

# Diseño Asistido por Computadora de un Martillo Excavador

E. Terán<sup>1</sup>, M. Helguero<sup>2</sup>

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Km 30.5 vía Perimetral, Guayaquil

eaterac@espol.edu.ec<sup>1</sup>, mhelguer@espol.edu.ec<sup>2</sup>

## Resumen

*En el presente trabajo se diseñó por completo un Martillo Excavador, una máquina cuya finalidad es remover material del suelo para formar un túnel vertical, lo que permite fundir pilotes de cimentación para estructuras. Se aplicaron las etapas del proceso de diseño, partiendo de un conjunto de especificaciones hasta llegar a un diseño definitivo. En cada paso se contó con la ayuda del programa de computación Autodesk Inventor, que aceleró y facilitó el proceso de diversas maneras para lograr el objetivo planteado. Se identificó el problema que debía resolverse y se recopiló toda la información necesaria para establecer los requerimientos y restricciones del diseño. Luego se plantearon soluciones alternativas que pudieran satisfacer la necesidad y se escogió la más conveniente tomando en consideración diversos criterios. Con la alternativa seleccionada se procedió a darle una forma definitiva. Se diseñó la cadena cinemática que permitiera realizar el movimiento requerido de la máquina teniendo en cuenta las fuerzas requeridas y geometría del mecanismo. Luego se procedió al diseño en detalle de las piezas y componentes mediante los cálculos de ingeniería y el análisis de elemento finito del programa. Ya con el diseño definitivo se procedió a elaborar un conjunto de planos de la máquina y el ensamblaje de sus piezas. Finalmente se hizo un análisis de costos de la construcción del Martillo Excavador.*

**Palabras claves:** *Diseño, máquina, martillo excavador, Autodesk Inventor*

## Abstract

*In the present work a Hammer Grab was completely designed, a machine which purpose is to remove material from ground to form a vertical tunnel allowing casting foundation piles for structures. Design process stages were applied, starting from a set of specifications until the definitive design. Each stage was assisted by the Autodesk Inventor software, which accelerated and facilitated the process in various ways to achieve the stated objective. The problem to be solved was identified and all needed information was gathered in order to establish design requirements and restrictions. Then, alternative solutions were presented to satisfy the need and the most suitable one was chosen while considering various criteria. With the selected alternative, we proceeded to give it a definitive shape. A kinematic chain was designed to allow the movement required by the machine, considering the required forces and geometry of the mechanism. Then we started the detailed design of parts and components through engineering calculations and the software's finite element analysis. Having the definitive design, a set of drawings of the machine and the assembly of its parts was elaborated. Finally, a cost analysis is presented.*

**Keywords:** *Design, machine, hammer grab, Autodesk Inventor*

## 1. Introducción

Para toda fabricación de grandes y pequeñas estructuras en obras civiles es indispensable contar con una buena cimentación que sea capaz de soportar el peso de la misma, sea ésta un edificio, puente, torre, etc., transmitiendo la carga al suelo de manera eficiente. Existen diferentes técnicas para lograr estas cimentaciones que varían según el tipo de estructura, su peso, y las características del terreno en el que se

van a aplicar. Cada técnica requiere herramientas de excavación que se ajusten a la labor deseada. Contar con la herramienta adecuada al momento de remover material constituye la diferencia entre un trabajo bien realizado, de manera rápida, eficiente y económica, y un trabajo deficiente y costoso. De esto viene la importancia y necesidad en una empresa de contar con máquinas de diseño óptimo para sus requerimientos.

En nuestro país no es común que una compañía se decida a fabricar sus propias herramientas, lo que en

ocasiones deja un vacío en su oferta de servicios que suele ser aprovechado por empresas extranjeras que sí las tienen. Por eso la trascendencia de fomentar la concepción y construcción de maquinaria nacional que ayude al crecimiento tecnológico y de plazas de trabajo en el Ecuador. El diseño y fabricación de un Martillo Excavador realizado localmente en su totalidad, constituye una experiencia significativa en ese sentido.

