

Análisis y modelado de un eje de una máquina cortadora de placas de mármol



Colaboración

Pedro Cruz Ortega, Adolfo Manuel Morales Tassinari; Marcos Manuel Azcaray Rivera, Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez

RESUMEN: Uno de los procesos que se llevan a cabo en las empresas dedicadas a la transformación de productos minerales pétreos en productos terminados, es el denominado corte de block de mármol; dicho proceso se lleva a cabo en una máquina cortadora denominada parqueteadora. Debido a que la actividad de las empresas locales en el municipio de Tepexi de Rodríguez localizado en la mixteca baja del estado de Puebla, se enfoca en su mayoría en la producción de parquet y laminado, se implementan procesos de recuperación de materiales producto de las mermas de los grandes cortes en las piedras. No obstante, sabiendo que la artesanía es considerada una actividad secundaria en muchas localidades de dedicadas al proceso del mármol, resulta importante para las empresas de la transformación del mármol aplicar nuevas estrategias de aprovechamiento del material que están procesando. El presente trabajo muestra el análisis y modelado de un eje multidisco que tiene como propósito ayudar el proceso de producción de una artesanía basada en mermas de mármol denominada tapete de recubrimiento.

PALABRAS CLAVE: Mermas de mármol, eje multidisco, artesanía, taller, modelado.

ABSTRACT: One of the processes carried out in companies dedicated to the transformation of stone mineral products into finished products, is the so-called marble block cut; This process is carried out in a cutting machine called a parquet machine. Because the activity of local companies in the municipality of Tepexi de Rodríguez located in the low Mixteca of the state of Puebla, focuses mostly on the production of parquet and laminate, processes of recovery of materials product of waste are implemented of the great cuts in the stones. However, knowing that craftsmanship is considered a secondary activity in many localities of our country, it is important for marble transformation companies to apply new strategies for the use of the material they are processing. The present work shows the analysis and modeling of a multi-disk axis that has as purpose to help the process of production of a crafts based on marble shrinkage called coating mat.

KEY WORDS: Marble waste, multi-disk axis, crafts, workshop, modeling.

INTRODUCCIÓN

Puebla es un estado asociado principalmente como un destino turístico que es rico en gastronomía, artesanías e historia; como lo establece el Centro de Estudios de Competitividad adscrito al Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM), la pequeña y mediana minería y la minería social enfrentan problemas de cuantificación de sus reservas, desconociendo de la calidad de sus minerales, insuficiencia de capacitación para la exploración, beneficio y comercialización de los minerales [1]. La artesanía en México juega un papel importante como un sector que refleja la diversidad cultural y la riqueza creativa de nuestros pueblos y al mismo tiempo, representa un recurso económico para los millones de artesanos en el país que viven de ella. El mármol es una materia prima fundamental en la actividad artesanal en el Estado de Puebla, de donde proviene la mayor oferta de artesanías de este tipo tanto a nivel nacional como internacional [2].

En contexto; en el municipio de Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, existen canteras de materiales pétreos diversos; en resultado, la actividad económica se basa en gran medida a los empleos en canteras o fábricas transformadoras de mármol. De lo anterior también podemos mencionar que debido a que la actividad de las empresas locales en el municipio de Tepexi de Rodríguez se enfoca mayormente en la producción de material para parquet y laminado; se han presentado durante los últimos años, tendencias a los procesos alternativos de recuperación de materiales sobrantes o mermas de los grandes cortes en las piedras por medio de pequeños talleres.

Es por ello que resulta de especial interés para los autores de este trabajo, la búsqueda de opciones que permitan la recuperación y buen uso de los desperdicios llamados así en cantera en comparativa con la dimensión de la piedra que no es usada en el proceso para laminado y parquet, resultante de explotar los bancos y de la padecería en las grandes fábricas. Al respecto algunos estudios muestran que, aun sabiendo que la artesanía es considerada una actividad económica marginal, es indispensable tener un modelo de producción distinto junto a la administración formal y la búsqueda de estrategias de comercialización que potencialicen este sector [1].

Sabiendo que en numerosas ocasiones se cuenta con el recurso humano y el conocimiento empírico del trabajo de recuperación de mármol, pero que sin embargo no siempre se cuenta con demasiado recurso económico, en el presente trabajo se parte de la idea de qué: La construcción de maquinarias de talla modesta para talleres de recuperación, permitiría lograr incidir al contexto de la economía local, regional y estatal, a través de ofrecer artesanías y productos ornamentales en mármol procedente de la entidad [3]. La Figura 1 muestra la imagen de una máquina parqueteadora y las mermas resultantes del proceso de corte.



