

Diseño del proceso de construcción, simulación e implementación de la Corona de Bronce del mecanismo alimentador del doble Cañón Antiaéreo Oerlikon de 35 mm.

Manzanares, F. & Paltán, A.

Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador.

Culqui, B.

Departamento de Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador.

Castellanos, S.

Centro de Investigaciones del Ejército, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador.

RESUMEN

El presente artículo se refiere al estudio de la corona de bronce que es parte del mecanismo de alimentación del cañón antiaéreo Oerlikon de 35 mm del ejército ecuatoriano y se divide en las siguientes etapas: análisis de falla, cálculo mediante el método AGMA, simulación, fabricación y pruebas. El Análisis de Falla se lo realiza para determinar cuál es la causa que provoca la fractura en los dientes de la corona. El cálculo se lo realiza para determinar la geometría de la corona y los esfuerzos generados en la misma. Como siguiente paso se realiza la simulación por el método de elementos finitos en el Software Inventor Autodesk para analizar su comportamiento mecánico en condiciones de falla y en condiciones normales de funcionamiento. Luego se ejecuta la fabricación de la corona, la misma que involucra las fases de generación de los dientes, con la herramienta denominada fresa madre sincronizada con el 4to eje y la fase de generación del perfil concéntrico, todo en el CNC Fadal VMC 3016L. Finalmente se realizan las pruebas geométricas y funcionales a fin de verificar el correcto funcionamiento de la corona.

Palabras Clave: Análisis de Falla, CNC, Fresa Madre, Procesos de Manufactura, elementos finitos

ABSTRACT

This article refers to the study of bronze worm well which is part of the feeding mechanism of the anti-aircraft gun 35mm Oerlikon Ecuadorian army and is divided into the following stages: failure analysis, calculation using the AGMA method, simulation, manufacturing and testing. The Failure Analysis is performed to determine what is the underlying cause of the fracture in the teeth worm well mechanism. The calculation is done to determine the geometry of the worm well and the stresses generated in the same. As a next step the simulation is performed by the finite element method in the Autodesk Inventor Software to analyze their mechanical behavior under fault conditions and under normal operating conditions. After making the worm well is divided in generation of the teeth, with the hobbing tool called, synchronized with the 4th axis and concentric phase profile generation, particularly in the CNC Fadal VMC 3016L. Finally geometric and functional in order to verify the correct operation of the corona tests are performed.

Keywords: Failure Analysis, CNC, Hobbing tool, Manufacturing Process, finite element

DESARROLLO DEL PROYECTO.

ANÁLISIS DE FALLA

“El análisis de falla es un método que lleva a la determinación y descripción de las causas de fallas en piezas, componentes, partes o equipos de manera que conociendo estas causas, se pueda tomar distintas acciones correctivas para evitar posteriores irregularidades en éstas”. (IAS Instituto Argentino de Siderurgia, 2003).

Las herramientas usadas en la determinación de la falla son: macrografía, dureza, análisis químico; cuyos resultados se indican a continuación.

Macrografía.

La corona muestra corte en sus dientes, presentando superficies rectas y vidriosas características de las fallas por impacto. (IAS Instituto Argentino de Siderurgia, 2003). En la figura 1. se observa la macrografía de la superficie de falla (corona derecha).

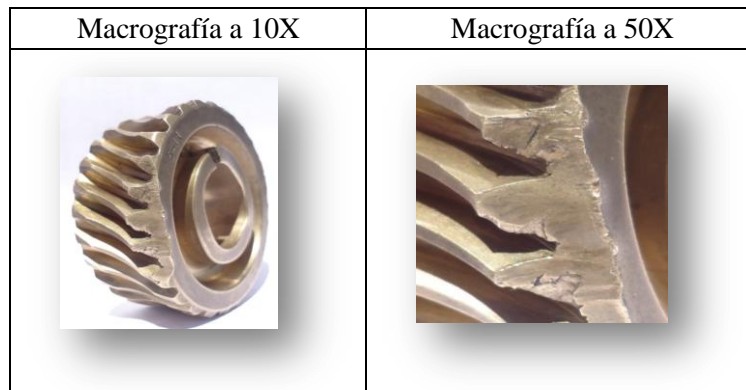


Figura 1. Macrografía de la corona derecha
Fuente: Autores de la Investigación.

