



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**“SIMULACIÓN DE RECUPERACIÓN POR MÉTODO DE  
ELEMENTO FINITO DE CUCHARONES PARA  
MAQUINARIA DE MINERÍA.”**

**SAÚL ANDRÉS COLOMA MORALES**

# **TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Previa a la obtención del Título de:**

# **INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**RIOBAMBA – ECUADOR  
2017**

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

---

**2016-10-20**

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

**SAÚL ANDRÉS COLOMA MORALES**

Titulado:

**“SIMULACIÓN DE RECUPERACIÓN POR MÉTODO DE ELEMENTO FINITO  
DE CUCHARONES PARA MAQUINARIA DE MINERÍA.”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

---

Ing. Carlos Santillán Mariño  
**DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Édison Marcelo Castillo Cárdenas  
**DIRECTOR**

---

Ing. Celin Abad Padilla Padilla  
**ASESOR**

---

**CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TRABAJO**  
**DE TITULACIÓN**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** SAÚL ANDRÉS COLOMA MORALES

**TRABAJO DE TITULACIÓN:** “SIMULACIÓN DE RECUPERACIÓN POR MÉTODO DE ELEMENTO FINITO DE CUCHARONES PARA MAQUINARIA DE MINERÍA.”

**Fecha de Examinación:** 2017-05-10

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. José Francisco Pérez Fiallos <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Edison Marcelo Castillo Cárdenas. <b>DIRECTOR</b>			
Ing. Celin Abad Padilla Padilla. <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. José Francisco Pérez Fiallos.  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de titulación que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

**Saúl Andrés Coloma Morales.**

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Yo, Saúl Andrés Coloma Morales, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados. Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

---

**Saúl Andrés Coloma Morales.**

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mi madre Margoth Morales y a mi padre Roque Coloma que me brindaron su confianza e incondicional apoyo durante toda mi preparación profesional ya que su gran esfuerzo hoy se refleja en este proyecto y en la culminación de mi carrera.

A mis hermanos, José Coloma y Julissa Coloma que son parte esencial de este logro y familia que estuvieron siempre a mi lado dándome fuerzas en momentos difíciles.

A mi novia Jhosselyn Valdez por el apoyo incondicional durante nuestros estudios, ya que fue un pilar fundamental.

**Saúl Andrés Coloma Morales**

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme culminar el presente trabajo de titulación, porque poco a poco se hizo realidad este sueño tan anhelado. A la Escuela Superior Politécnica De Chimborazo y en especial a la Carrera de Ingeniería Automotriz por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

A mi Tutor, Ing. Marcelo Castillo, a mi asesor, Ing. Celin Padilla por su esfuerzo y dedicación, quienes con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su estimulación han logrado que este proyecto concluya con total éxito.

**Saúl Andrés Coloma Morales**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>CAPÍTULO I</b>	
1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Antecedentes. ....	18
1.2 Justificación.....	18
1.2.1 <i>Justificación técnica.</i> ....	18
1.2.2 <i>Justificación económica.</i> .....	19
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 <i>Objetivo General.</i> .....	19
1.3.2 <i>Objetivos específicos.</i> .....	19
1.4 Hipótesis. ....	19
1.4.1 <i>Verificación de hipótesis.</i> .....	19
1.5 Resultados a alcanzar.....	20
<b>CAPÍTULO II</b>	
2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 <i>Las máquinas de excavación y carga de tierras.</i> .....	21
2.2 <i>Tipos de máquinas.</i> ....	21
2.3 <i>Dimensiones de las máquinas.</i> .....	24
2.4 <i>Tipos de trabajo.</i> .....	24
2.4.1 <i>Excavadora de empuje.</i> .....	24
2.4.2 <i>La dragalina.</i> ....	24
2.4.2 <i>La retroexcavadora hidráulica.</i> .....	24
2.4.3 <i>La cuchara de almeja.</i> ....	24
2.5 <i>Elementos principales de las máquinas de movimiento de tierras.</i> .....	25
2.6 <i>Características y constitución de las excavadoras.</i> .....	25
2.7 <i>Retroexcavadora.</i> .....	27
2.8 <i>Selección de las máquinas.</i> ....	28
2.8.1 <i>Selección de una excavadora.</i> .....	28
2.8.2 <i>Selección de una retroexcavadora.</i> .....	31

2.9	<i>Equipos de excavación hidráulicos.</i>	31
2.10	<i>Partes de un cucharón de excavadora.</i>	33
2.11	<i>Dureza y ensayos de dureza.</i>	34
2.12	<i>Tensión y deformación en metales.</i>	35
2.12.1	<i>Deformación elástica y plástica.</i>	35
2.12.2	<i>Deformación convencional.</i>	35
2.12.3	<i>Coefficiente de Poisson.</i>	36
2.13	<i>Ensayo de tracción.</i>	36
2.13.1	<i>Propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tracción.</i>	36
2.13.2	<i>Módulo de elasticidad.</i>	37
2.13.3	<i>Límite elástico.</i>	37
2.13.4	<i>Resistencia a la tracción.</i>	38
2.13.5	<i>Porcentaje de alargamiento.</i>	38
2.13.6	<i>Porcentaje de estricción</i>	39
2.14	<i>Fracturas de los metales.</i>	39
2.14.1	<i>Fractura dúctil.</i>	39
2.14.2	<i>Fractura frágil.</i>	40
2.15	<i>Fatiga de los elementos.</i>	41
2.16	<i>Diagrama de fase.</i>	42
2.17	<i>Método de elemento finito.</i>	43
2.17.1	<i>Elementos finitos de un continuo elástico.</i>	43
2.17.2	<i>Ecuación de estado</i>	44

### **CAPÍTULO III**

3.	<b>ESTUDIO DEL MATERIAL UTILIZADO PARA LA FABRICACIÓN DE CUCCHARONES DE RETROEXCAVADORAS.</b>	45
3.1	<b>Preparación de las probetas para las pruebas de laboratorio.</b>	45
3.1.1	<i>Preparación de la superficie.</i>	46
3.1.2	<i>Ataque Químico</i>	48
3.2	<b>Ensayo metalográfico.</b>	48
3.3	<b>Espectrometría.</b>	49
3.3.1	<i>Propiedades de los materiales presentes en el acero AISI 1522.</i>	50

3.4	Ensayo de dureza. ....	51
3.5	Material del cucharon de la retroexcavadora. ....	51
3.5.1	<i>Composición química..</i> .....	51
3.5.2	<i>Propiedades Físicas</i> .....	52
3.5.3	<i>Propiedades Mecánicas</i> .....	52

## **CAPÍTULO IV**

4	ANÁLISIS DEL CUCHARON DE EXCAVADORA HIDRAULICA MEDIANTE CAE.....	53
4.1	Diseño de la geometría. ....	53
4.1.1	<i>Trazado de la geometría en el software SolidWorks</i> .....	53
4.2	Análisis del cucharon de excavadora hidráulica mediante elementos finitos.....	53
4.2.1	<i>Importar la geometría al programa ANSYS 16.1</i> .....	54
4.2.2	<i>Designación del material</i> .....	54
4.2.3	<i>Mallado</i> .....	55
4.2.4	<i>Restricciones físicas del problema</i> .....	56
4.2.5	<i>Fuerzas aplicadas sobre el cucharon de la retroexcavadora hidráulica</i> .....	56
4.3	Análisis de estudios relevantes en el cucharón de la retroexcavadora. ....	57
4.3.1	<i>Análisis de deformación</i> .....	58
4.3.2	<i>Esfuerzo de Von Mises</i> .....	58
4.3.3	<i>Factor de seguridad</i> .....	59
4.4	Análisis de resultados. ....	59
4.4.1	<i>Deformación del cucharon de la excavadora hidráulica</i> .....	60
4.4.2	<i>Tensión de Von Mises</i> .....	60
4.4.3	<i>Factor de Seguridad</i> .....	61
4.5	Análisis del cucharón al golpear con un banco.....	61

## **CAPÍTULO V**

5.	OPTIMIZACIÓN DE SOLUCIONES. ....	63
5.1	Factores a tomar en cuenta al momento de la reparación. ....	65
5.2	Propuesta número uno, cordón de soldadura. ....	67
5.3	Propuesta número dos, añadidura de placas. ....	67

5.3.1	<i>Materiales a utilizar</i> .....	68
5.4	Modelación de los métodos. ....	69
5.4.1	<i>Modelación de añadidura de soldadura</i> .....	69
5.4.2	<i>Modelación de añadidura de placas</i> .....	69
5.4	Análisis mediante método de elemento finito de las propuestas planteadas. ....	70
5.4.1	<i>Análisis de la añadidura de soldadura</i> .....	70
5.4.2	<i>Análisis de la añadidura de placas</i> .....	72
5.4.3	<i>Resultados de los análisis del análisis de la añadidura de placas</i> .....	77
5.4.4	<i>Análisis de la añadidura de placas al momento de golpear el cucharón con un banco de roca</i> .....	78
5.5.	Análisis económico.....	78

## **CAPÍTULO VI**

6.	VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS .....	81
6.1	Análisis de distribución T-Student de la deformación.....	81
6.1.2	<i>Análisis de distribución T-Student del Factor de seguridad</i> .....	81
6.1.3	<i>Análisis de hipótesis</i> .....	82

## **CAPÍTULO VII**

7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	84
7.1	Conclusiones.....	84
7.2	Recomendaciones. ....	84

## **BIBLIOGRAFÍA**

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Excavadora de empuje.....	22
Figura 2. Dragalina. ....	22
Figura 3. Retroexcavadora. ....	23
Figura 4. Cuchara de almeja. ....	23
Figura 5. Deslizamiento por cremalleras. ....	26
Figura 6. Deslizamiento por cable o cadena. ....	27
Figura 7. Partes que conforma el cucharón.....	34
Figura 8. Cuerpo sometido a tensión de tracción.....	36
Figura 9. Diagrama tensión deformación. ....	37
Figura 10. Esfuerzos cíclicos. ....	41
Figura 11. Diagrama de fases en equilibrio presión-temperatura, para el hierro puro. ..	42
Figura 12. Ecuación de estado. ....	44
Figura 13. Base de las cuchillas del cucharón de maquinaria de minería. ....	45
Figura 14. Plancha de desgaste inferior. ....	46
Figura 15. Protectores laterales.....	46
Figura 16. Máquina de corte refrigerada.....	47
Figura 17. Paño. ....	47
Figura 18. Probeta con el acabado final.....	48
Figura 19. Ensayo metalográfico a 500x. ....	49
Figura 20. Espectrometría.....	50
Figura 21. Geometría en SolidWorks del cucharón de la excavadora Hyundai L220....	53
Figura 22. Importar la geometría. ....	54
Figura 23. Designación del material. ....	55
Figura 24. Parámetros de mallado. ....	55
Figura 25. Calidad de la malla.....	56
Figura 26. Restricción física del cucharón de la retroexcavadora hidráulica. ....	56
Figura 27. Fuerza de excavación. ....	57
Figura 28. Detalles del estudio de deformación en ANSYS 16.....	58
Figura 29. Detalles del estudio de esfuerzos.....	59
Figura 30. Detalles del factor de seguridad. ....	59

Figura 31. Análisis de Deformación. ....	60
Figura 32. Tensión de von Mises. ....	61
Figura 33. Factor de seguridad. ....	61
Figura 34. Análisis del cucharón al golpear un banco. ....	62
Figura 35. Parte Superior del cucharón y orejas principales. ....	63
Figura 36. Base de las cuchillas del cucharón. ....	64
Figura 37. Interior del cucharón, piso, laterales y techo. ....	64
Figura 38. Parte inferior y laterales exteriores del cucharón. ....	65
Figura 39. Cuchilla de la excavadora. ....	65
Figura 40. Cuchilla de maquinaria de minería desgastada. ....	66
Figura 41. Cuchara de maquinaria de minería deformada por sobrecarga temporal. ....	67
Figura 42. Placas protectoras en posición horizontal. ....	69
Figura 43. Placas protectoras en posición vertical. ....	69
Figura 44. Placas protectores en forma de X. ....	70
Figura 45. Esfuerzos que interviene en la soldadura. ....	71
Figura 46. Análisis de soldadura. ....	72
Figura 47. Deformación de placas horizontal, usando FORA 450. ....	72
Figura 48. Factor de seguridad de las placas horizontales, usando FORA 450. ....	73
Figura 49. Deformación de las placas verticales, usando FORA 450. ....	73
Figura 50. Factor de seguridad de las placas verticales, usando FORA 450. ....	74
Figura 51. Deformación de las placas protectoras en forma de X, usando FORA 450. ....	74
Figura 52. Factor de seguridad de las placas en forma de X, usando FORA 450. ....	75
Figura 53. Deformación de las placas horizontales usando acero naval, ....	75
Figura 54. Factor de seguridad de las placas horizontales usando acero naval. ....	76
Figura 55. Deformación de las placas en posición vertical usando acero naval. ....	76
Figura 56. Factor de seguridad de las placas horizontales usando acero naval. ....	76
Figura 57. Deformación de las placas en forma de X, usando acero naval. ....	77
Figura 58. Factor de seguridad de las placas en forma de X, usando acero naval. ....	77
Figura 59. Análisis de la añadidura de placas al momento de golpear el cucharón. ....	78
Figura 60. Grafica de distribución de T-Student de la deformación. ....	81
Figura 61. Grafica de distribución de T-Student del factor de seguridad. ....	82
Figura 62. Análisis de la hipótesis mediante el uso del software minitab 17.1. ....	83

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Rendimiento en metros cúbicos por hora. Palas excavadoras. ....	28
Tabla 2. Profundidad de corte para palas excavadoras. ....	29
Tabla 3. Resultados del ensayo de dureza. ....	51
Tabla 4. Composición química. ....	52
Tabla 5. Propiedades físicas. ....	52
Tabla 6. Propiedades mecánicas. ....	52
Tabla 7. Características del acero AISI 1522. ....	54
Tabla 8. Propiedades mecánicas del acero FORA 450. ....	68
Tabla 9. Propiedades mecánicas del acero ASTM A 131. ....	68
Tabla 10. Eurocode 3. Datos Válidos para un espesor inferior a 40mm. ....	71
Tabla 11. Resultado de los análisis de la añadidura de placas. ....	77
Tabla 12. Precio de las partes intercambiables del cucharón. ....	79
Tabla 13. Comparación de los materiales. ....	79
Tabla 14. Datos de la deformación usados en el análisis de distribución T-Student. ....	81
Tabla 15. Datos usados en el análisis del Factor de seguridad. ....	82
Tabla 16. Datos utilizados para el cálculo de hipótesis. ....	83

## LISTA DE ABREVIACIONES

- ASTM** American Society of the International Association for Testing AND Materials  
(Asociación Americana de Ensayos de Materiales)
- CAD** Computer Aided Design (Diseño asistido por computadora)
- CAE** Computer Aided Engineering (Ingeniería asistida por computadora)
- MEF** Método de Elementos Finitos
- AISI** American Iron and Steel Institute (Instituto americano del hierro y el acero)
- ISO** International Organization for Standardization (Organización internacional de normalización)
- HB** Hardness Brinell (Dureza de Brinell)
- HRC** Hardness Rockwell C (Dureza de Rockwell C)

## RESUMEN

Se realizó una simulación para la recuperación por método de elemento finito de cucharones para maquinaria de minería, el cucharón de una excavadora hidráulica está diseñado para aplicaciones de movimiento de tierra de servicio pesado y alta producción, por lo cual está sometido a diferentes esfuerzos. Como punto de partida se analizó el material con el cual es construido el cucharón, para esto se tomó seis muestras de diferentes partes del cucharón de la excavadora, con los cuales se realizó ensayos metalográficos, ensayos de dureza y ensayos espectrométricos. Se dibujó el cucharón de excavadora con la ayuda de software CAD, y posterior a esto se importó el diseño al software de método de elemento finito en el cual se sometió el cucharón de excavadora a condiciones extremas y se evaluó el resultado. Para el análisis de la recuperación se utilizó los aceros AISI 1522 y FORA 450, se utilizó tres tipos de geometría: soportes horizontales, soportes verticales y horizontales, y soportes en X. Con el resultado del análisis se escogió el material FORA 450 y la geometría en forma de X, ya que fueron los resultados más adecuados para realizar la recuperación, para esto se tomó en cuenta factores técnicos y económicos. Se verificó la validez de la hipótesis, por lo cual realizar la recuperación de cucharones de maquinaria de minería es factible. Se recomienda utilizar la excavadora únicamente para lo cual fue diseñada, ya que un mal uso puede perjudicar la reparación.

PALABRAS CLAVES: <SIMULACIÓN POR MÉTODO DE ELEMENTO FINITO>, <RECUPERACIÓN>, <DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD)>, <MAQUINARIA DE MINERÍA>, <CUCHARONES DE EXCAVADORA>, <ENSAYO METALOGRAFICO>, <INSTITUTO AMERICANO DEL HIERRO Y EL ACERO (AISI)>, <ACERO RESISTENTE A LA FRICCIÓN (FORA)>

## ABSTRACT

A simulation was carried out in order to apply the finite element method of buckets machinery, this bucket of hydraulic excavator is designed to apply land movements to produce heavy and high production service, which has different ways. As a starting point, the material of the bucket was analyzed by six samples from different parts, with which metallographic practices, hardness tests and spectrophotometric trials experiment was developed. With the computer-assisted design software (CAD) was possible to design the excavator ladle, then this design was sent to the software of finite element method in which the excavator ladle was exposed to extreme conditions and the result was tested. For the analysis were used some steels: AISI 1522, FORA 450, also three kinds of geometry: horizontal, vertical, and X supports. It was conclude with the result from the analysis showed that the material FORA 450 and the X geometry shape were suitable to apply the operation, for this was taken into account technical and economic factors. The hypothesis was verified, so the recovery of mining machinery buckets is feasible.

KEY WORDS: <SIMULATION BY FINITE ELEMENT METHOD>, <RECOVERY>, <COMPUTER ASSISTED DESIGN (CAD)>, <MINING MACHINERY>, <BUCKET EXCAVATOR>, <ESSAY METALLOGRAPHIC>, < AMERICAN INSTITUTE OF IRON AND EL STEEL (AISI)>, <STEEL RESISTANT TO FRICTION

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN.

#### 1.1 Antecedentes.

El cucharón de una excavadora hidráulica está diseñado para aplicaciones de movimiento de tierra de servicio pesado y alta producción, por lo cual está sometido a diferentes esfuerzos.

La mayor parte de estas fuerzas están concentradas en la parte inferior del cucharón, y este elemento va a sufrir desgaste, ocasionando que se rompan, siendo este el problema más común.

Luego de romperse los cucharones se los recupera mediante un procedimiento empírico, el cual es eficiente en bajo índice, generando que los cucharones se rompan inesperadamente generando paradas imprevistas, produciendo perjuicios económicos y disminución de la producción.

