

ISSN 2531-2189

Volumen 1, Número 3 — Julio — Septiembre - 2017

Revista de Ingeniería Mecánica

ECORFAN®

Indización



ECORFAN®

- Google Scholar
- Research Gate
- REBID
- Mendeley

ECORFAN-Spain

Directorio Principal

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD.

Director Regional

MIRANDA-GARCIA, Marta. PhD.

Director de la Revista

SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC.

Edición de Logística

PERALTA-CASTRO, Enrique. PhD.

Diseñador de Edición

SORIANO-VELASCO, Jesus. BsC.

Revista de Ingeniería Mecánica, Volumen 1, Número 3, de Julio a Septiembre - 2017, es una revista editada trimestralmente por EORFAN-Spain. Calle Matacerquillas 38, CP: 28411. Moralarzal -Madrid. WEB: www.ecorfan.org/spain, revista@ecorfan.org. Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD, Co-Editor: MIRANDA-GARCÍA, Marta. PhD, ISSN-2531-2189. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática EORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN, Imelda. PhD, LUNA-SOTO, Vladimir. PhD, actualizado al 30 de Septiembre de 2017.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan necesariamente las opiniones del editor de la publicación.

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Centro Español de Ciencia y Tecnología.

Consejo Editorial

MARTINEZ-BRAVO, Oscar Mario, PhD

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica-UNAM-México

ROMAN-KALISCH, Manuel Arturo, PhD

Universidad Autónoma de Yucatán-México

SOUSA-GONZÁLEZ, Eduardo, PhD

Universidad Autónoma de Nuevo León-México

ARANCIBIA-VALVERDE, María Elena, PhD

Universidad Pedagógica Enrique José Varona de la Habana-Cuba

SALINAS-AVILES, Oscar Hilario, PhD

Centro de Investigación en Energía-UNAM-México

DE AZEVEDO-JUNIOR, Wladimir Colman, PhD

Federal University of Mato Grosso-Brazil

PÉREZ-ROBLES, Juan Francisco, PhD

CINVESTAV-IPN-México

PARTIDA-RUVALCABA, Leopoldo, PhD.

Universidad Tecnológica de Culiacán-México

MARTÍNEZ-RIVERA, María de los Ángeles, PhD

Escuela Nacional de Ciencias Biológicas-IP- México

GONZALEZ-TORRIVILLA, Cesar Castor PhD

Universidad Central de Venezuela-Venezuela

DE LA FUENTE-SALCIDO, Norma Margarita, PhD

Universidad Autónoma de Coahuila-México

Consejo Arbitral

MPC, PhD

Universidad de Valladolid- Spain

GGO, PhD

Universidad Autónoma Metropolitana- México

DGS, PhD

Universidad de Guadalajara- México

RLR, PhD

Universidad Autónoma de Sonora-México

CBMT, PhD

Universidad Autónoma de Baja California-México

HGV, BsC

Instituto Nacional de Higiene y Epidemiología-México

GOH, PhD

Facultad de Química, UNAM-México

EZNG, PhD

Instituto Nacional de Cardiología-México

Presentación

ECORFAN, es una revista de investigación que publica artículos en el área de: Ingeniería Mecánica.

En Pro de la Investigación, Docencia, y Formación de los recursos humanos comprometidos con la Ciencia. El contenido de los artículos y opiniones que aparecen en cada número son de los autores y no necesariamente la opinión de la Editora en Jefe.

Es presentado el artículo *Diseño, construcción y control de un Robot Paralelo de 5 barras de 2 GDL* por ZUÑIGA, Nadia , CRUZ, Juan, VERA, Edgar y RAMOS, Julio como siguiente artículo *Caracterización de una aleación automotriz modificada con vanadio y niobio*, por VERA-SERNA, Pedro¹ , TENORIO-GONZALEZ, Felipe¹ y BARAJAS-ROSALES, Iván², con adscripción en la ¹Universidad Politécnica de Tecámac, ²Instituto Tecnológico de Pachuca, como siguiente artículo *Generación de energía a partir de fuerzas magnéticas repulsivas en un rotor*, por GOMEZ-MERCADO, Abdiel & PALOMAR-CORONA, José con adscripción, en el Instituto Tecnológico de Pachuca, como siguiente artículo está , *Diseño asistido por computadora de una órtesis mecánica manufacturada en CPVC* por SANDOVAL, Edith, LÓPEZ, Marcos, GÓMEZ, Erick y CORTES, Uzias, como siguiente capítulo tenemos *Sellado del recubrimiento de ácido fítico aplicado sobre la aleación de magnesio AZ31* por, HERNÁNDEZ, Laura A. ¹ , LOMELÍ, Martha², HERNÁNDEZ, Luis S.², ESCUDERO, María³, TORRES, A. Alberto², con adscripción en 1 Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2 Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 3 Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM),CSIC.Finalmente, *Análisis de disipación de energía cinética por elementos tubulares deformables*, por BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Jorge , FLORES-LARA, Vicente, BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Marcos y SZWEDOWICZ-WASIK, Dariusz, con adscripción en el Instituto Tecnológico de Apizaco.

Contenido

| Artículo | Página |
|---|--------|
| Diseño, construcción y control de un Robot Paralelo de 5 barras de 2 GDL ZUÑIGA, Nadia , CRUZ, Juan, VERA, Edgar y RAMOS, Julio | 1-9 |
| Caracterización de una aleación automotriz modificada con vanadio y niobio VERA-SERNA, Pedro, TENORIO-GONZALEZ, Felipe y BARAJAS-ROSALES, Iván | 10-15 |
| Generación de energía a partir de fuerzas magnéticas repulsivas en un rotor GOMEZ-MERCADO, Abdiel & PALOMAR-CORONA, José | 16-21 |
| Diseño asistido por computadora de una órtesis mecánica manufacturada en CPVC SANDOVAL, Edith, LÓPEZ, Marcos, GÓMEZ, Erick y CORTES, Uzias | 22-30 |
| Sellado del recubrimiento de ácido fítico aplicado sobre la aleación de magnesio AZ31 HERNÁNDEZ, Laura A., LOMELÍ, Martha, HERNÁNDEZ, Luis S., ESCUDERO, María, TORRES, A. Alberto | 31-40 |
| Análisis de disipación de energía cinética por elementos tubulares deformables BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Jorge , FLORES-LARA, Vicente, BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Marcos y SZWEDOWICZ-WASIK, Dariusz | 41-51 |
| <i>Instrucciones para Autores</i> | |
| <i>Formato de Originalidad</i> | |
| <i>Formato de Autorización</i> | |

Diseño, construcción y control de un Robot Paralelo de 5 barras de 2 GDL

ZUÑIGA, Nadia *†, CRUZ, Juan, VERA, Edgar y RAMOS, Julio

Recibido 08 Enero, 2017; Aceptado 12 Agosto, 2017

Resumen

El presente trabajo describe una metodología aplicada para el diseño y construcción de mecanismos. Así mismo, la sintonización de un controlador del tipo PID, basada en la respuesta en lazo abierto de las articulaciones vistas como servomecanismos, para aplicaciones didácticas.

Se siguió la metodología de Nigel Cross para llegar a la selección del diseño conceptual, los materiales, así como para la elección de los dispositivos electrónicos usados para un robot paralelo de configuración cinco barras de 2 grados de libertad (GDL). Durante el proceso de diseño, se hizo un análisis de esfuerzos, para determinar el factor de seguridad y garantizar que la elección de materiales fuera adecuada para las fuerzas a las que se somete el mecanismo. Así mismo, se muestra el modelo cinemático directo e inverso del robot paralelo, que es útil para las referencias de control. Para la sintonización de la ley de control PID de los actuadores, que son motores de CD, se utiliza la función transferencia, obtenida de la respuesta en lazo abierto del sistema ante una entrada escalón. Se muestran los resultados comparativos del modelo cinemático contra la respuesta real del robot funcionando en tiempo real ante trayectorias deseadas.

Robot Paralelo, cinco barras, 2 GDL, Diseño, PID

Abstract

The present work shows a technique applied in mechatronics for the design and construction of mechanisms. Also, the tuning of a PID controller, based on the response in open loop of the joints called servomechanism, for didactic applications. In order to choose the design, construction materials and electronic devices, the Nigel Cross methodology was used for a five bar parallel robot of two DoF. In the design stage a stress analysis was made to determine the factor of safety, as well as, to be sure the election of appropriate materials for the forces suffered by the mechanism. In addition, the direct and inverse kinematic model is shown that is useful for the references control. It was used the transfer function obtained on open loop with step in, for the tuning of the PID control laws, the results are shown comparing the kinematic model versus the response of the robot in real time.

Parallel Robot, Five bar arms, 2-DoF, Design, PID

Citación: ZUÑIGA, Nadia, CRUZ, Juan, VERA, Edgar y RAMOS, Julio. Diseño, construcción y control de un Robot Paralelo de 5 barras de 2 GDL. Revista de Ingeniería Mecánica. 2017. 1-3: 1-9.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: nasamzp@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En las últimas décadas, el desarrollo de sistemas mecatrónicos, ha avanzado exponencialmente, ya que existen aplicaciones en todos los campos de la tecnología, como lo son: la automotriz, biotecnología, biomédica, telecomunicaciones, por mencionar algunas [1, 2, 3, 4]. En diversos campos, existen aplicaciones de robots paralelos, debido a las ventajas que presentan, en comparación a las estructuras seriales [2]. Se han diseñado robots paralelos, dependiendo la aplicación, que van desde los dos, hasta los seis grados de libertad, incluyendo el desarrollo del control de los mismos.

El enfoque de este trabajo es abarcar desde el diseño del mecanismo, realizar los análisis de esfuerzos y cálculo de factor de seguridad, realizar el proceso de maquinado y finalmente diseñar un control para el robot paralelo de cinco barras de dos GDL.

El objetivo del trabajo es poder integrar las diferentes disciplinas que conforman a la mecatrónica [5, 6], aplicando la metodología de diseño de Nigel Cross, la cual consiste en una serie de etapas que incluyen, la clarificación de objetivos, establecimiento de funciones, especificación de requerimientos, determinación de características, generación de alternativas y evaluación de las mismas [7], dicha metodología permitió la elección del diseño conceptual, materiales, así como la elección de los dispositivos electrónicos implementados; otro objetivo, es mostrar una de las técnicas que se utilizan para la identificación basada en la respuesta en lazo abierto para la sintonización de la ley de control PI [8, 9].

Desarrollo

Metodología de Diseño

En esta etapa del trabajo, se siguió la metodología de diseño de Nigel Cross [3], la cual consiste en una serie de etapas que facilitan el proceso de diseño.

1. Clarificación de objetivos. El fin de esta etapa es, expresar las necesidades de la manera más clara posible, haciendo las preguntas: ¿qué?, ¿cómo? y ¿para qué? Los objetivos del diseño del robot paralelo, se pueden ver en la Figura 1.

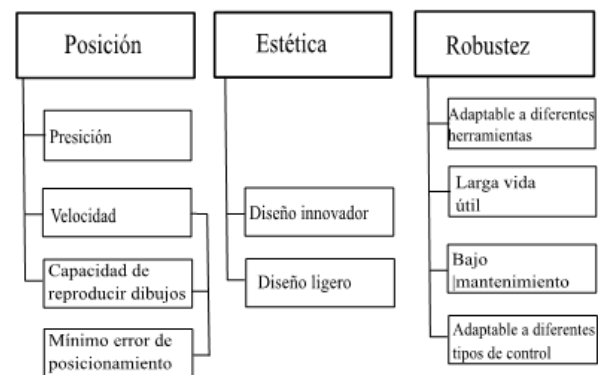


Figura 1 Clarificación de objetivos

2. Establecimiento de funciones. En esta etapa, se expresa la función general, en términos de entrada-proceso-salida. Ver Figura 2.

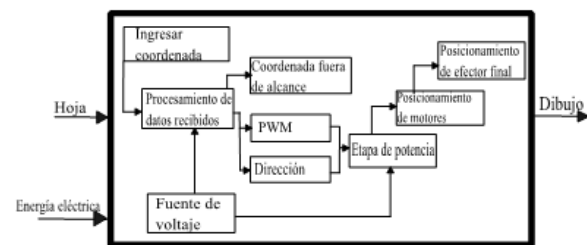


Figura 2 Establecimiento de funciones. Contenido de la caja negra

3. Especificación de requerimientos. En esta etapa se determina el nivel de importancia de cada una de las funciones.

Se enumeran las funciones y se determina si es deseable (D) o forzoso (F) que el diseño las incluya (ver Tabla 1).

| No | F/D | Requerimiento | Observaciones |
|----|-----|---|----------------------------------|
| 1 | F | Espacio de trabajo 15x20 cm | |
| 2 | D | Material ligero y resistente | |
| 3 | F | Precio | No exceda 5,000.00 |
| 4 | D | Mecanizable | |
| 5 | F | Que sea estético | |
| 6 | F | Que se adapte a diferentes tipos de control | |
| 7 | F | Presición de posicionamiento | Se usará para reproducir dibujos |
| 9 | F | Actuadores | 2 motores CD |
| 10 | D | Bajo mantenimiento | |
| 11 | D | Refacciones accesibles | |
| 12 | D | Efactor final cambiante | |

Tabla 1 Especificación de requerimientos

4. Determinación de características.

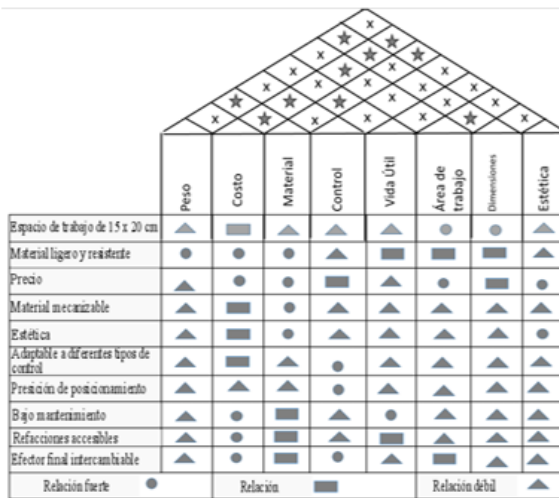


Figura 3 Casa de la calidad de diseño

Se hace una relación entre las características y los atributos que debe tener el diseño, en este trabajo se usa la “casa de la calidad de diseño”.

En la Figura 3, se puede observar, por ejemplo, que hay una relación fuerte entre el peso y el material.

5. Generación de alternativas. Esta etapa es esencial, ya que aquí se generan las posibles soluciones para cada uno de los requerimientos; para este trabajo se usó el método de la caja morfológica. Se dibuja una caja con las soluciones, para poder apreciar las posibles combinaciones que puedan crearse. Ver Tabla 2.

| Estética | Peso | Costo | Material | Control | Vida Útil | Área de trabajo | Dimensiones |
|----------|-----------|------------------|----------|----------|-----------|-----------------|-------------|
| Baja | 1kg - 2kg | <\$5000 | Aluminio | PIC | 5 años | 20x25 cm. | 30x50 cm. |
| Media | 2kg - 3kg | \$5000 - \$10000 | Nylamid | Arduino | 10 años | 15x20 cm. | 50x80 cm. |
| Alta | 3kg- 4kg | >\$10000 | Acrílico | Hercules | 15 años | 30 x 35 cm. | 10x30 cm. |
| | | | Acero | | | | |

Tabla 2 Caja morfológica

6. Evaluación de alternativas. Una vez que se generaron las alternativas, el diseñador, se encarga de elegir la mejor, asignando un peso o calificación a cada una de las características y así poder obtener una calificación final para cada posible diseño. El diseño que se eligió, con base en la evaluación de alternativas, es el Diseño 1(ver Tabla 3), ya que como se puede ver en la Tabla 4, es el que obtuvo la calificación más alta. Esta calificación, se obtiene asignando un valor de peso (W) a cada criterio de diseño, la suma de todos los pesos debe dar 100, después considerando cada diseño que se evalúa se asigna una calificación S, entre 0 y el valor de W y se divide entre 100, que da como resultado el valor de U. Al final se suman todas las calificaciones y se obtiene la calificación total. Una vez generadas las alternativas, se combinan las soluciones a los requerimientos, para posteriormente hacer una evaluación. Se generaron dos posibles combinaciones. Ver Tabla 3.

| Opción | Estética | Peso | Costo | Material | Control | Vida Útil | Área de trabajo | Dimensiones |
|--------|----------|------------|-------------------|----------|----------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | Alta | 1kg 2kg | <\$5000 | Aluminio | Arduino | 10 años | 15x20 cm. | 50x80 cm. |
| 2 | Media | 2kg 3kg | \$5000 \$10000 | Nylamid | Hercules | 15 años | 30 x 35 cm | 50x80 cm. |

Tabla 3 Combinaciones elegidas. A partir de la caja

| CRITERIO DE DISEÑO | Peso | Diseño 1 | | Diseño 2 | |
|--|------|----------|----------|----------|---------------|
| | | W | S | U | S |
| 1. POSICIÓN | | | | | |
| Presición | 11 | 9 | 0.9 9 | 9 | 0. 99 |
| Velocidad | 11 | 8 | 0.8 8 | 8 | 0. 88 |
| Error de Posicionamiento Casi Despreciable | 11 | 9 | 0.9 9 | 9 | 0. 99 |
| 2. ESTÉTICA | | | | | |
| Diseño Innovador | 10 | 1 0 | 1 | 9 | 0. 9 |
| Diseño Ligero | 9 | 8 | 0.7 2 | 6 | 0. 64 |
| 3. ROBUSTEZ | | | | | |
| Adaptable a Diferentes Herramientas | 8 | 8 | 0.6 4 | 8 | 0. 64 |
| Larga Vida útil | 9 | 1 0 | 0.9 3 | 1 0 | 0. 9 63 |
| No requiera mantenimiento constante | 7 | 9 | 0.6 3 | 9 | 0. 63 |
| Adaptable a Diferentes tipos de Control | 7 | 1 0 | 0.7 0 | 1 0 | 0. 7 |
| 4. COSTO | | | | | |
| Material | 5 | 9 | 0.4 5 | 7 | 0. 35 |
| Tarjeta de Control | 6 | 8 | 0.4 8 | 7 | 0. 42 |
| Manufactura | 6 | 9 | 0.5 4 | 7 | 0. 42 |
| TOTAL | | | 8.9 2 | | 8. 46 |

Tabla 4 Evaluación de alternativas

Morfológica

Metodología de Nigel Cross, se comienza el diseño a detalle del robot paralelo, que consiste en un mecanismo de 5 barras conectado a una base por dos acudadores, que son motores de corriente directa (MCD), con los cuales se controla dos ángulos de salida, que a su vez proveen de dos grados de libertad al efector final. En la Figura 4 se puede observar la estructura del mecanismo.

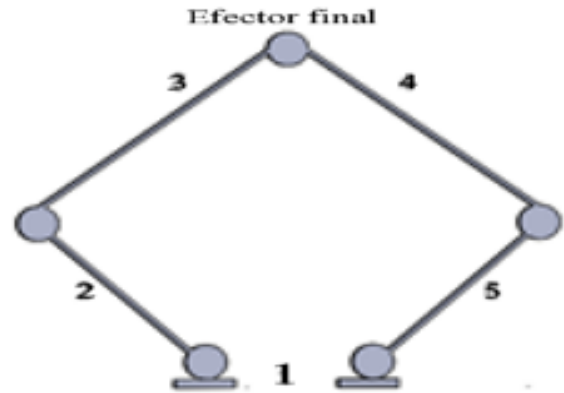


Figura 4 Configuración del mecanismo paralelo 5 barras 2 GDL

Por medio de una simulación en el software Scilab, que usa las cinemáticas inversa y directa, se propusieron las medidas que deben tener los eslabones del robot, para alcanzar el área de trabajo especificada en los requerimientos (Tabla 1). En la Figura 5, se muestra una primera propuesta de diseño del robot, la cual se descartó, ya que los eslabones tenían demasiado peso, con lo que el eje del motor sufría una fuerza flexionante, que a su vez reducía el factor de seguridad, además que la junta entre eslabones debía soldarse y el precio de maquinado es elevado.

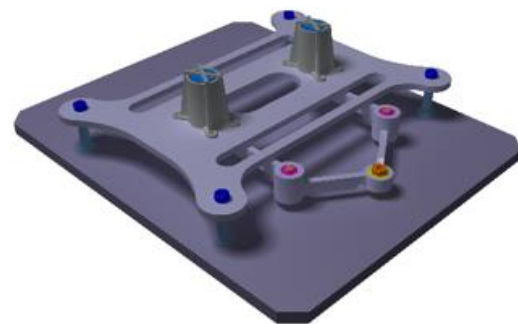


Figura 5 Propuesta de diseño conceptual

Diseño a detalle

Una vez determinadas las especificaciones con las que ha de hacerse el diseño, mediante la En la Figura 6, se muestra el del diseño final del mecanismo.

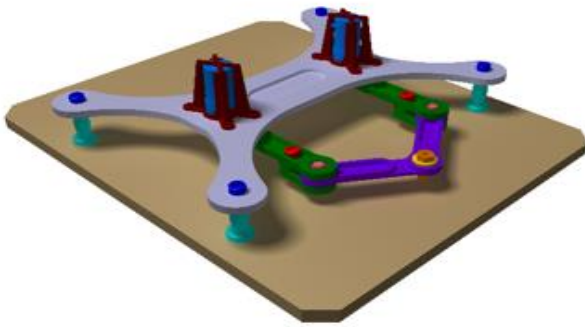


Figura 6 Diseño final en 3D del robot paralelo 5 barras 2 GDL

Se realizaron los análisis de esfuerzos y deformaciones, así como el de factor de seguridad. El factor de seguridad calculado es de 6, considerando una carga en el efector final de 800 gramos. Ver Figura 7.