Examen de Dureza.

Para determinar la dureza del material del cual está fabricado la corona se comparan los resultados obtenidos del examen de dureza con la dureza de un material de similares características, el Bronce al Aluminio estándar (DIN 1714) evidenciándose su similitud en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados del Examen de Dureza

<i>Características del Examen</i>		<i>Resultados Dureza</i>	<i>Norma DIN 1714</i>
Carga:	100 kg.	165,5 HB	150 – 170 HB
Precarga:	3 kg.		
Penetrador:	bola de 1/16”.		
Escala:	B.		

Fuente: Autores de la Investigación.

Análisis Químico.

Los resultados del análisis químico de los elementos más significativos, se comparan con los porcentajes de los elementos de la norma del Bronce al Aluminio estándar (DIN 1714) y se verifica que es el más parecido a un bronce a aluminio, ya que los datos obtenidos se encuentran muy próximos a los rangos de porcentajes de la norma, como lo indica la tabla 2.

Tabla 2. Resultado del Análisis Químico

<i>Resultados Análisis</i>	<i>Norma DIN 1714</i>
Cu: 86,510 %	Cu: 83 - 89 %
Al: 8,409 %	Al: 8,7 – 10,5 %
Fe: 3,825 %	Fe: 1,5 – 3,3 %

Fuente: Autores de la Investigación.

Conclusión.

Los resultados muestran que el material de la corona es Bronce al Aluminio estándar (DIN 1714), además el análisis de falla indica que este elemento sufrió una falla por impacto, provocando un corte en sus dientes, generalmente ocasionada por sobrecargas repentinas de choque.

Examinando la macrografía y los demás mecanismos adyacentes, se propone la descripción de la posible falla en la figura 2.

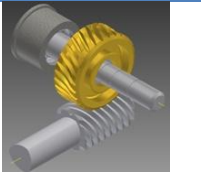

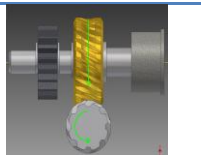
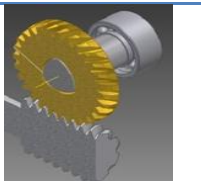
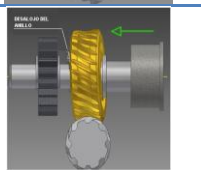
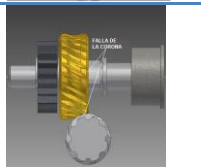
<p>1 el tornillo sinfín, recibe el torque del motor de muelles, mismo que transmite el movimiento a la corona.</p>		
<p>2 el funcionamiento intermitente del motor de muelles hace que la corona, choque contra su eje.</p>		
<p>3 este choque repetitivo, deriva en el desgaste interno de la corona, provocando un juego muy amplio entre el agujero y el eje.</p>		
<p>4 la corona trabaja desbalanceada y la fuerza axial de la misma supera la resistencia del anillo de retención, sacándolo de su alojamiento.</p>		
<p>5 La corona se mueve axialmente, por esto, el sinfín impacta a la corona produciéndose la falla en sus dientes</p>		

Figura 2. Descripción de la posible falla.

Fuente: Autores de la Investigación.

CÁLCULO MEDIANTE MÉTODO AGMA.

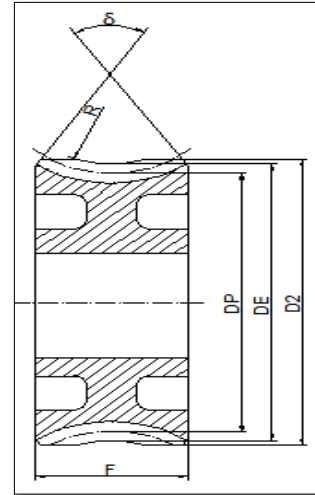
Geométrico

El cálculo se lo realiza mediante el método AGMA, el cuál establece la geometría y los esfuerzos generados en la corona; estos datos se usan para la construcción y para la simulación de esfuerzos respectivamente.