#### 1.2 Justificación.

**1.2.1 Justificación técnica.** Actualmente para la reparación de componentes mineros, se asigna dicha tarea a diferentes empresas previa una evaluación técnica, se ha notado que estas empresas reparan los cucharones con diferentes procedimientos los cuales son empíricos careciendo de técnicas adecuadas, por esto difieren mucho uno de otro procedimiento. Esto origina que los cucharones de la maquinaria pesada se rompan repentinamente produciendo paradas imprevistas, perjuicios económicos y disminución de la producción. Actualmente solo se inspecciona visualmente para determinar si un cucharón de maquinaria pesada puede o no continuar trabajando, esto depende directamente del medio ambiente en el cual están laborando, esto lo confirma el Ing. Fernando Gaibor Jefe de taller del GADPB.

En el Gobierno Autónomo Provincial de Bolívar se cuenta con 18 excavadoras hidráulicas y 28 retroexcavadoras de los cuales todos los cucharones han sido reparados.

Por lo ya expuesto resulta pertinente realizar un análisis mediante método de elemento finito para solucionar este problema del desgaste prematuro o que el cucharón se rompa luego de realizar la reparación. Con este análisis se pretende encontrar un procedimiento adecuado para la recuperación de cucharones.

**1.2.2** *Justificación económica.* Actualmente los cucharones de retroexcavadora de maquinaria de minería, se reparan de forma empírica, provocando que los costos varíen de una reparación a otra. El Ingeniero Fernando Gaibor, jefe de taller de la Prefectura de Bolívar, asegura que una reparación se encuentra en un rango de 2000 a 6000 dólares.

Para realizar una reparación es necesario cambiar, la base, uñas, protecciones laterales, tuercas, pines y bocines, además de esto es necesario tomar en cuenta la mano de obra

### **1.3** **Objetivos.**

#### **1.3.1** *Objetivo General.*

Simular la recuperación por método de elemento finito de cucharones para maquinaria de minería.

#### **1.3.2** *Objetivos específicos.*

- Analizar el material antes y después del desgaste mediante estudios metalográficos.
- Trazar la geometría del cucharón con la ayuda de un software CAD.
- Determinar el procedimiento óptimo para la recuperación de cucharones.
- Evaluar la eficacia de los procedimientos para la recuperación de cucharones mediante método de elemento finito.

### **1.4** **Hipótesis.**

La superpuesta de placas metálicas y cordones de soldadura son procedimientos adecuados para la recuperación de cucharones de maquinaria de minería.

**1.4.1** *Verificación de hipótesis.* Se validara la hipótesis mediante las pruebas estadísticas del T-Student.

## **1.5 Resultados a alcanzar.**

Mediante la correcta simulación se espera obtener análisis de los diferentes materiales, geometría y procedimientos para verificar la efectividad del procedimiento de recuperación de cucharones.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Las máquinas de excavación y carga de tierras.

La palabra excavar tiene un significado preciso, ya que se trata de realizar un esfuerzo de disgregación de un material consolidado. Las máquinas de excavación mecánica de metal fueron desarrolladas en el segundo decenio del siglo XX por razones económicas y de eliminación de la fatiga física que la excavación manual producía. (Río, 2006)

Las excavadoras se perfeccionaron definitiva en la segunda guerra mundial. Ello fue debido a que durante aquellos años se logró un motor diésel suficientemente ligero, rápido y fiable para el accionamiento, ya que el uso de la gasolina como fuerza motriz resultaba excesivamente costoso. (Río, 2006)

Una importante evolución ha tenido también lugar en los años setenta al ponerse a punto los mecanismos hidráulicos de gran potencia y fiabilidad que han dado origen a las excavadoras hidráulicas. Hasta entonces, las excavadoras fueron simplemente equipos mecánicos. En la actualidad, los equipos hidráulicos de excavación tienen una presencia cada vez mayor en las obras por su gran flexibilidad e indudable costo de explotación competitivo. (Río, 2006)

La excavadora está diseñada para excavar a su propio nivel. La excavadora trabaja mejor cuando excava debajo de su nivel normal. (Nichols, 1993)

#### 2.2 Tipos de máquinas.

Dentro de los equipos mecánicos de carga de tierras cabe distinguir los siguientes:

- Excavadora de empuje. (Fig. 1.)
- Dragalina. (Fig. 2.)
- Retroexcavadora. (Fig. 3.)
- Cuchara de almeja. (Fig. 4.)

Figura 1. Excavadora de empuje.



[http://s7d2.scene7.com/is/image/Caterpillar/C10397793?\\$cc-s\\$](http://s7d2.scene7.com/is/image/Caterpillar/C10397793?$cc-s$)

Figura 2. Dragalina.



Fuente: [http://img.directindustry.es/images\\_di/photo-g/55229-8296810.jpg](http://img.directindustry.es/images_di/photo-g/55229-8296810.jpg)

Figura 3. Retroexcavadora.



Fuente: <https://www.logismarket.com.ar/ip/biscayne-retroexcavadora-sistema-hidraulico-retro-sistema-hidraulico-1060724-FGR.jpg>

Figura 4. Cuchara de almeja.



Fuente: [http://img.nauticexpo.es/images\\_ne/photo-g/30468-10115390.jpg](http://img.nauticexpo.es/images_ne/photo-g/30468-10115390.jpg)

### **2.3 Dimensiones de las máquinas.**

Dentro de las palas excavadoras, o excavadoras de empuje, la manera de definir su capacidad es evaluando el volumen de su cuchara en metros cúbicos. Son tamaños normales las palas con capacidad de cuchara comprendida entre 0,3 y 2,5 m<sup>3</sup>. (Río, 2006)

La Dragalina, la retroexcavadora y la cuchara de almeja pueden adaptarse a un mismo chasis de excavadora de empuje. Tienen un volumen de sus aparejos igual o ligeramente inferior al de la propia cuchara de la excavadora, que generalmente se considera la maquina base. (Río, 2006)

### **2.4 Tipos de trabajo.**

Los trabajos realizados por las distintas variantes de equipos pueden definirse de la siguiente manera:

**2.4.1 Excavadora de empuje.** Es una máquina que realiza las mismas funciones elementales de excavación que una simple pala de mano. Estas operaciones son: Hincar la cuchara, levantar la carga, girar la cuchara misma verter después el contenido ya en la posición girada. (Río, 2006)

**2.4.2 La dragalina.** Consta de un balde que se lanza sujeto a unos cables recogiendo tierra en su interior al cobrar estos. Una vez realizada la carga del balde, este queda colgado de tal manera que no viene la tierra, pudiéndose mantenerlo suspendido y ser girado para depositar al cargamento en cualquier otra posición dentro del alcance de la pluma. (Río, 2006)

**2.4.2 La retroexcavadora hidráulica.** Realiza la misma función que la pala excavadora, pero en vez de recoger la tierra por encima del nivel de sus orugas o sistema de sustentación, la hace en un plano inferior, por esta razón, es muy empleada para la excavación de zanjas. (Río, 2006)

**2.4.3 La cuchara de almeja.** Tiene un dispositivo que, dejándola caer desde una posición elevada, recoge entre sus valvas el material que se quiere elevar, cerrando éstas mediante un sistema de cables, lo que permite proceder a la elevación, ya que entonces el material no se derramará. (Río, 2006)

## **2.5 Elementos principales de las máquinas de movimiento de tierras.**

Las máquinas de movimiento de tierras constan de las siguientes partes principales:

- Superestructura giratoria.
- Base o montaje fijo.
- Herramientas de trabajo.

Los mandos de las excavadoras deben responder a una serie de condiciones para su mejor y más ordenado funcionamiento. Estas condiciones son las siguientes:

- Concepción sencilla y robusta.
- Seguridad en el funcionamiento.
- Gran fiabilidad y reparación sencilla.
- Conservación y entretenimiento reducidos.
- Confortabilidad y ligereza en el manejo.

## **2.6 Características y constitución de las excavadoras.**

La pala excavadora integra tres elementos fundamentales:

- La pluma.
- Los brazos.
- La cuchara de cargue.

La pluma se compone, esencialmente, de una viga de acero en cajón que se mantiene fija a la superestructura giratoria por medio de un sistema de cables. Estos cables permiten variar en cada caso la inclinación de la pluma antes de proceder el trabajo. (Río, 2006)

Los brazos están constituidos por vigas cajón que se deslizan a lo largo de una línea fija de la pluma. En el extremo de los brazos va fija la cuchara de cargue. (Río, 2006)

La cuchara de cargue, debe ser autolimpiable, en el borde que ha de hacer contacto con la tierra o roca un sistema de dientes recargables de acero al manganeso; este material es empleado por su gran resistencia a la abrasión y a la rotura. (Río, 2006)

De esta manera se consigue que la cuchara propiamente dicha, que tiene un coste importante, no sufra durante prácticamente toda la vida de la máquina gracias a un elemento recambiable que es al que se confía el trabajo más brusco. (Río, 2006)

El deslizamiento del brazo con relación a la pluma se puede hacer por varios sistemas, entre los que destacan los de cremallera, cadena y cable. (Río, 2006)

El deslizamiento por cremallera (Fig. 5.) resulta eficaz en las palas pequeñas, donde los esfuerzos son relativamente moderados; los sistemas de deslizamiento por cadenas (Fig. 6) o por cable (Fig. 6) son los más empleados en máquinas más pesadas. (Río, 2006)

Figura 5. Deslizamiento por cremalleras.



Fuente:[http://2.bp.blogspot.com/BW7uivJk/VGG\\_8jJoUYI/AAAAAAAAANns/ttP5B8kiwXA/s1600/excavadora%2Bvapor.bmp](http://2.bp.blogspot.com/BW7uivJk/VGG_8jJoUYI/AAAAAAAAANns/ttP5B8kiwXA/s1600/excavadora%2Bvapor.bmp)

Figura 6. Deslizamiento por cable o cadena.



Fuente: <http://multiplikatrust.com.ar/wp-content/uploads/2015/04/pala-de-cable-300x225.jpg>

La máquina excavadora, que puede excavar múltiples materiales, está limitada a un esfuerzo máximo en los dientes de la cuchara. Cuando se pretende sobrepasar este esfuerzo, surgen deformaciones y roturas anormales. Para evitar esto, resulta mucho más conveniente disgregar previamente el material a excavar. (Río, 2006)

Las máquinas excavadoras de menor capacidad, sobre neumáticos son máquinas cargadoras no realmente excavadoras, pues el esfuerzo que pueden dar en la cuchara es muy reducido. (Río, 2006)

## **2.7 Retroexcavadora.**

La retroexcavadora consta, en esencia de una pluma similar a la empleada en la excavadora de empuje; en el extremo anterior va un brazo cuya posición es generalmente vertical con juego hacia delante y hacia atrás. Cuando se procede a la excavación, el brazo gira separando la cuchara de la máquina. Posteriormente se baja la pluma, lo cual obliga a un hincado de la cuchara, y a continuación, se gira la cuchara hacia la máquina, con lo que se consigue llenarla de tierra. (Río, 2006)

Una vez realizada esta función, se eleva la pluma y el brazo que le es solidario. Para el vertido hay que girar el conjunto de la superestructura, deshaciendo posteriormente el movimiento de acercamiento de la cuchara a la máquina y girando después la cuchara para su vertido. (Río, 2006)

## 2.8 Selección de las máquinas.

**2.8.1 Selección de una excavadora.** Tratándose de máquinas de un elevado coste, puede ser básica una prudencial cautela en la elección para una explotación rentable. Hay que tomar en cuenta los siguientes aspectos que intervienen de manera fundamental en la explotación.

En primer lugar, conviene insistir en que, en la elección de una máquina, depende de la dureza o consolidación del material a extraer o excavar resulta fundamental. Cuando se trata de excavar margas o arcillas poco consistentes es suficiente con cualquier tipo de máquina por pequeña que esta sea. (Río, 2006)

Cuando se pretende hacer la excavación de materiales rocosos duros, aunque previamente volados con dinamita u otros explosivos, no es aconsejable el uso de palas excavadoras con una capacidad inferior a los tres cuartos de metro cubico. (Río, 2006)

El rendimiento de una excavadora, está en función de la capacidad de la cuchara y varía según el tipo de material a excavar y cargar. Puede darse una regla aproximada como la siguiente: por cada metro cubico de capacidad de cuchara, una pala carga por hora 100 m<sup>3</sup> de material blando y 70 m<sup>3</sup> de material duro o rocoso. (Río, 2006)

La cota de excavación influye también de manera muy notable en el rendimiento de una pala. (Río, 2006)

Tabla 1. Rendimiento en metros cúbicos por hora. Palas excavadoras.

Tamaño del cucharón (m <sup>3</sup> )									
Clase de material.	0,29	0,38	0,58	0,77	0,96	1,15	1,35	1,5	1,9
Tierra húmeda o arcilla arenosa y liviana.	65	88	125	155	190	220	245	270	310

Fuente: (Río, 2006)

Tabla 1. (Continuación). Rendimiento en metros cúbicos por hora. Palas excavadoras.

Arena y grava.	60	85	120	150	175	205	230	250	300
Tierra común.	53	73	105	135	160	185	205	230	270
Arcilla dura.	38	57	85	110	140	160	180	200	235
Roca bien fragmentada.	30	45	73	95	120	140	155	175	210
Material común con raíces y rocas.	23	38	61	80	100	120	140	153	187
Arcilla mojada y pegajosa.	19	30	54	73	92	110	126	141	175
Rocas mal fragmentadas.	12	19	38	57	73	88	107	122	150

Fuente: (Río, 2006)

Se entiende por óptima cota de excavación, o profundidad de corte, aquella con la que se consigue un máximo rendimiento en volumen excavado y la posibilidad de llenar completamente la cuchara sin dificultades en un solo recorrido de la misma. (Río, 2006)

Tabla 2. Profundidad de corte para palas excavadoras.

Capacidad del cucharón (en m <sup>3</sup> ).	Materiales, suelos, arena, grava, etc. (en m).	Materiales medianos tierra común (en m).	Materiales difíciles, arcilla dura, mojada y pegajosa (en m).
0,29	1,15	1,37	1,83
0,38	1,40	1,43	2,13
0,58	1,62	2,07	2,44
0,77	1,83	2,38	2,74
0,96	1,98	2,60	2,99
1,15	2,13	2,80	3,26
1,35	2,25	2,96	3,51
1,5	2,38	3,11	3,72
1,9	2,56	3,41	4,05

Fuente: (Hyundai, 2005)

El ángulo horizontal que tiene que girar la excavadora para verter el producto cargado tiene una importancia fundamental en el rendimiento. Lo normal es que se imponga a la pala movimientos de giro no superiores a los 70 grados, no debiendo sobrepasar los 90 grados. (Río, 2006)

La excavadora necesita un lugar suficientemente amplio para poder trabajar con facilidad. Los espacios libres necesarios para su operación vienen indicados en los catálogos que se entregan con toda máquina. (Río, 2006)

Otro aspecto muy importante que hay que tener en cuenta al adquirir una máquina es la necesidad de su cambio de tajo una vez acabada la realización de cada trabajo. Cuando se pretenda hacer excavaciones sencillas y muy pequeñas en sitio muy distantes unos de otros, lo recomendable es adquirir una máquina sobre neumáticos. (Río, 2006)

Cuando además de ser grande el volumen a excavar en cada tajo las distancias entre los mismos sean pequeñas, estará indicada una excavadora sobre orugas. También está indicado adquirir una excavadora sobre orugas cuando los volúmenes a excavar sean grandes y el material muy consistente, aunque la distancia entre los distintos tajos sea muy importante. (Río, 2006)

Las excavadoras pueden trasladarse, por grandes que estas sean, sobre plataformas especiales de ferrocarril y también sobre tráileres carreteros, aunque en este caso es muy frecuente que las de gran tamaño haya que desmontarla en sus tres partes fundamentales. (Río, 2006)

Para elegir una máquina excavadora hay que tener en cuenta el volumen de las cajas de los camiones con los cuales se transporta. Se da como regla general para la elección de una pala excavadora y atendiendo a los elementos de transporte que estos pueden ser llenados con cuatro cucharones o cinco como máximo de la máquina cargadora. (Río, 2006)

En general, existen dudas respecto a la conveniencia de empleo en la carga de las máquinas excavadoras de empuje o de las autocargadoras. (Río, 2006)

Cuando el trabajo de excavación es duro, muy especializado y de gran permanencia en obra, resulta imprescindible el empleo de la máquina excavadora de empuje, que además de este equipo puede ser dotada de implementos que la capacitan para trabajos diversos. (Río, 2006)

Por otra parte, las ventajas de la autocargadora se concentran en lo siguiente:

- Mayor movilidad, dado que la autocargadora tiene unas facilidades de desplazamiento extraordinarias, se utiliza en trabajos en zonas próximas. (Río, 2006)
- Adaptabilidad, la misma maquina puede ser utilizada para la conservación de caminos de acceso, como elevadoras, etc. (Río, 2006)
- Facilidad de manejo, la formación de maquinistas para las autocargadoras modernas exige plazos inferiores a una semana para el conocimiento y manejo practico de las mismas, mientras que se toma un mes para la formación de un palista de excavadora de empuje. (Río, 2006)

**2.8.2 Selección de una retroexcavadora.** Lo que define generalmente una retroexcavadora es la anchura de corte de la cuchara, por lo que se refiere a giros, puede extenderse a esta lo dicho para las excavadoras normales. (Río, 2006)

En el mercado existe retroexcavadoras con una capacidad inferior a 1 m<sup>3</sup> de cuchara.

## **2.9 Equipos de excavación hidráulicos.**

Están compuestos básicamente por el bastidor, la pluma, el balancín y la cuchara, que puede ser sustituida por otra herramienta, como la cuchara bivalva, las cucharas Priestman o el martillo hidráulico, etc. (Río, 2006)

En definitiva, los equipos de trabajo de la excavadora hidráulica son equivalentes a los empleados en la excavadora mecánica, aunque se usan con herramientas específicas y sistemas de accionamiento adaptados a los dispositivos hidráulicos. (Río, 2006)

Los puntos fuertes de los dispositivos hidráulicos son la precisión y versatilidad, especialmente en equipos pequeños donde prima la versatilidad. (Río, 2006)

No sucede así en las unidades de mayor potencia, donde dominan los equipos específicos de gran precisión, pasando a un segundo plano la versatilidad. Dentro de sus características constructivas, hay que indicar que tanto la pluma como el balancín están contruidos de secciones en cajón con chapa electrosoldada. (Río, 2006)

Los tres equipos de trabajo principales de que van dotadas son:

- Equipos de retroexcavadora.
- Equipo de carga-excavación
- Equipo de cuchara bivalva u otro tipo, generalmente implementados como opción para el equipo básico de retro.