Un Martillo Excavador es una herramienta usada para formar un túnel vertical que servirá luego para fundir un pilote de cimentación. En suelos mixtos compuestos de gravilla, arena y rocas no es eficiente usar brocas u otro tipo de herramientas de perforación ya que no son capaces de generar la fuerza o el confinamiento necesario para extraer todos estos materiales simultáneamente. Se requiere que la herramienta sea capaz de penetrar el suelo con su propio peso y luego remover, por medio de una boca en forma de almeja, los materiales que allí se encuentren. Ésta es la principal aplicación de esta herramienta.

En la siguiente figura se muestra el proceso en 3 etapas para formar una cimentación con ayuda de un Martillo Excavador. Primero se coloca como guía un cilindro de acero. Luego se extrae el material en su interior formando el agujero hasta la profundidad requerida. Finalmente se introduce una armadura metálica y se vierte concreto para formar el pilote.

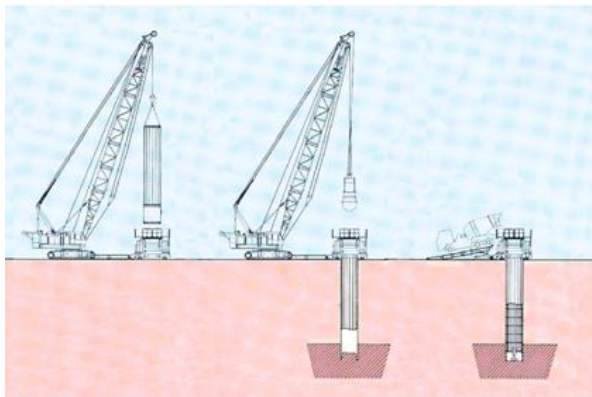


Figura 1. Proceso de cimentación

## 2. Proceso de diseño

El proceso de diseño es una secuencia de etapas ordenadas lógicamente que permite resolver una necesidad particular originando una solución concreta. Se empieza por la definición del problema que se desea resolver y luego se plantean distintos conceptos de soluciones posibles. Uno de ellos es considerado satisfactorio y conveniente, por lo que se empieza su desarrollo de manera cada vez más detallada. El concepto se transforma en un mecanismo con sistemas y subsistemas. Luego estos se dividen en piezas que deben ser diseñadas en detalla y evaluadas. Finalmente

se tiene un diseño completo y listo para su implementación.

Seguir estos pasos ordenados es clave para el éxito del diseño pues sintetiza las ideas generales en especificaciones detalladas de una manera eficiente.

### 2.1. Definición del problema

El problema a resolver en este trabajo consiste en diseñar una herramienta que permita realizar una perforación vertical sobre suelos mixtos según los requerimientos y restricciones presentados por el cliente, que en este caso es una empresa dedicada a la construcción civil a nivel local.

Entre los requerimientos más importantes se encuentran: la herramienta debe ser circular con un diámetro de 800mm, su longitud debe estar entre 3m y 4m, su peso debe estar entre 3t y 4t, debe funcionar con los sistemas de la grúa, lo que incluye dos malacates y una bomba hidráulica.

Entre las restricciones más importantes se encuentran: se debe usar acero A36 y soldadura MAG principalmente, ninguna pieza individual puede superar las 2t de peso, se deben usar las máquinas herramientas del cliente para construir el diseño.

### 2.2. Diseño conceptual

En esta etapa del proceso de diseño se proporciona soluciones al problema identificado y definido. Esto incluye la idea general de operación del diseño, sus sistemas, subsistemas y configuraciones que le permiten resolver el problema propuesto. Se evalúan y comparan aquellas soluciones que se han considerado satisfactorias, es decir, adecuadas, posibles y aceptables. Finalmente se escoge aquella que resulte ser la más conveniente.

Tomando en cuenta las restricciones en cuanto a la construcción y operación de la máquina, se generaron dos alternativas distintas de diseño como solución al problema planteado. Ambas comparten la misma geometría exterior en términos generales, basada en los martillos excavadores existentes, pero difieren en el mecanismo interno que logra abrir y cerrar las almejas de la herramienta para extraer el material. Se le ha llamado almejas a las piezas curvas que están en contacto con la tierra y extraen el material, debido a su similitud geométrica con la concha de ese molusco.