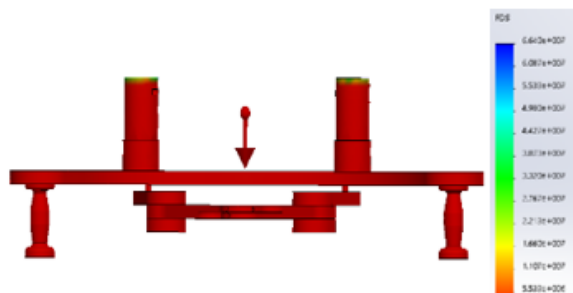


Figura 7 Cálculo del Factor de seguridad

Además, se realizó el análisis estático del mecanismo (Figura 8), para poder observar las deformaciones debidas a la fuerza aplicada en el efector final que es de 11.46 N.

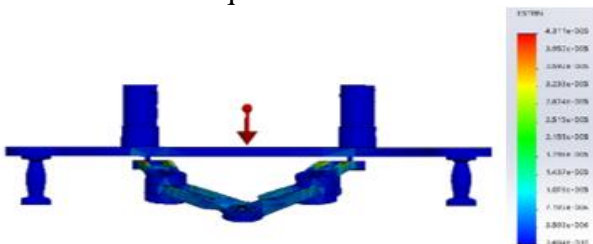


Figura 8 Resultados de Análisis estático

La deformación máxima presentada por el mecanismo, en el área del eje del motor es de $[(4.31 \times 10)^{-5}]$.

Se hizo además un análisis para determinar el esfuerzo cortante a la que es sometido el perno, debido a las fuerzas de tensión-compresión con una magnitud de 11.66 N, las cuales son generadas por el torque de los motores, que es de 18Kg·cm. Figura 9. El valor máximo calculado es de 2.2 MPa.

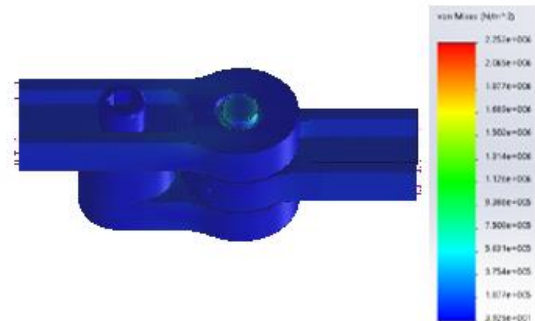







Figura 9 Análisis de esfuerzo cortante a perno

Posterior al diseño de detalle, que incluye los dibujos de ingeniería y selección de materiales; se realizó el el proceso de maquinado, determinando las herramientas a usar y el proceso de manufactura adecuado. El material necesario y el mecanizado para las piezas, se pueden observar en la Tabla 5. Maquinado en fresadora CNC

Tabla 5 Material y herramienta usados para el proceso de maquina

Por último, se hizo un análisis para determinar la fuerza de torsión sufrida por el eje del motor, debido a la fuerza requerida para vencer la inercia de los eslabones. Figura 10. El valor del esfuerzo máximo calculado es de $1.46 \times [10]^8 \text{ N/m}^2$, que es menor al límite elástico del material (acero inoxidable) que es de $1.70 \times [10]^8 \text{ N/m}^2$.

| Maquinado en fresadora CNC | | |
|---|---------------------------|---|
| Pieza | Material | Herramientas a utilizar |
|  | Placa de aluminio 3/8" | *Fresa 3/8" *Broca P/acero de 1/4" *Broca P/acero de 3/8" *Broca P/acero de 31/64 |
|  | Solera de aluminio 3/8x2" | *Fresa 3/8" *Broca P/acero de 1/4" *Broca P/acero de 3/8" |
|  | Solera de aluminio 3/8x2" | *Fresa 3/8" *Broca P/acero de 1/4" |
| Maquinado en Torno CNC | | |
|  | Barra redonda 1,3/16" | Broca P/acero de 11/32" *Broca de centros *Butil de tronzado *Butil de cilindrado *Moleteador |
| Impresión 3D | | |
|  | Filamento ABS | *Base adhesiva *Espátula |

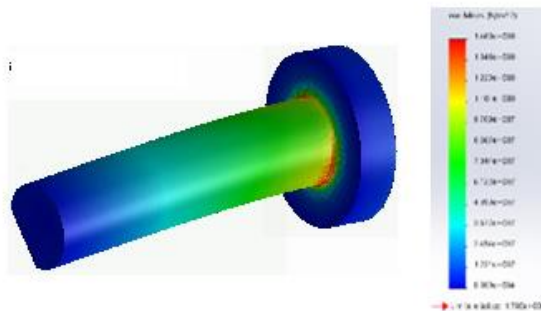


Figura 10 Análisis de torsión a flecha de motor

Al llevar a cabo el proceso de arranque de viruta se necesitó de un software CAM, para

ello se ocupó CAMWorks, a partir de los modelos realizados en CATIA. Al generar el código G para el maquinado en CNC, se verificó el mismo en el simulador didáctico WinUnisoft; ya que es compatible con el centro de maquinado con control FANUC. La simulación se hace para identificar cualquier falla en el código o posibles interferencias en las trayectorias generadas por el CAMWorks. De igual manera se hace para el código del proceso de torneado, el cual se verificó en el simulador HAAS. Por último, para fabricar las bases de los motores, se utilizó una impresora 3D MakerBot Replicator.

Desarrollo de control

Las propiedades dinámicas de una planta, pueden ser aproximadas a un sistema simple, que son sistemas que pueden representarse como una ecuación de primer o segundo orden y poder así sintonizar un controlador para dicha planta. La sintonización de un controlador, es el proceso de seleccionar los parámetros que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas. La respuesta de la planta a una entrada escalón se obtiene de manera experimental, la Figura 11 muestra los datos obtenidos para la identificación de uno de los motores con la carga de los eslabones 2 y 3.

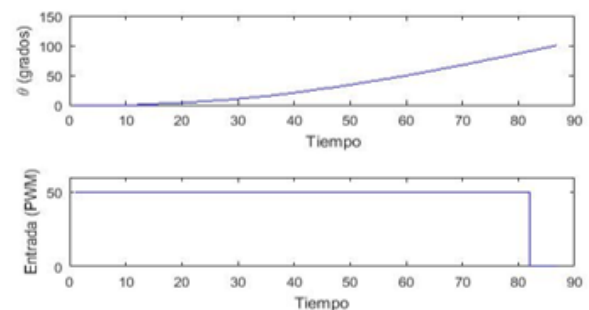


Figura 11 Respuesta a una entrada de 50 PWM

Con ayuda de la herramienta Ident de Matlab, se estiman un modelo y una función de transferencia. Figura 12. El modelo estimado, tiene una aproximación de 79.6%.

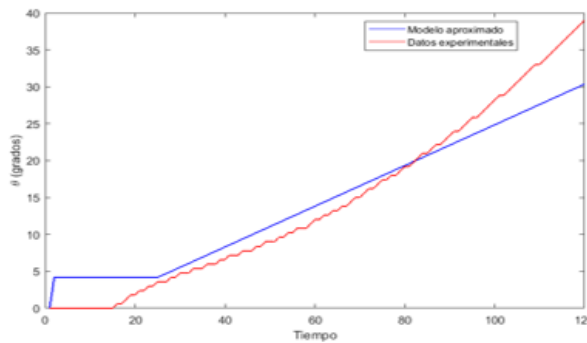


Figura 12 Modelo estimado vs Datos experimentales

Una vez teniendo el modelo estimado, el cuál es un sistema de segundo orden, representado por la función de transferencia de la Ec. 1.

$$(U(s))/(\theta(s))=0.0068918/(s^2+1x \text{ [10]}^{(-6)} s+1) \quad (1)$$

Usando la Herramienta Tune de Simulink, se sintonizó un controlador PI, obteniendo las siguientes ganancias:

$$K_p=1.89$$

$$K_i= 0.0004342$$

En la Figura 13, se muestra el circuito de control implementado para regular la posición de los actuadores (MCD), que están acoplados en la base de la cadena cinemática (eslabón fijo, ver Figura 4).

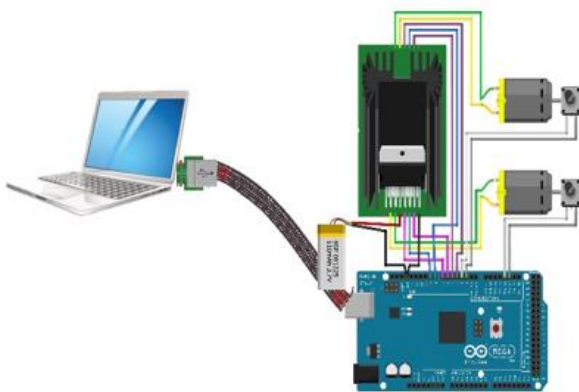


Figura 13 Esquema del circuito de control

Una vez teniendo la interfaz para controlar la posición de los actuadores, se implementaron las ganancias calculadas en un algoritmo, para cargarlo a la tarjeta Arduino. El control PI implementado, tiene la estructura de la Ec. 2.

$$u(k)=(K_p*K_i)e(k)-K_p(e(k-1))+u(k-1) \quad (2)$$

Donde, $u(k)$, es la salida del control actual, K_p y K_i , son las ganancias calculadas, $e(k)$, es el error actual (referencia – posición medida) y $e(k-1)$, es el error anterior. Resultados.

En las figura 14, se muestran imágenes del robot paralelo de 5 barras de 2 GDL, maquinado y ensamblado, con el circuito de control montado sobre la base superior del robot.



Figura 14 Robot paralelo de 5 barras de 2GDL

Una vez que se implementó el algoritmo, se obtuvo la respuesta de la Figura 15, en la cual se ven la posición angular medida, que es la respuesta de uno de los motores a una referencia de 40 grados. Se puede observar, que la respuesta, es lenta, ya que le toma 12.5 segundos en alcanzar a la referencia, sin embargo el error es del 0.5%, un error de posicionamiento bajo, lo que se solicitó en el establecimiento de requerimientos

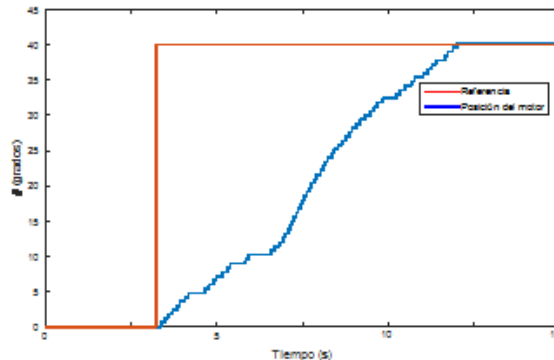


Figura 15 Robot paralelo de 5 barras de 2GDL

Agradecimiento

Nuestro agradecimiento a la Universidad Politécnica de Pachuca y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por hacer posible la realización de este trabajo.

Conclusiones

Este trabajo presenta el diseño, construcción y control de un robot paralelo de 5 barras de 2 GDL, de lo cual, se puede concluir lo siguiente:

1. La metodología de Nigel Cross permitió llegar a un diseño conceptual, de una manera ordenada, lo que nos facilitó llegar al proceso de maquinado sin necesidad de hacer modificaciones, evitando pérdidas de tiempo y económicas.
2. Se comprobó por medio de los análisis de esfuerzos y deformaciones, que la elección de materiales es adecuada para el

mecanismo, ya que soportará las fuerzas a la que será sometido.

3. El cálculo del factor de seguridad, nos indica que es posible implementar para futuros trabajos un efector final de mayor masa, que incluso pueda agregar un grado de libertad al robot.
4. La realización de las simulaciones de código G, antes del proceso de maquinado permitió
5. asegurar el uso óptimo de materiales y horas máquina, evitando pérdidas y gastos innecesarios.

Al implementar la estrategia de control PI y a partir de los resultados obtenidos se observó un comportamiento lento para llevar al sistema a la referencia deseada, por esta razón se recomienda para trabajos futuros.

Implementar un control más robusto que puedan responder a los problemas de no linealidad y así tener una respuesta más agresiva.

Referencias

- [1] Merlet, J. P., (1995). Determination of the orientation workspace of parallel manipulators. *Journal of intelligent and robotic systems*, 13:143–160.
- [2] Parallel Robot Design. (2008). Naqib Daneshjoo, Enayat Danishjoo, Sylvia Rovnakova. Faculty of Mechanical Engineering, I, 1-8.
- [3] Merlet, J-P. (2004). Parallel manipulators: state of the art and perspectives.
- [4] Sergiu-Dan Stan, Vistrian Mătieș and adu Bălan. Optimization of a 2 DOF MicroParallel Robot Using Genetic Algorithms. Technical University of Cluj-Napoca, Romania.

[5] Barrientos Antonio, Peñín Luis, Balaguer Carlos, Aracil Rafael. Fundamentos de Robótica. Madrid (España): Segunda edición.

[6] Reyes Fernando, Cid Jaime, Vargas Emilio. Mecatrónica, control y automatización. Ciudad de México (México): Primera edición.

[7] Nigel Cross. Engineering Design Methods. (2000). Keynes (Ucrania): Tercera edición.

[8] Katsuhiko Ogata. (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid (España): Quinta edición.

[9] Pinto Enrique, Matia Fernando. (2010). Fundamentos de control con Matlab. Madrid (España): Primera edición.

Caracterización de una aleación automotriz modificada con vanadio y niobio

VERA-SERNA, Pedro¹ *†, TENORIO-GONZALEZ, Felipe¹ y BARAJAS-ROSALES, Iván²

¹Universidad Politécnica de Tecámac

²Instituto Tecnológico de Pachuca

Recibido 28 Enero, 2017; Aceptado 12 Julio, 2017

Resumen

Se modificó y caracterizó en el aspecto mecánico una aleación de aluminio utilizada en un automóvil sedan comercial fabricado en México agregando vanadio (V) y niobio (Nb) mediante tratamiento térmico y con ello poder comparar la con la aleación original, para la caracterización se utilizaron las siguientes máquinas y equipod: difractómetro de rayos X, durómetro, máquina universal, microscopio metalográfico y de barrido, con la finalidad de poder observar el efecto del V y el Nb sobre la aleación de aluminio, con la caracterización de difracción de rayos X se observó un cambio de fases cristalinas, mediante la metalografía se pudo observar un cambio de tamaño de grano, lo que mejora su distribución con respecto a la pieza original tratada térmicamente, el valor de dureza se incrementó, mientras que los valores de resistencia mecánica tuvieron poca variación, lo anterior permite determinar el cambio de propiedades observadas en función del tamaño de grano y un material homogéneo con la agregación del V y Nb, además de poder evidenciar los cambios de fases.

Aleación de aluminio, Aleación automotriz, Niobio, Vanadio

Abstract

Car body alloy of automotive vehicle used in México was modified using vanadium and niobium powders, powders were added with heat treatment, so the results were compared with original alloy under same conditions, the equipment used were X-Ray Diffractometer, Metallographic Microscope, Electromechanical Universal Tester, Hardness Tester, samples were evaluated and compared to identify the changes in alloy on structural phases, grain size, hardness and changes on surface, the grain have smaller diameter and was observed better distribution when were applied niobium and vanadium with heat treatment on samplers, it was possible using the metallographic microscope, the hardness have increase on value, mechanical resistance was similar in comparison with original part of car body, the results let identify better distribution in material with decrease on dimensions of grain, changes on structural phases were discussed.

Aluminum alloy, Car body alloy, Niobium, Vanadium

Citación: VERA-SERNA, Pedro, TENORIO-GONZALEZ, Felipe¹ y BARAJAS-ROSALES, Iván. Caracterización de una aleación automotriz modificada con vanadio y niobio. Revista de Ingeniería Mecánica. 2017. 1-3: 10-15.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: pedrovera.upt@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En la actualidad en México la inversión automotriz es fuerte, en el país se espera estar claramente en el lugar número 6 de producción de autos y se requiere tener un desarrollo tecnológico en este ramo, dentro de ello está el Estado de México ya que compite por estar en los primeros lugares, una problemática actual de estudio en los autos son el alto consumo de energía y la necesidad de materiales ligeros y resistentes al impacto que permita salvaguardar a los pasajeros, la anterior acompañado de una reducida investigación aplicada en carrocerías en el país, por lo que se establece un área de oportunidad en el estudio de carrocerías ligeras y resistentes mecánicamente. En este sentido se ha realizado un estudio del arte en donde se encontraron materiales como V y Nb para mejorar la resistencia mecánica del material y mantener un peso ligero, en trabajos previos como el de Romo se han estado realizando pruebas con resultados positivos con aleaciones de Nb y Al, por lo anterior se busca continuar evaluando el efecto del Nb con otros materiales como el V, por lo que en este trabajo se caracterizaron muestras metálicas de carrocería con difracción de rayos X, metalografía, microscopía electrónica de barrido, medición de dureza y ensayos de tracción con máquina universal, con la finalidad de comparar los cambios en sus propiedades al agregar V y Nb, en el que se encontraron valores superiores del material en comparación con el material tratado térmicamente que existe en el mercado. En este trabajo se presentaran los resultados obtenidos de las pruebas teniendo una aleación ligera y que además de los resultados obtenidos en el material fortalece la formación de estudiantes de ingeniería y del grupo de investigación, al utilizar técnicas de caracterización de materiales para el desarrollo de nuevas propuestas de aleaciones orientadas al sector automotriz.

Metodología a desarrollar

Para el desarrollo del proyecto se adquirió una aleación de un auto fabricado en México, fue una pieza lateral del marco de la puerta original, la cual es ligera y resistente utilizada actualmente en los vehículos. Se realizó la investigación de la aleación de aluminio con materiales de V y Nb ya que estos se definieron en el estudio del arte como materiales adecuados, logrando así desarrollar un proyecto con aleación automotriz comercial, en el que se modificaron las propiedades del material y permite observar la relación existente con el tamaño de grano, logrando proponer un proceso alternativo con la adición de estos materiales, estos materiales fueron de la marca Sigma-Aldrich en forma de polvo.

Se utilizó un difractómetro de rayos X Bruker Advance con radiación de Cu y detector LYNXEYE XE, utilizando el software EVA y base de datos PDF2 para la identificación de fases presentes, se utilizó un durómetro Mitutoyo digital Wizhard para poder comparar la dureza superficial de las muestras, el tratamiento térmico se realizó en una Mufla Mondragón HR12-2/1200-E-R, mientras que se utilizó un microscopio metalográfico para determinar el tamaño de grano, se utilizó en microscopía electrónica de barrido un equipo JEOL a 20 kV. Para la caracterización de dureza y de tracción la muestra se preparó de acuerdo a las normas ASTM.

Resultados

Para el estudio se utilizó el marco delantero de un vehículo tipo sedan, se prepararon las muestras a las que se les se agregó el porcentaje de materiales de V y Nb de acuerdo al peso de la placa, posteriormente se introdujeron las muestras a la mufla para buscar la integración de los elementos en la placa, en este caso las temperaturas fueron de 530°C y 550°C.

En la figura 1 se muestra del lado izquierdo la pieza de la aleación original y en el lado derecho la muestra con los materiales agregados.



Figura 1 Muestras de Nb-V

| Número de Probeta | Masa (gramos) | Material Agregado | Masa del material agregado |
|-------------------|---------------|-------------------|----------------------------|
| 1 | 5.4900 | Ninguno | 0 |
| 2 | 5.4536 | V Nb | V= 0.0062 Nb= 0.025 |

Tabla 1 Proporciones en Probeta

Evaluación de dureza

De los resultados de la medición de la muestra que fue tratada a 530°C, se observó una mayor dureza con respecto de la muestra tratada a 550°C. Los resultados se presentan en la tabla 1 en la que se presentan los valores más representativos de las lecturas tomadas.

| Número de Probeta | Dureza alcanzada con Tratamiento térmico a 530 °C | HRA con Tratamiento térmico a 550 °C |
|-------------------|---|--------------------------------------|
| 1 | 31.9 | 21 |
| 2 | 34 | 27 |

Tabla 2 Valores de dureza de aleaciones

Microscopia Electrónica de Barrido

Los resultados obtenidos con el microscopio electrónico de barrido permiten observar los cambios en la superficie de la aleación, así en la figura 2 se tiene una superficie homogénea con precipitados, mientras que en la figura 3 se observa la formación de elementos planos irregulares sobre la superficie, las cuales se atribuyen a los materiales que se agregaron, que al ser sometidos a un tratamiento térmico de 530°C facilitan la homogenización. Normalmente los granos crecen debido a la migración de los bordes de grano, pero como no todos los granos pueden crecer al mismo tiempo, unos crecen a expensas de otros, pero al mantener la temperatura y velocidades de enfriamiento lentas permite la homogenización del tamaño medio de grano, en este caso se obtuvo una distribución homogénea, se observó un cambio de textura y la formación de capas externas en donde se tienen fases diferentes.

