

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA SILLA/EXOESQUELETO

SIMULATION AND STRUCTURAL ANALYSIS OF A CHAIR/EXOSKELETON

Luis I. Solórzano Caballero

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
luisiransc@gmail.com

Amparo D. Palomino Merino

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
palomino@ece.buap.mx

Fernando Reyes Cortés

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
fernando.reyes@correo.buap.mx

César Martínez Torres

Universidad de las Américas Puebla
cesar.martinez@udlap.mx

Rogelio Pérez Santiago

Universidad de las Américas Puebla
rogelio.perez@udlap.mx

Gibran Etcheverry

Universidad de las Américas Puebla
gibran.etccheverry@udlap.mx

Resumen

Esta investigación evalúa el diseño mecánico de un exoesqueleto de tipo pasivo para extremidades inferiores del cuerpo comúnmente denominado “chairless-chair” cuyo objetivo es disminuir el cansancio físico y las lesiones musculoesqueléticas en áreas laborales. Mediante simulaciones se realizó un análisis estructural y de pandeo con el propósito de examinar los componentes del mecanismo los cuales soportan y transmiten el peso del usuario hacia el piso, para establecer bajo qué condiciones de carga la silla/exoesqueleto cumple con los requisitos de resistencia. Asimismo, se analizó el comportamiento estructural de la

silla/exoesqueleto considerando que para su fabricación se utilizan tres materiales distintos al aluminio (acero, plástico ABS, y polímero reforzado con fibra de carbono); los resultados demuestran que el aluminio es el material más adecuado porque presenta un equilibrio entre ligereza, rigidez, aspectos económicos, y resistencia a fallar por pandeo; además, soporta eficientemente al usuario estándar cuando este está sentado sobre la silla/exoesqueleto.

Palabras Claves: Análisis estructural, análisis de pandeo, silla/exoesqueleto.

Abstract

This research evaluates the mechanical design of a passive lower extremities exoskeleton commonly called “chairless-chair”, which objective is to decrease physical fatigue and skeletal-muscle injuries mainly in labor areas. Through simulations a structural and a buckling analysis were made with the purpose of examine the components of the mechanism which support and transmit the user’s weight to the floor in order to establish under what load conditions the exoskeleton/chair meets the resistance requirements. Besides this, the structural behavior of the exoskeleton/chair was analyzed considering that for its manufacturing three materials other than aluminum were used (steel, ABS plastic, and carbon fiber reinforced polymer); the results show that aluminum is the most suitable material since it presents a balance between lightness, rigidity, economical aspects, and resistance to a buckling failure; in addition, it efficiently supports to the standard user when this is sitting on the exoskeleton/chair.

Keywords: Structural analysis, buckling analysis, exoskeleton/chair.

1. Introducción

Los exoesqueletos son sistemas mecatrónicos sofisticados cuya finalidad es la de satisfacer una necesidad biológica motriz en una persona. El soporte proporcionado por los exoesqueletos es externo al cuerpo por lo cual estos sistemas son acoplados a las extremidades corporales como un elemento adicional no invasivo que, como en la mayoría de los casos para su implementación sólo se requiere ajustarlo como un elemento más añadido a la

vestimenta que las personas utilizan cotidianamente. La palabra que le da el nombre a los exoesqueletos ('exo' significa exterior, y esqueleto; esqueleto externo), proporciona una definición meramente introductoria de lo que son estos sistemas ya que actualmente se han desarrollado exoesqueletos muy complejos para los cuales es necesario hacer más explícita la categoría a la cual pertenece y los rasgos principales que dicho exoesqueleto tiene. Actualmente se categorizan en base a sus aspectos estructurales, de funcionamiento, área de aplicación, entre otros. Abordando la categoría por área de aplicación, algunos de sus campos son rehabilitación y asistencia, ámbito militar, y área laboral e industrial. En el campo de la rehabilitación y asistencia, exoesqueletos como los reportados en [López, 2014], [Sanz-Merodio, 2013], se enfocan en crear sistemas que les permitan a las personas con discapacidades parciales o totales de sus extremidades inferiores y/o superiores recuperar parte de la fuerza y movilidad, o proveer de completa movilidad a tales partes del cuerpo. Estos exoesqueletos son en su mayoría de tipo activo, lo cual indica que aumentan la fuerza del segmento del cuerpo en el cual está siendo utilizado. Por otra parte, en el ámbito militar se desarrollan exoesqueletos comúnmente activos para miembros tanto superiores como inferiores del cuerpo que les permitan a los usuarios transportar cargas significativas con el mínimo esfuerzo por periodos prolongados de tiempo [Zoss, 2005]. De manera similar, en el campo laboral e industrial diversas corporaciones han desarrollado exoesqueletos que tienen como principal objetivo reducir las lesiones musculo-esqueléticas ocasionadas por fatiga [Lockheed, 2018], [US Bionics Inc., 2018]. Estos exoesqueletos pueden ser activos o pasivos; los pasivos son aquellos que no aumentan la fuerza de los trabajadores, sino que actúan de manera indirecta mediante mecanismos que desvían la carga del peso del usuario de los músculos y articulaciones de sus extremidades para permitirle adoptar posiciones corporales saludables al realizar una labor.

