otro lado, se puso énfasis en el material de los martillos de forja que corresponde a un carburo y la manera en que se fabrican estas herramientas. Se explica de manera breve la manufactura por medio de la metalurgia de polvos y los diferentes procesos que sigue este método, así también se habló de las diferentes fallas que pueden tener los martillos de forjado, y la manera en que se clasifican los diferentes tipos de falla que se pueden presentar debido a los ciclos de trabajo y las cargas a las que se encuentran sujetos. Se finaliza con el análisis por medio del elemento finito, para determinar los esfuerzos y desplazamientos a los que se encuentran sometidos los martillos de forjado, se hace énfasis de las principales ventajas del uso de un software especializado para el estudio, así como de los usos comerciales y en la industria que se dan a este tipo de programas para auxiliarse en el diseño de componentes y máquinas. Se describen también las propiedades del material de los martillos, módulo de *Young* y relación de *poisson*, se muestra el modelo de ambos martillos la aplicación de carga y las restricciones aplicadas. En el siguiente capítulo se estudiará a detalle como modificar la geometría del perfil de trabajo de los martillos a fin de reducir tanto los esfuerzos como los desplazamientos en dichas herramientas.

III.8.- Referencias

- 1.- Cedeño-Verduzco, V. F., *Determinación del Comportamiento Mecánico de Materiales Empleados en los Procesos de Forjado y Torneado*, Ph. D. Tesis, SEPI ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, pp 55, 56, 68-72, 91-93, 2015.
- 2.- James Higley, Vern Briggs, “*Notes on Hammer Forged Barrels*”, Precision Shooting. 2007.
- 3.- Skaupy, Franz Vericad, Juan Bautista., *Cerámica de los metales: la fabricación de piezas metálicas a partir de metales en polvo: sinterización de los metales y pulvimetalurgia*. Reverté, 1955.
- 4.- Catalogo No. 272 ES 11.12, “*Hard material matters*”, CERATIZIT, Luxembourg Sarl Route de Holzem 101.
- 5.- Amador, S Talacchia J, and J Urcola., *Fabricación de Matrices de Corte Con Aceros Rápidos Para Herramientas Mediante Metalurgia de Polvos*, 927–45.1995
- 6.- Skaupy, Franz Vericad, Juan Bautista., *Cerámica de los metales: la fabricación de piezas metálicas a partir de metales en polvo: sinterización de los metales y pulvimetalurgia*. Reverté, 1955.
- 7.- Molera Solá, Pere. *Conformación Metálica*. Marcombo, 1991.
- 8.- Kalpakjian, S. y Schmid, S. R., *Manufactura; Ingeniería y Tecnología*. Quinta Edición, Editorial Pearson Prentice Hall, México, pp 483-504, 2008.
- 9.- Vern Briggs, James Higley, “*Hammer Forged Barrels*”, Precision Shooting. 2005.
- 10.- Cedeño-Verduzco, V. F., *Diseño y desarrollo de herramientas de suajeado para la fabricación de cañones de armamento*, M. en C. Tesis, SEPI ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, pp 90-98, 2010.
- 11.- Subsuelo, Hidrología D E L, *Introducción A Los Elementos Finitos*. “*Introduction the Elements Finites,*” no. 1982: 1–10, 2012
- 12.- celigueta-Lizarda, J. T., *Método de los elementos finitos para el análisis estructural*, Unicopia C.B., pp 1-8, 2011.
- 13.- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. *InfoStat versión 2017*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Capítulo IV

Optimización y resultados

IV.1.- Introducción

En la ingeniería, sobre todo en el diseño de elementos de máquinas o de componentes para integrar estas, se presenta un problema. el cual consiste en determinar que configuración geométrica puede llegar a ser la óptima para maximizar o minimizar ciertas funciones que deberán cumplir los componentes que integrarán estas máquinas. Además de que deberán cumplir con restricciones y condiciones de contorno para el problema que se presente esto aunado a los objetivos que se persiguen en el diseño y la fabricación, la solución a este problema se puede obtener por medio de la optimización de forma o por optimización topológica.

En el caso de la optimización de forma (Geométrica), esta consiste en la modificación de la geometría del dominio sin afectar la topología ya que al realizar este tipo de optimización se conserva la masa de la pieza que se esté trabajando lo que no crea huecos (Cavidades) en el interior de esta.

Si se usa la optimización por topología en este caso se controla de manera general el dominio ya que se modifica la topología de la pieza, esto permite obtener una configuración a partir de una morfología inicial. Pero en este caso si hay afectación a la masa del componente lo que crea cavidades en las zonas donde la pieza tenga menos afectaciones ocasionadas por el trabajo al que se somete ya sea por impacto, esfuerzos, desplazamientos etc.

En este capítulo se trabajará con la optimización de forma para determinar la configuración optima de los martillos de forjado que fueron estudiados previamente en el capítulo III. para lo cual se usará el estado de esfuerzos de estos, los cuales fueron obtenidos en el capítulo antes mencionado. El objetivo en este estudio es la modificación del perfil angulado de los martillos a fin de obtener una redistribución de esfuerzos por lo que no es de interés modificar la integridad estructural de los mismos.

Para este caso de estudio se usarán como variables a ser optimizadas los ángulos de entrada del perfil angulado de los martillos (función Objetivo), como restricciones se utilizarán los Esfuerzos de *Von Mises*, desplazamientos y deformaciones unitarias. Y como objetivos se espera obtener la minimización de los esfuerzos y desplazamientos, así como de las deformaciones unitarias en los martillos. Tomando en cuenta que solo se trabajara en una sola función objetivo que en este caso es representada por los ángulos de entrada de los herramientas se estará trabajando con optimización mono objetivo, ya que solo se busca modificar el perfil del herramental.

IV.2.- Métodos de optimización

Generalmente en el diseño de productos de ingeniería se involucra la optimización siendo esta una tarea compleja, ya que se deben maximizar o minimizar funciones objetivo con la finalidad de encontrar soluciones óptimas la mayoría de los problemas de ingeniería en la vida real tienen dos o más funciones a ser optimizadas y que son contradictorias entre sí, de ahí que se conozcan como problemas de optimización multiobjetivo. [IV.1]

Un problema de optimización consiste en la búsqueda de valores para determinadas variables de un sistema, y que cumplen ciertos requisitos que son representados por ecuaciones algebraicas proporcionando así los mejores valores posibles de la función que se utiliza para para cuantificar el rendimiento del sistema. Los conceptos de optimización encuentran su base en la ingeniería ya que la función principal del ingeniero es la de diseñar sistemas eficientes y menos costosos por lo que la potencia de los métodos de optimización para obtener el mejor diseño se basa en utilizar un nivel de matemáticas relativamente modesto que permite realizar cálculos numéricos iterativos, para lo que se utilizan procedimientos lógicos o algoritmos implementados en ordenadores. [IV.2]

La optimización de elementos de máquinas y estructuras en la actualidad se encuentra en constante evolución y es reconocida en la actualidad como una herramienta de diseño práctica, entre los métodos de optimización se pueden mencionar los siguientes: [IV.3]

- 1.- Programación matemática (MP)
- 2.- Criterios de optimalidad (OC)
- 3.- Optimización estructural evolucionaria (ESO)
- 4.- Optimización estructural basada en el crecimiento biológico (BGSO)
- 5.- Computación evolutiva (EC)
- 6.- Programación Genética (GP)
- 7.- Algoritmos genéticos (Gas)

Se define entonces que el objetivo de la optimización es obtener un diseño o un conjunto de valores para las variables de diseño que hacen máxima o mínima una función objetivo, satisfaciendo además las restricciones que dependen de las variables y se pueden dividir en tres categorías: de propiedades, forma y topología [IV.3].

IV.3.- Optimización de los martillos de forjado

Para realizar la optimización de los martillos de forjado se usará la herramienta de optimización topológica de *ANSYS 18.2*, como se había comentado con anterioridad las tres principales categorías en que se puede dividir los tipos de optimización son: por propiedades, topológica y de forma. en la que se puede incluir la optimización paramétrica. Para este caso de estudio se tomarán en consideración tanto la optimización de forma como la topológica. Para el caso de la optimización de forma esta nos permite introducir variables adicionales que permitan el movimiento de la frontera del sistema, pero al incrementarse la dificultad relativa de la optimización de tamaño se limitan los cambios geométricos.