Figura 1. Máquina de parquet y las mermas del proceso productivo del mármol. Tomada de [3]

En consecuencia de lo antes mencionado debe entenderse que es de suma importancia para las empresas de la transformación del mármol conocer nuevas estrategias de aprovechamiento del material que están procesando, para que puedan obtener nuevos productos y/o procesos con este desperdicio, generando así nuevas formas y métodos de trabajo en el procesos de industrialización [4].

Una de las principales formas de recuperación del mármol en talleres locales es el denominado corte de zoclo para adorno y protección de las orillas de las paredes a partir de pellets de saldos o mermas de mármol de las fabricas grandes, a estos pellets se les conoce comúnmente como tarimas. Las tarimas contienen placas apiladas que ya tenían las dimensiones finales de 30.5cm x 30.5 cm y que por alguna razón tuvieron una rotura o desperfecto durante el proceso de producción por lo que la reparación es inviable para la empresa por lo que prefiere estibar y vender a productores secundarios.

La mejor forma de recuperación para los pequeños talleres es cuando el saldo de mármol ya tiene el acabado superficial final; por ejemplo, el pulido o el brillado, por lo que solo restará cortar a 30.5 cm x 10 cm. La Figura 2 muestra la imagen de la aplicación más común de un material recuperado de mármol; es decir, el zoclo de protección en orillas de paredes.



Figura 2. Zoclo de mármol para protección de las orillas de paredes

Una forma más compleja de recuperación de material es la creación de los denominados tapetes, mosaicos y cenefas de recubrimiento, mediante el pegado conjunto de pequeñas piezas de mármol ordenados en patrones producto de la imaginación del cliente o del propio productor dueño del taller.

La Figura 3 muestra la imagen de la producción de un tapete para recubrimiento realizado de forma tradicional con pequeños cortes cuadrados de mármol.



Figura 3. Tapete de recubrimiento con pequeños cortes cuadrados de mármol. Tomada de [5]

Cabe mencionar que esta actividad sigue usualmente una producción totalmente artesanal ya que el pegado y diseño se realiza pieza por pieza. Es de apreciarse entonces, que el valor de dichos trabajos se incrementa en cuanto más perfecto sea el acabado, corte y el pegado de las piezas, ya que sirven de recubrimiento para diferentes aplicaciones en la construcción y la arquitectura.

MATERIAL Y MÉTODOS

Una vez entendida la necesidad de producir una superficie flexible, útil para recubrir pisos, columnas, decoraciones en baños, fachadas, etcétera y sabiendo que lo que se requiere es reducir los tiempos de producción; una alternativa al proceso mostrado anteriormente es la que se muestra a continuación.

1. Ensamblar cuadrados de mármol de medidas requeridas (p.e. 30.5 cm x 30.5 cm)
2. Cortar un cuadrado de malla de fibra de vidrio de 2 mm de espesor con las medidas adecuadas (p.e. 30.5 cm x 30.5 cm)
3. Pegar en la malla con resina especial los cuadrados de mármol
4. Dejar secar
5. Escuadrar a medida en caso de ser necesario
6. Uno a uno pasar los cuadrados enmallados por el disco multidisco.
7. Uno a uno pasar los cuadrados enmallados por el eje multidisco girando 90° respecto del primer corte generando así los cuadrados pequeños.

Este último procedimiento optimizara el tiempo de producción y la calidad de escuadrado y alineación de los pequeños cuadrados. La Figura 4 muestra el modelo inicial no validado del eje multidisco propuesto.

Metodología de análisis

A causa del desarrollo simultaneo de los esfuerzos cortantes torsionales y los esfuerzos flexionantes, el

análisis de esfuerzos en un eje implica casi siempre emplear el método de esfuerzos combinados. De esta manera el método para diseñar y analizar ejes es el de la teoría de falla por energía de distorsión. También pueden desarrollarse esfuerzos cortantes verticales y esfuerzos normales directos, por cargas axiales. Estos esfuerzos pueden dominar en ejes muy cortos, o en porciones de ejes donde no existe flexión ni torsión [6].

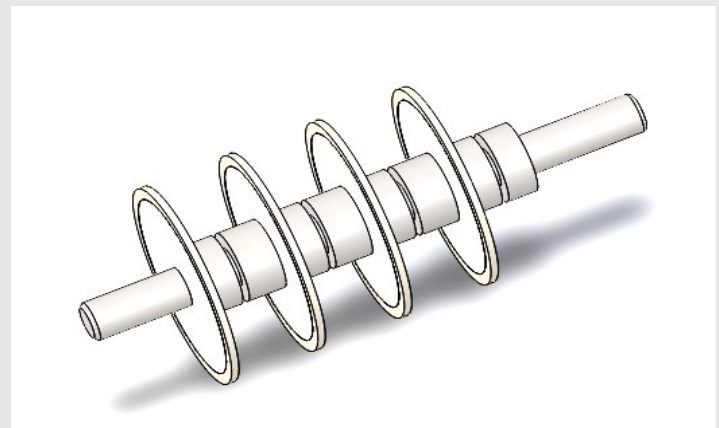


Figura 4. Modelo inicial no validado del eje multidisco

a) Estimación de la resistencia real a la fatiga S'n
Se propone un acero aleado AISI 1020 estirado en frío el cual tiene las siguientes propiedades de resistencia.

