

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



“Evaluación de Recubrimientos AlCrO₃ y Al₂O₃ de Herramientas de Corte utilizadas en Procesos de Manufactura Skiving para la Generación de Dientes de Engranés Rectos.”

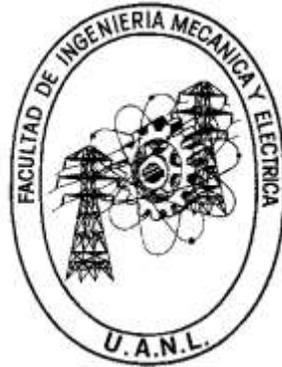
Por:
Aldo Omar González Escarpully

EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

Junio 2024

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



“Evaluación de Recubrimientos AlCroNa y Altensa de Herramientas de Corte utilizadas en Procesos de Manufactura Skiving para la Generación de Dientes de Engranés Rectos.”

Por:
Aldo Omar González Escarpully

EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

Junio 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Evaluación de Recubrimientos AlCrONa y Altensa de Herramientas de Corte utilizadas en Procesos de Manufactura Skiving para la Generación de Dientes de Engranés Rectos.", realizada por el estudiante Aldo Omar González Escarpully, con número de matrícula 1447765, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Jorge Adrián Aldaco Castañeda
Director

Dra. Flor Esthela Palomar Pérez
Co-director

Dra. Adriana Salas Zamarripa
Revisor

Dr. Diego Francisco Ledezma Ramírez
Revisor

MBA. Mario Alberto Cerda Muruaga
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 554502

Acta Núm. 4396

Ciudad Universitaria, a Julio 2024.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN **5**

CAPÍTULO I **6**

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	6
1.2 HIPÓTESIS.	11
1.3 OBJETIVO.	11
1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	11
1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO.	11

CAPÍTULO II **13**

2.1 COSTOS.	13
2.1.1 COSTOS INDIRECTOS.	14
2.1.2 COSTOS VARIABLES.	14
2.2 GASTO DE CATERPILLAR PLANTA 4 POR CADENA DE VALOR.	15
2.3 ANÁLISIS DE DEMANDA.	16

CAPÍTULO III **17**

3.1 INTRODUCCIÓN A LOS ENGRANES.	17
3.2 DISEÑO DE ENGRANES.	18
3.3 DESVIACIONES EN LA GEOMETRÍA DEL DIENTE.	21
3.4 TIPOS DE ENGRANES.	24
3.4.1 ENGRANES DE EJES PARALELOS	24
3.4.2 ENGRANES DE EJE CON INTERSECCIÓN.	25
3.5 MATERIALES EN ENGRANES.	27
3.5.1 METALES FERROSOS.	28
3.5.2 METALES NO FERROSOS Y ALEACIONES.	30
3.5 PROCESOS DE MANUFACTURA DE ENGRANES.	32
3.6 ENGRANAJES PARA MAQUINARIA.	37

CAPÍTULO IV **38**

4.1 REAFILADO DE CORTADORES.	38
-------------------------------------	-----------

4.2 DECAPADO DE HERRAMIENTAS.	41
4.3 APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTO POR DEPOSICIÓN FÍSICA EN LA FASE DE VAPOR (PVD).	43
4.4 RECUBRIMIENTO ALCRONA Y ALTENSA.	46
<u>CAPÍTULO V</u>	<u>50</u>
5.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.	50
5.2 ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.	53
5.3 DUREZA EN RECUBRIMIENTOS.	54
5.4 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.	56
<u>CAPÍTULO VI</u>	<u>57</u>
6.1 RESULTADOS.	57
6.2 DISCUSIÓN.	66
6.3 CONCLUSIÓN.	72
<u>RECOMENDACIONES.</u>	<u>73</u>
<u>GLOSARIO.</u>	<u>74</u>
<u>REFERENCIAS.</u>	<u>76</u>
<u>ÍNDICE DE FIGURAS.</u>	<u>79</u>
<u>ÍNDICE DE TABLAS.</u>	<u>82</u>
<u>APÉNDICE 1.</u>	<u>83</u>

Resumen

El arranque productivo de la planta 4 de Caterpillar en 2016, aunado a su meta de obtener ahorros en el segundo y tercer año, hizo que en Caterpillar se evaluaran financieramente los principales gastos de la planta durante el año 2019.

Los indicadores financieros arrojaron que uno de los principales gastos era el del reafilado de herramientas de corte utilizadas en los procesos de manufactura, entre esos procesos estaba el generado de dientes para engranes tipo rectos.

Para abordar esa área de oportunidad se estudiaron los diferentes tipos de proveedores en México con experiencia en reafilados de herramientas (cortadores), así como los recubrimientos de herramientas para aplicaciones de manufactura de engranes.

Estudiando las alternativas de recubrimientos actuales en el mercado y disponibles en México, se decidió analizar dos tipos de recubrimientos: Altensa y AlCroNa, ambos con base Aluminio – Cromo – Niquel, para evaluar su tiempo de vida, desempeño, propiedades, costo y estructura y así determinar el óptimo para la empresa.

Por motivos logísticos para entregas y recolección de cortadores, así como tiempos de entrega menores 15 días, se decidió analizar a Gleason y Starsu como proveedores del reafilado de cortadores, para evaluar su desempeño y costo, y así determinar el óptimo para la empresa.

La evaluación experimental de los recubrimientos aplicados y el desgaste de los cortadores afilados se hizo mediante microscopios y durómetros. Además, se analizaron los engranes producidos mediante máquinas especializadas en la inspección de engranes. Ese procedimiento experimental permitió obtener datos numéricos que sustentaron la elección del mejor recubrimiento y proceso de reafilado, así como la adquisición de conocimiento referente a cómo influyen las diferentes variables (dureza, espesor de capa y composición química del recubrimiento) en la duración de los cortadores.

Con lo anterior, se determinaron el recubrimiento y el proceso de reafilado óptimos de los cortadores en cuanto a lo financiero, pero también en la manufactura de los engranes; lo encontrado en este trabajo pudiera emplearse en el futuro en procesos similares de la planta.

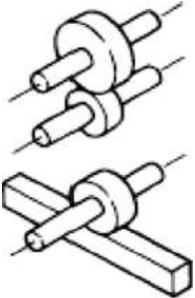
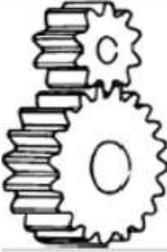
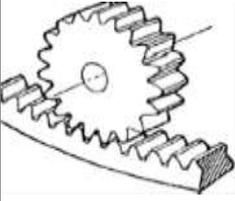
Capítulo I

1.1 Descripción del problema

Caterpillar planta 4 se encuentra dividida en 2 cadenas de valor, engranes tipo anillos y engranes tipo planetarios.

Estos tipos de engranes entran en una clasificación de engranes paralelos de tipo recto. Entre sus características principales es que son simples de diseñar y manufacturar a diferencia de otro tipo de engranes, que se pueden observar en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Principales categorías de engranes de eje paralelo [1].

Categorías de engranes (Basados en la orientación de su eje)	Tipos de engranes	Representación	Características, aplicaciones y métodos de manufactura.
	Engranes rectos. (Planetarios y anillos)		Características: simples de diseñar y manufacturar, máxima eficiencia, fácil de ensamblar, ofrece excelente precisión, alto desgaste y operación ruidosa. Aplicación: transmisión automotriz, manejo industrial, herramientas de maquinaria; motores y bombas; equipo de agricultura; instrumentos científicos, dispositivos electrónicos. Métodos de manufactura: hobeado, shaping, fresado, brochado, extrusión, estampado, metalurgia de polvos, forja, rolado, rectificado, lapeado.
	Engranes helicoidales		Características: resistentes, acción suave, operación silenciosa, ofrece buena precisión, complicaciones en empuje axial. Aplicación: transmisiones automotrices, componentes de alta velocidad y maquinas, robots, equipo de agricultura. Métodos de manufactura: hobeado, shaping, fresado, brochado, extrusión, estampado, metalurgia de polvos, forja, rolado, rectificado, lapeado.
	Piñón y rack		Características: eficiencia para convertir movimiento rotacional en lineal y viceversa. Aplicación: manejo de material, actuadores lineales, sistema de dirección asistida, herramientas de maquinaria, gantries viajeros, robots, sistemas de posicionamiento. Métodos de manufactura: fresado, shaping, brochado, fundición, rectificado, desbarbado y honeado.

En la industria son usados en partes de transmisiones para autos, herramientas para maquinarias, máquinas de extrusión y estampado, forjado, rolado, partes para máquinas CNC, rectificadoras, entre algunas otras aplicaciones. Los procesos de manufactura más utilizados para la elaboración de este tipo de productos son: hobbing, shaping, milling, grinding, shaving, Skiving, entre muchos otros más [1].

Para el caso específico de estudio de esta tesis, la aplicación de engranes de tipo anillo y planetario es en transmisiones y ejes para vehículos utilizados en la industria de la construcción.

En planta 4, estos engranes pasan por tres tipo de transformaciones, que son, maquinado verde, maquinado duro, tratamiento térmico y ejes (ensamble). Cada una de las transformaciones que sufre el producto son conocidas como cadenas de valor y representan un proceso a través del diagrama de flujo que se muestra en la Figura 1.1.



Figura 1.1. – Diagrama de flujo de procesos (cadenas de valor) de Caterpillar planta 4.

El análisis de los gastos de los centros de costos¹ que administra ingeniería de manufactura es de suma importancia para la generación de ahorros y hacer más eficientes los procesos.

Durante el 2019 el gasto en la cuenta de reafilado de cortadores, para los centros de costo de maquinado verde, representó un gasto aproximado de \$330, 000 USD, que equivale a un 13.8% de los gastos variables de toda la planta para la manufactura de engranes durante ese año [2].

La distribución porcentual de los gastos para reafilados en los diferentes centros de costos de maquinado verde se realizó de acuerdo a la Figura 1.2

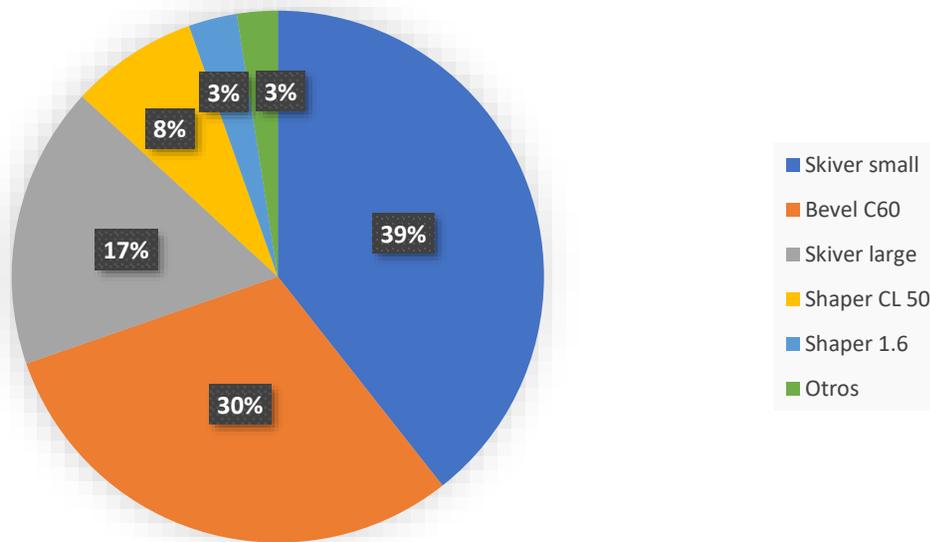


Figura 1.2. – Gráfica de pastel de los porcentajes de los gastos de reafilado 2019 para los diferentes procesos (centros de costo) de maquinado verde [2].

En la Figura 1.2 se puede apreciar que el 87% del gasto total anual para el reafilado de cortadores en el proceso de maquinado verde estuvo constituido por los procesos de Skiver Small (39%), C60 (30%) y Skiver Large (17%), a través de ellos se generan los dientes de los engranes en piezas desde 200 mm hasta 1000 mm de diámetro externo.

¹Centro de costos se puede referir también a un proceso específico, este nombre es utilizado para cuantificar su producción y gastos en el ámbito financiero.

Al analizar los gastos de la cuenta de reafilados durante el primer semestre del año 2020 (enero – junio 2020), se tuvo un gasto de \$116, 180 USD, que representó un 14.16% del gasto variable de toda la planta, lo que indicó una tendencia muy parecida a la del año anterior. Así la distribución de los gastos de reafilado en los diferentes centros de la cadena de valor² de maquinado verde se realizó de acuerdo a la Figura 1.3.

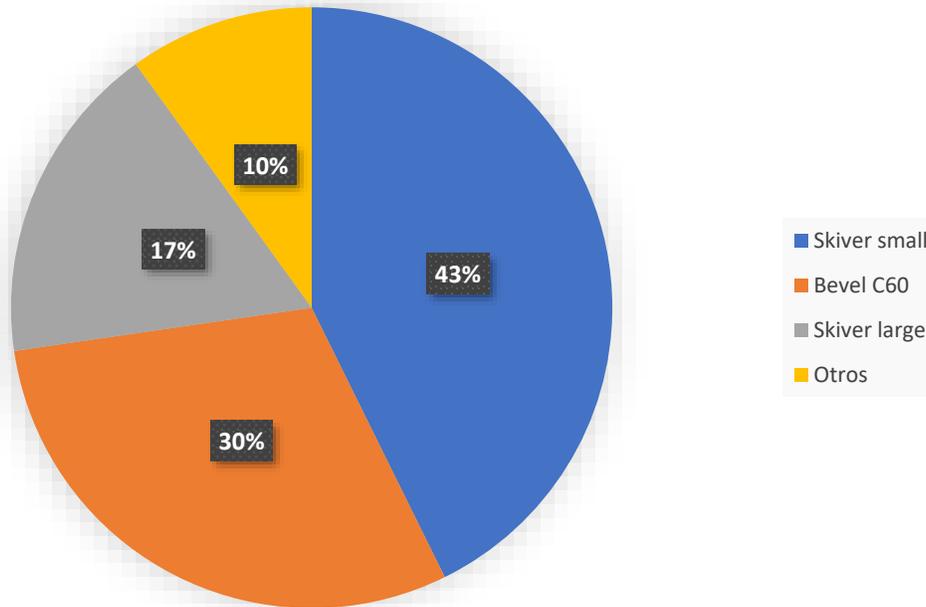


Figura 1.3. – Gráfica de pastel de los porcentajes de los gastos de afilado del primer semestre 2020 para los diferentes procesos (centros de costo) del maquinado verde [2].

Los centros de costos Skiver Small (43%), C60 (30.00%) y Skiver Large (17%), representaron un 90% del gasto en la cuenta de reafilados durante ese periodo del año.

Por encima del 50% de las horas base³ generadas en planta 4 se encuentran en los centros de costo de maquinado verde. Un 80% de los números de parte pasan por los centros de costos Skiver Small y Skiver Large, de ahí se desprende el objetivo general de este proyecto, la reducción de al menos un 10% de los gastos en las cuentas de reafilado para el segundo semestre del 2020.

²Una cadena de valor se refiere a una unidad de negocios que puede conformarse por varios procesos desde su etapa de transformación inicial hasta que el producto es entregado al cliente.

³Las horas base son la suma de los tiempos de cada uno de los procesos por los cuales la pieza sufre una transformación, incluyendo los tiempos de inventario.

El proceso Skiving es un proceso de manufactura que se utiliza para el generado de diente en engranes. Consta de una máquina de tipo CNC (Control Numérico por Computadora) con 5 ejes y un sistema semiautomático para carga y descarga de piezas. Dependiendo del tipo y el modelo de la máquina, el tamaño de piezas que estas máquinas pueden manufacturar puede variar, entre 300 mm y hasta 1000 mm de diámetro externo, y módulos⁴ desde 3 mm y hasta 12 mm, una representación de la máquina Power Skiver con sus 5 ejes, se muestra en la Figura 1.4.

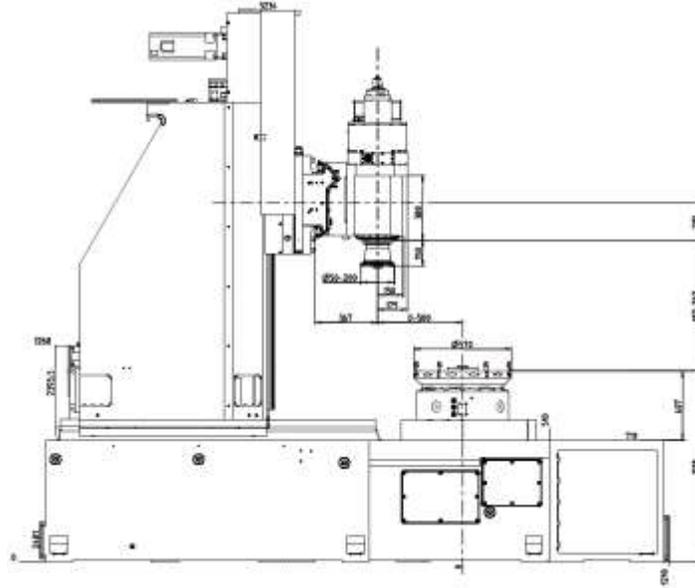


Figura 1.4. Imagen representativa de máquina CNC de 5 ejes que se utiliza en el proceso Skiving para generado de dientes.

El proceso Skiving aún es poco conocido en México y hay muy pocas empresas que realizan el proceso de generado de diente para engranes, por lo tanto son pocos los proveedores que cuentan con maquinaria y herramientas para poder afilar y recubrir los cortadores utilizados en estas máquinas para módulos superiores a 8 mm.

El proveedor Gleason, de quien se tiene la maquinaria para los procesos de Skiving, también es el proveedor que presta a Caterpillar el servicio de reafilado para cortadores, desde el arranque de las máquinas mencionadas en el año 2017.

Otro de los objetivos en esta investigación es generar alternativas para el recubrimiento y reafilado de cortadores cumpliendo las expectativas de calidad de las especificaciones de Caterpillar para la manufactura de sus engranes.

⁴El módulo en un engrane está definido por el radio de paso por el número de dientes del engrane y se expresa en milímetros [3].

1.2 Hipótesis.

Con base en la relación existente entre la composición, estructura, procesamiento y el desempeño/costo que presentan los materiales [4] se plantea que:

La variable de mayor influencia en la duración de los cortadores para los procesos de Skiving es el espesor de capa del recubrimiento, así como la dureza.

Relacionando los resultados de desgaste de los cortadores utilizados contra el tiempo de vida de éstas, y los acabados superficiales del producto final, se pueden llegar a obtener variables que también influyan en la duración de los cortadores.

1.3 Objetivo.

- Reducir los gastos en un 10% para el segundo semestre del 2020 en la cuenta de reafilado de cortadores (\$ 13, 000 USD).

1.3.1 Objetivos específicos.

- Desarrollar al menos un proveedor alternativo para el reafilado de cortadores.
- Igualar el desempeño de los cortadores en calidad y tiempo de vida con el proveedor desarrollado.
- Determinar la variable que representa el mayor impacto en el tiempo de vida del cortador.

1.4 Metodología de trabajo.

En el apéndice 1 se desglosa la metodología general 6 Sigma DMAIC que sigue Caterpillar y que se aplica en este trabajo. De ésta y del tetraedro de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales [4] se puede establecer, a priori, que la investigación de las características del recubrimiento (espesor, ligado con su desgaste y tiempo de vida, dureza y composición) de los cortadores y del acabado superficial del producto final pudieran dar claridad de las variables principales que influyen en la duración de los cortadores.

Las 5 etapas que se llevaron a cabo para el desarrollo de este trabajo fueron:

Definir, se analizó el historial de información para obtener los objetivos, el plan de acción y las actividades a ejecutar. En esta etapa se definió el proyecto y los tiempos de entrega de las actividades.

Medir, en esta etapa entró parte de la ejecución del proyecto, se tuvieron resultados de algunas pruebas y se ejecutaron otras más, en esta etapa se regresó a la parte de definir para agregar más actividades al proyecto.

Analizar, en esta etapa se concluyó con la fase de medición y pruebas, se analizaron los resultados de las pruebas realizadas y se obtuvieron algunas conclusiones, en esta etapa se regresó a los dos puntos anteriores para agregar más mediciones.

Mejorar, en esta etapa se obtuvieron las conclusiones, se regresó a la parte de medir para definir nuevas pruebas o complementos de las pruebas ya propuestas, si los objetivos que se plantearon al inicio no son resueltos o bien los resultados con las pruebas propuestas no son satisfactorios, habrá que proponer nuevas pruebas, nuevas mediciones o bien un nuevo análisis.

Controlar, en esta etapa el proyecto se concluyó, se definieron métodos de control con base en sistemas, por ejemplo, se agregaron inspecciones adicionales a planes de control, modificaciones a los análisis de modos de falla, se agregaron más controles de calidad en el proceso, se cambiaron de equipos de medición y se eliminaron mediciones con el uso de la estadística.

Capítulo II

2.1 Costos.

El costo en una empresa representa el efectivo que dicha empresa destina para la manufactura de sus productos y que aportan un beneficio presente o futuro [5].

Un sistema de administración de costos es necesario en cualquier empresa principalmente para:

- Realizar el costeo de productos.
- La planeación financiera de la empresa.
- La toma de decisiones financieras.

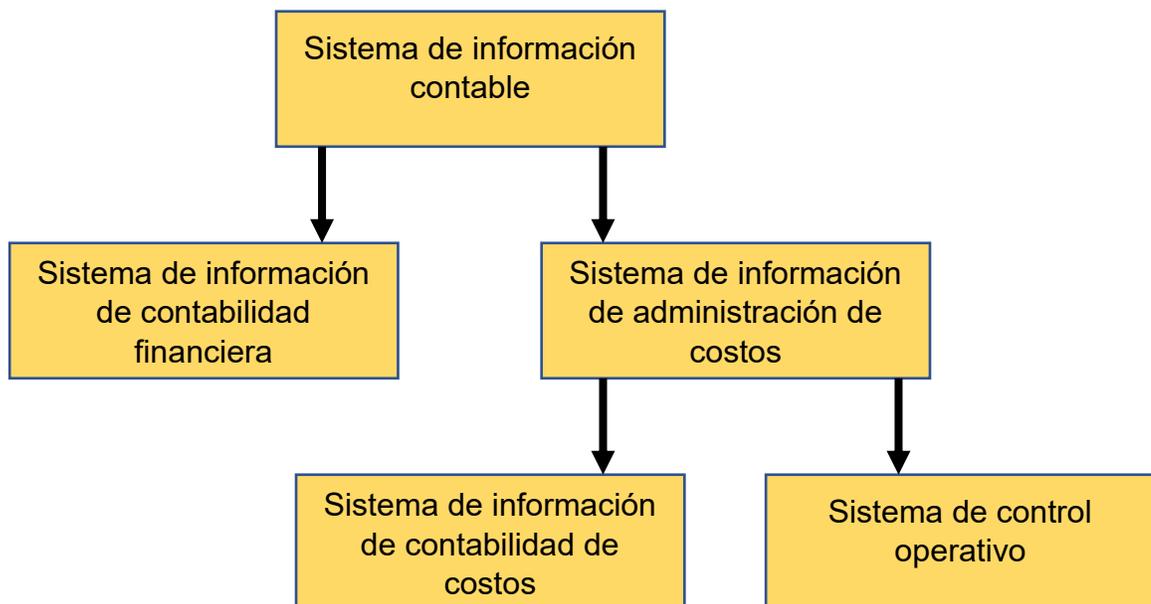


Figura 2.1 – Relevancia de un sistema de información contable y de administración de costos en una empresa [5].