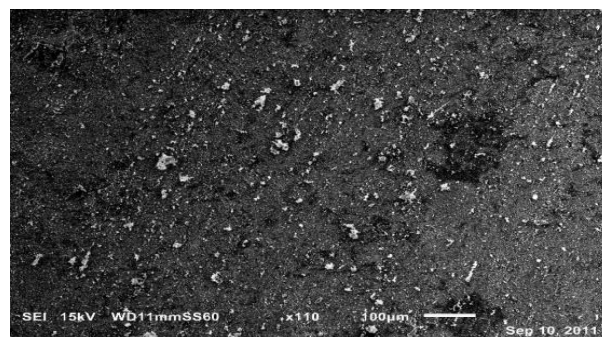


Figura 2 Imagen de muestra sin recubrimiento

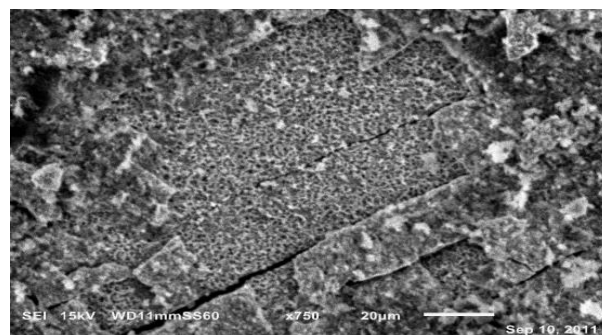


Figura 4 Imagen de muestra con aleación de V y Nb

Difracción con Rayos X

De acuerdo a las evaluaciones realizadas a la aleación de V y Nb se ha obtenido un resultado con fases distintas con respecto a la aleación original al utilizar el tratamiento térmico. Con la técnica de difracción de rayos X, se obtuvo el perfil de difracción que se muestra en la figura 5, la cual corresponde a la muestra sin recubrimiento, esto es la aleación original del sedán, en donde se observan elementos como Al, Zn, Ni, Fe, Cu, Cr, entre otros, en la figura 6 se presenta la imagen de las fases identificadas en la muestra original, que al ser comparadas con los resultados del perfil de difracción de rayos X de la muestra tratada térmicamente que se presenta en la figura 7 se distinguen cambios en las fases de la muestra original, notándose la presencia de fases con Nb y V como se identifican en las figura 8, en donde se detecta picos correspondientes con el PDF 1-071-9885 el NbNi, no detectándose aun el vanadio.

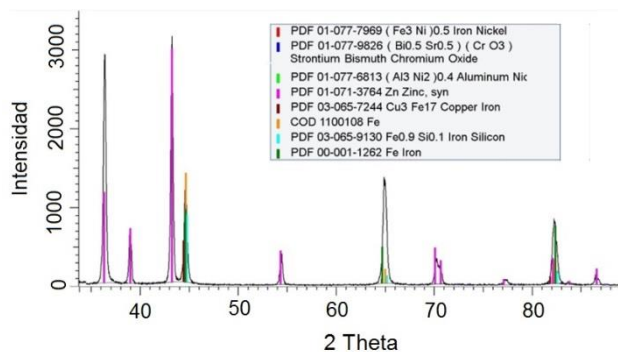


Figura 5 Primer muestra sin recubrimiento

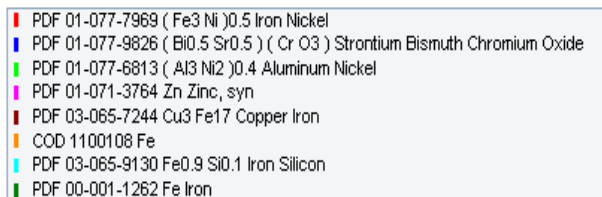


Figura 6 Imagen de fases detectadas por DRX

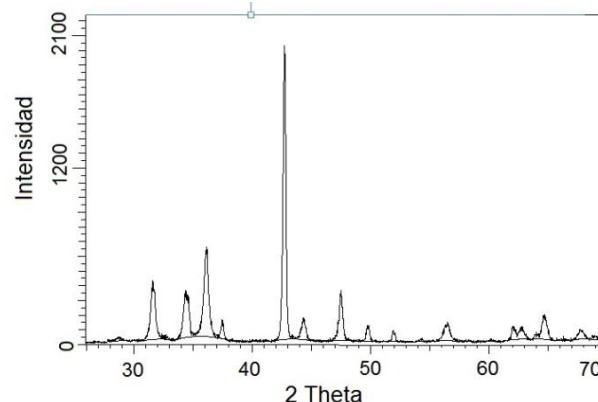


Figura 7 Perfil de DRX de muestra con V y Nb

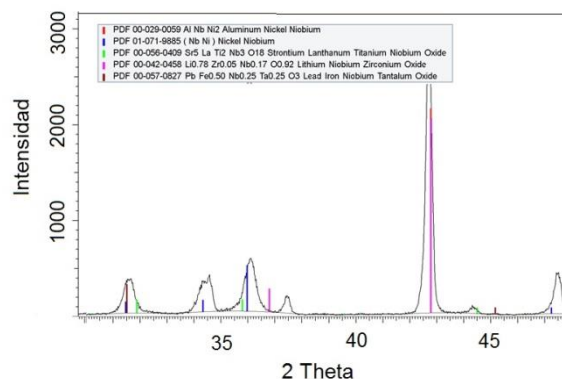


Figura 8 Identificación de fases con Nb después del tratamiento térmico al agregar V y Nb

Metalografía

En los resultados de metalografía se observa en las figuras 9, 10 y 11 que el tratamiento térmico afecta la aleación original ampliando huecos y coprecipitando, es posible evidenciar que a la muestra que se le agrega vanadio y niobio mejora la distribución de material debido a una mejor homogenización del tamaño de granos, observándose una disminución en la dimensión, comparándolo con la muestra tratada térmicamente.



Figura 9 Muestra con V y Nb



Figura 10 Imagen de muestra virgen con tratamiento térmico



Figura 11 Imagen de aleación virgen sin tratamiento térmico

Resistencia mecánica

A continuación se muestran los resultados de las pruebas de tracción realizadas con la máquina universal, en la figura 12 se muestra la curva de esfuerzo-deformación de la aleación original la cual fue tratada térmicamente a 530 °C para comparar bajo las mismas condiciones de tratamiento térmico los cambios originados por los materiales con V y Nb.

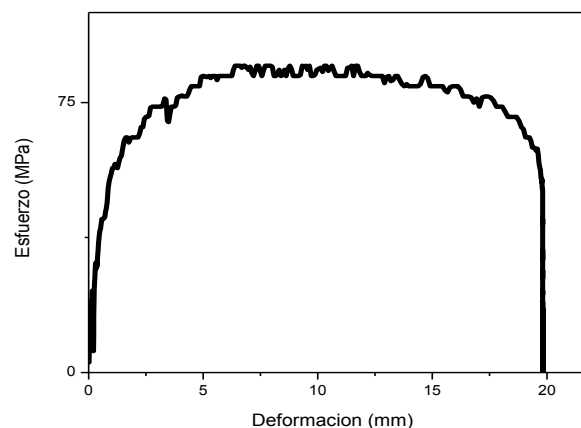


Figura 12 Curva Esfuerzo-Deformación de referencia de pieza original con tratamiento térmico

En la figura 13 se muestra el resultado obtenido en la máquina universal en donde se observa que al agregar materiales de Nb y V aumenta su resistencia mecánica con respecto a los resultados de la figura 10.

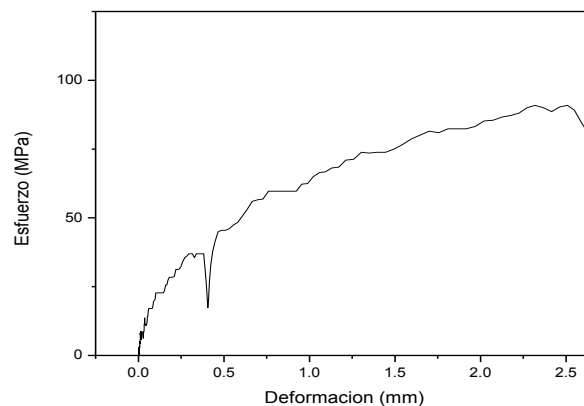


Figura 13 Curva Esfuerzo-Deformación de referencia de probeta con V y Nb

Conclusiones

Al agregar V y Nb mediante tratamiento térmico, se modificaron las propiedades mecánicas y el tamaño de grano, mejorando la homogeneidad del material, aumenta poco la dureza, se forman fases estructurales diferentes, la textura es rugosa y aumenta ligeramente la resistencia mecánica.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo del Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología para el desarrollo del proyecto, así como la participación de la alumna de Ingeniería en Tecnologías de Manufactura Aide Ivonee Islas Ortiz.

Referencias

Abdul Rani, R., Sabirin Zoolfakar, A., O'Mullane, A., Austin, M., Kalantar-Zadeh, K. (2014). Thin films and nanostructures of niobium pentoxide: fundamental properties, synthesis methods and applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014 (38), 15683-15703

Adilson Rangel, A. y Aparecido dos Reis C. (2015). The Evolution of the Niobium Production in Brazil. *Materials Research*, 18 (1).

Boileau, J., Zindel, J., y Allison, J. (1997) The Effect of Solidification Time on the Mechanical Properties in a Cast A356-T6 Aluminum Alloy, *Journal of Materials & Manufacturing SAE 1997 Transactions* - V106-5

C. L. Chen, C. L., Chen, C.X., Guo, Z., Ding, J., X. Han, X., y. Jiang, Q. (2016). Composition Design and Fatigue Curves of Hardfacing Materials for Cold Roll. *Journal of Engineering*, 216 (8487976), 1-5.

Chao-lei Z., Ya-zheng, L., Chao J. y Jin-fu, X. (2011). Effects of Niobium and Vanadium on Hydrogen-Induced Delayed Fracture in High Strength Spring Steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 18 (6), 49-53

Katahira A. (1993). Glass-forming ability of alloys. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 156-158 (2), 473-480

Romo G., Vera P. y Carrillo L.,. (2016), Development and testing of aluminum alloy used in commercial cars in Mexico, adding niobium to modify mechanical properties, SAM-CONAMET, vol 2016, pp 1, Recuperado de <http://samconamet2016.congresos.unc.edu.ar/presentaciones-congreso-internacional-de-metalurgia-y-materiales/>

Zanatta, A. y Casolco, S.R. (2014). Análisis de reingeniería y de prospectiva de un material compuesto para su implementación en el área automotriz. *Vislumbra*, recuperado de http://www.pue.itesm.mx/comunicacion/journals/Vislumbra_Enero_Junio2014.pdf

Zhi-qiang, T., Di, T., Hai-tao, J., Xiao-liang, M., y Hong-xun, X. (2009). Research and Production Status of Dual Phase Steels for Automobiles. *Materials for Mechanical Engineering*, 33 (4): 1-5.

Generación de energía a partir de fuerzas magnéticas repulsivas en un rotor

GOMEZ-MERCADO, Abdiel†*, PALOMAR-CORONA, José

Instituto Tecnológico de Pachuca

Recibido 08 Marzo, 2017; Aceptado 16 Agosto, 2017

Resumen

En el presente trabajo se analiza el comportamiento del campo magnético de un arreglo de imanes empotrados en un rodillo suspendido y conectado paralelamente a 2 chumaceras. El propósito es determinar si las fuerzas magnéticas repulsivas entre el arreglo de imanes y otro imán son capaces de hacer girar el rodillo y a su vez generar un par, para lo cual se realiza el cálculo de dicha fuerza con la ley de Coulomb. Con el software de elemento finito (MEF) se hizo una simulación de dicho arreglo de imanes para observar su espectro magnético. La ley de Coulomb dio una fuerza repulsiva entre estos imanes de 73.92 N. Para el cálculo del torque se multiplicó la fuerza magnética repulsiva por el radio del rodillo y resultó un par de 2.21 Nm. La intención es promover más estudios sobre energía renovable con imanes en dimensiones más grandes.

Simulación, par, fuerza repulsiva, campo magnético

Abstract

In this paper the behavior of the magnetic field of an arrangement of magnets embedded in a suspended roller connected in parallel to two bearings is analyzed. The purpose is to determine if the repulsive magnetic forces between the magnet array and another magnet are capable of rotating the roller and generate a torque, so it was calculated using the Coulomb law. With finite element software (FEM) a simulation of this array of magnets was performed in order to observe its magnetic spectrum. Coulomb's law gave a repulsive force between these magnets of 73.92 N. For the torque calculation was multiplied the repulsive magnetic force by the radius of the roller and resulted in a torque of 2.21 Nm. The purpose is to promote more studies on renewable energy with magnets in large dimensions.

Simulation, torque, repulsive forces, magnetic field

Citación: GÓMEZ-MERCADO, Abdiel, PALOMAR-CORONA, José. Generación de energía a partir de fuerzas magnéticas repulsivas en un rotor. *Revista de Ingeniería Mecánica*. 2017. 1-3: 16-21.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: agmerca63@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Actualmente las emisiones de diversas máquinas térmicas son una de las principales causas de contaminación. La búsqueda de nuevas alternativas de energía limpia ya no es una opción sino una necesidad. Una de las aplicaciones de dichas máquinas con mayor impacto en nuestra vida es en la producción de energía eléctrica, pero se requiere combustible fósil para su funcionamiento.

Como todos sabemos, el ciclo convencional del combustible fósil está entre las actividades más destructivas en la tierra, amenazando la salud, contaminando el aire y el agua, dañando la tierra, y contribuyendo al calentamiento global. En particular la contaminación atmosférica es un grave problema de salud pública que enfrentamos día con día y que tiende a incrementar aceleradamente tanto a escala global como regional, Montaña (2007).

La contaminación del aire provoca alrededor de cuatro millones de defunciones prematuras en el mundo debido a enfermedades cardiovasculares, cáncer de pulmón y neumopatías crónicas y agudas, López (2016). Ante este panorama, se propone aprovechar las fuerzas repulsivas del magnetismo para el movimiento o levitación de algunos mecanismos, aplicadas en un rotor. En este trabajo se realizó un estudio para determinar si dichas fuerzas son capaces de generar un par y transformarlas en energía mecánica. En estudios anteriores, Baker (1960) y Yamada et al (1996) analizaron teóricamente las características de las fuerzas repulsivas en imanes permanentes y aclararon que dichas fuerzas tienen una fuerza repulsiva no lineal de características similares a un resorte duro. Paden et al, investigó las características de la fuerza repulsiva en algunos espacios magnéticos, Paden et al (2003).

Incluso un cojinete magnético repulsivo es capaz de soportar un eje giratorio con un control de un grado de libertad en la dirección axial (2012). Distribuyendo imanes permanentes en forma estratégica en un rotor y con la ayuda de otro mecanismo que exponga a su vez otro imán para su repulsión se logra completar un ciclo de giro. Al igual en un motor de combustión interna, la repulsión magnética sustituiría al ciclo de potencia para encender el combustible dentro de la cámara de combustión.

Metodología

Diseño de rotor

La selección del rotor para esta aplicación en específico es un rotor de tipo rodillo (Figura 1). Se pretende utilizar un arreglo de imanes distribuidos en forma de V. El arreglo se coloca a lo largo de la superficie lateral del cilindro. Las dimensiones del rotor (Figura 2) intervienen con la posición en V de los imanes por la distancia que permite la variación del dominio de los campos magnéticos de cada imán. La fuerza de repulsión magnética es mayor conforme la formación en V va cerrándose y menor conforme va abriéndose (Figura 3). Las dimensiones del rotor dependen del campo magnético del imán de neodimio a ocupar. La fuerza de repulsión se complementa con otro imán que se acerca e interactúa con el campo magnético del arreglo en el rodillo provocando que gire y genere un momento.

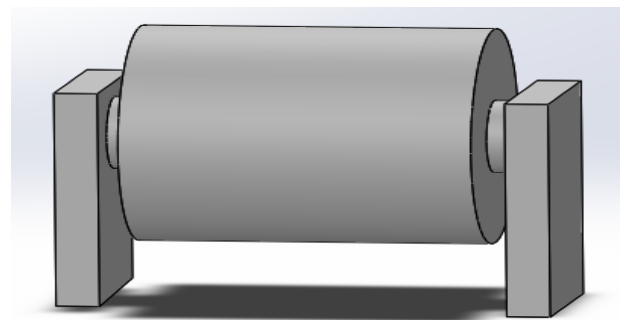
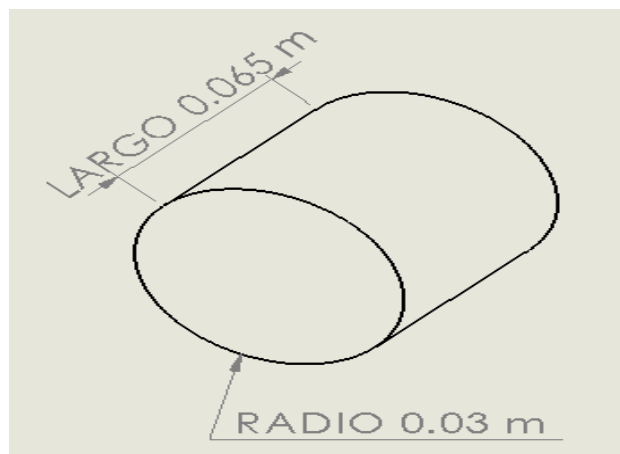
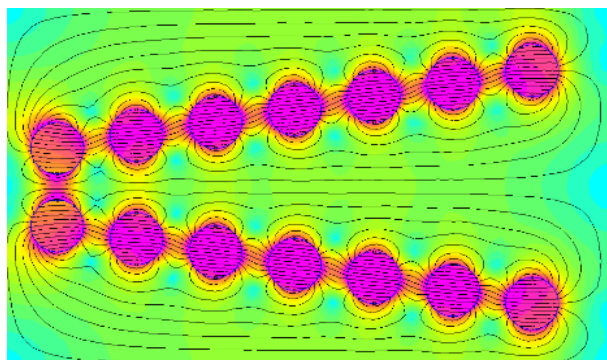


Figura 1 Rotor


Figura 2 Dimensiones del rodillo

Figura 3 Arreglo de imanes en V

Los imanes a ocupar para el arreglo son imanes de neodimio en forma de disco con un diámetro de 0.012m y un ancho de 0.003m (Figura 4).

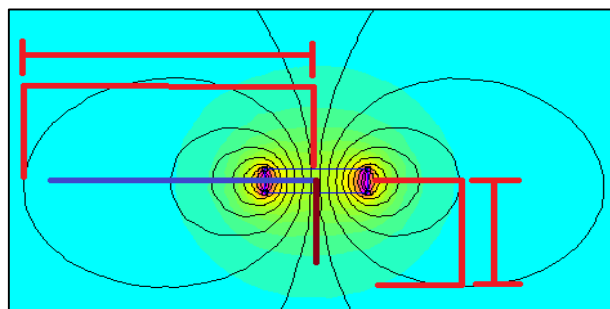

Figura 4 Imán de neodimio

Otro imán en forma de rosqueta de 0.052m diámetro exterior, 0.02m de diámetro interior y 0.012m de alto (Figura 5) se utiliza solo para ejercer repulsión entre él y el arreglo en V.


Figura 5 Imán rosqueta

Las características geométricas del imán en forma de rosqueta se apegan a la necesidad de los campos magnéticos del arreglo en V que se propone. La distribución de los imanes de neodimio para el ensamble del arreglo depende mucho de los dominios del campo magnético de los polos de cada imán. Se realizó una simulación del imán de neodimio en forma de disco con ayuda del software de elemento finito llamado FEM. Con la simulación se observaron las dimensiones de sus campos magnéticos. Este dato es necesario para las dimensiones del arreglo en V.

La distancia entre ellos influye para la combinación de sus campos magnéticos que crearan un espectro en forma del área lateral del rotor en donde van empotrados. Las dimensiones de los campos magnéticos del polo norte al polo sur en la simulación del imán de neodimio se muestran en la figura 6.





 Eje magnético
 Plano del ecuador magnético

Figura 6 Simulación imán de neodimio

Tiene 0.025 m de largo del centro del imán hasta su última línea magnética respecto al plano del ecuador magnético y 0.008 m de alto del centro del imán hasta la última línea magnética con respecto al eje magnético. En razón de usar fuerzas repulsivas, todos los imanes en el arreglo deben estar orientados con un mismo polo en común. No importa el polo en común que sea utilizado, el polo norte fue el común que se eligió.

Agrupando los datos de las dimensiones del campo magnético del imán de neodimio se propone utilizar 18 imanes en 9 hileras de 2 imanes cada una. Cada imán separado desde 0 m hasta 0.04 m a un paso de 0.005 m con respecto al plano del ecuador magnético y 0.08 m entre cada hilera de imanes (Figura 7).

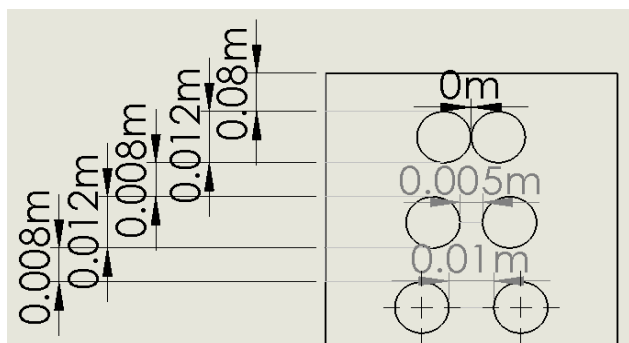


Figura 7 Separación de imanes

El arreglo debe abarcar un área 0.065 m de ancho y 0.18 m de largo con un total de 0.012252 m² siendo esta el área lateral del rodillo (Figura 8).