El equipo de retroexcavadora consta básicamente de una pluma, un balancín y una cuchara. La pluma está anclada al soporte central, previsto al efecto en la superestructura. (Río, 2006)

En general, se podría clasificar las plumas en dos grandes tipos:

- Pluma de una pieza.
- Pluma de dos piezas.

Retro con pluma de una pieza, la más simple y la que ofrece menos prestaciones. Está formada, como su nombre indica, por solo una pieza. Es específica del equipo de retro, pero eventualmente se usa en ocasiones con equipos de cucharas de almeja o similares. (Río, 2006)

Retro con pluma de dos piezas, está formada por dos tramos articulados solidarios mediante bulones u otros sistemas de enlace. La primera pieza base se fija a la superestructura; su posición puede ser variable. Dentro de la gama de dos piezas, existen diversos dispositivos de enlace con la segunda pieza. (Río, 2006) Estos son de:

- Corredera.
- Ángulo variable.
- Ángulo fijo.

Las tres variables fundamentales de la operación: alcance, altura y profundidad, pueden lograrse con el balancín que se monta al extremo de la pluma, la pluma de dos piezas da normalmente mayor versatilidad a la excavadora, sobre todo a las de tipo pequeño y medio. (Río, 2006)

El ángulo variable nos permite levantar más, disminuyendo la profundidad máxima. Esto conviene a los equipos cucharón de almeja, con los que se consigue profundizar más mediante la adición de alargaderas. La pluma de dos piezas es más costosa, pero da mayor versatilidad en el montaje de equipos. Las plumas de dos piezas se construyen con

dispositivos de corredera y ángulo variable accionados mecánica o hidráulicamente. (Río, 2006)

El balancín es la pieza que se monta en el extremo de la pluma. Está formado por una sección en cajón. En función de la penetración de la herramienta, se ofrecen diferentes longitudes de balancín. En cada unidad, el balancín más corto es el que confiere mayor fuerza de penetración para atacar terrenos más duros, con lo que se obtiene mayor producción. (Río, 2006)

El balancín intermedio nos dará más profundidad y alcance con menor fuerza de excavación. Los balancines más largos también se usan, en ocasiones, para excavación. (Río, 2006)

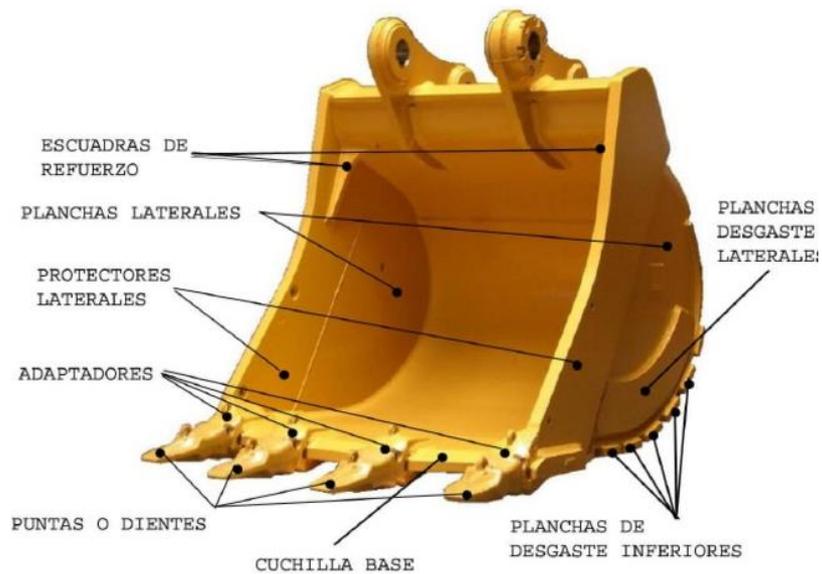
### **2.10 Partes de un cucharón de excavadora.**

El cucharón se ofrece en diversas configuraciones: de descarga frontal o por el fondo, diseñados para la aplicación en terrenos rocosos. En el equipo de excavación frontal se combinan dos esfuerzos en los dientes de la cuchara: el de penetración y el de excavación. (Río, 2006)

En la penetración, la máxima fuerza horizontal se consigue al accionar el balancín la botella hidráulica. En la Fig. 2.14. Puede verse en detalle el mecanismo de excavación. (Río, 2006)

El esfuerzo de excavación será función de la posición de la cuchara y de las situaciones relativas de las bielas y de las botellas hidráulicas. En la Fig. 7. se puede observar las partes que conforma el cucharón.

Figura 7. Partes que conforma el cucharón.



Fuente: <https://imgf.scribdassets.com/img/document/58133277/original/82234a29f7/1485232482>

## 2.11 Dureza y ensayos de dureza.

La dureza es una medida de la resistencia de un metal a la deformación permanente (plástica) en su superficie. La dureza de un metal se mide forzando con un penetrador sobre su superficie. El material del penetrador, que es usualmente una bola, pirámide o cono, está hecho de un material mucho más duro que el material bajo ensayo. (F.Smith, 2006)

El acero endurecido, el carburo de tungsteno y el diamante son los materiales comúnmente utilizados como penetradores. Para la mayoría de los ensayos de dureza estándar se aplica lentamente una carga conocida presionando el penetrador a 90° en la superficie del material bajo ensayo. (F.Smith, 2006)

Después de realizar la incisión, se retira el penetrador de la superficie, se calcula un valor de dureza empírica o se lee en una escala analógica, que se basa en el área de la sección o en la profundidad de la impresión. (F.Smith, 2006)

Los tipos de penetradores y los tipos de impresiones asociados con cuatro ensayos comunes de dureza: Brinell, Vickers, Knoop, y Rockwell. Los factores de dureza de cada uno de estos ensayos dependen de la forma de la incisión y de la carga aplicada. (F.Smith, 2006)

La dureza de un metal se mide según sea la facilidad con que puede ser deformada plásticamente. Por tanto, se puede determinar una relación experimental entre la dureza y la

resistencia para cada metal en particular. El ensayo de dureza es mucho más simple que el ensayo de tracción y puede ser no destructivo (es decir, la presencia de una pequeña huella no impide la utilización del objeto ensayado). Por estas razones, es común la utilización del ensayo de dureza en el control de calidad de procesos industriales.

## 2.12 Tensión y deformación en metales.

**2.12.1 Deformación elástica y plástica.** Cuando se somete una pieza de metal a una fuerza de tracción uniaxial se produce la deformación del metal. Si el metal recupera sus dimensiones originales cuando se elimina la fuerza, se considera que el metal ha sufrido una deformación elástica. La cantidad de deformación elástica que puede soportar un metal es pequeña pues durante la deformación elástica, los átomos del metal se desplazan de sus posiciones originales, pero sin llegar a alcanzar nuevas posiciones. De este modo, cuando la fuerza sobre el metal deformado elásticamente se elimina, los átomos del metal vuelven a sus posiciones iniciales y el metal recupera su forma inicial. (F.Smith, 2006)

Si el metal se deforma tanto que no puede recuperar completamente sus dimensiones originales, se considera que ha sufrido una deformación plástica. Durante la deformación plástica, los átomos del metal se desplazan continuamente desde sus posiciones iniciales hasta otras nuevas. (F.Smith, 2006)

La propiedad que tienen algunos metales de ser extensamente deformados sin que se fracturen, es una de las más útiles en ingeniería. Por ejemplo, la gran deformación plástica a que puede ser sometido el acero permite fabricar parachoques, capós y puertas de automóvil sin que se fracture el metal. (F.Smith, 2006)

**2.12.2 Deformación convencional.** Cuando una fuerza de tracción uniaxial se aplica a una barra, se produce un alargamiento de la barra en la dirección de la fuerza. Dicho desplazamiento se conoce como deformación. Por definición, deformación convencional es la relación entre el cambio en la longitud de una muestra en la dirección en que se aplica la fuerza y la longitud original de la muestra considerada. (Beer, y otros, 2010)

Por tanto la deformación para una barra de metal es:

$$\text{Deformación convencional } \varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\text{cambio de la longitud de la muestra}}{\text{longitud original de la muestra}} \quad (1)$$

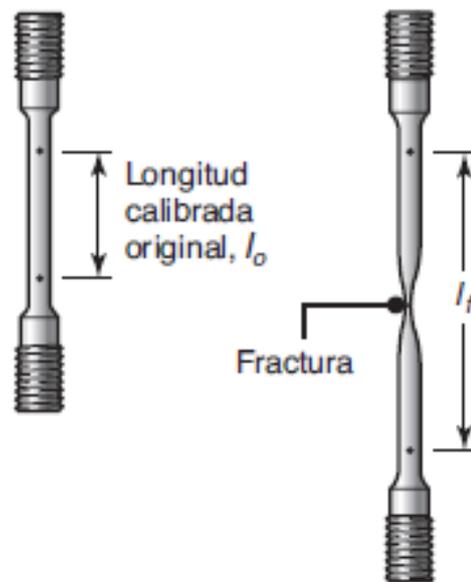
(F.Smith, 2006)

**2.12.3 Coeficiente de Poisson.** La deformación longitudinal elástica de un metal produce un cambio simultáneo de las dimensiones laterales. Como se muestra en la figura 2.16., una tensión a tracción o  $\sigma_z$  produce una deformación axial  $+\epsilon_z$  y una contracción lateral de  $-\epsilon_x$  y  $-\epsilon_y$ . Si la conducta es isotrópica,  $\epsilon_x$  y  $\epsilon_y$  son iguales. La relación se denomina coeficiente de Poisson. Para materiales ideales,  $\nu = 0,5$ . No obstante, en materiales reales el coeficiente de Poisson oscila entre 0,25 y 0,4, con un valor medio alrededor de 0,3. (F.Smith, 2006)

### 2.13 Ensayo de tracción.

El ensayo de tracción se utiliza para evaluar la resistencia de metales y aleaciones. En este ensayo, una muestra de metal se estira a velocidad constante hasta la fractura, que se produce en un tiempo relativamente corto. (F.Smith, 2006)

Figura 8. Cuerpo sometido a tensión de tracción.



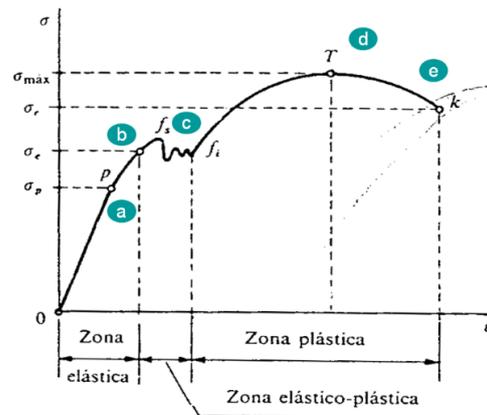
Fuente: (Beer, y otros, 2010)

**2.13.1 Propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tracción.** Las propiedades mecánicas de metales y aleaciones que tienen interés para el diseño estructural en ingeniería, y que pueden obtenerse a partir del ensayo de tracción técnico, son:

- Módulo de elasticidad
- Límite elástico convencional de 0.2 por ciento
- Resistencia a la tracción

- Porcentaje de alargamiento a fractura
- Porcentaje de estricción a fractura

Figura 9. Diagrama tensión deformación.



Fuente: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/files/2010/10/Diagrama-esfuerzo-Deformacion-unitaria.png>

**2.13.2** *Módulo de elasticidad.* Las estructuras de ingeniería se diseñan para sufrir deformaciones realmente pequeñas, para lo cual se utiliza, lo siguiente, es la relación entre la tensión y la deformación. (Beer, y otros, 2010)

$$\sigma(\text{tensión}) = E\varepsilon(\text{deformación}) \quad (2)$$

$$E = \frac{\sigma(\text{tensión})}{\varepsilon(\text{deformación})} \text{ unidades Pa, ksi} \quad (3)$$

Donde E es el módulo de elasticidad, o módulo de Young, el módulo de elasticidad está relacionado con la fuerza del enlace entre los átomos del metal o aleación. Los metales con alto módulo de elasticidad son relativamente rígidos y no flechan fácilmente. (F.Smith, 2006)

Los aceros; por ejemplo, tienen un alto valor de módulos de  $30 \times 10^6$  psi (207 GPa), mientras que las aleaciones de aluminio tienen un módulo inferior, alrededor de  $10$  a  $11 \times 10^6$  psi (69 a 76 GPa). Nótese que en la región elástica del diagrama convencional, el valor del módulo no varía con el incremento de la tensión. (F.Smith, 2006)

**2.13.3** *Límite elástico.* El límite elástico es un valor muy importante para el diseño estructural en ingeniería, pues es el nivel de tensión al que un metal o aleación muestran una deformación plástica significativa. Debido a que no hay un punto definido de la curva tensión-deformación donde acaba la deformación elástica y empieza la deformación plástica, se determina el límite elástico como la tensión a la que se produce una deformación elástica

definida. En muchas ocasiones se determina el límite cuando se produce una deformación de 0.2 por ciento. (F.Smith, 2006)

**2.13.4 Resistencia a la tracción.** La resistencia a la tracción (UTS, por sus siglas en inglés) es la máxima tensión que se alcanza en la curva tensión-deformación. Si la probeta desarrolla un decrecimiento localizado de la sección transversal, la tensión convencional decrecerá con el incremento de la deformación hasta producirse la fractura, porque la deformación convencional se determina utilizando el área original de la sección transversal de la probeta. (F.Smith, 2006)

Cuanto más dúctil es el metal, mayor es la estricción antes de la fractura y más descendente la tensión alejándose del valor de resistencia a la tracción. En aleaciones de aluminio de alta resistencia, con curvas tensión-deformación, sólo hay un pequeño descenso de la tensión convencional desde el valor resistencia a la tracción porque este tipo de material tiene una ductilidad relativamente baja. (F.Smith, 2006)

**2.13.5 Porcentaje de alargamiento.** El porcentaje de alargamiento que una probeta a tracción soporta durante el ensayo proporciona un valor de la ductilidad del metal. La ductilidad de metales suele expresarse como porcentaje de alargamiento, usualmente determinado en probetas de 2 pulgadas. En general, a mayor ductilidad del metal, mayor porcentaje de deformación. (F.Smith, 2006)

Por ejemplo, una chapa de 0.062 pulgadas de aluminio comercialmente puro en estado reblandecido (aleación a 1100-0), tiene un alto porcentaje del mismo espesor de una aleación de 35 por ciento, mientras que una muestra del mismo espesor de aluminio de alta resistencia en estado de máxima dureza 7075-T6 solamente tiene un porcentaje de alargamiento de 11 por ciento. (F.Smith, 2006)

El alargamiento mínimo especificado para una longitud calibrada de 2 in., para los aceros más usados con resistencias de fluencia de hasta 50 ksi es de 21%. Esto indica que la deformación a la fractura debería ser de, por lo menos, 21%.

El porcentaje de alargamiento se calcula mediante la ecuación:

$$\% \text{ alargamiento} = \frac{\text{longitud final} - \text{longitud inicial}}{\text{longitud inicial}} \times 100\% \quad (4)$$

El porcentaje de alargamiento a fractura tiene importancia no sólo como medida de la ductilidad, sino también como índice de la calidad del metal. Si existe porosidad o inclusiones en el metal, o si existe un deterioro debido a un sobrecalentamiento del mismo, el porcentaje de alargamiento decrecerá por debajo del valor normal. (F.Smith, 2006)

**2.13.6 Porcentaje de estricción.** Una medida de la ductilidad que es muy empleada es el porcentaje de reducción de área. Esta magnitud normalmente se obtiene del ensayo de tracción utilizando una probeta de 0.50 pulgadas (12.7 mm) de diámetro. Para el acero estructural, es común encontrar porcentajes de reducción de área del 60 al 70%. (Beer, y otros, 2010)

Después del ensayo, se determina el diámetro de la sección transversal de la zona de fractura. Utilizando las medidas del diámetro inicial y del diámetro final, el porcentaje de estricción se determina según la ecuación. (F.Smith, 2006)

$$\% \text{ reducción en área} = \frac{\text{área final} - \text{área inicial}}{\text{área inicial}} \times 100\% \quad (5)$$

El porcentaje de reducción en el área, como el porcentaje de alargamiento, es una medida de la ductilidad del metal y un índice de su calidad. El porcentaje de reducción en el área se puede disminuir si existen defectos como inclusiones y/o porosidad en la muestra metálica. (F.Smith, 2006)

## **2.14 Fracturas de los metales.**

Uno de los aspectos más importantes y prácticos de la selección de metales en el diseño, desarrollo y producción de nuevos componentes es la posibilidad de que el componente falle durante su funcionamiento habitual. La falla se puede definir como la incapacidad de un material o componente de realizar la función prevista, cumplir los criterios de desempeño aunque pueda seguir funcionando, o tener un desempeño seguro y confiable incluso después de deteriorarse. El rendimiento, desgaste, la torcedura (inestabilidad elástica), la corrosión y la fractura son ejemplos de situaciones en las que ha fallado un componente. (F.Smith, 2006)

**2.14.1 Fractura dúctil.** La fractura dúctil de un metal tiene lugar después de una intensa deformación plástica. Por simplicidad, considérese la fractura dúctil de una probeta redonda (0.50 pulgadas de diámetro). Si se aplica un esfuerzo a la probeta tal que exceda su

resistencia máxima a la tensión, y se mantiene suficiente tiempo, la probeta se fracturará. (F.Smith, 2006)

Pueden reconocerse tres etapas distintas en la fractura dúctil:

La muestra presenta una estricción y se forman cavidades en la zona de estricción.

Las cavidades formadas se juntan generando una fisura en el centro de la probeta que se propaga hacia la superficie de la misma y en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado

Cuando la fisura se aproxima a la superficie, la dirección de la misma cambia a  $45^\circ$  respecto al eje de la tensión y se genera una fractura del tipo cono y copa. (F.Smith, 2006)

En la práctica, las fracturas dúctiles son menos frecuentes que las frágiles, y su principal causa es el exceso de carga aplicado al componente. La sobrecarga podría ocurrir como resultado de: un diseño inadecuado, lo que incluye a la selección de materiales, fabricación inadecuada o abuso (el componente se emplea a niveles de carga por encima del permitido por el diseñador). (F.Smith, 2006)

**2.14.2** *Fractura frágil.* Muchos metales y aleaciones se fracturan de forma frágil con muy poca deformación plástica. La fractura frágil suele avanzar a lo largo de los planos cristalográficos determinados llamados planos de exfoliación bajo un esfuerzo normal al plano de exfoliación. Muchos metales con estructura cristalina HCP muestran habitualmente fractura frágil debido al número limitado de planos de deslizamiento. Un monocristal de zinc, por ejemplo, bajo un elevado esfuerzo normal a los planos (0001), se fracturará de forma frágil. Muchos metales BCC como el hierro  $\alpha$ , molibdeno y volframio también se fracturan de forma frágil a bajas temperaturas y a elevadas velocidades de deformación. (F.Smith, 2006)

Las fracturas frágiles en los metales policristalinos, en su mayoría, son transgranulares, es decir, la fisura se propaga a través del interior de los granos. Sin embargo, la fractura frágil puede ocurrir de manera intergranular si los límites de grano contienen una película frágil o si la relación del límite de grano se ha hecho frágil por la segregación de elementos perjudiciales. (F.Smith, 2006)

Se cree que la fractura frágil tiene lugar en los metales en tres etapas:

La deformación plástica concentra las dislocaciones a lo largo de los planos de deslizamiento en los obstáculos.