Resistencia a la tensión $S_u = 61 \text{ ksi}$
Resistencia a la fluencia $S_y = 51 \text{ ksi}$

Del análisis de la resistencia a la fatiga Sn en función de la resistencia a la tención Su, se tiene:

$$S_u \approx 23 \text{ ksi}$$

Los discos de corte que se utilizaran son discos de segmento continuo de 4 1/2" siendo su centro 7/8" por lo que un factor de tamaño adecuado para el eje se calcula con la Ec. (1)

$$C_s = \left(\frac{D}{0.3}\right)^{-0.11} = \left(\frac{0.875}{0.3}\right)^{-0.11} \approx 0.89 \quad \text{Ec.(1)}$$

Otros factores a considerar son: factor de material (acero), factor de esfuerzo (esfuerzo flexionante únicamente) y factor de confiabilidad.

Factor de material $C_m = 1.0$
Factor de tipo de esfuerzo $C_{st} = 0.80$
Factor de confiabilidad $C_R = 0.81$

La resistencia real a la fatiga S'n se calcula mediante la Ec. (2)

$$S'_n = S_n(C_m)(C_{st})(C_R)(C_s) \quad \text{Ec. (2)}$$

$$S'_n = 13264 \text{ psi}$$

b) Estimación del par torsional en el eje

Se propone una velocidad angular de trabajo del eje $n=1750$ rpm mediante el uso de un motor trifásico de 1.5 HP. El par torsional se calcula mediante la Ec. (3)

$$T = \frac{63000(P)}{n} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$T = \frac{63000(1.5 \text{ HP})}{1750} = 54 \text{ lb.in}$$

Debe continuarse el análisis mediante el cálculo del diámetro aceptable del eje, en varios puntos del mismo. En cada punto se observara la magnitud del par torsional y del momento flexionante que existan allí, deberá calcularse el valor de los factores de concentración de esfuerzos [6].

c) Cálculo de diámetros de sección

Con ayuda de Solidworks 2017° puede determinarse la masa total del sistema discos separadores, siendo esta: $m = 6.064$ lb. De esta forma el eje puede considerarse una viga simplemente apoyada sometida a una carga de flexión uniformemente distribuida de 0.92lb/in y un par de torsión igual a 54 lb.in La Figura 5 muestra el sistema discos-separadores para el modelo de la viga a analizar.

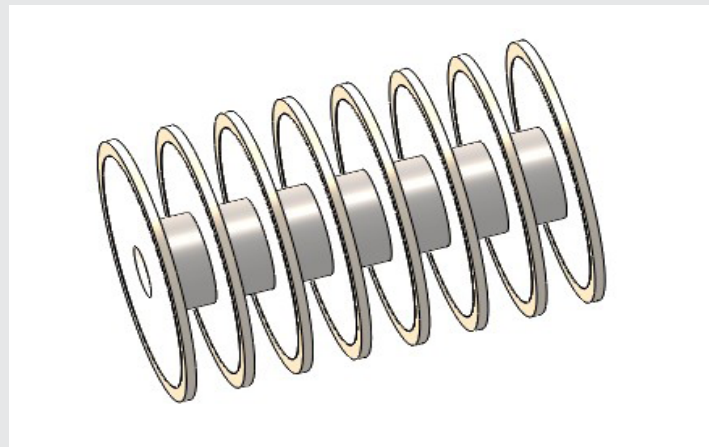


Figura 5. Sistema discos-separadores del eje multidisco

Cabe hacer mención que las fuerzas debidas al trabajo de corte de los discos se considera una variable de diseño para el sistema de avance del material mismo que queda fuera del propósito de este análisis.

Utilizando el Software MDsolid° puede modelarse la viga mencionada anteriormente para obtener las reacciones en los apoyos, así como el esfuerzo cortante máximo y el momento flexionante máximo. La Figura 6 muestra los resultados del estudio realizado.

1) Diámetro en el segmento sin transmisión de potencia (sección A).