En el caso de la optimización topológica, esta puede modificar tanto forma como dimensiones, para el caso de optimización paramétrica. Si se supone que el sistema depende de “n” parámetros de entrada la respuesta del sistema es aceptable cuando se encuentra determinados valores dentro de una tolerancia especificada por lo que la variación de los parámetros de entrada puede obtener una solución óptima para el sistema. [IV.4]

Se comenzará utilizando la herramienta de optimización topológica de *ANSYS 18.2* la cual se encuentra en el *Toolbox* de dicho *software*, el análisis comienza enlazando el módulo de análisis estático estructural (A), previamente con los resultados obtenidos en el análisis del estado de esfuerzos de la herramienta en el capítulo III. Con el módulo de optimización topológica (B), posterior a esta etapa del estudio el modelo optimizado será analizado nuevamente en un módulo estático estructural (C) lo que nos permitirá ver los resultados de la redistribución de esfuerzos que se persigue como objetivo.

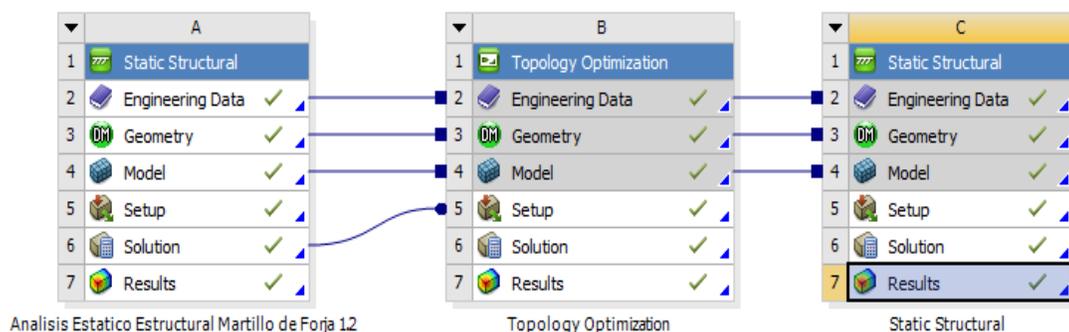


Figura IV.1.- Módulos de análisis para la optimización de los martillos de forja

Los ángulos del perfil de los martillos de forjado a optimizar tienen su razón en el hecho de que depende si la forja que se realizara del barril será sin ò con cámara de cartucho. normalmente en el caso de forjado sin cámara de cartucho. los cuatro martillos tienen una cara de golpe de martillo idéntica, por lo que en el mismo conjunto de martillos en el caso de altura y forma se mantienen uniformes en los ángulos y longitudes individuales (tolerancia de longitud en los pasos de Angulo ± 0.05 mm). Cuando se forjan cámaras de cartucho el proceso de forjado se lleva a cabo con dos formas de martillo en un conjunto forma A-B, esta forma es necesaria debido al efecto de llenado en la entrada de material, el cual aumenta al forjar una cámara de cartucho. por lo que en los martillos debe existir un Angulo de entrada que permita que no haya acumulación de material [IV.5].

IV.4.- Optimización topológica de los martillos de forjado

El primer paso para la optimización de los martillos corresponde a designar la región que será optimizada, así como de la región excluida de la optimización. cómo se puede observar en la figura IV.2 el área de color morado corresponde a la región designada para ser optimizada y es la zona donde se encuentra el perfil angulado objeto de este estudio, mientras que la de color rojo es la región excluida misma que deberá mantener su forma e integridad estructural durante el proceso de optimizado.

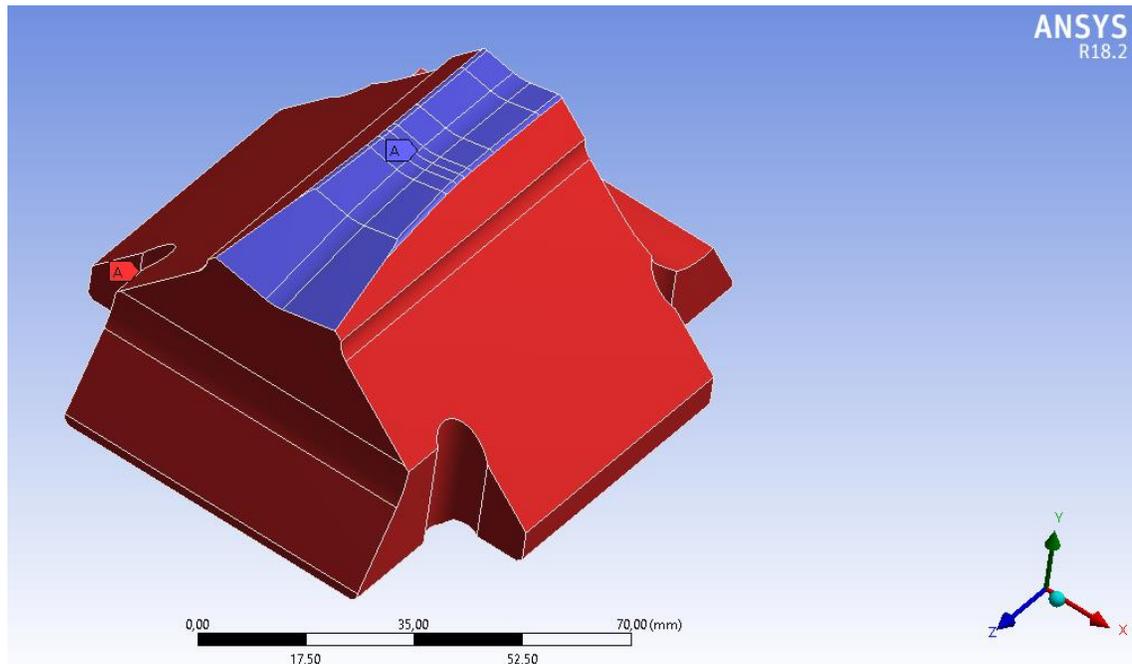


Figura IV.2.- Región designada y de exclusión para la optimización de los martillos

La siguiente fase del proceso de optimización será definir las restricciones y los objetivos, para este caso se definieron las restricciones en base a los esfuerzos de *Von Mises* del estudio previo en 0,60907 MPa, con el objetivo de minimizar los esfuerzos y un máximo número de iteraciones de 500 para llegar al objetivo, definidas las condiciones se corrió el *solver* manteniendo el volumen y la masa del modelo del martillo sin cambios durante el proceso. [IV.6]

Para realizar la validación del diseño después de la optimización de la topología se transfirió al sistema de validación del diseño y por medio de un tercer modulo en este caso el módulo de análisis estático estructural (C), se analizó el nuevo modelo con las mismas condiciones de restricción y carga a fin de verificar que los esfuerzos de *Von Mises* se hubieran reducido. Además de mantener la integridad estructural y de masa.

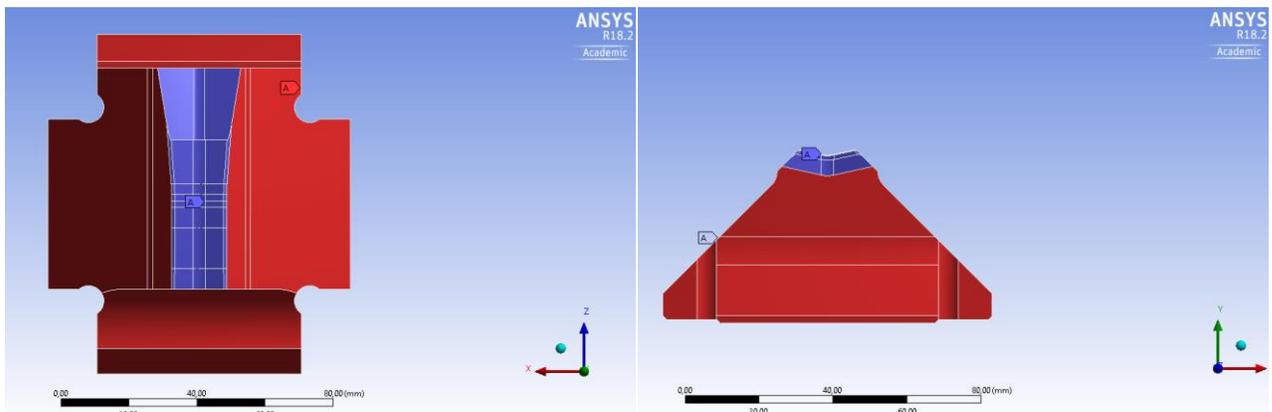


Figura IV.3.- Detalle de vista superior y frontal de las regiones a optimizar y excluida de los martillos de forjado

IV.4.1.- Resultados de la optimización topológica de los martillos de forja

A continuación, se presentan los resultados de la optimización, donde se observa que no hubo cambio significativo en la región asignada para la optimización.