Tabla 3. Geometría de la corona

Paso circular	pc	6.283 mm
Paso normal	pn	5.654 mm
Número de dientes	N	28
Módulo	M	2 mm
Diámetro mayor	D2	62
Diámetro exterior	DE	60 mm
Diámetro primitivo	Dp	56 mm
Altura del diente	h	4.4 mm
Ángulo de la hélice	α	26 °
Ángulo de presión	ϕ_n	20 °
Concavidad periférica	R	14.5 mm
Distancia entre centros	c	44.5 mm

Fuente: Autores de la investigación



Cálculo de tensión por esfuerzo de flexión en los dientes.

fractor de forma de Lewis:

$$\sigma = 0,125$$

longitud de cuerda de un diente de la corona:

$$B = \frac{27}{25,4} = 1.063 \text{ plg}$$

Paso circular normal en la corona:

$$pn = \frac{6.283 \times \cos(25.866)}{25,4} = 0,223 \text{ plg}$$

Esfuerzo de flexión en los dientes de la corona:

$$\sigma_{\text{diente}} = \frac{F_{\text{corona}}}{4,448xyxBxp_n} = 9058 \text{ psi}$$

$$\sigma_{\text{diente}} = \sigma_{\text{diente}} \times 0,006894$$

$$\sigma_{\text{diente}} = 62,446 \text{ MPa}$$

Resistencia a la fluencia:

$$S_y = 240 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_{\text{diente}}} = 3,843$$

SIMULACIÓN.

Una vez realizado el análisis de falla y específicamente con la determinación del material un Bronce al Aluminio (BS 1400 AB2), se realizó la simulación en condiciones normales de funcionamiento y en condiciones de falla.

Simulación en condiciones normales de funcionamiento.

Para saber si el Bronce al Aluminio (BS 1400 AB) es el material adecuado para la construcción de la corona se lo estudió con una simulación en condiciones normales de funcionamiento a fin de verificar si el diente de la misma es capaz de soportar los esfuerzos generados. Se usó el software Inventor Autodesk. y en la tabla 4, se tiene los siguientes parámetros de entrada.

Tabla 4. Parámetros iniciales para simulación.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Tipo de análisis	Estático
Cuerpo	Corona
Material	Bronce al aluminio
Torque máximo (sinfín)	5084 N.mm - 45 lbf.plg
Resistencia a la fluencia	240 MPa
Densidad	7.6 E-6 kg/mm ³
Módulo de elasticidad	110 000 MPa
Coefficiente de poisson	0.36

Fuente: Autores de la investigación

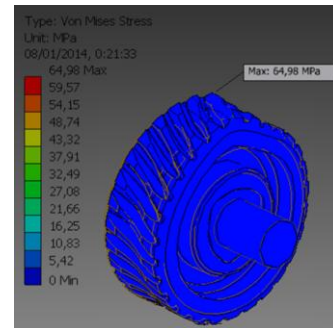


Tabla 5. Resultados de los métodos CAE y AGMA.

Método	Esfuerzo Máximo (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Factor de seguridad
CAE	64,98	240	3.69

Fuente: Autores de la investigación

Resultado: El factor de seguridad indica que la corona soporta los esfuerzos generados en condiciones normales de funcionamiento.

Análisis

En la tabla 6. comparamos los valores de los resultados de los métodos antes citados, tanto del método de diseño AGMA como del método CAE.

Tabla 6. Resultados de los métodos CAE y AGMA.

Método	Esfuerzo Máximo (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Factor de seguridad
CAE	64,98	240	3.69
AGMA	62,44	240	3.84

Fuente: Autores de la investigación

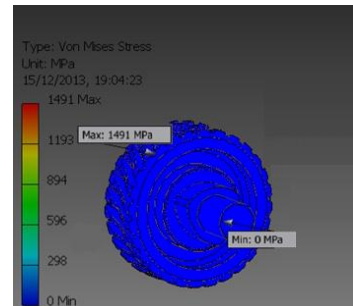
Resultado: Al analizar los factores de seguridad indican que la corona soporta ampliamente los esfuerzos generados en condiciones normales de funcionamiento, tanto por el método AGMA como por el método CAE. Además se observa una diferencia del 4.06% del método CAE con respecto al AGMA. La variación entre los dos métodos se justifica ya que el Método por Elementos Finitos no considera factores de corrección al momento de calcular el esfuerzo.

Simulación en condiciones de falla.

También estudió a la corona con la simulación en condiciones de falla a fin de verificar si el diente de la misma es capaz de soportar los esfuerzos producidos en el momento del impacto contra el sinfín, luego del desalojo de su eje. Se usó el software Inventor Autodesk, teniendo en la tabla 7. los siguientes parámetros de entrada.