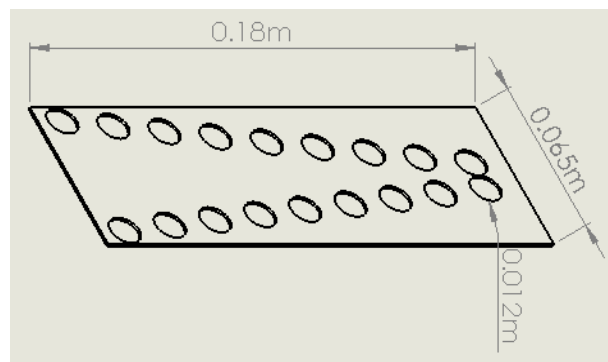


Figura 8 Área del rodillo

Las características proporcionadas por el fabricante de los imanes en forma de disco se muestran en la Tabla 1.

| | |
|--------------------------|--------------------------|
| Material | MnZn |
| Forma | Rosqueta |
| Diámetro externo | 0.052 m |
| Diámetro interno | 0.02 m |
| Alto | 0.012 m |
| Sentido de magnetización | Axial paralelo al alto |
| Masa magnética | 1.26X10 ⁻⁴ Wb |

Tabla 1 Propiedades imán de neodimio

Las características del imán en forma de rosqueta se presentan en la Tabla 2. Estos datos son importantes y son requeridos para cálculos del estudio.

| | |
|--------------------------|--------------------------|
| Material | NdFeB |
| Forma | Disco |
| Diámetro | 0.012 m |
| Alto | 0.003 m |
| Sentido de magnetización | Axial paralelo al alto |
| Masa magnética | 1.32X10 ⁻⁴ Wb |

Tabla 2 Propiedades del imán rosqueta

El cálculo de la fuerza de repulsión que estos ejercerán sobre el rotor tipo rodillo se realiza mediante la ley cuantitativa del magnetismo de Coulomb dada por la Ecuación 1.

$$F = \frac{1}{\mu} * \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \quad (1)$$

La fórmula involucra el valor de dos masas magnéticas m dadas en Webers de las cuales se consultan de las tablas 1 y 2. El valor del campo magnético de un imán es mucho mayor justo en su superficie. Esto significa que depende de la distancia entre el imán y el punto de aplicación y no es por tanto un valor absoluto. Por esto se involucran 2 masas ya que entre ellas depende la fuerza de repulsión entre los 2 campos magnéticos involucrados.

Al ejercer una fuerza en un punto de un cuerpo, dicho cuerpo tiene una reacción que puede comportarse como un movimiento de rotación en torno a algún eje. A esta fuerza aplicada se le llama torque. Para calcular el torque producido por la fuerza de repulsión de los imanes en el rotor se utilizó la Ecuación 2.

$$T = F \cdot d \quad (2)$$

Donde T es el torque expresado en unidades de fuerza-distancia.

F Es la fuerza aplicada en un punto al rotor expresada en Newtons.

d La distancia entre el centro del rotor y el punto donde dicha fuerza es aplicada dada en metros.

Resultados

Agrupando los datos necesarios de las tablas 1 y 2 para ser sustituidos en la Ecuación 1 y así determinar la fuerza, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} m_1 &= \text{masa magnética del imán en forma de disco} = 1.32 \times 10^{-4} \text{ Wb} \\ m_2 &= \text{masa magnética del imán en forma de rosqueta} = 1.26 \times 10^{-4} \text{ Wb} \\ \mu &= 10^{-7} \text{ Wb}^2 / \text{Nm}^2 \\ d &= 15 \text{ mm} = 0.015 \text{ m} \end{aligned}$$

$$F = \frac{1}{10^{-7} \text{ Wb}^2 / \text{Nm}^2} * \frac{(1.32 \times 10^{-4} \text{ Wb})(1.26 \times 10^{-4} \text{ Wb})}{(0.015)^2 \text{ m}}$$

$$F = 73.92 \text{ N}$$

Esta fuerza teóricamente es la producida por la repulsión de los imanes sobre el rotor tipo rodillo. Multiplicada por el valor del radio del rotor resultará el torque teórico producido por todo el conjunto.

Agrupando los datos y sustituyendo en la Ecuación 2, para el cálculo se obtiene:

$$\begin{aligned} F &= 73.92 \text{ N} \\ d &= 0.03 \\ T &= 73.92 \text{ N} \cdot 0.03 \text{ m} = 2.21 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Conclusión

Con estos resultados se comprueba teóricamente que es posible ocupar las fuerzas magnéticas repulsivas para transformarlas en energía mecánica. Las dimensiones son tomadas con base en componentes magnéticos existentes.

Es posible construir con estos datos un prototipo, y buscar una aplicación práctica adecuada, dadas las dimensiones físicas y la fuerza de torque. La intención es promover este tipo de estudios sobre el magnetismo y descubrir nuevas alternativas de propulsión de máquinas y mecanismos.

Entre otros trabajos futuros, se planea diseñar otro mecanismo encargado de acercar y alejar el imán en forma de rosqueta para la interacción sincronizada entre todo el conjunto de imanes.

Referencias

Backer F.T. (1960) A Magnetic Journal Bearing, Philips Technical Review, 22-7, pp.232-238.

Montaño N., Sandoval A. (2007) Contaminacion atmosférica y salud.
<http://www.elementos.buap.mx/num65/htm/29.htm>.

López P. (2016) La política de la contaminación.
<http://go.galegroup.com/ps/i.do?p=AONE&u=p&id=GALE|A459634722&v=2.1&it=r&sid=summon&authCount=1>

Paden B., Groom N. and Antaki J.F. (2003) Design Formulas for PermanentMagnet Bearings, Transaction of the ASME, Journal of Mechanical Design. No. 125, pp.734-738.

Sugai T., Inoue T., Ishida Y. (2012). Nonlinear vibration analysis of a rotating shaft supported by a repulsive magnetic bearing and vibration suppression using the axial control. 10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, pp. 427-439.

Yamada S., Ohji T., Miyamoto T., Matsumura F. (1996) Single-Axis Controlled Repulsion Type Magnetic Bearing System Using Permanent Magnets Journal of JSAEM, Volume 4, No.1, March pp. 267-272.

Diseño asistido por computadora de una órtesis mecánica manufacturada en CPVC

SANDOVAL, Edith, LÓPEZ, Marcos, GÓMEZ, Erick y CORTES, Uzias

Recibido 08 Enero, 2017; Aceptado 12 Agosto 2017

Resumen

El empleo de exoesqueletos para la rehabilitación de miembros inferiores ha sido un avance significativo en la solución a deficiencias motrices parciales a través de la estimulación por la asistencia de movimiento. En este trabajo se presenta el análisis por elemento finito del CPVC para determinar su factibilidad técnica como material para manufacturar actuadores neumáticos empleados en una órtesis exoesquelética. La estructura restante se manufacturó de aluminio 6061. Dicho exoesqueleto fue implantado en un sujeto de prueba, donde se verificó su eficiencia. Los resultados obtenidos indican que es factible utilizar el CPVC como material viable para manufacturar los actuadores neumáticos aplicados en esta propuesta, reduciendo con ello el costo de componentes comparado con tecnologías para el mismo fin, así como una reducción en el peso total de la órtesis. Se comprobó que la alternativa de construcción de la órtesis exoesquelética propuesta es viable utilizando CPVC para la manufactura de sus actuadores, con lo que se contribuiría a su posible adquisición ampliando la cobertura de dispositivos de rehabilitación en sectores económicamente vulnerables.

Análisis, CAD, CPVC, exoesqueleto, órtesis.

Abstract

The use of exoskeletons to rehabilitate the lower limbs has been a significant advance in the solution of partial motor deficiencies through the stimulation of assisted movement. In this paper we present the finite element analysis of CPVC to determine its technical feasibility as a material for manufacturing pneumatic actuators used in an exoskeletal orthosis. The structure was manufactured from aluminum 6061. This exoskeleton was implanted in a test subject, where its efficiency was verified. The results indicate that it is feasible to use CPVC as a viable material to manufacture the pneumatic actuators applied in this proposal, thus reducing the cost of components compared to technologies for the same purpose, as well as a reduction in the total weight of the orthoses. It was verified that the alternative of construction of the proposed exoskeletal orthosis is viable using CPVC for the manufacture of its actuators, which would contribute to its possible acquisition by expanding the coverage of rehabilitation devices in economically vulnerable sectors.

Analisis, CAD, CPVC, exoskeleton, orthosis

Citación: SANDOVAL, Edith, LÓPEZ, Marcos, GÓMEZ, Erick y CORTES, Uzias. Diseño asistido por computadora de una órtesis mecánica manufacturada en CPVC. Revista de Ingeniería Mecánica. 2017. 1-3: 22-30.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: sandovaledith1609@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En las últimas décadas se ha incursionado en la fabricación de dispositivos que asisten el movimiento de las extremidades del cuerpo con el fin de rehabilitarlas en casos donde el daño las inhabilita de forma temporal, tal es el caso de los exoesqueletos y órtesis exoesqueléticas. Se han desarrollado diversos exoesqueletos con fines médicos tanto para extremidades inferiores como para extremidades superiores [1].

El sistema de movimiento presentado por *Homayoon Kazerooni et al* [2], donde el dispositivo lleva el nombre de pierna generadora de energía (figura 1).

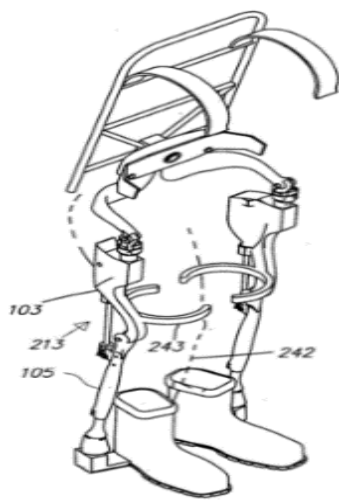


Figura 1 Exoesqueleto “Pierna Generadora de energía”, Patente con número de publicación CA2645319 A1

Consta de un conjunto de eslabonamientos verticales enlazados, donde el movimiento se realiza a través de un enlace partiendo de una sujeción del actuador a la altura de la cadera dirigido hacia el extremo inferior del mecanismo de la rodilla.

El vástago del actuador queda de enlace entre estos dos elementos donde permite la flexión y extensión de los movimientos de dicho muslo y enlace del vástago con respecto al otro; consta de igual manera de un soporte lumbar y sujeciones para adaptarse al cuerpo humano.

Otro sistema de exoesqueleto es el desarrollado por *Nathan Harding et al* [3], se compone por un soporte lumbar conectado a un primer y segundo soporte de la pierna, posee actuadores que permiten el movimiento en la cadera, un soporte lumbar con contrapeso que incluye una masa auxiliar al exoesqueleto, de igual manera posee actuadores en las articulaciones de rodilla para llevar a cabo la extensión y flexión del miembro.

El exoesqueleto de extremidad inferior propuesto por *Homayoon Kazerooni et al* [4], propone un sistema configurable para ser acoplado a una persona, incluye soportes de piernas y está diseñado para descansar en el suelo durante las fases de postura, cada soporte tipo actuador tiene un enlace del muslo y un enlace de vástago (figura 2).

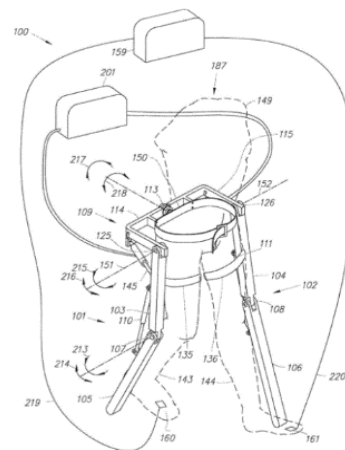


Figura 2 Exoesqueleto “Dispositivo y método para disminuir el consumo de energía de una persona mediante el uso de un exoesqueleto de extremidad inferior”, Patente con número de publicación WO/2009/143161

Este exoesqueleto cuenta con dos articulaciones de rodilla, cada uno configurados para permitir la flexión, los actuadores de la cadena están situados en posición opuesta al eslabonamiento del muslo, el tronco de exoesqueleto es adaptable a la parte superior del cuerpo de usuario. Otro caso de un exoesqueleto de extremidad inferior fue desarrollado por *Little Richard y Irving Robert Alexander* [5] (figura 3). Este sistema comprende un miembro de soporte rígido con un arnés pélvico y un par de eslabones de soporte de la pierna, consta de un actuador situado en la cadera, un actuador de rodilla y un actuador de pie principal.

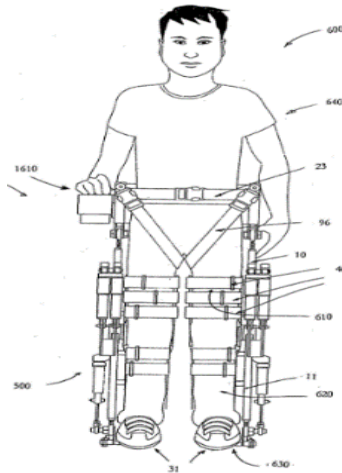


Figura 3 Exoesqueleto “Exoesqueleto de alimentación autónoma para un usuario con discapacidad”, Patente con número de publicación US20110066088 A1

Materiales y Equipos

Materiales estructurales y equipos neumáticos.

- Perfil tubular 1 in de Policloruro de vinilo clorado CPVC.
- Perfil tubular $\frac{1}{2}$ in de Policloruro de vinilo clorado CPVC.
- Perfil tubular $\frac{3}{4}$ in de Policloruro de vinilo clorado CPVC.
- Perfil redondo de 1 in AISI 1020.
- Empaques de caucho.

- Spray de teflón como lubricante.
- Solera de $\frac{1}{4}$ in x $1\frac{1}{2}$ in de aluminio 6061.
- Perfil redondo de $\frac{7}{8}$ in de aluminio 6061.
- Manguera de conexión neumática PUN6x1.5
- Electroválvulas 5/2 biestables.
- Fuente de potencia neumática.
- Sujetadores roscados inoxidable.
- Mezclilla.
- Velcro.
- Hule espuma.
- Torno paralelo convencional
- Fresadora vertical convencional

Metodología

La innovación que posee esta órtesis para miembros inferiores es, en primera instancia el diseño compacto propuesto, al igual que la implementación de CPVC como material primario en la manufactura de éste, con una reducción de peso aproximado del 60% a comparación de tecnologías similares al igual que una reducción de costos significativa por su accesible adquisición y manufactura. En la figura 4 se muestra un diagrama de bloques que representa el proceso metodológico.

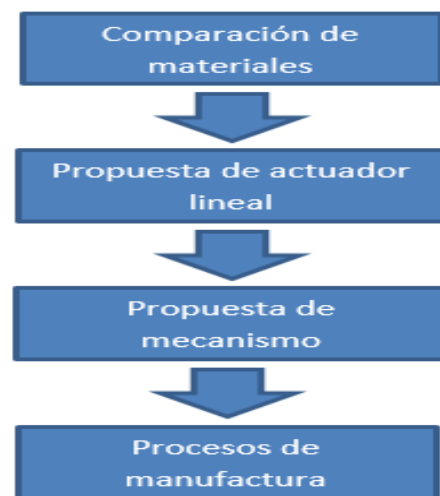


Figura 4 Diagrama de flujo del proceso metodológico

La comparación sistemática de materiales comúnmente usados como implementos de rehabilitación, sobre todo en miembros inferiores, dado su costo y propiedades mecánicas daría como resultado la propuesta de los materiales a utilizar en la manufactura de los actuadores lineales como de la estructura de soporte.

En seguida se procedió a diseñar el tipo de actuador neumático que se utilizará para dar movimiento a las extremidades inferiores. Posteriormente se propuso la estructura del mecanismo de cada extremidad, así como del soporte del mismo, con base en una búsqueda del estado del arte sobre el diseño de exoesqueletos. Por último se procedió a establecer el proceso de manufactura de la propuesta en general.

Comparación de materiales

Para la manufactura de los actuadores lineales se decidió comparar al aluminio y al CPVC debido a que el aluminio es empleado con frecuencia en la tecnología neumática y también para el desarrollo de prótesis de rehabilitación. Se seleccionaron los materiales siguientes para ser comparados con base en dos criterios, costo y resistencia mecánica.

| Propiedades mecánicas | CPVC | Aluminio |
|---|---------------------|------------------------|
| Módulo de Young., GPa | 2.9 -3.4 | 68.996 |
| Resistencia a la tracción., MPa | 50-80 | 124.078 |
| Punto de fusión., °C | 212 | 663 |
| Coefficiente de expansión térmica., m/m°C | 98x10 ⁻⁶ | 2,4 x 10 ⁻⁵ |
| Costo por pieza., (MXN) | 150.00/6 m | 160.00/1m |

Tabla 1 Comparativo de propiedades mecánicas CPVC-Aluminio

Con base en los datos de la tabla 1 se propuso realizar un análisis por elemento finito asistido por computadora, considerando que de forma general los actuadores neumáticos operan a 6 bar de presión.

Para la prueba se diseñaron probetas de la misma longitud y mismo espesor de pared, sometidas a una presión confinada en sus extremos.

Ambos materiales se ensayaron en un ambiente virtual bajo las mismas condiciones, para obtener su respuesta en términos de esfuerzo, su deformación por expansión (desplazamiento de su pared) y su factor de seguridad. Un ejemplo ilustrativo se muestra en las figuras 5 y 6, que corresponden a la respuesta de esfuerzos Von Mises para el aluminio y el CPVC respectivamente.

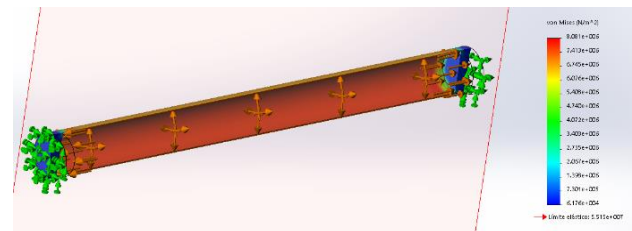


Figura 5 Esfuerzos de tensión, probeta de Aluminio 6061

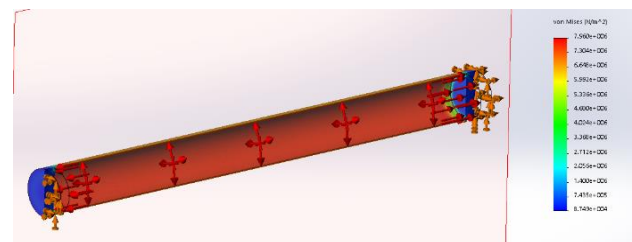


Figura 6 Esfuerzos de tensión, probeta de CPVC

Del estudio realizado se comprobó que bajo la misma presión de trabajo ambos materiales poseen factores de seguridad altos, superiores a cinco veces lo que el material puede tolerar.

El valor máximo de la deformación por expansión en su longitud media es inferior a una décima de milímetro para el CPVC, lo que resulta aceptable para trabajarse en la aplicación que se aborda en esta propuesta, lo cual se resume en la tabla 2.

| Material Prueba | Aluminio | CPVC |
|---------------------|------------|------------|
| Esfuerzo Von Mises | 8.081e+006 | 7.960e+006 |
| Desplazamiento | 1.353e-003 | 3.756e-002 |
| Factor de seguridad | 6.824e+000 | 5.113e+000 |

Tabla 2 Tabla comparativa de pruebas, Al y CPVC a una presión interna de 6 bar

Propuesta de actuador lineal

El actuador neumático se diseñó de acuerdo con la carga de trabajo, la cual se propuso en función del peso de un sujeto de prueba de 80 kg. Para determinar los diámetros de émbolo y de vástago primero se utilizaron (1) y (2) [6] y en seguida se consultó un catálogo técnico de especificaciones de los perfiles a utilizar [7].

$$D = \sqrt{\frac{F_{avance} * 40}{P_{aire} * \pi}} \quad (1)$$

$$d = \sqrt{-\frac{F_{retroceso} * 40}{P_{aire} * \pi} + D^2} \quad (2)$$

Donde:

F : Fuerza en newton.

D : Diámetro del émbolo en mm.

d : Diámetro del vástago en mm.

P_{aire} : Presión del aire en bar.

De acuerdo con Creus el rozamiento del pistón en su movimiento equivale a un valor comprendido entre el 3% y 10% de la fuerza calculada. En la tabla 3 se resumen las características para los actuadores lineales. Las dimensiones mostradas corresponden a valores comerciales más cercanos a los resultados obtenidos.

| Características. | Dimensiones. |
|----------------------------|--------------|
| Diámetro interior cilindro | 7/8 in |
| Diámetro émbolo | 7/8 in |
| Diámetro vástago | 5/8 in |
| Longitud del cilindro | 10.5 in |
| Longitud del vástago | 9.6 in |
| Carrera del vástago. | 3.9 in |
| Factor de pandeo | 2 |

Tabla 3 Dimensiones del actuador de doble efecto

Con base en las características y dimensiones obtenidas se propuso el esquema definitivo mostrado en la figura 7. La camisa, embolo, bridas y el vástago están manufacturados en CPVC, la terminal de soporte para el vástago totalmente extendido se manufacturo en acero AISI1020, mientras que los empaques se adquirieron de la marca Plastiseal Industrial S.A. de C.V.

Del esquema propuesto en la figura 8 se muestra un despiece del actuador lineal, mostrando las diferentes partes que lo conforman.



Figura 7 Actuador lineal esquema definitivo



Figura 8 Despiece de actuador lineal

Propuesta de mecanismo

De la búsqueda en el estado del arte se propuso la geometría del mecanismo principal del exoesqueleto. El diseño definitivo se observa en la figura 9 incluyendo el soporte lumbar y la estructura de soporte.



Figura 9 Diseño propuesto de la órtesis para rehabilitación

Para comprobar la integridad de su estructura y componentes se realizó un análisis asistido por computadora en MDSolids®, considerando la carga provista por el sujeto de prueba. El estudio se realizó para la posición más significativa misma que se puede observar en la figura 10.