Dichos sistemas de administración son necesarios para el cálculo del costo de los productos que se comercializan y puede ser de manera interna (clientes internos u otras plantas de Caterpillar) o de manera externa (clientes externos o ajenos a Caterpillar) como se observa en la figura 2.1.

El producto tangible, como en este caso, un engrane fabricado en planta 4 está calculado a través de la conversión de materias primas (material directo), mano de obra y bienes de capital, este último se refiere al uso del terreno, herramientas, herramientas e insumos necesarios para la transformación directa del producto [6].

Los insumos necesarios, en este caso el servicio de reafilado de cortadores, impactan directamente en el cálculo del costo de cierta familia de productos manufacturados en Caterpillar planta 4. En el caso del estudio de esta tesis, uno de los impactos para la empresa sería la reducción del gasto en la cuenta de servicios de reafilado.

2.1.1 Costos indirectos.

Este tipo de clasificación de costos no se pueden identificar como una actividad determinada, es decir, depende de la actividad que se esté analizando [7].

Por ejemplo, los costos que representan el uso de una herramienta de corte y de servicios de reafilado de cortadores como puede ser un cortador con insertos⁵, un cortador de preformado o una herramienta que se desgaste en un periodo de tiempo menor a un año.

Algunos otros costos que entran en esta clasificación pueden ser la depreciación de los equipos, es decir que tanto el equipo se va devaluando con el tiempo, el mantenimiento, la supervisión, los suministros y el tiempo extra.

Todos esos costos se utilizan para el cálculo del precio de venta de los productos.

2.1.2 Costos variables.

Los costos variables, como su nombre lo indica, se refieren a todos aquellos costos que dependen directamente de la producción o la manufactura de componentes. Es decir, si una máquina se enciende para producir un componente, entonces representa un gasto en luz, agua para enfriamiento, aceite de corte y mano de obra [7].

Estos costos están en función del volumen de piezas producidas, como se puede ver en la Figura 2.1.2.1.

⁵Un inserto de una herramienta es una pieza removible generalmente fabricada con carburo de tungsteno y recubierta con algún material compuesto o cerámico. Es utilizada en procesos de maquinado como torneado, fresado, generado de dientes, entre otros.

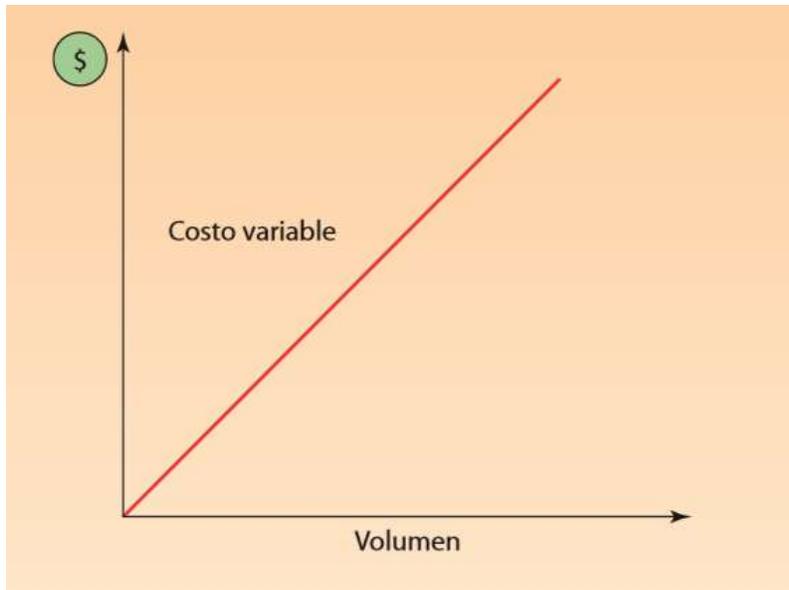


Figura 2.1.2.1 – La índole de los costos variables representada por vectores [8].

2.2 Gasto de Caterpillar planta 4 por cadena de valor.

Se utilizaron datos de costos variables y costos indirectos de Caterpillar planta 4. Los resultados y ejecución de ésta fueron realizados durante febrero 2020 a octubre 2020, es por esto por lo que los datos financieros que se analizaron fueron del año 2019. Debido a la confidencialidad de la empresa por los datos financieros, únicamente y con fines de estudio, se estarán presentando porcentajes de presupuestos / gastos.

Durante el 2019 el 13% del presupuesto asignado a Caterpillar planta 4 fue utilizado en la cuenta de reafilado de cortadores. De este 13% el gasto para la cuenta de reafilado de cortadores se distribuyó tal como se mostró en la Figura 1.2.

Al realizar un análisis de Pareto en porcentaje acumulado, se tiene que el 80% de los gastos se encuentra en los centros de costos de Skiver Small, Skiver Large y C60 siendo los primeros dos objetos de estudio en esta tesis, debido a que suman una mayor cantidad de horas base por número de parte⁶.

En el capítulo IV se tratarán los procesos de manufactura para engranes en donde se dará una mayor explicación de los procesos Skiving.

⁶Un número de parte se refiere a un tipo de engrane con características específicas, puede contener letras o números y lo designa Caterpillar

2.3 Análisis de demanda.

Se analizó mediante un diagrama de Pareto la demanda de números de parte de engranes del 2020. Y se decidió comenzar a trabajar en la evaluación de un proveedor de reafilado / recubrimiento para los números de parte que representan el 80% de la demanda total del 2020, tal como se muestra en la Figura 2.3.1.

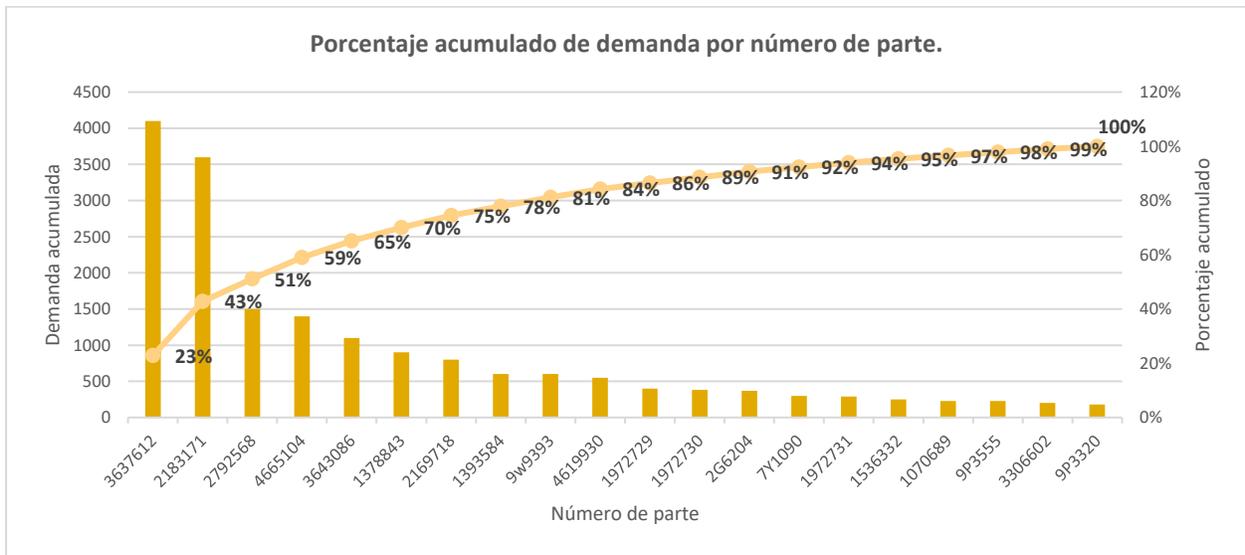


Figura 2.3.1 – Gráfica de Pareto, análisis de demanda segundo semestre del año 2020 en el value stream Rings & SWL [2].

Se puede observar que el 80% de la demanda del 2020 está representada por 9 números de parte de acuerdo a la gráfica, sin embargo después de exponer el alcance de la presente tesis con la gerencia del departamento de ingeniería de manufactura, fueron seleccionados los primeros 15 números de parte (92% de la demanda del 2020) para ser sustituidos con un proveedor de reafilado / recubrimiento alternativo, siempre y cuando la evaluación del costo / beneficio sea rentable y la calidad del producto iguale o mejore las condiciones actuales.

Capítulo III

3.1 Introducción a los engranes.

Los engranes son componentes utilizados en muchos tipos de maquinaria. Es un elemento importante en la manufactura de maquinaria, desde lavadoras para uso doméstico y comercial como se muestran en la Figura 3.1.1, mezcladoras de alimentos, máquinas CNC para torneado, fresado, rolado, ejes de rotación automotriz, transmisiones automotrices, entre otras más. [9]



Figura 3.1.1 Engranés con acero sinterizado utilizados en una lavadora. [1]

Los engranes son producidos en cantidades enormes cada año por empresas. Industrias como la automotriz encabezan la producción de engranes, seguidas por la industria aeroespacial, la industria de la agricultura, construcción por mencionar algunas. [9]

Esto hace que la ingeniería de manufactura esté en constante investigación para probar nuevas teorías y nuevos procesos que ayuden a la reducción de costos de producción, así como el aumento en la producción de engranes para las diferentes industrias.

El diseño de los engranes es complejo y obliga a las industrias a construirlos con un menor costo, así como también a buscar eliminar en su mayoría el ruido entre engranajes durante su funcionamiento, disminuir su peso y aumentar el poder de transmisión de torque que estos ejercen durante su funcionamiento. Los materiales comúnmente utilizados para la construcción de engranes van desde diferentes plásticos de uso comercial como se puede ver en la Figura 3.1.2, aleaciones de acero, aleaciones de titanio, así como la búsqueda en la mejora de sus propiedades por medio de tratamientos térmicos. [1]



Figura 3.1.2 Engranés plásticos utilizados en un juguete. [1]

3.2 Diseño de engranes.

Como ya se mencionó en la introducción de este capítulo, hay muchos tipos de engranes dependiendo cuál sea su aplicación, y también muchos tipos de materiales de los cuales pueden estar compuestos. Están formados de dientes alrededor de su circunferencia ya sea dentados internos o externos y dicho diseño y geometría tienen características especiales de las cuales se hablará en este capítulo.

El diseño de un engrane está compuesto por dos diferentes curvas, la curva de la involuta y la curva cicloidal (Figura 3.2.1). No todos los engranes están diseñados a partir de una involuta, otro caso como por ejemplo los engranes de tipo cicloidal están construidos a partir de la curva cicloidal que parte de un círculo llamado línea de paso. La involuta está desarrollada por una línea a través de una cuerda que parte de un círculo base [1]. El tamaño de la involuta y del círculo base está determinado por el tamaño del engrane y el número de dientes que tenga, así mismo por la aplicación para la que el engrane sea requerido y fue diseñado. En el caso de los engranes con involuta su manufactura y diseño es menos compleja ya que sus flancos son generados sobre una misma curva. Para el caso de estudio de esta tesis son utilizados engranes con involuta y de tipo recto. Se profundizará en este tipo de engranes más adelante en este capítulo.

El círculo de referencia o círculo de paso (pitch circle) es una línea imaginaria en la cual se simula un movimiento oscilatorio (Figura 3.2.1). Se simula el movimiento circular que tendría el engrane en función para su diseño. A su vez este círculo imaginario pasa por el centro de cada diente en el engrane y su centro es el eje central del engrane completo [1]. Dicho de otra manera, es la distancia medida a través del círculo de paso o la línea de paso de cualquier punto en un diente de un engrane, es también equivalente a la

circunferencia del círculo de paso dividido por el número de dientes del engrane, su fórmula está representada por:

Ecuación 3.2.1.

$d = Nm$ donde m es el módulo del engrane, N el número de dientes, y d el círculo de paso [1]

Paso diametral (diametral pitch) es el número de dientes por pulgada del diámetro de paso, aunque pueden sonar parecido al círculo de paso diametral, se calcula y se representa de forma distinta. Se representa en unidades del sistema inglés y es una medida del tamaño de los dientes. Si se quisiera transformar el paso diametral a módulo, se tendría que utilizar la siguiente fórmula:

Ecuación 3.2.2.

$$m = \frac{25.4}{DP}$$

Donde DP es el paso diametral.

En la Figura 3.2.1 se pueden observar las características más importantes que son consideradas en el diseño de engranes, las líneas punteadas que pasan por en medio de los dientes son las explicadas anteriormente (paso diametral, diámetro de paso y módulo) y de donde parte el resto de las características que son importantes para el diseño de engranes.

Diámetro base (base diameter). Es el diámetro del círculo base donde una porción de la involuta en un diente comienza. [1]

Diámetro raíz (root diameter). Es el diámetro del círculo que contiene la raíz de un diente o el inicio de un diente o dicho de otra forma la base de un diente. [1]

Diámetro de punta (tip diameter). Dependiendo de si el dentado del engrane está en el interior o exterior del círculo, también es conocida como la medida del diámetro interno o externo respectivamente. Es donde el diente finaliza o donde se encuentra la punta del diente de un engrane. [1]

Addendum. Es la altura por la cual un diente se proyecta más allá de la línea de paso o círculo de paso, también se describe como la porción de un diente entre el diámetro de punta y el diámetro de paso. [1]

Dedendum. Es la profundidad del diente por debajo del círculo de paso o la porción del diente entre el círculo de paso y el diámetro raíz del diente. [1]

Profundidad de trabajo. Es la profundidad del apareamiento entre dos engranes, también se puede considerar como la suma de los addendums. [1]

Profundidad total. Es la profundidad total del espacio de un diente y equivalente a la suma de los addendums y deddendums. [1]

Distancia de centro. Es la distancia entre el centro del eje de un engrane al centro del eje de otro engrane. Se puede calcular dividiendo la suma de los diámetros de paso entre dos. [1]

Grosor de diente. También conocida como espesor cordal (chordal thickness) y es el grosor del diente medido a través del círculo de paso. [1]

Ángulo de presión (Φ). Es el ángulo donde la presión aplicada en el diente de un engrane se transfiere al siguiente diente. De manera geométrica es el ángulo en donde dos dientes de un engrane convergen y tienen un punto tangente en común a través del círculo de paso. [1]

Backlash. Se puede definir como la cantidad de espacio que el grosor de un diente excede al estar unido con otro engrane. [1]

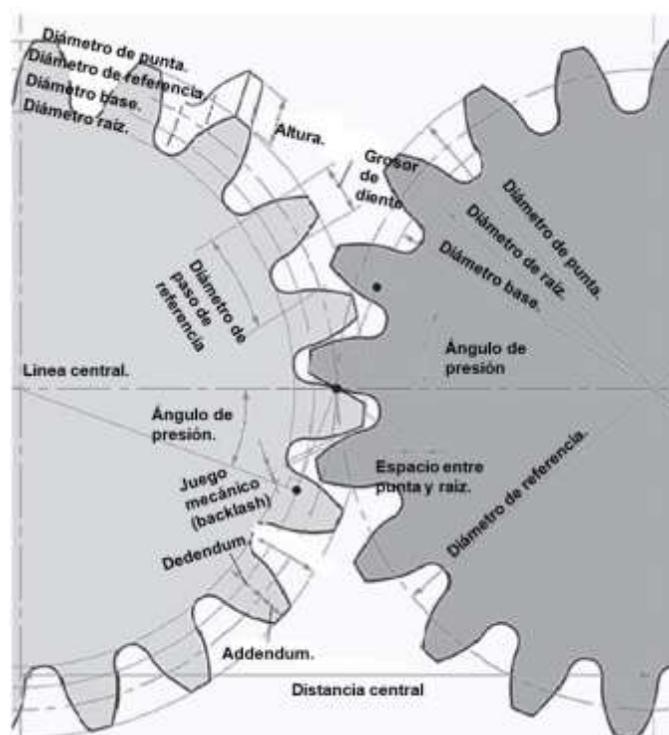


Figura 3.2.1 Representación esquemática del diseño de engranes con sus características principales. [1]

El módulo es el radio del círculo de paso (pitch circle). Está definido por el tamaño de los dientes de un engrane (Figura 3.2.2) y normalmente se representa con la letra m las unidades del módulo deben siempre ser en milímetros:

Ecuación 3.2.3.

$$m = \frac{d}{N}$$

Donde N es el número de dientes y d el círculo de paso. [1]



Figura 3.2.2 Tamaño de los dientes de un engrane en función del módulo [1].

3.3 Desviaciones en la geometría del diente.

Durante los procesos de manufactura de engranes se pueden encontrar que las características que marca el diseño no son exactamente iguales a los productos manufacturados, existen grados de error; por ejemplo, durante el proceso de maquinado, o durante los procesos de tratamiento térmico a los que son sometidos.

Por tanto, se definen como desviaciones a todas aquellas diferencias algebraicas entre las características de diseño y las características reales del engrane.

Una desviación simple en el círculo de paso (f_p) por ejemplo se define como una diferencia algebraica entre el círculo de paso teórico y el círculo de paso real. [1]

Una desviación acumulativa en el círculo de paso (F_p) es la suma algebraica de todos los sectores de cada paso de cada diente comparada con el círculo de paso teórico; es decir, es la suma de todas las desviaciones individuales de las líneas de paso. [1]

Ecuación 3.3.1.

$$F_p = \sum_{nx}^{n1} (f_p)$$

Donde n es el número de dientes del engrane y se suma desde el diente uno hasta el diente nx que representa el número de dientes total del engrane en cuestión.

Por otra parte, existen también desviaciones en la hélice (lead) y el perfil.

Una desviación en el perfil es la cantidad de desviaciones del perfil real comparada con las desviaciones calculadas en el diseño.

De acuerdo con la Figura 3.3.1 se encuentran las diferentes desviaciones del perfil que pueden presentarse.

- a) Desviación total del perfil (F_{α}). Evalúa la desviación de las líneas desde el start of tip break (TB) hasta el profile control diameter (CD), o dicho de otra forma toda la longitud desde la raíz del diente hasta la punta de este.
- b) Desviación de error de forma del perfil ($f_{f\alpha}$). Evalúa la desviación de las líneas de manera positiva o negativa a partir de la línea de trazo de diseño y arroja como resultado la desviación máxima total encontrada. La evaluación al igual que la desviación total se realiza desde la raíz del diente hasta la punta de este.
- c) Desviación de inclinación del perfil ($f_{H\alpha}$). Evalúa la desviación de las líneas del perfil al igual que los ejemplos anteriores, sin embargo, el resultado que entrega es la desviación de la inclinación de la línea a partir de la línea de trazo. Su resultado puede ser positivo o negativo dependiendo hacia donde se encuentre la inclinación. La evaluación al igual que la desviación total se realiza desde la raíz del diente hasta la punta de este.

Una desviación en la hélice (lead) al igual que las desviaciones en el perfil es la cantidad de desviaciones medida a través de la hélice del diente de un engrane comparada con la línea de trazo del diseño. A diferencia de la desviación en el perfil que es evaluada de la raíz del diente hasta la punta, una desviación en la hélice es evaluada desde la parte superior del diente del engrane hasta la parte inferior de este.

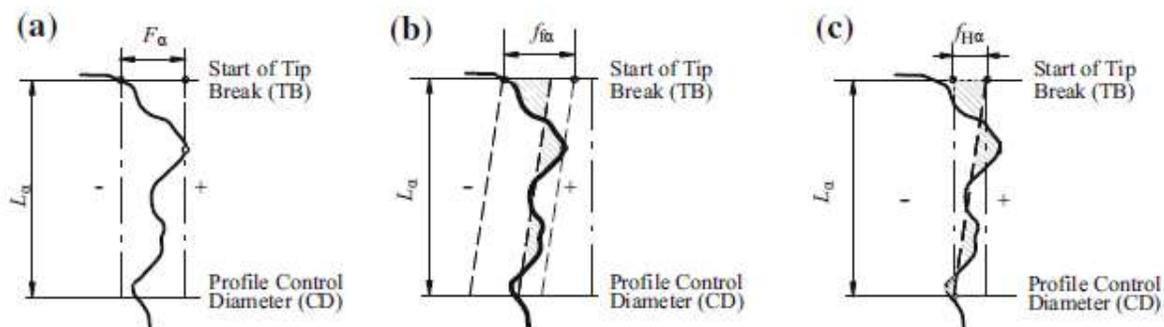


Figura 3.3.1 Desviaciones del perfil de un diente. [1]

En la Figura 3.3.2 se encuentran las diferentes desviaciones de la hélice de un diente.

- a) Desviación total de la hélice (F_{β}). Es la suma de la desviación de la hélice fuera de la línea de paso de diseño. Se evalúa a través de todo el face width que representa la longitud desde la parte superior del diente de un engrane hacia la inferior y cuantifica el total de la desviación, no existen símbolos positivos y negativos.
- b) Desviación de error de forma de la hélice ($f_{f\beta}$). Evaluación de la hélice de manera positiva o negativa a partir de la línea de trazo de diseño y arroja como resultado la desviación máxima total encontrada. La evaluación se realiza a través de toda la longitud del diente desde la parte superior hasta la parte inferior.
- c) Desviación de inclinación de la hélice ($f_{H\beta}$). Se evalúa la desviación de las líneas de la hélice al igual que los ejemplos anteriores, sin embargo, el resultado que entrega es la desviación de la inclinación de la línea a partir de la línea de trazo. Su resultado puede ser positivo o negativo dependiendo hacia donde se encuentre la inclinación. La evaluación se realiza a través de toda la longitud del diente desde la parte superior hasta la parte inferior.