El esfuerzo cortante se acumula en los lugares donde las dislocaciones están bloqueadas y como resultado se nuclean microfisuras.

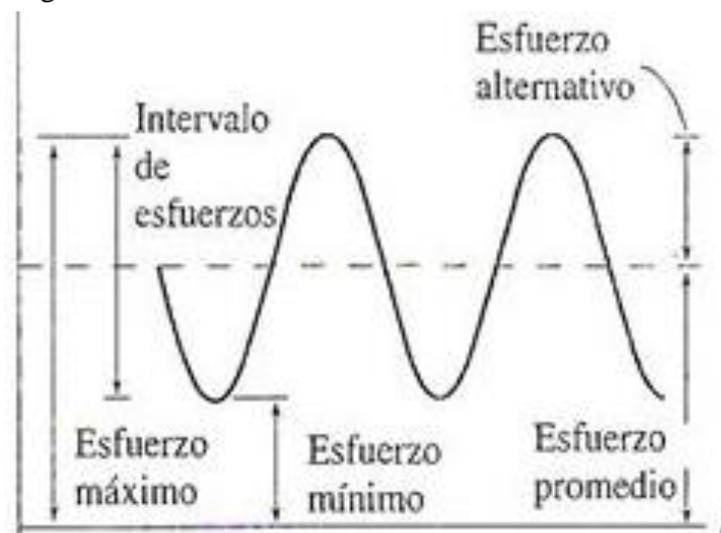
Un esfuerzo posterior propaga las microfisuras y la energía de deformación elástica almacenada puede contribuir a la propagación de las mismas.

## 2.15 Fatiga de los elementos.

En muchos tipos de aplicaciones las piezas metálicas sometidas a esfuerzos cíclicos o repetitivos se rompen por la fatiga que sufren debido a un esfuerzo mucho menor de lo que la pieza puede soportar durante la aplicación de un esfuerzo estático sencillo. Estas fallas se denominan fallas por fatiga. Las piezas móviles, como los ejes de transmisión de movimiento, bielas y engranajes, son ejemplos de piezas de las máquinas en las que es común la falla por fatiga. Algunas estimaciones de las fallas de las máquinas se atribuyen en un 80 por ciento de la acción directa a las fallas por fatiga. (F.Smith, 2006)

Los esfuerzos de fatiga aplicados en los casos reales y en las pruebas de fatiga pueden variar mucho. Los diferentes tipos de pruebas utilizadas en la industria y en la investigación suponen esfuerzos axiales, de flexión o de torsión. (F.Smith, 2006)

Figura 10. Esfuerzos cíclicos.



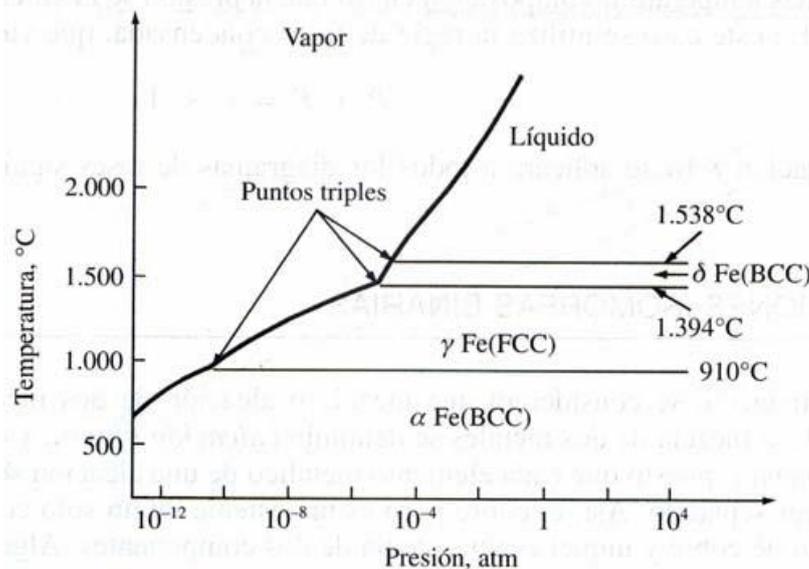
Fuente: [http://images.slideplayer.es/8/2273683/slides/slide\\_29.jpg](http://images.slideplayer.es/8/2273683/slides/slide_29.jpg)

## 2.16 Diagrama de fase.

En un material, una fase es una región que difiere en su microestructura y/o composición, de otra región. Los diagramas de fase son representaciones gráficas de las fases que existen en un sistema de materiales a varias temperaturas, presiones y composiciones. Los diagramas, en su mayoría, se han construido en condiciones de equilibrio, y son utilizados por ingenieros y científicos para entender y predecir muchos aspectos del comportamiento de los materiales.

Los diagramas de fase presión-temperatura en el equilibrio se pueden construir para diferentes sustancias. Por ejemplo, el diagrama de fase de equilibrio PT del hierro puro se muestra en la figura 11. Una diferencia fundamental de ese diagrama de fase es que tiene tres fases sólidas distintas y separadas: alfa ( $\alpha$ ) Fe, gamma ( $\gamma$ ) Fe, y delta ( $\delta$ ) Fe. El hierro alfa y el hierro delta tienen estructuras cristalinas BCC, mientras el hierro gamma tiene una estructura FCC. Los límites de fase en el estado sólido tienen las mismas propiedades que los límites de las fases líquida y sólida.

Figura 11. Diagrama de fases en equilibrio presión-temperatura, para el hierro puro.



Fuente: <http://cosmolinux.no-ip.org/uned/figura22.jpg>

## 2.17 Método de elemento finito.

El método de elemento finito, es un análisis matemático que consiste en discretizar un medio continuo en pequeños elementos manteniendo las mismas propiedades del original. (Lotti, y otros, 2006)

**2.17.1** *Elementos finitos de un continuo elástico.* El proceso de aproximar el comportamiento de un método continuo mediante elementos finitos, que se comporta de forma similar a los elementos reales, se puede introducir mediante aplicaciones físicas específicas o como un concepto matemático general. (Ansys 16.1, 2016)

Son varios los aspectos de la ingeniería en las que se precisa determinar la distribución de tensiones y deformaciones en un contiguo elástico. Los casos particulares de dichos problemas pueden variar desde problemas bidimensionales de tensión o deformación plana, sólidos de revolución y flexión de placas y láminas, hasta el análisis más general de sólidos tridimensionales. (Ansys 16.1, 2016)

El número de interconexiones entre un análisis de elemento finito, cualquiera rodeado por fronteras imaginarias y los elementos vecinos a él es infinito. Es difícil, por consiguiente, analizar a primera vista como se puede discretizar los problemas de este tipo, sin embargo esta dificultad puede superarse de la siguiente manera: (Ansys 16.1, 2016)

- El problema continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias, en un número de elementos finitos.
- Los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos, que se denominan como nodos, situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema
- Se toma un conjunto de características que delimiten de manera única el campo de desplazamiento dentro de cada elemento finito en función de los desplazamientos nodales de dicho estudio.
- Las funciones de desplazamiento definirán de manera única el estado de deformación dentro del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las deformaciones iniciales y las propiedades constitutivas del material, definirán el estado de tensiones en todo el elemento y, por consiguiente, también en sus contornos.

- Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre las tensiones en el contorno y cualesquier carga repartida, resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos.

**2.17.2 Ecuación de estado.** El modelo del material en estudio proporciona un mecanismo al material ortotrópico para calcular. Las contribuciones a la presión de los componentes de deformación isotrópica y desviación. Además, esta metodología da lugar a la posibilidad de incorporar efectos no lineales, lo que incluye añadir efecto de choque, que se pueden atribuir a la tensión volumétrica en el material. (Ansys 16.1, 2016)

La relación puede expresarse con la siguiente ecuación.

Figura 12. Ecuación de estado.

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_{11} \\ \Delta\sigma_{22} \\ \Delta\sigma_{33} \\ \Delta\sigma_{23} \\ \Delta\sigma_{31} \\ \Delta\sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{11} \\ \Delta\varepsilon_{22} \\ \Delta\varepsilon_{33} \\ \Delta\varepsilon_{23} \\ \Delta\varepsilon_{31} \\ \Delta\varepsilon_{12} \end{bmatrix}$$

Fuente: (Ansys 16.1, 2016)

## CAPÍTULO III

### 3. ESTUDIO DEL MATERIAL UTILIZADO PARA LA FABRICACIÓN DE CUCHARONES DE RETROEXCAVADORAS.

Se realizó diferentes estudios para determinar el material utilizado para la fabricación de cucharones de retroexcavadoras, para lo cual se tomaron muestras de un cucharón de retroexcavadora con lo cual se obtuvo: la microestructura, la composición y la dureza del material utilizado para la fabricación del cucharón.

Con estos datos obtenidos posteriormente se podrá elegir un material óptimo, que se encuentre fácilmente en el mercado y que sea rentable económicamente, para realizar la recuperación del cucharón de la retroexcavadora.

#### 3.1 Preparación de las probetas para las pruebas de laboratorio.

Se seleccionó diferentes partes del cucharón de maquinaria de minería, para obtener las probetas las cuales fueron:

- 2 de la base de las cuchillas del cucharón, de aquí se tomó dos probetas. (Fig. 13.)
- 2 de la plancha de desgaste inferior, se tomó dos probetas. (Fig. 14.)
- 2 de los protectores laterales, se tomó dos probetas. (Fig. 15.)

Se seleccionó un área de 5x5cm, los cuales se trataron para realizar los análisis.

Figura 13. Base de las cuchillas del cucharón de maquinaria de minería.



Fuente: Autor.

Figura 14. Plancha de desgaste inferior.



Fuente: Autor.

Figura 15. Protectores laterales.



Fuente: Autor.

Para realizar los análisis, estas probetas tuvieron que ser preparadas, y se realizaron los siguientes procesos:

**3.1.1 Preparación de la superficie.** Se siguió el siguiente proceso:

Se cortó, se usó herramientas de corte con refrigeración para no perder las características del material.

Figura 16. Máquina de corte refrigerada.



Fuente: Autor.

Luego se pulió las caras de las probetas que se va a analizar, se lijo las probetas para obtener un mejor acabado superficial y con esto poder realizar los análisis. Se usó la norma ASTM E3, para la preparación de las probetas. En la figura 17 se puede observar el paño, el cual se usó para dar el acabado final a las probetas. En la figura 18 se puede observar la probeta con el acabado final.

Figura 17. Paño.



Fuente: <https://image.slidesharecdn.com/analisismetalografico-100928035507-phpapp01/95/analisis-metalografico-4-728.jpg?cb=1285646147>

Figura 18. Probeta con el acabado final.



Fuente: Autor

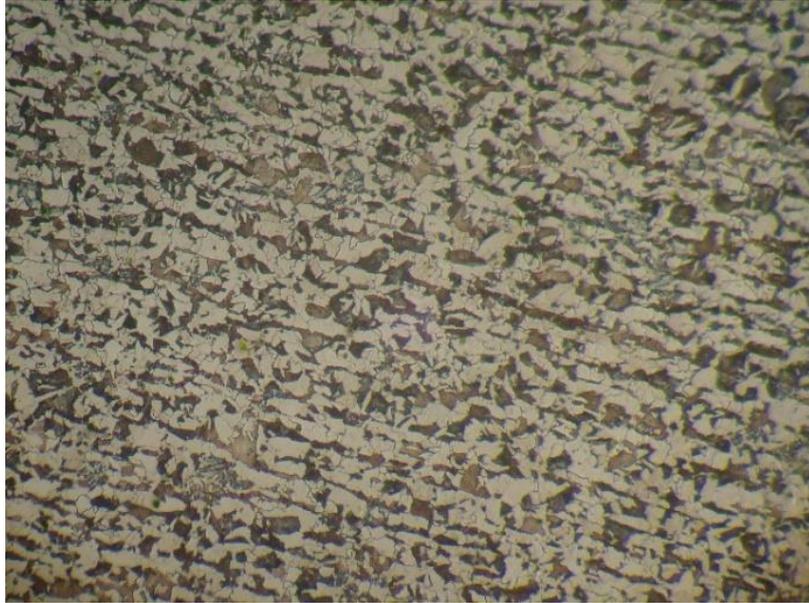
**3.1.2 Ataque Químico.** Al terminar la última pasada de pulimento, las probetas fueron sometidas al ataque químico, el ataque químico es un proceso de corrosión controlada, se usó nital, que consiste en 5% de ácido nítrico y 95% de alcohol etílico, este proceso se lo realizó con mucho cuidado, se evitó el contacto de las caras que se sometieron al ataque químico con las huellas digitales ya que estas podían afectar al resultado del análisis.

### **3.2 Ensayo metalográfico.**

El ensayo metalográfico se realizó, en el laboratorio de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, para la realización del ensayo metalográfico se utilizó la norma ASTM E3, el cual nos da las recomendaciones para la preparación de la probeta.

En la figura 19 se puede observar la muestra a una aproximación de 500x, que es el máximo acercamiento, que nos permite el microscopio, del laboratorio.

Figura 19. Ensayo metalográfico a 500x.



Fuente: Autor

Se observa la presencia de ferrita en su gran mayoría y también se encuentra perlita se puede decir en un porcentaje de 70% de ferrita y un 30 % de perlita lo que es característicos en los aceros al carbono.

Se puede ver una microestructura estable porque no existe fisura entre los granos del material.

### **3.3 Espectrometría.**

El ensayo de espectrometría se realizó, en el laboratorio de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, para la realización de este ensayo se usó la norma NTE INEN 0118, esta norma establece el método adecuado para la determinación de Manganeso del acero usando el método espectrofotométrico. (INEN 0118, 1975)

En la Figura. 20 se muestra los porcentajes químicos que contiene la probeta del cucharón de maquinaria de minería, se concluye que para la fabricación de este cucharón de retroexcavadora se utilizó un acero al carbono AISI 1522, ya que los componentes químicos encontrados son iguales a los que encontramos en las tablas de los componentes químicos de un AISI 1522.

Figura 20. Espectrometría.

Analysis Time: 31.10.2016 17:24:45		Method: Fe110			
	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
∅	0,234	0,245	1,187	<0,0030	<0,0030
	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
∅	0,468	0,070	0,174	0,253	0,021
	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	W [%]
∅	0,0096	0,0080	0,053	0,0098	<0,020
	B [%]	Sn [%]	Fe [%]		
∅	0,0021	0,012	97,25		

Fuente: Autor

Se observa que el material del cucharón de retroexcavadora es de acero al carbono de resistencia media, este material se lo puede encontrar en el mercado en forma de palanquillas, perfiles, barras, rollos laminados o productos estirados.

### 3.3.1 Propiedades de los materiales presentes en el acero AISI 1522.

- Cobalto: mejora la resistencia y la dureza a temperaturas elevadas.
- Cobre: mejora la resistencia a la corrosión atmosférica y, en menor medida, incrementa la resistencia con una pequeña pérdida de ductilidad; afecta el trabajo en caliente y la calidad de la superficie.
- Cromo: mejora la tenacidad, templabilidad y resistencia al desgaste, a la corrosión y a la alta temperatura; incrementa la profundidad de penetración de dureza resultante del tratamiento térmico, al promover la carburización.
- Manganeso: mejora la templabilidad, resistencia, resistencia a la abrasión y maquinabilidad; desoxida el acero fundido, reduce la fragilización en caliente y disminuye la soldabilidad.
- Molibdeno: mejora la templabilidad, resistencia al desgaste, tenacidad, resistencia a la temperatura elevada, resistencia a la termofluencia y dureza; minimiza la fragilización por revenido
- Níquel: mejora la resistencia, tenacidad y resistencia a la corrosión; mejora la templabilidad.

- Silicio: mejora la resistencia, dureza, resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica; disminuye la pérdida por histéresis magnética, maquinabilidad y formabilidad en frío.
- Titanio: mejora la templabilidad; desoxida los aceros. (Kalpakjian, y otros, 2008)

### 3.4 Ensayo de dureza.

Se realizó un ensayo de dureza Brinell, de las probetas obtenidas del cucharón de retroexcavadora, se realizó este ensayo por las características de la geometría de las probetas del cucharón, ya que las caras no son totalmente paralelas, y no se rectificó por que se podía perder las características del material, lo cual impide realizar otro tipo de ensayo de dureza.

Para el ensayo se utilizó la norma, NTE INEN 0123, esta norma establece el método adecuado para determinar la dureza Brinell en materiales metálicos. (INEN 0123, 1984)

Se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados del ensayo de dureza.

Dureza del cucharon de retroexcavadora (Brinell)	1	199 HB	15 HRC
	2	181 HB	11 HRC
	3	183 HB	11 HRC
	4	180 HB	10 HRC
	5	209 HB	17 HRC
Promedio del ensayo		190,4 HB	12,8 HRC

Fuente: Autor

### 3.5 Material del cucharon de la retroexcavadora.

Después de realizado las pruebas sobre la muestra del cucharón de la retroexcavadora el material usado en la fabricación de esta se trata de un acero al carbono AISI 1522, a continuación se muestra las propiedades que este posee:

**3.5.1 Composición química.** La composición química del acero AISI 1522 se detalla en la tabla 4.

Tabla 4. Composición química.

Elemento	Porcentaje (%)
Hierro	97-98,27
Manganeso	1,10-1,40
Azufre	0,05
Fosforo	0,04

Fuente: (AZO Materials, 2012)

El cromo, el aluminio, el molibdeno, el níquel, y el cobre están presentes en pequeños porcentajes, los cuales se excluyen.

**3.5.2** *Propiedades Físicas.* Las propiedades físicas del acero AISI 1522 se detalla en la tabla 5.

Tabla 5. Propiedades físicas.

Propiedad	Unidad
Densidad	7,7-8,03 g/cm <sup>3</sup>

Fuente: (AZO Materials, 2012)

**3.5.3** *Propiedades Mecánicas.* Las propiedades mecánicas del acero AISI 1522 se detalla en la tabla 6.

Tabla 6. Propiedades mecánicas.