El exoesqueleto al cual está dirigida esta investigación es el que se muestra en la figura 1; es para extremidades inferiores del cuerpo, de tipo pasivo:

- a) Fase inicial, el usuario está de pie.
- b) Fase intermedia, la rótula inferior hace contacto con el piso.

c) Fase final, el usuario está sentado sobre la silla/exoesqueleto.

Su principal área de aplicación es el campo laboral e industrial debido a que gran parte de estos trabajadores (por ejemplo, trabajadores en líneas de producción y ensamblaje de productos), realizan tareas repetitivas en espacios de trabajo reducidos mientras están parados durante jornadas laborales completas, además de que colocar sillas en esas áreas no es factible. A este tipo de exoesqueletos se le denomina “chairless-chair”, ya que el mecanismo que lo compone funciona como una silla replegable que se despliega cuando el usuario flexiona las articulaciones de sus piernas para adoptar una posición inclinada al realizar algún trabajo o actividad. La silla/exoesqueleto se fija a las piernas del usuario, y debido a que sus articulaciones no son actuadas el movimiento que dirige sus desplazamientos es el transmitido por las piernas del usuario.

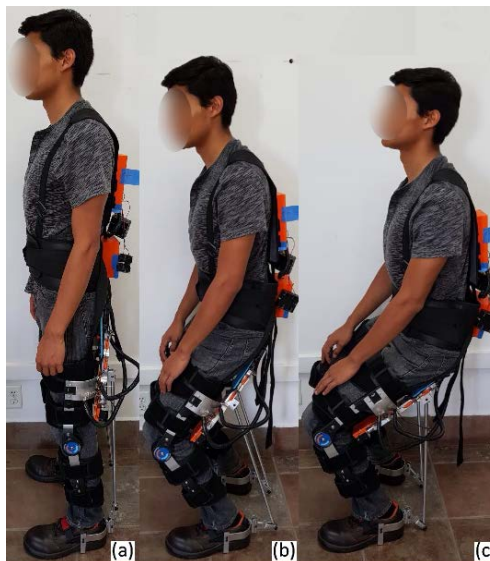


Figura 1 Fases de accionamiento de la silla/exoesqueleto.

Exoesqueletos con características similares a la silla/exoesqueleto que se presenta en esta investigación se encuentran en una etapa de comercialización [Noonee, 2018], [NITTO Co., 2015], existe poca información acerca de estos en revistas y artículos de divulgación. Por otra parte, prototipos de silla/exoesqueletos de bajo costo han sido presentados en [Zurina, 2015], [Suhail., 2008], en los cuales existen

deficiencias de diseño considerando su área de aplicación, ya que el material con el cual están fabricados es acero, por lo cual el peso de la silla/exoesqueleto es inapropiado; la descarga del peso del usuario por medio de la silla/exoesqueleto no es directamente al suelo, sino que descarga en su pantorrilla o en sus talones; además, el mecanismo con el cual se bloquea la silla/exoesqueleto para que el usuario pueda sentarse sobre la misma puede obstruir el espacio de trabajo debido a sus dimensiones. Así, la silla/exoesqueleto que se presenta en este artículo representa un diseño innovador ya que sus componentes están fabricados de aluminio lo cual la hace ligera y de bajo costo; descarga el peso del usuario directamente al suelo, además de que el mecanismo de bloqueo y descarga de la silla/exoesqueleto se repliega hacia las piernas del usuario cuando este se pone de pie. En consecuencia, evaluar el diseño considerando los materiales de fabricación, así como el mecanismo propuesto de bloqueo y descarga resulta vital para valorar su eficiencia; para este propósito se deben considerar las herramientas teóricas adecuadas con respecto a la mecánica de los materiales, e interpretar apropiadamente los resultados obtenidos por medio de simulaciones.