Tabla 7. Resultados de los métodos CAE y AGMA.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Tipo de análisis	Estático
Cuerpo	Sinfín, Corona
Material	Bronce al aluminio (corona) Acero templado (sinfín)
Torque máximo (sinfín)	5084 N.mm-45 lbf.plg
Esfuerzo último	500 MPa
Desplazamiento de la corona	8,5 mm
Densidad	7.6 E-6 kg/mm ³
Módulo de elasticidad	110 000 MPa
Coefficiente de poisson	0.36



Fuente: Autores de la investigación

y en la tabla 8, se observa los siguientes resultados.

Tabla 8. Resultado del método CAE.

Método	Esfuerzo Máximo (MPa)	Esfuerzo Último (MPa)
CAE	1491	500

Fuente: Autores de la investigación.

Resultado: La corona falla debido a que el esfuerzo máximo resultado de la simulación supera en un 66,4 % al esfuerzo último del bronce al aluminio BS1400 AB2

FABRICACIÓN.

El proceso de fabricación de la corona de bronce tiene los siguientes pasos:

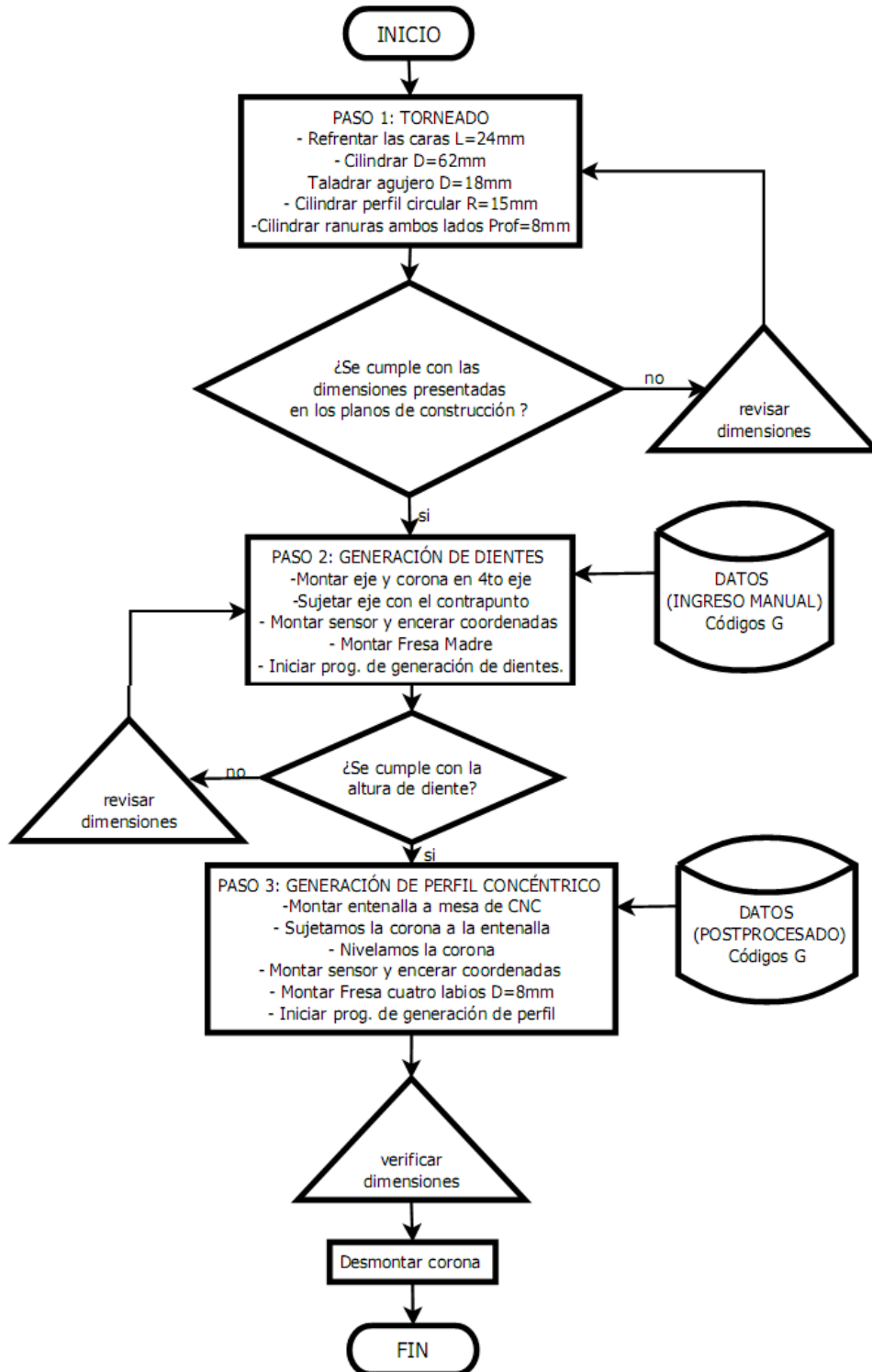


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de maquinado de la corona
Fuente: Autores de la Investigación.

A continuación se detallan los pasos seguidos en el proceso de mecanizado para la obtención de la corona de bronce.

Paso 1. Torneado.

En la fase de Torneado se realizan las medidas exteriores de la corona de bronce, es decir se prepara a este elemento para la fase de generación de dientes con fresa madre, teniendo que obtener la geometría de la tabla 3.

Paso 2. Generación de los dientes de la corona con Fresa Madre.

La generación de dientes de la corona de bronce se basa en reproducir las operaciones de una máquina entalladora de engranajes en la máquina CNC Fadal VMC 3016L, es decir sincronizar el husillo con el 4to eje, teniendo en cuenta que la relación de transmisión del sinfín a la corona es de 3.5, esta misma relación fue efectiva entre el husillo y el 4to eje, como se observa en la figura 4.