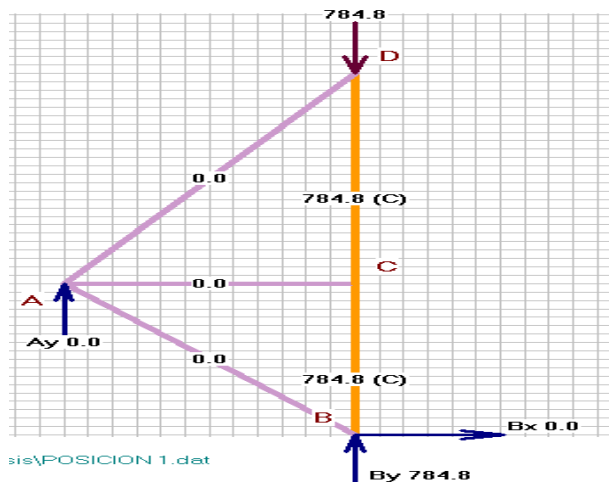


Figura 10 Análisis de fuerzas y reacciones del mecanismo propuesto

De los resultados obtenidos en el análisis previo se procedió a determinar el esfuerzo, deformación y factor de seguridad del eslabón que presentó la fuerza de mayor magnitud, por medio de un AEF realizado en SolidWorks®. De las imágenes mostradas en la figura 11 se puede establecer que la integridad de la estructura no se ve afectada dado que el factor de seguridad promedio de la estructura es aproximadamente seis veces lo que el perfil puede soportar.

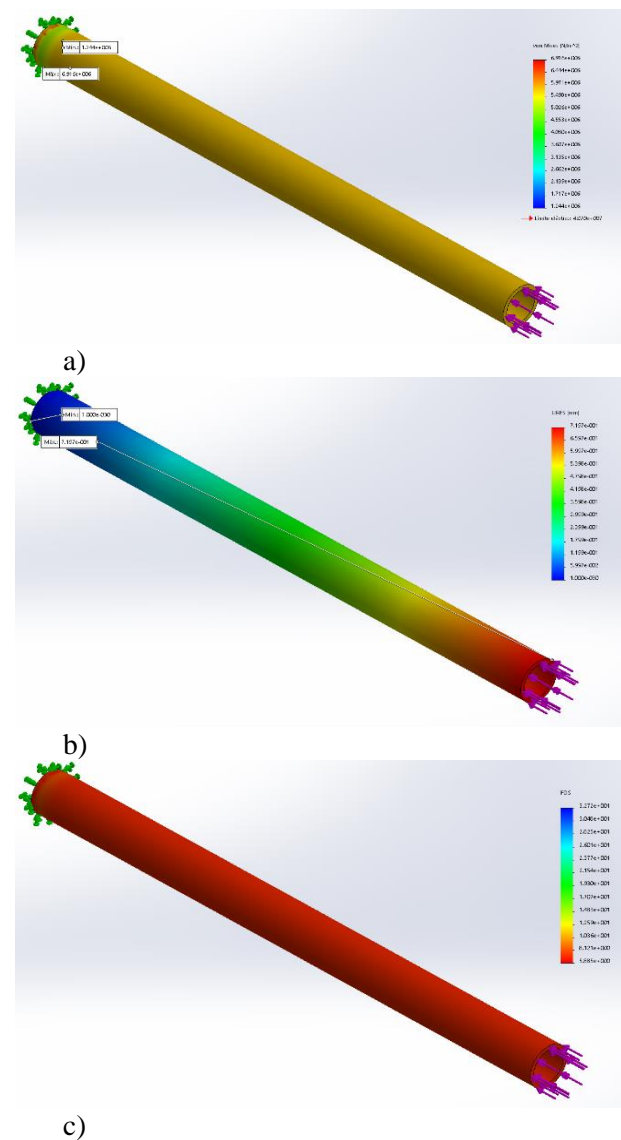


Figura 11 AEF del mecanismo propuesto. a) Distribución de esfuerzos. b) Distribución de deformaciones. c) Distribución de factor de seguridad

Procesos de Manufactura

El proceso de manufactura contempla las siguientes actividades:

- Recorte de secciones para eslabones, vástago y camisa del actuador lineal
- Maquinado por torno convencional de terminal de vástago, émbolo y soporte basculante
- Maquinado por fresadora convencional de juntas universales
- Ensamble de elementos estructurales y componentes del cilindro neumático

Para proceder a la manufactura de las diferentes partes del mecanismo se desarrollaron y siguieron los planos técnicos que describen la geometría de cada elemento (figura 12).

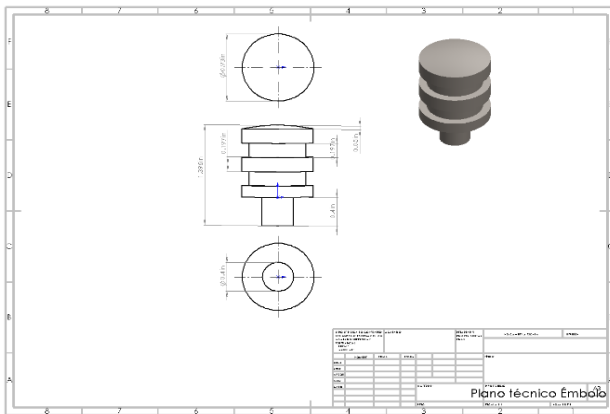


Figura 12 Ejemplo ilustrativo de Plano técnico para la manufactura del émbolo del actuador neumático

Las figuras 13-16 ilustran un ejemplo del proceso de manufactura que se llevó a cabo para integrar el modelo propuesto.

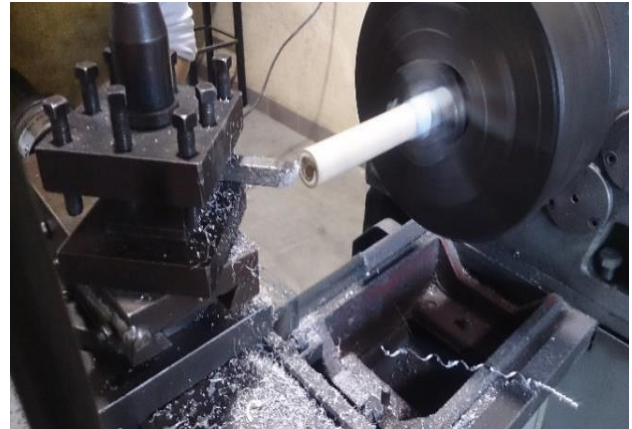


Figura 13 Recorte de secciones para estructura. Proceso de refrentado a eslabones, camisa y vástago del actuador lineal



Figura 14 Maquinado en torno convencional del émbolo



Figura 15 Fresado convencional de juntas universales



Figura 16 Ensamble de eslabones de la estructura propuesta

Resultados

Se comprobó que los materiales propuestos para la manufactura de una órtesis exoesquelética son adecuados y poseen las características mecánicas necesarias para la aplicación propuesta, con un factor de seguridad superior a cinco veces lo que el material es capaz de resistir sin presentar deformaciones permanentes.

[La configuración geométrica del mecanismo propuesto posee las propiedades estructurales necesarias para proveer un desempeño eficiente en la rehabilitación de miembros inferiores, considerando la carga del sujeto de prueba.

La propuesta resultó ser de características económicamente asequibles, tanto por el material como por el proceso de manufactura. Lo anteriormente descrito pone a disposición una órtesis exoesquelética a personas de bajos recursos con la finalidad de rehabilitar extremidades inferiores (figura 17).



Figura 17 Órtesis exoesquelética probada en un sujeto de prueba

Conclusiones

Las causas de una discapacidad al caminar son diversas tales como accidentes o resultado de enfermedad o el avance de la edad, es aquí donde el proyecto desea hacer frente a esta problemática, proveer en primera instancia rehabilitación a personas que posean inmovilidad parcial o total es sus piernas, como la estimulación de las extremidades inferiores, brindando a la sociedad de bajos recursos una alternativa accesible.

Agradecimientos

Se agradece al Ingeniero Andrés Cruz Ramírez Jefe de División de Ingeniería Electromecánica e Ingeniería en Industrias Alimentarias del Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla, por su valiosa aportación al brindarnos el recurso tiempo para la realización de la fase experimental y de su posterior redacción en el presente trabajo.

Agradecemos al Ingeniero Raúl Juárez Ordoñez Jefe de Talleres y Laboratorios del Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla, por su valiosa aportación asesorándonos en la fase experimental del prototipo.

Se agradece a Fedeliseo Gómez Mora y a Miguel Angel Millán Moreno estudiantes de Ingeniería Electromecánica en el Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla, por su valiosa aportación en la manufactura de piezas de la órtesis y como sujeto de pruebas.

Referencias

- [1] Chávez M.A., Rodríguez F., Baradica A. “Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación”. *Revista Ingeniería Biomédica*, volumen 4, número 7, enero-junio 2010, págs. 63-73.
- [2] Homayoon Kazerooni., Adam Zoss., Nathan Harding y Russdon Angold., 2011. US 11-716,135., *Power generating leg, US7883546 (B2)*. Lugar: Estados Unidos., Espacenet.
- [3] Nathan Harding, Kurt Amundson, Jon Burns, Russdon Angold, Adam Zoss y Homayoon Kazerooni, 2013. US 13/639,984., *Exoskeleton load handling System and Method of Use., US2013303950 (A1)*. Lugar Estados Unidos, Espacenet.
- [4] Homayoon Kazerooni., Kurt Amundson y Nathan Harding, 2015. US 14/605,343, *Device and Method for Decreasing energy Consumption of a Person by Use of a Lower Extremity Exoskeleton., US2015134078 (A1)*, Lugar: Estados Unidos, Espacenet.
- [5] Little Richard y Irving Robert Alexander, 2011. US 12/801,809, *Self contained powered exoskeleton walker for a disabled user, US2011066088 (A1)*, Lugar: Estados Unidos, Espacenet.
- [6] Creus A., Enero 2011, *Neumática e hidráulica, México*, Alfaomega Grupo Editor.
- [7] Primaflow., *Sistema de tuberías y conexiones CPVC, México*, (Consultado el 17 de marzo de 2017).

Sellado del recubrimiento de ácido fítico aplicado sobre la aleación de magnesio AZ31

HERNÁNDEZ, Laura A.¹ *†, LOMELÍ, Martha², HERNÁNDEZ, Luis S.², ESCUDERO, María³, TORRES, A. Alberto²

1 Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Avda. Dr. Manuel Nava 6, 78240 San Luis Potosí, S.L.P., México.

2 Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Avda. Sierra Leona 550, 78210 San Luis Potosí, S.L.P México.

3 Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM), CSIC, Avda. Gregorio del Amo 8, 28040 Madrid, España

Recibido 08 Enero, 2017; Aceptado 12 Julio, 2017

Resumen

Con el objetivo de mejorar la resistencia a la corrosión de la aleación base magnesio AZ31, para su posterior uso en la manufactura de implantes biodegradables, se llevó a cabo la depositación de un recubrimiento de conversión de ácido fítico, obtenido mediante la inmersión de las muestras en una solución al 0.5% de ácido fítico a 60°C. Posteriormente, se realizó un tratamiento de sellado de las grietas presentes en el recubrimiento introduciendo las muestras en una solución de fosfatos y cloruros por 13 días. Las muestras fueron analizadas mediante MEB, DRX, para caracterizar su morfología y naturaleza química. Además, se realizaron ensayos potenciodinámicos en muestras con el recubrimiento de ácido fítico, con y sin el tratamiento de sellado de grietas, utilizando solución de Hanks a 37°C para determinar la velocidad de corrosión. Los resultados demostraron un decremento en la velocidad de corrosión en las muestras con el tratamiento de sellado.

Corrosión, implantes biodegradables, ácido fítico

Abstract

In order to improve the corrosion resistance of the magnesium base alloy AZ31, for its further use in the manufacture of biodegradable implants, deposition of a phytic acid conversion coating obtained by immersing the samples was carried in a 0.5% solution of phytic acid at 60°C. Subsequently a sealing treatment of the cracks present in the coating was performed introducing the samples in a solution of phosphates and chlorides for 13 days. The samples were analysed by MEB, XRD to characterize their morphology and chemical nature. In addition potentiodynamic tests were performed on samples with the phytic acid coating with and without the crack sealing treatment using Hanks solution at 37°C to determine the corrosion rate. The results showed a decrease in the corrosion rate in the samples with the sealing treatment.

Corrosion, biodegradable implants, phytic acid

Citación: HERNÁNDEZ, Laura A, LOMELÍ, Martha, HERNÁNDEZ, Luis S, ESCUDERO, María y TORRES, A. Alberto. Sellado del recubrimiento de ácido fítico aplicado sobre la aleación de magnesio AZ3. Revista de Ingeniería Mecánica. 2017. 1-3: 31-40.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: laura.hernandez@uaslp.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Tradicionalmente, los materiales metálicos utilizados como implantes en el cuerpo humano (biomateriales), están contruidos con metales muy resistentes a la corrosión y sus aleaciones, por ejemplo: aceros inoxidable, aleaciones de titanio y aleaciones de cobalto y cromo. Sin embargo, en la actualidad se evalúa la ventaja del uso de otros metales menos resistentes a la corrosión como el magnesio (Mg). Por ello, existe un creciente número de artículos que estudian su posible utilización como implante temporal, biodegradable y reabsorbible [1].

El Mg es un material prometedor como implante biodegradable debido a que [2,3]: a) se degrada en los fluidos del cuerpo por corrosión, b) no es tóxico y su exceso puede fácilmente y sin peligro ser excretado en la orina, c) puede estimular el crecimiento de nuevo tejido en el hueso, haciéndolo particularmente apropiado para aplicaciones ortopédicas; d) la densidad, módulo elástico y resistencia a la compresión del Mg son más cercanos a aquellos del hueso, que la de los materiales metálicos convencionales empleados en aplicaciones ortopédicas; e) los iones Mg^{2+} son los cuartos más abundantes en el cuerpo humano y están almacenados principalmente en los huesos, estando involucrados en muchas reacciones metabólicas y mecanismos biológicos; f) permite la supresión de una segunda cirugía para retirar el implante cuando el hueso ha sanado.

Por lo tanto, contrario a otros metales para implantes, los productos de corrosión o desgaste que pueden ser potencialmente tóxicos o dañinos para el paciente, los del Mg pueden ser potencialmente benéficos para el paciente. Sin embargo, uno de los problemas a resolver en el uso del Mg, como bioimplante, es su elevada velocidad de corrosión, demasiado grande para satisfacer las necesidades clínicas.

Además, existen problemas no resueltos como alcalinización del entorno y liberación de hidrógeno que puede conducir al desprendimiento de partículas de la aleación; debido a lo anterior, es crucial mejorar la resistencia a la corrosión del Mg y sus aleaciones [4].

Una forma efectiva de aumentar su resistencia a la corrosión, es realizar recubrimientos de conversión sobre su superficie, los cuales presentan uniformidad, adherencia y un costo reducido [5]. Sin embargo, su proceso no está exento de dificultades ya que si no es controlado se pueden generar recubrimientos heterogéneos, con la presencia de poros, grietas u otros defectos que permitan la penetración del medio corrosivo hasta la superficie del sustrato [6].

Recientemente se ha estudiado al ácido fítico (*af*) ($C_6H_{18}O_{24}P_6$) para generar recubrimientos de conversión [5, 7-9], el cual es un compuesto natural presente en las legumbres, granos de cereales y frijoles; cuya estructura tiene una poderosa capacidad quelante con muchos iones metálicos. Si los grupos activos del *af* reaccionan con iones Mg^{2+} o Al^{3+} , formarían quelatos estables que podrían depositarse sobre la superficie de las aleaciones de magnesio, formando una capa de conversión química estable, con lo que aumentaría la resistencia a la corrosión [5,7].

Si los grupos activos de *af* reaccionan con iones Mg^{2+} o Al^{3+} , formarían quelatos estables que podrían depositarse sobre la superficie de las aleaciones de Mg, formando una capa de conversión química estable, con lo que aumentaría la resistencia a la corrosión. Sin embargo, la presencia de microgrietas en las muestras recubiertas disminuye su resistencia a la corrosión en soluciones con cloruros [9].

Para eliminar las microgrietas se han implementado las siguientes acciones: recubrimientos combinados de *af* más sales de cerio [10-12], ácido esteárico [13], alúmina [14] o de hidrotalcita [15], pretratamiento alcalino previo al recubrimiento de *af*, [16] y tratamiento térmico de las muestras recubiertas para sellar las microgrietas [9, 14, 16-17]. Aunque pareciera que existe una gran cantidad de trabajos sobre el *af*, la mayoría de los citados anteriormente, se refieren a su utilización para distintas aplicaciones relacionadas con la obtención de recubrimientos, su posible utilización como recubrimiento para implantes clínicos apenas empieza, como lo demuestran las siguientes características: primera, en solo 5 de estos trabajos [9, 13, 16-18] se utilizan soluciones fisiológicas simuladas y únicamente en 2 de ellos [16, 18].

Los experimentos se llevan a cabo a 37°C y se informa de la biocompatibilidad de los recubrimientos por citotoxicidad y hemólisis; en los trabajos restantes se utilizan soluciones de NaCl, de distintas concentraciones, a temperatura ambiente; segunda, se utiliza la aleación AZ91 que presenta mayor probabilidad de corrosión galvánica, que por ejemplo la aleación AZ31, debido a una mayor cantidad de segunda fase; y tercera, varios autores señalan que el tratamiento de *af* tiene características favorables como pretratamiento anterior a la aplicación de una pintura, por los grupos hidroxilo y fosfato presentes [5, 7, 19] e incluso afirman que las microgrietas son deseables para un anclaje mecánico de dichas pinturas [20-22]. En el presente trabajo se propone utilizar la aleación AZ31, que ha sido ampliamente investigada, y una vez generado el recubrimiento de *af* sobre ésta, realizar un tratamiento de sellado utilizando una solución de fosfatos.

Caracterizar ambos recubrimientos química y morfológicamente, así como evaluar sus características protectoras frente a la corrosión, en un medio fisiológicamente simulado, utilizando polarización potenciodinámica.

Metodología

Obtención y caracterización de los recubrimientos

El material utilizado como sustrato fue la aleación de Mg forjada AZ31. Esta aleación se utiliza mucho como aleación extruida para propósitos generales, y tienen buena resistencia y formabilidad. Como contiene solo 3% de aluminio, no se puede tratar térmicamente y logra sus propiedades mediante endurecimiento por deformación. Se obtuvo de la empresa Magnesium Elektron Limited, R. U., en forma de láminas de 3mm de espesor, con un temple O (recocida a 345°C). La composición química fue determinada mediante análisis de fluorescencia de rayos X por longitud de onda dispersiva (WDXRF): 3.37% Al, 0.78% Zn, 0.22% Mn y resto Mg.

Las muestras rectangulares de la misma se encapsularon en una resina acrílica de curado rápido, dejando una superficie expuesta de aproximadamente 0.75 cm². Previamente al depósito del recubrimiento, las muestras se desbastaron con lijas de SiC grados 320, 600 y 1200. Fueron lavadas con agua destilada y secadas con aire caliente después de finalizar el desbaste con cada lija. Se procedió a obtener el primer recubrimiento por inmersión de las muestras en una solución de *af* al 0.5%, durante 60 minutos, sin agitación, a 60 °C. El pH de la solución se ajustó a 5.0 con trietilamina [7]. Después de obtener el recubrimiento, las muestras se lavaron nuevamente con agua destilada dejándose secar al aire, por 24 h.

Posteriormente, las muestras recubiertas con *af* se introdujeron en la solución para sellar las grietas, cuya composición aparece en la tabla No. 1, durante 13 días a temperatura ambiente, sin agitación. Esta composición se eligió por su habilidad para formar fosfato de calcio, sobre el sustrato, y proporcionar recubrimientos homogéneos [23].

La morfología de ambos recubrimientos, tanto en superficie como en sección transversal, fue observada mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Los compuestos químicos cristalinos presentes en los recubrimientos adheridos a los sustratos fueron identificados mediante Difracción de Rayos X (DRX), empleando la técnica de haz paralelo en modo película (espejo Göbel), con un ángulo de incidencia de 2°. Se empleó la radiación $K\alpha$ del cobre ($\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$), un voltaje de 40 kV, una intensidad de filamento de 40 mA, un barrido angular de 5 a 65°, una anchura de paso de 0.02° y un tiempo de adquisición por paso de 2 segundos.

| Reactivos | Concentración (mM) |
|----------------------------------|--------------------|
| CaCl ₂ | 1.5 |
| MgCl ₂ | 1.5 |
| Na ₂ HPO ₄ | 1.8 |

Tabla 1 Composición de la solución de fosfatos-cloruros

Evaluación del sellado de las grietas.

La evaluación de la resistencia a la corrosión de las muestras recubiertas, en comparación con los sustratos, se llevó a cabo en la solución de Hanks a 37°C, cuya composición, en g/L, es la siguiente: NaCl 8.0, CaCl₂ 0.14, KCl 0.40, MgCl₂•6H₂O 0.10, MgSO₄•7H₂O 0.06, NaHCO₃ 0.35, Na₂H₂PO₄ 0.10, Na₂HPO₄•2H₂O 0.06, glucosa 1.00. El pH de la solución fue de 7.8. Se obtuvieron curvas de polarización potenciodinámica, después de 30 minutos de estabilización del potencial en circuito abierto (*Eca*).

El barrido se inició en - 500 mV hasta +1,000 mV, ambos respecto a *Eca*, a una velocidad de barrido de 1 mV s⁻¹. Se utilizó un electrodo de referencia de calomelanos saturado (ecs) y dos barras de grafito de alta densidad como electrodos auxiliares. La reproducibilidad se confirmó ensayando un mínimo de 2 muestras que presentaran resultados muy similares por cada condición superficial. El potencióstato utilizado cuenta con el software Echem Analytix 5.56 que permite calcular los principales parámetros de corrosión, en un ajuste de Tafel. Los criterios para seleccionar el valor de los parámetros del ajuste de datos fueron, el valor más bajo de calidad (χ^2) y el menor porcentaje de error.