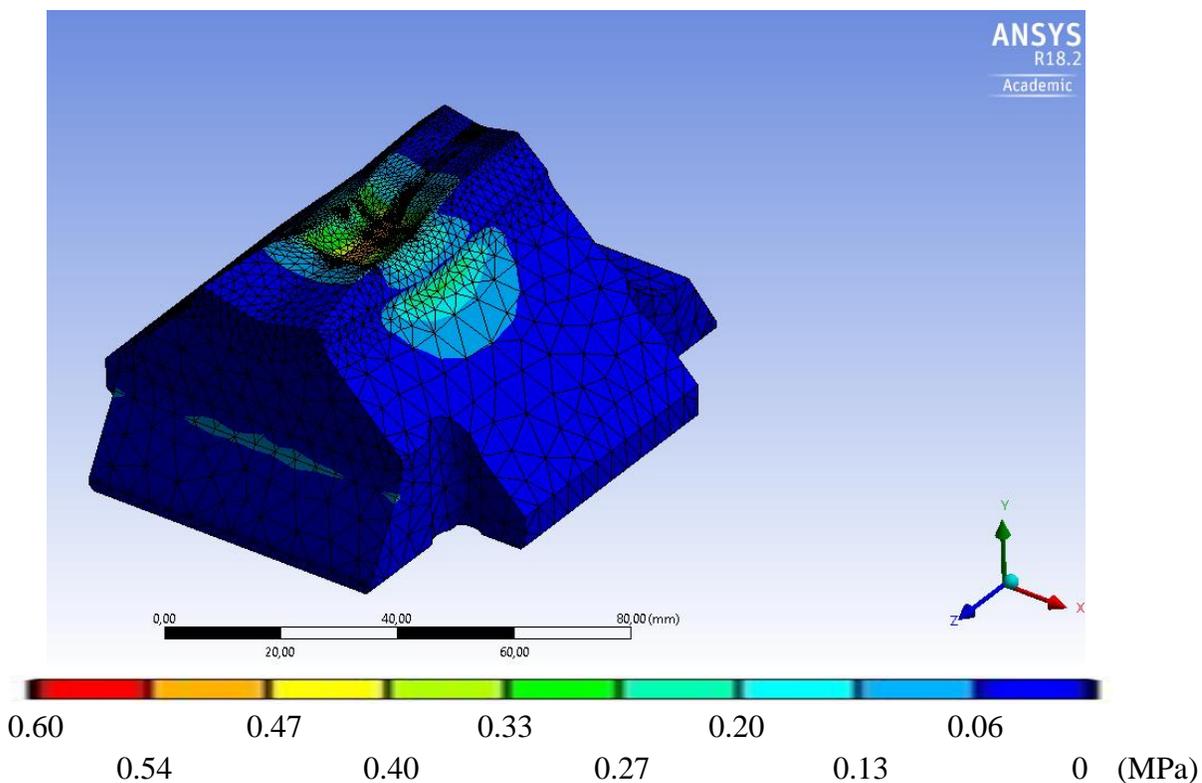


Figura IV.4.- Esfuerzos de *Von Mises* del modelo optimizado topológicamente

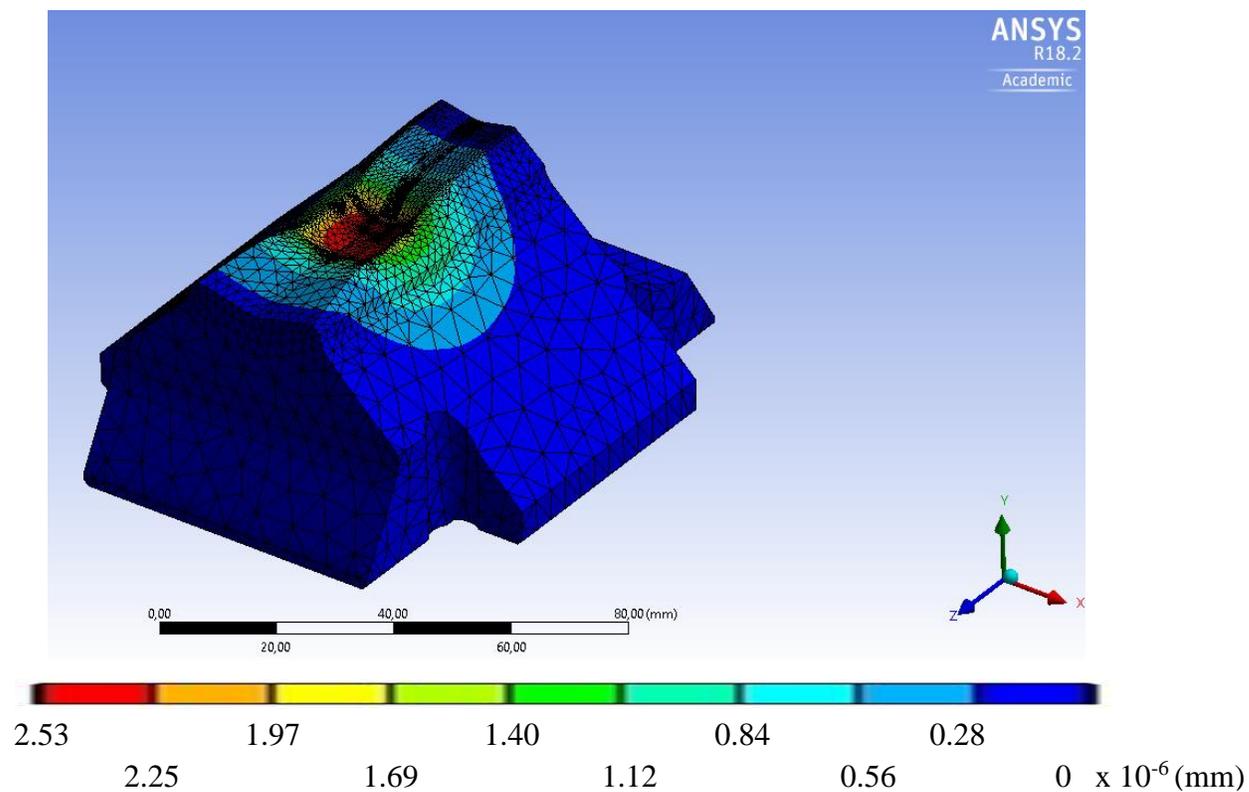


Figura IV.5.- Desplazamiento total del modelo optimizado topológicamente

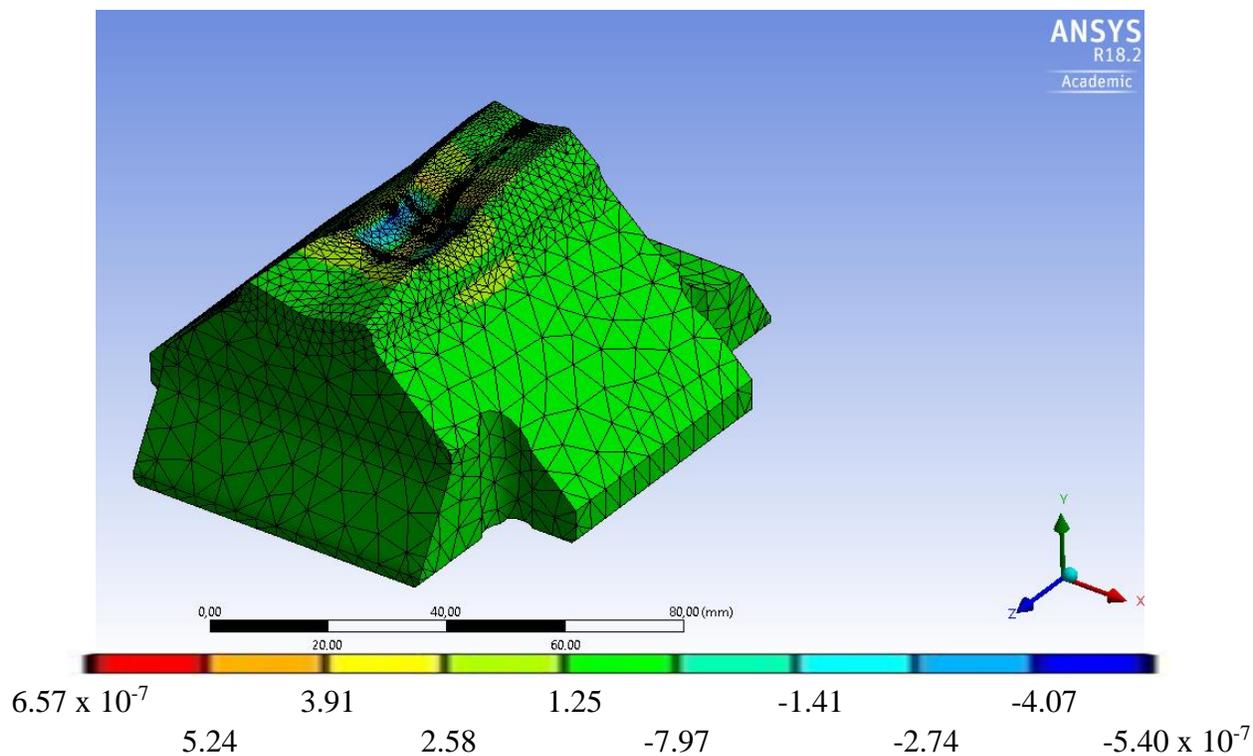


Figura IV.6.- Máxima deformación unitaria del modelo optimizado topológicamente

Como puede observarse en los resultados no hay reducción de los esfuerzos, tampoco se observa minimización en el desplazamiento y deformación unitaria, lo anterior ya que se compararon los resultados del modelo optimizado con los resultados previos obtenidos en el capítulo III. el objetivo es obtener un resultado optimizado topológicamente para llevarlo a un sólido sin que sea necesario reconstruir o hacer nuevamente el modelo.

IV.5.- Optimización paramétrica de los martillos de forjado

Se realizó la parametrización del modelo, en este caso de los ángulos de entrada de los martillos de forja, para usarlos como variables de la función a ser optimizada, se mantienen como restricciones del modelo los esfuerzos de *Von Mises*, el desplazamiento total y la deformación unitaria. Como objetivo se mantiene la minimización de los esfuerzos.

VARIABLES PARA SER OPTIMIZADAS MARTILLO TIPO A

Ángulos de entrada martillo de forja "A"	Valor Mínimo	Valor Máximo	Paso
13°	6.5°	19.5°	6.5°
6°	3°	9°	3°
3°	1.5°	4.5°	1.5°
2°	1°	3°	1°
1°	0.5°	1.5°	0.5°
0.50°	0.25°	0.75°	0.25°
1°	0.5°	1.5°	0.5°

Tabla IV.1.- Variables de los ángulos de entrada del martillo tipo "A" para optimizar

En la tabla IV.1 se muestran las variables de los ángulos originales del perfil angulado de la herramienta de forjado, así como los valores mínimos y máximos que puede alcanzar las variables durante el proceso de optimización. Se muestra también el paso variable de la que depende el número de escenarios (iteraciones) que realizara el programa hasta alcanzar el óptimo.

Para ingresar las restricciones se toman los valores máximos de los esfuerzos de *Von Mises*, desplazamiento y deformación unitaria del estado de esfuerzos del martillo de forja tipo A, estudiados en el capítulo III, como se muestra en la tabla IV.2.

