



INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero
Automotriz**

Autor: Steven Enrique Guala Maita

Tutor: Ing. Edgar Gustavo Vera Puebla, Msc.

**Análisis del Comportamiento Estructural de Diente de
Corte Tipo SYL Utilizado en Cucharones de Excavadoras a
través de Método de Elementos Finitos**

Certificación de Autoría

Yo, Steven Enrique Guala Maita, con CI: 0929313005, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad intelectual, reglamento y leyes.

Steven Enrique Guala Maita

C.I: 0929313005

Aprobación del Tutor

Yo, Edgar Vera Puebla certifico que conozco al autor del presente trabajo siendo responsable exclusivo tanto de su seguridad y autenticidad, como de su contenido

Ing. Edgar Vera Puebla, Msc

C.I.: 1715264105

Director del Proyecto

Dedicatoria

A mis padres. Este éxito refleja su profundo amor y compromiso. Aprecio enormemente los valores que me han enseñado y el afecto constante que me han dado. No puedo describir completamente mi agradecimiento hacia ustedes. Esta tesis es un homenaje a su historia y a la admiración inquebrantable que les tengo. Gracias por ser los padres más maravillosos de este mundo.

Steven Enrique Guala Maita

Agradecimiento

A Dios, quien diariamente me brindó la fuerza y la sabiduría necesaria para seguir adelante y concluir mis estudios con éxito.

Deseo manifestar expresar mis más sinceros agradecimientos a mi Tutor Máster Edgar, director de mi tesis, cuya dedicación y profesionalismo, junto con sus valiosas observaciones y sugerencias, han sido un pilar fundamental en la culminación de esta investigación.

Igualmente quiero agradecer a la Universidad Internacional del Ecuador UIDE, que, a través de su propuesta educativa, se destaca no solo sobresale por su excelente formación académica, sino que también uno de sus objetivos es la innovación en los contenidos académicos.

A mis padres, que, gracias a su amor incondicional, su apoyo constante y su sacrificio, hicieron posible que este sueño se hiciera realidad.

Y, por último, a cada uno de ustedes, les ofrezco mi más profundo agradecimiento por su invaluable apoyo en este recorrido académico.

Steven Enrique Guala Maita

Índice General

Dedicatoria.....	v
Agradecimiento	vi
Índice General.....	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Ecuaciones	xii
Índice de Tablas.....	xiii
Resumen	xiv
Abstract.....	xv
Capítulo I.....	1
Problema de la Investigación.....	1
1.1. Tema de Investigación.....	1
1.2. Planteamiento, Formulación y Sistematización del Problema	1
<i>1.2.1. Planteamiento del Problema</i>	<i>2</i>
<i>1.2.2. Formulación del Problema.....</i>	<i>2</i>
1.3. Sistematización del Problema.....	2
1.4. Objetivos de la Investigación	3
<i>1.4.1. Objetivo General</i>	<i>3</i>
<i>1.4.2. Objetivos Específicos.....</i>	<i>3</i>
1.5. Justificación y Delimitación de la Investigación.....	3

1.5.1. Justificación Teórica	4
1.5.2. Justificación Metodológica	5
1.5.3. Justificación Práctica.....	5
1.5.4. Delimitación Temporal.....	6
1.5.5. Delimitación Geográfica.....	6
1.5.6. Delimitación del Contenido.....	7
1.6. Alcance.....	7
Capítulo II.....	9
2. Marco Referencial	9
2.1. Análisis Estructural en Maquinaria Pesada	9
2.1.1. Importancia del Análisis Estructural en Componentes de Maquinaria Pesada	10
2.1.2. Aplicación del Método de Elementos Finitos	12
2.2. Mecánica de Materiales y Resistencia Estructural	12
2.2.1. Propiedades Mecánicas de los Materiales Utilizados en Dientes de Corte	13
2.2.2. Tipos de Esfuerzos y Deformaciones en Componentes Sometidos a Carga	14
2.3. Dientes de Corte en Cucharones de Excavadoras	16
2.3.1. Tipos y Características de Dientes de Corte.....	16
2.3.2. Factores que Afectan el Desgaste y Vida Útil de los Dientes de Corte	19
2.4. Método de Elementos Finitos aplicado al Diseño de Dientes de Corte	20
2.4.1. Principios del Método de Elementos Finitos en Autodesk Inventor.....	21
2.5. Cálculo de Esfuerzo que Soporta un Diente de Corte	22
2.5.1. Esfuerzo Normal (σ)	22

2.5.2. Esfuerzo Cortante (τ).....	22
2.5.3. Fórmula de Flexión (Módulo de Resistencia) (σ)	23
2.5.4. Criterio de Von Mises.....	23
2.6. Materiales y Aleaciones más Utilizadas en Dientes de Corte	24
2.6.1. Aceros Aleados con Alto Contenido de Manganeso (Hadfield - ASTM A128).....	24
2.6.2. Aceros de Baja Aleación con Tratamientos Térmicos (ASTM A514, AISI 4140, 4340)	25
2.6.3. Fundiciones de Acero con Tratamiento Térmico (ASTM A148, AISI 8630).....	26
2.6.4. Tendencias y Mejoras Actuales.....	26
Capítulo III	28
3. Desarrollo Metodológico de la Investigación.....	28
3.1. Herramientas Tecnológicas	28
3.2. Modelado del Diente de Corte Tipo SYL.....	30
3.2.1. Recolección de Información Geométrica y Dimensional.....	30
3.2.2. Diseño CAD Tridimensional en Autodesk Inventor	32
3.2.3. Definición del Material y Propiedades Mecánicas	36
3.3. Configuración de la Simulación Estructural.....	38
3.3.1. Asignación de Material en Diente de Corte	38
3.3.2. Asignación de Condiciones de Contorno	39
3.3.3. Aplicación de Cargas Representativas.....	40
3.3.4. Generación del Mallado de Elementos Finitos	40
3.4. Ejecución del Análisis Estructural del Diente de Corte	41
3.4.1. Visualización y Validación del Modelo Simulado.....	42

Capítulo IV	44
4. Interpretación de Resultados	44
4.1. Distribución de Esfuerzos y Deformaciones	44
4.2. Evaluación del Factor de Seguridad (FS).....	45
4.3. Discusión de los Resultados Obtenidos.....	45
Conclusiones.....	47
Recomendaciones	48
Bibliografía.....	49

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Maquinaria Pesada – Excavadora Komatsu</i>	10
Figura 2 <i>Funcionamiento de Dientes de Corte en Maquinaria Pesada</i>	11
Figura 3 <i>Propiedades Mecánicas</i>	14
Figura 4 <i>Tipos de Esfuerzos</i>	15
Figura 5 <i>Diente de Penetración</i>	17
Figura 6 <i>Diente de Desgaste</i>	17
Figura 7 <i>Diente de Uso General</i>	18
Figura 8 <i>Diente de Uso General</i>	19
Figura 9 <i>Inicio de Bocetaje de Diente de Corte 2D</i>	33
Figura 10 <i>Aplicación de Herramienta de Extrusión</i>	34
Figura 11 <i>Modelado de Cuadrante de Diente de Corte</i>	34
Figura 12 <i>Modelado Tridimensional del Cuadrante de Diente de Corte</i>	35
Figura 13 <i>Réplica de Cuadrante de Diente de Corte</i>	35
Figura 14 <i>Obtención del Modelado de Diente de Corte</i>	36
Figura 15 <i>Designación de Material</i>	39
Figura 16 <i>Condiciones de Contorno del Tipo Fija</i>	39
Figura 17 <i>Condiciones de Carga</i>	40
Figura 18 <i>Proceso de Mallado</i>	41
Figura 19 <i>Resultados de Tensión de Von Mises</i>	42
Figura 20 <i>Resultados de Deformación</i>	43
Figura 21 <i>Resultados de Factor de Seguridad</i>	43

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 <i>Esfuerzo Normal</i> (σ).....	22
Ecuación 2 <i>Esfuerzo Cortante</i> (τ)	23
Ecuación 3 <i>Fórmula de Flexión (Módulo de Resistencia)</i> (σ).....	23
Ecuación 4 <i>Tensión de Von Mises</i>	23
Ecuación 5 <i>Fórmula de Carga Máxima Admisible</i> (F)	37

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Dimensiones de Diente de Corte STY de la Marca Komatsu Serie 30</i>	31
Tabla 2 <i>Propiedades Mecánicas de Diente de Corte de la Marca Komatsu</i>	37

Resumen

El presente estudio analizó el comportamiento estructural del diente de corte tipo SYL, utilizado en cucharones de excavadoras Komatsu, mediante simulaciones computacionales con Autodesk Inventor. Inicialmente, se recopiló información técnica sobre su geometría y el material utilizado, un acero de alta resistencia según especificaciones del fabricante. Se realizó el modelado 3D del diente, aplicando condiciones de carga severa representadas por una fuerza de 100,5 N en la punta, y se establecieron condiciones de contorno en la base y el orificio del pasador. A través del método de elementos finitos se obtuvo una distribución detallada de esfuerzos y deformaciones, siendo el valor máximo de tensión de Von Mises de 0,0519 MPa, localizado en la zona del orificio del pasador, y una deformación máxima de 0,00002632 mm en la punta del diente, zona de mayor contacto con el terreno. Estos resultados indican un desempeño estructural adecuado del diente bajo condiciones exigentes de trabajo. Además, el análisis arrojó un factor de seguridad de 15, lo que sugiere una capacidad de carga muy superior a la exigida en operación, otorgando un amplio margen de resistencia. Se concluye que el diseño actual cumple con los estándares de durabilidad y eficiencia, aunque se recomiendan mejoras en las zonas críticas para aumentar aún más su vida útil. El uso de herramientas CAE permitió validar el modelo y establecer propuestas de optimización. Este tipo de análisis es esencial para garantizar el rendimiento y la fiabilidad de los componentes en aplicaciones de alto desgaste, como la excavación de suelos rocosos.

Palabras Clave: Dientes de corte, maquinaria pesada, excavadora, diseño mecánico.

Abstract

This study analyzed the structural behavior of the SYL-type cutting tooth used in Komatsu excavator buckets through computational simulations with Autodesk Inventor. Initially, technical information was collected on its geometry and the material used, a high-strength steel according to the manufacturer's specifications. The tooth was 3D modeled, applying severe loading conditions represented by a force of 100.5 N at the tip, and boundary conditions were established at the base and the pin hole. A detailed distribution of stresses and strains was obtained through the finite element method, with the maximum Von Mises stress value of 0.0519 MPa, located in the pin hole area, and a maximum strain of 0.00002632 mm at the tooth tip, the area of greatest contact with the ground. These results indicate adequate structural performance of the tooth under demanding working conditions. Furthermore, the analysis yielded a safety factor of 15, suggesting a load capacity far exceeding that required in operation, providing ample resistance. It is concluded that the current design meets durability and efficiency standards, although improvements in critical areas are recommended to further increase its service life. The use of CAE tools allowed the model to be validated and optimization proposals to be established. This type of analysis is essential to ensure the performance and reliability of components in high-wear applications, such as rocky soil excavation.

Keywords: Cutting teeth, heavy machinery, excavator, mechanical design.

Capítulo I

Problema de la Investigación

1.1. Tema de Investigación

Análisis del comportamiento estructural de diente de corte tipo SYL utilizado en cucharones de excavadoras a través de método de elementos finitos.

1.2. Planteamiento, Formulación y Sistematización del Problema

El presente estudio investigativo se enfoca en el análisis del comportamiento estructural del diente de corte tipo SYL utilizado en cucharones de excavadoras, utilizando de forma principal el Método de Elementos Finitos (MEF), lo que permite la evaluación de esfuerzos estructurales, deformaciones y distribución de carga con el fin de determinar la resistencia y durabilidad del componente bajo condiciones de operación real.

Los distintos tipos de dientes de corte son piezas críticas en los cucharones utilizados en excavadoras y en otro tipo de maquinaria pesada, ya que está sometido a fuerzas extremas durante el proceso de operación de funcionamiento paro con mayor influencia de carga en excavación. Un aspecto de suma importancia lo es su diseño y materiales con los que están elaborados por lo que influyen directamente en la eficiencia y costos de operación en este tipo de maquinaria. La aplicación del MEF permite predecir su comportamiento mecánico y optimizar su diseño, lo cual en la actualidad se lo realiza con la ayuda de programas computacionales.