Resultados

Obtención y caracterización de los recubrimientos

Después de la inmersión en la solución de *af*, la superficie de la aleación se tornó gris, opaca, sin asperezas. Al observarla en el MEB, revela el característico aspecto de un recubrimiento compacto, continuo, aunque microfisurado, como se aprecia en la figura 1. En esta figura también aparecen unos productos blancos pertenecientes al recubrimiento de fosfatos y cloruros (para sellar las grietas).

Las microfisuras se crean muy probablemente, bien por el desprendimiento de hidrógeno durante la reacción o bien por la deshidratación y contracción durante su secado y posterior introducción en la cámara de vacío del MEB [22]. Un recubrimiento microfisurado de *af* se ha reportado por otros autores, para estas aleaciones de Mg [22, 24].

Evidentemente, la figura 1a corresponde a una muestra deficientemente recubierta con el recubrimiento de fosfatos y cloruros, pues en una muestra bien recubierta, se aprecia una capa de productos blancos sobre toda la superficie (figura 2), aunque no se trata de una capa continua, sino que se distinguen huecos por los que el electrolito puede penetrar. En la observación ocular, aparecía una capa blanca granulosa.

Respecto al espesor del recubrimiento de *af*, la figura 2a presenta un corte transversal del mismo. En esta figura, el espesor es de $\approx 4.3 \mu\text{m}$ pero en otras muestras se midieron espesores mayores, pudiendo establecer un rango de 4 a 8 μm , que corresponde a los valores obtenidos en casi todos los trabajos anteriores en los que se midió el espesor [9, 20, 24-25], pues en la mayoría de los trabajos revisados no se midió el espesor de *af*.

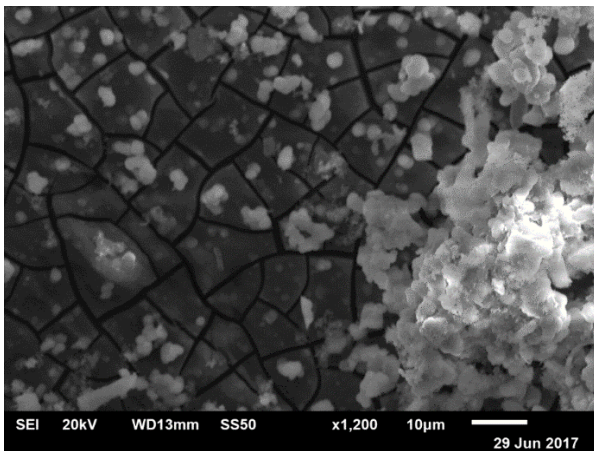


Figura 1 Aspecto del recubrimiento microfisurado o agrietado de *af* sobre la aleación AZ31, para mayor información consultar el texto

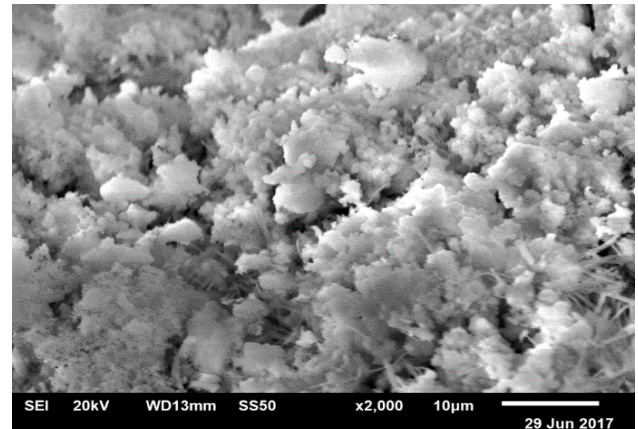


Figura 2 Aspecto del recubrimiento de fosfatos y cloruros, sobre la aleación y el recubrimiento de *af*, para sellar las grietas

La superficie aparece compacta y más o menos continua, pero debajo de ella se aprecian cavidades alargadas que conectan con el sustrato y que deben estar relacionadas con las grietas mostradas en la figura 1. En la mayoría de los trabajos revisados aparecen grietas en la superficie del recubrimiento y la mayor resistencia a la corrosión parece coincidir con la red de grietas más fina [24]. En la figura 4 se observa que el espesor del recubrimiento de fosfatos y cloruros fue mucho mayor, $\approx 350 \mu\text{m}$, aunque aparece agrietado. Debido a la diferencia entre los valores de ambos espesores, en la figura 2b, no se observa el recubrimiento de *af*.

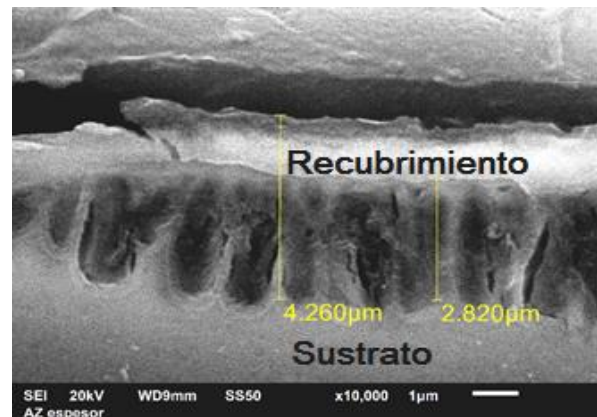


Figura 3 Sección transversal del recubrimiento de *af* sobre la aleación AZ31

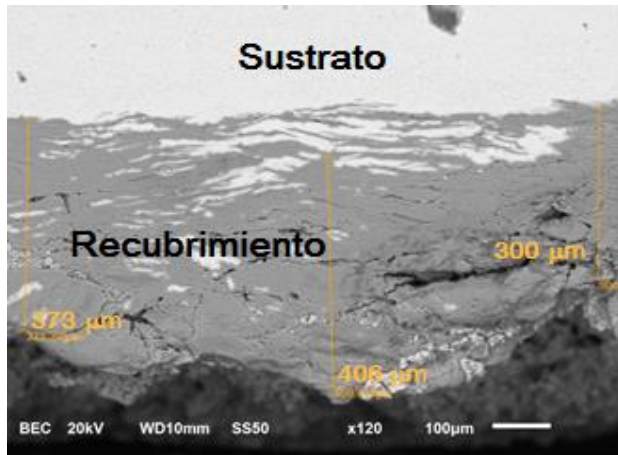
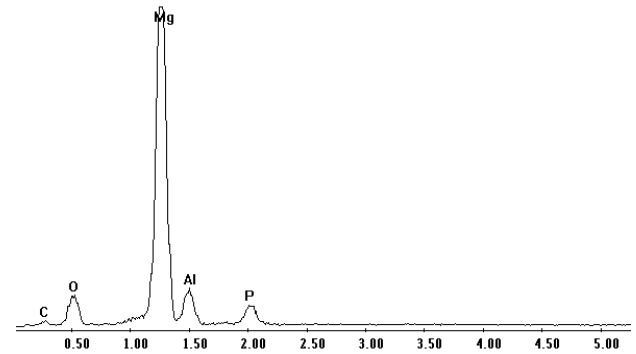
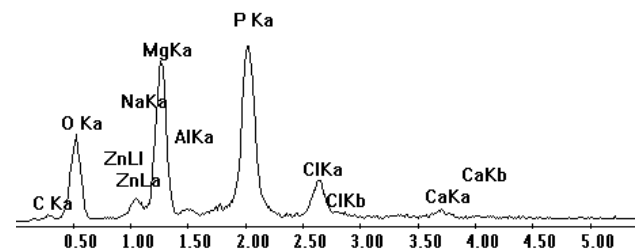


Figura 4 Sección transversal del recubrimiento de fosfatos y cloruros sobre la aleación y el recubrimiento de af. Nótese la diferencia entre los espesores de ambos recubrimientos

El resultado del análisis por dispersión de energías de rayos X (EDX) de la Figura 3a, muestra la presencia de C, O, Mg, Al y P en el recubrimiento generado sobre la aleación AZ31. De estos elementos, el Mg y el Al provienen de la aleación y el resto del af. La presencia de P indica que el recubrimiento de af recubre la superficie del sustrato. Anteriormente, ya se ha comprobado la presencia de fosfatos y fitatos, provenientes del af, mediante espectroscopia infrarroja [26]. El análisis por EDX del recubrimiento de fosfatos y cloruros se presenta en la figura 3b, en ella aparecen los elementos químicos anteriores, más Zn, Na, Cl y Ca. El Zn procedente de la aleación y el resto de este segundo recubrimiento.



a)



b)

Figura 3 (a) Análisis por espectroscopia de energías dispersadas de rayos X (EDX) del recubrimiento de af sobre la aleación AZ31 y (b) del recubrimiento de fosfatos y cloruros sobre la aleación y el recubrimiento de af.

La figura 4a corresponde al resultado del análisis mediante DRX, representativo del recubrimiento de af depositado sobre la aleación AZ31. Los valores exactos de los picos del Mg y sus intensidades relativas se han señalado con líneas verticales, de acuerdo con la tarjeta PDF 00-001-1141 [27]. En la parte de bajos valores de 2θ , claramente se observa una colina que no muestra picos definidos, característica de un material amorfo. Solo se logró la identificación del pico a 7.54° correspondiente al compuesto AlPO_4 , PDF01-070-6291 [27], por lo que se concluye que el recubrimiento de conversión es amorfo y los picos presentes corresponden al sustrato.

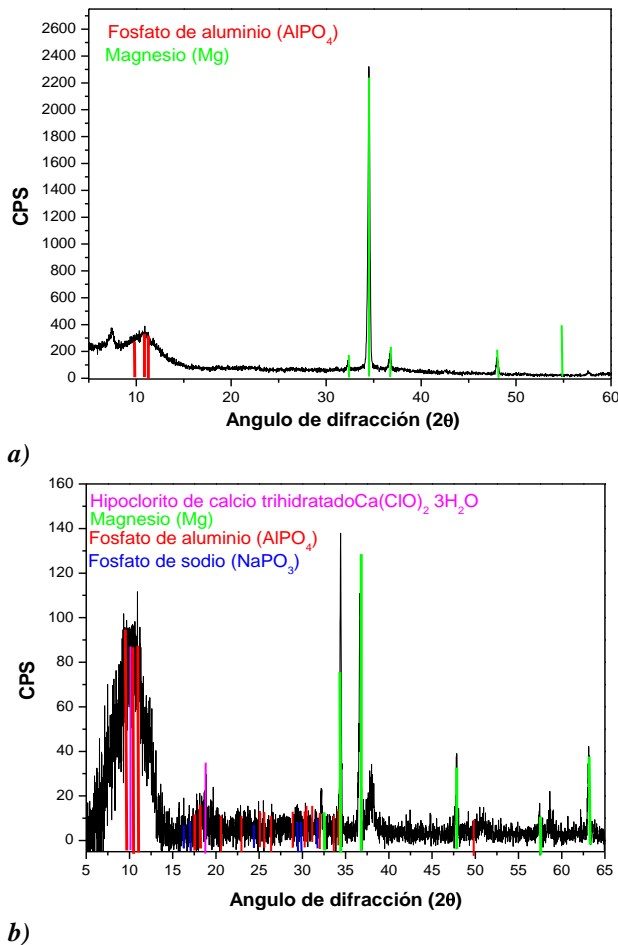


Figura 4 (a) Análisis por DRX del recubrimiento de *af* sobre la aleación AZ31 y (b) del recubrimiento de fosfatos y cloruros sobre la aleación y el recubrimiento de *af*.

Como en la figura 2, el recubrimiento de fosfatos y cloruros presenta productos aparentemente cristalinos, también se analizó mediante DRX (figura 4b). Nuevamente aparece en la zona de bajos valores de 2θ , una colina que no muestra picos definidos, característica de un material amorfo. Aun así fue posible la identificación del Mg, del AlPO_4 y de 2 compuestos más. En las referencias, el recubrimiento de fosfatos y cloruros, obtenido en las mismas condiciones sobre la aleación AZ31, que en el presente trabajo, se describió con las mismas características recién señaladas, solo que las imágenes de MEB lo presentan continuo y homogéneo [23].

Tampoco se identificó fosfato de calcio, se identificaron fosfatos mediante espectroscopia infrarroja.

Evaluación del sellado de las grietas

Debido a la presencia de huecos (figura 1b) y grietas (figura 2b) en el recubrimiento de fosfatos y cloruros, las muestras de AZ31 doblemente recubiertas (*af* + fosfatos) fueron evaluadas cualitativamente mediante el seguimiento del E_{ca} con el tiempo, en la solución de Hanks a 37°C. Para fines comparativos, muestras de AZ31 sin recubrimiento y recubiertas con *af* únicamente fueron evaluadas en las mismas condiciones. La figura 5a muestra los comportamientos típicos, que son esencialmente monótonos, las muestras sin recubrimiento y con recubrimiento doble exhiben un aumento inicial, seguido de valores muy semejantes.

Las muestras sin recubrir exhibieron un desplazamiento continuo hacia potenciales más nobles, de potenciales muy negativos (en torno a -1700 mV_{ecs}), alcanzando a los 1800 s valores de -1470 mV_{ecs}. Para las muestras recubiertas se observan potenciales iniciales considerablemente más nobles, adquiriendo a los 1800 s valores de -336 y -128 mV_{ecs} para los recubrimientos de *af* y *af* + fosfatos, respectivamente. Solamente las muestras recubiertas que presentaron potenciales similares a los señalados fueron sometidas al ensayo de polarización.

En la figura 5b, se presentan las curvas típicas de PPD de la aleación AZ31 con y sin recubrimientos, después de 1800 s de contacto con la solución de Hanks a 37°C.

Se aprecia que la presencia de los recubrimientos desplaza el E_{corr} hacia valores mucho más nobles, -503 y -194 mV, para el recubrimiento de *af* y el recubrimiento doble respectivamente, con relación a las muestras sin recubrir (-1371 mV), y que los recubrimientos originan curvas de PPD claramente desplazadas hacia las bajas densidades de corriente, con densidades de corriente de corrosión (i_{corr}) menores. Esta aseveración se comprueba al comparar los valores derivados de los parámetros de las curvas de polarización de la figura 5b, mostrados en la tabla 2, calculados por el software del equipo.

Queda así demostrado el efecto protector del recubrimiento *af* y que el recubrimiento de fosfatos efectivamente sella las grietas del *af*, disminuyendo más la i_{corr} y la velocidad de corrosión. Sin embargo, estos efectos protectores son modestos comparados con los obtenidos por otros procedimientos [32, 36, 37, 40-42]; además un estudio inicial como este no puede prever el comportamiento que tendrá el doble recubrimiento a mayores tiempos de contacto con la solución de Hanks.

En cuanto a la forma de las curvas PPD, la rama anódica de las muestras recubiertas presenta mayor polarización que la correspondiente a la muestra sin recubrir, lo que ocasiona mayores valores de la pendiente de Tafel anódica (β_a) (tabla 2).

Sin embargo, la rama anódica de la muestra con el doble recubrimiento exhibe, a potenciales muy nobles, un cambio de pendiente y tendencia a que los valores de densidad de corriente crezcan mucho más (formación de picaduras) lo que incrementaría considerablemente su velocidad de corrosión.

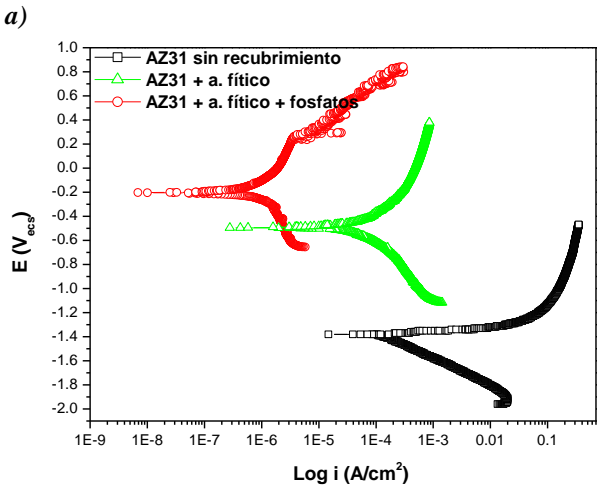
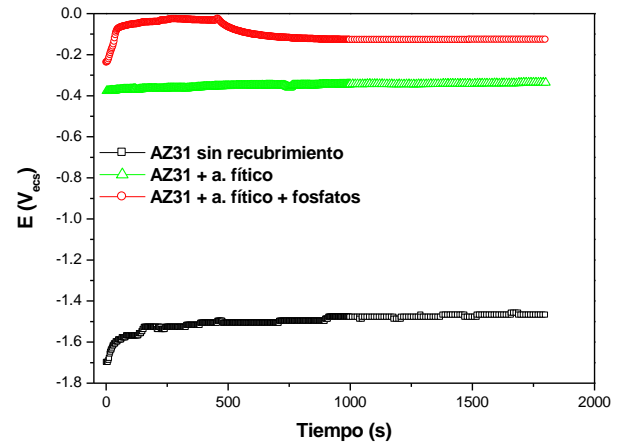


Figura 5 a) Evolución típica del E_{ca} durante 1800 s y b) curvas de polarización potenciodinámica típicas para la aleación AZ31, recubierta y sin recubrir, en la solución de Hanks a 37°C.

| Muestra | β_a (mV/déc) | β_c (mV/déc) | i_{corr} ($\mu A/cm^2$) | Vel corr (mpa) | E_{ca}/E_{corr} (mV) | Chi^2 |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------------|---------|
| AZ31 | 87 | 220 | 200 | 180.38 | -1470/ -1371 | 3.8E-4 |
| AZ31 + <i>af</i> | 210 | 180 | 35 | 31.56 | -336/ -503 | 2.2E-5 |
| AZ31 + <i>af</i> + fosfatos | 200 | 260 | 0.6 | 0.54 | -128/ -194 | 2.5E-6 |

Tabla 2 Parámetros electroquímicos calculados de las curvas de polarización

Conclusiones

Se obtuvieron recubrimientos de ácido fítico, por simple inmersión a 60°C, con espesor de unos cuantos μm . Los principales elementos que los forman son Mg, Al, O, P y C. Como dichos recubrimientos aparecen microagrietados, se aplicó un segundo recubrimiento de fosfatos y cloruros, con espesor $\approx 350 \mu\text{m}$. Ambos recubrimientos están constituidos por compuestos esencialmente amorfos. Tanto los recubrimientos de *af*, como los de *af* + fosfatos ennoblecieron el potencial de corrosión y redujeron la densidad de corriente de corrosión, comprobándose el efecto de sellado de microgrietas del recubrimiento de fosfatos. Esto significa que el doble recubrimiento mejora la resistencia a la corrosión del sustrato de la aleación de magnesio AZ31.

Referencias

1. Witte, F. (2010). The history of biodegradable magnesium implants: A review. *Acta Biomater.* 6 (5), 1680–1692. doi:10.1016/j.actbio.2010.02.028.
2. Guo, K. W. (2011). A review of magnesium/magnesium alloys corrosion. *Recent Pat. Corros. Sci.* 1, 72–90.
3. Kirkland, N. T. (2012) Magnesium biomaterials: past, present and future, *Corrosion Engineering, Science and Technology.* 47, 322-328.
4. Álvarez-López, M., Pereda, M.D., del Valle, J.A., Fernández-Lorenzo, M., García-Alonso, M.C., Ruano, O.A., Escudero, M.L. (2010). Corrosion behaviour of AZ31 magnesium alloy with different grain sizes in simulated biological fluids. *Acta Biomater.* 6 (5), 1763–1771. .

5. Cui, X., Li, Y., Li, Q., Jin, G., Ding, M., Wang, F. (2008). Influence of phytic acid concentration on performance of phytic acid conversion coatings on the AZ91D magnesium alloy. *Mater. Chem. Phys.* 111, 503-507.
6. Chen, X.B., Birbilis, N., Abbott, T.B. (2011). Review of corrosion-resistant conversion coatings for magnesium and its alloys. *Corrosion* 67 (3), 035005-1-035005-16.
7. Jianrui, L., Yina, G., Weidong, H. (2010). Phytic acid conversion coatings of magnesium, *Chin. J. Chem.* 28 (2010) 639-646.
8. Pan, F., Yang, X., Zhang, D. (2009). Chemical nature of phytic acid conversion coating on AZ61 magnesium alloy. *Appl. Surf. Sci.* 255, 8363–8371. doi:10.1016/j.apsusc.2009.05.089.
9. Chen, Y., Wan, G., Wang, J., Zhao, S., Zhao, Y., Huang, N. (2013). Covalent immobilization of phytic acid on Mg by alkaline pre-treatment: corrosion and degradation behavior in phosphate buffered saline, *Corros. Sci.* 75, 280-286.
10. Liu, J. R., Guo, Y. N., Huang, W. D., (2011). Formation process and properties of phytic acid conversion coatings on magnesium, *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol.* 1, 15-21.
11. Zhang, S., Li, Q., Chen, B., Yang, X. (2010) Preparation and corrosion resistance studies of nanometric sol-gel-based CeO_2 film with a chromium-free pretreatment on AZ91D magnesium alloy, *Electrochim. Acta.* 55, 870-877.
12. Gao, H. F., Tan, H. Q., Li, J., Wang, Y. Q., Xun, J. Q. (2012) Synergistic effect of cerium conversion coating and phytic acid conversion coating on AZ31B magnesium alloy, *Surf. Coat. Technol.* 212, 32-36.