RESTRICCIONES MARTILLO TIPO A

Restricción	Mayor que /Menor que	Valores
Esfuerzo Max de <i>Von Mises</i>	Es < que	0.6090 MPa
Desplazamiento	Es < que	2.539×10^{-5} mm
Deformación Unitaria	Es < que	0.000001

Tabla IV.2.- Restricciones para la optimización del martillo de forja tipo A

El objetivo es minimizar los esfuerzos, valor que estará por debajo del esfuerzo de *Von mises*, especificado en la tabla de restricciones. Una vez declarados los parámetros se obtienen 2187 escenarios para ser evaluados, Con lo que se empieza el proceso de optimización.

IV.5.1- Resultados martillo tipo A

Una vez que se han evaluado todos los escenarios, se muestra el resultado óptimo, así como algunos escenarios evaluados, como se muestra en la tabla IV.3.

RESULTADOS DEL PROCESO DE OPTIMIZACION

Modelo inicial	Optimo	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
13°	19.5°	6.5°	13°	19.5°	6.5°	13°
6°	3°	3°	3°	3°	6°	6°
3°	1.5°	1.5°	1.5°	1.5°	1.5°	1.5°
2°	3°	1°	1°	1°	1°	1°
1°	1°	0.5°	0.5°	0.5°	0.5°	0.5°
0.50°	0.5°	0.25°	0.25°	0.25°	0.25°	0.25°
1°	1.5°	0.5°	0.5°	0.5°	0.5°	0.5°

Tabla IV.3.- Resultados del proceso de optimización en las variables de entrada

En la tabla IV.4.- se muestran los resultados optimizados según las restricciones aplicadas, de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria.

VALORES DE ESFUERZO, DESPLAZAMIENTO Y DEFORMACION UNITARIA

Valor de restricción	Inicial	optimo	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
< 0.6090 MPa	0.6090	0.5636	0.6036	0.5798	0.5731	0.5856	0.6002
< 3 x 10 ⁻⁵ mm	2.539 x 10 ⁻⁵	2.505 x 10 ⁻⁵	2.498 x 10 ⁻⁵	2.499 x 10 ⁻⁵	2.5 x 10 ⁻⁵	2.533 x 10 ⁻⁵	2.533 x 10 ⁻⁵
<0.000001	.000001	.000000	.000001	.000001	.000001	.000001	.000001

Tabla IV.4.- Valores optimizados según las restricciones aplicadas

En la figura IV.7 se muestra el nuevo perfil optimizado del martillo tipo A, donde se observa los nuevos ángulos que se obtuvieron durante el proceso de optimización. Según el escenario que resulto ser óptimo.