La primera alternativa consiste en un mecanismo interno de poleas, que utiliza el mismo cable que sostiene la máquina desde la grúa y su propio peso para abrir y cerrar las almejas que remueven la tierra. La segunda alternativa corresponde a un conjunto de eslabones accionados por un cilindro hidráulico. A continuación una figura con los dos diseños conceptuales.

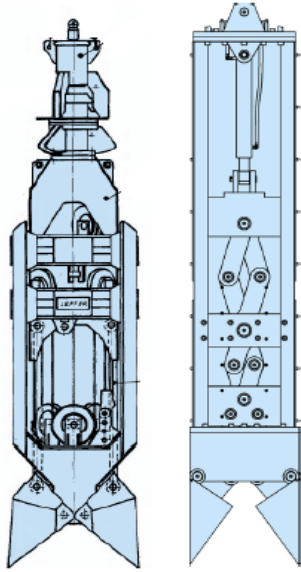


Figura 2. Alternativas de diseño

Para elegir la mejor solución a la necesidad se definen parámetros o criterios de selección basados en los requerimientos del problema e intereses del cliente, y luego se les asigna una ponderación. Se califica cada alternativa en una matriz de decisión y se escoge la más conveniente contrastando la adecuación de las opciones a cada criterio propuesto.

Tabla 1. Matriz de decisión

CRITERIO	VALOR	OPCIÓN 1: Mecanismo de poleas interno	OPCIÓN 2: Mecanismo hidráulico interno
Facilidad de construcción	25%	20%	15%
Capacidad de operación	30%	10%	25%
Costo	15%	15%	15%
Facilidad de mantenimiento	25%	20%	20%
TOTAL	100%	65%	75%

En este caso, la segunda alternativa, de un Martillo Excavador con sistema hidráulico interno, obtuvo una mejor puntuación y por lo tanto es la opción elegida.

### 2.3. Diseño de formulación

En ésta etapa del diseño se realizan algunos cálculos fundamentales que describen el funcionamiento interno del Martillo Excavador. Se inicia el diseño de formulación partiendo del concepto de la alternativa seleccionada. Aplicando un mecanismo simple de 4 eslabones se consigue el movimiento fundamental deseado a partir de un cilindro hidráulico.

Sin embargo, tras evaluar las fuerzas en puntos importantes de esta cadena cinemática, se observa que no es suficiente para realizar el trabajo deseado.

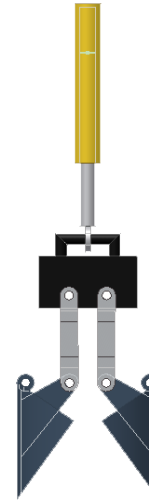


Figura 3. Mecanismo simple

Para solucionar este problema se adaptó el concepto de palanca y punto de apoyo en un mecanismo de varios eslabones en el interior del armazón del Martillo Excavador, con el fin de conseguir una ventaja mecánica que permita aumentar la fuerza de cierre en las almejas.



Figura 4. Mecanismo con ventaja mecánica

La fuerza de entrada  $F$  se duplica a la salida del mecanismo apoyado en el punto central. Esta multiplicación de la fuerza no quebranta la ley de la conservación de la energía ya que, al tener una relación de 2 a 1 en la longitud del brazo de la palanca, el trabajo entregado a la entrada es el mismo que a la salida.

Finalmente al unir el mecanismo con ventaja mecánica con el simple, se obtiene un mecanismo satisfactorio de forma definida que puede empezar a detallarse.

El uso del programa Autodesk Inventor es clave al momento de simular el movimiento del mecanismo, ya que permite determinar si los elementos pueden

confinarse dentro de los límites requeridos por el diseño. Su capacidad de identificar piezas que colisionan en el mecanismo permite corregir errores con agilidad.