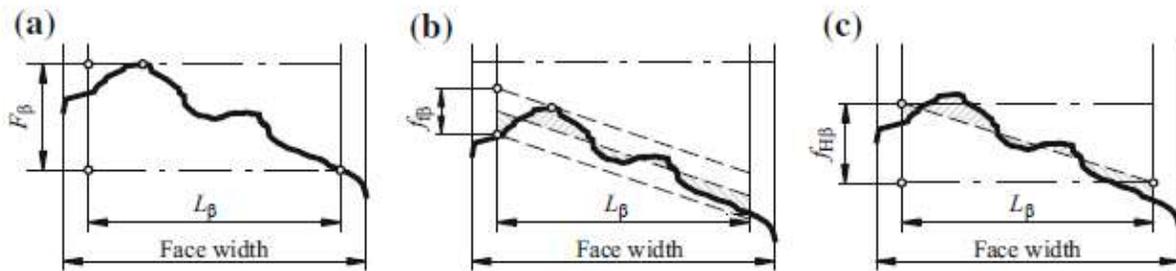


Figura 3.3.2 Componentes de la desviación de la hélice de un diente. [1]

3.4 Tipos de engranes.

3.4.1 Engranes de ejes paralelos

Se trata del tipo de engranes más común y de hecho el tipo de engranes objeto de estudio de la presente tesis. Los ejes de estos tipos de engranes se encuentran en el mismo plano y son paralelos a otros ejes. El tipo de dientes que presentan estos engranes puede ser de tipo recto o de tipo helicoidal, es decir presentan cierta inclinación de la hélice, también puede ser dentado interior o exterior. [1]

Los engranes de tipo recto es el tipo de engrane más utilizado para los engranes de ejes paralelos, tienen dientes rectos. Cuando hablamos de un engranaje interno, la mayoría de las veces se habla de engranes de tipo anillo, el tipo de engrane que específicamente es objeto de estudio en esta investigación y son utilizados en un juego de engranajes con planetarios, tal como se muestra en la Figura 3.4.1 [1]

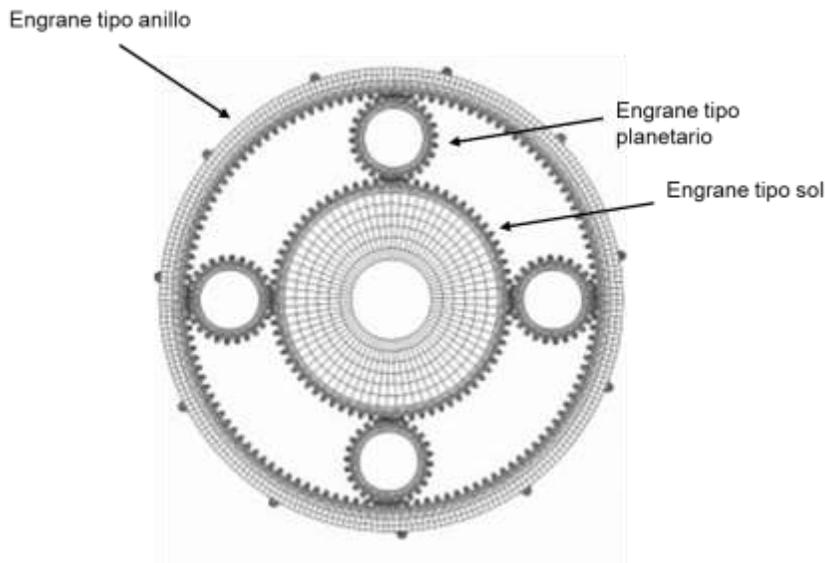


Figura 3.4.1 Ensamble de un engrane de tipo anillo en un eje paralelo con 4 engranes de tipo planetario y un engrane de tipo sol. [10]

Los engranes de tipo helicoidales son el segundo tipo de engranes más utilizados en engranes de ejes paralelos. Este tipo de engranes está diseñado de manera que la hélice está en el mismo ángulo que el eje, es decir está paralelo a su eje. Sus ángulos típicos van desde los 8° hasta los 30°, incluso algunas aplicaciones especiales más de 45°. Este tipo de ángulos pueden estar orientados de manera positiva o negativa tal cual se mencionaba en el capítulo anterior en el caso del error de inclinación de la hélice ($f_{H\beta}$), físicamente el ángulo en este tipo de engranes es visible y diferente a los engranes de tipo recto, tal como se muestra en la Figura 3.4.2

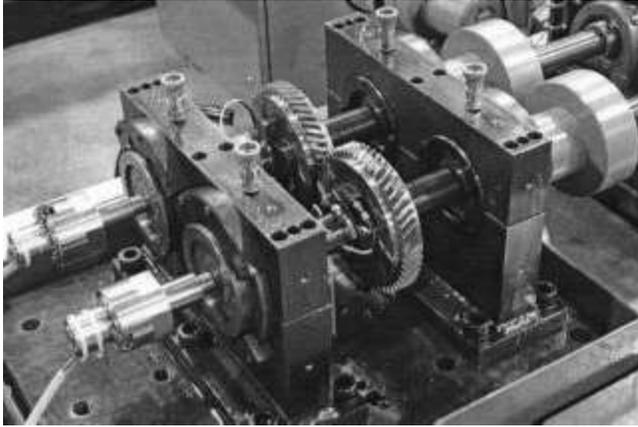


Figura 3.4.2 Engranés de tipo helicoidal. [16]

Por otra parte, existen también engranes helicoidales dobles (Figura 3.4.3). Estos engranes helicoidales dobles sirven para distribuir la carga aplicada sobre ellos, constan de dos inclinaciones de la hélice opuestas sin embargo en el mismo grado de inclinación.



Figura 3.4.3 Engranés helicoidales dobles. [1]

3.4.2 Engranés de eje con intersección.

En este arreglo de engranes los ejes de estos interceptan, aunque se encuentren en el mismo plano. La más extensa configuración de este tipo de engranes es el sistema de ángulo derecho en donde el eje de dos engranes está a 90° uno del otro, el mejor complemento de este tipo de engrane es en un engrane de tipo bevel (Figura 3.4.5). [1]

Los engranes de tipo bevel se pueden dividir en dos tipos de engrane: bevel recto y bevel con espiral.

El engrane de tipo bevel recto es un engrane tipo cónico, tienen dientes rectos en línea con la línea de paso tipo cónica de este tipo de engranes tal como se puede ver en la Figura 3.4.5. Entre algunas aplicaciones para este tipo de engranes son en la industria automotriz para algunos vehículos de baja velocidad donde la vibración no es significativa para la aplicación de este tipo de componentes. [1]

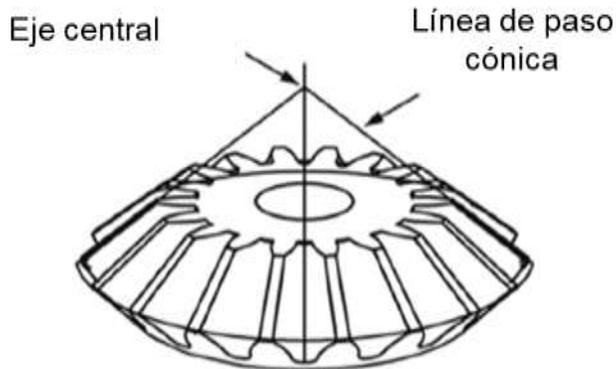


Figura 3.4.5 Engrane de tipo bevel recto.

Los engranes de tipo bevel en espiral son por lo regular más complejos de manufacturar debido a sus dientes en forma de espiral con ángulo de inclinación de hélice (Figura 3.4.6). Este tipo de geometría de diente asegura un contacto más suave y menor ruido durante su operación, comparado con los engranes de tipo bevel rectos. Típicamente el ángulo de inclinación de la hélice es 35° y son utilizados en la industria automotriz para aplicaciones de alta velocidad.

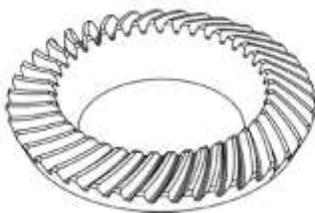


Figura 3.4.6 Engrane de tipo bevel con espiral. [1]

Otros tipos de engranes utilizados en la industria son los de eje no paralelo y sin intersección, y algunos tipos de engranes no circulares (Figura 3.4.7) para aplicaciones complejas.



Figura 3.4.7 Tipos de engranes no circulares. [1]

3.5 Materiales en engranes.

La elección de materiales para la manufactura de engranes es muy importante, y esta va a depender del uso de dicho engrane bajo diferentes condiciones de vibración, torque, velocidad, ambiente de trabajo, temperatura, condiciones químicas a las que se va a exponer, entre otros tipos de consideraciones.

Explorando un poco de la historia de los engranes, el registro más antiguo que cumple con la descripción de un engrane, data de la escuela de Aristóteles en el año 300 A.C. en el cual se describe un mecanismo de ruedas entrelazadas haciendo referencia a ruedas dentadas que buscaban, al igual que los engranes modernos, generar movimiento. Si bien los dientes no tenían una forma y tamaño determinado si contaban con un número de dientes y estaba en contacto uno con otro, en la Figura 3.5.1 se puede observar el dispositivo de engranes hecho de madera.

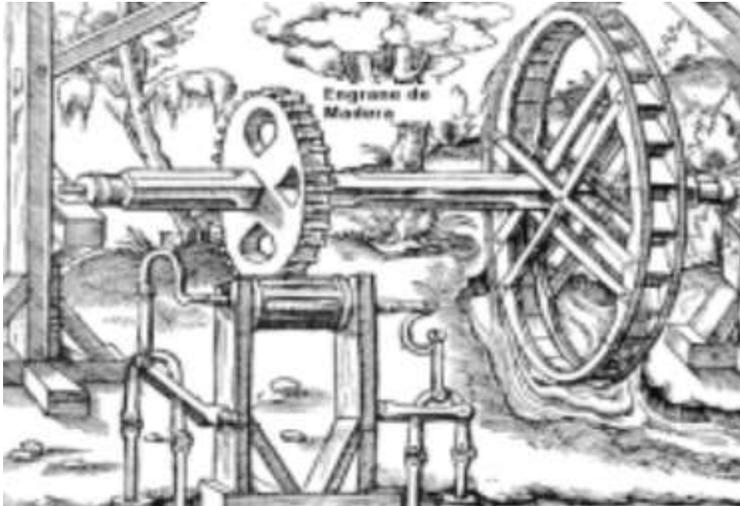


Figura 3.5.1 Prototipo de engrane de madera del año 300 A.C. [12]

Debido a que la mayoría de los engranes que se manufacturan a nivel mundial son para la industria automotriz y la industria de construcción como se mencionó en el capítulo 3.1. Dichas aplicaciones requieren de materiales que tengan una gran resistencia a la fatiga, materiales resistentes al desgaste y capaces de tener un tiempo de vida largo como lo es en transmisiones y ejes automotrices. Los materiales más utilizados son los metales, ya sea ferrosos, no ferrosos, algunas aleaciones especiales y en otras aplicaciones especiales pudieran llegar a ser materiales no metálicos.

3.5.1 Metales ferrosos.

El hierro gris presenta alta maquinabilidad, sin embargo, el uso en aplicaciones es limitado al ser un material débil y frágil debido a su microestructura que produce también una alta dureza.

Dentro de la gama de los hierros existe también el hierro dúctil, este hierro dúctil dentro de su microestructura contiene grafito en forma de nódulos que asemejan sus propiedades con los de algunos aceros, tal es el caso del acero al carbón 1141. De acuerdo con la Tabla 3.5.1 donde se puede observar una comparativa de propiedades mecánicas:

Tabla 3.5.1 Comparativa entre propiedades mecánicas de un hierro dúctil 80-55-06 contra un acero al carbón AISI 1141.[13]

	80-55-06 Ductile Iron	1141 Carbon Steel
Tensile Strength (psi)	80,000 (min.)	98,000 (typical)
Yield Strength (psi)	55,000	52,000
Elongation	6%	22%

En esta tabla se puede observar que la elongación de un hierro dúctil contra un acero al carbono es 3 veces menor, el esfuerzo a la tensión y el esfuerzo de cedencia son muy parecidos y dependiendo la aplicación en que se utilice, el hierro podría sustituir al acero, siendo el hierro a su vez un material más económico que el acero.

Los engranes de hierro presentan a su vez mayor resistencia a la corrosión y en aplicaciones de engrane presentan menos ruido en su funcionamiento. Generalmente, los engranes de hierro son utilizados en aplicaciones de maquinaria para minería, agricultura, construcción y herramientas para maquinaria.

Diferentes grados de acero son utilizados en distintas aplicaciones que requieren una carga pesada de transmisión de fuerza y alta resistencia y precisión. Aceros al carbón, como los AISI 1020 y AISI 1040 (Tabla 3.5.2), y aceros de aleación son los más utilizados en la industria de los engranes.

Tabla 3.5.2 Composición química de los aceros AISI 1020 y AISI 1040. [14]

AISI 1020		AISI 1040	
Elemento	Porcentaje (%) presente	Elemento	Porcentaje (%) presente
Carbono (C)	0.18 hasta 0.23%	Manganeso (Mn)	0.60-0.90
Azufre (S)	≤0.050%	Carbono (C)	0.370-0.440
Manganeso (Mn)	0,30 a 0,60%	Azufre, (S)	≤ 0.050
Silicio (Si)	0.15 hasta 0.35%	Fósforo (P)	≤ 0.040
Fósforo (P)	≤0.040%		

Los elementos presentes en estos aceros los hacen ideales para tratar térmicamente. Su capacidad de ser endurecidos que es la razón primaria por la que este tipo de aceros son los más utilizados en engranes, así como su fuerza y su resistencia.

Aceros de baja aleación son preferibles para aplicaciones de mediano y moderado esfuerzo, aceros de alta aleación son preferibles para aplicaciones pesadas. Estos aceros son modificados por medio de tratamientos térmicos y endurecidos hasta una dureza de 64 HRC – 66 HRC.

Por otra parte, los aceros inoxidable son aleaciones de acero que contienen más del 12% de su composición de cromo (Cr), importantes e ideales para engranes que serán expuestos a altas temperaturas y ambientes corrosivos, como máquinas utilizadas con productos químicos especiales, la industria de petróleo, la industria alimenticia y la industria de bebidas. El cromo reacciona con el oxígeno en el aire formando una capa pasiva y homogénea de óxido que protege la superficie del material contra la corrosión. Existen aceros inoxidable de grado austenítico, ferrítico y martensítico. Siendo el grado austenítico el más popular debido a su elevada resistencia a la corrosión, es no magnético, no es tratable térmicamente y en general difícil de maquinar.

El acero inoxidable 304 (18Cr – 8 Ni) es uno de los aceros inoxidables más utilizados para engranes que se encuentran expuestos a altos niveles de corrosión.

3.5.2 Metales no ferrosos y aleaciones.

Distintos tipos de metales no ferrosos como aleaciones de aluminio y cobre son las más utilizadas para ciertos procesos de manufactura de engranes. Entre las propiedades que este tipo de metales no ferrosos poseen son baja densidad, ideales para procesos de extrusión y rolado en frío, gran resistencia a la corrosión a su vez que no presentan magnetismo. [1]

Tal es el caso del trabajo hecho por *Rohrmoser, A., Hagenah, H., & Merklein, M. (2021) [15]* en donde utilizó 3 aleaciones no ferrosas utilizadas en engranes en un proceso de extrusión en frío en el cual analizó las condiciones de flujo y condiciones tribológicas durante el proceso de manufactura de engranes.

Utilizó un acero de baja aleación 16MnCr5 frecuentemente usado como material para engranes y usualmente empleado para aplicaciones de esfuerzo “medio”, que puede ser endurecido para una mayor demanda de esfuerzo durante su aplicación. Una aleación de latón CuZn37 con un contenido de zinc del 37% que ayudan a que sea ideal para su formación en frío, por último, una aleación de aluminio tratable térmicamente (AlMgSi) con gran resistencia a la tensión y que al igual que las otras dos aleaciones. Comúnmente utilizada en engranes.

En su trabajo *Rohrmoser, A., Hagenah, H., & Merklein, M. (2021)* investigaron las propiedades de flujo de los distintos materiales en el proceso de formación en frío de un proceso de extrusión por medio de análisis numérico por computadora.

Entre sus conclusiones se incluyeron la precisión del engrane en las líneas del perfil y la hélice en los flancos como se muestra en la Figura 3.5.2 se pueden ver desviaciones menores en la aleación de cromo para la línea de la hélice y menores desviaciones en las líneas del perfil para la aleación de aluminio.

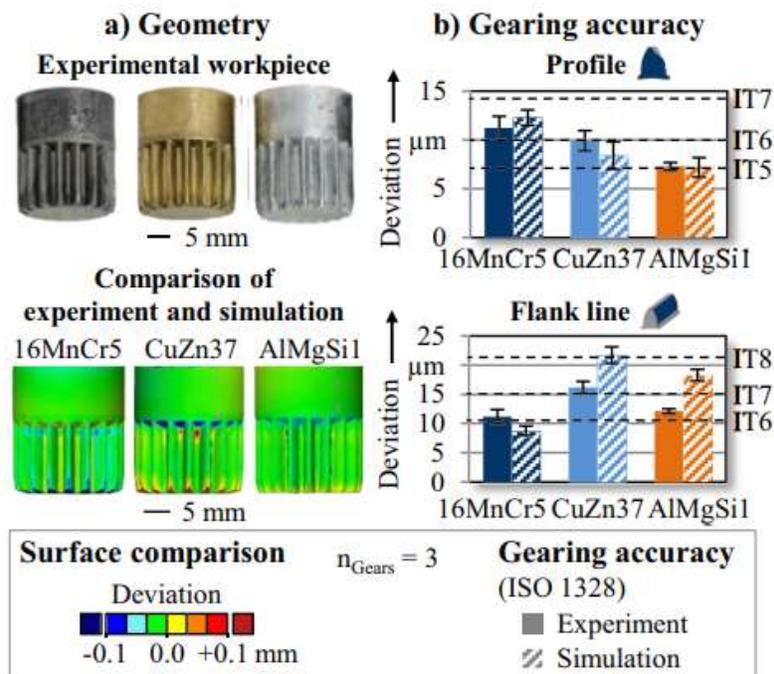


Figura 3.5.2 Comparación de precisión entre 3 diferentes aleaciones para la formación de engranes en un proceso de extrusión en frío. [15]

También concluyeron que la fuerza del dado para el proceso de extrusión en la aleación de cromo es la mayor y el aluminio fue el que requirió menos fuerza para poder ser formado (Figura 3.5.3)

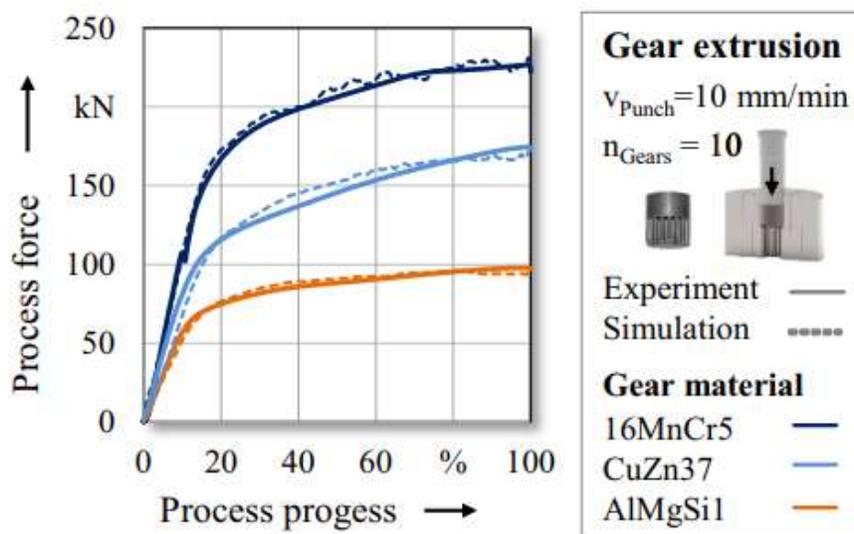


Figura 3.5.3 Fuerza utilizada en las diferentes aleaciones probadas por Rohrmoser, A., Hagenah, H., & Merklein, M. (2021). [15]

Este trabajo nos muestra que diferentes tipos de aleaciones también pueden ser utilizados para la manufactura de engranes en procesos muy distintos, como en estos ejemplos, donde el material no sufrió ningún proceso de maquinado ni tratamiento térmico y fue debido a las propiedades de los materiales y a su aplicación.

3.5 Procesos de manufactura de engranes.

Los procesos convencionales de producción de engranes se dividen en 3 diferentes tipos:

Procesos de remoción de material. Son los procesos más importantes de manufactura de engranes para el corte de diente y preparación de la geometría del diente, por lo general lo conforman procesos de maquinado con herramientas de corte de tipo cortadores.

El diseño de los cortadores de forma para engranes contienen la forma de los dientes del engrane que se va a manufacturar y pasa a través de un blank, que es la forma del engrane sin sus dientes, por ejemplo, procesos de fresado, shaping y skiving por mencionar algunos. [1]

El proceso de fresado para engranes es económico y flexible para grandes variedades de engranes de tipo cilíndricos y algunos otros engranes de tipo rectos, helicoidales, y engranes de tipo bevel. En este proceso un disco de tipo circular con la forma del diente del engrane es pasado a través del blank creando un espacio vacío que conforma el flanco de los dientes. Como se observa en la Figura 3.5.4 el engrane o blank está siendo formado por un cortador con la forma de la geometría del diente. Este cortador gira al mismo tiempo que la pieza haciendo cada uno de sus dientes de manera individual.

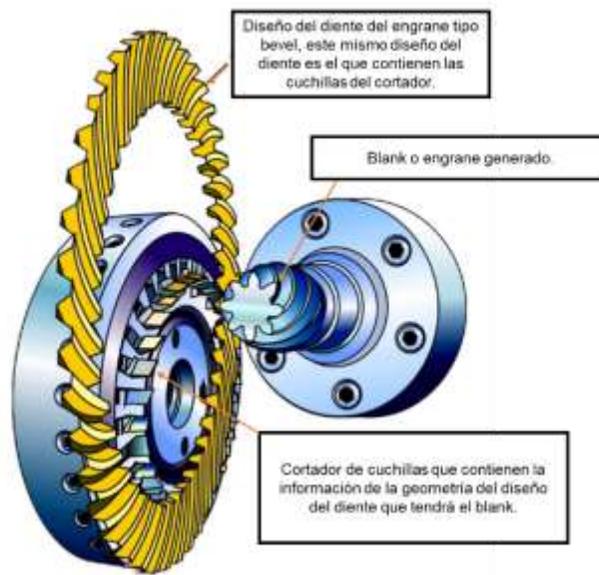


Figura 3.5.4 Engrane de tipo bevel formado por un proceso de fresado. [1]

En el proceso de shaping un movimiento linear hace pasar un cortador por un blank. Este proceso es utilizado en la manufactura de engranes de baja calidad o una forma simple de perfil, normalmente es usado en engranes de tipo recto. Es un proceso con una capacidad de producción alta y económica. La herramienta se mueve de forma paralela al centro del eje del blank y corta el espacio de un diente de uno por uno.