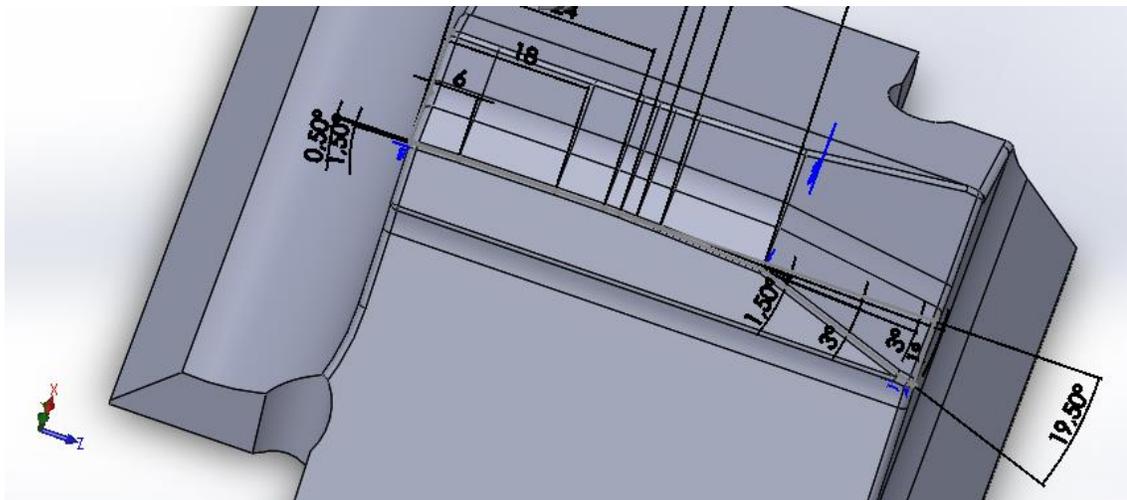


Figura IV.7.- Nuevo perfil optimizado, martillo de forja tipo A

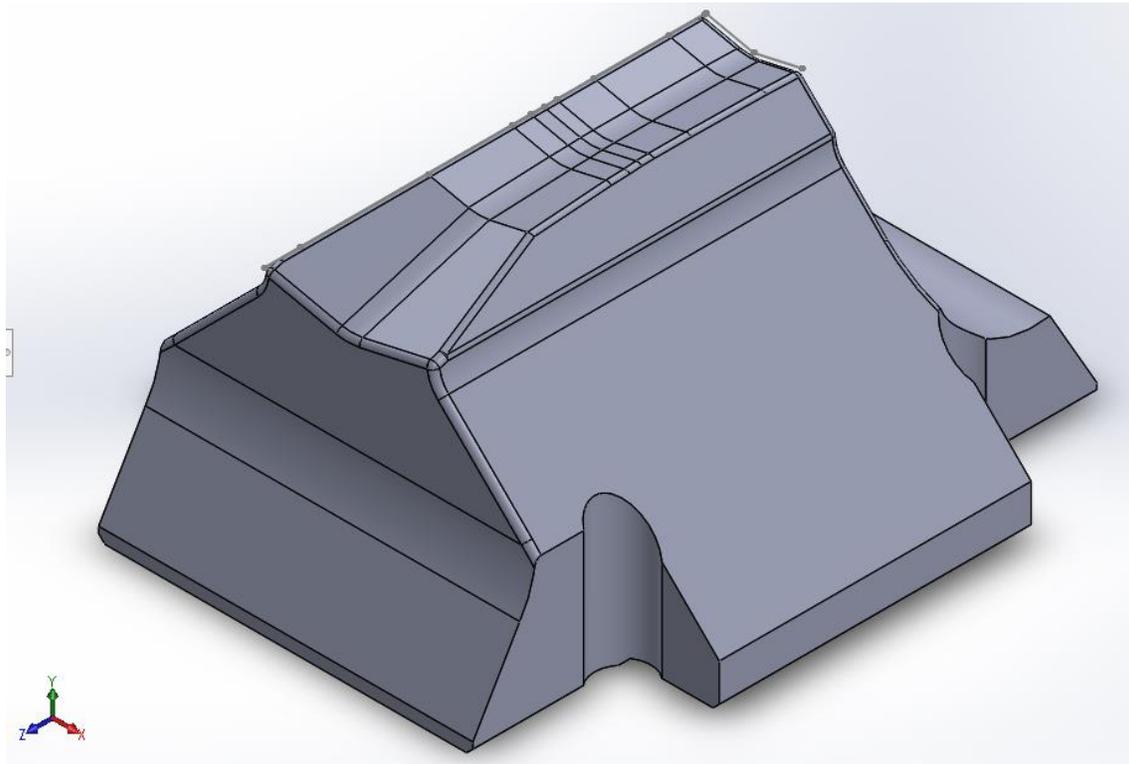
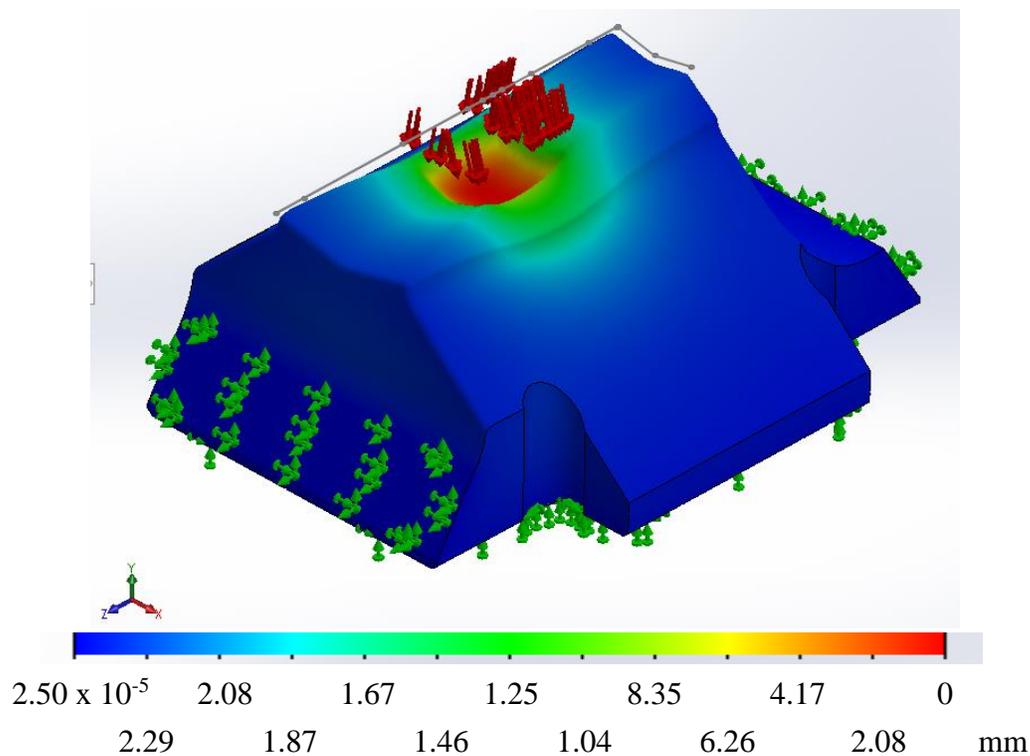
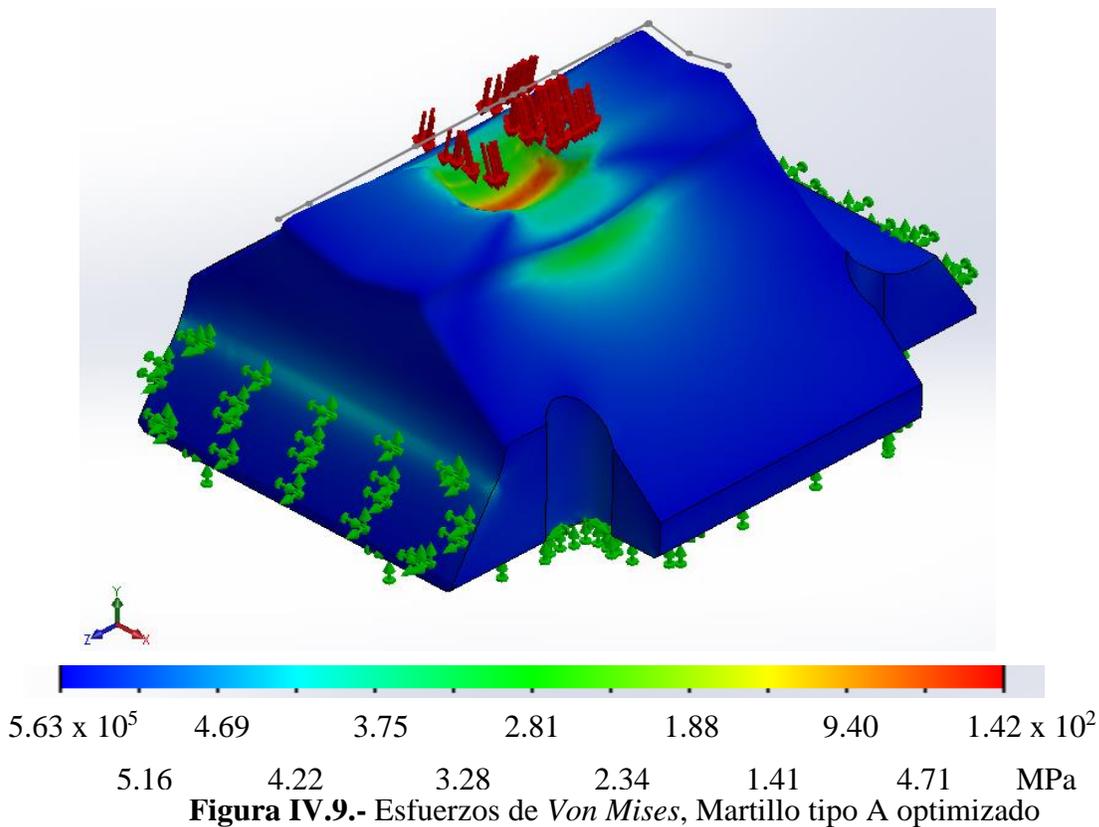


Figura IV.8.- Vista isométrica del martillo de forja tipo A optimizado.