Figura 5. Mecanismo satisfactorio

## 2.4. Diseño en detalle

Luego de definir una concepción general del mecanismo y de la forma de las piezas y elementos, es necesario darles una dimensión coherente con su función. Se establecen y calculan las fuerzas y esfuerzos a los que está sometido cada componente, siempre teniendo en cuenta los diversos materiales y formas disponibles en el mercado.

Con estos datos considerados se selecciona y aplica la teoría de falla adecuada con la finalidad de establecer la geometría definitiva de las piezas, algo que luego permita dibujar planos de construcción y dar paso a su fabricación en el taller.

Ya que el presente diseño posee una gran cantidad de piezas que debieron pasar por esta metodología de dimensionamiento, sólo se muestra una, a manera de ejemplo para ilustrar los conceptos usados.

Se analiza en los siguientes párrafos, el diseño y dimensionamiento de un pin (pasador) ubicado en el centro del mecanismo con ventaja mecánica que se observa en la figura.

Se muestra con ayuda de transparencias el pin en su ubicación central dentro de la máquina. Su función es de gran importancia ya que sirve como punto de apoyo para el mecanismo. Por eso, es una de las piezas sometidas a mayores fuerzas.

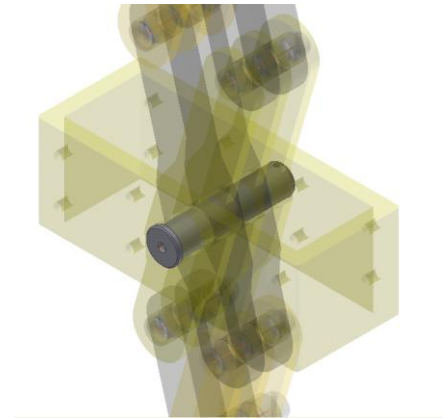


Figura 6. Pin en su ubicación central

Se analizan las fuerzas a la que está sometido el elemento con la finalidad de encontrar los esfuerzos que se producen en su interior.

Por sencillez, se analiza el pin como un cilindro sencillo, es decir, como una viga de sección transversal circular simplemente apoyada. En el diagrama de cuerpo libre, se representan los soportes como dos pequeños triángulos celestes situados en los extremos donde se producirán las fuerzas de reacción que mantienen al elemento en equilibrio.

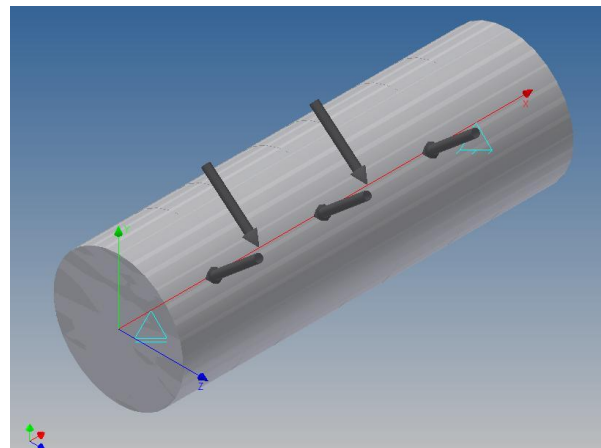
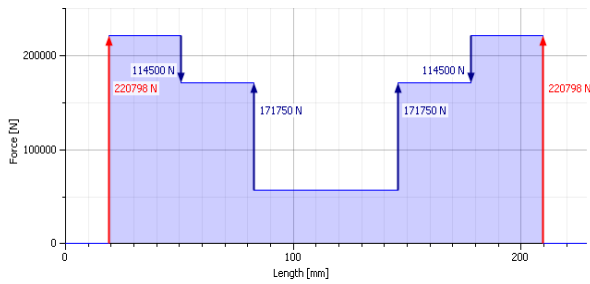


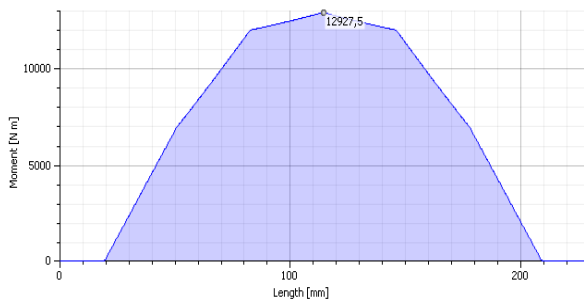
Figura 7. Diagrama de cuerpo libre del pin

A partir de aquí se obtienen diagramas de fuerza cortante y momento flector. Con ayuda del software, esta tarea es muy sencilla, y coincide de manera satisfactoria con los resultados obtenidos manualmente.