Uno de los factores importantes es la durabilidad y eficiencia de los dientes de corte del tipo SYL en los cucharones de excavadoras representan un gran desafío en lo concerniente a la industria de maquinaria pesada. Estos elementos se encuentran constantemente sometidos a condiciones de trabajo severos y extremo, lo que provoca un desgaste altamente acelerado y provocando de forma constante posibles fallas estructurales tanto del elemento como de su mecanismo. Ante esta problemática, el presente proyecto investigativo se basa en determinar

las principales causas de deterioro por su operación de funcionamiento y evaluar posibles soluciones que permitan optimizar su diseño y alargar su vida útil.

1.2.1. Planteamiento del Problema

Estos eslabones mecánicos denominados dientes de corte tipo SYL instalados en cucharones de excavadoras están sometidos a condiciones operativas severas, lo que produce que se generen desgastes acelerados en su estructura y una posible falla estructural prematura. La deficiencia de estudios detallados por parte de departamentos de estudio científico sobre la distribución de esfuerzos y deformaciones limita mucho la optimización de su diseño y la constante mejora en su vida útil. Por lo que es de suma importancia el analizar su comportamiento mecánico mediante el Método de Elementos Finitos para de esta forma identificar cada uno de los puntos críticos de fatiga y desgaste de este tipo de dientes de cucharón, permitiendo así desarrollar estrategias de optimización que contribuyan a mejorar significativamente su durabilidad y eficiencia en operaciones de excavación.

1.2.2. Formulación del Problema

¿Cuál es la distribución de esfuerzos bajo cargas severas y deformaciones generadas en el diente de corte tipo SYL utilizado en cucharones de excavadoras y cómo afecta su rendimiento en la operación de excavación?

1.3. Sistematización del Problema

- ¿Cuáles son los factores principales que influyen en la fatiga del diente de corte del tipo SYL aplicado en cucharones de excavadoras?
- ¿Cómo afecta el diseño de la geometría del diente a su resistencia estructural?
- ¿Qué impacto tiene el tipo de material aplicado en este tipo de diente de corte en su vida útil?
- ¿De qué manera las condiciones de carga severa afectan el desgaste del diente de corte del tipo SYL?

- ¿Cómo varía la resistencia estructural del diente tipo SYL según las condiciones de operación durante su funcionamiento?

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. *Objetivo General*

- Analizar el comportamiento estructural del diente de corte tipo SYL utilizado en cucharones de excavadoras mediante el método de elementos finitos.

1.4.2. *Objetivos Específicos*

- Recopilar información sobre el diente de corte del tipo SYL aplicado a cucharones de excavadoras Komatsu, sus materiales y geometría.
- Simular tridimensionalmente el diente de corte tipo SYL por medio del programa computacional de Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE) Inventor de AutoDesk bajo condiciones severas de carga.
- Determinar el análisis de los resultados obtenidos en la simulación teniendo en cuenta cada uno de los puntos críticos y proponiendo mejoras en el diseño original.

1.5. Justificación y Delimitación de la Investigación

El estudio investigativo que se realiza del comportamiento estructural del diente de corte tipo SYL es fundamental para poder generar propuestas de optimización del diseño y también mejorar su durabilidad en el desempeño de excavadoras. Mediante el Método de Elementos Finitos, se pretende reducir significativamente costos operativos y de esta forma aumentar la eficiencia del desempeño de la maquinaria. El presente proyecto investigativo se enfoca en condiciones de carga específicas y de los materiales comúnmente utilizados en este tipo de elementos, proporcionando soluciones aplicables a la industria de maquinaria pesada, a continuación, se presentan algunos de los tipos de justificaciones que se requieren en este tipo de investigación:

1.5.1. Justificación Teórica

Por medio del presente estudio enfocado en el comportamiento estructural del diente de corte tipo SYL se fundamenta en cada una de las características mecánica de materiales y análisis de elementos finitos. Las ventajas que brinda la aplicación de este tipo de método es el de evaluar la distribución de esfuerzos y deformaciones en estructuras sometidas a condiciones de carga variablemente severas, facilitando la identificación de zonas críticas y desgaste. Además, la aplicación de este tipo de metodología de simulaciones computacionales en Autodesk Inventor permite optimizar el proceso de diseño de manera estratégica por parte de la fase de diseño, reduciendo costos y recursos experimentales. Para de esta forma generar las propuestas de mejoras técnicas en lo concerniente a la geometría y materiales del diente de corte tipo SYL.

A continuación, se puede apreciar algunos criterios científicos que aportan a este estudio investigativo:

Según (Coloma, 2017) indica que “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 200 HB”.

En el estudio de (Serna L. , Saldivar, Valderrama, García, & López, 2023) determinan que “la parte más crítica del cucharón es la unión entre el diente y la plancha, en el régimen estático se obtuvo un valor de 138.38 MPa, la deformación máxima fue de 3.578mm y un factor de seguridad de 4.98”.

Otro estudio investigativo como lo es el de (Lemache & Martinez, 2024) concluye que “El método DEM permite realizar un estudio dinámico más allegado a la realidad y los datos obtenidos como interactúa la cuchara de la retroexcavadora hidráulica con las partículas de tierra al momento de realizar su trabajo de minería”.

Finalmente (Cuyo, 2024) establece que “el comportamiento mecánico de una estructura sometida a cargas externas, para lo cual se considera conveniente seleccionar al estudio de la teoría de falla y al método de elementos finitos como medios más adecuados para abordar este fenómeno”.

1.5.2. Justificación Metodológica

Es de suma importancia aclarar que el uso del Método de Elementos Finitos (MEF) a través del programa computacional de Autodesk Inventor permite una generación del modelado, simulación y evaluación detallada del comportamiento estructural del diente de corte tipo SYL, aplicado normalmente en las excavadoras de la marca Komatsu, optimizando de forma técnica su diseño antes de la fabricación. Esta metodología brinda de manera significativa una alternativa eficiente y económica frente a pruebas físicas costosas con altos consumos de recursos y prolongadas. Autodesk Inventor facilita la simulación operacional de las cargas a que el elemento se encuentra sometido y las condiciones operativas reales, permitiendo visualizar su comportamiento por medio de una interfaz adecuada la distribución de esfuerzos y deformaciones. Es por este motivo que el enfoque metodológico basado en simulaciones computacionales del presente estudio investigativo garantiza resultados precisos y aplicables, contribuyendo a la mejora del diseño y vida útil del componente en aplicaciones de maquinaria pesada como lo son las excavadoras.

1.5.3. Justificación Práctica

Para la presente investigación el proceso práctico inicia con el modelado en 2D y 3D del diente de corte tipo SYL del cucharón de la excavadora Komatsu en el programa computacional de Autodesk Inventor, donde se definen sus características geométricas y propiedades del material con que está elaborado bajo características del fabricante. Posteriormente, se aplican condiciones de carga realistas y restricciones que simulan su entorno de trabajo.

Mediante el Método de Elementos Finitos, se procede al análisis de los esfuerzos y deformaciones en el diente de corte, identificando zonas críticas de fatiga y desgaste. Con cada uno de los resultados obtenidos por la simulación se procede a evaluar la eficiencia estructural del diseño actual y proponer modificaciones que optimicen su geometría, así como su rendimiento. Otro aspecto de suma importancia con la realización de este proyecto es el enfoque práctico el cual facilita la predicción del comportamiento del elemento sin necesidad de pruebas físicas extensas, reduciendo costos, recursos y tiempos de desarrollo. Así, la investigación proporciona información valiosa para mejorar la resistencia y durabilidad de este tipo de dientes de corte, beneficiando a la industria de maquinaria pesada mediante soluciones basadas en simulaciones computacionales precisas y aplicables.

1.5.4. Delimitación Temporal

El presente estudio investigativo se desarrolla en un periodo de 16 semanas, la cual se da inicio en la primera semana de mayo de 2025 y finalizando en la última semana de agosto de 2025. Durante este tiempo, se lleva a cabo cada una de las fases de recopilación de información, modelado del elemento hacer modelado, simulado, para luego la realización del análisis respectivo de los resultados arrojados por el proceso, para finalmente formular las respectivas conclusiones. Este marco temporal permite obtener un análisis detallado y validado, asegurando la calidad y precisión de los resultados obtenidos.

1.5.5. Delimitación Geográfica

Esta investigación se lleva a cabo en la Universidad Internacional del Ecuador, sede Guayaquil. En esta institución se dispondrá de los recursos tecnológicos (instalaciones, laboratorios y programa computacional) y académicos necesarios para la realización del modelado, simulaciones y análisis de resultados, garantizando un entorno adecuado para el desarrollo de presente proyecto.

1.5.6. Delimitación del Contenido

El presente proyecto investigativo se encuentra estructurado por fases las cuales contemplan desde la recopilación de información sobre los dientes de corte tipo SYL aplicados en cucharones de excavadoras Komatsu y sus materiales hasta la obtención de conclusiones basadas en los resultados del análisis estructural. Se inicia como fase inicial con una revisión bibliográfica de los principios mecánicos técnicos y el Método de Elementos Finitos. Luego, se procede al desarrollo del modelado tridimensional del diente en Autodesk Inventor y se realiza su respectiva simulación bajo diferentes condiciones de carga teniendo en cuenta la máxima carga de acuerdo con lo establecido los estudios que se han realizado y por medio de modelos matemáticos. Posteriormente, se analiza cada uno de los esfuerzos y deformaciones obtenidos en la simulación para identificar zonas críticas de desgaste y posibles mejoras en el diseño original. Finalmente, los hallazgos se interpretan y se formulan conclusiones sobre la posible optimización del componente, proporcionando recomendaciones para su mejora y aplicación en la industria de maquinaria pesada.

1.6. Alcance

Con respecto al alcance de este estudio investigativo se centra básicamente en el análisis estructural de un tipo de diente de corte del tipo SYL utilizado normalmente en cucharones de excavadoras, a través de la aplicación del Método de Elementos Finitos por medio del programa computacional Autodesk Inventor. La investigación pretende abarcar desde la recopilación de información técnica correcta y selección del tipo de modelo a estudiar, hasta lograr la simulación de cargas a las que en la vida real está expuesto el presente elemento y evaluación de resultados obtenidos de la simulación. Se pretende identificar de manera clara y precisa cada una de las zonas críticas de esfuerzo, deformaciones generadas en su estructura y posibles fallas estructurales que se pueden generar para de esta manera poder optimizar el diseño y mejorar la resistencia del diente de corte del tipo SYL. Este estudio no contempla pruebas físicas en campo

ni la fabricación del prototipo de manera física, enfocándose únicamente en la validación virtual de su comportamiento mecánico bajo condiciones de cargas máximas simuladas. Los resultados buscan aportar al conocimiento teórico de ingeniería mecánica automotriz y servir como base para futuras investigaciones orientadas al diseño más eficiente y durable de componentes utilizados en maquinaria pesada de excavación.

Capítulo II

Marco Referencial

Uno de los factores fundamentales para el presente trabajo investigativo lo es el marco conceptual en el cual se establecen las bases teóricas necesarias para analizar el comportamiento estructural del diente de corte tipo SYL en cucharones de excavadoras de la marca Komatsu. Así mismo se procede abordar conceptos fundamentales de mecánica de materiales, resistencia de materiales y el Método de Elementos Finitos (MEF), los cuales permiten comprender la distribución de esfuerzos y deformaciones en el componente en ser simulados y analizados. Adicionalmente, se explorarán estudios referenciales previos o información técnica la cual ayuda a la optimización de diseños y selección de materiales en dientes aplicados en cucharones de excavadoras. Este marco conceptual servirá como referencia para la generación del modelado, simulación y análisis de resultados en Autodesk Inventor.

2.1. Análisis Estructural en Maquinaria Pesada

Conceptualmente según (Molina, 2021) establece que “el análisis estructural es una rama de la ingeniería que se ocupa del cálculo de la respuesta (reacciones, campos de fuerzas internas (o esfuerzos) y desplazamientos (o deformaciones)) de estructuras, ya sea estáticamente determinadas o indeterminadas”.

Pero cuando se trata el estudio en maquinaria pesada como se puede apreciar en la figura 1, el análisis estructural es fundamental para garantizar la eficiencia y durabilidad de cada uno de los componentes sometidos a condiciones extremas de carga, sus mecanismos y sistemas. En este contexto, herramientas que se aplican a este tipo de estudio está el Método de Elementos Finitos (MEF) el cual permite predecir el comportamiento estructural de los componentes estructurales bajo diferentes escenarios operativos, optimizando su diseño y minimizando fallas.