IV.5.1.1- Análisis numérico del martillo de forja tipo A optimizado

A continuación, se muestran los resultados del análisis numérico del martillo tipo A optimizado, se muestran los esfuerzos de *Von Mises*, desplazamiento total y deformación unitaria.



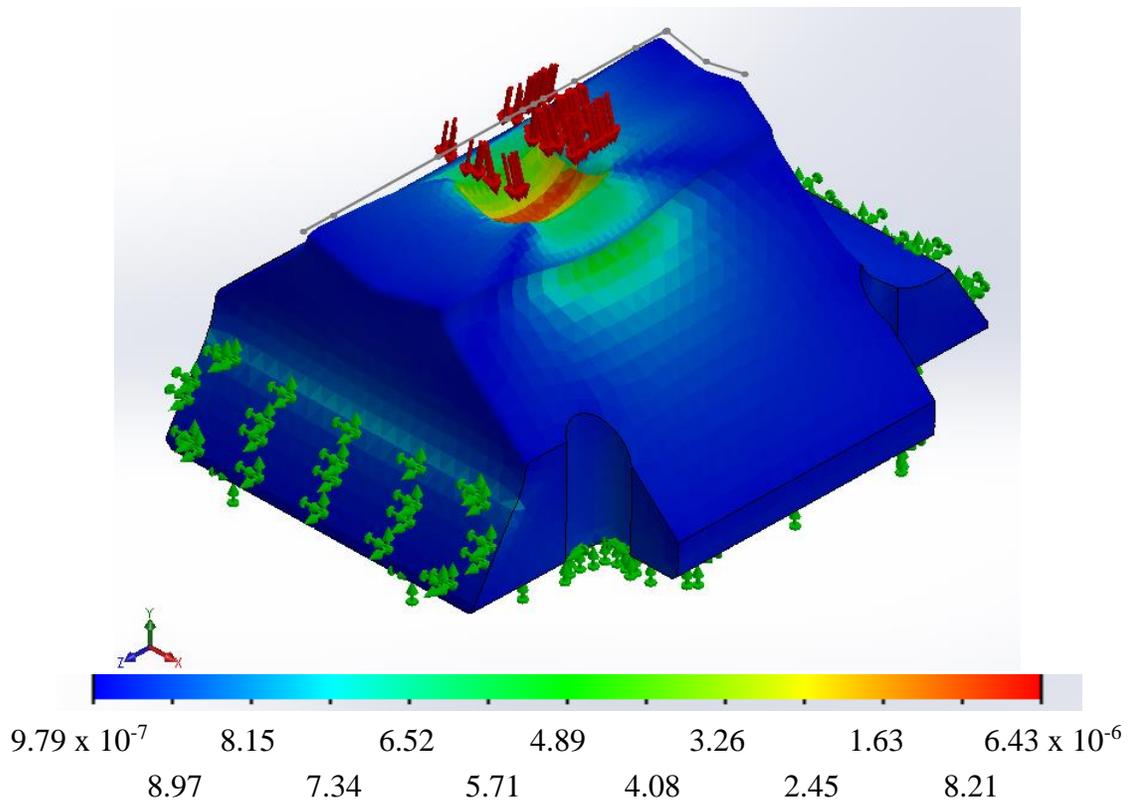


Figura IV.11.- Deformaciones unitarias Martillo tipo A optimizado

IV.6.- Optimización del martillo de forja tipo B

VARIABLES PARA SER OPTIMIZADAS MARTILLO TIPO B

Ángulos de entrada martillo de forja “B”	Valor Mínimo	Valor Máximo	Paso
9.75°	4.875°	14.625°	4.875°
6°	3°	9°	3°
3°	1.5°	4.5°	1.5°
2°	1°	3°	1°
1°	0.5°	1.5°	0.5°
0.5°	0.25°	0.75°	0.25°
1°	0.5°	1.5°	0.5°

Tabla IV.5.- Variables de los ángulos de entrada del martillo tipo “B” para optimizar

Como se hizo con el martillo tipo A, en la tabla IV.5 se muestran los ángulos de entrada del perfil correspondiente al martillo de forja tipo B, valores máximos y mínimos de iteración, así como el paso para determinar el número de escenarios para el proceso de optimización.

Se ingresan como restricciones los valores máximos del estado de esfuerzos del martillo tipo B estudiado en el capítulo III. esfuerzos de *Von Mises*, Desplazamiento y Deformación unitaria como se muestra en la tabla IV.6.

RESTRICCIONES MARTILLO TIPO B

Restricción	Mayor que /Menor que	Valores
Esfuerzo Max de <i>Von Mises</i>	Es < que	1.03 MPa
Desplazamiento	Es < que	1.916×10^{-5} mm
Deformación Unitaria	Es < que	0.000001

Tabla IV.6.- Restricciones para la optimización del martillo de forja tipo B

El objetivo también es minimizar y obtener una redistribución de esfuerzos en el perfil angulado del martillo tipo B. por lo que la base es el esfuerzo de *Von Mises* de la tabla de restricciones IV.6, ya con los parámetros de variables, restricciones y objetivo se obtuvieron 2189 escenarios con lo que se procede a la optimización del modelo.

IV.6.1.- Resultados martillo tipo B

RESULTADOS DEL PROCESO DE OPTIMIZACION

Modelo inicial	Optimo	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
9.75°	9.75°	4.875°	9.75°	14.625°	4.875°	9.75°
6°	6°	3°	3°	3°	6°	6°
3°	1.5°	1.5°	1.5°	1.5°	1.5°	1.5°
2°	3°	1°	1°	1°	1°	1°
1°	1°	0.5°	0.5°	0.5°	0.5°	0.5°
0.5°	0.75°	0.25°	0.25°	0.25°	0.25°	0.25°
1°	1°	0.5°	0.5°	0.5°	0.5°	0.5°

Tabla IV.7.- Resultados del proceso de optimización en las variables de entrada

En la tabla IV.8 se muestran los resultados correspondientes al valor optimo y de algunos escenarios de los esfuerzos de *Von Mises*, desplazamientos y deformaciones unitarias generados durante el proceso de optimización.

VALORES DE ESFUERZO, DESPLAZAMIENTO Y DEFORMACION UNITARIA

Valor de restricción	Inicial	optimo	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
< 1.03 MPa	1.03	0.5615	0.5760	0.5927	0.5786	0.5928	0.5683
< 2 x 10 ⁻⁵ mm	1.916 x 10 ⁻⁵	1.912 x 10 ⁻⁵	1.897 x 10 ⁻⁵	1.898 x 10 ⁻⁵	1.899 x 10 ⁻⁵	1.954 x 10 ⁻⁵	1.911 x 10 ⁻⁵
<0.000001	.000001	.000000	.000001	.000001	.000001	.000001	.000001

Tabla IV.8.- Valores optimizados según las restricciones aplicadas

En la figura IV.12 se puede observar el nuevo perfil optimizado del martillo de forja tipo B, se muestran los nuevos ángulos obtenidos conforme al escenario óptimo evaluado según el proceso de optimización.