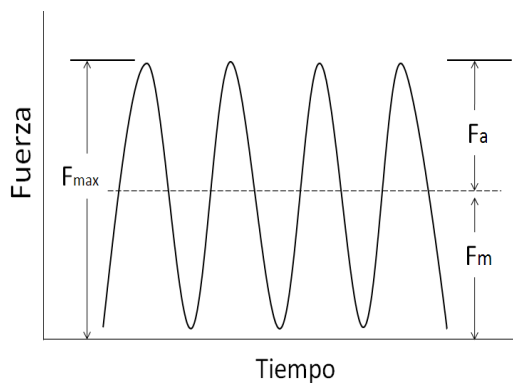
**Figura 8.** Diagrama de fuerza cortante total

Para el diagrama de momento hay que recordar que el momento flector corresponde a la integral de la fuerza cortante a través de la longitud [1].



**Figura 9.** Diagrama de momento total

Sin embargo es muy importante acotar que las fuerzas aplicadas sobre el pin son de un carácter variable y repetitivo. En la siguiente figura se muestra un gráfico de la fuerza aplicada sobre el pin a lo largo de varios ciclos de trabajo de apertura y cerrado del Martillo Excavador.



**Figura 10.** Fuerza repetitiva sobre el pin

Con esta observación se concluye que los esfuerzos en el interior del pin serán analizados y evaluados desde la perspectiva de la falla por fatiga y esto conlleva la elección de un criterio de falla adecuado.

Para esta situación usamos el criterio de Goodman expresado en la siguiente ecuación [2].

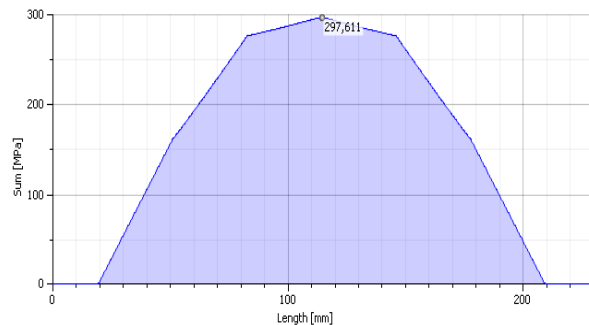
$$\frac{\sigma}{S_u} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$$

Donde  $\sigma$  y  $\sigma_m$  son esfuerzos equivalentes de Von Mises, tanto para amplitud del esfuerzo, como para el esfuerzo medio.  $S_u$  es la resistencia última del material usado y  $S_y$  es el límite de resistencia a la fatiga de la pieza.  $n$  es el factor de seguridad obtenido.

El valor de la resistencia a la fatiga depende de la resistencia a la fluencia del material y de factores modificantes que obedecen al acabado superficial, dimensiones, tipo de carga, temperatura de operación y concentradores de esfuerzos; todas características que pertenecen al elemento mecánico.

Todo esto determina que, para evaluar si el diseño del pin es satisfactorio, se requiere obtener un factor de seguridad superior a 1.

Una vez más el programa de computadora es muy útil porque nos permite encontrar el esfuerzo de Von Mises en el punto crítico. En piezas de geometría compleja, hallar los puntos críticos puede resultar muy difícil.



**Figura 11.** Esfuerzo de Von Mises

Un segundo criterio a evaluar es que la deflexión máxima en el elemento no supere los 100  $\mu\text{m}$ . Para el caso de una viga conocemos la ecuación

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI}$$

Que incluye propiedades elásticas del material y la geometría de la viga [3].