AISI 1522			
Módulo de Elasticidad	190-210	Radio de Poisson	0,27-0,3

Fuente: (AZO Materials, 2012)

## CAPÍTULO IV

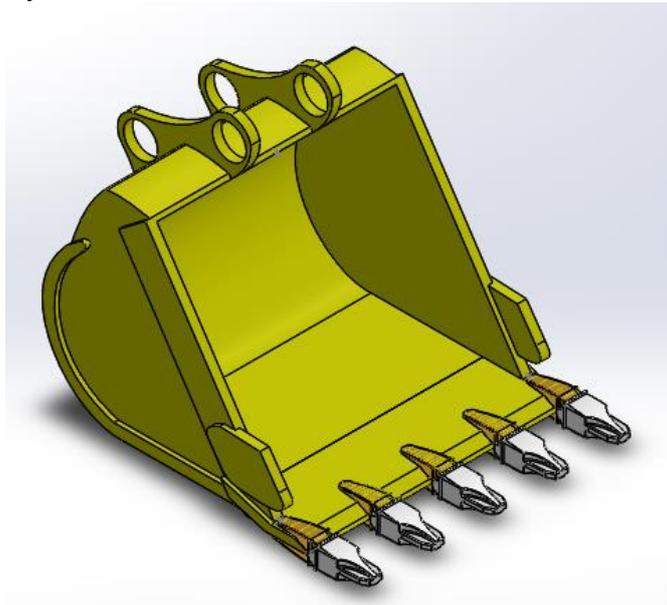
### 4 ANÁLISIS DEL CUCHARON DE EXCAVADORA HIDRAULICA MEDIANTE CAE

#### 4.1 Diseño de la geometría.

En el mercado se puede encontrar varios modelos de cucharones de excavadoras hidráulicas, pero todos los cucharones conservan el mismo diseño, por lo tanto se analizó el cucharón de la excavadora hidráulica Hyundai L220.

**4.1.1** *Trazado de la geometría en el software SolidWorks.* Se realizaron diferentes mediciones del cucharón de la excavadora Hyundai L220 para obtener un diseño real obteniendo como resultado la figura 21.

Figura 21. Geometría en SolidWorks del cucharón de la excavadora Hyundai L220



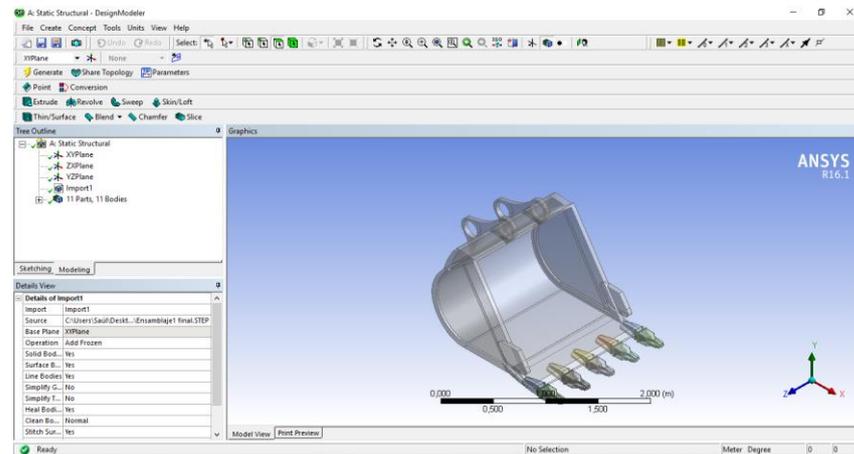
Fuente: Autor

#### 4.2 Análisis del cucharon de excavadora hidráulica mediante elementos finitos.

Para el análisis del cucharon de excavadora hidráulica se utilizará el programa ANSYS Workbench 16.1, el cual al ingresar la geometría y las propiedades del material a utilizar permite realizar estudios de deformación, fatiga y vida útil, cuyo resultado final será interpretado para realizar una recuperación adecuada del cucharon de excavadora.

**4.2.1 Importar la geometría al programa ANSYS 16.1.** El proceso de importación desde el programa SOLIDWORKS se realiza automáticamente desde el software ANSYS 16.1, solo se debe tomar en cuenta el formato de procedencia, el cual es “.step”, el programa reconocerá todos los detalles del modelo.

Figura 22. Importar la geometría.



Fuente: Autor

**4.2.2 Designación del material.** El material seleccionado para el análisis será el acero AISI 1522, conocido. La tabla 7 muestra diferentes características que posteriormente serán ingresados en el programa para crear un nuevo material en la librería de ANSYS, ya que este no se encuentra disponible en la misma.

Tabla 7. Características del acero AISI 1522.

Propiedades	Valor	Unit
Densidad	7,7-8,03	kg/m <sup>3</sup>
Radio de Poisson	0.25	
Módulo de Elasticidad	190-210	GPa

Fuente: (AZO Materials, 2012)

En la figura 23., podemos observar los datos ingresados en ANSYS para crear el nuevo material con el cual trabajará para realizar el análisis del cucharón de excavadora hidráulica.

Figura 23. Designación del material.

Properties of Outline Row 3: Structural Steel			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	8,03	g cm <sup>-3</sup>
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
8	Young's Modulus	1,9E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0,3	
10	Bulk Modulus	1,5833E+11	Pa
11	Shear Modulus	7,3077E+10	Pa
12	Field Variables		
13	Temperature	Yes	
14	Shear Angle	No	
15	Degradation Factor	No	
16	Alternating Stress Mean Stress	Tabular	
20	Strain-Life Parameters		
28	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa
29	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa
30	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa
31	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Fuente: Autor.

**4.2.3 Mallado.** Se ha seleccionado un mallado de 0,1 mm que dio resultados aceptables tanto en velocidad de cálculo de las matrices internas que resuelve el programa y la calidad del resultado. En la figura 23., se pueden observar todas propiedades del mallado ingresadas en el programa ANSYS 16.1.

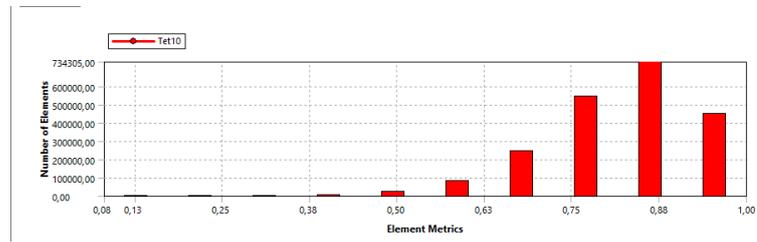
Figura 24. Parámetros de mallado.

Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Curvature Normal Angle	Default (70,3950 °)
Num Cells Across Gap	Default (3)
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
Min Size	1,0 mm
Proximity Min Size	Default (1,3450 mm)
Max Face Size	Default (134,50 mm)
Max Size	Default (269,0 mm)
Growth Rate	Default (1,850 )
Minimum Edge Length	9,7539e-004 mm
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2

Fuente: Autor.

Un aspecto muy importante a tomar en cuenta es la calidad de la malla para lo cual se verifico, con la ayuda del software se comprobó que el mallado escogido es adecuado, en la figura 25., se indica la calidad de la malla. Se obtiene un promedio de 0,8782 por lo cual esto garantiza la fiabilidad en la obtención de los resultados.

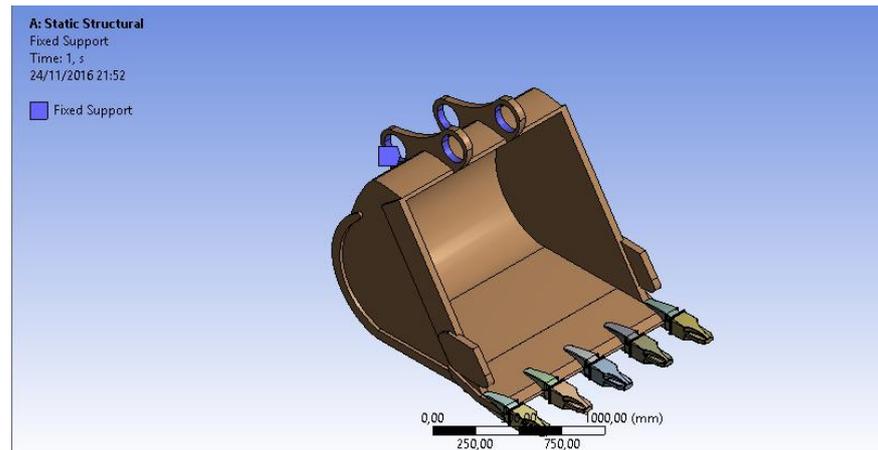
Figura 25. Calidad de la malla



Fuente Autor.

**4.2.4 Restricciones físicas del problema.** El cucharón de la retroexcavadora hidráulica se encuentra sujeto al brazo de la excavadora a través de pasadores y es accionado por el cilindro hidráulico, por lo cual se usó un FIX SUPPORT, el cual nos permite fijar el soporte del cucharón.

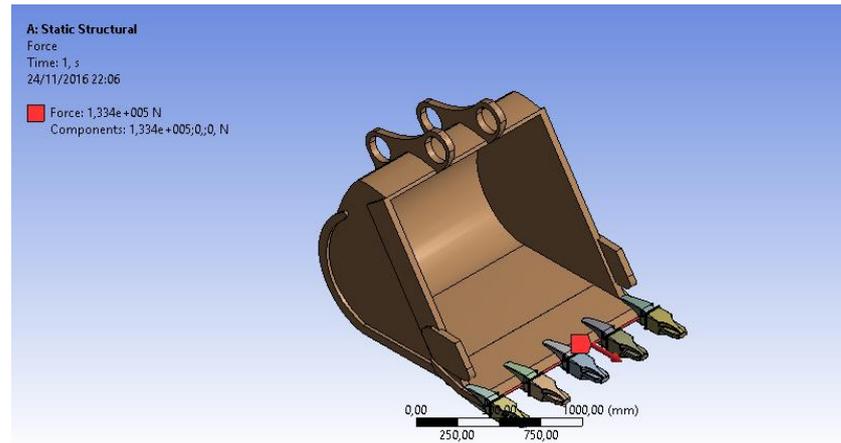
Figura 26. Restricción física del cucharón de la retroexcavadora hidráulica.



Fuente: Autor.

**4.2.5 Fuerzas aplicadas sobre el cucharón de la retroexcavadora hidráulica.** El movimiento que produce el cilindro neumático sobre el cucharón de la excavadora produce una fuerza de 133.4 KN con la cual se puede producir la excavación, la fuerza de excavación se puede encontrar en los manuales o fichas técnicas de las excavadora. (Hyundai, 2005)

Figura 27. Fuerza de excavación.



Fuente: Autor.

#### 4.3 Análisis de estudios relevantes en el cucharón de la retroexcavadora.

El cucharón de una excavadora hidráulica trabaja en contacto con el suelo de forma cíclica, la manera en que realiza este contacto producirá en la misma un tipo de deformación que dependiendo del tipo de suelo y la fuerza proporcionada por el cilindro neumático deberá ser soportado por el cucharón de la excavadora, por lo tanto se deberá analizar si ésta deformación será lo suficientemente grande como para llegar a fracturar el cucharón.

Se sabe también que la geometría del elemento influye notablemente en el efecto que la deformación causará en el cucharón de la excavadora, ya que, dependiendo de ésta se producirán las diferentes concentraciones de esfuerzos que son las partes más susceptibles a la fractura por deformación.

Así mismo el contacto del cucharón de la excavadora con el suelo producirá un esfuerzo alternante que podría ocasionar que el material se debilite con el paso del tiempo, lo cual determinara el tiempo de vida o ciclos máximos de trabajo.

En conjunto, el material y el diseño del elemento que se va a analizar se traducen en la fiabilidad del mismo, lo cual proporciona seguridad de que el elemento cumplirá con el o los propósitos para el que está construido.

Para comprobar todos estos factores descritos anteriormente será necesario realizar los análisis que se describen a continuación mediante métodos de elementos finitos utilizando el software ANSYS 16.

**4.3.1 Análisis de deformación.** El cual proporcionará información de la magnitud de la deformación producida por las fuerzas y soportes fijos que actúan en el cucharón de maquinaria de minería. Dentro del programa se debe tener en cuenta principalmente la previa selección del material que utilizaremos, en este caso el acero AISI 1522 que no existía en la biblioteca del programa pero que anteriormente fue agregado al mismo.

Figura 28. Detalles del estudio de deformación en ANSYS 16.

Details of "Total Deformation"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
<b>Definition</b>	
Type	Total Deformation
By	Time
<input type="checkbox"/> Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
<b>Results</b>	
<input type="checkbox"/> Minimum	0, mm
<input type="checkbox"/> Maximum	2,7348 mm
Minimum Occurs On	Bucket_excavadora_hidraulica(2)
Maximum Occurs On	tooth
<b>Information</b>	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

Fuente: Autor.

**4.3.2 Esfuerzo de Von Mises.** Muestra el límite de tensión máxima que soportará el cucharón de la excavadora antes de que el material empiece a ceder debido a la fuerza aplicada.

Figura 29. Detalles del estudio de esfuerzos.

Details of "Equivalent Stress"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Layer	Entire Section
<b>Definition</b>	
Type	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time
<input type="checkbox"/> Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
<b>Integration Point Results</b>	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
<b>Results</b>	
<input type="checkbox"/> Minimum	2,7353e-006 MPa
<input type="checkbox"/> Maximum	201,78 MPa
Minimum Occurs On	tooth
Maximum Occurs On	Bucket_excavadora_hidraulica(2)
<b>Information</b>	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

Fuente: Autor

**4.3.3 Factor de seguridad.** El factor de seguridad que tendrá el cucharón de excavadora con esto se podrá comprobar la fiabilidad en el trabajo.

Figura 30. Detalles del factor de seguridad.

Details of "Safety Factor"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
<b>Definition</b>	
Type	Safety Factor
By	Time
<input type="checkbox"/> Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
<b>Integration Point Results</b>	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
<b>Results</b>	
<input type="checkbox"/> Minimum	1,239
Minimum Occurs On	Bucket_excavadora_hidraulica(2)
<b>Information</b>	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

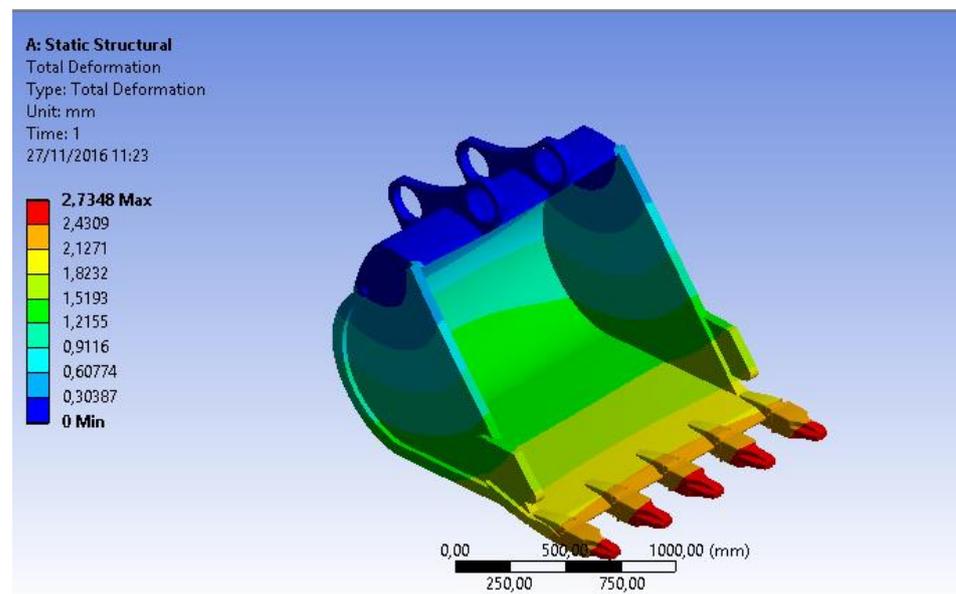
Fuente: Autor.

#### 4.4 Análisis de resultados.

Los resultados del análisis por medio de métodos de elementos finitos realizado por el software ANSYS 16.1 se muestran mediante una escala gráfica acompañada de un valor numérico.

**4.4.1** *Deformación del cucharón de la excavadora hidráulica.* A partir del soporte fijo colocado en los orificios y la fuerza sobre la base de los dientes se producirá una deformación. El resultado del estudio de deformación total de la cuchilla mostrada en la figura 30., dio como resultado 2,7348 mm la cual se encuentra ubicado en la parte de color rojo, esta deformación también esta descrita como “Max “, también en la parte descrita como “Min” se tiene que la deformación es 0 mm, este resultado es la deformación esperada debido a que la deformación máxima ésta se encuentra localizada en el extremo más alejado del empotramiento.

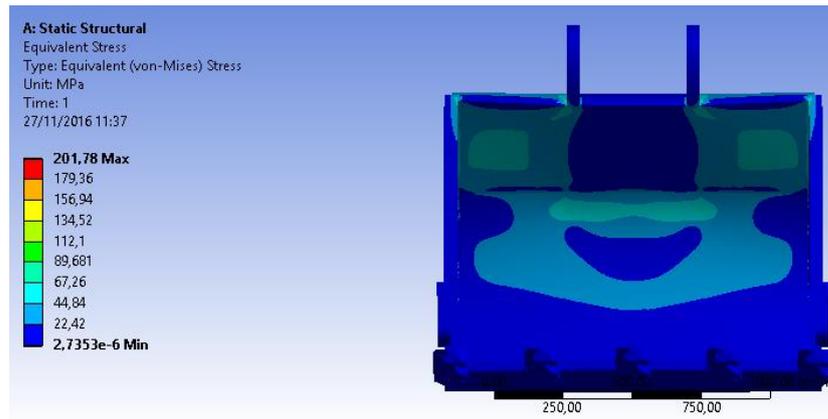
Figura 31. Análisis de Deformación.



Fuente: Autor.

**4.4.2** *Tensión de Von Mises.* El cucharón de excavadora unido al brazo de la excavadora se toma como un elemento estático referente al brazo, por lo tanto es necesario conocer si se podría producir un fallo elástico. Como resultado del estudio se tiene una energía de distorsión elástica máxima de 201,78 MPa y una mínima de  $2,73 \times 10^{-6}$  MPa. Analizando la ubicación del esfuerzo máximo se observa que se encuentra localizado en las arista que une las caras del cucharón de la excavadora y que no existe ningún tipo de redondeo, estos factores provocan que se concentren los esfuerzos por lo tanto esto podría provocar un fallo elástico o la ruptura del cucharón.