13. Gupta, R. K., Mensah-Darkwa, K., Sankar, J., Kumar, D. (2013) Enhanced corrosion resistance of phytic acid coated magnesium by stearic acid treatment, *Trans. Nonferrous. Met. Chin.* 23, 1237-1244.
14. Zhong, X., Li, Q., Chen, B., Wang, J., Hu, J., Hu, W. (2009) Effect of sintering temperature on corrosion properties of sol-gel based Al_2O_3 coatings on pre-treated AZ91D magnesium alloy, *Corros. Sci.* 51, 2950-2958.
15. Gao, H. F., Zhang, S. T., Liu, C. L., Xu, J. Q., Li, J. (2012). Phytic acid conversion coating on AZ31B magnesium alloy, *Surf. Eng.* 28, 387-392.
16. Gupta, R. K., Mensah-Darkwa, K., Kumar, D. (2013). Effect of post heat treatment on corrosion resistance of phytic acid conversion coated magnesium, *J. Mater. Sci. Technol.* 29, 180-186.
17. Zhang, R., Cai, S., Xu, G., Zhao, H., Li, Y., Wang, X., Huang, K., Ren, M., Wu, X. (2014) Crack self-healing of phytic acid conversion coating on AZ31 magnesium alloy by heat treatment and the corrosion resistance, *Appl. Surf. Sci.* 313, 896-904.
18. Cui, X. F., Jin, G., Liu, E. B., Wang, Z. Y., Liu, Z., Li, Q. F., Wang, F. H. (2012) Corrosion resistance of organic coating pretreated by phytic acid, *Surf. Eng.* 28, 657-661.
19. Cui, X., Jin, G., Liu, E., Ding, M., Li, Q., Wang, F. (2012) Influence of substrate composition on the formation of phytic acid conversion coatings, *Mater. Corros.* 63, 215-222.
20. Gao, L., Zhang, C., Zhang, M., Huang, X., Jiang, X. (2009) Phytic acid conversion coating on MgLi alloy, *J. Alloys Compd.* 485, 789-793.
21. Jianrui, L., Yina, G., Weidong, H. (2012) Phytic acid conversion coatings on magnesium surface treatment with cerium chloride solution, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 48, 233-237.
22. Ye, C. H., Zheng, Y. F., Wang, S. Q., Xi, T. F., Li, Y. D. (2012) In vitro corrosion and biocompatibility study of phytic acid modified WE43 magnesium alloy, *Appl. Surf. Sci.* 258, 3420-3427.
23. Smith, M. R., Atkinson, P., White, D., Piersma, T., Rossini, G., Wellinhoff, S., Yu, H., Cheng, X. (2012). Design and assessment of a wrapped cylindrical Ca-P AZ31 Mg alloy of critical-size ulna defect repair. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 100(1), 206-216.
24. Liang, C. H., Zheng, R. F., Huang, N. B., Xu, L. S. (2009) Conversion coating treatment for AZ31 magnesium alloys by a phytic acid bath, *J. Appl. Electrochem* 39, 1857-1862.
25. Cui, X., Li, Q., Li, Y., Wang, F., Jin, G., Ding, M. (2008) Microstructure and corrosion resistance of phytic acid conversion coatings for magnesium alloy, *Appl. Surf. Sci.* 255, 2098-2103.
26. Hernández-Alvarado, L. A., Hernández, L. S., Lomelí, M. A., Miranda, J. M., Narvaéz, L., Díaz, I., Escudero, M. I. (2016). Phytic acid coating on Mg-based materials for biodegradable temporary endoprosthetic applications. *J. Alloys compd.* 664, 609-618.
27. International Center for Diffraction Data, 2010.

Análisis de disipación de energía cinética por elementos tubulares deformables

BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Jorge * †, FLORES-LARA, Vicente¹, BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Marcos² y SZWEDOWICZ-WASIK, Dariusz²

¹Instituto Tecnológico de Apizaco, Av. Instituto Tecnológico S/N Conurbado Apizaco-Tzompantepec Tlaxcala, México.

² Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Int. Internado Palmira S/N, Cuernavaca, Morelos, México

Recibido 08 Enero, 2017; Aceptado 25 Agosto, 2017

Resumen

Se presenta un análisis de un sistema pasivo de disipación de energía cinética. Se considera la influencia de la geometría del contacto inicial entre elementos con movimiento relativo. El objetivo se centra en estimar la aplicación de elementos estructurales tubulares para disipar energía cinética, generada a consecuencia de cargas dinámicas en una caída accidental. El estudio se realiza mediante experimentación numérica con software de elemento finito. El sistema considera pares de tubos estructurales deformables de igual diámetro y dimensiones comerciales. Esto para plantear aplicaciones alternativas de elementos comerciales en sistemas disipadores de energía. Se consideran las condiciones iniciales del sistema, se establecen las características de interacción de los componentes estructurales y las propiedades de materiales en contacto, se analiza la respuesta. Las cargas se aplican en dirección axial, lo que genera incrustación y disipación de la energía. Los resultados muestran la configuración que elimina el movimiento, con lo que se disipa la energía cinética con un sistema pasivo capaz de adecuarse a condiciones y magnitudes de carga en particular.

Deformación, disipación, elementos estructurales, energía

Abstract

The analysis for passive systems used as kinetic energy absorber is presented. The analysis considers the influence of geometry for initial contact between structural elements with relative movement. The potential application of tubular deformable elements as energy absorbers in fall arrest is the main objective. Numerical experimentation with finite element software is used in the analysis. The absorber consists in couples of tubular elements with the same diameter and commercial dimensions. That searches an alternative configuration for energy absorbers, based in commercial elements. The methodology consists in the establishment of: initial conditions, contact interaction between elements, material behavior; and response of the system. The dynamic loads are applied in axial direction, which produces the energy dissipation as consequence of friction and plastic deformation. The response of the absorber is considered as function of velocity and change of position at movable element. The configuration to eliminate the movement is presented; this dissipates the kinetic energy and can be adequate and implemented in function of loads.

Deformation, dissipation, structural elements, energy

Citación: BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Jorge, FLORES-LARA, Vicente, BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Marcos y SZWEDOWICZ-WASIK, Dariusz, Análisis de disipación de energía cinética por elementos tubulares deformables. Revista de Ingeniería Mecánica. 2017. 1-3: 41-51

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ljbedolla@itapizaco.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La industria de la construcción representa una de las principales actividades económicas en el entorno global; la cual incluye diversos retos en su operación, dentro de estos se encuentra la reducción de espacios disponibles y la consecuente necesidad de trabajar en alturas. A la par, las normas y reglamentaciones en esa actividad se han rigidizado con el paso del tiempo.

Al tomar como punto central los problemas de salud de los trabajadores de la construcción, una preocupación principal es el número de trabajadores que desarrollan su actividad en alturas. Donde la severidad de lesiones que se presentan aumenta conforme se incrementa la altura de trabajo. Por lo se considera que la necesidad de opciones de equipos de protección contra caída incrementa en esa misma proporción (Cortés J., 2007).

El trabajo en alturas no es exclusivo en el campo de la construcción, y se realiza en otras actividades pudiendo ser altura sobre nivel de piso o altura en profundidad (Molino B., 2013). Al margen del tipo de altura de trabajo, este es un tema que no puede pasar desapercibido o tomarse a la ligera, ya que presenta una alta accidentabilidad grave o mortal.

Se considera un trabajo de altura a aquel que se desempeña a una distancia del piso más bajo igual o superior a los 1.8 m, o aquel trabajo donde la altura es inferior pero la caída es de un alto riesgo (OSHA, 2012). Según la OSHA, el 15% de las muertes accidentales en la industria, suelen ser por caídas mortales debidas a resbalones y tropiezos. En función de los riesgos que presentan los trabajos en alturas, se considera que los sistemas de protección contra caídas son equipo personal indispensable para la realización de esos trabajos.

Estos sistemas pretenden evitar lesiones en trabajadores involucrados en algún tipo de caída de una altura dada. Las lesiones en trabajadores de alturas, son causadas por las elevadas fuerzas que se presentan durante la desaceleración (Miang y Love, 2010). Biomecánicamente se pueden presentar peligrosas cargas dinámicas con sistemas de protección contra caídas, si es que sus componentes no se diseñan apropiadamente (Martín y otros, 2005). Las prácticas en seguridad laboral especifican que la protección en caídas debe aplicarse como prevención y no como respuesta al accidente (Bobick et al., 2010). Esa especificación motiva el continuo desarrollo de sistemas de protección, de forma tal que sea la primera medida de protección de los usuarios.

Los sistemas de protección contra caídas tienen que diseñarse de manera que absorban la energía cinética de la caída, resultado de la aceleración vertical desde una altura determinada. Existen diferentes configuraciones de sistemas de protección contra caída; sin embargo, un componente característico de esos sistemas es el absorbedor/disipador de energía. Cuya función principal es disipar la energía cinética de la caída, a través de algún mecanismo que prevenga la restitución. De forma tal que la energía sea disipada y no se regrese al sistema de protección, para evitar un “rebote” del usuario. Los sistemas de seguridad contra caídas, con disipadores de energía, pueden categorizarse por dos parámetros principales (Wang et al, 2014): i) máxima elongación dinámica del mecanismo y ii) máxima fuerza actuando en el sistema que realiza la disipación de la energía.

De acuerdo a las características de disipación de energía cinética, se tienen alternativas para ese proceso, dentro de las que se encuentra el subsistema de disipación de energía por deformación controlada o la destrucción de sus componentes estructurales para liberar la energía.

Al respecto, los elementos estructurales de pared delgada responden a los requerimientos de deformación para disipar energía, sin retornarla al sistema, cuando se alcanza su comportamiento plástico. Los elementos estructurales de pared delgada tienen potenciales ventajas como su bajo peso, relativo bajo costo y facilidad de producción (Alavi y Parsapour, 2014). En ese sentido Abramowicz y Wierzbicki (1989), desarrollaron estudios teóricos y experimentales para evaluar la respuesta de tubos de sección circular y cuadrada, y evaluar su respuesta bajo cargas cuasi-estáticas y dinámicas.

Muchas de las investigaciones sobre disipadores de energía se enfocan en elementos de sección circular transversal, particularmente en aquellos con el eje axial paralelo con las paredes del elemento (Rezvani and Damghani Nouri, 2014). También es necesario considerar que en el pasado los estudios de sistemas de disipación de energía se desarrollaron principalmente con técnicas empíricas y analíticas. Pero actualmente, las técnicas tradicionales se complementan con el método del elemento finito (MEF), que resulta en una herramienta versátil para el desarrollo de estudios paramétricos, con lo que se elimina la necesidad de producción física de todos los modelos a analizar (Baroutaji et al., 2015).

La expansión de tubos es una alternativa para disipar la energía cinética que recibe ese elemento, ya sea por impacto o algún otro tipo de carga. En esas condiciones la disipación se lleva a cabo por medio de deformación plástica, la flexión plástica y la fricción de la pared del tubo. A pesar de las características de los tubos como elementos estructurales disipadores, el análisis de expansión en estos elementos ha recibido relativamente poca atención (Yang et al., 2010).

Adicionalmente, los estudios de expansión o contracción de tubos, se centran en uno de esos fenómenos, para lo cual es práctica común usar un dado rígido; que en cada caso expande o contrae el tubo (Salehghaffari et al., 2010; Niknejad, et al., 2013).

En función de lo anterior, el presente trabajo se centra en una aproximación de elementos estructurales tipo tubular de características comerciales, para su aplicación como elementos disipadores de energía, en magnitudes de carga equivalente a la caída de trabajadores en alturas. La carga que se genera por caída, tiene una magnitud reducida en comparación con la capacidad de absorción de un elemento estructural, el cual soporta grandes magnitudes, incluso cargas de impacto de valor significativamente grandes. En ese sentido, el presente estudio se acota a cargas de magnitud equivalente a la caída de trabajadores. Para el sistema propuesto se considera que se compone de pares de elementos tubulares estructurales, ambos deformables y dimensiones comerciales. El sistema propuesto se considera que presenta otra alternativa a los sistemas de disipación de energía, compuesto con elementos de fácil adquisición, geometría simplificada y una configuración que resulta en un disipador pasivo.

Hipótesis

Establecer si “es viable la construcción de sistemas pasivos disipadores de energía cinética, para magnitudes de caída con pares de elementos estructurales tubulares comerciales, en donde ambos elementos presentan deformación y el respectivo dado de compresión o contracción incluido en el mismo sistema es el tubo complementario”.

En las siguientes secciones se presenta la descripción del sistema contra caídas, se indican los componentes del sistema disipador de energía, se presenta el modelo para su estimación del comportamiento, del cual se considera también la geometría del contacto inicial. Se presenta el modelo discreto con los elementos finitos que lo componen, las restricciones aplicadas y las consideraciones hechas en el modelo para su simulación. Se presentan los resultados obtenidos y finalmente se incluyen las conclusiones del trabajo.

Elementos de un sistema contra caídas

Para los trabajos en alturas se requiere de sistemas capaces de limitar los riesgos en el trabajo, por ejemplo por una caída accidental. Las configuraciones de sistemas contra caídas son diversas y su aplicación depende de cada situación particular. Cuando estos sistemas se diseñan en forma correcta, considerando aspectos tanto de los materiales, como biológicos de los usuarios, estos permiten limitar considerablemente la severidad de las caídas accidentales.

Sin importar las diferentes configuraciones de los sistemas de protección, estos cuentan invariablemente con un subsistema para el mecanismo disipador de energía. Un sistema típico de protección contra caída es el que se ocupa con una línea horizontal de vida, y se presenta en la Figura 1, incluye típicamente (Miang y Wang, 2015; Spierings y Stämpfli, 2006):

1. Anclaje a una superficie firme que soporta grandes cargas dinámicas.
2. Cuerda de seguridad con deformación limitada para evitar la restitución de la energía dinámica.
3. Sistema de conectores que permiten desplazarse en una dirección próxima a

la definida por la cuerda de seguridad.

4. Elemento disipador de energía, que en este caso corresponde al ensamble de elementos tubulares estructurales que se deforman plásticamente para disipar la energía cinética.
5. Meses que se fijan firmemente al cuerpo del trabajador y son los que en forma directa aplican la fuerza limitadora de caída al cuerpo humano.

Los componentes del sistema mostrado en la Figura 1, se consideran partes críticas en el accionamiento y protección del trabajador. En función de eso, el presente estudio se acota al análisis de una propuesta para el elemento 4 (ver Figura 1). El cual considera disipación de la energía presente en la caída por medio de la deformación plástica de elementos tubulares estructurales, de dimensiones comerciales.

Las características de operación para la alternativa considerada se basan en deformación radial de elementos tubulares y fuerzas de fricción que se generan por contacto en la interfaz común entre los tubos. Tanto la deformación plástica como la disipación por fricción son aspectos disipativos requeridos para evitar la restitución de energía al sistema. En ese entendido, los elementos estructurales cumplen con los requisitos para formar parte de un sistema contra caída.

Los elementos tubulares presentan ventajas como (Yang et al., 2010): i) fuerza reactiva constante, ii) carrera relativamente larga, iii) modo de deformación repetible y estable, iv) peso ligero comparado con su elevada capacidad de energía específica, y v) bajo costo y fácil adquisición.

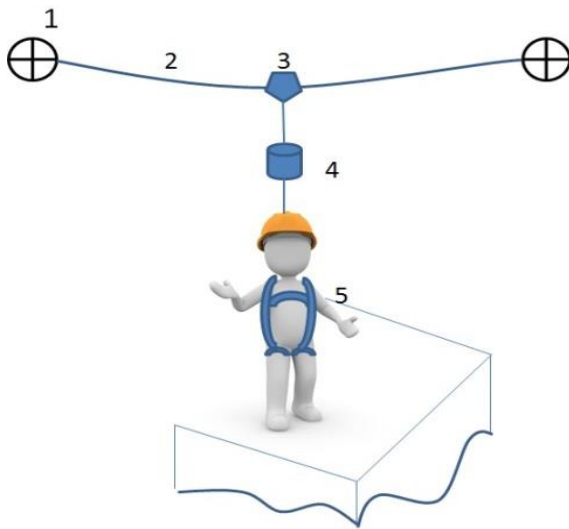


Figura 1 Esquema de sistema de protección contra caídas, con línea de vida horizontal

Análisis de la propuesta del subsistema disipador de energía

El proceso común de expansión o contracción en tubos estructurales se realiza de manera que un tubo es deformado por medio de un dado rígido. Con el objeto de ampliar ese concepto al proceso de disipación de energía en sistemas contra caídas, en el presente estudio se analiza la propuesta de ensambles con dos elementos tubulares deformables, de igual diámetro nominal. Para lograr su deformación plástica, mediante carga axial, un tubo se incrusta en el otro (ver Figura 2). De esta forma se obtiene deformación por contracción en un tubo y expansión en el otro.

Dado el nivel de cargas en la disipación de energía de caída, los elementos estructurales corresponden a tubos de pared delgada. Para el caso particular, se aproximan las características comerciales de los tubos del sistema de disipación, en cuanto a materiales y dimensiones a elementos comerciales.

Además, como parte del estudio, para facilitar la incrustación de un tubo en el otro, se practica una expansión previa al proceso de disipación (campana de radio r_c , ver Figura 3).

La Figura 2 representa un corte de los elementos tubulares en el sistema de disipación. La Figura 2a) muestra los elementos antes de la deformación y la Figura 2b) una ampliación del tubo móvil incrustado en el fijo, en el proceso de deformación plástica. El recorrido del móvil dentro del fijo genera la disipación de energía por deformación y fricción.

Metodología para el sistema disipador

La metodología usada en el desarrollo de la experimentación numérica consiste en establecer la geometría de los elementos del sistema disipador (incluye diferentes radios (r_c) en los modelos para facilitar la incrustación entre los tubos). A partir de la geometría se establece su discretización geométrica, considerando tubos deformables, además de incluir elementos rígidos que simulan la carga, proporcional a la caída. Se definen las propiedades del material, con valores de deformación plástica.

En seguida se establecen valores de carga aplicada en la experimentación numérica. Se establecen las condiciones de contacto e interacciones los elementos. Posteriormente se establece el tipo de análisis en la simulación, para finalmente llegar a resultados y analizarlos en función de la disipación de energía cinética, que se presenta a consecuencia de la caída. A continuación se describen los parámetros y valores usados en el modelado numéricos del elemento disipador.

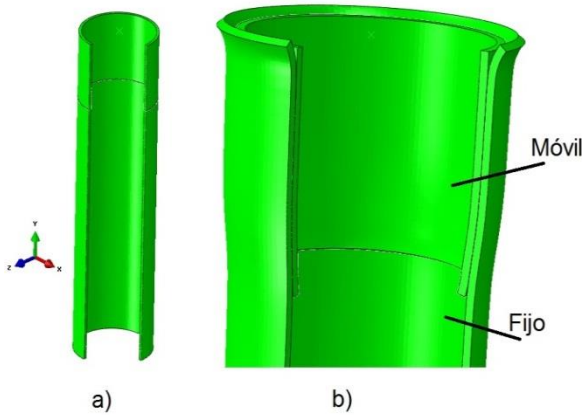


Figura 2 Esquema de elementos tubulares, a) sin carga y b) durante el recorrido del móvil que produce la deformación plástica y la fricción

| Parámetro | |
|-----------------------------------|------------------------|
| Radio interno r_i | 14 mm |
| Espesor e | 26 mm |
| Longitud axial del fijo | 95 mm |
| Longitud axial del móvil | 25 mm |
| Densidad | 7850 kg/m ³ |
| Límite de fluencia | 245 MPa |
| Poisson | 0.3 |
| Coefficiente de fricción estática | 0.15, 0.31, 0.62 |
| Esfuerzo plástico | Ver Tabla 2 |
| Radios de curvatura r_c | 0, 5, 10 y 15 mm |

Tabla 1 Geometría y materiales del modelo

| Esfuerzo [MPa] | Deformación unitaria [mm/mm] |
|----------------|------------------------------|
| 245 | 0.0 |
| 401 | 0.083 |
| 477 | 0.123 |
| 532 | 0.168 |
| 573 | 0.215 |
| 605 | 0.264 |
| 629 | 0.312 |

Tabla 2 Deformación plástica del acero

De acuerdo con la Figura 2, se tienen dos elementos tubulares cilíndricos, el elemento designado como fijo presenta un radio r_c (ver Figura 3) que facilita la incrustación entre los tubos.

Para las pruebas numéricas se consideran diferentes valores de r_c (ver Tabla 1 y Figura 3). Las dimensiones presentadas corresponden a un diámetro nominal comercial de tubo de 30 mm, con material de acero estructural.

En función de la geometría axisimétrica de los tubos, los elementos finitos para representar la geometría de los componentes usados en el elemento disipador son elementos axisimétricos de 4 nodos. La Figura 3 muestra una representación de los elementos discretizados en la región de contacto inicial, se muestra al eje de simetría y los elementos de 4 nodos usados en la discretización. De forma esquemática se muestra el perfil de las paredes de los tubos, con el radio interno (r_i), el espesor de pared (e) y el radio que genera la campana inicial (r_c). El esquema de la Figura 3 corresponde con la sección de la Figura 2. Adicional a los elementos deformables, se incluye un nodo de referencia en la parte superior central del elemento móvil, el cual se fija rigidamente a los elementos axisimétricos de la parte superior del móvil. El nodo de referencia se encarga de desplazar la parte superior del elemento móvil a la velocidad inicial especificada.