Otra opción es utilizar la simulación del mecanismo en Autodesk Inventor para observar la deformación máxima de la pieza con su geometría real, es decir, no idealizada como un cilindro. Lo que resulta más conveniente. En la figura siguiente se muestra el resultado ofrecido por el programa, utilizando colores y una escala para indicar la deformación [4]. De esta manera se concluye que el diseño del pasador es satisfactorio.

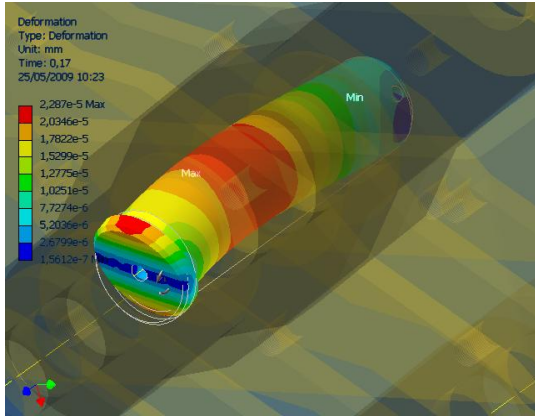


Figura 12. Deformación del pin

Un segundo ejemplo de metodología de diseño lo constituye una unión empernada. Con el fin de que el Martillo Excavador pudiera ser desarmado con relativa facilidad para darle mantenimiento, algunas de las uniones en el diseño son de carácter no permanente logradas por medio de sujetadores mecánicos. Se muestra un ejemplo de este tipo de sujeción mecánica. Se trata de la unión de la pieza que soporta el pin analizado anteriormente con el resto de la estructura principal.

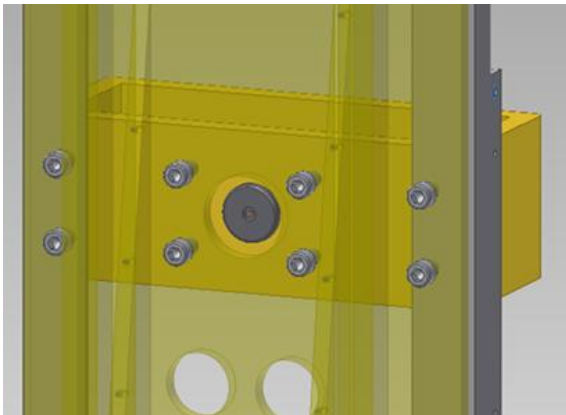


Figura 13. Unión empernada

Para esta aplicación se escogieron pernos disponibles en los almacenes locales. Se ha diseñado una geometría para la ubicación de los pernos y se han escogido ya los pernos. De esta manera se procede a verificar si este diseño cumple con la teoría de falla. Como en muchas partes de este trabajo, el diseño en detalle de esta unión es un proceso iterativo donde se prueban varias opciones hasta encontrar una satisfactoria. Por esta razón sólo se muestra la verificación de esta configuración, ilustrada en la siguiente figura.

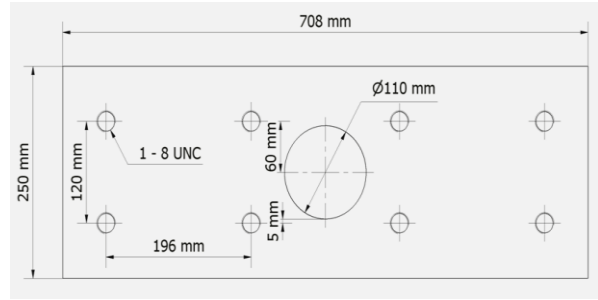


Figura 14. Ubicación de los pernos

Para seguir la metodología estudiada, se aísla el extremo izquierdo por conveniencia y se determina el centroide de los pernos y la fuerza y momento sobre el elemento. A cada perno de la configuración le corresponde una fuerza primaria y una secundaria que determinarán los esfuerzos a los que se somete el elemento.

Para la evaluación de esta unión mecánica se considera la teoría de falla de Goodman que en este caso se expresa con la siguiente ecuación:

$$S_a + S_m = S_u$$

Donde  $S_a$  y  $S_m$  son parámetros que incluyen los esfuerzos producidos por las fuerzas externas así como propiedades mecánicas de los pernos escogidos.