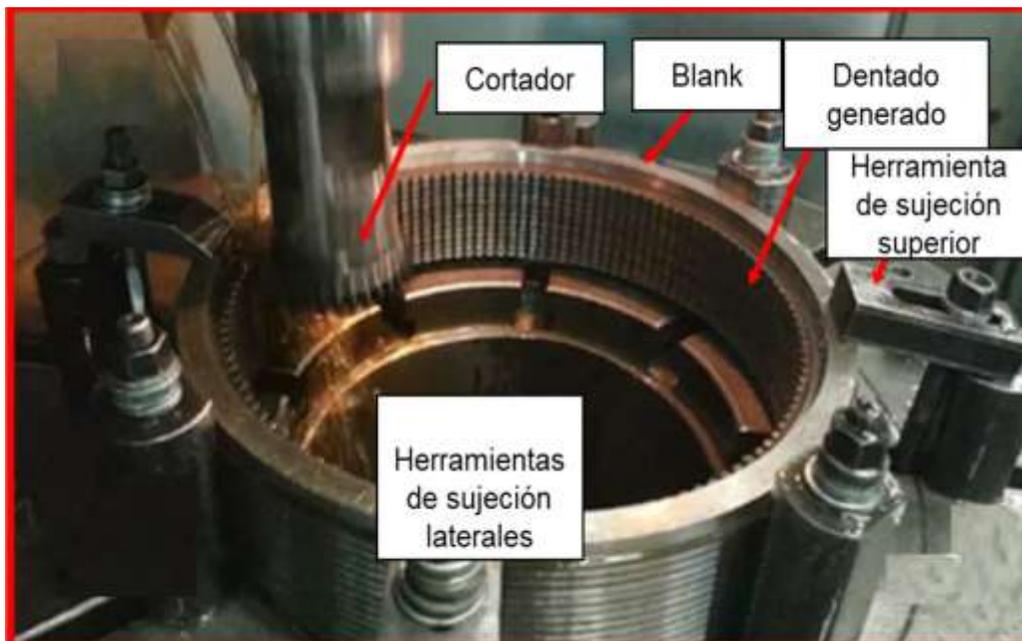


Figura 3.5.5. Proceso de shaping con los elementos generales que la componen. [17]

El movimiento de los ejes de una máquina shaping consta del movimiento del cortador hacia arriba y abajo, como se muestra en la imagen 3.5.5, este cortador comienza a remover material acercándose a la pieza, la cual a su vez está girando a cierta velocidad y sincronizada con el giro del cortador. Existen también distintos tipos de herramientas de sujeción, en este caso y por las dimensiones del engrane consta de herramientas de sujeción superiores y laterales que impiden que el engrane presente movimiento durante el proceso ya que esto puede afectar la forma del diente o la calidad superficial del mismo.

El proceso de Skiving para maquinado de engranes internos es múltiples veces más rápido que el proceso de shaping, durante el estudio de esta tesis se profundizará en el capítulo VI acerca de este proceso ya que es el proceso donde el cortador y los recubrimientos serán estudiados.

En la vista lateral de la figura 3.5.6 el engrane está orientado en la coordenada principal del sistema de manera colineal con el eje Y_4 . El eje del cortador representado con R_w está posicionado fuera del eje Y_4 del eje central de la pieza. De tal forma que los ejes

están posicionados en los planos $X_4 - Z_4$ por un vector de distancia que llamaremos E_x . El ángulo que se menciona como “tilt angle” es un ángulo que puede ser utilizado dependiendo si la máquina permite este grado de inclinación para incrementar el alivio de esfuerzos en los ángulos, esto permite minimizar las interferencias durante el ensamble. El círculo de paso del cortador y del engrane hacen contacto de manera tangencial. En la vista por encima se muestra la inclinación que presenta el cortador representado por un ángulo que se llama Σ , este ángulo está definido de forma diferente que el ángulo de hélice del engrane. En un engrane recto el recorrido que realiza el cortador es en la dirección del eje Y_4 . [18]

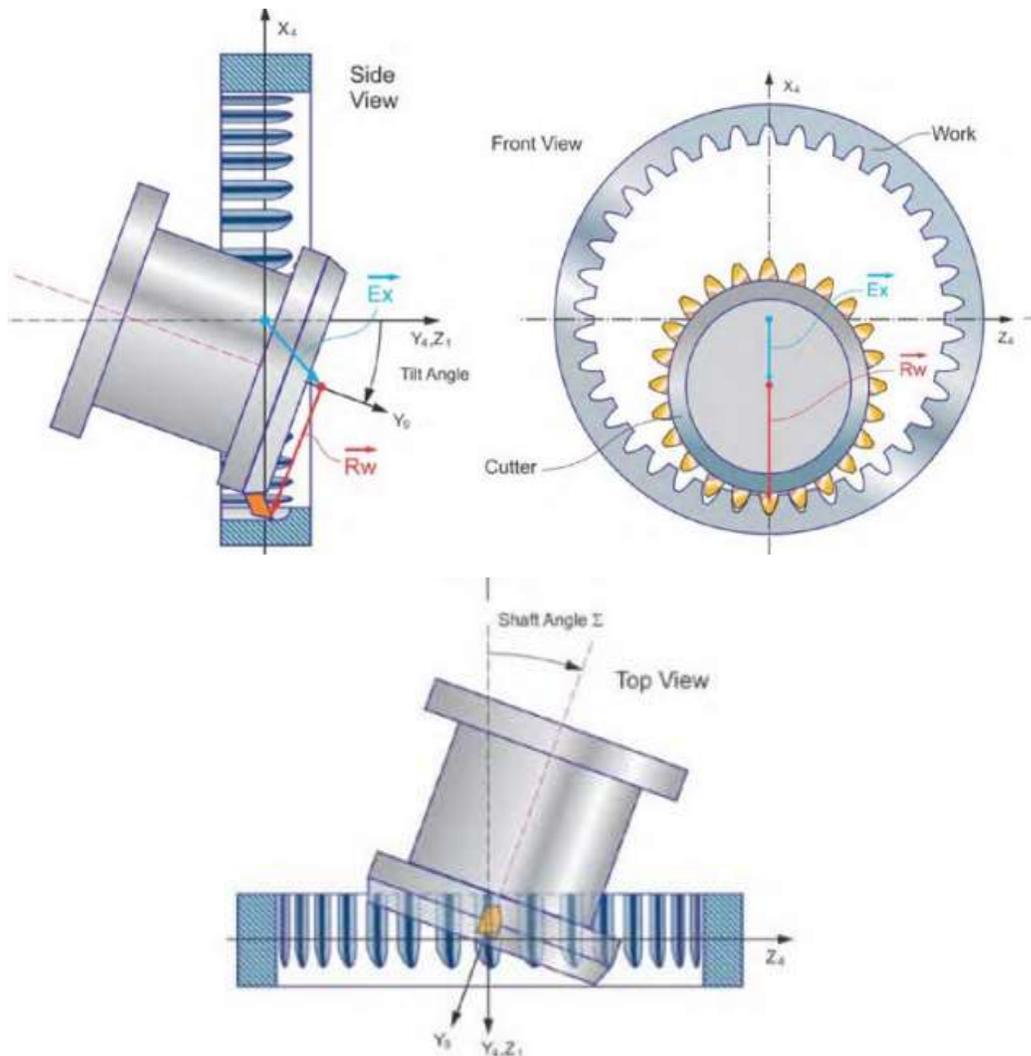


Figura 3.5.6 Vista lateral, frontal y por encima durante un proceso de Skiving. [18]

Procesos de formación de material. En este tipo de operaciones todos los dientes de un engrane son formados de manera simultánea. Esto en un molde que contiene el diseño de la geometría del diente que se requiere formar. La calidad y la precisión del molde va a ser directamente proporcional a la calidad del diente que se formará. Entre algunas de sus ventajas son, tiempos de proceso más rápidos, menor pérdida de material y no existen rebabas durante el proceso. Ejemplos de este tipo de procesos son estampado, extrusión, deformación en frío, rolado y forjado [1].

La extrusión y el rolado en frío involucra la formación requerida de la geometría del diente en rodamientos cilíndricos (Figura 3.5.7). Una barra de material es pasada a través de un extrusor o varios extrusores con un dado que contienen la forma del engrane a fabricar.

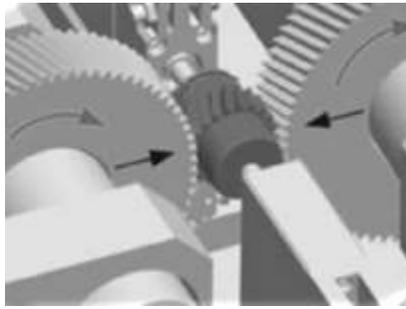


Figura 3.5.7 Representación del proceso de rolado en frío para un engrane. [1]

La primera fase se conforma de una herramienta que es empujada a través del diámetro de un blank, en la segunda fase la herramienta sincroniza su giro con el blank, al igual que su velocidad y el avance de la herramienta sobre el blank para la formación de los dientes del engrane, en la tercera fase se ajusta la calidad final del engrane, moviendo la herramienta de corte en reversa a la dirección original.

Procesos de adición de material. En este tipo de procesos, al igual que en los procesos de formación de material, se utiliza un molde que contiene la forma y geometría de los dientes del engrane. Se incluyen aquí los procesos de preparación del blank que representa la materia prima de los procesos de remoción de material. [1]

El proceso de fundición a presión es el más utilizado para la formación de blanks, este consiste en hacer pasar el metal en forma líquida por un molde a presión, velocidad y temperatura controlada en un molde que como se acaba de mencionar contiene la forma del engrane. [19] Una vez que el metal se solidifica en el molde después de un tiempo establecido, dicha pieza se retira y es enfriada y puede o no contener un tratamiento antes de pasar a un proceso de remoción o formación de material. Este tipo de procesos por lo regular son de bajo costo y grandes volúmenes de producción (Figura 3.5.8)



Figura 3.5.8 Engranés formados en fundición a presión para una mezcladora de cemento. [1]

Los procesos de fundición en arena producen piezas de baja calidad, pero gran tamaño, por lo regular el material procesado es hierro, aceros de aleación y son piezas utilizadas para mecanismos de levantamiento, maquinaria pesada y grúas manuales (Figura 3.5.9)



Figura 3.5.9 Anillo de fundición en molde de arena utilizado en la industria de la minería. [19]

3.6 Engranajes para maquinaria.

La precisión y el poder de transmisión son muy importantes en este tipo de componentes. Los engranes mayormente utilizados son engranes metálicos [9]. En su mayoría los dentados de este tipo de engranes deben tener un acabado superficial de mucha precisión, hablando por ejemplo en el caso de las desviaciones de la hélice y del perfil en ocasiones menores a 0.010 mm. Así como también las durezas superficiales de hasta 68 RC. Esta precisión y propiedad de los materiales requeridos son necesarias debido a las altas velocidades de corte utilizadas en los engranes que se ensamblan en estas máquinas.

Un ejemplo de engranajes para maquinaria de gran precisión son los constructores de maquinaria para rectificado en máquinas CNC. La industria de la construcción de máquinas cada vez es más especializada para un cierto tipo de productos y esta a su vez busca que esta maquinaria requiera el menor ciclo de mantenimientos con buenos software y componentes como este tipo de engranes de mejor calidad [20].

La Figura 3.6.1 nos presenta un modelo común de una máquina CNC para rectificado de engranajes en donde una piedra de rectificado entra a cada uno de los dientes a remover cierta cantidad de material buscando dejar un cierto tipo de acabado de precisión y para esto la alineación de los ejes de dicha máquina deben tener una gran precisión.

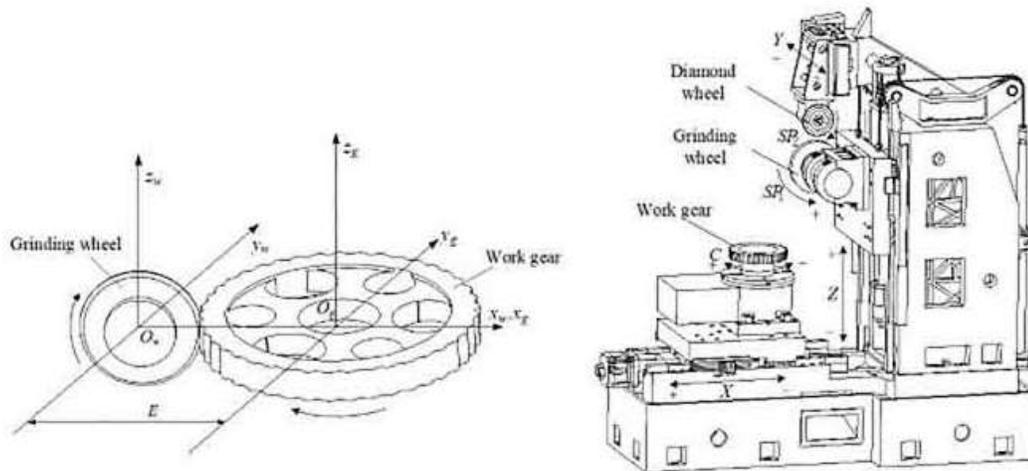


Figura 3.6.1. Máquina CNC de rectificado de dientes para la manufactura de engranes. [20]

Capítulo IV

4.1 Reafilado de cortadores.

La precisión del afilado de cortadores es muy importante para poder cumplir con los diferentes requerimientos del diseño de engranes, es decir, no exceder la tolerancia permitida en las desviaciones del perfil y de la hélice, así como ser precisos en las dimensiones y forma del círculo de paso y demás características mencionadas en el capítulo III.

Una característica importante de los cortadores utilizados en el estudio de esta tesis es que son cortadores de cuerpo sólido (Figura 4.1) de material tipo acero grado herramientas recubierto con un material de tipo cerámico, las características y tipos de recubrimiento utilizado se abordarán más adelante en este capítulo.

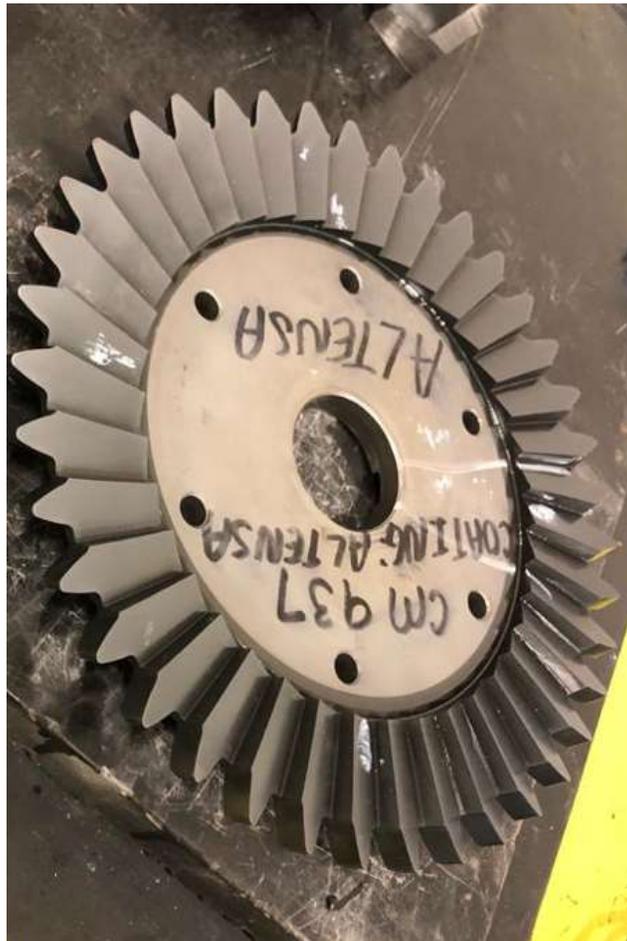


Figura 4.1. Cortador de cuerpo sólido. Acero grado herramienta. [2]

Las características más importantes en el diseño del cortador y que influyen en la calidad del afilado son los ángulos que lo componen (Figura 4.2), por ejemplo, para el cortador 1455-9102:

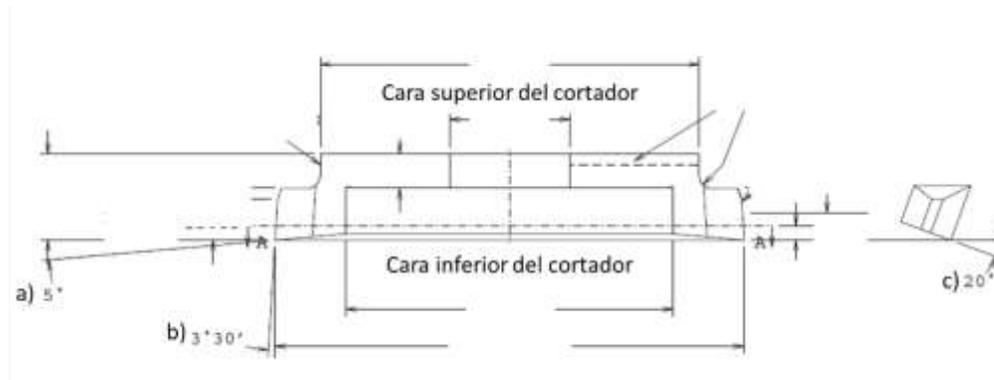


Figura 4.2 Ángulos de afilado que componen al cortador 1455-9102. [2]

- a) Ángulo cónico de afilado: este ángulo representa la conicidad del diámetro externo del cortador hacia el ángulo de hélice (Figura 4.3).

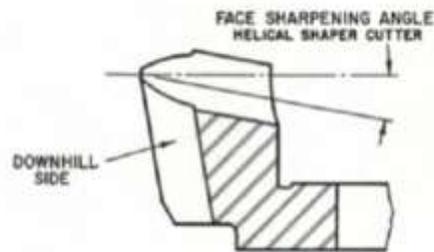


Figura 4.3 Ángulo cónico de afilado. [21]

- b) Ángulo de escalón de afilado (sharpening step): es el ángulo de inclinación del diente del cortador respecto al diente consecutivo. (Figura 4.4).

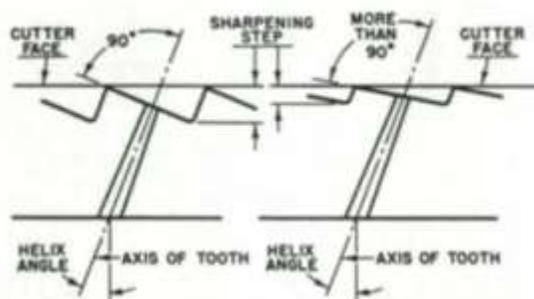


Figura 4.4. Ángulo de escalón de afilado entre dientes. [21]

- c) Ángulo de hélice: al igual que se explicó en el capítulo III el ángulo de hélice del cortador representa la inclinación de la hélice de diseño, en este caso 20° .

Normalmente en los procesos de afilado de cortadores se utilizan máquinas especiales rectificadoras con 4 o 5 ejes dependiendo del afilado que vaya a realizar, para el caso del cortador 1455-9102 se utilizó una máquina rectificadora con 5 ejes en la cual se sitúa la cara superior del cortador en una mesa de tipo magnética. Estos 5 ejes sirven para ajustar los ángulos de la herramienta en la máquina. Para el caso del cortador 1455-9102 un eje de la máquina rota a 5° (ángulo cónico de afilado), otro eje se posiciona en la inclinación del ángulo de hélice de 20° y otro eje más interactúa colocándose en el ángulo de afilado final de $3^\circ 30'$ (Figura 4.4).

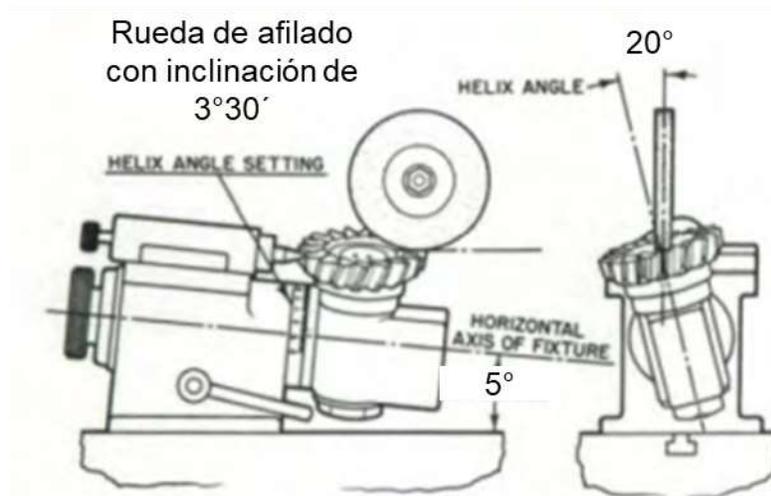


Figura 4.4 Ajustes de la máquina para el afilado de la herramienta. [21]

Una vez ajustada la máquina de rectificado para el afilado se procede a establecer los parámetros de corte, en este caso avances, velocidades y pasadas que la piedra dará dependiendo el daño que el cortador tenga después de su uso. Un daño que requiere de 1 a 3 pasadas con la piedra de rectificado va de 0.01 mm hasta 0.350 mm. (Figura 4.5)



Figura 4.5 Daño de un cortador skiving de 0.308 mm evaluado con un comparador óptico digital.

El tipo de calidad que se requiere para el afilado está dado por el diseño del engrane de este cortador ya que su diseño se trata a su vez de un engrane y tiene parámetros de rugosidad especificados por el proveedor, además de una remoción de filos en los bordes de cada diente.

Algunas tolerancias comerciales están incluidas en las publicaciones como ANSI B94.21 (Gear Shaper Cutters), Metal Cutting Tool Institute y las tolerancias de las normas American Gear Manufacturers Association Q-10 Q-8.

4.2 Decapado de herramientas.

Una vez concluido el afilado del cortador es necesario someterlo a un proceso de decapado con el propósito de retirar la capa de recubrimiento del cortador que de acuerdo con la recomendación del proveedor y para este caso en específico puede variar entre 0.002 mm a 0.005 mm. Esto con el propósito de colocar una capa de recubrimiento nueva y uniforme sobre los dientes del cortador.

El proceso de decapado está definido como un proceso químico electroquímico en el que el material es removido de la superficie de un material, típicamente un metal. Estas impurezas generadas en la superficie metálica pueden afectar el uso o desempeño del producto, en este caso el cortador. Los compuestos inorgánicos que regularmente son removidos por medio de este proceso son óxidos, hidróxidos, aceites de corte, grasas, arena de fundición, algunos compuestos orgánicos e incluso se utiliza como prevención a la oxidación (Figura 4.6).