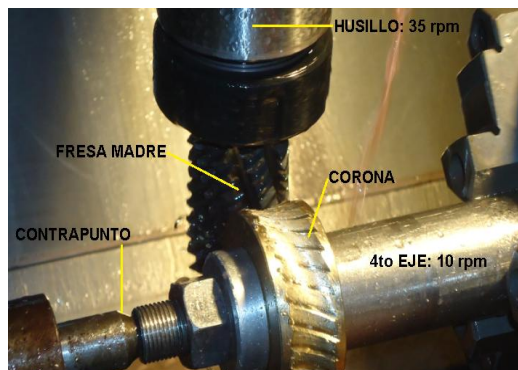


Figura 4. Generación de los dientes de la corona.
Fuente: Autores de la Investigación.

Fresa Madre.

Es la herramienta de generación de dientes de la corona, que tiene la misma geometría del sinfín pero con la adición de fillos de corte perpendiculares a la hélice del sinfín, figura 5.



Figura 5. Fresa madre
Fuente: Autores de la Investigación.

Sincronización.

Se programó al cuarto eje para que gire a una velocidad lineal de $V_c=3\ 600\text{ mm/min}$, y se contabilizó en el tiempo $t=1\text{ min}$ que el cuarto eje gira 10 veces; entonces tenemos que a esa velocidad V_c el cuarto eje gira a 10 rev/min .

$$V_c(\text{mm/min}) = W(\text{rad/min}) \cdot r(\text{mm})$$

$$3600 \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right) = 10 \left(\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right) \cdot 2 \cdot \pi \left(\frac{\text{rad}}{\text{rev}} \right) \cdot r$$

$$3600 \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right) = 10 \cdot \pi \cdot d \left(\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right) \left(\frac{\text{rad}}{\text{rev}} \right)$$

$$d = \frac{360}{\pi} (\text{mm})$$

Teniendo en cuenta que el cuarto eje gira hasta 16 rev/min , esta es la velocidad máxima con la que puede girar el cuarto eje (corona), por este motivo se eligió una velocidad angular de $W_{\text{corona}}=10\text{ rev/min}$. Entonces tenemos que calcular cuál es la velocidad angular del husillo (fresa madre).