Figura 1

Maquinaria Pesada – Excavadora Komatsu



Fuente: (Komatsu, 2015)

Los dientes de corte utilizados en cucharones de excavadoras son elementos críticos en condiciones de trabajo severo en la industria de la construcción y minería, ya que están expuestos a impactos, abrasión y fatiga mecánica.

Al momento de evaluar su resistencia y mejorar su diseño mediante simulaciones computacionales contribuye significativamente a extender su vida útil y reducir costos operativos.

Este estudio se enfoca en el análisis de estos componentes utilizando Autodesk Inventor, permitiendo identificar zonas críticas y realizar mejoras estructurales basadas en los resultados obtenidos.

2.1.1. Importancia del Análisis Estructural en Componentes de Maquinaria Pesada

Como se observa en la figura 2, al ser equipos de trabajo severo, el análisis estructural en componentes de maquinaria pesada es de suma importancia para garantizar de esta manera su rendimiento, seguridad y durabilidad de cada uno de los elementos o mecanismos. Estas

máquinas operan en condiciones extremas de trabajo, sometidas a cargas dinámicas, impactos y desgaste constante que comprometen a cada uno de sus elementos. El realizar un estudio como el que se realiza en la presente investigación se detalla los esfuerzos y deformaciones lo cual permite predecir fallas y optimizar el diseño para mejorar la resistencia y eficiencia operativa.

Figura 2

Dientes de Corte en Cucharón de Excavadora



Fuente: (Ningbo SanJin, 2022)

El uso de herramientas de alta eficiencia y actualizada como el Método de Elementos Finitos facilita considerablemente la simulación de diferentes escenarios de trabajo del elemento en análisis, permitiendo evaluar la distribución de esfuerzos y minimizar puntos críticos de fatiga. Esto contribuye a reducir significativamente costos de mantenimiento y prolongar la vida útil de los componentes.

En el caso de los distintos tipos de dientes de corte aplicados en cucharones de excavadoras, el adecuado análisis estructural permite mejorar significativamente su geometría y selección de materiales, garantizando de esta manera un desempeño óptimo en aplicaciones

diversas como lo es la agricultura y en casos más severos como la minería y áreas de la construcción.

2.1.2. Aplicación del Método de Elementos Finitos

Según (Fornons, 1982) indica que “Para resolver problemas de análisis de comportamiento lineal estático y dinámico de las estructuras continuas sometidas a acciones diversas con finitos grados de libertad es necesario estudiar un modelo matemático de estructura dividida en partes pequeñas denominadas elementos finitos”

En este tipo de investigación el método de elementos finitos es una herramienta fundamental para el estudio de análisis estructural de dientes de corte utilizados en maquinaria pesada y sobre todo en cucharones de excavadoras. A través de este método, es posible realizar operaciones matemáticas de difícil solución de forma tradicional al descomponer la geometría compleja de los dientes en elementos más pequeños, permitiendo de esta forma evaluar la distribución de esfuerzos, deformaciones y zonas críticas de fatiga de manera precisa y con un alto nivel de exactitud.

La aplicación de programas computacionales como el caso de Autodesk Inventor, según (Vera & Peralta, 2017) facilita de manera significativa la simulación de cargas reales a las que están sometidos este tipo de elementos, optimizando su diseño y seleccionando o determinando el tipo de materiales. Con este proceso de análisis permite mejorar significativamente la resistencia y prolongar la vida útil de los dientes de corte aplicados en cucharones de excavadoras, reduciendo costos de mantenimiento y aumentando la eficiencia operativa en sectores como la minería y la construcción.

2.2. Mecánica de Materiales y Resistencia Estructural

Según (Carvera & Blanco, 2003) establece que “La resistencia de materiales es una disciplina que se basa en tres principios o hipótesis fundamentales: Principio de Rigidez, Principio de Superposición y Principio de Saint – Venant”

Basándose en la conceptualización la mecánica de materiales es una disciplina fundamental en la ingeniería estructural e industrial, ya que permite de manera exacta analizar el comportamiento de los materiales bajo diferentes tipos de carga a la que se encuentra sometido el elemento a realizar el estudio. En el caso de los dientes de corte utilizados en excavadoras o distintos tipos de maquinaria pesada, es fundamental poder comprender sus propiedades mecánicas para garantizar su resistencia y durabilidad.

Cada uno de los materiales comúnmente utilizados en este tipo de elementos estructurales incluyen aceros de alta resistencia y aleaciones con importantes tratamientos térmicos, diseñados estrictamente para soportar esfuerzos de tracción, compresión y flexión. Según (Álvarez, 2021), La resistencia estructural de los dientes de corte para cucharones de excavadoras depende de factores como la composición del material, el diseño geométrico y las condiciones de operación.

En lo concerniente al análisis de esfuerzos y deformaciones mediante el Método de Elementos Finitos admite evaluar la capacidad del material para soportar esfuerzos o cargas extremas y minimizar el riesgo de fracturas o desgaste prematuro del componente es estudio. Esto contribuye a optimizar su diseño y prolongar su vida útil en aplicaciones extremadamente exigentes como la minería y la construcción.

2.2.1. Propiedades Mecánicas de los Materiales Utilizados en Dientes de Corte

Normalmente los materiales utilizados en los dientes de corte aplicados en maquinaria pesada y sobre todo en excavadoras deben poseer adecuadas características mecánicas que les permitan resistir condiciones de trabajo extremas. En la figura 3 se puede apreciar las propiedades más relevantes las cuales se describen a continuación:

- Dureza: Garantiza la resistencia al desgaste y la abrasión, reduciendo la deformación superficial del diente

- Resistencia a la tracción y compresión: Es crucial para soportar fuerzas externas que normalmente está sometido un diente de corte sin fracturarse
- Resistencia a la fatiga: Es fundamental para de esta forma prolongar la vida útil ante cargas cíclicas repetitivas
- Tenacidad: Permite absorber impactos sin generar fallas frágiles

Los aceros aleados con tratamientos térmicos y recubrimientos especiales son comúnmente utilizados en dientes de corte aplicados en cucharones de excavadoras para optimizar estas propiedades. La evaluación de estas características mediante simulaciones con el Método de Elementos Finitos en programas computacionales como Autodesk Inventor permite identificar mejoras en su diseño y desempeño.

Figura 3

Propiedades Mecánicas



Fuente: (Cohidrex, 2020)

2.2.2. Tipos de Esfuerzos y Deformaciones en Componentes Sometidos a Carga

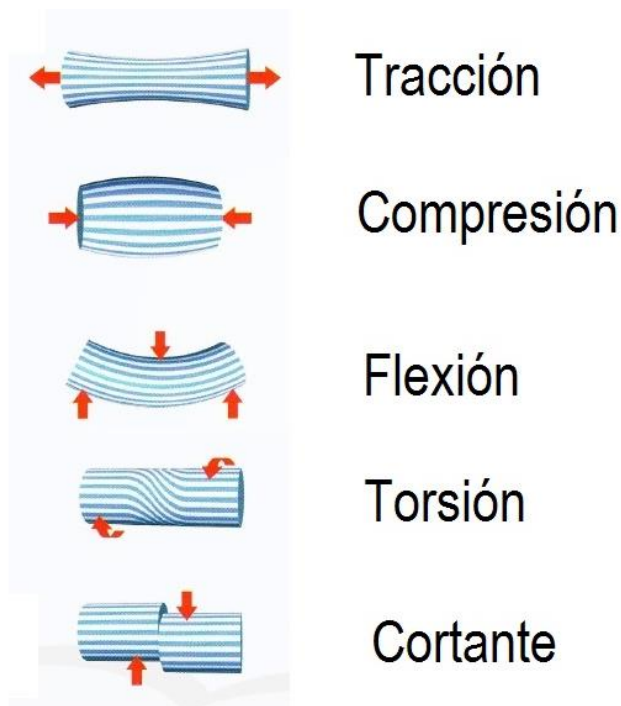
Los dientes de corte que se emplean en los cucharones de las excavadoras y otros tipos de maquinaria pesada están expuestos constantemente a diversas cargas durante su operación, lo que genera distintos tipos de cargas, esfuerzos y deformaciones que afectan de manera considerable a su desempeño y vida útil. Entre los principales efectos que se presentan están los siguientes y los que se ilustran en la figura 4:

- Esfuerzo de tracción: Ocurre cuando una carga o fuerza intenta alargar el material.

- Esfuerzo de compresión: Se produce cuando una carga empuja o comprime el material, reduciendo su longitud.
- Esfuerzo cortante: Se presenta cuando las fuerzas opuestas actúan en direcciones paralelas, generando deslizamiento en el material.
- Esfuerzo de flexión: Se manifiesta cuando una carga genera una curvatura en la estructura del componente.
- Esfuerzo de fatiga: Resulta de cargas cíclicas repetitivas que pueden causar fallas prematuras sobre el elemento.

Figura 4

Tipos de Esfuerzos



Fuente: (Cervilla, 2020)

El análisis mediante el método de elementos finitos permite identificar cada una de las zonas críticas donde estos esfuerzos se concentran (máximos y mínimos), facilitando el diseño de componentes más resistentes y duraderos.

2.3. Dientes de Corte en Cucharones de Excavadoras

Los dientes de corte son componentes esenciales en los cucharones de excavadoras como lo es en el caso del presente estudio del equipo de maquinaria pesada de la marca Komatsu, el cual ha sido diseñado para soportar condiciones extremas de trabajo sobre todo en minería y construcción. Fabricados normalmente en aceros aleados y materiales de alta resistencia, estos elementos están expuestos normalmente a desgaste abrasivo, grandes cargas de impactos y cargas repetitivas que pueden afectar su rendimiento y vida útil de manera significativa.

El diseño y la geometría de cada uno de los dientes de corte para cucharón de excavadoras varían de forma considerable según el tipo de material de la superficie a la cual se va a excavar y las condiciones de operación con la que cumple su función de excavación. Además, cada uno de los factores son de igual importancia como la calidad del material, el tratamiento térmico y los recubrimientos protectores influyen de manera significativa en la durabilidad del diente de corte. Un adecuado análisis estructural, mediante herramientas como el método de elementos finitos, permite optimizar su diseño y mejorar su desempeño, reduciendo costos de mantenimiento y aumentando la eficiencia operativa de este tipo de componente.

2.3.1. Tipos y Características de Dientes de Corte

Todos los dientes de corte utilizados en cucharones de excavadoras y otros tipos de accesorios pueden clasificarse según su diseño y aplicación. Entre los tipos más comunes en la marca Komatsu se encuentran los siguientes:

- Dientes de penetración: Diseñados básicamente para excavar terrenos del tipo compactos y suelos duros, con una forma puntiaguda que facilita la penetración adecuada en el material, este tipo de diente de corte se observa en la figura 5.

Figura 5

Diente de Penetración



Fuente: (Cohidrex, 2020)

- Dientes de desgaste: Utilizados sobre todo en aplicaciones donde la abrasión es sumamente elevada, este tipo de dientes cuentan con un mayor espesor y materiales resistentes, esto se puede observar en la figura 6.

Figura 6

Diente de Desgaste



Fuente: (Cohidrex, 2020)

- Dientes de uso general: Este tipo de dientes de corte combinan características tanto de penetración como resistencia al desgaste por el motivo que actualmente se realizan con materiales de alta innovación tecnológica en su proceso de fabricación, destacándose por su durabilidad y eficiencia prolongando significativamente su vida útil y durabilidad, mejorando de esta manera su productividad y rentabilidad, siendo estos los más adecuados para diferentes tipos de suelo, estos se pueden observar en la figura 7.

Figura 7

Diente de Uso General



Fuente: (Cohidrex, 2020)

- Dientes autoafilables: Su diseño es de suma importancia al ser un diente robusto e ideal para trabajos de máxima penetración y autoafilado por el motivo que permite mantener una punta afilada con el uso de forma continua, reduciendo la necesidad de mantenimiento, este tipo de diente brinda una excelente durabilidad y eficiencia garantizando una muy buena rentabilidad y productividad en condiciones de trabajo severo, como se puede observar en la figura 8.

Figura 8*Diente Autoafilable*

Fuente: (Cohidrex, 2020)

En definitiva, cada tipo de diente muestra características específicas en cuanto a su diseño de geometría, material y tratamiento térmico, lo que influye de forma significativa en su durabilidad y rendimiento. La correcta elección del tipo de diente de corte para el cucharón adecuado depende significativamente del tipo de material a excavar y de las condiciones operativas. Un análisis estructural es de alta importancia realizarlo mediante el Método de Elementos Finitos por lo que permite optimizar estos diseños, mejorando su eficiencia y prolongando su vida útil.