Figura 4.6 Material antes (izquierda) y después (derecha) de un proceso de decapado. [22]

Una capa de óxido se forma en el metal durante el proceso de manufactura y trabajo en caliente, como en este caso lo es el rectificado, esto como producto de la reacción con el oxígeno del aire. La composición de la escala de óxido depende de la rampa de enfriamiento. Un enfriamiento rápido provoca una capa de óxido ferroso en la superficie (FeO). Si el tiempo de enfriamiento es prolongado, esta capa de óxido se forma de magnetita (Fe_3O_4) y una capa muy delgada de hematita (Fe_2O_3), esta última es preferente ya que se disuelve de forma lenta. La composición del acero no presenta alteraciones durante la formación de la capa de óxido, sin embargo, aceros de alto carbono o altas concentraciones de manganeso reducen el tiempo en el proceso de decapado.[22]

El ácido durante el proceso de decapado penetra en las capas de magnetita y hematita formadas, reaccionando con el óxido ferroso (wustita) y con el gas de hidrógeno formado durante la reacción química del contacto del ácido con el metal, rompiendo la capa formada (Figura 4.7).

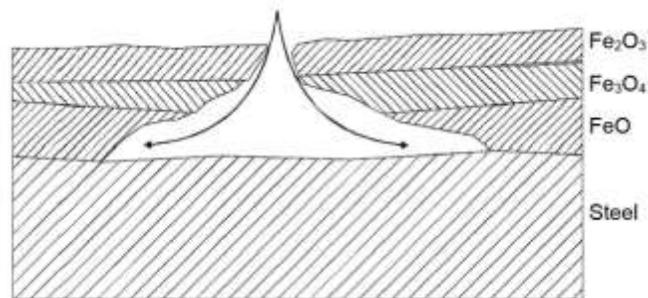


Figura 4.7. Reacción química del proceso de decapado en el acero y la ruptura de las capas formadas por Fe_3O_4 , Fe_2O_3 y FeO . [22]

El proceso de decapado puede variar dependiendo de la aplicación del producto y las especificaciones de cada industria, sin embargo, el proceso más común consta de 3 pasos, limpieza previa, decapado y enjuague final.

Durante la limpieza previa se utiliza un baño de sales alcalinas mezclado con surfactantes y solventes en donde dependiendo del tipo de impurezas que se desean remover, dicho baño debe estar en una temperatura de entre $60^\circ C$ a $90^\circ C$. En esta temperatura se asegura que grasas y ceras puedan ser removidas de manera eficiente.

Entre algunos factores que pueden afectar la eficiencia del decapado son, por ejemplo, la cantidad de tiempo necesaria dependiendo del químico que se vaya a aplicar. También un tiempo excesivo puede causar un exceso de decapado que provoca poros en la superficie del material. El calor acelera la reacción del decapado, pero a su vez incrementa los riesgos en la salud al generar el vapor de los ácidos de las reacciones químicas. Altas concentraciones de ácido incrementan la eficiencia en el decapado aún sin inducir calor durante el proceso. [22]

Algunos de los ácidos más comunes utilizados durante el proceso de decapado son, por ejemplo, el ácido clorhídrico (HCL), también conocido como ácido muriático, se puede trabajar a bajas temperaturas hasta debajo de 15°C con concentraciones de 5 % a 15 %.

El ácido cítrico ($C_6H_8O_7$), recomendado para temperaturas por encima de 90°C, usualmente es encontrado como anhídrido ($C_6H_8O_7$) o monohidrato ($C_6H_8O_7 - H_2O$), este ácido a temperatura de 90° C no libera vapores dañinos, son recomendadas concentraciones de 2 % a 10 %.

El ácido fosfórico (H_3PO_4), en concentraciones de 15 % a 70 % este ácido es un efectivo removedor de óxido, no ataca la superficie del metal de manera agresiva, como el ácido clorhídrico o cítrico, por ejemplo.

El ácido sulfúrico (H_2SO_4), es el ácido más utilizado en Estados Unidos, su eficiencia es dependiente de la temperatura, se utiliza en concentraciones del 5 % al 10 % con temperaturas de hasta 60° C comúnmente, es necesario usar equipo de protección debido a que libera pequeñas cantidades de vapor en la reacción química con el metal y la temperatura.

Algunos procesos adicionales al decapado y que en este caso son aplicados al caso específico del cortador 1455-9116 son por ejemplo procesos de rebabeo y sand blast.

El proceso de rebabeo es utilizado para remover muchas de las impuras en la superficie del metal, este proceso no causa un daño considerable sobre la pieza, algunas veces dependiendo de la herramienta de rebabeo, el proceso puede ser algo difícil, sobre todo en piezas con cierta dureza, el rebabeo con cerdas metálicas puede ayudar y eficientizar el proceso de decapado.

El proceso de sand blast es un proceso donde esferas, comúnmente arena sílica, son disparados a la superficie del metal para producir una superficie más lisa, y a su vez ayudar a eliminar óxidos en la superficie, este proceso es algo agresivo ya que, se tiene que utilizar un tamaño de grano de arena adecuado al acabado deseado en la pieza y una velocidad y cantidad de arena adecuada al tipo de material.

4.3 Aplicación de recubrimiento por deposición física en la fase de vapor (PVD).

Para el caso de estudio de esta tesis se explica el proceso de aplicación del recubrimiento para el cortador 1455-9102, así como algunas características importantes de los recubrimientos que se aplicarán.

El proceso de deposición física en fase de vapor, algunas veces también llamado proceso de aplicación de capa es un proceso de deposición atómica en el que un material es vaporizado de un estado sólido o líquido a su forma de átomos o moléculas y transportado en forma de vapor por medio de vacío o gas a baja presión. El ambiente en el que este debe ser aplicado es en un ambiente de sustrato, donde el vapor se condensa. El proceso de PVD es usado para depositar láminas con grosores de la escala de nanómetros, a su vez se pueden agregar una o más capas de estas láminas en la superficie a recubrir. [29] Algunas de las aplicaciones del PVD son en la rama de la microscopía, recubrimientos hidrofóbicos, sensores y filtros ópticos, entre sus ventajas se encuentran aplicaciones de capas de alta pureza y permite un control muy preciso en el grosor de capa que se va a aplicar, tiene costos de producción bajos y se puede replicar a grandes escalas de producción con un proceso estable y repetitivo. [23]

La uniformidad en las capas de recubrimiento aplicadas es muy importante, esto dependerá directamente del proceso de aplicación, por ejemplo, la geometría de la pieza a la cual se le va a aplicar la capa, la presión de vacío la temperatura, entre otras. Algunos trabajos en donde se han estudiado los parámetros de aplicación para la PVD fueron investigados por Talbot, Ramprasad, Usoskin, Guo y Kotlikov. [24, 25, 26, 27 y 28]

Para que la PVD sea atractivamente comercialmente depende de una serie de pasos como lo son la elección del sustrato, definir y especificar las propiedades críticas del sustrato, realizar una preparación adecuada de la superficie en que se aplicará el recubrimiento, como métodos de limpieza como el sandblast, selección del recubrimiento a aplicar, realizar evaluaciones de capacidad de proceso y asegurar que bajo ciertos parámetros se pueda repetir el grosor y la uniformidad de la capa de recubrimiento, tener disponible el equipo de producción necesario, establecer parámetros y técnicas de monitoreo de los mismos, alguna técnica de caracterización es necesaria para evaluar los grosores de las capas de recubrimiento y las propiedades del mismo, desarrollar procesos para reprocesar material o reparar piezas con recubrimientos defectuosos y desarrollar instrucciones de trabajo para el proceso de manufactura. [29]

En el trabajo mostrado por Fuki, H [30] muestra el resultado de una correcta aplicación de un recubrimiento en un cortador de tipo inserto para un engrane después de ciertas condiciones de corte (Figura 4.8), en la Figura a) muestra el borde de la punta del diente del cortador sin ningún tipo de recubrimiento, es decir solamente el carburo del que se compone el inserto, en este se puede observar un daño severo en forma de cráter alargado después de 15 segundos de uso. En la Figura b) se muestra el mismo carburo recubierto de una capa de .0005 mm de nitruro de titanio (Ti_N), esta muestra un cráter más pequeño después de 120 segundos de uso. En la Figura c) aparece un inserto de carburo recubierto con nitruro de titanio y alúmina (Ti_N/Al_2O_3) con un espesor de 0.0005 mm a 0.001 mm, después de 240 segundos de uso, este no muestra daño alguno.

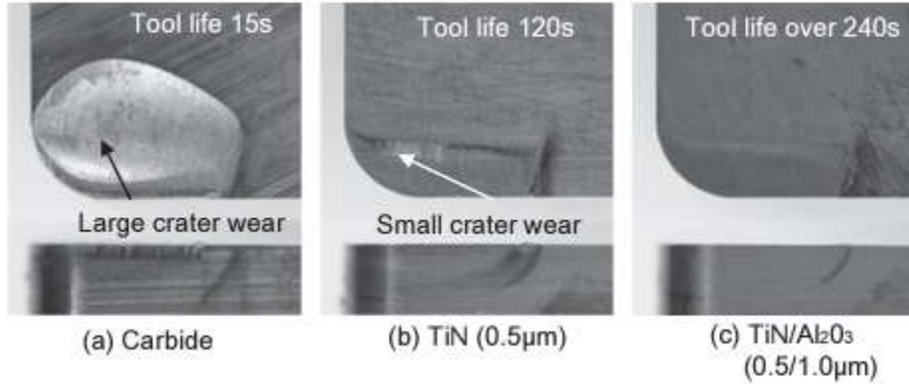


Figura 4.8 Inserto de carburo con diferentes capas de recubrimiento a diferentes tiempos de trabajo.

Fukui, H [30] también muestra como se ve un cortador de diente de tipo inserto se ve con y sin aplicación de un recubrimiento (Figura 4.9). Se puede observar que en ambas tomas tanto la toma por encima del borde y la toma de uno de los flancos, al no tener recubrimiento el cortador usado a una velocidad de corte de 300 m/min y una superficie de corte de 9 mm el cortador presenta adhesión de material en su superficie. Sin embargo, al aplicar un recubrimiento el cortador no presenta daño alguno y no hay evidencia de adhesión de metal proveniente de la pieza que se procesó.

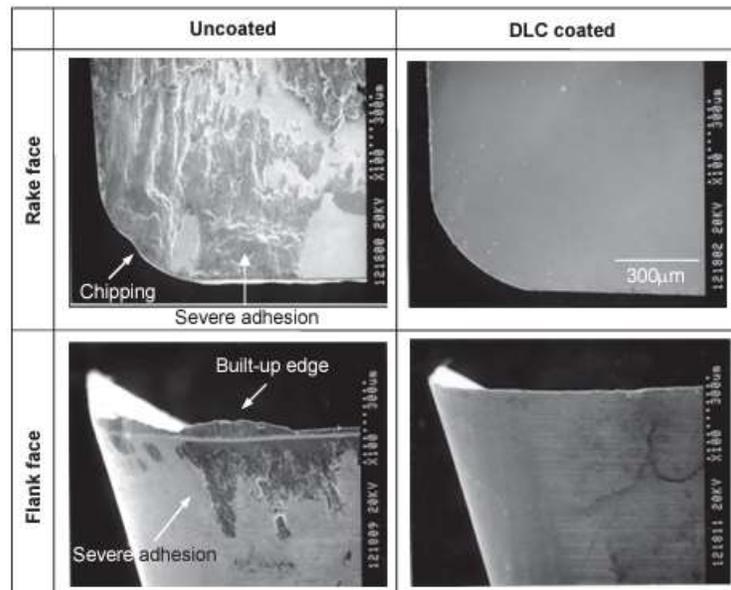


Figura 4.9 Inserto para diente de engrane recubierto por una técnica de DLC (Diamond-like carbon) visto desde un microscopio electrónico de barrido con y sin recubrimiento. [30]

4.4 Recubrimiento Alcrona y Altensa.

El proceso de decapado y recubrimiento durante el estudio de esta tesis fue realizado por un proveedor ajeno a Caterpillar, en este caso Oerlikon, Balzers, empresa que se encuentra ubicada en Querétaro, Querétaro. Caterpillar no compra el servicio de recubrimiento directamente a Balzers, sino que lo compra a Gleason, empresa encargada de hacer el reafilado de los cortadores, por tanto, la logística del proceso queda de acuerdo con el diagrama de flujo mostrado en la Figura 4.10.

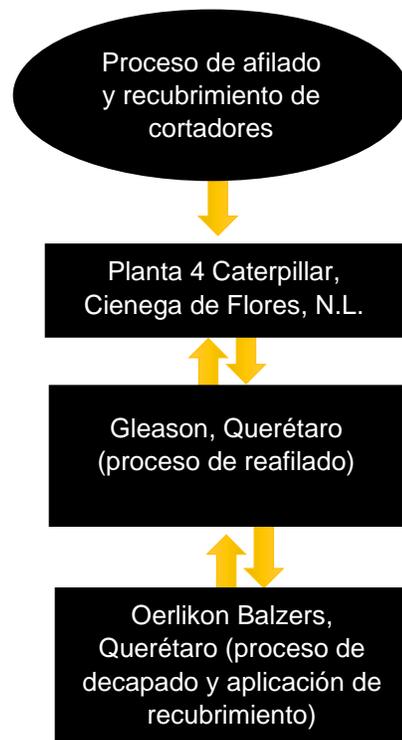


Figura 4.10 Diagrama de flujo logístico para el reafilado de cortadores. [2]

La compañía Oerlikon Balzers ubicada en Querétaro cuenta con la propiedad intelectual de algunos recubrimientos, y es uno de los principales proveedores de aplicaciones de recubrimientos para herramientas en el país y también alrededor del mundo con industrias como la automotriz, aeroespacial, médica, alimenticia, energía, ingeniería, semiconductores. Herramientas de todo tipo como cortadores, formadores de metal, procesamiento de plásticos y fundición. Algunos tipos de herramientas que recubre este proveedor son herramientas para barrenado, fresado, torneado, brochado y generado de diente.

Para las herramientas de generado de diente, cuentan con variedad de recubrimientos los cuales recomiendan dependiendo del material que vaya a ser transformado, el tipo de proceso, el tipo de enfriamiento, es decir si el corte se realiza en seco o con algún soluble o aceite de corte, así como velocidades de corte y módulo, misma definición abordada en el capítulo III de esta tesis.

Al colocar las características del proceso en el que trabaja el número de cortador 1455-9102, la página del proveedor Oerlikon Balzers nos sugiere dos recubrimientos, el recubrimiento Alcrona y el recubrimiento Altensa (Figura 4.11).

The screenshot shows a search interface with the following parameters:

- Material group:** Steel < 1000N/mm2
- Tool and substrate:** Skiving tools
- Cooling:** Wet
- Module:** > 8
- Cutting speed:** Medium

A "Search" button is located below the input fields.

The search results are displayed in a table with the following columns:

Solution	Coating material	Coating technology	Coating hardness H _{IT} [GPa]	Coefficient of friction (dry) vs. steel	Max. service temp. [°C]	Process temperature [°C]	
BALINIT ALTENSA	AlCrN-based	Arc	40 +/-3	-	1100	< 500	↓
BALINIT ALCRONA PRO	AlCrN-based	Arc	36 +/-3	~0.6	1100	< 500	↓

Figura 4.11 Recubrimientos Balzers sugeridos para la aplicación del cortador 1455-9102. [31]

De acuerdo con la especificación del proveedor, el recubrimiento Alcrona, puede ser aplicado a fresas madre, también conocidas como herramientas tipo hob para generado de dientes de engranes, piezas de fundición, maquinado con y sin liquido de corte, brocas, cuchillas y cortadores para piezas de acero de hasta 52 HRC.

En la Figura 4.12 podemos observar un estudio realizado por Balzers [31] de una herramienta tipo hob con un recubrimiento Alcrona.



Figura 4.12 Productividad de herramienta tipo hob con recubrimiento Alcrona en un acero AISI5120 y acero AISI8620 comparada con un recubrimiento de aluminio-titanio-niquel (AlTiN). [31]

En la gráfica de barras comparativa entre recubrimientos se muestran dos ejemplos; en el ejemplo de la izquierda, una herramienta de tipo hob en condiciones de maquinado seco, a una velocidad de 200 m/min y con un avance de remoción de material de .3 mm por pasada, se obtuvo un rendimiento de 5000 piezas para el recubrimiento Alcrona, a comparación del recubrimiento a base de aluminio-titanio-niquel de 2000 piezas, es decir, el rendimiento de este recubrimiento aumentó en un 120%. Mientras que, para el ejemplo de la derecha, en un hob en condiciones de maquinado con aceite de corte, una velocidad de 110 m/min y una altura de pieza de 3 mm se compara con un proceso incluso más agresivo de 146 m/min de velocidad de corte y una altura de pieza de 4 mm logra un 210% más de rendimiento, es decir de 700 piezas logra un total de 2500 piezas.

En trabajos como el de J.L. Endrino, Rabinovich, Reiter [32] estudian el comportamiento de los compuestos del recubrimiento alcrona bajo ciertas condiciones de trabajo y diferentes concentraciones de compuestos evaluando su porcentaje de oxidación. Recomienda adicionar algunos elementos al compuesto y un cierto número de capas a

aplicar en el cortador o herramienta que se vaya a aplicar, esto trae como consecuencia un aumento en la temperatura en donde los compuestos comienzan a oxidarse.

C. Tritremmel [33] en su trabajo del análisis mecánico y tribológico de compuestos *AlTiN* y *AlCrBN* aplicado en multicapas de 5 a 180 nm y de 5 a 60 nm en menor cantidad de capas aumentan su resistencia al impacto hasta por encima de 50 GPa y su resistencia a la compresión hasta – 250 MPa mostrando mejores resultados que los recubrimientos comerciales de Balzers.

El recubrimiento altensa (Figura 4.11) al igual que el recubrimiento alcrona, es usualmente aplicado a herramientas como hob's, cortadores, insertos, cuchillas, brocas y piezas de acero en procesos de generado de dientes como hobeado, shaping, skiving y procesos de maquinado convencional como torneado y fresado.

La base del recubrimiento es la misma que el recubrimiento alcrona (*AlCrN*), temperatura de proceso de hasta 500°C, máxima resistencia de temperatura antes de oxidación de 1100 °C, y presenta una mejora en la resistencia al impacto probada en el recubrimiento, ya que el recubrimiento alcrona muestra una resistencia de 36 GPa, mientras el altensa muestra una resistencia de 40 GPa. [31]

En la Figura 4.13 se puede observar una referencia del proveedor Balzers de un aumento en el rendimiento de las herramientas de corte probadas. En la gráfica de la izquierda se analiza una herramienta de tipo cuchilla de carburo en un acero AISI 5115 con una velocidad de corte de 148 m/min usado en el recubrimiento alcrona, contra una velocidad de corte de 200 m/min en el recubrimiento altensa, ambas con un corte en seco mostraron un aumento en la productividad de 1300 piezas a 1700 piezas, esto indica un aumento en la vida de la herramienta del 30%. En la gráfica de la derecha se puede observar un tallador usado en un acero AISI 5115 con un módulo de 1.56 con lubricación, en ella se muestra una comparativa entre el recubrimiento alcrona y altensa con las mismas condiciones de corte observando un aumento considerable en la productividad, de 500 piezas pasó a 1200 piezas, es decir un aumento del 140% en las piezas producidas.



Figura 4.13 Productividad de cuchilla de carburo y un tallador con recubrimiento altensa en un acero AISI515 comparada con un recubrimiento alcrona. [31]

El desarrollo del recubrimiento alcrona y alcrona pro comenzó a ser utilizado por empresas en México a mediados del año 2020, por tanto, la literatura encontrada ha sido limitada en cuanto a experimentaciones y trabajos encontrados, sin embargo, de acuerdo con González, S. A. P., & Díaz, L. A. C. [34] comparó en su trabajo los 3 principales recubrimientos de Balzers (alcrona, alcrona pro, que es una mejora en composición química del recubrimiento alcrona original y altensa) en el que encontró un aumento en la vida de la herramienta recubierta con el recubrimiento altensa por medio de la PVD. Comparada con la herramienta sin recubrimiento, presentó un aumento del 400%; comparada con el recubrimiento alcrona con una sola capa, un aumento del 100%; el recubrimiento alcrona con multicapa, un 43%, esto con espesores de recubrimiento de 0.0005 mm a 0.004 mm, en un cortador de tipo tallador usado en engranes de la industria automotriz en el año 2021.

Capítulo V

5.1 Metodología experimental.

El proceso de generado de diente interno más utilizado para la manufactura de engranes de tipo recto es el proceso de Shaping, las repetidas ocasiones en que el pistón baja y

sube, lo hacen un proceso lento; a su vez las fuerzas que actúan durante el proceso, aunque son similares al proceso Skiving se tienen que analizar de diferente manera [35].

El principio de los movimientos del proceso Shaping se encuentran ilustrados en la Figura 5.1.1 en donde la Figura (a) nos presenta el blank del engrane que se refiere a la pieza que se está maquinando, el cortador Shaper y el movimiento que desempeña el cortador para generar el diente del engrane. El pistón baja haciendo contacto con la pieza, y una vez abajo realiza un movimiento de retorno en donde vuelve a subir y se vuelve a colocar en su posición inicial, simulando un movimiento rectangular en el eje del pistón donde el cortador está colocado.

(b) Avance de rotación y avance radial, estos movimientos nos explican como el cortador avanza para generar los dientes en la pieza haciendo dos movimientos de rotación, uno de la pieza (rotary feed) y otro del cortador (radial feed).

(c) En esta figura se muestran los sistemas de coordenadas de la herramienta y la pieza de una máquina Shaper común de 3 ejes.

(d) La manivela de deslizamiento se encuentra en la parte superior del pistón que sostiene al cortador y se encuentra configurada para moverse en un eje rotacional que hace que el pistón avance y se retraiga, tal como se explicó en la Figura a. El movimiento en el eje Z es el que hace posible que el pistón con el cortador baje y suba.

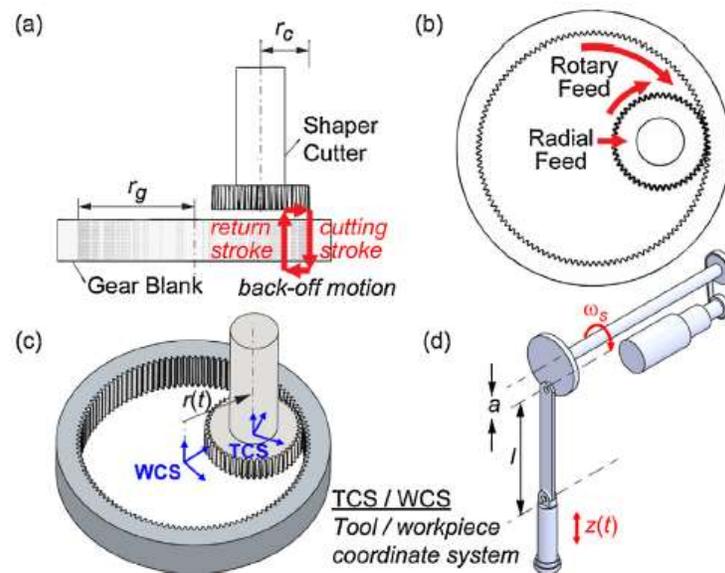


Figura 5.1.1. Principales movimientos y geometrías en el proceso de Shaping, (a) corte, (b) movimientos de avance, (c) Sistema de coordenadas de cortador y piezas, (d) manivela de deslizamiento de máquina para proceso Shaping [35].