Diseño mecánico de la silla/exoesqueleto

El mecanismo del exoesqueleto está compuesto por 22 partes diferentes hechas de aluminio, acopladas por medio de 3 articulaciones rotacionales y 1 articulación de tipo traslacional. La parte inferior del exoesqueleto se ajusta firmemente a las botas del usuario, y la parte superior del exoesqueleto es ajustada a las piernas, la cadera, y los hombros del usuario a través de cintas adheribles de tela reforzada parecidas a las de una órtesis. El exoesqueleto está compuesto por 2 mecanismos similares, cada uno de estos es ajustado a cada una de las piernas del usuario. En la figura 2 se muestran los componentes principales del exoesqueleto (sin considerar las cintas adheribles), los cuales han sido enumerados con el propósito de identificarlos como piezas individuales: 1. base inferior, 2. base lateral, 3. unión de la base y la horquilla, 4. horquilla, 5. rótula inferior, 6. barra de soporte, 7. rótula superior, 8. corredera, 9. bloqueador, 10. base de la corredera, y 11. resorte. Las articulaciones rotacionales son las partes 3, 5 y 7; y la articulación lineal es la parte

8. Ninguna de las articulaciones es actuada por un motor, y las piezas están mecánicamente acopladas.

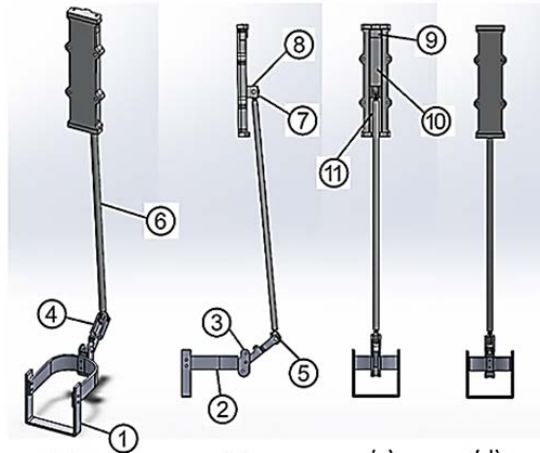


Figura 2 Componentes de la silla/exoesqueleto.

Análisis de resistencia del mecanismo

Utilizando el software de análisis de elemento finito llamado Nastran In-CAD (ambiente de simulación del software Autodesk Inventor 2018), se realizaron dos tipos de análisis a los componentes mecánicos que tienen mayor incidencia en la carga y descarga del peso del usuario. El primer análisis es estructural estático y examina la última fase de operación de la silla/exoesqueleto (ver figura 1), es decir, cuando esta está totalmente desplegada y a su vez el usuario posa su cuerpo a manera de descanso sobre la misma. Bajo estas consideraciones un vector de fuerza que ha sido determinado previamente y que representa el peso del usuario actuando en tal dirección, es aplicado sobre las superficies de los componentes mecánicos que reciben y transmiten dicha carga. Posteriormente, se determina el esfuerzo máximo al cual las piezas de la silla/exoesqueleto están siendo sometidas. El segundo análisis es de pandeo, definido por [Gere et al., 2016] como una de las causas principales de fallas en estructuras que siempre debe ser considerada en el diseño. En este análisis es importante resaltar el hecho de que la silla/exoesqueleto cumple con dos definiciones: es un mecanismo durante el proceso de repliegue, y una estructura cuando el repliegue ha sido completado. Por tal motivo, el análisis de pandeo en la fase final de la silla/exoesqueleto en la

cual adopta su configuración de estructura es fundamental para conocer la carga crítica de pandeo.

2. Métodos

Con la finalidad de seleccionar un material que satisfaga los requerimientos técnicos para la fabricación y uso de la silla/exoesqueleto, se llevó a cabo el procedimiento que se muestra en la figura 3.

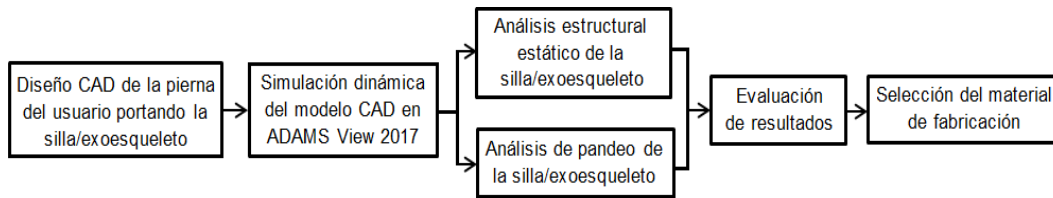


Figura 3 Metodología implementada para la solución del problema planteado.