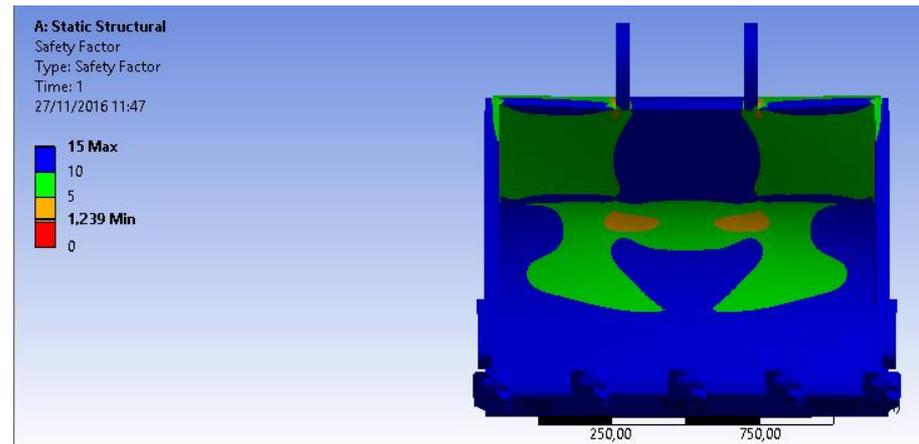
Figura 32. Tensión de von Mises.



Fuente. Autor.

**4.4.3 Factor de Seguridad.** También se obtuvo como resultado el factor de seguridad mínimo de 1,239, el cual brinda una seguridad para realizar trabajos de excavación con cucharones de este material.

Figura 33. Factor de seguridad.



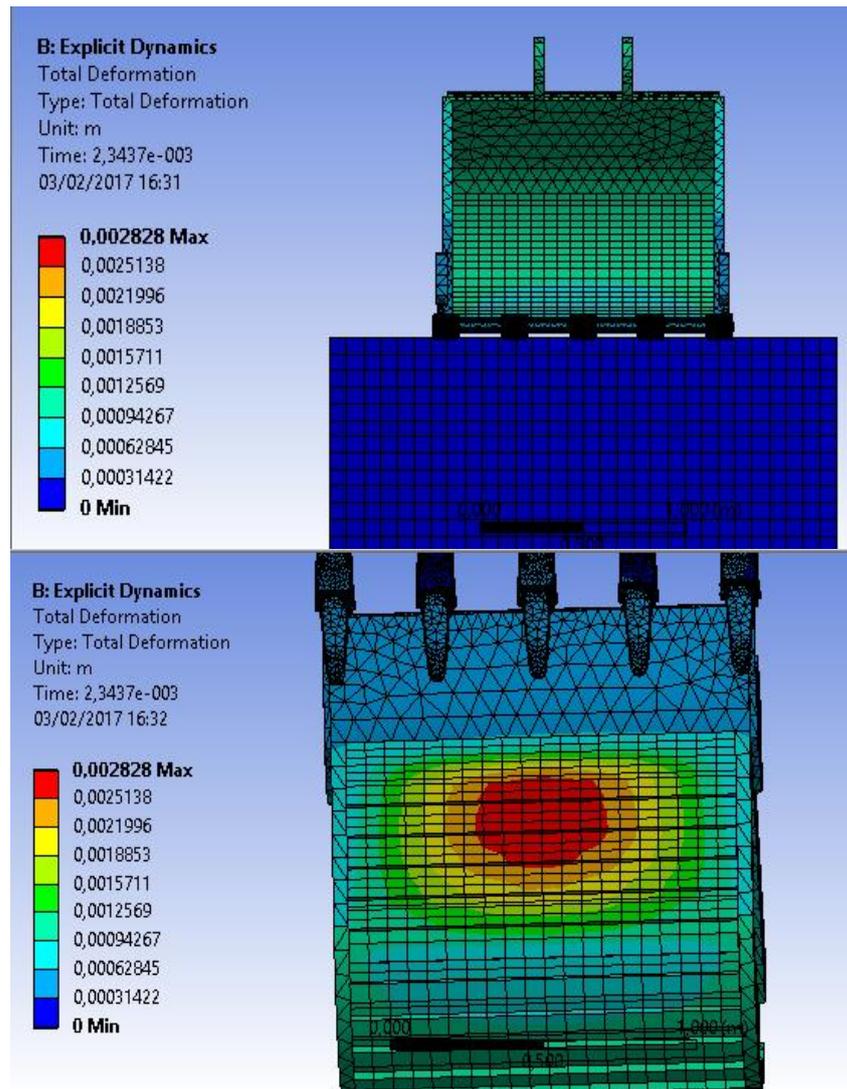
Fuente. Autor.

#### 4.5 Análisis del cucharón al golpear con un banco.

El cucharón de la excavadora de maquinaria de minería sufre golpes en la base, los cuales son provocados por operadores novatos, o por una mala operación, de la maquinaria de minería, esto se produce especialmente al momento de retirar arena del río ya que no se tiene una buena visibilidad.

Para el banco de roca se usó un Módulo de Young de 250Mpa, y un Radio de Poisson de 0,25. (CANOBA, y otros, 2004)

Figura 34. Análisis del cucharón al golpear un banco.



Fuente. Autor.

## CAPÍTULO V

### 5. OPTIMIZACIÓN DE SOLUCIONES.

Para decidir que método de recuperación de cucharones de maquinaria de minería es el más adecuado, se recomienda realizar una inspección y examen minucioso de los requisitos de carga de la pieza, a lo cual, servirá como guía para escoger el tipo de reparación.

Una vez considerados todos estos criterios determinamos las reparaciones a realizar en el cucharón que son las siguientes:

- Parte superior del cucharón y orejas principales. (Fig. 34.)
- Base de las cuchillas del cucharón de maquinaria de minería. (Fig. 35.)
- Interior del cucharón, piso, laterales y techo. (Fig. 36.)
- Parte inferior y laterales exteriores del cucharón. (Fig. 37.)
- Cuchillas de la excavadora. (Fig. 38.)

Figura 35. Parte Superior del cucharón y orejas principales.



Fuente: <http://www.d-maq.com.gt/img/productos/Cucharon.jpg>

Figura 36. Base de las cuchillas del cucharón.



Fuente: <https://www.ferreyros.com.pe/adjunto/upload/fck/images/promociones/cucharon-329D2-reforzado.jpg>

Figura 37. Interior del cucharón, piso, laterales y techo.



Fuente: Autor

Figura 38. Parte inferior y laterales exteriores del cucharón.



Fuente: Autor

Figura 39. Cuchilla de la excavadora.



Fuente:<http://image.made-in-china.com/43f34j00zeATPualsnpf/Bucket-Teeth-for-Komatsu-Excavators-Loaders.jpg>

### 5.1 Factores a tomar en cuenta al momento de la reparación.

Al momento de realizar una reparación se debe tener claro que procedimiento sería el más adecuado, una agrietación por fatiga podría ameritar un enfoque distinto al de una pieza dañada por una sobrecarga temporal.

En las reparaciones involucra la revisión de varios factores, para hacer una reparación, los factores a considerar incluyen:

- ¿Se está reparando una grieta por sobrecarga o por fatiga?
- ¿Se va a reparar una pieza que necesita refuerzo en las zonas desgastadas?
- ¿Se necesita hacer soldaduras extensas que requieren un soldador de alambre?
- ¿Cuáles son los requisitos de precalentamiento y post calentamiento?
- ¿Causara la reparación deformaciones inaceptables?
- ¿Será necesario usar andamios?
- ¿Se necesitara el uso, y por tanto el pedido de un material de relleno especial?
- ¿Puede colocarse la pieza en una superficie plana para soldarla o será necesario efectuar una soldadura fuera de posición?

Se recomienda realizar este cuestionario para reducir el tiempo de reparación, además al realizar este cuestionario se tendrá claro cuál procedimiento se debe utilizar.

En la Fig. 40, se puede observar la cuchilla de excavadora de maquinaria de minería el cual necesita una reparación mediante soldadura.

Figura 40. Cuchilla de maquinaria de minería desgastada.



Fuente: Autor.

En la Fig. 41, se puede observar una base de cucharón de maquinaria de minería dañado por una sobrecarga temporal.

Figura 41. Base de cuchara de maquinaria de minería deformada por sobrecarga temporal.



Fuente: Autor.

### **5.2 Propuesta número uno, cordón de soldadura.**

Este procedimiento se utilizara únicamente cuando el cucharón este con fisura, mas no cuando este dañado por sobrecarga temporal.

Para realizar este procedimiento, al usar soldadura eléctrica se utiliza electrodos de 5 a 8mm o más, ya que cubren un amplio rango de corriente. Los electrodos de menores diámetros producen mayor penetración, se usará electrodos 7018 ya que estos por su contenido cumplen con los requerimientos necesarios, y si se usa una soldadura autógena se usará alambre ER 70S-6 o alambre tubular 71T1.

El Ing. Marcelo Arguello, trabajador del GADPB por su amplia experiencia en el ámbito de maquinaria de minería recomienda el uso de la suelda eléctrica el asegura que se obtiene una mayor vida útil.

### **5.3 Propuesta número dos, añadidura de placas.**

Este procedimiento se utiliza cuando se produce un daño severo y es necesario cambiar las partes laterales, inferiores y superiores tanto internamente o externamente del

cucharón, estos daños son producidos por fatiga, golpes en el cucharón, generalmente se producen por trabajar en lugares donde existe gran cantidad de minerales pétreos o por mala operación por parte del operador.

**5.3.1 Materiales a utilizar.** Los materiales a utilizar deben poseer iguales o superiores características del material base AISI 1522, los materiales utilizados para este estudio son: el acero FORA 450, y el acero de uso naval.

**5.3.1.1 Características de acero FORA 450.** Es un acero martensítico templado al agua con una dureza típica de 450 HB. Es un material tenaz, de alta dureza y resistencia mecánica, con buena resistencia a la deformación plástica y al desgaste por impacto o deslizamiento del material abrasivo. Tiene buena soldabilidad y buenas características para conformado. (BOHMAN, 2016).

En nuestro país el material lo encontramos comercialmente como FORA 450.

Tabla 8. Propiedades mecánicas del acero FORA 450.

Dureza	Límite de Fluencia.	Resistencia a la Tracción.
450 HB	1200 MPa.	1400 MPa.
47,5 HRC	174000 PSI	203000 PSI

Fuente: (BOHMAN, 2016).

**5.3.1.2 Características aceros para construcción naval.** Cumplen la normativa, ASTM A131, es un acero estructural al carbono, utilizado en construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, torres para comunicación y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas, herrajes eléctricos y señalización.

Tabla 9. Propiedades mecánicas del acero ASTM A 131.

Límite de fluencia.		Resistencia a la Tracción	
Mpa	Psi	Mpa	Psi
235	34000	490	71000

Fuente: (IPAC)

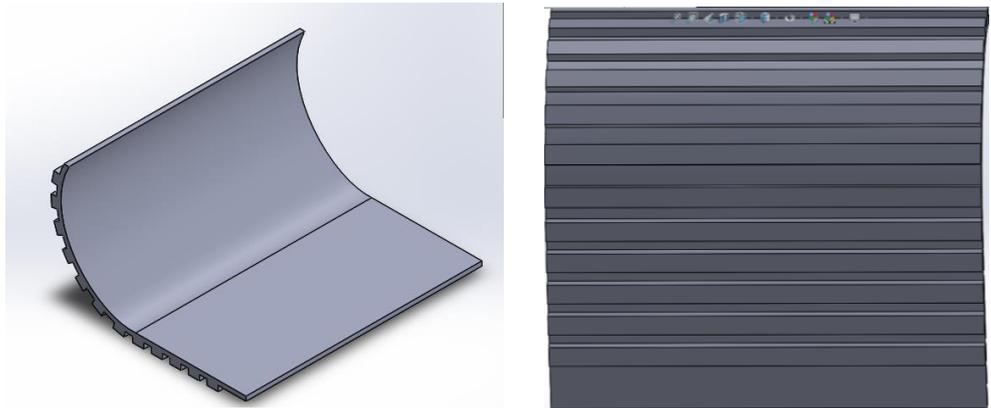
## 5.4 Modelación de los métodos.

**5.4.1** *Modelación de añadidura de soldadura.* Se analizara la adición de soldadura en zonas agrietadas de la base de las cuchillas de la retroexcavadora.

**5.4.2** *Modelación de añadidura de placas.* Se cambió toda la base inferior y se añadió placas protectoras, las placas protectoras se probó en diferentes geometrías las cuales son:

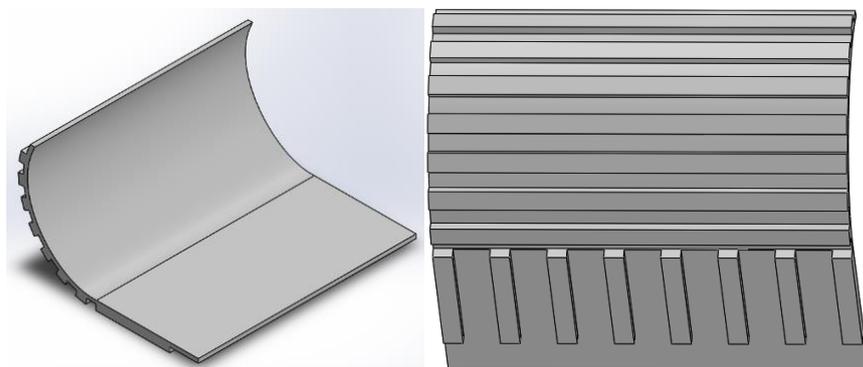
- Placas protectoras en posición horizontal. (Fig. 42.)
- Placas protectoras en posición vertical. (Fig. 43.)
- Placas protectores en forma de X. (Fig. 44.)

Figura 42. Placas protectoras en posición horizontal.



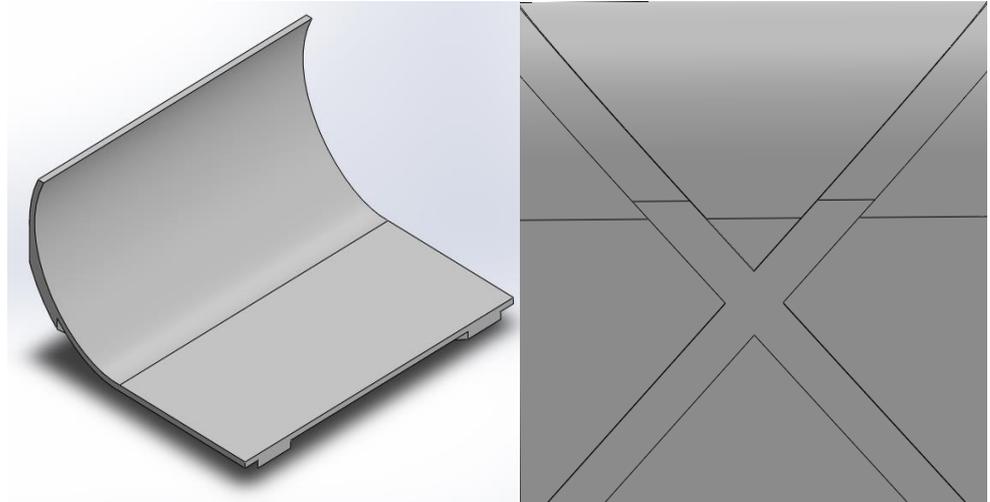
Fuente. Autor.

Figura 43. Placas protectoras en posición vertical.



Fuente. Autor.

Figura 44. Placas protectoras en forma de X.



Fuente. Autor.

#### 5.4 Análisis mediante método de elemento finito de las propuestas planteadas.

El análisis se realiza en condiciones extremas de trabajo del cucharón de la retroexcavadora.

**5.4.1 Análisis de la añadidura de soldadura.** Para el análisis del método de añadidura de soldadura, se usó el software de método de elementos finitos, y fue necesario utilizar el complemento, Weld Strength en el cual se calculó el factor WUF, que es el factor de utilización de la soldadura. (MEDESO, 2016)

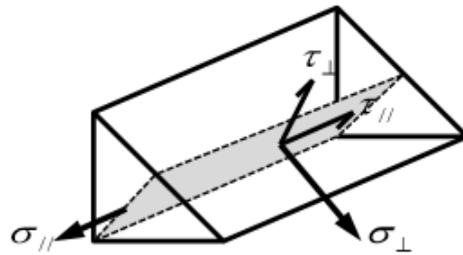
El factor WUF, es la relación entre el esfuerzo equivalente sobre la resistencia equivalente última de tracción.

$$WUF = \frac{\delta_{equivalente}}{f_{equivalente}} \quad (6)$$

Donde el esfuerzo equivalente es igual a:

$$\sigma_{Eqv} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \quad (7)$$

Figura 45. Esfuerzos que interviene en la soldadura.



Fuente: (MEDESO, 2016)

Y la resistencia ultima de tracción es igual a

$$f_{equivalente} = \frac{f_u}{B_W * \gamma_{M2}} \quad (8)$$

$B_W$  es un factor igual a uno ya que se usó un grado de acero S460, tiene una resistencia ultima de tracción,  $f_u$  de 540 Mpa, y  $\gamma_{M2}$  es el factor de seguridad para soldadura que es igual a 1,25.

Tabla 10. Eurocode 3. Datos Válidos para un espesor inferior a 40mm.

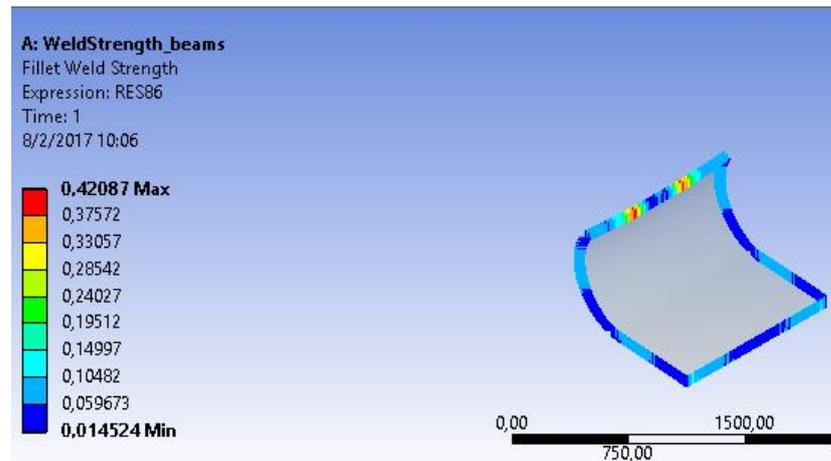
Grado de acero	Factor de correlación	Resistencia ultima de tracción. (Mpa)
S235	0.80	360
S275	0.85	410
S355	0,90	470
S420	1,00	520
S460	1,00	540

Fuente: (MEDESO, 2016)

Hay que tomar en cuenta que el manual del software nos recomienda tomar un espesor de soldadura mayor a 3 mm y un espesor menor a 40 mm. Por lo cual el análisis cumplió con las características del programa de métodos de elemento finito.