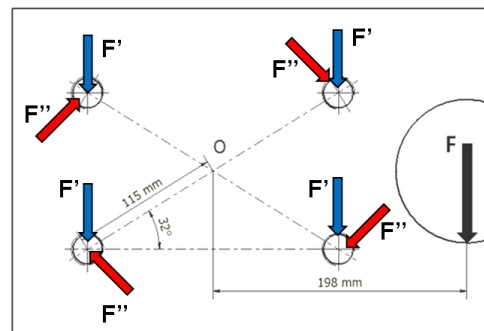


Figura 15. Fuerzas primarias y secundarias

Luego de haber calculado todos los valores requeridos, se los puede ingresar en la ecuación para la teoría de falla de Goodman y verificar el factor de seguridad. Al haber obtenido un valor  $\eta = 1.00$  se satisface el criterio y el diseño se aprueba.

La aplicación de la metodología llevó a conseguir un diseño completo del Martillo Excavador. No sólo se requirió el dimensionamiento de partes y el diseño de uniones no permanentes; también se analizó la soldadura, el sistema hidráulico, el sistema de sujeción y muchos otros detalles. Todos forman un conjunto de sistemas indispensables para lograr un diseño definitivo.



**Figura 16.** Diseño definitivo del Martillo Excavador

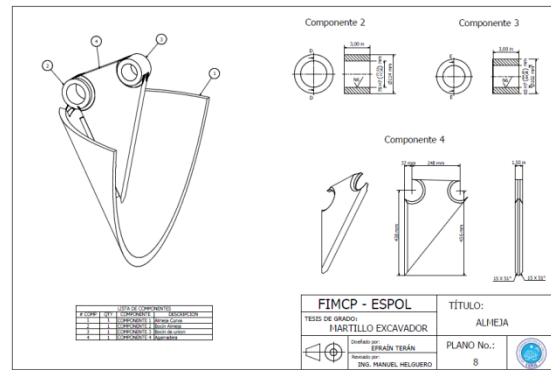
### 3. Planos de construcción

Con el diseño de las partes y componentes terminado, se procedió a elaborar planos de construcción del Martillo Excavador.

Se realizaron planos de piezas individuales dibujando diferentes vistas en sistema europeo para representar la geometría completa de cada elemento. Se agregaron detalles importantes y propios de la mecanización como agujeros, roscas, biseles, chaflanes, acabado superficial, y tolerancias dimensionales, siguiendo la nomenclatura estandarizada.

Las piezas de similares características se agruparon según el tipo de mecanización requerido y la estación de trabajo correspondiente, ayudando a su clasificación y eficiencia en el uso del tiempo de fabricación.

Se agregaron vistas isométricas a piezas más complejas para facilitar su comprensión por parte del personal de taller. En muchos casos fue indispensable realizar tablas de sub componentes y agregar detalles en diferente escala para poder observar la pieza completamente.

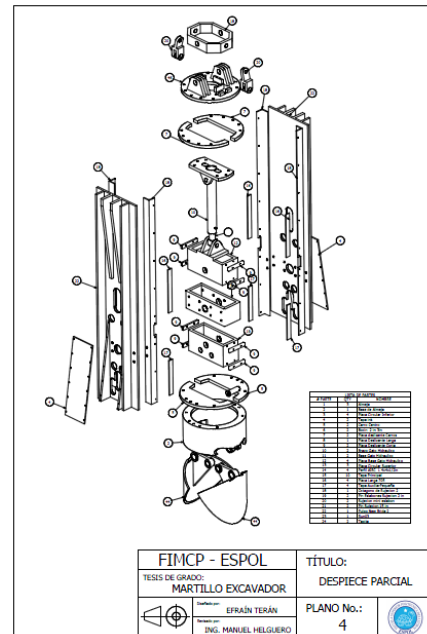


**Figura 17.** Plano detallado de una almeja

Se hicieron planos de ensamblajes y sub ensamblajes tomando en cuenta el orden correcto de mecanización de las piezas y su acoplamiento. Detalles como ajustes y tolerancias dimensionales fueron indispensables para las piezas en contacto.