2.3.2. Factores que Afectan el Desgaste y Vida Útil de los Dientes de Corte

Al tomar en cuenta que el desgaste y la vida útil de los dientes de corte implementados en cucharones de excavadoras dependen de diversos factores que influyen directamente en su desempeño y resistencia. Entre los principales factores se encuentran:

- Tipo de material a ser excavado: En este factor contemplan los suelos compactos, con mucha dureza, rocas y materiales abrasivos lo cual acelera de manera considerable el desgaste.
- Calidad del material que se cuenta elaborado el diente: Entre estos se encuentran los aceros de alta resistencia y tratamientos térmicos los cuales mejoran la durabilidad de la punta del diente.
- Diseño y geometría del diente: En este factor influye de manera directa la forma optimizada del diente lo cual reduce de forma considerable la fricción y mejora la penetración en los distintos tipos de superficies a excavar.
- Condiciones de operación de la maquinaria u operador: Factores como la presión aplicada, velocidad de excavación y temperatura afectan de manera directa al tipo de desgaste del diente.
- Mantenimiento y reemplazo del juego de dientes de corte: El modo de uso y un mantenimiento adecuado prolonga de manera considerable la vida útil y previene fallas prematuras del diente de corte.

Por lo indicado con estos factores básicos el presente estudio contempla el análisis mediante el método de elementos finitos lo cual permite evaluar cada uno de estos factores, optimizando la selección de materiales del diente de corte SLY y su diseño estructural para mejorar su rendimiento y reducir recursos operativos.

2.4. Método de Elementos Finitos aplicado al Diseño de Dientes de Corte

El método de elementos finitos básicamente es una técnica fundamental para la realización del análisis estructural de componentes sometidos a cargas complejas y severas. En el caso de los dientes de corte instalados en cucharones de excavadoras, su aplicación permite evaluar de forma precisa la resistencia mecánica, distribución de esfuerzos y posibles fallas

bajo condiciones reales de operación por medio de simulaciones avanzadas en programas computacionales.

Por este motivo el programa computacional Autodesk Inventor ofrece herramientas avanzadas para modelado y simulación utilizando el método de elementos finitos. Este proceso se inicia con la creación de un modelo tridimensional de la geometría del diente de corte, al que se le asignan propiedades de material establecidos por el fabricante bajo tablas de propiedades y condiciones de carga a las que normalmente se encuentra sometido. Posteriormente, el programa computacional descompone la geometría en elementos finitos y resuelve ecuaciones de equilibrio para determinar esfuerzos, deformaciones y puntos críticos de fatiga.

Los resultados obtenidos luego de la simulación por parte de programa computacional permiten optimizar el diseño de los dientes de corte, ajustando su geometría y material bajo criterios del departamento o área de diseño para de esta forma mejorar la resistencia y prolongar su vida útil. Este enfoque lo que permite es reduce recursos operativos al minimizar el desgaste y las fallas prematuras del elemento en análisis. Además, la simulación en Autodesk Inventor facilita la comparación de distintos materiales y configuraciones, permitiendo la selección de la mejor alternativa para aplicaciones específicas del diente de corte.

2.4.1. Principios del Método de Elementos Finitos en Autodesk Inventor

Principalmente el método de elementos finitos en el programa computacional Autodesk Inventor se basa en la discretización del modelo en un sistema de mallado de elementos finitos, donde cada nodo y elemento interactúa mediante modelos de ecuaciones matemáticas para determinar básicamente tres factores importantes como lo son: esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad. El proceso inicia con la definición del material que para este caso es el del diente de corte, condiciones de contorno, restricciones y cargas aplicadas, seguido de la resolución numérica mediante métodos iterativos.

Este enfoque permite identificar cada una de las zonas críticas de los dientes de corte de excavadoras, optimizar su diseño y finalmente generar una propuesta de mejora en su desempeño en aplicaciones industriales.

La combinación del modelado tridimensional del diente de corte y simulación estructural en Autodesk Inventor facilita de manera considerable la evaluación de diferentes escenarios de carga, permitiendo al área de diseño ajustes en la geometría y selección de materiales para maximizar la durabilidad y eficiencia de los componentes mecánicos.

2.5. Cálculo de Esfuerzo que Soporta un Diente de Corte

Para la determinación del cálculo de la carga máxima que soporta un diente de corte utilizado en el desgarre de roca a través de una excavadora, se pueden utilizar algunos modelos matemáticos basados en la mecánica de materiales y la teoría de la resistencia estructural. Algunos de estos modelos matemáticos se presentan a continuación:

2.5.1. Esfuerzo Normal (σ)

Según (Díaz de León, González, Rosete, & Díaz de León, 2018) define que “El esfuerzo se expresa como la relación entre la carga aplicada y la sección transversal resistente del elemento”.

Ecuación 1

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde:

σ = es el esfuerzo normal (Pa o N/m²)

F = es la fuerza aplicada (N)

A = es el área de la sección transversal del diente (m²)

2.5.2. Esfuerzo Cortante (τ)

Según (Hibbeler, 2005) define “El esfuerzo cortante es la componente del esfuerzo que actúa en el plano del área seccionada”.

Ecuación 2

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Donde:

τ = es el esfuerzo normal (Pa o N/m²)

F = es la fuerza aplicada (N)

A = es el área de la sección transversal del diente (m²)

2.5.3. Fórmula de Flexión (Módulo de Resistencia) (σ)

Según (Hibbeler, 2005) indica que “Un diseño por flexión requiere la determinación del módulo de sección del elemento, que es la relación entre el momento flector y el módulo de resistencia a la flexión”, y su modelo matemático es el siguiente:

Ecuación 3

$$\sigma = \frac{M}{S}$$

Donde:

$\Sigma \sigma$ = Módulo de Resistencia

M = es el momento flector (N·m)

S = es el módulo de resistencia a la flexión (m³)

2.5.4. Criterio de Von Mises

Según (Serna J. , y otros, 2024) establece que “en tensiones normales y tangenciales, hay que recordar la tensión equivalente de Von Mises y tener en cuenta que, para vigas largas las tensiones normales son más importantes que las tangenciales, en general, determinarán la verdadera resistencia de la barra”, definiendo de esta manera el siguiente modelo matemático.

Ecuación 4

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2}$$

Donde, σ_v debe ser menor que el límite elástico del material para evitar falla plástica.

2.6. Materiales y Aleaciones más Utilizadas en Dientes de Corte

Los dientes de corte utilizados en cucharones de excavadoras están sometidos a condiciones extremas de trabajo, como lo son el impacto, abrasión y fatiga mecánica. Por ello, se fabrican con materiales de muy alta resistencia, principalmente aceros aleados y fundiciones especiales, entre los más utilizados se presentan los siguientes:

2.6.1. Aceros Aleados con Alto Contenido de Manganeso (*Hadfield - ASTM A128*)

Este tipo de aceros aleados con alto contenido de manganeso, son normalmente conocidos como Aceros Hadfield, los cuales son una clase de aceros que contienen entre 11% y 14% de manganeso, además de una pequeña cantidad de carbono (0.9% - 1.4%) y son normalmente utilizados en aplicaciones de alto impacto y desgaste.

Entre las propiedades físicas y mecánicas que posee este tipo de material se tiene la dureza inicial la cual está en un rango de 200 y 250 HB (Brinell), pero en condiciones de aumento del trabajo mecánico llega alcanzar los 550 HB, la resistencia a la tracción oscila entre los 850 a 100 MPa, una densidad aproximada de 7.85 g/cm³, posee un alto coeficiente de endurecimiento por deformación, lo cual se interpreta que entre más impacto recibe, más duro se vuelve el elemento, otro factor que posee es una buena tenacidad y resistencia al impacto lo cual mantiene su capacidad de absorción de energía sin fracturarse y finalmente posee una baja maquinabilidad por el motivo a su elevada tenacidad y endurecimiento en frío.

Las ventajas que brindan al fabricar los dientes de corte con este tipo de material son: alta resistencia al desgaste, larga vida útil en entornos de trabajo extremo, excelente tenacidad y sobre todo no es magnético.

Entre las aplicaciones están: Dientes de corte en excavadoras, rieles de vías férreas, mandíbulas, conos de trituradoras, revestimientos de molinos, cuchillas y componentes de maquinaria pesada.

Por lo tanto, el acero Hadfield es una opción ideal para la elaboración de este tipo de componentes sometidos a alto impacto y abrasión, ya que mejora significativamente su resistencia con el uso, reduciendo costos de mantenimiento y prolongando la vida útil de los dientes.

2.6.2. Aceros de Baja Aleación con Tratamientos Térmicos (ASTM A514, AISI 4140, 4340)

Este tipo de aceros de baja aleación, pero con tratamientos térmicos son aceros al carbono los cuales contienen pequeñas cantidades de elementos de aleación (menos del 5%) tales como níquel, cromo, molibdeno, manganeso y vanadio. Con este tipo de elementos permiten mejor las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción, la dureza y la tenacidad del diente de corte. Además, el tratamiento térmico optimiza de manera óptima su rendimiento estructural, haciéndolos ideales para aplicaciones que requieren alta resistencia al desgaste y a la fatiga.

Entre los tratamientos térmicos que se aplican en este tipo de elementos están el temple y revenido lo cual aumenta la dureza y tenacidad, el normalizado el cual refina la microestructura, mejorando resistencia y ductilidad del diente y finalmente el de cementación o nitruración lo cual brinda un endurecimiento superficial para mayor resistencia al desgaste de los dientes.

En lo correspondiente a las propiedades mecánicas estos poseen una dureza que va entre los 300 a 500 HB, brinda una resistencia a la tracción de 900 a 1300 MPa y finalmente posee una muy buena resistencia a la fatiga.

Las ventajas que brinda este tipo de material está el equilibrio entre dureza y tenacidad, la resistencia al desgaste y cargas dinámicas y finalmente una fácil maquinabilidad y soldabilidad al momento de fabricar los dientes de corte para excavadoras.

2.6.3. Fundiciones de Acero con Tratamiento Térmico (ASTM A148, AISI 8630)

Básicamente estos son materiales obtenidos mediante el proceso de la colada de acero líquido en moldes y sometidos posteriormente a procesos térmicos para mejorar significativamente sus propiedades mecánicas de los elementos a ser fabricados. Se utilizan en aplicaciones de alto impacto y desgaste, como los dientes de corte de excavadoras, debido a su combinación de resistencia, tenacidad y durabilidad.

En lo concerniente a que tipos de tratamientos térmicos son aplicados están los siguientes: temple, revenido y normalizado. Par lo que corresponde a las propiedades mecánicas se tiene que la dureza está en un rango de 280 a 450 HB, posee una resistencia a la tracción que está entre 800 y 1200 MPa y finalmente una alta resistencia a la compresión y al impacto.

Las ventajas que se obtiene con el uso de este tipo de material en la elaboración de dientes de cuchillas aplicados en cucharones de excavadoras se encuentran las siguientes: alta resistencia estructural, Bajo costo en comparación con aceros aleados complejos y finalmente la reducción de fracturas en trabajos de impacto.

2.6.4. Tendencias y Mejoras Actuales

En la actualidad el uso de revestimientos de carburo de tungsteno proporciona a los dientes de cortes de excavadoras una mayor resistencia a la abrasión, mientras que los nanocompuestos cerámicos incrementan la durabilidad y reducen el desgaste en dientes de corte. Además, los procesos actuales de endurecimiento por inducción mejoran considerablemente la resistencia superficial sin comprometer la tenacidad interna del material con el que se encuentra fabricado el componente. Estas innovaciones en materiales y tratamientos actuales optimizan el rendimiento de los dientes de corte, asegurando una mayor mejora de la eficiencia en la excavación de suelos duros y rocosos, prolongando de esta forma

la vida útil de los componentes, reduciendo costos de mantenimiento y mejorando la productividad en aplicaciones exigentes.

Capítulo III

Desarrollo Metodológico de la Investigación

En el desarrollo del presente capítulo se basa la parte práctica del estudio investigativo, enfocado en la generación del diseño, simulación y análisis estructural de un diente de corte del tipo SYL aplicado en excavadora, utilizando el programa computacional de Autodesk Inventor. Se inicia con una breve introducción técnica a los objetivos y herramientas empleadas en esta fase.

Así mismo en el desarrollo, se detalla cada paso del proceso de modelado tridimensional del diente de corte del cucharón del tipo SYL, basado en las dimensiones reales según las dimensiones originales y las propiedades mecánicas del material seleccionado. Luego, se describe la configuración de la simulación estructural del componente en estudio, incluyendo la aplicación de cargas representativas del trabajo real, sus secciones de restricción y la definición de condiciones de contorno necesarias para un análisis correcto.