El manual del software recomienda que el factor WUF debe ser menor a uno para que el diseño sea óptimo.

Figura 46. Análisis de soldadura.



Fuente: Autor.

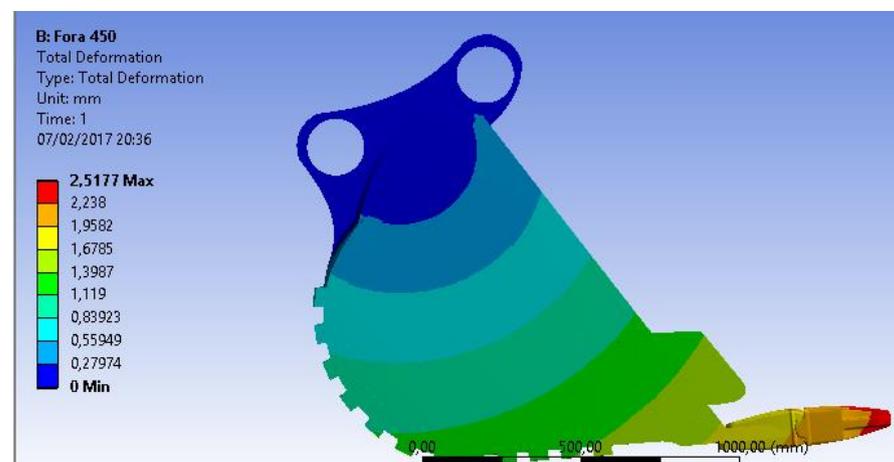
El análisis muestra un WUF máximo de 0,42, por lo cual el uso de añadidura de soldadura para la reparación de cucharones de maquinaria de minería es exitoso.

**5.4.2 Análisis de la añadidura de placas.** Para el análisis del método de la añadidura de placas, se usó el software de método de elementos finitos, para lo cual se calculó la deformación total y el factor de seguridad, en el análisis de la añadidura de placas se tuvo seis casos, ya que se toma en cuenta los dos tipos de materiales y las tres geometrías.

**5.4.2.1 Análisis de la añadidura de placas usando el acero FORA 450.**

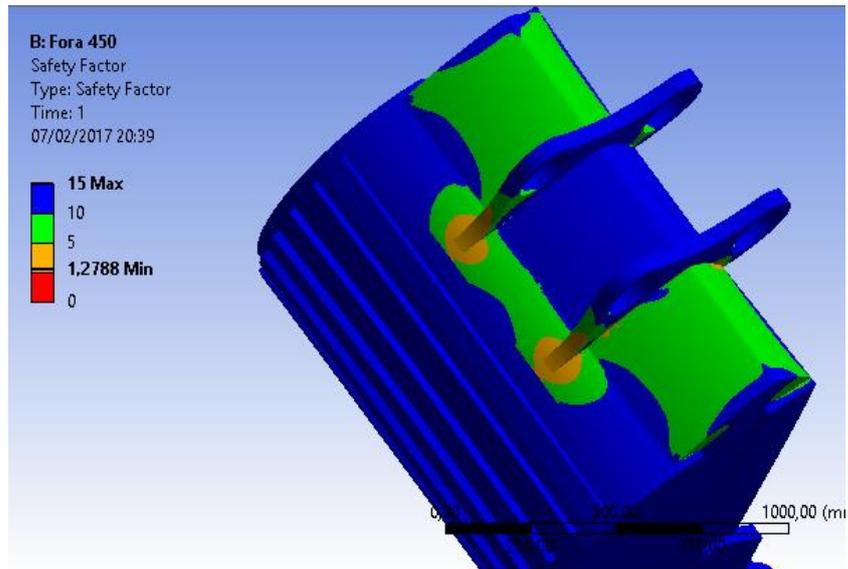
- Placas protectoras en posición horizontal. (Fig. 46.), (Fig. 47.)
- Placas protectoras en posición vertical. (Fig. 48.), (Fig. 49.)
- Placas protectores en forma de X. (Fig. 50.), (Fig. 51.)

Figura 47. Deformación de las placas protectoras en posición horizontal, usando FORA 450-500.



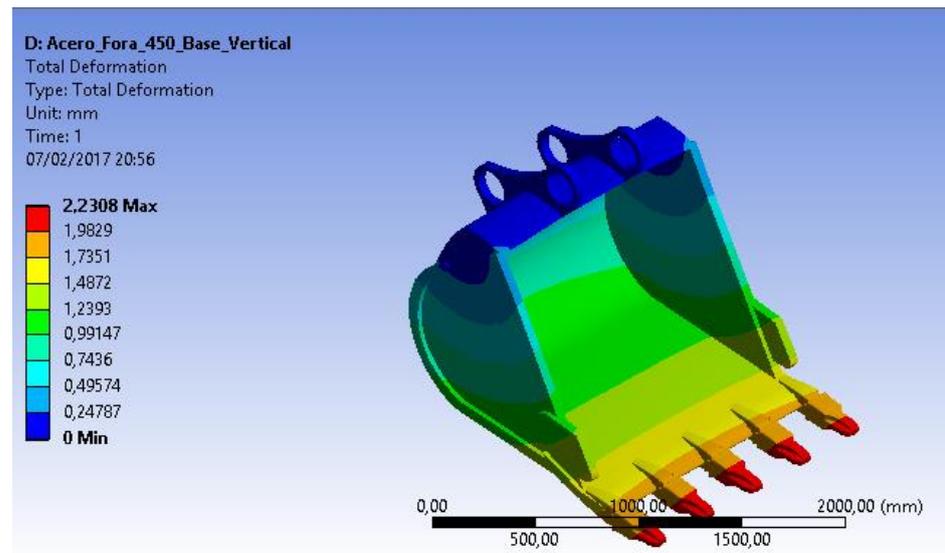
Fuente: Autor

Figura 48. Factor de seguridad de las placas protectoras en posición horizontal, usando FORA 450-500.



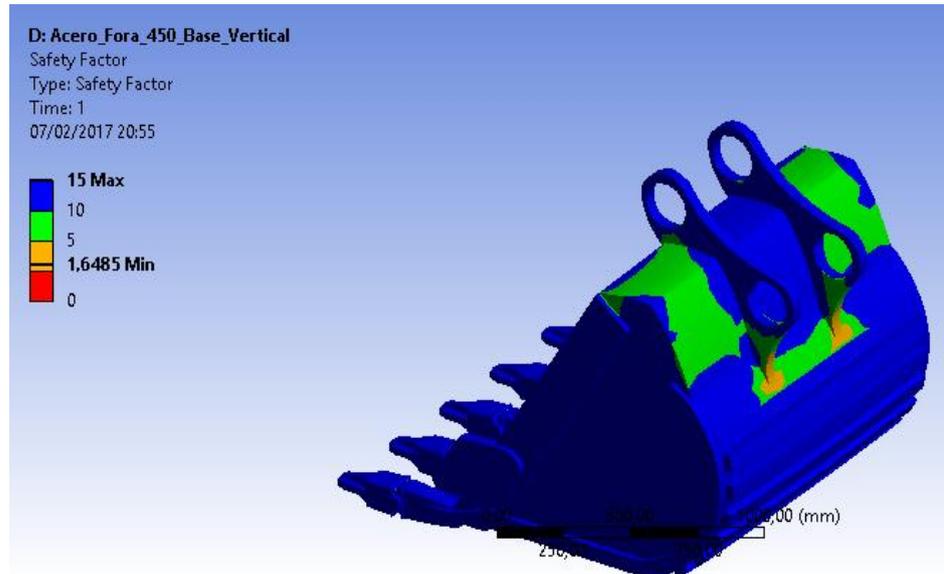
Fuente: Autor.

Figura 49. Deformación de las placas protectoras en posición vertical, usando FORA 450-500.



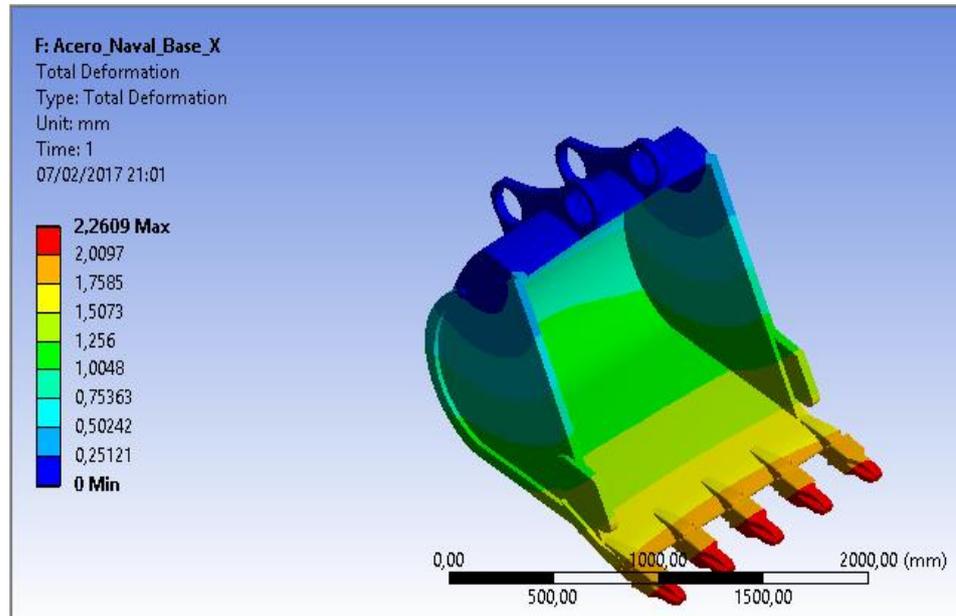
Fuente: Autor

Figura 50. Factor de seguridad de las placas protectoras en posición vertical, usando FORA 450-500.



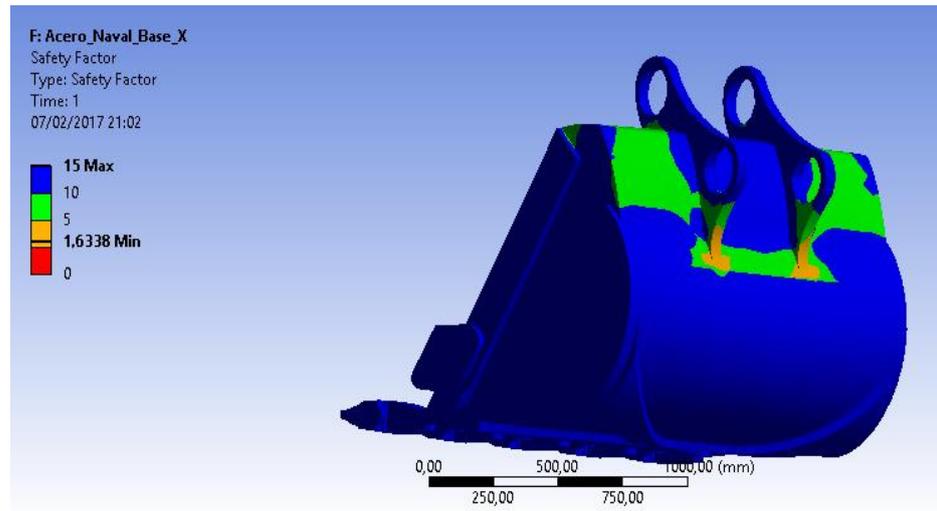
Fuente: Autor.

Figura 51. Deformación de las placas protectoras en forma de X, usando FORA 450.



Fuente: Autor

Figura 52. Factor de seguridad de las placas protectoras en forma de X, usando FORA 450.

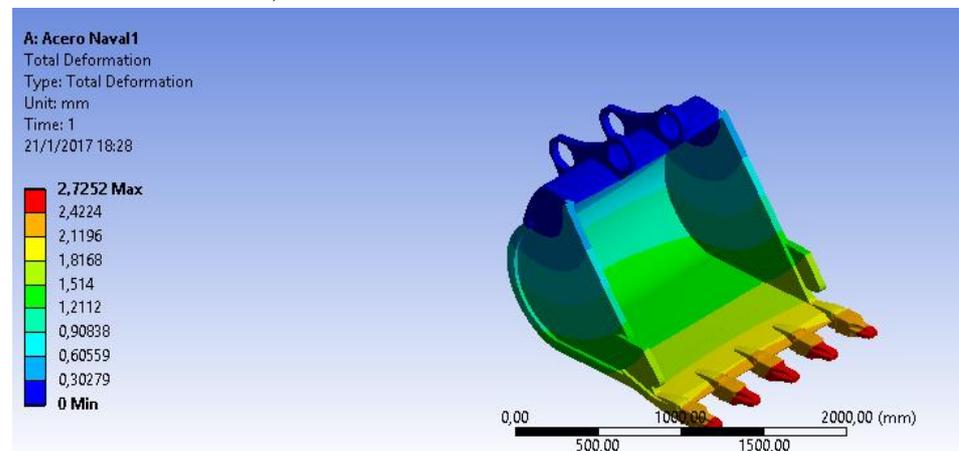


Fuente: Autor.

#### 5.4.2.2 Análisis de la añadidura de placas usando el acero de uso naval.

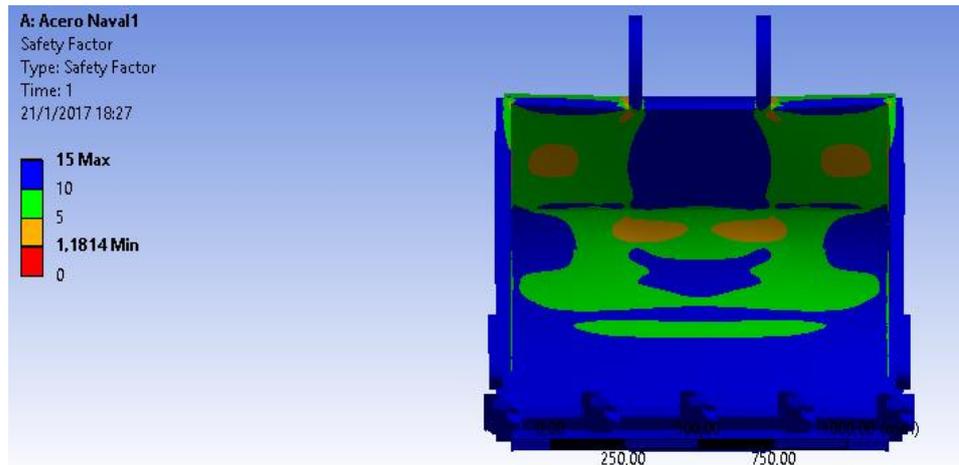
- Placas protectoras en posición horizontal. (Fig. 52.), (Fig. 53.)
- Placas protectoras en posición vertical. (Fig. 54.), (Fig. 55.)
- Placas protectores en forma de X. (Fig. 56.), (Fig. 57.)

Figura 53. Deformación de las placas protectoras en posición horizontal usando acero naval,



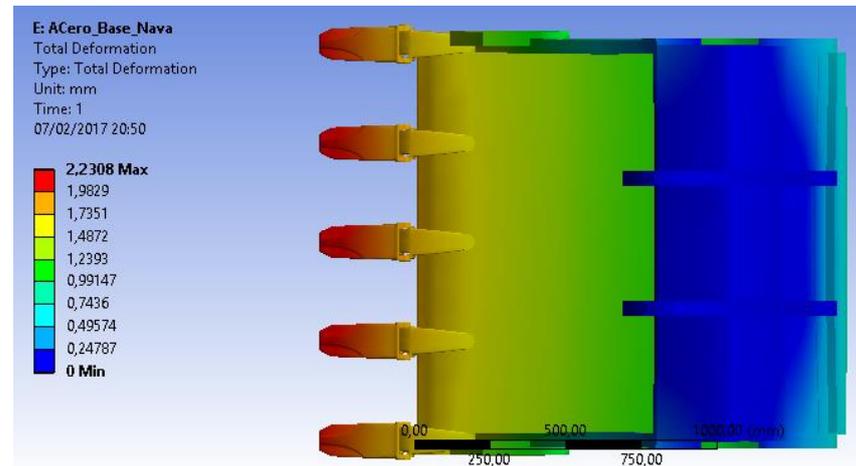
Fuente: Autor

Figura 54. Análisis del factor de seguridad de las placas protectoras en posición horizontal usando acero naval.



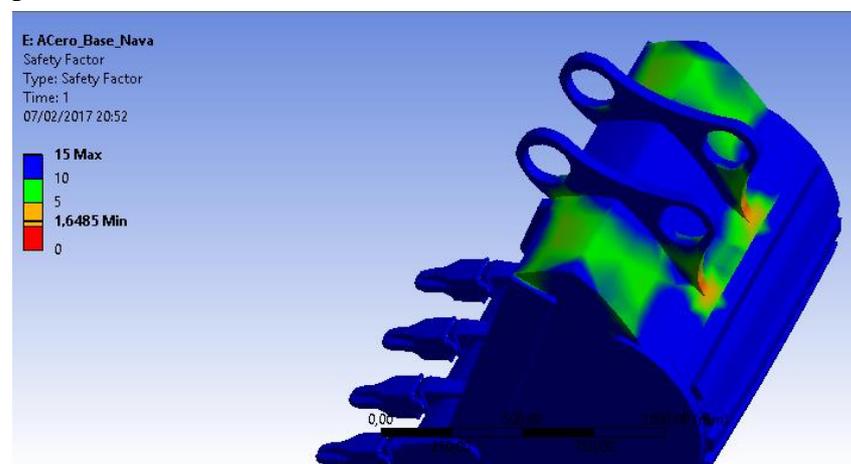
Fuente: Autor

Figura 55. Deformación de las placas protectoras en posición vertical usando acero naval.



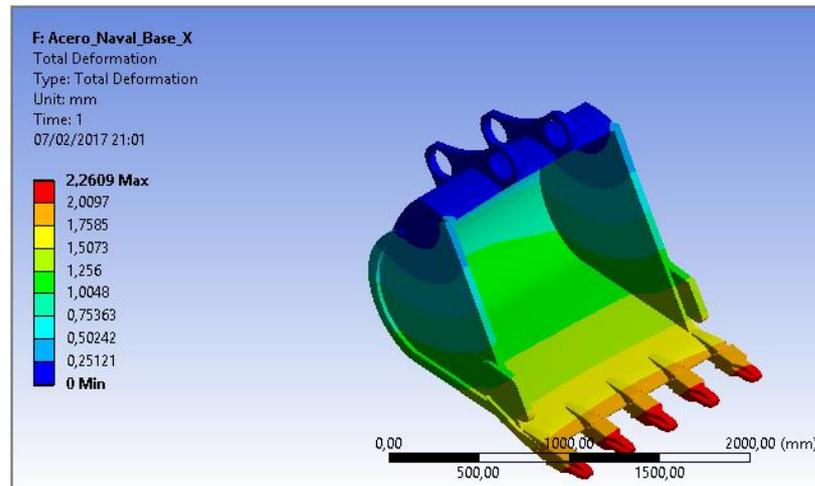
Fuente: Autor

Figura 56. Análisis del factor de seguridad de las placas protectoras en posición horizontal usando acero naval.