Skiving es un proceso continuo donde dependiendo del avance de corte que tenga el programa el cortador generará rebaba más gruesa o delgada, esto influirá directamente en el desgaste del cortador, así como en el desempeño del recubrimiento.

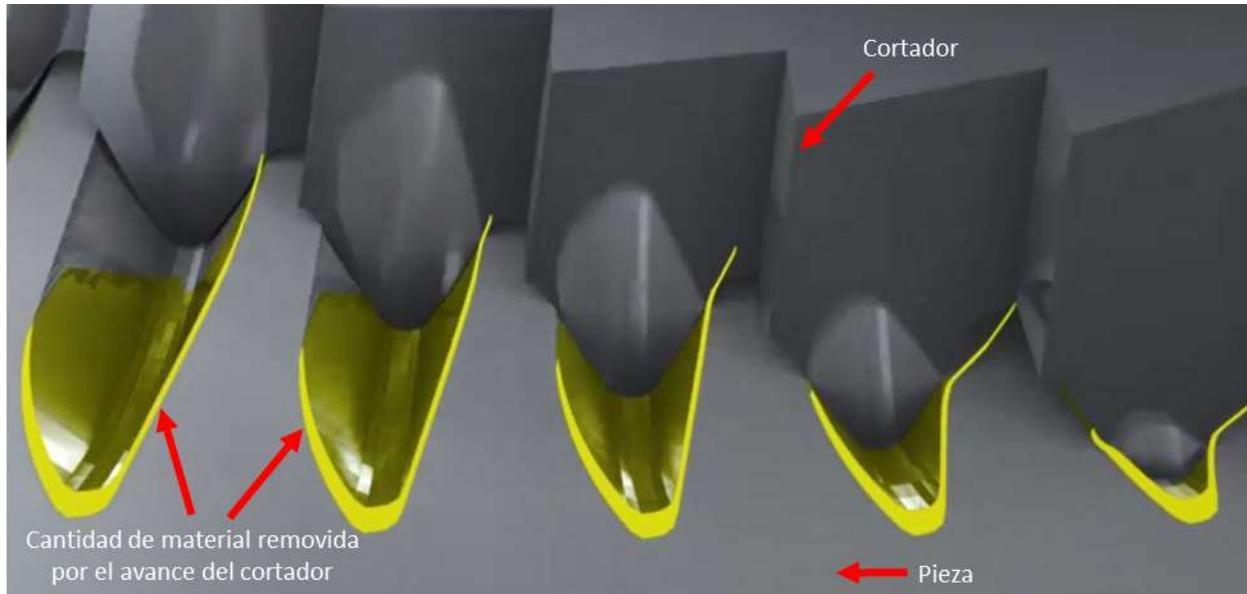


Figura 5.1.2 Avance de corte y remoción de material en un proceso de Skiving.

Durante inicios del año 2018, al iniciar este proceso de manufactura en México, se buscaba reducir los tiempos de ciclo de los procesos Skiving, así como sacar el máximo provecho de los cortadores, desde entonces los parámetros de corte como avances y velocidades se han llevado hasta los máximos límites permitidos, y esto es hasta que los cortadores garanticen una calidad aceptable, mediante métodos experimentales realizados en otros trabajos de Caterpillar y en colaboración con las recomendaciones del proveedor se ha concluido que desgastes presentados en los cortadores de entre 0.3 mm y no más de 0.5 mm pueden dar resultados aceptados en calidad.

Las variables de entrada (x) que se estarán evaluando son las siguientes:

- Proceso de reafilado.
- Proceso de recubrimiento.
- Tipo de recubrimiento.
- Dureza del recubrimiento.
- Espesor del recubrimiento.

Las variables de salida (y) enfocadas en la calidad y costo del producto son las siguientes:

- $f_{H\beta}$ (Inclinación de la hélice).
- $f_{f\beta}$ (Forma de la hélice).
- Desgaste presentado en el cortador.

5.2 Espesor del recubrimiento.

La medición del espesor del recubrimiento es una variable muy importante para evaluar, ya que este recubrimiento es el encargado de elevar, reducir o mantener el desempeño de los cortadores, así como de aumentar o disminuir la productividad del proceso.

El espesor del recubrimiento se determinó realizando una prueba destructiva que consistió en cortar una parte o partes del componente a evaluar, para luego montar esas piezas cortadas en un microscopio en el que se realizaron las mediciones.

Las piezas se pulieron y atacaron mediante un ataque de 2 gramos de sulfato cúprico disuelto en 500 ml de agua.

El microscopio que se utilizó para realizar esta medición fue un microscopio de la marca Leco con una amplificación de 250 x. Esto con la finalidad de poder realizar la medición del espesor de la capa de recubrimiento que el proveedor aplicó.

Durante la primera evaluación se cortó una sección del cortador Altensa, el resultado se puede observar en la Figura 5.2.1.

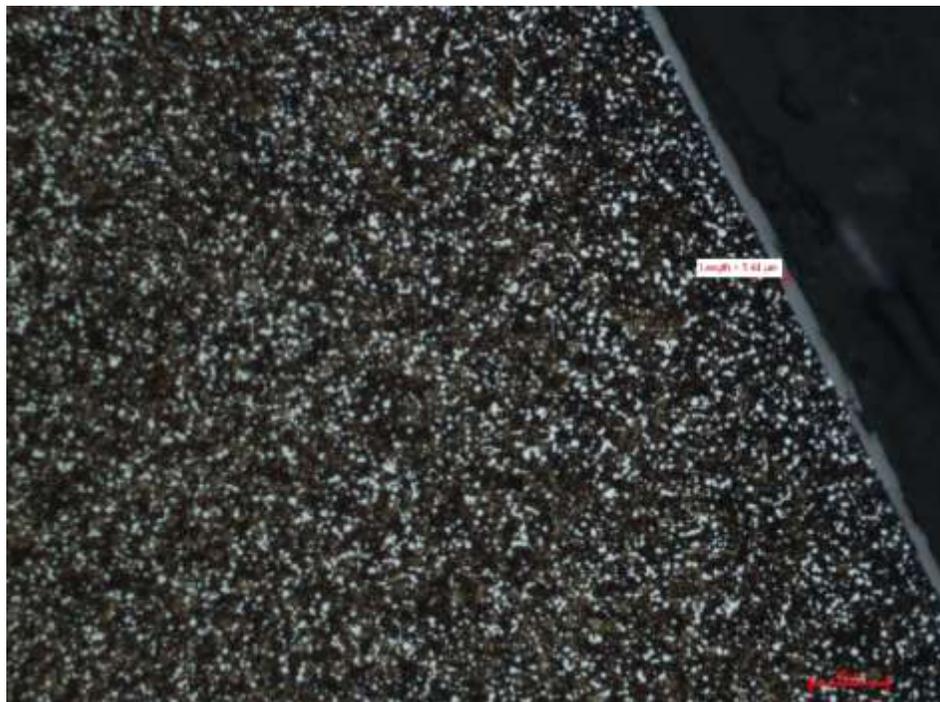


Figura 5.2.1. Fotografía de diente de cortador lateral con un grosor de recubrimiento de 3.44 micras en el recubrimiento Altensa.

Para la segunda prueba se cortó una sección del cortador con el recubrimiento Alcrona, el resultado se puede observar en la Figura 5.2.2.



Figura 5.2.2 Fotografía de diente de cortador lateral con un grosor de recubrimiento de 2.96 micras en el recubrimiento Alcrona.

De acuerdo con la Figura 5.2.3, se puede observar una diferencia que puede jugar un rol importante en el resultado de las pruebas que se definirán en el diseño de experimentos más adelante en este capítulo.

Results for Plating / Coating - General

ALCRONA (Plating / Coating - General)

Test	Location	Results
Plating_Thickness	Loc 1	2.95 μm - 2.97 μm

ALTENSA (Plating / Coating - General)

Test	Location	Results
Plating_Thickness	Loc 1	3.44 μm - 3.42 μm

Figura 5.2.3. Comparativa de espesor de recubrimientos aplicados Alcrona y Altensa.

Para el recubrimiento Altensa, se muestra un aumento en el grosor del recubrimiento de hasta un 15%, factor que puede influir en los resultados de desempeño de este cortador.

5.3 Dureza en recubrimientos.

El resultado de una prueba de dureza consiste en la resistencia que presenta un material ante la penetración en su superficie por un objeto más duro [4].

Como ya se planteó al inicio de este capítulo, una de las variables de entrada (X) es la dureza del recubrimiento con el que se va a estar trabajando.

Las pruebas de dureza a las que se sometieron estos recubrimientos fueron dureza Vickers y dureza Rockwell. Los resultados de las pruebas de dureza se utilizan como una base cualitativa para comparar materiales y no tienen unidades de medida [4].

La prueba de dureza Rockwell consiste en penetrar una punta de cierta geometría con cierta fuerza. Se utilizó un durómetro portátil de marca SonoDur, como se puede observar en la Figura 5.3.1.



Figura 5.3.1. Evaluación de dureza de recubrimiento Altensa con máquina SonoDur.

La escala de dureza que se utilizó para esas pruebas fue la Rockwell A y consistió en penetrar la pieza con una punta con una geometría en forma de cono con una carga aproximada de 60 kg, los resultados para los recubrimientos Altensa y Alcrona se pueden observar en la Figura 5.3.2.

Results for Rockwell Surface Hardness

ALCRONA (Rockwell Surface Hardness

Test	Location	Results
Rockwell Surface Hardness Result	Loc 1	64 HRC - 63 HRC

ALTENSA (Rockwell Surface Hardness - ASTM E18)

Test	Location	Results
Rockwell Surface Hardness Result	Loc 1	64 HRC - 64 HRC

Figura 5.3.2. Resultados de dureza Rockwell para los recubrimientos Alcrona y Altensa.

Además de evaluar la dureza Rockwell del cortador, también se realizó una prueba de microdureza que consistió en penetrar la pieza con una punta, pero con una carga mucho menor a la utilizada en la dureza Rockwell, la carga que se aplicó fue menor a 10 Kg. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 5.3.3.

General Comments and Results for Vickers Microhardness
HV a 100g

ALCRONA (Vickers Microhardness)

Test	Location	Results
Vickers Hardness - ASTM E384	Loc 1	1046 HV - 1119 HV

ALTENSA (Vickers Microhardness)

Test	Location	Results
Vickers Hardness - ASTM E384	Loc 1	1161 HV - 1266 HV

Figura 5.3.3. Resultado de microdureza Vickers para recubrimientos Alcrona y Altensa.

Se puede observar que para ambos recubrimientos la dureza Rockwell y microdureza Vickers fueron muy similares, no hubo alguna variación que sea de consideración para el diseño de experimentos.

5.4 Diseño de experimentos.

Pulido (2004) cita que un experimento se define como un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto [36].

Para la primera prueba se evaluó el cambio en la variable de entrada proceso de reafilado, se aseguró con las mediciones descritas en las Tablas 5.1.3 y 5.1.4 que las variables de entrada permanecieron iguales, salvo el proveedor.

Tabla 5.1.3. Evaluación de proceso de reafilado de proveedor.

Prueba	Proveedor	
	Gleason	Starsu
Proceso de reafilado	x	x
Proceso de recubrimiento	Balzars	Balzars
Tipo de recubrimiento	Alcrona	Alcrona
Dureza del recubrimiento	1100 Hv	1100 Hv
Espesor del recubrimiento	3 micras	3 micras

Para la segunda prueba se evaluó la propuesta de recubrimiento ofrecida por el proveedor Starsu (Altensa), las variables de entrada a medir para esta segunda prueba se pueden observar en la Tabla 5.1.4

Tabla 5.1.4. Evaluación del recubrimiento Alcrona Vs. Altensa.

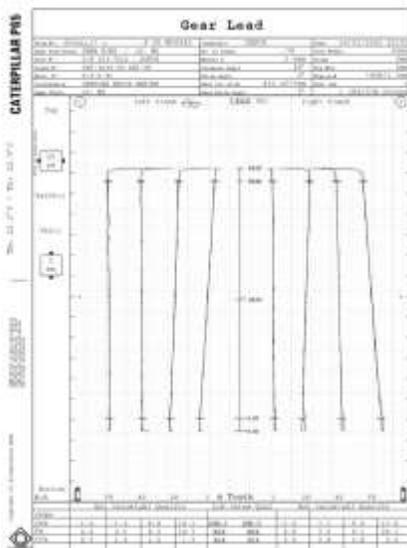
Prueba	Proveedor	
	Gleason	Starsu
Proceso de reafilado	x	x
Proceso de recubrimiento	Balzars	Balzars
Tipo de recubrimiento	Alcrona	Altensa
Dureza del recubrimiento	1100 Hv	1100 Hv
Espesor del recubrimiento	3 micras	3.4 micras

Capítulo VI

6.1 Resultados.

Para la evaluación de acabados superficiales se tomaron en cuenta mediciones de la geometría del diente del engrane, en específico la característica de error de forma e inclinación de la hélice, también abreviadas con la simbología $ff\beta$ y $fH\beta$ respectivamente, tal cual se muestra en las Figuras 6.1.1 y 6.1.2.

Hélice / Lead ($ff\beta$ y $fH\beta$):



Bottom	1st Tooth				2nd Tooth			
Min	Max	Avg	StDev	Min	Max	Avg	StDev	
115	114	113	0.2	112	111	110	0.2	
115	114	113	0.2	112	111	110	0.2	

Figura 6.1.1. Resultado de hélice ($f_{f\beta}$ y $f_{H\beta}$) con cortador de recubrimiento Alcrona (proveedor Gleason).

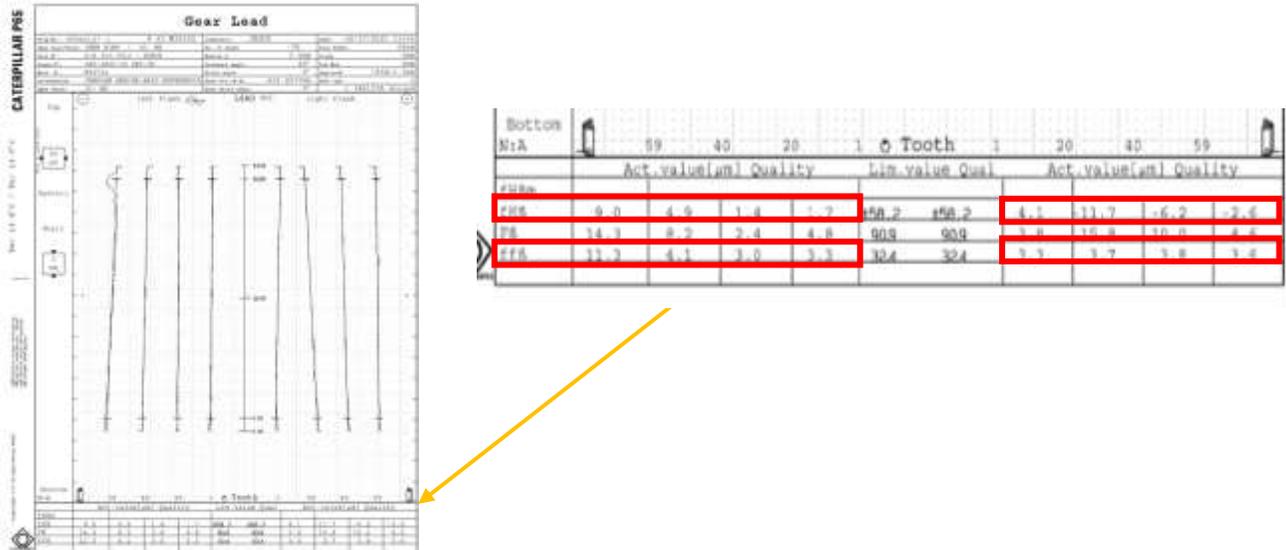


Figura 6.1.2. Resultado de hélice ($f_{f\beta}$ y $f_{H\beta}$) cortador de recubrimiento Alcrona (Proveedor StarSu).

El primer resultado está dado por la comparativa entre proveedores de reafilado de cortadores, es decir, se utilizó el mismo recubrimiento y solamente se cambió el proveedor de reafilado, la variación entre resultados fue la siguiente:

Tabla 6.1.1 Resultado de 4 dientes en flancos izquierdo y derecho en las características de $f_{f\beta}$ y $f_{H\beta}$. Proveedor de reafilado de cortadores Gleason con recubrimiento Alcrona.

Reafilado Gleason / Recubrimiento Alcrona										
Número de diente	Flanco izquierdo				Promedio flanco izquierdo	Flanco derecho				Promedio flanco derecho
	59	40	20	1		1	20	40	59	
$f_{H\beta}$ (Inclinación de la hélice)	-1.4	-1.3	8.2	14.1	4.9	-1.6	7.1	-5.2	-17.6	-4.325
$f_{f\beta}$ (Forma de la hélice)	2.3	1.3	1.5	1.3	1.6	3.4	3.8	3.8	3	3.5

Tabla 6.1.2 Resultado de 4 dientes en flancos izquierdo y derecho en las características de $f_{H\beta}$ y $f_{f\beta}$. Proveedor de reafilado de cortadores Starsu con recubrimiento Alcrona.

Reafilado Starsu / Recubrimiento Alcrona										
Número de diente	Flanco izquierdo				Promedio flanco izquierdo	Flanco derecho				Promedio flanco derecho
	59	40	20	1		1	20	40	59	
$f_{H\beta}$ (Inclinación de la hélice)	9	4.9	1.4	1.7	4.25	4.1	-11.7	-6.2	-2.6	-4.1
$f_{f\beta}$ (Forma de la hélice)	11.3	4.1	3	3.3	5.425	3.3	3.7	3.8	3.6	3.6

Una vez obtenidos los resultados de inclinación y forma de la hélice de ambos proveedores, que es como se determinó que se evaluarían, se realizó una Tabla comparativa. Una variación de un 20 % en las tolerancias es aceptable debido al cambio en el proceso de reafilado que está sufriendo el cortador, lo cual aún permite tener tolerancia libre en los procesos internos a los cuales se someterá el número de parte.

Tabla 6.1.3 Tabla comparativa de variación promedio entre flancos izquierdo y derecho para las características de hélice $f_{H\beta}$ y $f_{f\beta}$, proveedor de reafilado Gleason Vs. Proveedor de reafilado Starsu.

Variación promedio aceptable \leq a 20%										
Número de diente	Flanco izquierdo				Promedio flanco izquierdo	Flanco derecho				Promedio flanco derecho
	59	40	20	1		1	20	40	59	
$f_{H\beta}$ (Inclinación de la hélice)	-18%	-11%	12%	21%	1%	-10%	32%	2%	-26%	0%
$f_{f\beta}$ (Forma de la hélice)	-28%	-9%	-5%	-6%	-12%	0%	0%	0%	-2%	0%

De acuerdo con la Tabla 6.1.3 la variación promedio de los 4 dientes evaluados en la comparativa de proveedor de reafilados es menor al 20%, lo cual, de acuerdo con requerimientos establecidos por Caterpillar, es una variación aceptable.

Después de 40 piezas procesadas para uno de los números de parte, igualando condiciones de corte, se evaluó el desempeño del recubrimiento con la ayuda de un microscopio de tipo USB de la marca DNT de 5 Megapíxeles. El aumento al cual se evaluó este daño fue a 120 x.



Figura 6.1.3. Desgaste presentado en cortador reafilado por proveedor Gleason en microscopio DNT 5 MP 120 x.



Figura 6.1.4. Desgaste presentado en cortador reafilado por proveedor Starsu en microscopio DNT 5 MP 120 x.

De acuerdo con la Figura 6.1.3, el desgaste presentado en el cortador de Gleason se asemeja con el desgaste presentado en el cortador que afiló Starsu (Figura 6.1.4), el mayor desgaste encontrado fue de 0.056 mm en el cortador de Gleason contra un desgaste de 0.053 mm en el cortador de Starsu. Presentando una variación de 0.003 mm y ambos estando dentro del desgaste máximo permitido de 0.300 mm a 0.500 mm recomendado por el proveedor que manufactura los cortadores y en donde garantiza el desempeño de éste. Por tanto, el reafilado con el proveedor Starsu fue aprobado.

Para el siguiente análisis de acabado superficial, se decidieron evaluar las mismas características que el recubrimiento Alcrona, es decir, el error de forma e inclinación de la hélice ($ff\beta$ y $fH\beta$), sin embargo, en esta ocasión se decidió evaluar el recubrimiento Alcrona (proveedor Gleason) Figura 6.1.5 y Tabla 6.1.4, y el recubrimiento Altensa (proveedor Starsu) Figura 6.1.6 y Tabla 6.1.5 y realizar una comparativa (Tabla 6.1.6).

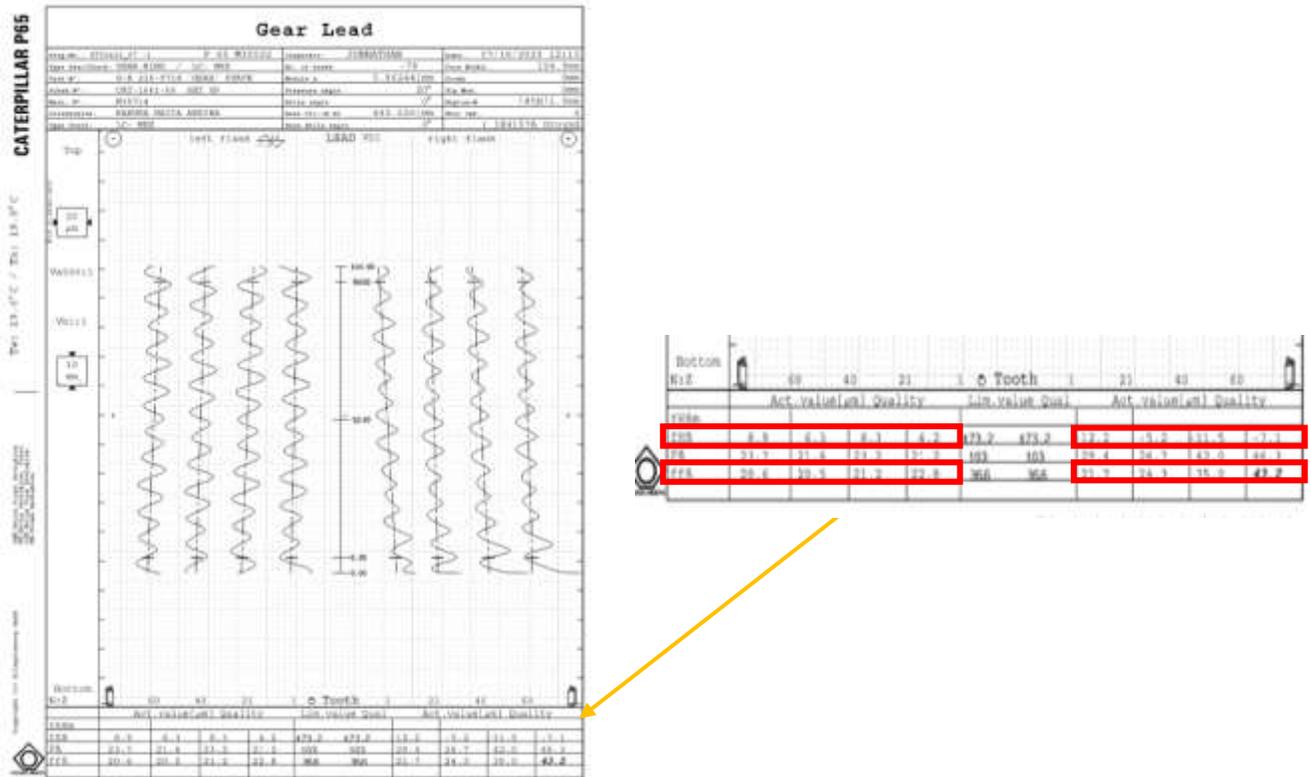


Figura 6.1.6 Resultado de hélice $f_{f\beta}$ y $f_{H\beta}$ cortador de recubrimiento Altensa (Proveedor Starsu).