El punto A es el asiento de un rodamiento, a este respecto se considera que no hay momentos torsionales

ni flexionantes. Sin embargo si hay una fuerza cortante vertical igual a la reacción en el apoyo $RAy=7.51$ lb \uparrow , como la reacción en el apoyo en el punto B es $RBy=1.43$ lb \downarrow puede emplearse la resultante de estas reacciones para calcular la fuerza cortante aplicando la Ec. (4).

$$V_A = \sqrt{(RAy)^2 + (RBy)^2} \quad \text{Ec. (4)}$$

$$V_A = \sqrt{(7.51)^2 + (1.43)^2} = 7.65 \text{ lb}$$

De lo antes mencionado $M_A=0$ lb.in

Aplicando la Ec. (5) considerando un cambio de sección con chaflán agudo y el uso de una ranura para seguro donde: $Kt=5.5$ y el factor propuesto $N=2$ se tiene.

$$D = \sqrt{2.94K_t(V)N/S'n} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$D = \sqrt{\frac{2.94(5.5)(7.65)(2)}{13254}} \approx 0.137 \text{ in}$$

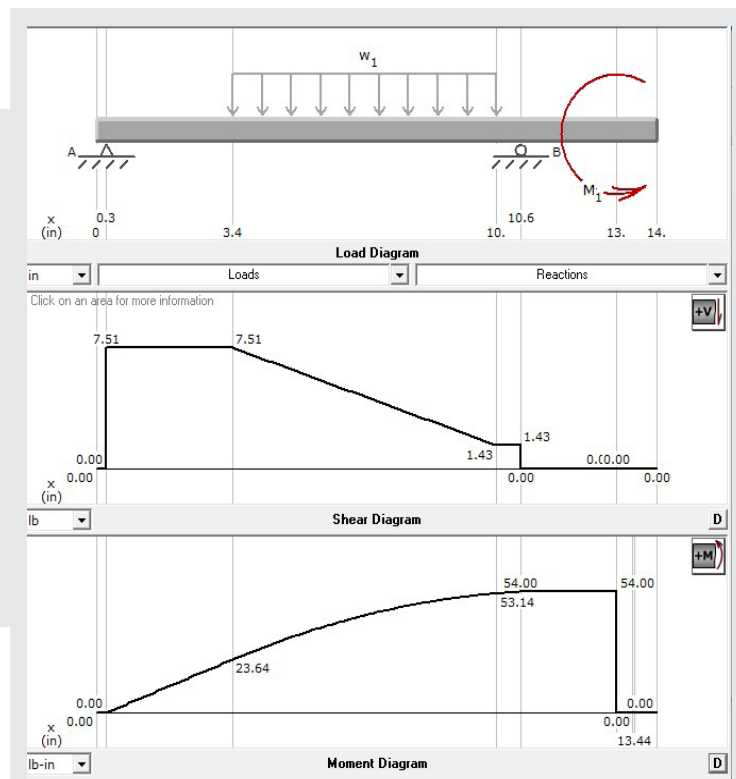


Figura 6. Análisis realizado en MDsolid°

Como puede observarse, este diámetro de sección es muy pequeño, en comparación con el diámetro propuesto de 7/8" ó 0.875". Al respecto en [6] se menciona que en la realidad esto es lo que sucede; es decir el valor real del diámetro del eje en esa sección es por lo regular mucho mayor que el valor calculado, por lo que su diámetro en esa sección queda en función de la selección del rodamiento que soporte la carga radial de 7.65 lb.

Un análisis más preciso con respecto a las fuerzas de reacción en el eje sugiere pequeños desplazamientos en el sistema; de esta forma puede argumentarse que los rodamientos no recibirán una combinación importante de cargas radiales y axiales, por lo que se determina que una selección adecuada del tipo de rodamiento a montar es el TIPO DE BOLAS ABIERTO 6303, cuyo diámetro externo e interno son 1.85 in y 0.669 in respectivamente según se muestra en [7].

2) Diámetro en el segmento con carga distribuida (sección B).

Para el análisis de la carga uniformemente distribuida del conjunto discos-separadores, donde el momento flexionante máximo es 53.14 lb.in se emplea la Ec. (6) considerando una condición de esfuerzos combinados debido a un chaflán agudo al final de la sección y cuerda al principio de la misma para la sujeción y apriete de los discos se considera un concentrador de esfuerzos $K_t=2.5$ y un factor propuesto $N=2$ se tiene.

$$D = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left[\frac{K_t M}{S_n} \right]^2 + \frac{3}{4} \left[\frac{T}{S_y} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}} \tag{Ec. (6)}$$

$$D = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left[\frac{(2.5)(53.14)}{13254} \right]^2 + \frac{3}{4} \left[\frac{54}{51000} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.589 \text{ in}$$

Como puede observarse, este diámetro de sección es más pequeño que el diámetro propuesto de 7/8" ó 0.875", por lo que se concluye que el diámetro propuesto es adecuado para nuestro eje.

3) Diámetro en el segmento con transmisión de potencia (polea), sección D.