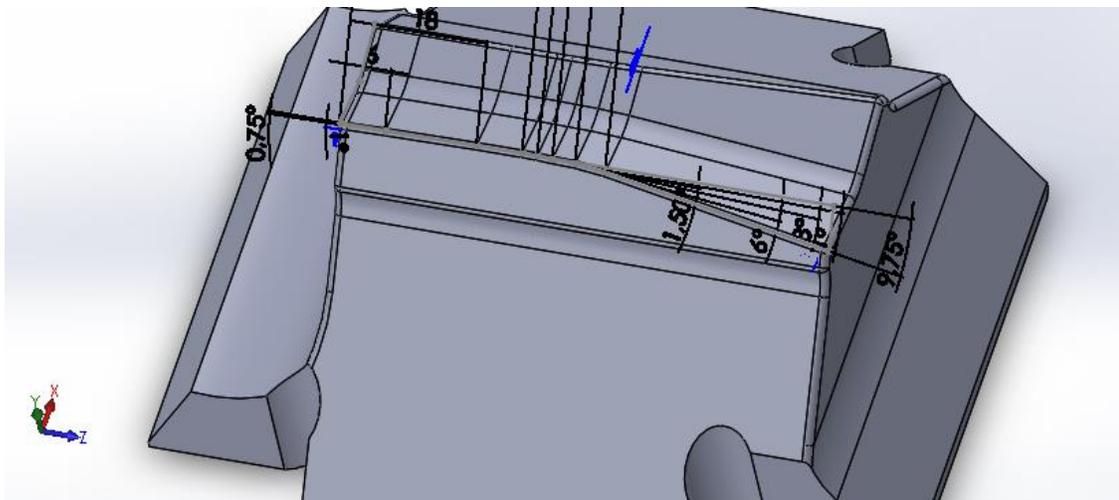


Figura IV.12.- Nuevo perfil optimizado, Martillo de forja tipo B

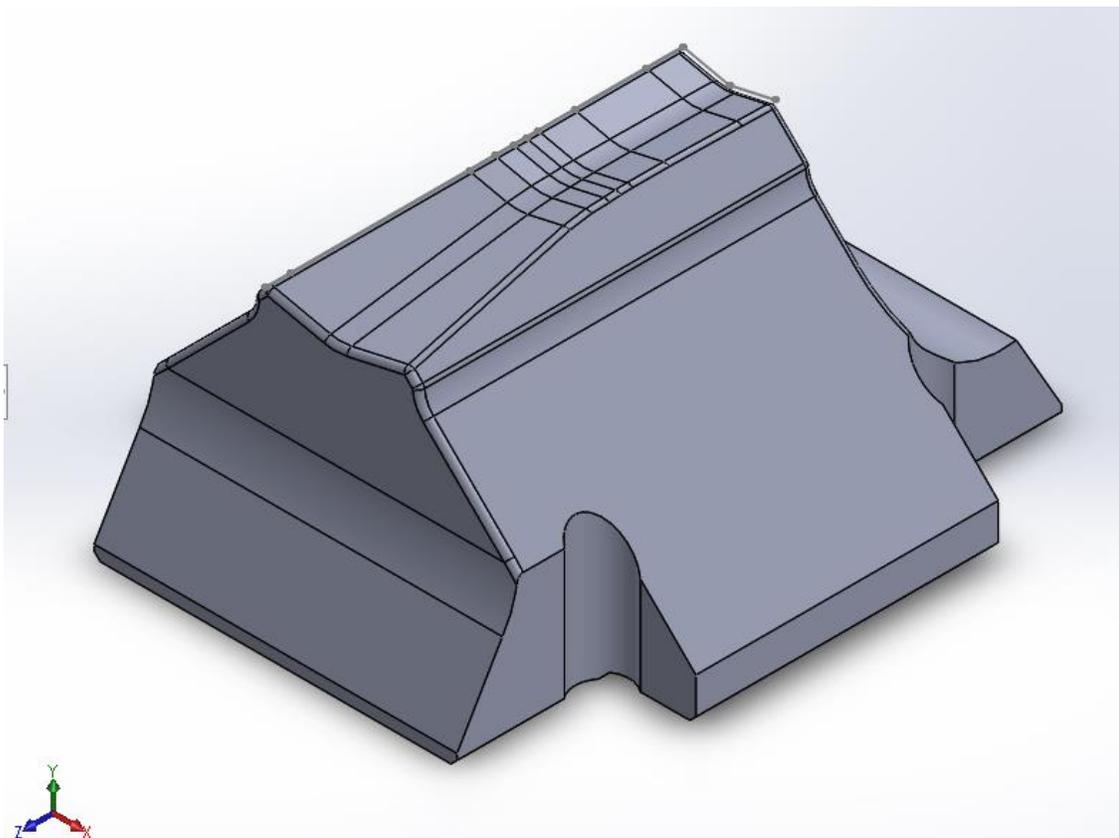


Figura IV.13.- Vista isométrica del martillo de forja tipo B optimizado.

IV.6.1.1.- Análisis numérico del martillo de forja tipo B optimizado

A continuación, se muestran los resultados del análisis numérico del martillo tipo B optimizado, se muestran los esfuerzos de *Von Mises*, desplazamiento total y deformación unitaria.