Tabla 6.1.4 Resultado de geometría proveedor de reafilado Gleason, recubrimiento Alcrona.

Reafilado Gleason / Recubrimiento Alcrona											
	Flanco izquierdo				Promedi o flanco izquierdo	Flanco derecho				Promedio flanco derecho	
	59	40	20	1		1	20	40	59		
Número de diente	59	40	20	1		1	20	40	59		
$f_{H\beta}$ (Inclinación de la hélice)	19.8	-10.4	20.3	-12	4.55	-13.5	6.9	-9.2	4.9	-2.725	
$f_{f\beta}$ (Forma de la hélice)	9	8.1	7.7	8	8.2	18.4	9.5	10.7	10.5	12.275	

Tabla 6.1.5 Resultado de geometría proveedor de reafilado Starsu, recubrimiento Altensa.

Reafilado Starsu / Recubrimiento Alcrona										
	Flanco izquierdo				Promedio flanco izquierdo	Flanco derecho				Promedio flanco derecho
Número de diente	59	40	20	1		1	20	40	59	
$f_{H\beta}$ (Inclinación de la hélice)	8.9	6.3	8.3	4.2	6.925	-12.2	-5.2	-12	-7.1	-9
$f_{f\beta}$ (Forma de la hélice)	20.6	20.5	21.2	22.8	21.275	21.7	24.3	35		27

Enseguida se compararon los resultados del proveedor Gleason con el recubrimiento alcrona y el proveedor Starsu con el recubrimiento Altensa (Tabla 6.1.6).

Tabla 6.1.6 Tabla comparativa de variación promedio entre flancos, proveedor de reafilado Gleason Vs. Proveedor de reafilado Starsu.

Variación promedio aceptable <= a 40%										
	Flanco izquierdo				Promedio flanco izquierdo	Flanco derecho				Promedio flanco derecho
Número de diente	59	40	20	1		1	20	40	59	
$f_{H\beta}$ (Inclinación de la hélice)	15%	-23%	16%	-21%	-3%	-2%	17%	3%	16%	9%
$f_{f\beta}$ (Forma de la hélice)	-32%	-34%	-37%	-40%	-36%	-9%	-40%	-66%	29%	-22%

Debido al cambio en el recubrimiento, la forma del diente pudo haber sufrido cambios y aun así estar dentro de especificación, por tanto, se abrió el rango de variación aceptable de <= 20% a <= 40%. Tal cual fue el caso del diente #1 para el error de forma, como se puede ver en la Tabla 6.1.6.

Basados en estos resultados y una variación menor a la aceptable, la calidad del diente es aceptable con el recubrimiento Altensa del proveedor StarSu.

El tiempo de vida recomendado por el proveedor, y con los parámetros de corte establecidos para este cortador con recubrimiento Alcrona de Gleason, fue de 40 piezas, sin embargo, se observó un desgaste prácticamente nulo después de procesar 40 piezas. Por tal motivo se elevó el tiempo de vida del cortador a 55 piezas y se evaluó el desempeño del mismo cortador con los recubrimientos de los dos proveedores. El desgaste del cortador está mostrado en las imágenes 6.1.7 y 6.1.8.



Figura 6.1.7. Desgaste de cortador, recubrimiento Altensa, proveedor de reafilado StarSu después de 55 piezas en microscopio DNT 5 MP 120 x.

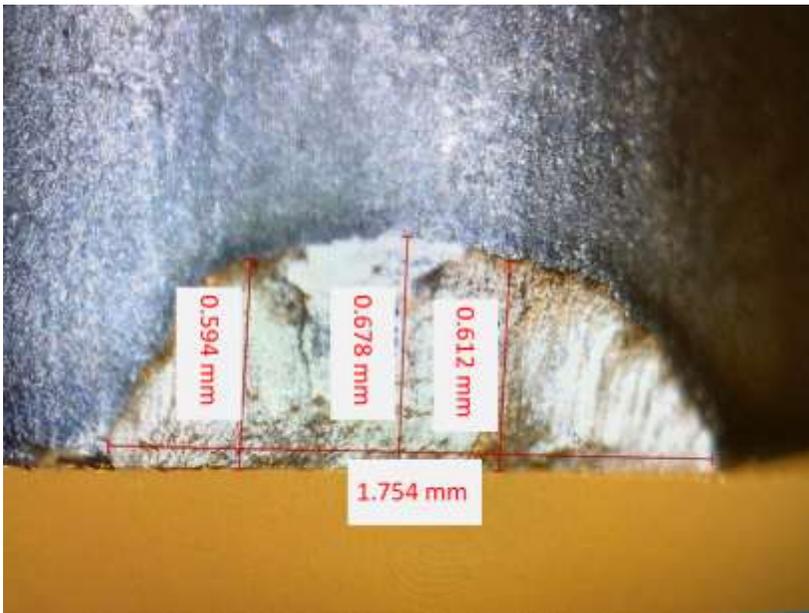


Figura 6.1.8. Desgaste de cortador, recubrimiento Alcrona, proveedor de reafilado Gleason después de 55 piezas en microscopio DNT 5 MP 120 x.

6.2 Discusión.

Al evaluar a dos proveedores se decidió realizarlo tratando de cuidar que tuvieran las condiciones de proceso de reafilado más parecidas posibles, es decir, evaluar el mismo cortador, de la misma serie y con diámetros y alturas similares, por tanto, se les solicitó información de sus máquinas para reafilado (Figura 6.2.1), como, por ejemplo, marca, modelo, y datos del programa a utilizar en la inspección de los cortadores.



Figura 6.2.1. Condiciones de reafilado en máquina rectificadora de cortadores Klingelberg, proveedor Starsu para el cortador 1455-9102.

Una vez revisada su información se decidió evaluar este reafilado con el mismo recubrimiento que se ha usado desde siempre, ya que, de no hacerlo de esta forma, se tendrían dos variables en un proceso, en caso de que se tuviera algún resultado negativo, y no se sabría que variable lo afectó.

Cuando se aseguraron las condiciones de reafilado tales como programa de reafilado, programa de inspección, y cantidad de material a remover en el reafilado, la siguiente variable a analizar fue el recubrimiento, dicho recubrimiento es aplicado por el proveedor Balzer para la evaluación del desempeño de ambos cortadores, por tanto, también se igualaron las variables de la aplicación del recubrimiento.

Para la evaluación del desempeño del cortador, se utilizó el mismo herramental, la misma máquina y el mismo recubrimiento, como normalmente lo hace el proveedor de

recubrimiento Balzers con los cortadores que afila Gleason, quizás la única variación en el proceso de recubrimiento fue la parte logística, la transportación y el manejo del material, mismo que se especificó debe ir colocado sobre una base de caucho con la forma del cortador, y a su vez envuelto en papel de cera, todo esto dentro de una caja de madera, este mismo requerimiento fue implementado para asegurar el cuidado del cortador durante su transportación de la planta de Balzers a la planta de reafilados de Gleason y Starsu, y ellos a su vez el envío de cortadores a la planta de Caterpillar.

En los resultados obtenidos se evaluó:

Hélice del engrane: el error de forma de la hélice en la mayoría de los casos viene de un mal acabado superficial en la pieza, el cual normalmente está atribuido al cortador. Una vez que los cortadores de prueba con StarSu y con Gleason se tuvieron en la planta se procesaron los dientes de un número de parte, en total se procesaron 40 piezas, mismas que los cortadores pueden maquinar en un proceso normal.

Se mostraron resultados muy similares. Se evaluaron flancos izquierdos y derechos de 4 dientes al azar de dos piezas: las piezas número 40 del cortador de Gleason y cortador de Starsu, respectivamente. Se seleccionó la última pieza hecha por el cortador, ya que en teoría esta última pieza procesada es la que menor calidad en cuanto a acabado superficial debería tener.

La variación en el promedio de los 4 dientes en la inclinación de la hélice ($f\eta\beta$) y el promedio de los 4 dientes en la forma de la hélice ($ff\beta$) hacia el lado derecho del flanco mostró un cambio o variación nula para ambas características. Para el flanco izquierdo se mostró una variación despreciable en la inclinación de la hélice y una variación aceptable para el error de forma de la hélice de un 12%. Para esta prueba y pensando que el cambio en la aplicación del recubrimiento aplicado por Gleason y aplicado por Starsu puede aumentar la variación hasta un 50%, se decidió establecer una meta de un 20% de variación hablando solamente de cambiar el proceso de reafilado. Por tanto y de acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 6.1.3 el proceso de reafilado alterno con StarSu y el mismo recubrimiento (Alcrona), es aceptable.

Desgaste del cortador: el desgaste de un cortador indica que éste mismo ya fue utilizado o bien que el recubrimiento fue removido de la parte del cortador a causa de la temperatura y el desgaste más fuerte que se tienen durante el proceso. Mediante la sugerencia de desempeño señalada por el proveedor que manufactura los cortadores y el historial de la producción a lo largo de la historia del proceso de Caterpillar, se ha determinado que en un rango de desgastes menores a 0.300 mm y hasta 0.500 mm, las características de los productos no se ven afectadas.

El desgaste del cortador de Gleason presentó resultados similares a los desgastes del cortador de Starsu con recubrimiento Alcrona, con variaciones menores al 1%, por tanto, se pueden considerar como despreciables. En 4 mediciones que se hicieron en el diente con mayor desgaste se observa que el recubrimiento se removió en máximo de 0.053 mm, desempeño que se considera aceptable para ambos cortadores.

Se decidió evaluar un recubrimiento nuevo para el proceso Skiving, el recubrimiento Altensa, dicho recubrimiento muestra propiedades mejores al actual (Alcrona). Y con dicho recubrimiento además de buscar una reducción en el costo de reafilados, se pretendía que el cortador mostrara un mejor desempeño.

Para esta segunda fase se decidió utilizar un cortador similar que se muestra en la Figura 6.2.2. Se tuvieron las mismas dos variables a evaluar, es decir el error de forma de la hélice ($ff\beta$) y la inclinación de la hélice ($f\eta\beta$) del engrane, así como el desgaste del cortador evaluado en el microscopio.



Figura 6.2.2. Cortador utilizado en la segunda fase de la experimentación (14559102).

La variación de la inclinación de la hélice para los flancos izquierdo y derecho fue de 9% para el flanco izquierdo y 3% para el flanco derecho, de una meta de 40% de variación establecida. Lo cual se puede considerar como aceptable para esta característica.

El error de forma de la hélice mostró una variación mayor, un promedio de 36% en el flanco izquierdo y 22% en el flanco derecho. Aunque el error de forma en el flanco izquierdo está muy cerca del porcentaje de variación límite, al momento de revisar el reporte de la geometría del diente, se puede observar en la imagen 6.1.6 en la parte inferior de la línea de la gráfica una línea que tiende a inclinarse en la parte inferior. Esto quiere decir que el palpador de la máquina de coordenadas detectó más material, lo cual indica que la rebaba no fue removida en un 100 % de esa pieza, aun y con el porcentaje de variación menor al 40% y bajo la consideración mencionada, el error de forma se considera aceptable para el proceso.

Una de las ventajas que se encontró durante este proyecto fue el desempeño del cortador, dicho cortador tiene una capacidad de 40 piezas, al ser evaluado el daño después de procesar estas piezas, se encontraron tendencias muy distintas en el desgaste de los cortadores, tal cual se mostró en las Figuras 6.1.7 y 6.1.8.

En la Figura 6.1.7 el cortador de Starsu con recubrimiento Altensa presentó un daño muy por debajo del límite permitido, ya que la vida del cortador se aumentó en un 40%, es decir, se cortaron 45 piezas sin que se presentara un desgaste mayor a 0.300 mm.

Al realizar la misma evaluación con el cortador de Gleason, como se puede ver en la Figura 6.1.8, con recubrimiento Alcrona con 55 piezas (mismas condiciones) se obtuvo un desempeño mucho menor al del recubrimiento con el nuevo proveedor, tal cual se puede ver en la Figura 6.1.8.

Estos resultados mostraron un mejor desempeño de los cortadores con el nuevo proveedor, como se plantea en la Tabla 6.2.1.

Tabla 6.2.1 Cortadores a sustituir recubrimiento con Alcrona.

Número de cortador	Costo StarSu	Duración (Pz)	Costo Gleason	Duración (Pz)	Ahorro directo	Incremento en duración
14559116	\$ 153.66	110	\$ 303.20	100	49%	10%
14559136	\$ 153.66	44	\$ 303.20	40	49%	10%
14559155	\$ 153.66	120	\$ 303.20	100	49%	20%
14559135	\$ 153.66	110	\$ 303.20	100	49%	10%
14559096	\$ 153.66	45	\$ 303.20	30	49%	50%
14559085	\$ 153.66	55	\$ 229.08	50	33%	10%
14558631	\$ 153.75	12	\$ 229.20	10	33%	20%
14559102	\$ 143.13	55	\$ 196.60	40	27%	38%
14559081	\$ 143.13	143	\$ 174.22	130	18%	10%
14559121	\$ 251.29	110	\$ 303.20	100	17%	10%
14559127	\$ 251.29	110	\$ 303.20	100	17%	10%
14559111	\$ 251.29	99	\$ 303.20	90	17%	10%
14559112	\$ 281.55	99	\$ 303.20	90	7%	10%
14559097	\$ 143.13	66	\$ 145.88	60	2%	10%

Basado en estudios similares, tal como lo indica Stadtfeld, H. J. (2014) [18] en su estudio donde habla del maquinado de engranes para el proceso Skiving, hay más variables además del recubrimiento que podrían influir en incrementar el número de piezas producidas, por ejemplo, implementando estrategias de corte e incluso diferentes fluidos para enfriamiento durante el maquinado. En su estudio evaluó uno de los recubrimientos que fueron objeto de estudio en la presente tesis (AlCrona) con o sin fluido de corte, en el cuál mostró que, por medio de una variación en los parámetros de corte, así como analizando el tamaño de la rebaba que se generaba como resultado del proceso de corte se podía llegar a tener mayor número de piezas por hora.

Como se puede ver en la Figura 6.2.3 se evaluaron distintos procesos en un engrane de las mismas características. Con el enfoque en los procesos Skiving, que son objeto de estudio de la presente tesis, se muestra que en un cortador de carburo sólido y bajo un tipo de corte en seco se puede llegar a obtenerse más número de piezas por hora.

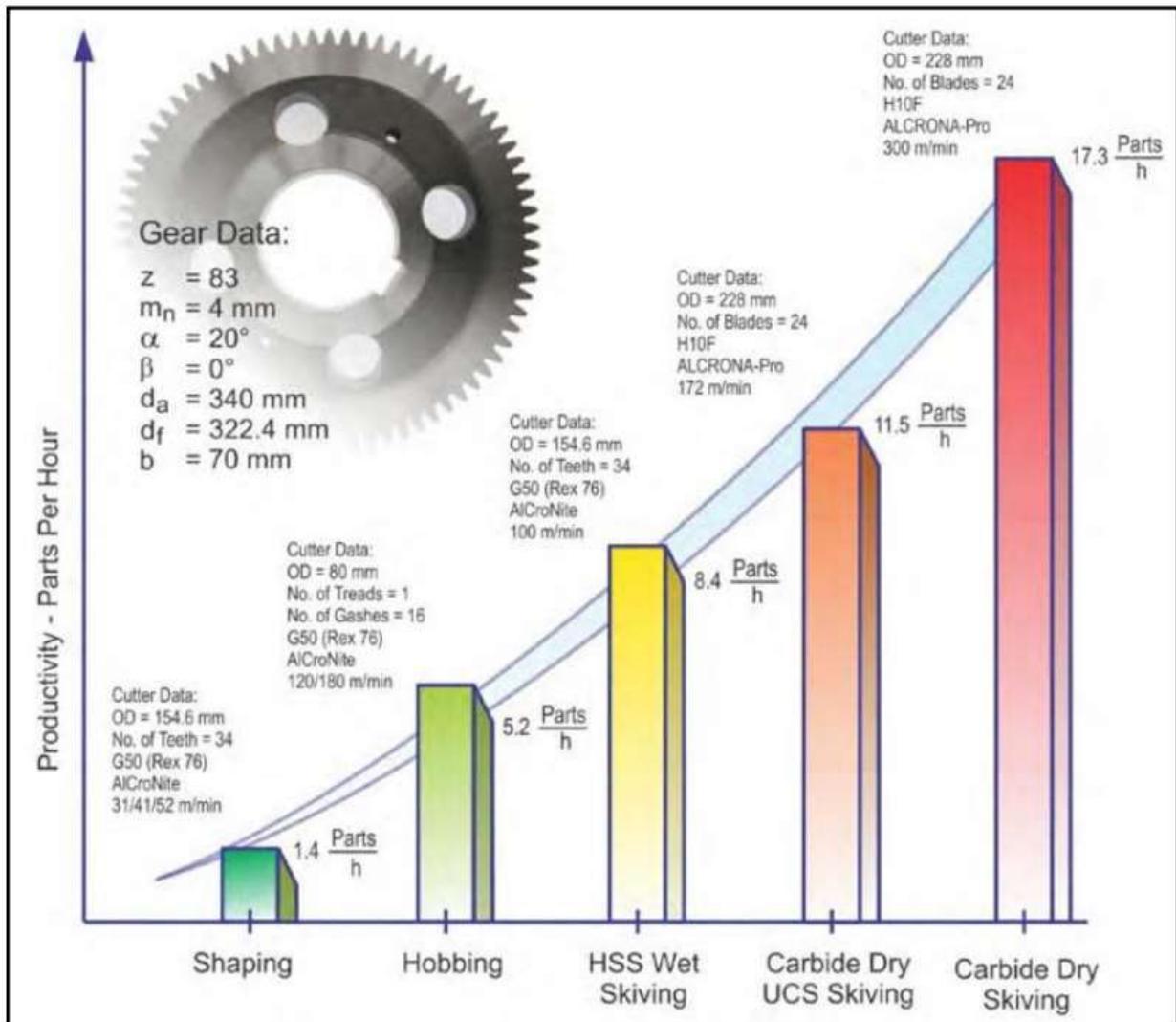


Figura 6.2.3. Comparativa en la producción de piezas en procesos de shaping, hobbing, Skiving con liquido de corte, Skiving con un tipo de cortador UCS, y Skiving con cortador de carburo sólido en un engrane de tipo recto.

Si bien no con todos los cortadores se tuvo un aumento en tiempo de vida del 40%, sí se encontraron aumentos mínimos del 10% en el tiempo de vida hasta máximos del 50%, esto representó ahorros para la empresa de hasta \$40,000 USD cumpliendo con la calidad y los requerimientos, así como una mejora en cuanto a disponibilidad de cortadores en planta. Esto último debido a que el cortador permanece más tiempo en máquina sin requerir algún cambio o sustitución.

6.3 Conclusión.

El desarrollo de un nuevo proveedor para el reafilado de cortadores utilizados en el proceso Skiver requirió la evaluación de un nuevo recubrimiento que conllevó a una mejoría en tiempo de vida de cortadores.

Para el objetivo establecido en el Capítulo 1.3, el resultado es positivo e incluso rebasó la expectativa, es decir, se tenía planeado generar ahorros con este proyecto por \$13, 000 USD o 10% del presupuesto establecido para los centros de costos del proceso Skiving. El resultado en ahorros fue de hasta \$40, 000 USD o el 30% del presupuesto.

Para los objetivos específicos establecidos en el capítulo 1.3.1, para el punto número uno, actualmente en los procesos de planta 4 se trabaja con dos proveedores autorizados, Gleason y StarSu.

Para el segundo punto establecido en los objetivos específicos, la calidad que ha presentado el proceso es aceptable e incluso iguala las condiciones del proveedor anterior, el desempeño es mucho mayor, por tanto, para este segundo objetivo se consideraría como cumplido. Para el tercer y último objetivo específico, la variable que representó mayor impacto fue el recubrimiento utilizado, es decir, haciendo variaciones en el mismo se pueden tener mejores o peores resultados y no con el proceso de reafilado de cortador.

Si bien se obtuvieron resultados favorables para la empresa Caterpillar y se cumplieron los objetivos establecidos en la presente tesis. De acuerdo con los estudios mostrados en trabajos similares, se deben estudiar más variables que interactúan con el proceso Skiving y que elevan la producción de piezas por hora.

Recomendaciones.

En estudios similares, tal es el caso del estudio realizado por Arndt, T., Klose, J., Gerstenmeyer, M., & Schulze, V. (2022) [37], se indican varios factores que pueden influir en el desempeño de la herramienta, como lo son el fluido de corte, similar a lo que mencionó Stadtfeld, H. J. (2014) [18] en su trabajo, los parámetros de corte como avances y velocidades del cortador y una evaluación de daño del inserto bajo diferentes condiciones de corte. Lo anterior lo estudiaron en engrane de acero 31CrMoV9 (AISI 4340) templado, con un cortador de tipo insertos, tal cual se muestra en la Figura 7.1.



Figura 7.1 Cortador de tipo insertos utilizado en el maquinado de un engrane con acero 31CrMoV9 (AISI 4340) templado.

Si bien es complicado eliminar el fluido de corte para las máquinas que Caterpillar utiliza (Gleason P 600 /800 Skiving), se pueden utilizar diferentes aceites de corte. Así mismo es importante evaluar diferentes tipos de cortadores, podría ser la adquisición de un cortador de insertos o un cortador de cuchillas, también es importante involucrar la variable de parámetros de corte (avances y velocidades de herramienta) correlacionada con un estudio de la apariencia visual de la rebaba generada por el proceso Skiving.