El punto B es un asiento de un rodamiento, a este respecto: hay momentos torsionales y flexionantes. Empleando nuevamente la Ec. (4) para el cálculo de la resultante de las reacciones la fuerza cortante.

$$V_B = \sqrt{(7.51)^2 + (1.43)^2} = 7.65 \text{ lb}$$

Del análisis de la Figura 6. $M_B = 54 \text{ lb.in}$
Aplicando nuevamente la Ec.(6) para esfuerzos combinados, considerando un cambio de sección con chaflán agudo y el uso de una ranura para seguro donde: $K_t=3.5$ y el factor propuesto $N=2$ se tiene.

$$D = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left[\frac{(3.5)(53.14)}{13254} \right]^2 + \frac{3}{4} \left[\frac{54}{51000} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.656 \text{ in}$$

Como se montará un rodamiento TIPO DE BOLAS ABIERTO 6303 que soportará la carga radial de 7.65 lb. El diámetro de 0.669" es adecuado y suficiente para esa sección del eje y se continua hasta la sección final del eje. En base a los resultados anteriores

se especifica que la transmisión de potencia se realizara mediante una polea acoplada mediante cuña tipo en trineo, cuyo análisis queda fuera de los alcances del presente trabajo.

Modelación CAD del eje

En la Figura 7 se presenta el modelo del eje, realizado en Solidworks 2017°, de esta manera se puede identificar los cambios de sección y los concentradores de esfuerzo involucrados para cada componente.

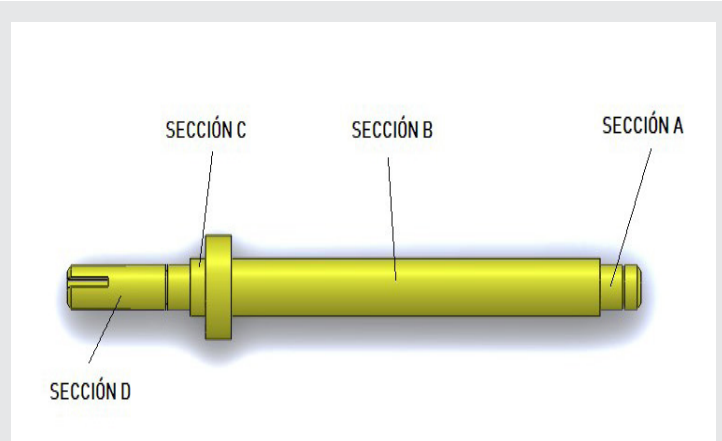


Figura 7. Modelo preliminar del eje

En la Tabla 1 se analizan las dimensiones finales propuestas para los elementos del sistema eje multidisco. Las dimensiones del eje serán sometidas a validación en Solidworks Simulation 2017° las cuales son resultado de los cálculos realizados.

Tabla 1. Componentes de sistema eje multidisco

Nombre del componente	Descripción
Eje	Diámetro sección A 0.669 in Longitud sección A 1.0 in Diámetro sección B 0.875 in Longitud sección B 9.0 in Diámetro de Traslape 1.575 in Longitud de Traslape 0.625 in Diámetro sección C 0.669 in Longitud sección C 0.375 in Diámetro sección D 0.669 in Longitud sección D 3.0 in
Separador	Ancho 0.787 in Diámetro interno 0.880 in Diámetro externo 1.570 in
Rodamientos para montaje	Tipo abierto de bola 6303 Ancho de cara 0.551 in Diámetro interno 0.880 in Diámetro externo 1.570 in
Discos	Diámetro interno 0.875 in Diámetro externo 4.5 in

1. Parámetros de modelado en función del funcionamiento final.

- La selección de la polea de tracción está en función del diámetro de la flecha y la relación de velocidades de corte requeridas.
- Se requiere el diseño de una guarda para protección respecto a los discos de corte.
- El sistema de eje multidisco debe considerar la posibilidad de adaptarse a un sistema de ajuste de altura para realizar el corte.
- La selección de rodamientos está en función de las velocidades de trabajo, las horas de trabajo y el tipo de carga aplicada, se debe considerar su lubricación.
- La sujeción final de los discos se dará mediante una tuerca con sistema anti aflojamiento.

2. Modelado y presentación final.

En base a las condiciones de trabajo y a la información recabada en la Tabla 1, en la Figura 8 se muestra una vista de sección de los elementos del sistema de corte por flecha multidiscos, nótese la flecha de color amarillo, los ocho discos de corte de color grisáceo, siete separadores en color verde, dos rodamientos de bolas en gris y una tuerca de sujeción en color rojo.