Una vez preparado el modelado del diente en 3D, se ejecuta el análisis por medio del proceso de elementos finitos para evaluar la distribución de esfuerzos generados, deformaciones y zonas críticas a las que se encuentra sometido. Finalmente, se interpretan los resultados obtenidos en la simulación, valorando el comportamiento estructural del diente de corte, su factor de seguridad y su capacidad de resistencia ante condiciones exigentes de operación. Al concluir el presente capítulo la información obtenida permite extraer conclusiones prácticas sobre el desempeño del diseño propuesto.

3.1. Herramientas Tecnológicas

Uno de los aspectos de mayor importancia para el desarrollo del presente trabajo de investigación se procesa a emplear herramientas tecnológicas que permiten realizar análisis estructurales con un alto nivel de precisión en cuanto a exactitud de cálculos, destacando especialmente el uso del programa computacional Autodesk Inventor, la cual es una plataforma

de diseño asistido por computadora (CAD) que integra funciones avanzadas de generación del diseño en 2D, modelado 3D y simulación por el Método de Elementos Finitos (MEF).

La selección del programa computacional Autodesk Inventor se da ya que es la herramienta principal utilizada ya que permite la generación del diseño tridimensional del diente de corte tipo SYL, logrando representar de forma confiable su geometría real a partir de las dimensiones que poseen este tipo de partes bajo las especificaciones del fabricante, así mismo esta herramienta permita el ingreso de cargas a las que este tipo de componente está sometido en el trabajo real.

En lo concerniente a ingeniería asistida por un ordenador este tipo de herramienta permite la realización de la fase de simulación estructural del diente de corte, en el que se procede a utilizar el módulo de análisis por elementos finitos (FEA) de Autodesk Inventor, que divide y subdivide el modelado en una malla de pequeños elementos o conocidos técnicamente como nodos, esto permite calcular con mayor precisión los esfuerzos, deformaciones generadas y puntos de posible fatiga que se presenten. Esta herramienta permite observar el comportamiento del diente bajo cargas estáticas equivalentes, logrando resultados visuales claros que facilitaron la interpretación del rendimiento estructural.

Además, se emplearon recursos complementarios como bibliografía técnica en formato digital para respaldar criterios de selección de materiales y condiciones de carga.

Estas herramientas tecnológicas no solo permiten alcanzar un alto nivel de precisión del estudio investigativo, sino que también optimizaron tiempos de análisis y facilitando la toma de decisiones sobre mejoras estructurales. Con este tipo de aplicación demuestra la importancia del uso de tecnologías modernas en este tipo de proyectos de ingeniería, especialmente en el análisis de componentes sometidos a condiciones de operación extremas, como los dientes de corte en maquinaria pesada.

3.2. Modelado del Diente de Corte Tipo SYL

Para la realización del modelado del diente de corte tipo SYL constituye una etapa fundamental dentro del objetivo de la realización del análisis estructural mediante herramientas CAD. Este proceso permite representar con una alta precisión la geometría real de elemento en investigación, facilitando su análisis bajo condiciones de carga muy apegadas a los reales. A través del software Autodesk Inventor se construye un modelo bidimensional y tridimensional que incluye detalles de sus dimensiones físicas, propiedades del material y zonas críticas de esfuerzo, sentando las bases para realizar simulaciones estructurales que optimicen su diseño y prolonguen su vida útil.

Para la fase del modelado del diente de corte se procede a la aplicación de tres pasos fundamentales como lo son:

- Recolección de información geométrica y dimensional
- Diseño CAD tridimensional en Autodesk Inventor
- Definición del material y propiedades mecánicas

Los cuales se detallas a continuación:

3.2.1. Recolección de Información Geométrica y Dimensional

Para la recolección de información geométrica y dimensional del diente de corte tipo SYL en el presente proyecto se sustenta en la información técnica de la marca Komatsu en su catálogo de Herramientas de Corte para excavadoras la cual es esencial para crear un modelo preciso y confiable en el entorno CAD. Este catálogo brinda todas las medidas detalladas como tipo de cuchilla, forma, largo, ancho, espesor, ángulo de ataque, curvaturas y ubicación de zonas de acople.

En lo que se refiere al diente de corte SYL ("Standard Y Long") es uno de los tipos más utilizados en excavadoras de la marca Komatsu de la serie 30 para uso general de corte penetrante y durabilidad moderada. Estos dientes no tienen "punta afilada" como los "Tiger" ni

son tan robustos como los "Heavy Duty Abrasion" (HD). Se usan normalmente en trabajos de excavación en tierra, arcilla y materiales medianamente compactos.

Como se puede apreciar en la tabla 1, las medidas exactas de un diente SYL están establecidas dentro de un rango de diseño el cual puede variar bastante según el tipo de la máquina y el fabricante, por ejemplo, Caterpillar, Komatsu, Doosan, entre otras, sin embargo, para un modelo general de diente SYL, se podría considerar las dimensiones de la tabla 1 las cuales son para la marca Komatsu de la serie 30:

Tabla 1

Dimensiones de Diente de Corte STY de la Marca Komatsu Serie 30

Parámetro	Dimensión en mm
Largo total	400
Ancho en la base	150
Alto máximo	130
Espesor de paredes	30
Diámetro de pasador	40

Fuente: (Komatsu Diteca, 2018)

De manera general en su forma el fabricante indica lo siguiente:

- Visto de lado posee un perfil triangular suavizado, terminado en punta afilada
- Visto de arriba es ligeramente curvo, con la punta más estrecha
- La Base posee una forma trapezoidal con agujero de pasador en el medio o ligeramente desplazado

Otro aspecto técnico de mucha importancia lo son las características principales que brinda este tipo de diente de corte el cual se detalla a continuación:

- En seguridad posee un sistema que está diseñado para ser instalado sin golpes y limitar al mínimo los golpes para su extracción

- La ratio de consumo del mercado está alrededor del 40% pero en algunas marcas se alcanza hasta un 60% de ratio de consumo
- Para el pasador este es único el cual permite se reúse en varias ocasiones sin uso de herramientas especiales
- Autoafilado, con un diseño de este tipo de puntas que permite una excelente penetración y lo mejor es que se mantiene en el tiempo por su geometría la cual permite el autoafilado
- En cuanto a dureza posee un tratamiento térmico en la superficie del diente, así como en todo el interior de entre 477 y 532 en la escala Brinnell
- Ciclos cortos, el perfil del diente y el autoafilado permite menor presión hidráulica y ciclos de trabajo más cortos
- Brinda una instalación rápida el cual solo requiere de un dado hexagonal y un giro de 90° para instalar o desinstalar
- Diseño de punta reversible lo cual para determinadas operaciones produce desgastes desbalanceados en los dientes, este permite voltear los dientes lo cual ayuda a mejorar las ratios de consumo
- Finalmente, para el flujo de material el perfil del diente y del adaptador brinda un flujo adecuado del material

3.2.2. Diseño CAD Tridimensional en Autodesk Inventor

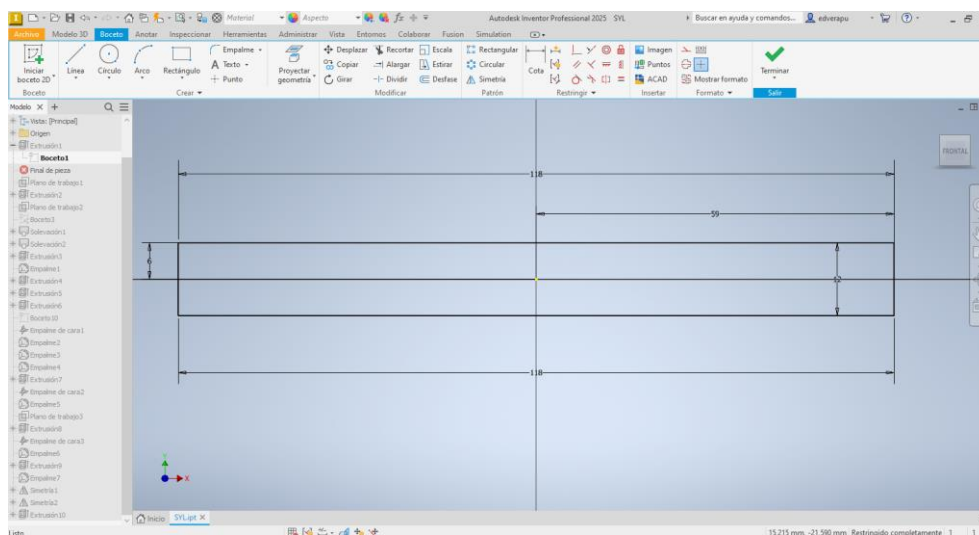
A través del programa Autodesk Inventor se procede a la realización del modelado tridimensional del diente de corte tipo SYL para excavadoras. Este software permite crear el modelo virtual detallado con alta precisión, a partir de dimensiones emitidas por el fabricante y parámetros geométricos específicos. Mediante esta herramienta avanzada en el área automotriz de modelado sólido, se procede a representar fielmente la forma, estructura y características del diente de corte.

Este modelo tridimensional no solo facilita la visualización y comprensión del diseño, sino que también sirve como base para realizar la simulación estructural, para luego realizar el análisis de los resultados obtenidos.

Con la selección del entorno de trabajo de AutoDesk Inventor, se procede a iniciar un nuevo proyecto con la selección de nueva pieza y el boceto en 2D como se puede observar en la figura 9, de esta forma se crea un boceto en dos dimensiones sobre un plano base que puede ser (XY, XZ o YZ), trazando el perfil lateral o frontal del diente según las dimensiones recopiladas.

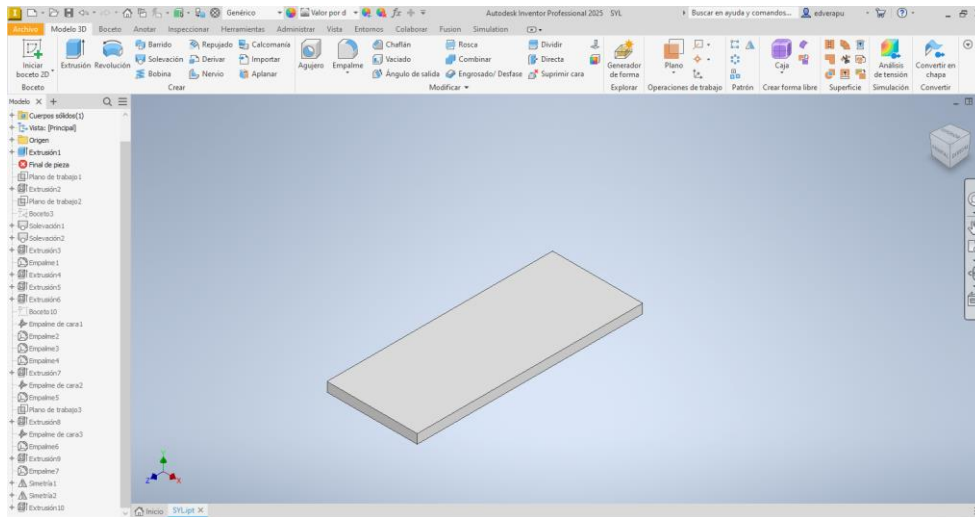
Figura 9

Inicio de Bocetaje de Diente de Corte 2D

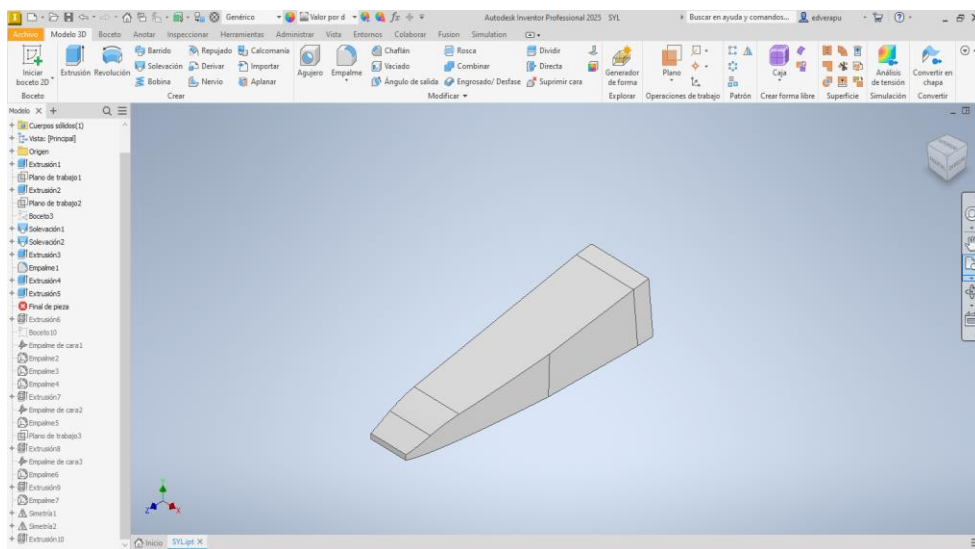


Luego se procede a asignar cada una de las cotas (dimensiones) y restricciones geométricas para definir con precisión la forma del boceto, cabe aclarar que este paso es muy importante por el motivo que en las siguientes etapas se requiere una estabilidad del modelado a generar.