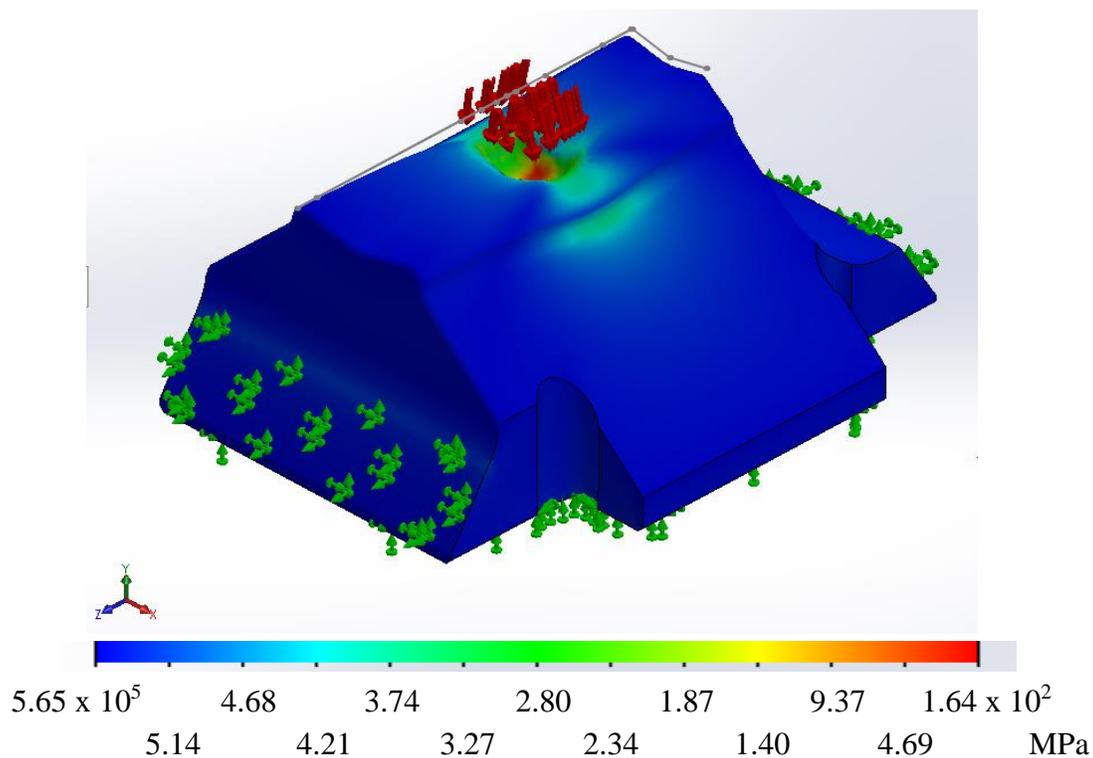


Figura IV.14.- Esfuerzos de *Von Mises*, Martillo tipo B optimizado

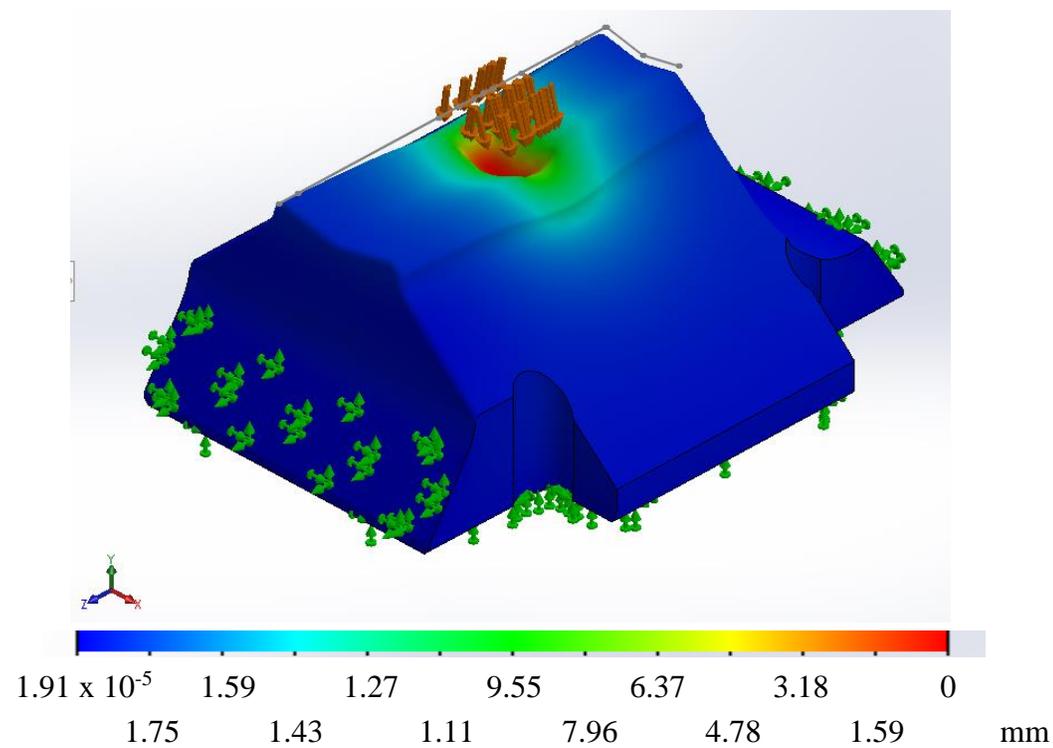


Figura IV.15.- Desplazamientos Martillo tipo B optimizado

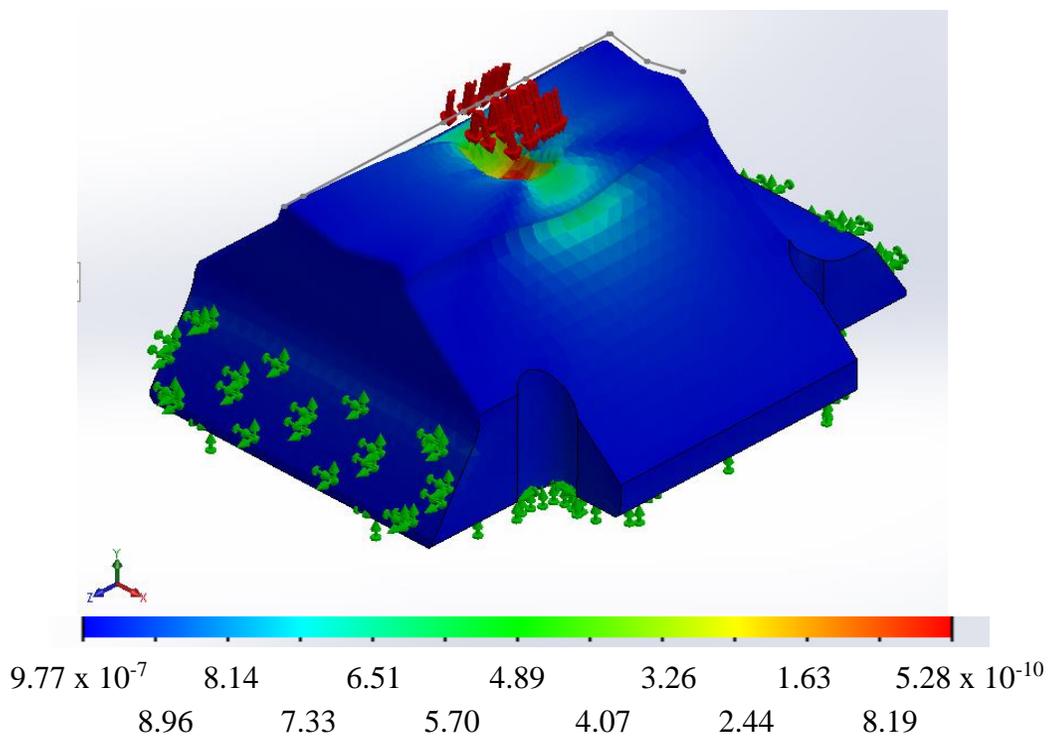


Figura IV.16.- Deformaciones unitarias Martillo tipo B optimizado

Se han obtenido los perfiles óptimos de los dos martillos para el proceso de forjado en frío de cañones de armamento, para lo que se obtuvieron los esfuerzos de *Von Mises*, Desplazamientos y Deformaciones unitarias a fin de corroborar los resultados del proceso de optimización de los modelos tipo A Y B. El siguiente paso es fabricar los nuevos perfiles angulados para determinar si los datos del análisis numérico son acordes a lo estudiado, así como determinar en qué porcentaje se incrementa la resistencia de los martillos de forjado al estar en operación.

IV.7.- Sumario

El capítulo IV trato sobre los diferentes tipos de optimización, entre estos se habló de la optimización de forma, optimización topológica y optimización paramétrica. Se trabajo con el *software ANSYS 18.2* auxiliándose de la herramienta de optimización topológica para optimizar las regiones del perfil angulado de los martillos de forjado, determinando que esta herramienta no fue eficiente para el tipo de estudio realizado. concluyendo que esta herramienta es óptima para procesos de optimización de topología en donde muestra eficacia al remover material de las zonas donde existen menos esfuerzos formando cavidades que reducen masa de la pieza que se esté optimizando lo que representa beneficios en costo y de material, pero para el caso de optimización de los martillos en donde nos interesa solo la optimización de geometría y obtener una redistribución de esfuerzos no resulto funcional. Por tal motivo se recurrió al método de optimización paramétrica usando los ángulos de entrada de los perfiles de ambos martillos de forjado. Para lo que se realizó un estudio de diseño con el *software Solid Works 2018* con lo que se pudo parametrizar las variables de los ángulos de entrada además de mantener como restricciones del modelo los esfuerzos de *Von Mises*, desplazamientos y deformaciones unitarias, manteniendo como prioridad el objetivo de reducir los esfuerzos en ambos martillos.

Se obtuvieron perfiles óptimos de los martillos y nuevos modelos, de los que se realizó el análisis numérico para corroborar los datos de la optimización paramétrica, con estos resultados se está en la posibilidad de fabricar los nuevos perfiles optimizados y llevarlos a la fase de experimentación misma que será realizada en el capítulo V de este trabajo.

IV.8.- Referencias

- 1.- Guzmán, María A., Delgado, Alberto, Optimización de la geometría de un eje aplicando algoritmos genéticos, *revista ingeniería e investigación* (58). Vol.25, No 2, pp 15-23, 2005.
- 2.- Victoria, Nicolás M., “*Optimización de forma y topología con malla fija y algoritmos genéticos*”, Ph. D. Tesis, Departamento de estructuras y construcción, Universidad politécnica de Cartagena, pp, 4-12, 2006.
- 3.- Vitela, Neri T.H., Cervantes, Martínez J.M., Alvarado, Guadarrama J., *Algoritmos genéticos aplicados en la optimización del diseño en ingeniería*, Instituto Mexicano del Petróleo.
- 4.- Estévez, Valencia P., *Optimización mediante algoritmos genéticos*, Anales del instituto de ingenieros de chile, pp, 83-92, 1997.
- 5.- Werner, Augustin., *Cold Forging of rifle barrels, with and without cartridge chamber on cold Forging machines type GFM SHK und SKK 06*, Augustin GmbH, Steyr Austria, 1995.
- 6.- Pardo, L., Retolaza, I., Martínez, F., Noriega, A., Metodología integral de optimización dimensional y de materiales adaptada al diseño de producto, *Revista de la Asociación Española de Materiales Compuestos*. Vol. 1, No 1, pp 63-68, 2017.
- 7.- Optimización de SolidWorks, https://www.solidworks.es/sw/docs/SIM_Optimization_WP_ESP.Pdf, 30/04/2018, 14:00 hrs.

Capítulo V

Conclusiones y trabajos a futuro