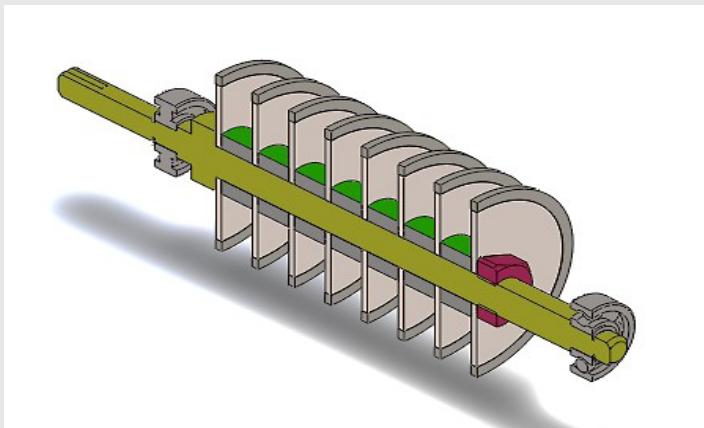


Figura 8. Vista de sección del sistema de corte por flecha multidiscos

La Figura 9 se muestra una vista en render de los elementos del sistema de corte por flecha multidiscos, esa vista es la simulación de apariencia final del componente de máquina.

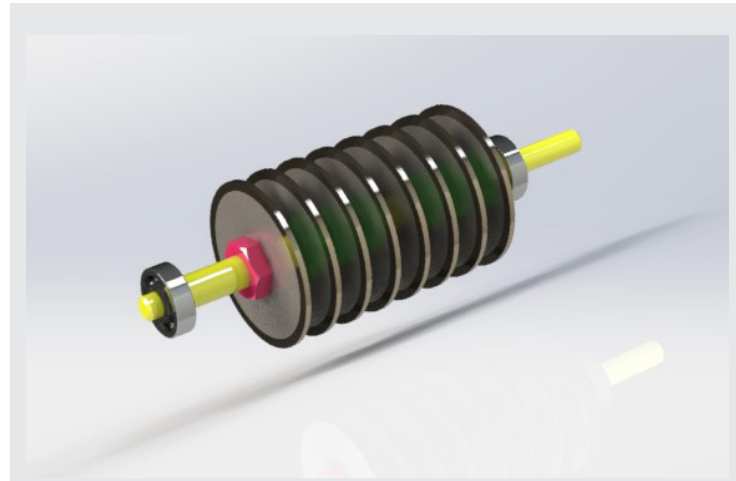


Figura 9. Renderizado del sistema de corte por flecha multidiscos

RESULTADOS

Para el análisis estático de la flecha se utilizó la herramienta Simulation de Solidworks en su versión 2017 para validar el acero propuesto ACERO AISI 1020, las características de este acero están contenidas en [6]. Así entonces, se consideran los datos obtenidos del análisis realizado para la flecha de transmisión $T = 54 \text{ lb.in}$ y un esfuerzo permisible $S'n = 13.27 \text{ ksi}$.

La Figura 10 muestra el espectro de esfuerzos el cual de acuerdo con la teoría de fallas de Von Mises señala que la máxima concentración de esfuerzos se encuentra en la geometría del eje que comprende al cuñero, esta se denota con un color rojo y tiene un valor de $S'n = 0.108 \text{ ksi}$, este valor es relativamente bajo por lo que se considera al acero ACERO AISI 1020 una selección de material adecuada.

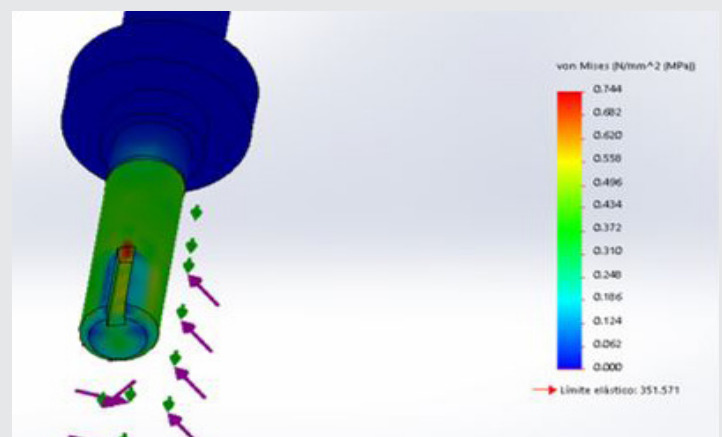


Figura 10. Esfuerzos a los que se somete el eje

Un análisis más preciso con respecto a las fuerzas de reacción en el eje sugiere pequeños desplazamientos, el valor máximo encontrado es de 6.38×10^{-5} por lo tanto puede argumentarse que los rodamientos TIPO DE BOLAS ABIERTO 6303 en este caso son adecuados aludiendo a cargas axiales imprevistas.

tas. La Figura 11 en color rojo la sección que tiende a un desplazamiento relativo.