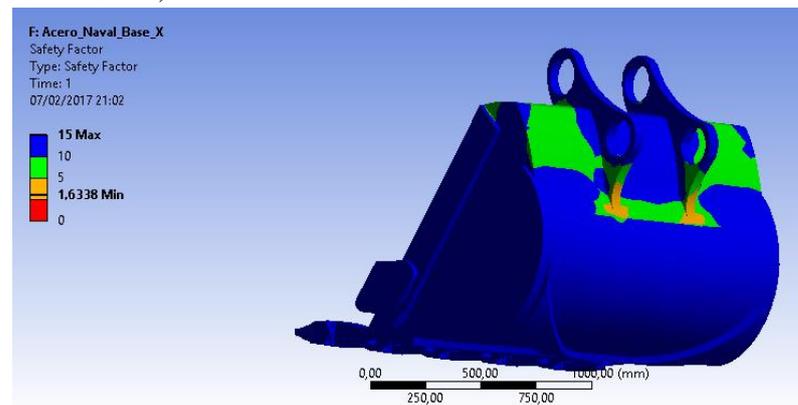
Fuente: Autor

Figura 57. Deformación de las placas protectoras en forma de X, usando acero naval.



Fuente: Autor

Figura 58. Análisis del factor de seguridad de las placas protectoras en forma de X, usando acero naval.



Fuente: Autor

**5.4.3 Resultados de los análisis del análisis de la añadidura de placas.** En la Tabla 11 se puede observar los resultados del análisis de la añadidura de placas. Con la ayuda del programa se calculó la cantidad requerida del material para cada caso.

Tabla 11. Resultado de los análisis de la añadidura de placas.

Base Horizontal			
Material	Peso (Kg)	Deformación	Factor de seguridad
Acero Naval	557	2,72	1,181
FORA 450	557	2,51	1,279

Fuente: Autor

Tabla 11. (Continuación.) Resultado de los análisis de la añadidura de placas.

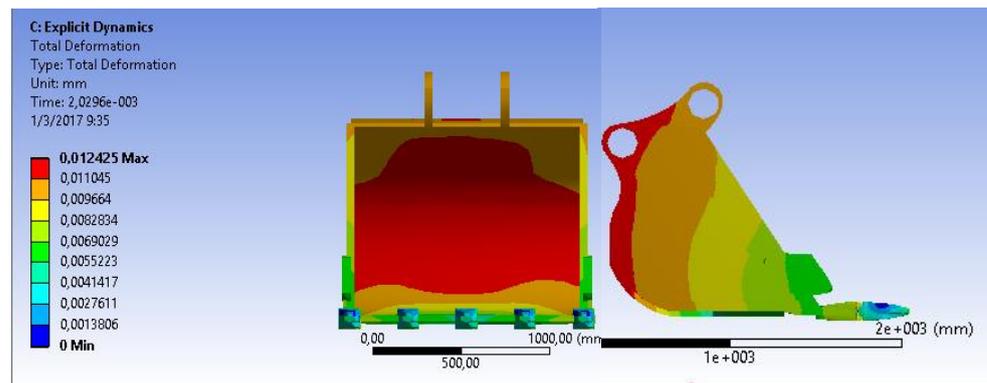
Base Horizontal Vertical			
Material	Peso (Kg)	Deformación	Factor de seguridad
Acero Naval	513	2,230	1,640
FORA 450	513	2,230	1,649
Base en forma de X			
Material	Peso (Kg)	Deformación	Factor de seguridad
Acero Naval	419	2,260	1,633
FORA 450	419	2,230	1,634

Fuente: Autor

Se encontró que el material más adecuado para realizar la recuperación es el acero FORA 450, y la geometría adecuada es la base en forma de X, ya que al comparar los análisis se obtuvo un mejor resultado con esta propuesta y además se ahorró el material a utilizar.

**5.4.4** *Análisis de la añadidura de placas al momento de golpear el cucharón con un banco de roca.* Se realizó el análisis con el acero FORA 450 y con la geometría en forma de X ya que esta fue la que mejor resultados presento.

Figura 59. Análisis de la añadidura de placas al momento de golpear el cucharón.



Fuente: Autor.

## 5.5. Análisis económico.

Se realizó un análisis económico al momento de realizar una recuperación completa del cucharón de la retroexcavadora.

Tabla 12. Precio de las partes intercambiables del cucharón.

Parte	Precio
Base de las cuchillas	70
5 Uñas	350
4 Bocines	160
2 protección de los esquineros	200
2 Protección de los laterales	400
Base del cucharón de la retroexcavadora Forá 450-500	1200
Mano de obra	1200
Total del presupuesto al usar el acero FORA 450-500.	3580

Fuente: Autor.

Mario Gonzales, trabajador de HARD ROCK BUCKETS, afirmó que el precio de un cucharón genérico cuesta alrededor de 8000 dólares, y un cucharón original para maquinaria de minería cuesta alrededor de 23000.

La vida útil de un cucharón de maquinaria de minería, es de 1 año en cantera y 3 meses al explotar trivado, esto lo afirma el Ing. Fernando Gaibor Jefe de taller del GADP de Bolívar, y lo corrobora el Sr. Jorge Sisa, operador de excavadora de minería con una experiencia de 20 años.

Por lo cual económicamente resulta rentable realizar el proceso de recuperación.

En la siguiente tabla se puede apreciar la comparación del método empírico, el material del cual está construido el cucharón y el método seleccionado en el estudio.

Tabla 13. Comparación de los materiales.

Resultados	AISI 1522	Método Empírico	Propuesta Base en Forma de X con FORA 450	Propuesta Base en Forma de X con ASTM A131
Deformación	2,734 mm	No hay estudios.	2,230 mm	2,260 mm
Deformación al golpear con un banco	2,828 mm	No hay estudios	0,01245 mm	0,01245 mm
Costo	8000 - 24000	2000 - 6000	3580	3580

Fuente: Autor.

Tabla 13. (Continuación.) Comparación de los materiales.

Costo	8000 - 24000	2000 - 6000	3580	3580
Adquisición del material	No existe en nuestro mercado	Materiales de desecho.	Fácil Adquisición	Fácil Adquisición
Resistente a la oxidación	Baja Resistencia	Baja Resistencia	Media Resistencia	Alta Resistencia
Resistencia a la abrasión	Baja Resistencia	Baja Resistencia	Alta Resistencia	Media Resistencia
Fiabilidad	Media fiabilidad	Baja fiabilidad	Alta Fiabilidad	Alta Fiabilidad
Factor de seguridad	Min 1,239- Max 15	No hay estudios.	Min 1,634-Max 15	Min 1,633-Max 15

Fuente: Autor

## CAPÍTULO VI

### 6. Validación de hipótesis.

Para la validación de hipótesis se utilizó un análisis con la distribución T-Student, para cada caso, se empleó el software Minitab 17.1.

#### 6.1 Análisis de distribución T-Student de la deformación.

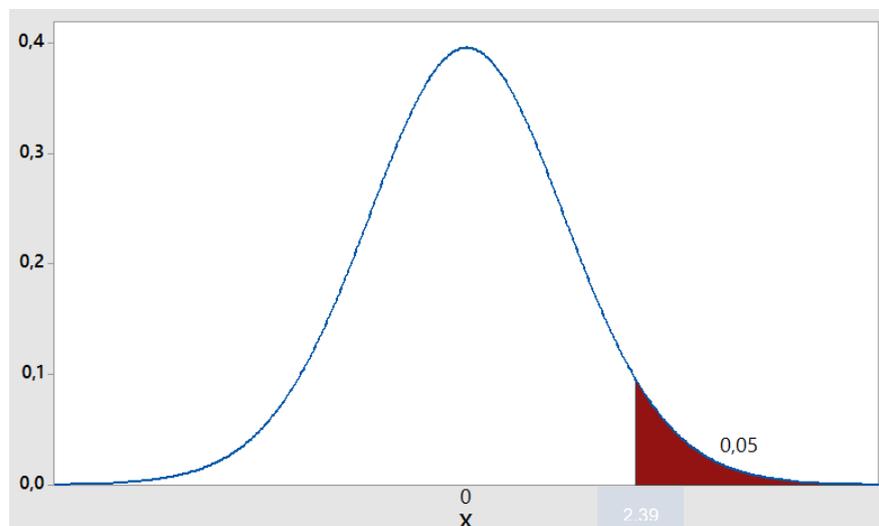
Para el análisis de la distribución T-Student se tomó en cuenta la deformación que se encontró en los análisis,

Tabla 14. Datos de la deformación usados en el análisis de distribución T-Student.

Tipos de Acero	Deformación	Media	Desviación Estándar
Acero 1522	2,734	2,39	0,23
Acero Fora 450-500	2,230		
Acero ASTM A131	2,260		

Fuente: Autores

Figura 60. Grafica de distribución de T-Student de la deformación.



Con los datos obtenidos, mediante el uso del software Minitab 17.1 se obtuvo una probabilidad de falla de 5% para el análisis de la deformación, lo cual es aceptable.

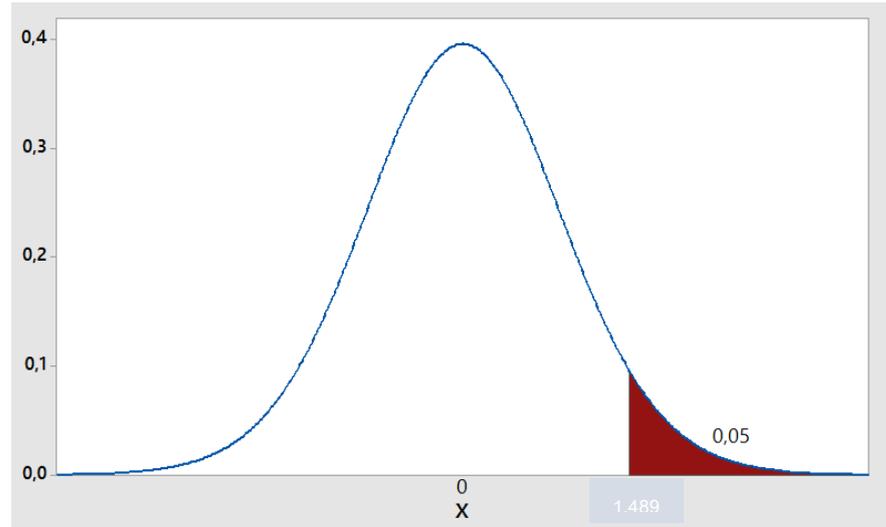
#### 6.1.2 Análisis de distribución T-Student del Factor de seguridad.

Tabla 15. Datos usados en el análisis del Factor de seguridad.

Tipos de Acero	Factor de seguridad	Media	Desviación Estándar
Acero 1522	1,239	1,489	0,185
Acero Fora 450-500	1,634		
Acero ASTM A131	1,633		

Fuente: Autor

Figura 61. Grafica de distribución de T-Student del factor de seguridad.



Fuente. (Autor).

Con los datos obtenidos, mediante el uso del software Minitab 17.1 se obtuvo una probabilidad de falla de 5% para el análisis del factor de seguridad, lo cual es aceptable.

**6.1.3 Análisis de hipótesis.** Para el análisis final de la hipótesis, se usó  $\alpha=5\%$  que es la probabilidad de falla que se calculó en el estudio, de distribución T-Student.

Para este análisis se tomó en cuenta las dos probabilidades de la hipótesis:

Hipótesis alternante: La superpuesta de placas metálicas y cordones de soldadura son procedimientos adecuados para la recuperación de cucharones de maquinaria de minería.

Hipótesis nula: La superpuesta de placas metálicas y cordones de soldadura, no son procedimientos adecuados para la recuperación de cucharones de maquinaria de minería.

Para la comprobación de la hipótesis se usó el software minitab 17.1.

Tabla 16. Datos utilizados para el cálculo de hipótesis.

Muestra	Media	Desviación Estándar
1	2,73	0,235
2	2,24	0,235

Fuente. (Autor).

Figura 62. Análisis de la hipótesis mediante el uso del software minitab 17.1.

```
Diferencia =  $\mu$  (1) -  $\mu$  (2)
Estimación de la diferencia: 0,0000
IC de 95% para la diferencia: (-0,0701; 0,0701)
Prueba T de diferencia = 0 (vs.  $\neq$ ): Valor T = 0,00 Valor p = 1,000
```

Fuente: (Autor).

Con el análisis que se calculó mediante el uso del software Minitab 17.1, se obtiene como conclusión que no se puede rechazar la hipótesis ya que  $p > \alpha$ , donde p es la ANDEVA, “análisis de varianza”.

## CAPÍTULO VII

### **7. Conclusiones y Recomendaciones.**

#### **7.1 Conclusiones.**

Se realizó un estudio sobre el material del cual está compuesto el cucharón de la retroexcavadora de maquinaria de minería, en el cual se determinó que es un acero AISI1522, el cual posee una dureza de 200HB.

Se trazó la geometría del cucharón de maquinaria de minería con la ayuda del software SOLIDWORKS tomando las medidas de un cucharón. Con el análisis de los resultados obtenidos del software de MEF, se determinó que tiene una deformación de 2,734 y un factor de seguridad Min de 1,239 y Max de 15 el cual nos da una media fiabilidad.

Se ejecutó el análisis de la recuperación del cucharón, con la añadidura de soldadura, utilizando los electrodos 7018 y alambre ER 70S-6 o alambre tubular 71T1, obteniendo un factor ultimo de seguridad de 0,420 el cual es aceptable.

Se analizó las tres propuestas plantadas con el acero ASTM 131 FORA 450 mediante software de método de elemento finito, y se escogió el método de plancha en forma de X ya que con esta propuesta se obtuvo mejores resultado,

Se verificó la validez de la hipótesis, por lo cual realizar la recuperación de cucharones de maquinaria de minería es factible, y se tendrá un ahorro económico.

#### **7.2 Recomendaciones.**

Antes de empezar el trabajo de movimiento de tierra verificar el estado en el que se encuentra el cucharón.

Cumplir las normas de seguridad al momento de trabajar cola retroexcavadora de maquinaria de minería.

Se recomienda lubricar los bocines del cucharón antes y después de realizar el trabajo, y si está trabajando en ambientes acuosos se recomienda lubricar cada dos horas, para evitar desgaste por fricción.

Se recomienda usar el cucharón de la retroexcavadora únicamente para lo cual ha sido diseñado, ya que otros usos lo pueden dejar deshabilitado.

Para evitar pérdidas económicas es aconsejable tener un cucharón de reserva, ya que una falla del cucharón podría parar el trabajo.

Al momento de usar la retroexcavadora se debe tener cuidado en la operación para que el cucharón no reciba golpes que lo pueden deformar o agrietarlo, dejándolo deshabilitado.

Para dibujar el cucharón de maquinaria de minería se debe realizar las mediciones con las herramientas adecuadas para una mayor precisión.

Al momento de realizar la recuperación se debe usar el acero Forc 450-500, ya que tiene las características óptimas para realizar la reconstrucción del cucharón de maquinaria de minería, para realizar la soldadura se debe cumplir con la norma de soldadura. D.1.1

## Bibliografía:

**ANSYS 16.1.** *Ansys Documentation*. [En línea]. 2016.[Consulta:10 de Diciembre 2016]. Disponible en: <http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>

**AZO MATERIALS.** *AISI 1522 Carbon Steel (UNS G15220)*. [En línea]. 2016.[Consulta el: 9 de Noviembre de 2016]. Disponible en: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6607&lang=e>

**BEER, Ferdinand P & et al. Sapiens.** *Mecánica de Materiales*. 5<sup>ta</sup> ed. México. México D.F. McGrawHill, 2010. ISBN 0-07-722140-0. pp 48-56.

**BOHMAN, IVAN.** *Planchas antiabrasivas*. [En línea]. 2016. [Consulta el: 18 de Enero de 2017]. Disponible en: <http://www.ivanbohman.com.ec/wp-content/uploads/2015/12/fora.pdf>.

**F.SMITH, William.** *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de materiales*. 4<sup>ta</sup> ed. México. México D.F. McGrawHill. 2006. ISBN 970-10-5638-8. pp 18-34.

**HYUNDAI.** *Robex 210LC-9*. [En línea]. 2007. Disponible en: <https://www.slideshare.net/silvioroman3/hyundai-210-serie-nueva-catalogo>

**INEN 0118.** *Determinación del contenido de manganeso en el acero usando el metodo espectrofotometrico*.

**INEN 0123.** *Determinación de la dureza Brinel*.

**IPAC.** *Aceros IPAC*. [En línea]. [Consultado: 18 de Enero de 2017.] Disponible en: [http://www.ipac-acero.com/revista-digital/IPAC\\_catalogo.html](http://www.ipac-acero.com/revista-digital/IPAC_catalogo.html).

**KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S.R.** *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 5<sup>ta</sup> ed. México. México D.F. PEARSON Educación. 2008. ISBN 0-13-148965-8. p. 157.

**CANOBA, Carlo; FRAGA, Héctor.** *Propiedades elasticas de las rocas*. [En línea]. Inglaterra. Londres. E&F.N. SPON Ltd. 2004. ISBN 0419104704. Disponible en: [http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Elasticidad\\_de\\_rocas.pdf](http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Elasticidad_de_rocas.pdf)

**LOTTI, Raquel.** *Aplicabilidad científica do método dos elementos finitos*. [En línea] 2006. [Consultado: 30 de Febrero de 2017.] Disponible en: <http://www.scielo.br/pdf/dpress/v11n2/a06v11n2>.

**MEDESO, EDR.** *WELD STRENGTH EXTENSION*. [En línea] 2016. [Consultado: 15 de Enero de 2017]. Disponible en: [https://appstore.ansys.com/-/media/Storefront/App\\_PDF/WeldStrengthDocumentationV1706.pdf?la=en](https://appstore.ansys.com/-/media/Storefront/App_PDF/WeldStrengthDocumentationV1706.pdf?la=en).

**NICHOLS, Herbert L. 1993.** *Reparación y Mantenimiento de Maquinaria Pesada*. México, México D.F. McGraw-Hill, 1993. ISBN 0-07-04698-7. pp. 300-310.

**Diaz del Río, Manuel.** *Manual de maquinaria de construcción.* México. Mexico D.F. McGraw-Hill interamericana de España S.L. 2006. ISBN 9788448156466. pp. 548-580.