Glosario.

Engrane: Figura geométrica con dientes uniformemente repartidos alrededor de una circunferencia. De forma general los dientes de un engrane embonan con otro para formar un subensamble. [9]

Engrane recto: un tipo de engrane con dientes rectos y paralelos a un eje de rotación. [9]

Engrane helicoidal: tipo de engrane con diente en forma de espiral formados alrededor del cuerpo del engrane. [9]

Engrane interno: tipo de engrane con dientes en el interior de un cilindro hueco. La mayoría de las veces el ensamble de un engrane interno se realiza con un engrane externo. [9]

Engrane externo: tipo de engrane con dientes en el exterior de una Figura cilíndrica. [9]

Modulo: medición del tamaño de un diente en el sistema métrico, en unidad de medida se refiere al diámetro de paso en milímetros por diente. Si el tamaño del diente incrementa, el módulo incrementará. Las medidas de módulo conocidas van desde 1 hasta 25 y no tiene unidad de medida. [9]

Paso diametral (pitch diameter): el paso diametral del círculo de un engrane. [9]

Ángulo de presión: la forma del diente del engrane en la posición del paso diametral. Si el ángulo de presión es cero, esto indica que el diente es paralelo al eje del engrane, esto significa que se trata de un engrane de tipo recto. [9]

Ángulo de hélice (hélix angle): la inclinación de la longitud del diente de un engrane. Si el ángulo de hélice es 0° , entonces el diente es paralelo al eje del engrane, por tanto, estamos hablando de un engrane de tipo recto. [9]

Desviaciones de la hélice (lead): son la cantidad de desviaciones reales de la hélice de un engrane comparadas con las desviaciones calculadas en el diseño del engrane. [1]

Rugosidad: es un conjunto de irregularidades superficiales reales definidas convencionalmente en la sección en la que se eliminan los errores de forma y las ondulaciones.

Error de forma de la hélice ($f_{f\beta}$) (error de forma del lead $f_{f\beta}$): variación del ángulo de hélice del engrane, generalmente causadas por la rugosidad en la superficie del diente del engrane. [1]

Inclinación de la hélice ($f_{H\beta}$) / inclinación del lead ($f_{H\beta}$): inclinación positiva o negativa de la hélice. Es un tipo de desviación de la hélice. [1]

Desviaciones del perfil: son la cantidad de desviaciones reales del perfil del diente de un engrane comparadas con las desviaciones calculadas en el diseño del engrane. [1]

Error de forma del perfil ($f_{f\alpha}$): un tipo de desviación en el perfil, generalmente causado por una rugosidad alta o pequeñas ondulaciones en la dirección del perfil. [1]

Inclinación del perfil ($f_{H\alpha}$): inclinación positiva o negativa del perfil. Es un tipo de desviación del perfil. [1]

Máquina CNC: Máquina de control numérico por computadora.

Resistencia a la tensión: máxima carga que un material puede recibir al someterse a un esfuerzo antes de llegar a la fractura.

Límite elástico: máxima carga que un material puede recibir al someterse un esfuerzo antes de que este sea deformado plásticamente.

Elongación: cualquier alteración en la forma del material bajo la acción de una o varias fuerzas.

Sustrato: especie química de transporte de un objeto por la acción de uno o más reactivos.

Referencias.

1. Gupta, K., Jain, N. K., & Laubscher, R. (2017). *Advanced gear manufacturing and finishing: classical and modern processes*. Academic Press.
2. Comunicaciòn interna de Caterpillar Industrias. <https://redi.ecorp.cat.com/GEARREF/55904.pdf>
3. Maitra, G. M. (1994). *Handbook of gear design*. Tata McGraw-Hill Education.
4. Askeland, D. R. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales (Vol. 3)*. México: International Thomson Editores.
5. Jacobs, F. R., Chase, R. B., & Lummus, R. R. (2011). *Operations and supply chain management (Vol. 567)*. New York: McGraw-Hill Irwin.
6. Horngren, C. T., Foster, G., & Datar, S. M. (2007). *Contabilidad de costos un enfoque gerencial*. Pearson educación.
7. Molina, A. (2007). *Contabilidad de costos*. Grafitext.
8. Padilla, D. N. R., & Díaz, D. (1980). *Contabilidad administrativa*. McGraw-Hill.
9. Radzevich, S. P., & Dudley, D. W. (1994). *Handbook of practical gear design*. CRC press.
10. Kahraman, A., Ligata, H., & Singh, A. (2010). Influence of ring gear rim thickness on planetary gear set behavior. *Journal of mechanical design*, 132(2).
11. Kubur, M., Kahraman, A., Zini, D. M., & Kienzle, K. (2004). Dynamic analysis of a multi-shaft helical gear transmission by finite elements: model and experiment. *J. Vib. Acoust.*, 126(3), 398-406.
12. Rodríguez, M. G., Hinojosa Rivera, M., & Ortiz Méndez, U. (2002). Breve y parcial historia de los engranes. *Ingenierías*, 5(16), 18-23.
13. O'Rourke, R., & Grandner, M. (1999). Cast iron: a solid choice for reducing gear noise. *Gear Tech*, 16, 46-49.
14. Acero al carbono AISI 1020 - ASTM A29. (s. f.). Acero Waldun. Recuperado 26 de septiembre de 2022, de <https://waldunsteel.com/es/products/aisi-1020-acero-carbono/>
15. Rohrmoser, A., Hagenah, H., & Merklein, M. (2021). Adapted tool design for the cold forging of gears from non-ferrous and light metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(7), 1833-1848.
16. Fan, Q. (2007). Enhanced algorithms of contact simulation for hypoid gear drives produced by face-milling and face-hobbing processes.
17. Gao, H., Li, X., Wu, Q., Zhang, W., Dai, G., & Zhang, G. (2021). The optimization of friction disc gear-shaping process aiming at residual stress and machining deformation. *Reviews on Advanced Materials Science*, 60(1), 921-935.
18. Stadtfeld, H. J. (2014). Power skiving of cylindrical gears on different machine platforms. *Gear Technology*, 31(1), 52-62.
19. Qin, X. Y., Su, Y., Chen, J., & Liu, L. J. (2019). Finite element analysis for die casting parameters in high-pressure die casting process. *China Foundry*, 16(4), 272-276.

20. Jiang, C., Wang, H., Yang, Y., & Fu, Y. (2022). Construction and Simulation of Failure Distribution Model for Cycloidal Gears Grinding Machine. *IEEE Access*, 10, 65126-65140.
21. Janninck, W. L. (1990). Shaper Cutters-Design& Application-Part, 2. *Gear Technology*, 7(2), 35-44.
22. Maanonen, M. (2014). Steel pickling in challenging conditions.
23. Mattox, D. M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew.
24. Oliver, J.B.; Talbot, D. Optimization of deposition uniformity for large-aperture National Ignition Facility substrates in a planetary rotation system. *Appl. Opt.* 2006, 45, 3097–3105. [CrossRef] [PubMed]
25. Ramprasad, B.S.; Radha, T.S. Uniformity of film thickness on rotating planetary planar substrates. *Thin Solid Films* 1973, 15, 55–64. [CrossRef]
26. Usoskin, A.I. Correcting diaphragms for improving the thickness uniformity of vacuum coatings. *Sov. J. Opt. Technol.* 1984, 51, 471–474. *Coatings* 2018, 8, 325 26 of 27
27. Guo, C.; Kong, M.; Liu, C.; Li, B. Optimization of thickness uniformity of optical coatings on a conical substrate in a planetary rotation system. *Appl. Opt.* 2013, 52, B26–B32. [CrossRef] [PubMed]
28. Kotlikov, E.N.; Prokashev, V.N.; Ivanov, V.A.; Tropin, A.N. Thickness uniformity of films deposited on rotating substrates. *J. Opt. Technol.* 2009, 76, 100–103. [CrossRef]
29. Wang, B., Fu, X., Song, S., Chu, H. O., Gibson, D., Li, C., ... & Wu, Z. (2018). Simulation and optimization of film thickness uniformity in physical vapor deposition. *Coatings*, 8(9), 325.
30. Fukui, H. (2016). Evolutional history of coating technologies for cemented carbide inserts—chemical vapor deposition and physical vapor deposition. *SEI Technical Review*, 82, 39-45.
31. Oerlikon, Balzers. (2021) Gear cutting, Gear Cutting. Disponible en: <https://www.oerlikon.com/balzers/global/en/applications/cutting-gear-cutting/>
32. Endrino, J. L., Fox-Rabinovich, G. S., Reiter, A., Veldhuis, S. V., Galindo, R. E., Albella, J. M., & Marco, J. F. (2007). Oxidation tuning in AlCrN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 201(8), 4505-4511.
33. Tritremmel, C., Daniel, R., Rudigier, H., Polcik, P., & Mitterer, C. (2014). Mechanical and tribological properties of AlTiN/AlCrBN multilayer films synthesized by cathodic arc evaporation. *Surface and Coatings Technology*, 246, 57-63.
34. González, S. A. P., & Díaz, L. A. C. (2021). Efecto de recubrimientos ALTENSA depositados por PVD sobre el desempeño de herramientas. *Revista Nthe. Revista de difusión científica, tecnológica y de innovación*, 12(36).
35. Bouzakis, K. D., Lili, E., Michailidis, N., & Friderikos, O. (2008). Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods. *CIRP annals*, 57(2), 676-696.
36. Gutiérrez Pulido, H., & Vara Salazar, R. D. L. (2004). Análisis y diseño de experimentos.

37. Arndt, T., Klose, J., Gerstenmeyer, M., & Schulze, V. (2022). Tool wear development in gear skiving process of quenched and tempered internal gears. *Forschung im Ingenieurwesen*, 86(3), 587-594.

Índice de Figuras.

1. Figura 1.1. – Diagrama de flujo de procesos (centros de costo) de Caterpillar planta 4.
2. Figura 1.2. – Gráfica de pastel de los porcentajes de los gastos de reafilado 2019 para los diferentes procesos (centros de costo) de maquinado verde [1].
3. Figura 1.3. – Gráfica de pastel de los porcentajes de los gastos de afilado del primer semestre 2020 para los diferentes procesos (centros de costo) del maquinado verde [1].
4. Figura 1.4. Imagen representativa de máquina CNC de 5 ejes que se utiliza en el proceso Skiving para generado de dientes.
5. Figura 2.1 – Relevancia de un sistema de información contable y de administración de costos en una empresa [4].
6. Figura 2.1.2.1 – La índole de los costos variables representada por vectores [7].
7. Figura 2.3.1 – Gráfica de pareto, análisis de demanda segundo semestre del año 2020 en el value stream Rings & SWL [1].
8. Figura 3.1.1 Engranés con acero sinterizado utilizados en una lavadora. [10]
9. Figura 3.1.2 Engranés plásticos utilizados en un juguete. [10]
10. Figura 3.2.1 Representación esquemática del diseño de engranes con sus características principales. [10]
11. Figura 3.2.2 Tamaño de los dientes de un engrane en función del módulo. [10]
12. Figura 3.3.1 Desviaciones del perfil de un diente. [10]
13. Figura 3.3.2 Componentes de la desviación de la hélice de un diente. [10]
14. Figura 3.4.1 Ensamble de un engrane de tipo anillo en un eje paralelo con 4 engranes de tipo planetario y un engrane de tipo sol. [15]
15. Figura 3.4.2 Engranés de tipo helicoidal. [16]
16. Figura 3.4.3 Engranés helicoidales dobles. [10]
17. Figura 3.4.5 Engrane de tipo bevel recto.
18. Figura 3.4.6 Engrane de tipo bevel con espiral. [10]
19. Figura 3.4.7 Tipos de engranes no circulares. [10]
20. Figura 3.5.1 Prototipo de engrane de madera del año 300 A.C. [17]
21. Figura 3.5.2 Comparación de precisión entre 3 diferentes aleaciones para la formación de engranes en un proceso de extrusión en frío. [20] Figura 3.5.3 Fuerza utilizada en las diferentes aleaciones probadas por Rohmoser, A., Hagenah, H., & Merklein, M. (2021). [20]
22. Figura 3.5.4 Engrane de tipo bevel formado por un proceso de fresado. [22]
23. Figura 3.5.5. Proceso de shaping con los elementos generales que la componen. [23]
24. Figura 3.5.6 Vista lateral, frontal y por encima durante un proceso de Skiving. [11]
25. Figura 3.5.7 Representación del proceso de rolado en frío para un engrane. [10]
26. Figura 3.5.8 Engranés formados en fundición a presión para una mezcladora de cemento. [10]

27. Figura 3.5.9 Anillo de fundición en molde de arena utilizado en la industria de la minería. [21]
28. Figura 3.6.1. Máquina CNC de rectificado de dientes para la manufactura de engranes. [14]
29. Figura 4.1. Cortador de cuerpo sólido. Acero grado herramienta 1455-9102. [1]
30. Figura 4.2 Ángulos de afilado que componen al cortador 1455-9102. [1]
31. Figura 4.3 Ángulo cónico de afilado. [24]
32. Figura 4.4. Ángulo de escalón de afilado entre dientes. [24]
33. Figura 4.4 Ajustes de la máquina para el afilado de la herramienta. [24]
34. Figura 4.5 Daño de un cortador skiving de 0.308 mm evaluado con un comparador óptico digital.
35. Figura 4.6 Material antes (izquierda) y después (derecha) de un proceso de decapado. [25]
36. Figura 4.7. Reacción química del proceso de decapado en el acero y la ruptura de las capas formadas por Fe_3O_4 , Fe_2O_3 y FeO . [25]
37. Figura 4.8 Inserto de carburo con diferentes capas de recubrimiento a diferentes tiempos de trabajo.
38. Figura 4.9 Inserto para diente de engrane recubierto por una técnica de DLC (Diamond-like carbon) visto desde un microscopio electrónico de barrido con y sin recubrimiento. [33]
39. Figura 4.10 Diagrama de flujo logístico para el reafilado de cortadores. [1]
40. Figura 4.11 Recubrimientos Balzers sugeridos para la aplicación del cortador 1455-9102. [34]
41. Figura 4.12 Productividad de herramienta tipo hob con recubrimiento Alcrona en un acero AISI5120 y acero AISI8620 comparada con un recubrimiento de aluminio-titanio-niquel ($AlTiN$). [34]
42. Figura 4.13 Productividad de cuchilla de carburo y un tallador con recubrimiento Altensa en un acero AISI515 comparada con un recubrimiento Alcrona. [34]
43. Figura 5.1.1. Principales movimientos y geometrías en el proceso de Shaping, (a) corte, (b) movimientos de avance, (c) Sistema de coordenadas de cortador y piezas, (d) manivela de deslizamiento de máquina para proceso Shaping [8].
44. Figura 5.1.2 Avance de corte y remoción de material en un proceso de Skiving.
45. Figura 5.2.1. Fotografía de diente de cortador lateral con un grosor de recubrimiento de 3.44 micras en el recubrimiento Altensa.
46. Figura 5.2.2 Fotografía de diente de cortador lateral con un grosor de recubrimiento de 2.96 micras en el recubrimiento Alcrona.
47. Figura 5.2.3. Comparativa de espesor de recubrimientos aplicados Alcrona y Altensa.
48. Figura 5.3.1. Evaluación de dureza de recubrimiento Altensa con máquina SonoDur.
49. Figura 5.3.3. Resultado de microdureza Vickers para recubrimientos Alcrona y Altensa.

50. Figura 6.1.1. Resultado de hélice ($ff\beta$ y $fH\beta$) con cortador de recubrimiento Alcrona (proveedor Gleason).
51. Figura 6.1.2. Resultado de hélice ($ff\beta$ y $fH\beta$) cortador de recubrimiento Alcrona (Proveedor StarSu).
52. Figura 6.1.3. Desgaste presentado en cortador reafilado por proveedor Gleason en microscopio DNT 5 MP 120 x.
53. Figura 6.1.4. Desgaste presentado en cortador reafilado por proveedor Starsu en microscopio DNT 5 MP 120 x.
54. Figura 6.1.5 Resultado de hélice $ff\beta$ y $fH\beta$ cortador de recubrimiento Alcrona (Proveedor Gleason).
55. Figura 6.1.6 Resultado de hélice $ff\beta$ y $fH\beta$ cortador de recubrimiento Altensa (Proveedor Starsu).
56. Figura 6.1.7. Desgaste de cortador, recubrimiento Altensa, proveedor de reafilado StarSu después de 55 piezas en microscopio DNT 5 MP 120 x.
57. Figura 6.1.8. Desgaste de cortador, recubrimiento Alcrona, proveedor de reafilado Gleason después de 55 piezas en microscopio DNT 5 MP 120 x.
58. Figura 6.2.1. Condiciones de reafilado en máquina rectificadora de cortadores Klingelnberg, proveedor Starsu para el cortador 1455-9102.
59. Figura 6.2.2. Cortador utilizado en la segunda fase de la experimentación (1455-9102).
60. Figura 6.2.3. Comparativa en la producción de piezas en procesos de shaping, hobbing, Skiving con liquido de corte, Skiving con un tipo de cortador UCS, y Skiving con cortador de carburo sólido en un engrane de tipo recto.
61. Figura 7.1 Cortador de tipo insertos utilizado en el maquinado de un engrane con acero 31CrMoV9 (AISI 4340) templado.

Índice de Tablas.

1. Tabla 1.1 Las tres principales categorías, clasificación y tipo de engranes [10].
2. Tabla 3.5.1 Comparativa entre propiedades mecánicas de un hierro dúctil 80-55-06 contra un acero al carbón AISI 1141.[18]
3. Tabla 3.5.2 Composición química de los aceros AISI 1020 y AISI 1040. [19]
4. Tabla 5.1.3. Evaluación de proceso de afilado de proveedor.
5. Tabla 5.1.4. Evaluación del recubrimiento Alcrona Vs. Altensa.
6. Tabla 6.1.1 Resultado de proveedor de reafilado de cortadores Gleason con recubrimiento Alcrona.
7. Tabla 6.1.2 Resultado de 4 dientes en flancos izquierdo y derecho en las características de $ff\beta$ y $fH\beta$. Proveedor de reafilado de cortadores Starsu con recubrimiento Alcrona.
8. Tabla 6.1.3 Tabla comparativa de variación promedio entre flancos izquierdo y derecho para las características de hélice $ff\beta$ y $fH\beta$, proveedor de reafilado Gleason Vs. Proveedor de reafilado Starsu.
9. Tabla 6.1.4 Resultado de geometría proveedor de reafilado Gleason, recubrimiento Alcrona.
10. Tabla 6.1.5 Resultado de geometría proveedor de reafilado Starsu, recubrimiento Altensa.
11. Tabla 6.1.6 Tabla comparativa de variación promedio entre flancos, proveedor de reafilado Gleason Vs. Proveedor de reafilado Starsu.
12. Tabla 6.2.1 Cortadores a sustituir recubrimiento con Alcrona.

Apéndice 1.

Tabla 1.4.1. 6 sigma, procedimiento DMAIC (Definir, medir, analizar, mejorar y controlar) [1].

Fases	Objetivo	Principales actividades	Entregables
Definir	Identificar y o validar la oportunidad de mejora, desarrollar casos de negocio, definir requerimientos del cliente y preparar un plan de proyecto efectivo.	<ul style="list-style-type: none"> * Identificar la oportunidad de negocio. * Desarrollar una guía de actividades. * Identificar y mapear procesos. * Identificar las mejoras rápidas que se puedan implementar. * Identificar las necesidades del cliente a las características críticas que este requiera. 	<ul style="list-style-type: none"> * Desarrollo de plan de actividades. * Plan de acción. * Mapas de proceso. * Implementación de mejoras rápidas. * Características críticas del cliente. * Preparar al equipo de trabajo involucrado.
Medir	Identificar mediciones críticas que sean necesarias para el cumplimiento de las características críticas del cliente y comenzar a desarrollar la metodología que sea funcional para el almacenamiento de datos del	<ul style="list-style-type: none"> * Identificar las variables de entrada, proceso y salida. * Definir la ejecución en la operación y el plan de medición. * Analizar datos. * Determinar mediante el desempeño de sigma si hay alguna causa específica que analizar. * Definir si es necesaria información de alguna otra línea base de desempeño de datos. 	<ul style="list-style-type: none"> * Indicadores de entrada, proceso y salida. * Definiciones operacionales. * Formatos y planes para la recolección de datos. * Desempeño de la línea base. * Definir la atmósfera o plan de producción.

	<p>desempeño del proceso. Entender los elementos del cálculo de 6 sigma, establecer la línea base para los procesos que el equipo se encuentre analizando.</p>		
<p>Analizar</p>	<p>Estratificar y analizar la oportunidad para identificar un problema específico y definir una manera sencilla para entenderlo. Identificar y validar la causa raíz que aseguren la eliminación de las causas raíz reales y que se encuentren enfocadas al problema.</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Estratificar el proceso e identificar el problema específico. * Desarrollar el estatus del problema. * Identificar la o las causas raíz. * Diseñar un método para el análisis de causas raíz. * Validar las causas raíces. * Motivar a la creatividad del equipo. 	<ul style="list-style-type: none"> * Análisis de datos. * Mapas de proceso. * Validación de causas raíz. * Definir el estatus del problema.

<p>Mejorar</p>	<p>Identificar, evaluar y seleccionar la solución correcta a la mejora. Desarrollar un cambio de estrategia que se adapte a la organización en adaptación a los cambios introducidos por la implementación de la solución.</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Generar la solución de ideas. * Determinar beneficios. * Evaluar las soluciones propuestas. * Desarrollar mapas de proceso y un plan de ejecución. * Desarrollar el historial de mejoras implementadas. * Dar a conocer al Equipo las soluciones implementadas. 	<ul style="list-style-type: none"> * Soluciones. * Mapas de proceso y documentación. * Implementación de mejoras. * Mejora en los impactos y beneficios analizados. * Generar mapas de cambio y documentar resultados de mejoras.
<p>Controlar</p>	<p>Entender la importancia de la planeación y ejecución en conjunto con el plan y determinar el impacto que tendrán los objetivos propuestos. Entender como implementar las lecciones aprendidas, identificar y replicar las oportunidades de estandarización, procesos y desarrollo de los planes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Desarrollar e implementar las soluciones del plan piloto. * Verificar el impacto de las soluciones de causas raíz. * Buscar mejorar el resultado obtenido con la solución propuesta. * Identificar y adicionar soluciones que sean necesarias para alcanzar la meta. * Identificar y replicar las oportunidades de estandarización. * Integrar lecciones aprendidas, identificar los equipos para los siguientes pasos del proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> * Sistemas de control del proceso. * Procedimientos y trabajos estándar. * Entrenamiento y evaluación. * Solución de resultados y piloto. * Oportunidades de réplica del proyecto. * Beneficios planeados. * Entrega del proyecto finalizado a quién se haya definido como dueño.