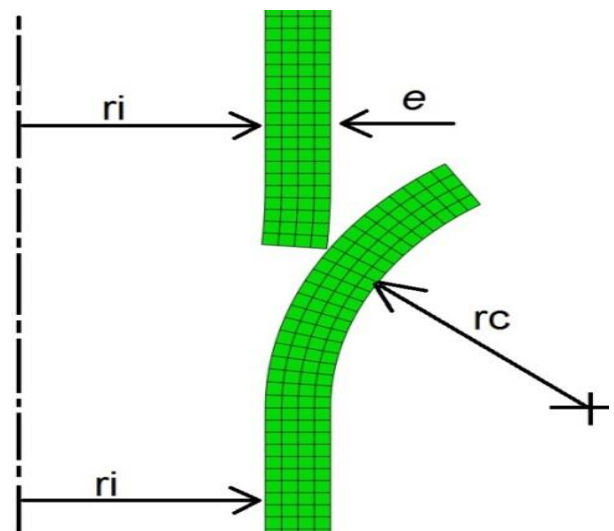


Figura 3 Esquema geométrico de elementos tubulares

La carga considerada para aplicar al elemento disipador se toma en función de la longitud de cuerdas comerciales que permiten el movimiento del trabajador y se unen al elemento disipador, en consecuencia también permiten caída antes de tensarse y transmitir carga al sistema para que inicie su función. La longitud de cuerdas comerciales permiten una caída de (Wu et al., 2011) 1.83 m y 3.35 m. Al considerar para este estudio la menor carrera de caída, la correspondiente velocidad inicial para el instante en que se aplica la carga dinámica al elemento disipador es de 5.5 m/s. Con el objeto de analizar la influencia de la carga en el elemento disipador, se consideran cargas aplicadas de 6 m/s, 5 m/s, 4 m/s, 3 m/s, 2 m/s y 1 m/s. En cada caso analizado la velocidad indicada es la condición inicial del elemento en el instante que se aplica carga a los elementos tubulares para la disipación.

La condición de contacto se presenta principalmente entre la superficie exterior del elemento móvil y la interior del elemento fijo. La interacción de contacto se establece como contacto superficie-superficie en la simulación, con modelo de fricción que considera decaimiento exponencial. La característica para el decaimiento exponencial incluye coeficientes de fricción estáticos de la Tabla 1, y con un decremento de 25% una vez iniciado el movimiento, para la aproximación asintótica de la fricción en deslizamiento. Para las restricciones de movimiento, se considera que la parte inferior del elemento fijo se restringe en dirección axial y solo puede deformarse radialmente. El elemento móvil puede deformarse en cualquier dirección, y la restricción de movimiento está impuesta por la velocidad en dirección axial que se asigna al nodo de referencia, unido a todos los nodos de la parte superior del elemento móvil. El movimiento inicial del móvil corresponde a la velocidad en el rango de 1 a 6 m/s.

El desplazamiento y velocidad del elemento móvil son función de las características de contacto, fricción y deformación plástica que se genera al incrustarse un tubo en el otro. Por ser una condición dinámica, altamente variante en el tiempo, el tipo de análisis se define como explícito, para resolver ecuaciones del sistema en intervalos de tiempo que permiten la convergencia del modelo. En la siguiente sección se presentan los resultados.

Resultados y discusión

De acuerdo a las configuraciones, cargas y coeficientes de fricción del sistema de disipación, de forma representativa en la Figura 4, se muestra la trayectoria del elemento móvil dentro del elemento fijo, para la disipación de energía por deformación y contacto.

En la Figura 5 se presenta el comportamiento del elemento móvil para una velocidad inicial de 6 m/s, coeficientes de fricción indicados y $r_c=5$ mm. Donde se observa que solo el coeficiente de fricción de 0.62 alcanza la velocidad de 0 m/s. La velocidad de 0 m/s representa que el móvil se detiene, y en consecuencia se disipó la energía cinética. Para los otros coeficientes la velocidad es superior a cero, lo que indica que el sistema mantiene energía cinética de caída.

Un comportamiento análogo al de la Figura 5 se presenta para los radios $r_c=10$ mm y $r_c=15$ mm. A partir de lo cual se infiere, que el radio inicial de contacto no es factor en el proceso de disipación de la energía cinética en la configuración indicada. Esto siempre que se facilite la incrustación entre los tubos.

Ya que como se observa de la Figura 6, la deformación y contacto para tubos que no presentan una campana inicial (radio $r_c=0$), no se cumple con la función de eliminar la energía cinética por fricción, y toda la carga se transforma en deformación plástica, pero con un desplazamiento limitado. Lo que implica un detenimiento brusco del movimiento de caída.

Si se reduce a menos de 6 m/s la velocidad inicial en el sistema, entonces coeficientes de fricción pequeños tal como 0.15, resultan viables para actuar en los elementos disipadores y detener completamente la carrera que lleva el cuerpo en caída. En ese sentido la Figura 7, muestra el desplazamiento y velocidad del elemento móvil del sistema, para diferentes valores de velocidad inicial.

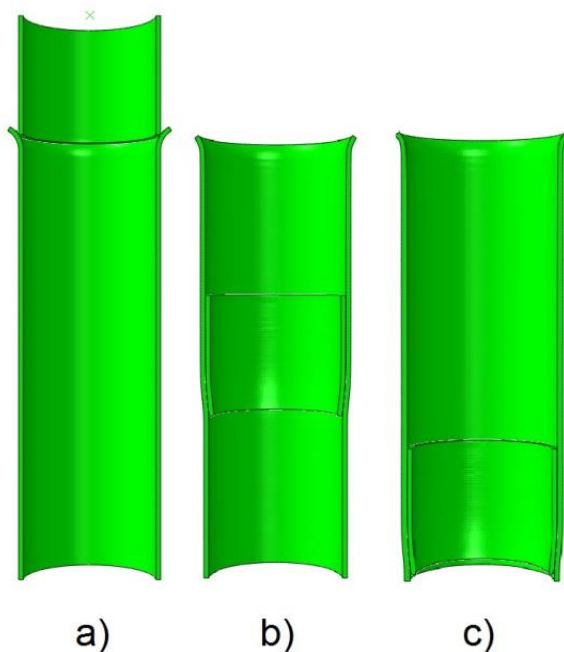


Figura 4 Esquema del desplazamiento relativo de tubos para la disipación, donde se tiene la posición a) inicial, b) intermedia, c) final con velocidad cero.

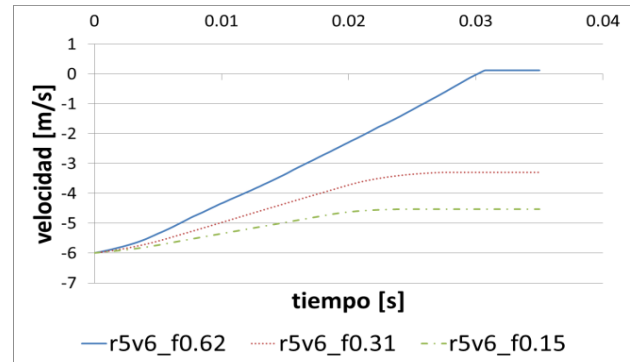


Figura 5 Cambio de velocidad del elemento móvil, para diferentes coeficientes de fricción

En todas las curvas en la Figura 7, se observa que el desplazamiento del móvil inicia en la posición cero. Las curvas respectivas presentan velocidad inicial diferente de cero (tiempo=0 s). De donde se observa que solo las curvas con velocidades iniciales de 1 m/s y 2 m/s llegan a velocidad de cero. Esto indica que el elemento móvil se detiene y se elimina la energía cinética.

La Figura 8 muestra una ampliación de las cruvas para 1 y 2 m/s de la Figura 7, en ésta se observa el cambio de desplazamiento como consecuencia del cambio en la velocidad que experimenta el elemento móvil en su recorrido. Esto permite corroborar que con el incremento de longitud del elemento fijo (incremento de la trayectoria del elemento móvil) se logra la eliminación de la energía cinética, aún para coeficientes de fricción bajos.

Sin embargo, ese incremento de longitud del elemento fijo tiene que limitarse por condiciones mecánicas de pandeo, que se presentan en elementos tubulares de pared delgada. Esto con el fin de evitar el colapso del sistema, y no se logre tener disipación por fricción y solo se logre deformación permanente similar a los resultados de la Figura 7.

De los experimentos numéricos realizados se obtuvo que el incrementar la longitud del elemento móvil no representa cambios significativos en el desempeño del sistema disipador. Ya que como se muestra en el Figura 9, la región inferior del elemento móvil es la que realiza la deformación del elemento fijo, y está se mantiene a lo largo del recorrido del móvil. Por lo que se verificó que aumentar la longitud del elemento móvil no presenta cambios significativos en la disipación; por otro lado modifica las dimensiones iniciales del sistema, lo que resulta en una característica adversa de la configuración al tener mayor longitud pero sin que se incremente la capacidad de disipación de energía cinética en el elemento disipador.

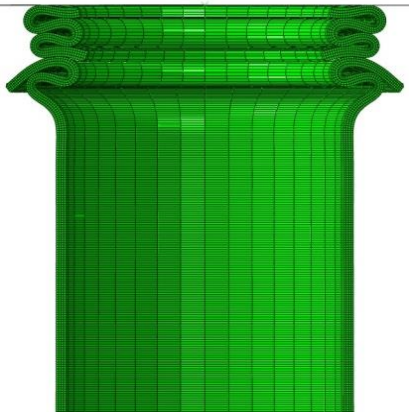


Figura 6 Deformación plástica de tubos sin campana inicial

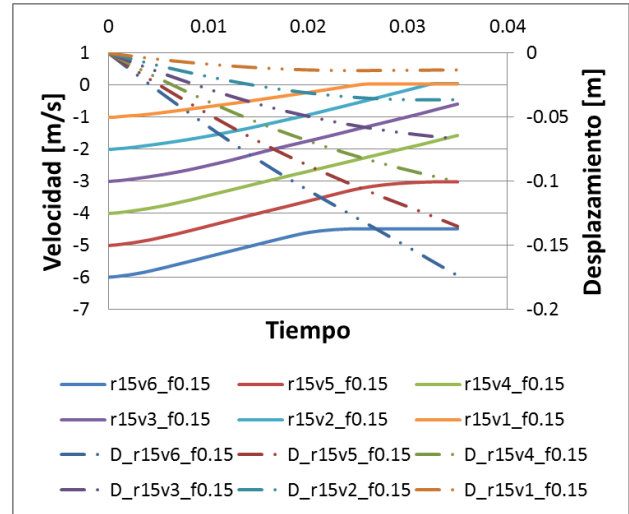


Figura 7 Velocidad y desplazamiento del elemento móvil a diferentes velocidades iniciales y coeficiente de fricción de 0.15

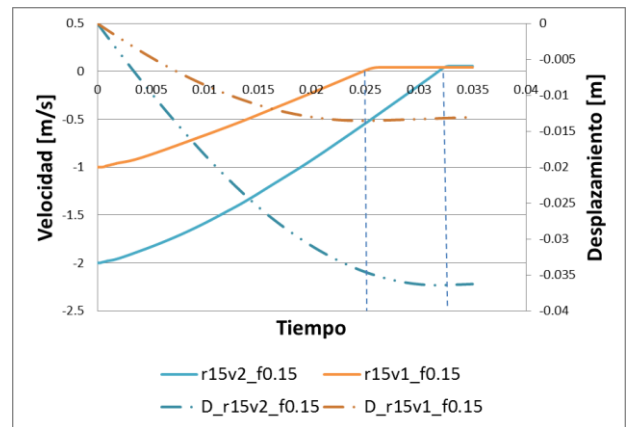


Figura 8 Velocidad y desplazamiento del elemento móvil para velocidades iniciales de 1 y 2 m/s, y coeficiente de fricción de 0.15

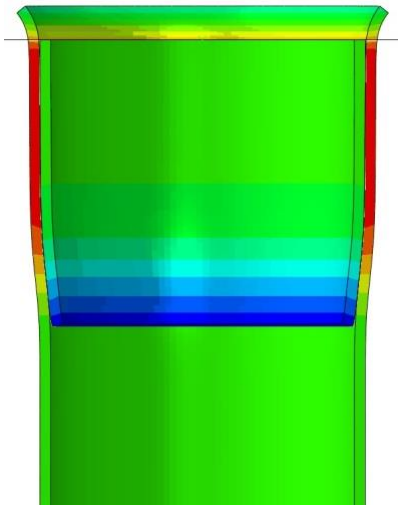


Figura 9 Proceso representativo de contracción y expansión de los elementos tubulares

Agradecimiento

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México el apoyo económico otorgado para la realización de este trabajo, como parte del proyecto clave: 6239.17-P.

Conclusiones

Se propuso un sistema de pares de tubos deformables, con capacidad de eliminar energía cinética, en magnitudes equivalentes a caídas de un trabajador, el cual es factible obtener mediante elementos comerciales. Es posible aprovechar en el disipador la deformación plástica de los tubos en contracción y en expansión, sin incluir dados rígidos en el proceso de deformación plástica. Se concluye que en función de las cargas iniciales de energía a disipar, diferentes coeficientes de fricción pueden considerarse en el diseño de elementos disipadores. Se verificó que el incremento del coeficiente de fricción o el incremento de la longitud axial del elemento fijo, son variables para obtener la configuración final de eliminación de energía cinética en el sistema.

Se concluye que el incremento de longitud del elemento móvil no tiene efecto real en el proceso de disipación de energía. Se verificó que la configuración del radio r_c es irrelevante en el proceso de disipación, siempre y cuando se tenga el valor inicial de r_c que permita la incrustación de un tubo en el otro.

Referencias

Abramowicz W, Wierzbicki T. Axial crushing of multi-corner sheet metal columns. *Appl Mech – TransASME*1989; 56(1):113–20.

Alavi Nia A., Parsapour M., Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections, *Thin-Walled Structures*, vol. 74(2014), pp. 155–165.

Bobick T.G., McKenzie E.A., Kau T.Y. (2010), Evaluation of guardrail systems for preventing falls through roof and floor holes, *Journal of Safety Research*, 41 (2010): 203–211, 2010.

Cortés J., (2007). Técnicas de prevención de riesgos laborales: seguridad e higiene del trabajo. España: Editorial Tébar S.L.

International Journal of Impact Engineering, 32 (2006): 1370–1383, 2006.

Miang Goh Y., and Wang Q., (2015), Investigating the Adequacy of Horizontal Lifeline System Design through Case Studies from Singapore, *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 141, Issue 7 (July 2015).

Miang-Goh Y, Love-Peter. (2010) Adequacy of personal fall arrest energy absorbers in relation to heavy workers, *Safety Science*, 48 (2010): 747–754, 2010.

Molino B., (2013). Seguridad y evaluación de riesgos profesionales en parque eólicos. España: Ediciones Paraninfo S.A.

Niknejad A., Rezaei B., Hossein Liaghat G., (2013), Empty circular metal tubes in the splitting process – theoretical and experimental studies, *Thin-Walled Structures* 72 (2013), pp. 48–60.

OSHA. (2012). Protección contra caídas en la construcción residencial. 4 de febrero del 2017, Sitio web: <https://www.osha.gov/doc/topics/residentialprotection/index.html>.

Rezvani M. J., and Damghani Nouri M., (2014), Axial Crumpling of Aluminum Frusta Tubes with Induced Axisymmetric Folding Patterns, *Arab J Sci Eng* (2014), vol 39, pp. 2179–2190.

Salehghaffari S., Tajdari M., Panahi M., Mokhtarnezhad F., (2010), Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading, *Thin-Walled Structures* 48 (2010): 379–390, 2010.

Spierings A.B., Stämpfli R., (2006), Methodology for the development of an energy absorber: Application to worker security ropes,

Wang Q., Pin Hoe Y., and Miang Goh Y., (2014), Evaluating the Inadequacies of Horizontal Lifeline Design: Case Studies In Singapore, Proc. CIB W099 Achieving Sustainable Construction Health and Safety, Lund, Sweden, 2-3 June 2014, pp. 660-670.

Wu J., Powers J.R., Harris J.R., Pan C.S., (2011) Estimation of the Kinetic Energy Dissipation in Fall-Arrest System and Manikin During Fall Impact. *Ergonomics*. 2011 Apr; 54(4):367-79

Yang J., Luo M, Hua Y, Lu G., (2010) Energy absorption of expansion tubes using a conical–cylindrical die: Experiments and numerical simulation, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 52 (2010), pp. 716–725.

Yang J., Luo M, Hua Y, Lu G., (2010), Energy absorption of expansion tubes using a conical–cylindrical die: Experiments and numerical simulation, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 52 (2010), pp. 716–725.

Instrucciones para autores

[Título en Times New Roman y Negritas No.14]

Apellidos en Mayusculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayusculas -2do Nombre de Autor
Correo institucional en Times New Roman No.10 y Cursiva

(Indicar Fecha de Envío: Mes, Día, Año); Aceptado (Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

Resumen

Título

Objetivos, metodología

Contribución

(150-200 palabras)

Abstract

Title

Objectives, methodology

Contribution

(150-200 words)

Keywords

**Indicar (3-5) palabras clave en Times New Roman
y Negritas No.11**

Cita: Apellidos en Mayúsculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayusculas -2do Nombre de Autor. Título del Paper.
Título de la Revista. 2015, 1-1: 1-11 – [Todo en Times New Roman No.10]

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Instrucciones para autores

Introducción

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?

Enfocar claramente cada una de sus características

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del artículo

Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente

[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Artículos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

En el *contenido del artículo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

[Indicando el título en la parte inferior con Times New Roman No.10 y Negrita]

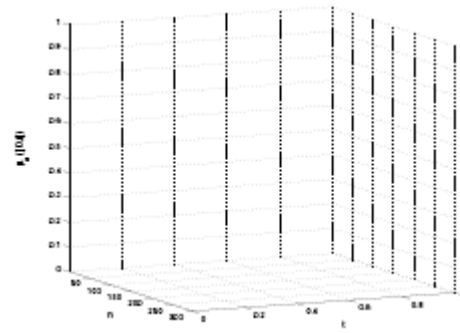


Grafico 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

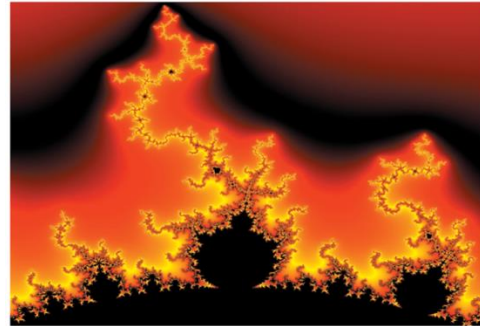


Figura 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Tabla 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

Cada artículo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Titulo secuencial.

Instrucciones para autores

Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:

$$Y_{ij} = \alpha + \sum_{h=1}^r \beta_h X_{hij} + u_j + e_{ij} \quad (1)$$

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

Metodología a desarrollar

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados

Resultados

Los resultados deberán ser por sección del artículo.

Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

Agradecimiento

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

Conclusiones

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

Referencias

Utilizar sistema APA. **No** deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del artículo.

Ficha Técnica

Cada artículo deberá presentar un documento Word (.docx):

Nombre de la Revista

Título del Artículo

Abstract

Keywords

Secciones del Artículo, por ejemplo:

1. *Introducción*
2. *Descripción del método*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda*
4. *Resultados*
5. *Agradecimiento*
6. *Conclusiones*
7. *Referencias*

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencias

Formato de Originalidad



Madrid, España a ____ de ____ del 20 ____

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables por lo que deberán firmar los autores antes de iniciar el proceso de revisión por pares con la reivindicación de ORIGINALIDAD de la siguiente Obra.

Artículo (Article):

Firma (Signature):

Nombre (Name)

Formato de Autorización



Madrid, España a ____ de ____ del 20 ____

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables. En caso de ser aceptado para su publicación, autorizo a ECORFAN-España a difundir mi trabajo en las redes electrónicas, reimpresiones, colecciones de artículos, antologías y cualquier otro medio utilizado por él para alcanzar un mayor auditorio.

I understand and accept that the results of evaluation are inappealable. If my article is accepted for publication, I authorize ECORFAN-España to reproduce it in electronic data bases, reprints, anthologies or any other media in order to reach a wider audience.

Artículo (Article):

Firma (Signature)

Nombre (Name)

Revista de Ingeniería Mecánica

“Diseño, construcción y control de un Robot Paralelo de 5 barras de 2 GDL”

ZUÑIGA, Nadia , CRUZ, Juan, VERA, Edgar y RAMOS, Julio

“Caracterización de una aleación automotriz modificada con vanadio y niobio”

VERA-SERNA, Pedro, TENORIO-GONZALEZ, Felipe y BARAJAS-ROSALES, Iván

*Universidad Politécnica de Tecámac
Instituto Tecnológico de Pachuca*

“Generación de energía a partir de fuerzas magnéticas repulsivas en un rotor”

GOMEZ-MERCADO, Abdiel & PALOMAR-CORONA, José

¹Universidad Politécnica de Tecámac

“Diseño asistido por computadora de una órtesis mecánica manufacturada en CPVC”

SANDOVAL, Edith, LÓPEZ, Marcos, GÓMEZ, Erick y CORTES, Uzias

“Sellado del recubrimiento de ácido fítico aplicado sobre la aleación de magnesio AZ31”

HERNÁNDEZ, Laura A., LOMELÍ, Martha, HERNÁNDEZ, Luis S., ESCUDERO, María, TORRES, A. Alberto

*Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM)*

“Análisis de disipación de energía cinética por elementos tubulares deformables”

BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Jorge , FLORES-LARA, Vicente, BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Marcos y SZWEDOWICZ-WASIK, Dariusz

*Instituto Tecnológico de Apizaco
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*