Para poder generar los dientes en la corona con la fresa madre se debe mantener la misma relación de transmisión:

$$i = \frac{Z_{\text{corona}}(\text{Número de dientes})}{Z_{\text{sinfn}}(\text{Número de entradas})} = \frac{W_{\text{sinfn}}(\text{Velocidad angular})}{W_{\text{corona}}(\text{Velocidad angular})}$$

$$i = \frac{28}{8} = \frac{W_{\text{sinfn}}(\text{rev/min})}{10}$$

$$W_{\text{sinfn}} = \frac{28 \times 10 (\text{rev/min})}{8}$$

$$W_{\text{sinfn}} = 35 (\text{rev/min})$$

Entonces se debe programar para que el husillo gire a una velocidad de 35 (rev/min) y el cuarto eje a una velocidad de 10 (rev/min) . En el CNC, en el husillo se ingresa la velocidad angular en (rev/min) que no tenemos problema, pero en el cuarto eje se ingresa la velocidad lineal en (mm/min) , para esto debemos pasar la velocidad angular a velocidad lineal así:

$$V_c \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right) = W \left(\frac{\text{rad}}{\text{min}} \right) \cdot r(\text{mm}) ; r = \frac{d}{2}$$

$$V_c(\text{mm/min}) = W(\text{rad/min}) \cdot \frac{d}{2}(\text{mm})$$

$$V_c = 10 \left(\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right) \cdot 2 \cdot \pi \left(\frac{\text{rad}}{\text{rev}} \right) \cdot \frac{360}{2 \cdot \pi} (\text{mm})$$

$$V_c = 3\ 600 \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right)$$

Esta es la velocidad lineal que se debe ingresar en la programación para el cuarto eje.

Programa.

Luego de la sincronización se realiza la programación en el CNC, respetando las velocidades de la corona (4to eje) y la fresa madre (husillo) con 10 rpm y con 35rpm respectivamente, en la tabla 9. se observa la programación.

Tabla 9. Códigos de generación para dientes de la corona.

PROGRAMA	COMENTARIO
M6 T9;	Llama a Herramienta
G54 ;	Traslado origen
G43 H9 D9 ;	Compensación de longitud y diámetro de herramienta
G90 ;	Modo Absoluto
G0 X0 Y52 ;	Posicionamiento rápido de la fresa madre, en X e Y
G0 Z-51 ;	Posicionamiento rápido de la fresa madre, en -Z
Y48,7 ;	Posicionamiento rápido de la fresa madre, en Y
G91 ;	Modo incremental
M3 ;	Giro sentido Horario del husillo
S35 ;	Velocidad Husillo (rpm)
G01 ;	Avance programado
A-99999 ;	Ángulo
Y-5 ;	Avance en Y
F3600 ;	Velocidad lineal del 4to eje (mm/min)
M01 ;	Parada condicional del programa
M5 ;	Parada del husillo
M9 ;	Refrigerante
G49 ;	Cancela compensación de herramienta
G80 ;	Cancela todo
M30 ;	Finaliza Programa con reseteo de variables

Fuente: Autores de la investigación

Paso 3. Generación del perfil concéntrico de la corona.

Para la generación del perfil concéntrico de la corona de bronce se realiza un modelado en SolidWorks para luego realizar el postprocesado en el software de mecanizado NX5, mismo que ingresamos en el CNC (Control Numérico por Computadora), para su mecanizado, este encargo se realizó con una fresa de 4 labios de 8mm de diámetro, como lo vemos en la figura 6.

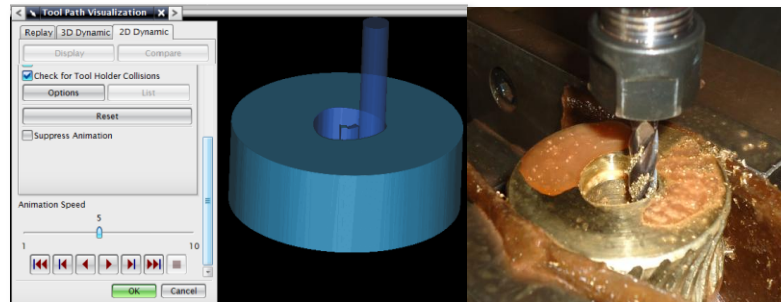


Figura 6. Mecanizado del perfil concéntrico de la corona.

Fuente: Autores de la Investigación.

PRUEBAS.

Aquí se somete al prototipo a mediciones geométricas y de funcionamiento, para verificar en forma práctica las dimensiones y el correcto funcionamiento de la corona.. Por lo antes descrito se hacen dos tipos de pruebas: dimensionales y funcionales.

Pruebas dimensionales.