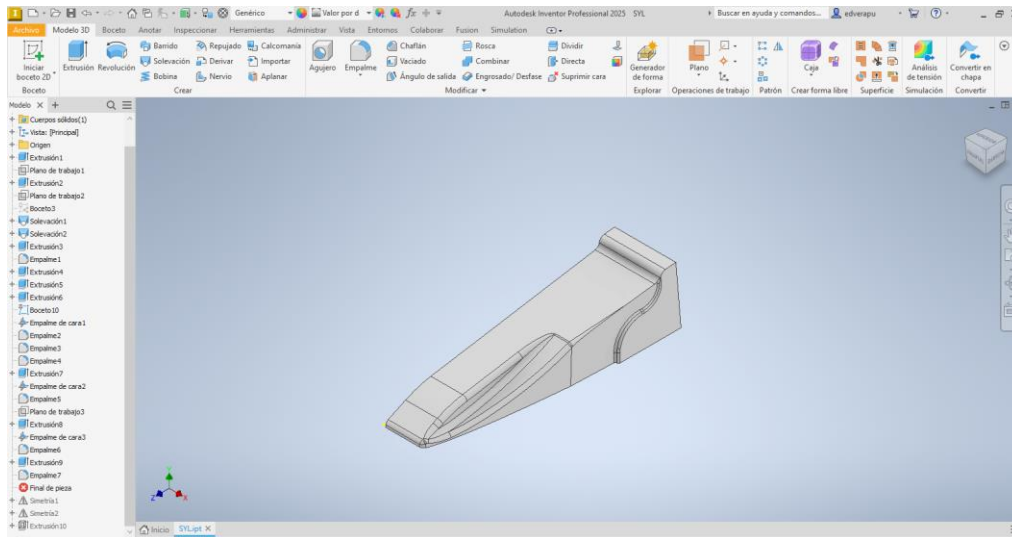
A partir del perfil 2D, se procede a utilizar la herramienta de extrusión para darle volumen, generando un sólido tridimensional básico del diente de corte, esto se muestra en la figura 10.

Figura 10*Aplicación de Herramienta de Extrusión*

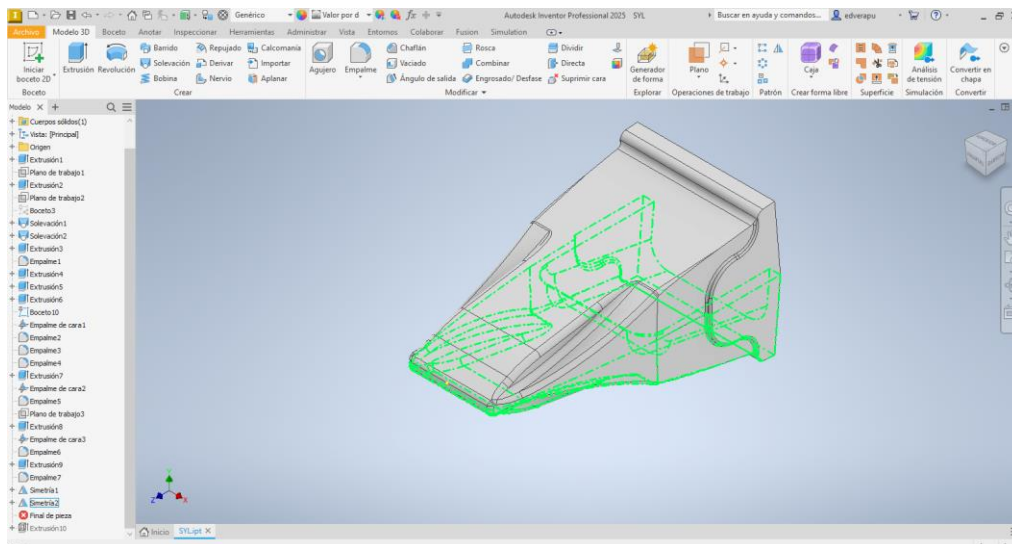
De acuerdo con el avance del modelado y al ver que el elemento es semi simétrico se procede a trabajar sobre un cuadrante del componente como se puede apreciar en la figura 11.

Figura 11*Modelado de Cuadrante de Diente de Corte*

Una vez creada esta base se procede al uso de ciertas herramientas para generar la forma tridimensional del diente de corte y entre las cuales están las siguientes: redondeos, cortes, chaflanes, como se puede apreciar en la figura 12.

Figura 12*Modelado Tridimensional del Cuadrante de Diente de Corte*

Una vez terminado del modelado del cuadrante se procede a generar una simetría del cuadrante como se muestra en la figura 13, esta replica de la geometría permite obtener el elemento completo.

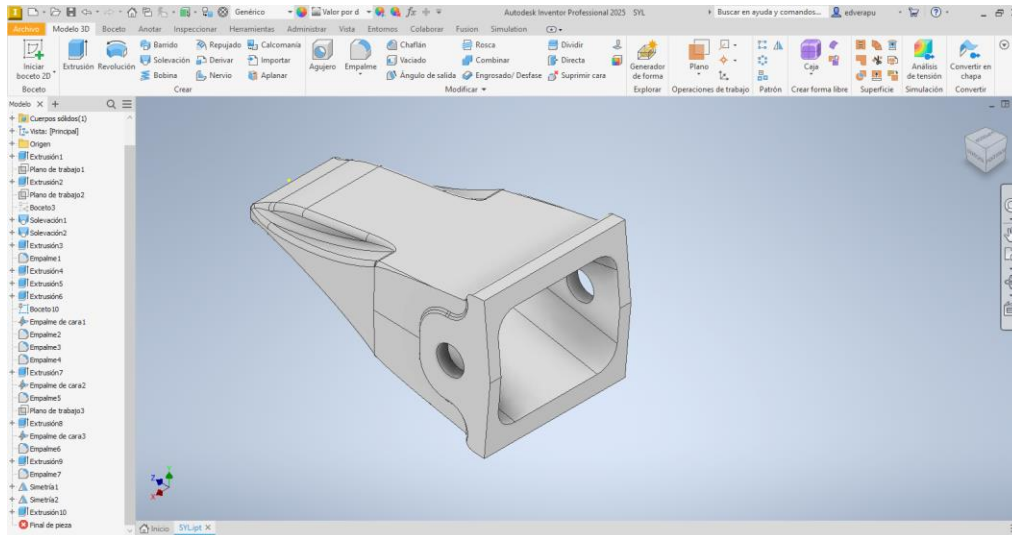
Figura 13*Réplica de Cuadrante de Diente de Corte*

Finalmente se procede a realizar el boceto y generación del orificio por donde para el pasador para el acoplamiento del diente de corte con su soporte, esto se puede apreciar en la figura 14, y de esta manera se finaliza con la fase de modelado del diente de corte, un aspecto

para tener en cuenta es que el archivo debe ser guardado con extensión (.ipt) para posteriormente poder realizar la fase del análisis estructural.

Figura 14

Obtención del Modelado de Diente de Corte



3.2.3. Definición del Material y Propiedades Mecánicas

De acuerdo con las especificaciones emitidas por (Komatsu Diteca, 2018) indica que los dientes de corte tipo SYL se encuentran elaborados con acero aleado de alta resistencia, específicamente formulado para que este tipo de elemento pueda soportar condiciones extremas de trabajo en minería y construcción. Este tipo de acero se somete normalmente a tratamientos térmicos de templado y revenido, lo que incrementa de manera considerable su dureza superficial y mejora la tenacidad interna. Este tipo de material garantiza una excelente resistencia al impacto, abrasión y fatiga mecánica. Entre las propiedades técnicas más importantes es que cumplen con los estándares de los fabricantes de equipos originales (OEM) de Komatsu, permite que el diente de corte asegure compatibilidad y durabilidad en operaciones severas. Este tipo de composición permite mantener el filo de corte por más tiempo y reducir los ciclos de reemplazo.

En la tabla 2 se puede apreciar alguna de las propiedades mecánicas que brinda este tipo de material al ser aplicado a dientes de corte para excavadoras.

Tabla 2*Propiedades Mecánicas de Diente de Corte de la Marca Komatsu*

Propiedades Mecánicas	Valor Aproximado	Unidad
Material base	Acero aleado tratado térmicamente	-
Dureza (Rockwell)	50 – 55 HRC	HRC
Resistencia a la tracción	1.300 – 1.500	MPa
Límite elástico	900 – 1.100	MPa
Tenacidad al impacto (Charpy)	≥ 20	J/cm ²
Densidad	7.85	g/cm ³

Fuente: (Komatsu Diteca, 2018)

Para poder determinar el valor del esfuerzo máximo a la que puede estar sometido un diente de corte de excavadora se lo determina por medio del siguiente modelo matemático, el cual para este estudio es basado en los valores emitidos por el fabricante de dientes de corte de la marca Komatsu.

Ecuación 5

$$F = \sigma_{adm} * A$$

Donde:

F = Carga máxima admisible [N]

 σ_{adm} = Esfuerzo admisible del material [Pa o N/m²] ≈ 670 MPaA = Área efectiva de contacto en la punta del diente [m²] ≈ 0.00015 m²

$$F = 670 \text{ MPa} * 0.00015 \text{ m}^2$$

$$F = 670000000 \text{ Pa} * 0.00015 \text{ m}^2$$

$$F = 100.5 \text{ N}$$

3.3. Configuración de la Simulación Estructural

Una vez obtenido el modelado del diente de corte en 3D se procede a determinar la configuración de la simulación estructural principalmente esto consiste en establecer las condiciones necesarias para analizar el comportamiento del diente de corte bajo cada una de las cargas operativas. Por medio de Autodesk Inventor, este proceso empieza por medio de la definición del material y sus propiedades mecánicas, seguido por la aplicación de cada una de las restricciones fijas en la base del diente para simular su sujeción al cucharón, las cuales son en la base de soporte del perno y las bases posteriores. Luego se aplica una carga en la punta, la cual representa el esfuerzo durante el trabajo de excavación aclarando que se toma en cuenta la simulación de un solo diente. Finalmente, se genera la malla de elementos finitos, y finalmente se ejecuta el análisis para obtener resultados de esfuerzos, deformaciones y coeficiente de seguridad.

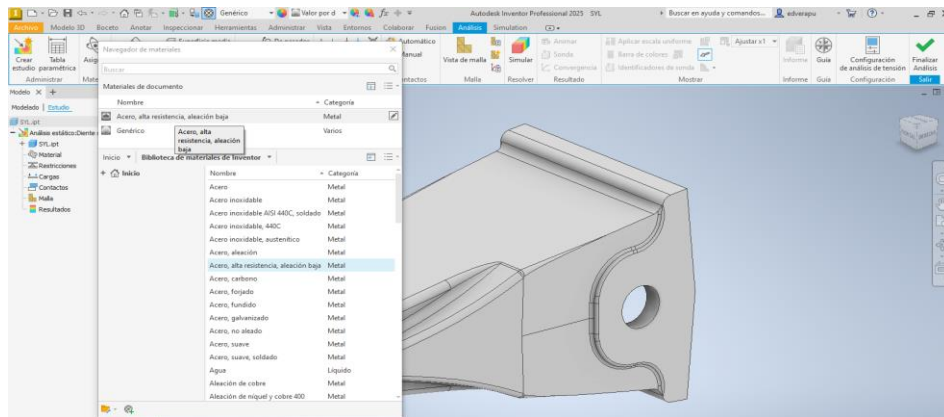
3.3.1. Asignación de Material en Diente de Corte

Para dar inicio al proceso de determinación de condiciones para la simulación se procede a la asignación del material sobre el modelado del diente de corte tipo SYL el cual se realiza con base en las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante como lo es (Komatsu Diteca, 2018), en este caso Komatsu. Según sus fichas técnicas, estas recomiendan el uso de acero de alta resistencia, específicamente acero aleado tratado térmicamente el cual presenta sus propiedades en la tabla 2, este tipo de material ofrece una excelente combinación de dureza, tenacidad y resistencia a la abrasión. En el programa computacional Autodesk Inventor, este material se selecciona desde la biblioteca de materiales con que cuenta el software, asegurando cada una de sus propiedades mecánicas principales como los son las siguientes: Módulo de elasticidad, límite elástico y dureza.