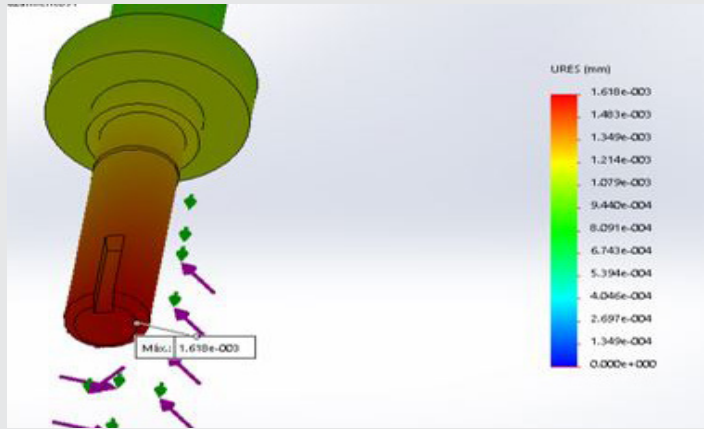


Figura 11. Desplazamientos relativos a los que se somete el eje

La Figura 12 muestra en color rojo la sección que tendera a sufrir una deformación significativa, nótese que se trata del cuñero del cual en una eventualidad se prefiere su deformación al igual que la de la cuña; esto por cuestiones de seguridad y protección para el eje. Empleando la herramienta de Solidworks 2017®, se realiza un análisis de frecuencias para conocer aquellas frecuencias en las que el eje entrará en resonancia.

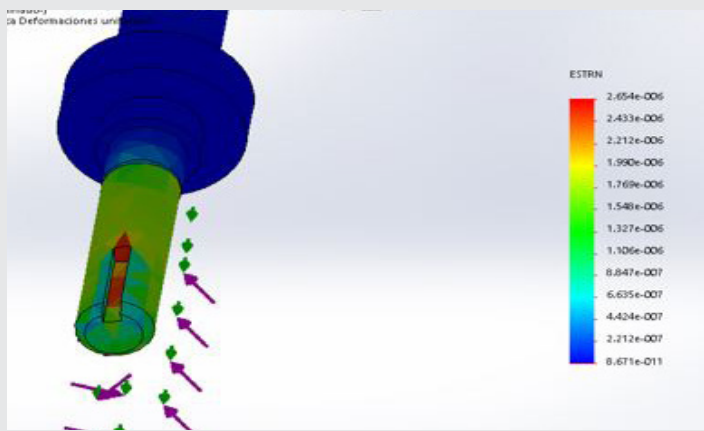


Figura 12. Deformaciones a las que se somete el eje

En la Figura 13, se muestra una imagen donde se aprecian los resultados del primer modo de vibración en el eje:

Como se muestra en la Figura 13, el primer modo de vibración en el eje se obtiene a una frecuencia natural de 9.724 Hz; o sea, a una velocidad de 583.443 rpm. Ahora en la Figura 14, se muestra una imagen donde se aprecian los resultados del segundo modo de vibración en el eje:

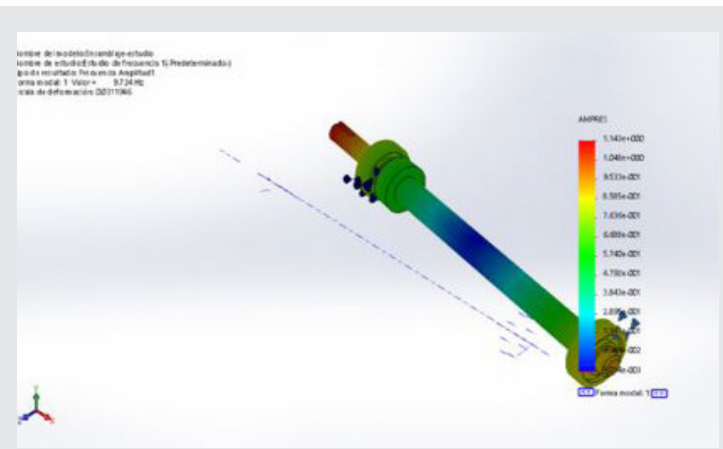


Figura 13. Resultados del primer modo de vibración en el eje

Como se muestra en la Figura 14, el segundo modo de vibración en el eje se obtiene a una frecuencia natural de 1.9358 Hz; o sea, a una velocidad de 116.148 rpm. También en la Figura 15, se muestra una imagen donde se aprecian los resultados del tercer modo de vibración en el eje:

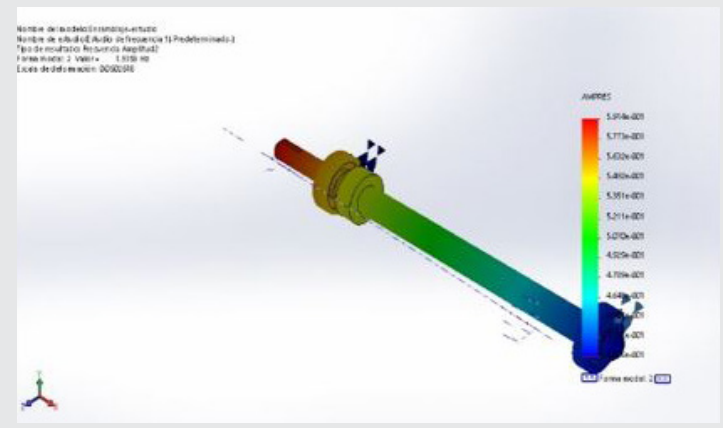


Figura 14. Resultados del segundo modo de vibración en el eje

Como se muestra en la Figura 15, el tercer modo de vibración en el eje se obtiene a una frecuencia natural de 6.4275 Hz; o sea, a una velocidad de 385.645 rpm; por lo que, estos tres modos de vibración podrán existir en el eje real porque el motor tendrá una velocidad máxima de 3600 rpm.

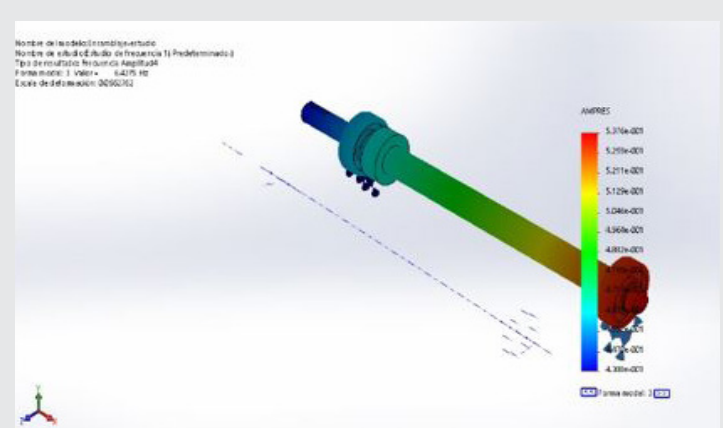


Figura 15. Resultados del tercer modo de vibración en el eje

CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo muestran que el elemento crucial del eje multidisco es la sección donde se montara la polea de transmisión de potencia, sin embargo, se considera que las dimensiones propuestas en la Tabla 1, así como el material seleccionado para su diseño soportarán los esfuerzos y las deformaciones a los que estará sometido. Los resultados obtenidos en los estudios estáticos y de frecuencias son adecuados para la fabricación del eje de acero AISI 1020 el cual va estar apoyado entre rodamientos de bolas 6303.

Debe mencionarse que el modelado, así como el análisis de esfuerzos de este componente pudo llevarse a cabo gracias a las herramientas de Software empleadas para este propósito. Finalmente puede concluirse que el eje multidisco como componente de una máquina más robusta tendrá un bajo costo en su posible fabricación. Esto último debido a que los materiales se encuentran fácilmente en el mercado y a que los procesos de manufactura involucrados son convencionales.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que, para optimizar el proceso de fabricación de tapetes con cuadros de diferentes medidas, se fabriquen los separadores correspondientes tomando en cuenta el espesor del segmento de corte de los discos o en el mejor de los casos armar un segundo eje multidisco que pueda alternarse en la máquina final.

BIBLIOGRAFÍA

[1] R. Martínez, *Proyecto de inversión para el establecimiento de un taller de artesanías de mármol en Santa María Yucuhiti, Tlaxiaco, Oax., Santa María Yucuhiti, Tlaxiaco, Oaxaca: UTM, 2010.*

[2] Centro de Estudios de Competitividad, «El Sector Minero en México: Diagnóstico, Prospectiva y Estrategía.» de *El Sector Minero en México: Diagnóstico, Prospectiva y Estrategía.*, México, D.F, ITAM, 2004, pp. 1-65.

[3] P. Cruz, «Software de Mantenimiento Preventivo para la Maquinaria de la Empresa Mármoles K&A S.A de C.V.» Tepexi de Rodríguez, 2008.

[4] D. R. Fort, «Los materiales petreos naturales: La piedra natural,» Madrid, España, recuperado en 2018, pp. 49-54.

[5] O. Block, «Onyx Slabs & Onyx Blocks,» videos online, [En línea]. Available: <https://www.onyx.com.mx/>. [Último acceso: 7 Julio 2018].

[6] R. L. Moot, «Diseño de ejes,» de *Diseño de elementos de maquinas*, Edo. de México, Pearson-Prentice Hall, 2006, pp. 530-563.

[7] SNR Industry, *Catálogo general de rodamientos SNR, Informaciones técnicas y listas de productos, 2005-2006.*