Se verifica las dimensiones reales con cálculos teóricos, como se indica en la tabla 10.

Tabla 10. Verificación de dimensiones de la corona.

N	Símb	Dimensión	Tol. Mm	Nominal mm	Real mm	Cumple	
						SI	NO
2	D2	Diámetro mayor	± 0.05	62	62.00	V	
3	DE	Diámetro exterior	± 0.05	60	60.00	V	
2	h	Altura total del diente	± 0.05	4.334	4.40	V	

Fuente: Autores de la investigación

Pruebas funcionales.

Las pruebas funcionales tienen por objetivo verificar si la nueva corona de bronce cumple con el funcionamiento correcto, para este motivo se hace funcionar a la corona en distintos ambientes de operación, como se observa en la tabla 11.

Tabla 11. Verificación de dimensiones de la corona.

No	CARACTERÍSTICAS	CUMPLE	
		SI	NO
1	Mecanismo accionado por el motor de muelles sin carga	V	
2	Mecanismo accionado por la carraca con carga	V	
3	Mecanismo accionado por el motor eléctrico sin carga	V	
4	Mecanismo accionado por el motor eléctrico con carga	V	



Fuente: protocolo de pruebas del ejército ecuatoriano.

CONCLUSIONES.

- El Análisis de Falla, con la asistencia de ensayos no destructivos, mediciones de dureza, composición química de material, macrografías, determinando que la corona de bronce falla debido al desgaste que se produce en su perfil concéntrico, provocando un juego entre la corona y su eje, mismo que repercute en el impacto con el sinfín.
- Según el análisis químico realizado a la corona, se llegó a determinar que el material que mayor similitud tiene en sus elementos aleantes es el estándar Británico Bronce al Aluminio BS1400 AB2,
- El análisis del comportamiento de la corona en condiciones normales de funcionamiento, mediante el diseño por el método AGMA y por el método de elementos finitos CAE, obteniendo un factor de seguridad de $FS=3,84$ y $FS=3,69$ respectivamente, reflejando que la corona soporta los esfuerzos en condiciones normales.
- Se diseñó y se construyó la Fresa Madre de módulo 2, herramienta que fue usada para el mecanizado de los dientes de la corona.
- Se reprodujo en el CNC Fadal VMC 3016L las operaciones que realiza la talladora de engranajes, sincronizando el movimiento del cuarto eje con el husillo, manteniendo la misma relación de transmisión del mecanismo sinfín corona ($i=3.5$).
- Se demostró el correcto funcionamiento de la nueva corona de bronce por medio de pruebas dimensionales y funcionales. Las pruebas dimensionales se encargaron de verificar que las medidas de la corona construida cumplan con los cálculos obtenidos y las pruebas funcionales de verificar que el mecanismo sinfín – corona trabaje sin interrupciones/bloqueos que afecten la vida del mismo.

REFERENCIAS.

- ❖ ASM Handbook, B. (2002). Cap 11 Failure Analysis And Prevention. Massachusetts: ASM International Corporations.
- ❖ Casillas, A. (2001). Máquinas Cálculos de Taller. Madrid: Copyright by Ediciones Máquinas.
- ❖ Deutschman, A. (1975). Machine Design Theory and Practice. Texas: Published by Prentice Hall.
- ❖ Douglas, H. (2000). Fuerzas Militares. Org. Obtenido de <http://seccionsegunda.blogspot.com/2011/04/montaje-antiaereo-oerlikon-gdf-002-de.html>
- ❖ IAS Instituto Argentino de Siderurgia, P. E. (2003). Análisis de Falla de Materiales. Publicación Instituto Argentino de Siderurgia, 2-200.
- ❖ Lainez, B. (2003). Scribd. Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/78959071/disenotornillo-sin-fin>
- ❖ Mott, R. (1992). Machine Elements in Mechanical Design. Dayton: Macmillan Publishing Company.
- ❖ Oerlikon, C. (1990). Manual de Mantenimiento y Operación. Berna: Published Contraves.
- ❖ Shigley, J. (1983). Mechanical Engineering Design. Michigan: McGraw - Hill.

- ❖ Zabalza Villalva, I. (2010). Síntesis de Mecanismos y Máquinas . Obtenido de http://www.imem.unavarra.es/isidro/sintesis_de_mec/Libro-sintesis.pdf