Cada una de estas propiedades deben ser coherentes con las condiciones reales de operación como se aprecia en la figura 15, para que de esta manera los resultados de la simulación sean lo más aproximados a las condiciones reales.

Figura 15

Designación de Material

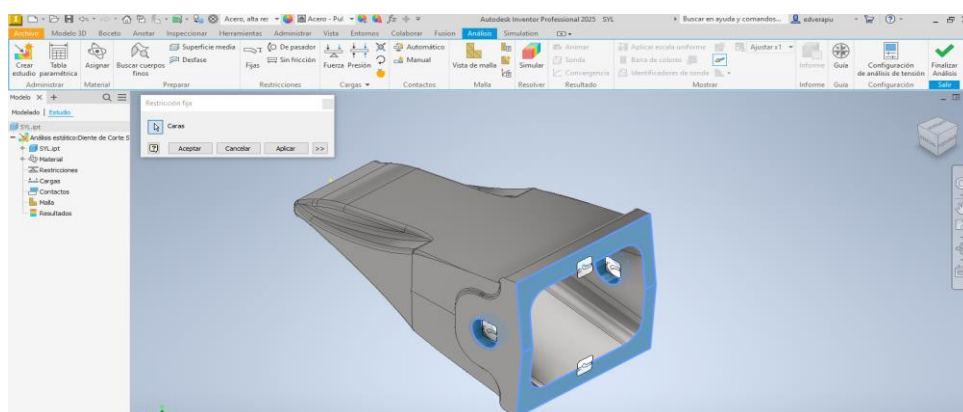


3.3.2. Asignación de Condiciones de Contorno

Continuando con el proceso se procede a la asignación de condiciones de contorno se realiza fijando el diente de corte en determinados puntos denominados estratégicos como el orificio del pasador y la base posterior del elemento, simulando de esta forma su conexión real al cucharón. Lo que se pretende con esta fijación es restringir el movimiento en esas zonas, permitiendo que las cargas aplicadas se distribuyan correctamente durante la simulación como se puede ver en la figura 16.

Figura 16

Condiciones de Contorno del Tipo Fija

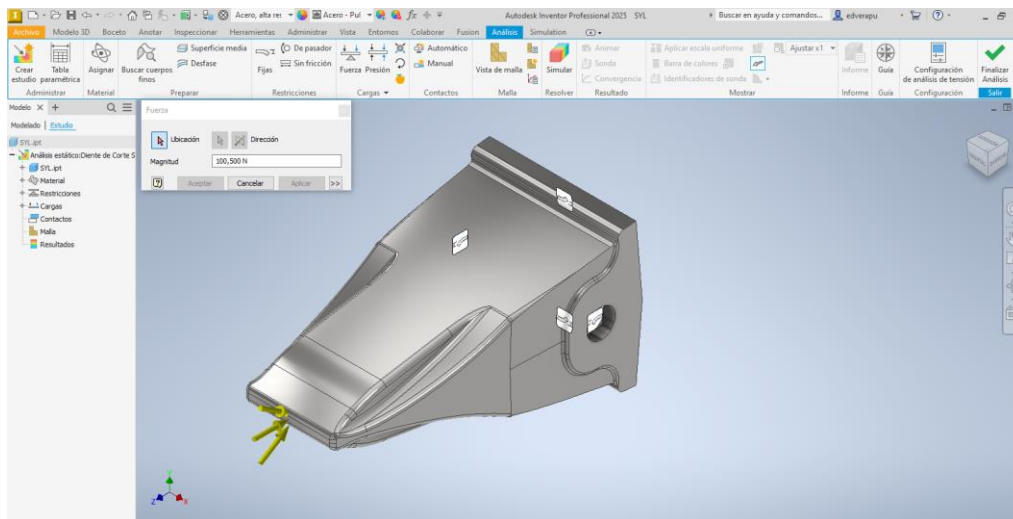


3.3.3. Aplicación de Cargas Representativas

Luego se procede a la aplicación de una carga representativa de 100,5 N en la sección de la punta del diente, replicando condiciones reales de trabajo severo, pero de consideración estática y con valores máximos de operación real. Esta carga se dirige en sentido longitudinal sobre la sección de geometría frontal, simulando el esfuerzo durante el desgarrar de materiales duros. Este paso permite analizar cómo se distribuyen los esfuerzos como se ve en la figura 17.

Figura 17

Condiciones de Carga



3.3.4. Generación del Mallado de Elementos Finitos

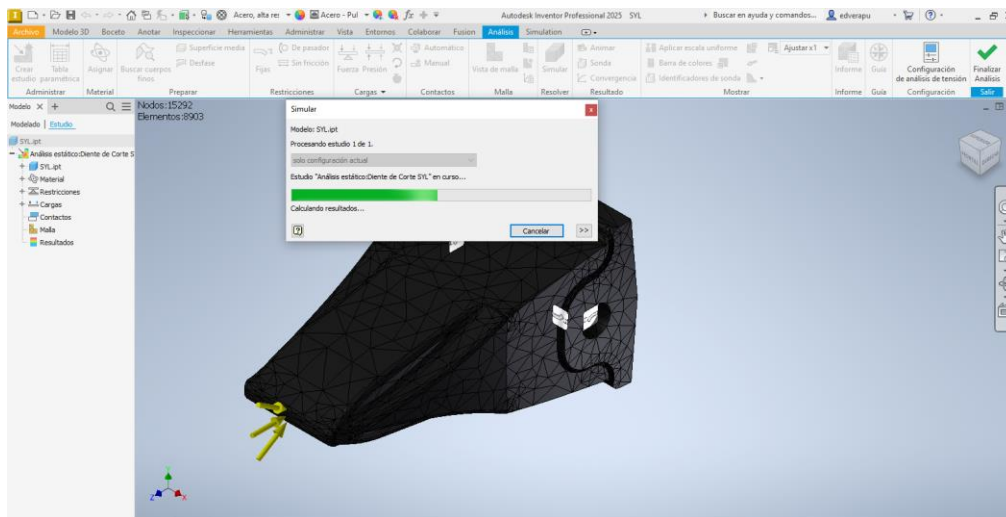
En esta parte del proceso se procede a la generación del mallado en Autodesk Inventor el cual consiste en dividir el modelo tridimensional del elemento en estudio como lo es el diente de corte en pequeños elementos conectados por nodos. Para el presente proyecto se aplica un mallado intermedio, por el motivo que ofrece un equilibrio entre precisión y tiempo de cálculo, además que depende también de las características del computador. Una consideración muy importante es el escoger un mallado correcto si se aplica con mayor número de nodos mejora la precisión del análisis, permitiendo detectar concentraciones de esfuerzo más detalladamente, pero se debe tener en cuentas que aumenta el uso de recursos como lo es el tiempo de procesamiento. Por el contrario, con la aplicación de una malla con menos nodos reduce el

tiempo de simulación, aunque puede comprometer la exactitud de los resultados obtenidos luego de la simulación. Este proceso es esencial para asegurar una correcta evaluación estructural y optimizar el diseño del componente sin exceder los recursos computacionales disponibles.

En la figura 18 se puede apreciar la aplicación del mallado sobre el diente de corte.

Figura 18

Proceso de Mallado



3.4. Ejecución del Análisis Estructural del Diente de Corte

La última fase del proceso de simulación del diente de corte es la ejecución del análisis estructural por medio del programa computacional Autodesk Inventor el cual consiste en resolver cada una de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del modelo tridimensional bajo las condiciones de carga y contorno definidas anteriormente. El programa computacional procede a calcular cada uno de los esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad, generando resultados visuales en una escala de colorimetría y numéricos con máximos y mínimos que permiten evaluar el desempeño del diente de corte y validar su diseño estructural.

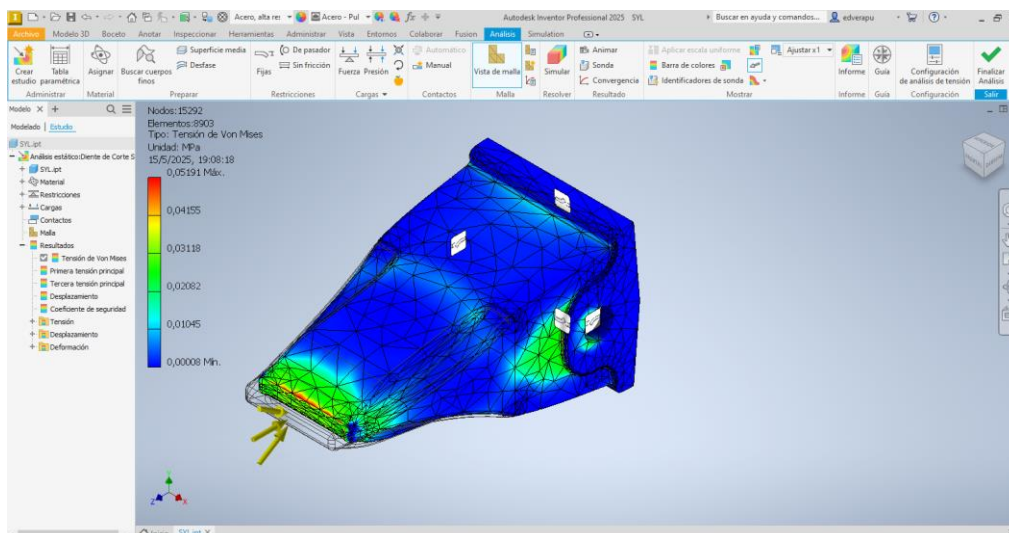
3.4.1. Visualización y Validación del Modelo Simulado

Una vez finalizado el proceso de simulación se procede a la visualización y validación del modelo bajo sus resultados obtenidos en Autodesk Inventor lo cual permite interpretar los resultados obtenidos tras el análisis estructural. A través de gráficos generados de esfuerzo, deformación y factor de seguridad, se identifican cada una de las zonas críticas donde el componente podría fallar bajo condiciones severas de carga. Para el caso del diente de corte tipo SYL utilizado en excavadoras, estas zonas suelen encontrarse en la punta y en la unión con la base donde se aloja el pasador. Con esta validación del modelo se verifica que los resultados sean coherentes con el comportamiento esperado del material, forma geométrica del elemento y las condiciones de operación. A continuación, se observa cada uno de los principales resultados obtenidos en la simulación.

En la figura 19 se puede apreciar el resultado de Tensión de Von Mises, el cual arrojó un valor mínimo de 0.00008 MPa y un máximo de 0.0519 MPa, concentrado principalmente en la zona frontal y del orificio donde se aloja el pasador. Esta área presenta una leve concentración de esfuerzos debido al ajuste y sujeción del diente de corte, aunque los valores se mantienen dentro de un rango seguro.

Figura 19

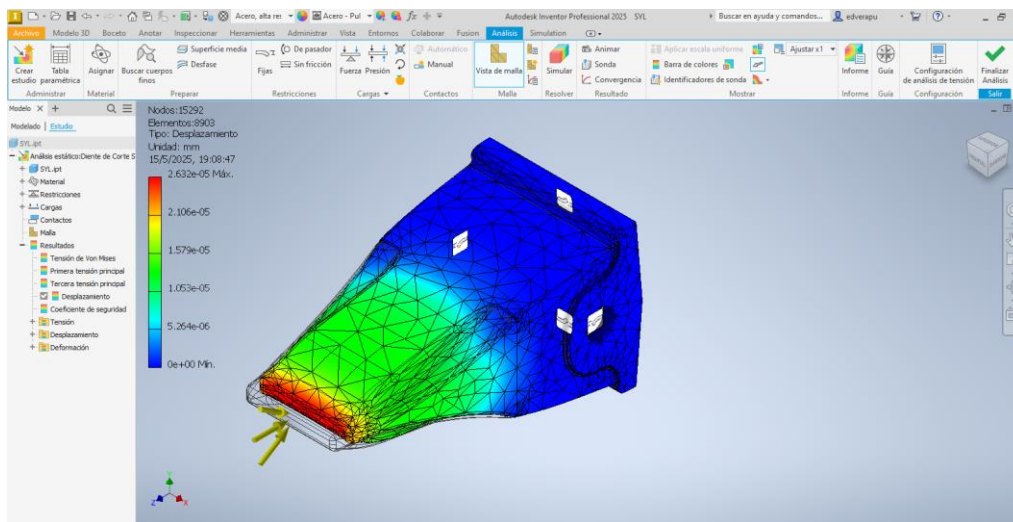
Resultados de Tensión de Von Mises



En la figura 20 se aprecia en cambio el resultado concerniente a la deformación en el cual en la punta del diente de corte correspondiente al área de contacto directo con la superficie a excavar donde se concentra el valor máximo de deformación que es de 0.00002632 mm y su valor mínimo es de 0.