Para los elementos soldados se realizaron dibujos particulares donde se detalla la ubicación y características de los cordones de soldadura utilizando la simbología correspondiente.

Otros planos detallan subsistemas completos, como el sistema de sujeción o el sistema hidráulico, para que puedan ser fácilmente identificados y construidos. Finalmente están los planos que muestran el ensamble completo en diferentes posiciones y que sirven para verificación.



**Figura 18.** Despiece del mecanismo

## 4. Costos

Como todo trabajo en ingeniería, el objetivo es crear soluciones aplicables en el mundo real. Un aspecto trascendental de esa solución es el análisis de los costos que genera su aplicación. En esta sección se describe cada uno de los rubros que conforman el costo total del Martillo Excavador. Se los ha clasificado por conveniencia, según su naturaleza, en 4 rubros principales que son:

*Materiales.*- incluye planchas de acero, barras, tubos, perfiles y elementos estructurales que requieren de procesos de mecanización para transformarse en partes de la máquina.

*Consumibles.*- son sustancias y materiales que se consumen en los procesos de oxicorte, soldadura y pintura.

*Accesorios y herramientas.*- corresponde a herramientas y partes prefabricadas que se incluyen en el Martillo Excavador o que se deben adquirir exclusivamente para construirlo.

*Mano de obra.*- acumula los gastos de la empresa en pagos de sueldos a sus empleados, lo que incluye ayudantes, soldador, tornero, fresador, etc., así como los gastos de diseño y dirección del proyecto.

Tras hacer un análisis de cada grupo se obtuvo la siguiente tabla de costos totales del Martillo Excavador.

**Tabla 2.** Costos del Martillo Excavador

CONCEPTO	SUBTOTAL
Materiales	\$ 8.214.17
Consumibles	\$ 583.40
Accesorios y herramientas	\$ 1.176.33
Mano de Obra	\$ 7.571.60
<b>Costo Total</b>	<b>\$ 17.545.50</b>

Vale la pena comparar el costo total del Martillo Excavador obtenido con los precios disponibles en el mercado.

En general, el valor de un martillo excavador de características similares en el mercado internacional, es de alrededor de USD 55 000 en promedio. Esto significa que, a un costo de USD 17 545.50, el diseño aquí propuesto representa sólo el 32% del precio del mercado logrando un ahorro de USD 37 000 aproximadamente para el cliente.

Esa sustancial diferencia obtenida con este trabajo de diseño justifica el esfuerzo con mucho. La recompensa no es sólo monetaria, pues también contribuye al bienestar económico del país y a su desarrollo tecnológico.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados de este trabajo fueron el diseño completo y detallado de un Martillo Excavador, listo para su construcción, además de una estimación del costo de su realización.

Observando estos resultados vale la pena mencionar las siguientes conclusiones:

Las etapas del proceso de diseño son aplicables e indispensables para lograr un resultado exitoso. Los principios de ingeniería aprendidos pueden considerarse confiables y aplicables. El diseño computacional potencia las capacidades y conocimiento de un ingeniero en la práctica. El diseño y construcción de máquinas a nivel local resulta ventajosa en varios aspectos.

Además es importante establecer las siguientes recomendaciones a futuro:

Fomentar el aprendizaje de programas computacionales de diseño mecánico. Recalcar la importancia de los conceptos de ingeniería por encima del uso de herramientas virtuales. Empezar proyectos similares que ayuden al crecimiento tecnológico de nuestro país.

## 6. Referencias

- [1] F.Singer & L.Pytel, Resistencia de Materiales, 3ra Edición, Alfahomega, 2005
- [2] Joseph E. Shigley y Charles R. Mischke, Diseño en Ingeniería Mecánica, 6ta Edición, McGraw-Hill, México, 2002.
- [3] Robert L. Norton, Diseño de máquinas, 3ra Edición, McGraw-Hill, México, 2005
- [4] Guía de entrenamiento de Autodesk Inventor. Autodesk, 2008