Figura 20

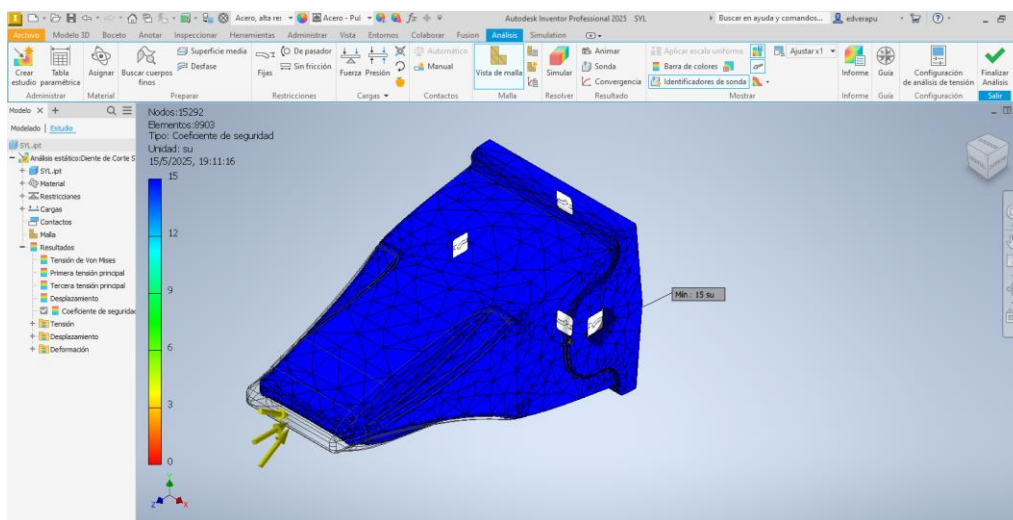
Resultados de Deformación



Finalmente, en la figura 21 se observa el resultado correspondiente al factor de seguridad el cual es de 15 en toda su estructura.

Figura 21

Resultados de Factor de Seguridad



Capítulo IV

Interpretación de Resultados

4.1. Distribución de Esfuerzos y Deformaciones

En este último capítulo del trabajo investigativo se procede a realizar el análisis estructural mediante el Método de Elementos Finitos aplicado al diente de corte tipo SYL para excavadoras en el cual se permitió identificar cada una de las distribuciones de esfuerzos y deformaciones a la que está sometido bajo condiciones simuladas de trabajo severo de acuerdo con información técnica de la marca. En los resultados obtenidos se destaca fundamentalmente el valor máximo de tensión equivalente de Von Mises el cual es de 0.0519 MPa, concentrado principalmente en dos zonas críticas: la punta del diente, que está en contacto directo con el terreno o material de desbaste y el orificio del pasador, zona de el acoplamiento estructural con el cucharón. Cabe tener en cuenta que estas áreas están sujetas normalmente a concentraciones de carga y transferencia de esfuerzos, lo que explica la acumulación de cada una de las tensiones.

Desde el punto de vista del comportamiento mecánico por parte del material, este valor se encuentra muy por debajo del límite elástico del acero de alta resistencia utilizado, lo que indica que el diente bajo estas condiciones trabaja dentro de su rango elástico sin comprometer su integridad estructural del diente de corte. Por lo tanto, no se espera presencia de plastificación o inicio de falla en las condiciones analizadas.

En cuanto a las deformaciones, el software arrojó como resultado un valor máximo de 0.00002632 mm en la punta del diente, siendo esta una región sometida a tracción y flexión debido al contacto con materiales de alta dureza durante la excavación. Esta mínima deformación confirma que la rigidez del diseño es adecuada y que no se presentan desplazamientos significativos que puedan afectar la eficiencia del corte o generar desalineación con otros componentes del sistema.

La distribución uniforme de esfuerzos en el resto del cuerpo del diente indica una geometría bien optimizada, lo que contribuye a la durabilidad del componente y su resistencia a la fatiga. En conjunto, los resultados sugieren que el diente puede operar de manera segura, eficiente y con bajo riesgo de falla estructural prematura.

4.2. Evaluación del Factor de Seguridad (FS)

En lo concerniente al resultado de factor de seguridad obtenido de un valor de 15 en el análisis estructural del diente de corte tipo SYL aplicado a excavadoras indica un comportamiento altamente confiable bajo las condiciones de carga simuladas según el fabricante. Este valor significa que el componente puede soportar hasta quince veces la carga aplicada antes de alcanzar el límite elástico del material lo cual está con una aceptación muy alta, lo cual proporciona un amplio margen de seguridad. Desde el punto de vista científico, cuando un componente posee un factor de seguridad tan elevado sugiere sobredimensionamiento, lo que puede implicar un exceso de material en su estructura y, por tanto, un mayor peso del componente y elevado costo. No obstante, en aplicaciones de excavación severa a las que normalmente está sometido este tipo de componente, este nivel de seguridad asegura alta durabilidad y resistencia a fallas inesperadas, especialmente frente a impactos o cargas dinámicas.

4.3. Discusión de los Resultados Obtenidos

La discusión de los resultados obtenidos en el presente estudio en lo que corresponde al análisis estructural del diente de corte tipo SYL para excavadora demuestra que el diseño propuesto presenta un comportamiento mecánico favorable frente a las condiciones de carga severas simuladas, pero bajo valores del fabricante. El valor máximo de tensión de Von Mises (0.0519 MPa) y la deformación máxima (0.00002632 mm) se ubicaron en la punta del diente y en el orificio del pasador, estas zonas se enfocan en presentar la mayor concentración en la

simulación por estar en contacto directo con el material excavado y los puntos de fijación con el cucharón de la excavadora.

Estos valores son considerablemente bajos en relación con la resistencia del material asignado el cual es el acero de alta resistencia, lo que confirma que no se alcanza a llegar a niveles críticos de esfuerzo ni deformación. El factor de seguridad de 15 refuerza esta conclusión, indicando una capacidad estructural robusta ante las solicitaciones aplicadas.

Desde un punto de vista técnico, los resultados sugieren que el diseño actual es eficiente y sobredimensionado, lo que, si bien proporciona alta seguridad. La correcta definición de condiciones de contorno, el uso de mallado adecuado y la asignación precisa de cargas y material fueron fundamentales para la obtención de resultados confiables.

En resumen, los resultados validan la eficacia del diseño bajo condiciones exigentes y sientan las bases para futuras optimizaciones orientadas a mejorar la eficiencia sin perder robustez.

Conclusiones

Por medio del presente trabajo investigativo se logró analizar satisfactoriamente el comportamiento estructural del diente de corte tipo SYL mediante el método de elementos finitos, evidenciando su alta resistencia ante condiciones de carga severa.

Se recopiló información técnica clave sobre el diente de corte tipo SYL de la marca Komatsu, incluyendo sus dimensiones de su geometría, así como del material utilizado en su fabricación, como lo es el acero de alta resistencia. Este material está caracterizado por su elevada dureza y resistencia a la abrasión, el cual es el ideal para condiciones de trabajo severas a la que están sometidos este tipo de componentes. Además, se detallaron sus propiedades mecánicas, fundamentales para la posterior simulación estructural, lo que permitió crear un modelo representativo y ajustado a la realidad.

Se desarrolló exitosamente la simulación tridimensional del diente de corte tipo SYL con la ayuda del programa computacional Autodesk Inventor. El modelo fue sometido a condiciones de simulación severas de carga, con una fuerza aplicada de 100,5 N en la punta del diente. A través del mallado intermedio y la asignación de propiedades mecánicas reales, se generó una simulación estructural que reprodujo fielmente el comportamiento del componente en uso real, permitiendo visualizar esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad.

Finalmente, a través del análisis de resultados reveló un valor máximo de tensión de Von Mises de 0.0519 MPa, ubicado en la zona del orificio del pasador, y una deformación máxima de 0.00002632 mm en la punta del diente, que es el área de contacto directo con el material a excavar. Estos valores, junto a un factor de seguridad de 15, demuestran que el diseño actual es estructuralmente seguro y sobredimensionado. Esto permite proponer como mejora una optimización del diseño para reducir peso o material sin afectar la resistencia, lo que podría contribuir a una mayor eficiencia operativa y económica del componente.

Recomendaciones

Luego de haber concluido este trabajo investigativo referente al análisis estructural del diente de corte SYL aplicado a excavadoras se presenta las siguientes recomendaciones:

Reforzar por medio de tratamientos técnicos la dureza de las zonas críticas identificadas, como la punta y el orificio del pasador, para mejorar su resistencia estructural.

Implementar materiales con mayor dureza y tenacidad, como aceros aleados mejorados, que incrementen la vida útil del componente en condiciones severas de excavación o cambio de otro tipo de diente al cucharón según el material a trabajar en el caso que este sea más duro que lo recomendado por el fabricante según su aplicación.

Realizar simulaciones periódicas bajo diferentes escenarios de carga para validar de esta manera el comportamiento estructural y anticipar posibles fallos antes de la fabricación de este tipo de componentes.

Bibliografía

- Álvarez, A. (2021). *Análisis Comparativo de Molduras que Influyen en la Eficiencia Aerodinámica Sobre un Chasis de Karting por Medio de Simulación Computacional*. Guayaquil: UIDE.
- Carvera, M., & Blanco, E. (2003). *Mecánica de estructuras - Libro 1 - Resistencia de Materiales*. Barcelona: EDICIONS UPC.
- Cervilla, A. (2020). *Estructuras vistas, ocultas e ilusorias - Lecciones de la historia en la obra de Mies Van Der Rohe*. Buenos Aires: cp67.
- Cohidrex. (19 de 5 de 2020). Obtenido de coidrex.com: <https://cohidrex.com/es/dientes-para-cazos-de-excavadoras>
- Coloma, S. (2017). *Simulación de recuperación por método de elementos finitos de cucharones para maquinaria de minería*. Riobamba: ESPOCH.
- Cuyo, R. (2024). *Diseño estructural de un cuello desmontable de un semiremolque tipo cama cuna de 45 toneladas de capacidad*. Cusco: UNSAAC.
- Díaz de León, V., González, V., Rosete, J., & Díaz de León, N. (2018). *Mecánica de Materiales - Teoría y aplicaciones*. México: Patria.
- Fornons, J. M. (1982). *El método de los elementos finitos en la ingeniería de estructuras*. Barcelona: U.P.B.
- Hibbeler, R. (2005). *Mecánica de Materiales*. Singapur: Pearson - Prentice Hall.
- Komatsu. (2015). *Excavadora hidráulica PC240LC-8*. USA: Komatsu.
- Komatsu Diteca. (2018). Puntas de excavadoras. En Komatsu, *Herramientas de corte para excavadoras* (págs. 1-18). Guayaquil: Kmax.
- Lemache, J., & Martinez, B. (2024). *Análisis mediante la simulación computacional utilizando el método de elementos discretos DEM para determinar la deformación de la cuchara de retroexcavadora*. Riobamba: ESPOCH.

Molina, J. (2021). *Análisis estructural - Métodos clásicos y matriciales*. Bogotá: ECOE.

Ningbo SanJin. (27 de 10 de 2022). Obtenido de nbsj-get.com:

<https://www.nbsjbucketteeth.com/>

Serna, J., Saldivar, N., Anticona, D., Garcia, M., Miranda, M., Oliva, C., & Serna, L. (2024).

Static and fatigue evaluation of the VOLVO EC460 excavator bucket using the finite element method. *Hybrid Event*, 17-19.

Serna, L., Saldivar, N., Valderrama, A., García, M., & López, M. (2023). Evaluación estática

y de fatiga del cucharón de excavadora VOLVO EC460 mediante el método de elementos finitos. *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 17-19.

Vera, E., & Peralta, D. (2017). *Propuesta de diseño ergonómico en butaca de vehículos*

monoplaza , para equipos ecuatorianos participantes de la Formula Student. Quito: UISEK.