La etapa inicial comienza con el diseño en un software CAD de un modelo 3D que represente al sistema completo, es decir, a la silla/exoesqueleto acoplada a una pierna del usuario. Al realizar el diseño es esencial considerar las dimensiones reales de cada elemento ya que posteriormente se utilizará este modelo para determinar los valores de masa y fuerza que se requieren en el proceso de solución del problema. A continuación, mediante el uso de ADAMS View 2017, un software con ambiente gráfico para simulación dinámica, y el uso del modelo de la pierna con la silla/exoesqueleto se determinan las fuerzas de carga que actúan sobre los principales elementos del mecanismo. En seguida, mediante la información adquirida previamente (la geometría de los segmentos y partes del modelo 3D, sus respectivas masas, y las fuerzas de carga), se realizó un estudio estático de resistencia utilizando el software de análisis de elemento finito Nastran In-CAD para conocer las condiciones estructurales de la silla/exoesqueleto en función de las propiedades mecánicas de cuatro materiales distintos.

Modelo 3D de una pierna utilizando la silla/exoesqueleto

Con el propósito de disponer de un modelo que pueda ser utilizado como planta de estudio y simulación, se diseñó en un software CAD un modelo 3D de una de

las piernas del usuario. Sus dimensiones se obtuvieron mediante mediciones realizadas directamente sobre el usuario estándar de la silla/exoesqueleto, y para establecer la masa de los segmentos de la pierna se utilizaron tablas probabilísticas compuestas de información recopilada por diversos autores en el área de antropometría [Winter, 2009].

(Se ha optado por dibujar una sola pierna bajo la consideración de que el usuario tiene simetría en sus extremidades inferiores del cuerpo, lo cual simplifica el análisis de este sistema). Cabe destacar que el modelo de la figura 4 fue indispensable para obtener por medio de simulaciones las fuerzas de reacción que actúan sobre la silla/exoesqueleto; debido a que esta investigación se enfoca en el análisis estructural estático de la silla/exoesqueleto, la información de la dinámica de la pierna no se expone ampliamente.

En la figura 4 se muestra el modelo de la pierna el cual está compuesto de los siguientes segmentos: Pie, Pantorrilla, Muslo, y Parte superior del cuerpo soportada por una sola pierna (representa la mitad de la masa del tronco, de los brazos, y de la cabeza).

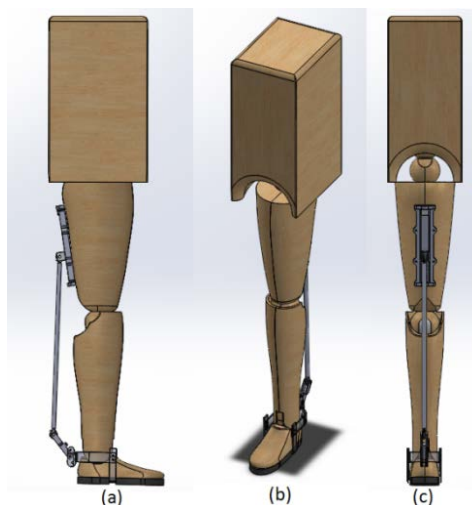


Figura 4 Modelo 3D sistema completo, pierna portando la silla/exoesqueleto.

Una consideración más en el diseño del modelo de la pierna es que sus segmentos son cuerpos rígidos. La pierna diseñada contiene tres articulaciones de tipo rotacional, las cuales están ubicadas en el tobillo, la rodilla, y la cadera. En la figura

4 también se puede observar el acoplamiento realizado mediante un ensamble en el software CAD del modelo de la pierna y el modelo de la silla/exoesqueleto. En la tabla 1 se muestran las masas de cada uno de los segmentos de la pierna del usuario estándar, una persona del sexo masculino de 24 años de edad, con una altura de 1.75 m y un peso de 65 kg; estos valores de masa fueron determinados utilizando una expresión para la densidad del cuerpo en función del peso y de la altura [Winter, 2009], así como el volumen que ocupa cada segmento de la pierna.

Tabla 1 Masa de los segmentos de una sola pierna del usuario.

Segmento	Masa (kg)
Pie	1.363
Pantorrilla	3.802
Muslo	8.556
Tronco/brazos/cabeza	18.776

Simulación dinámica en ADAMS View 2017

Por medio del software ADAMS View se han determinado las fuerzas de contacto ocasionadas por la interacción entre los elementos mecánicos que se muestran en la figura 5. Estas interacciones forman parte del concepto de diseño estructural de la silla/exoesqueleto, ya que a través de estas los componentes del mecanismo logran inmobilizarse y permanecer en una configuración estructural capaz de soportar el peso del usuario.

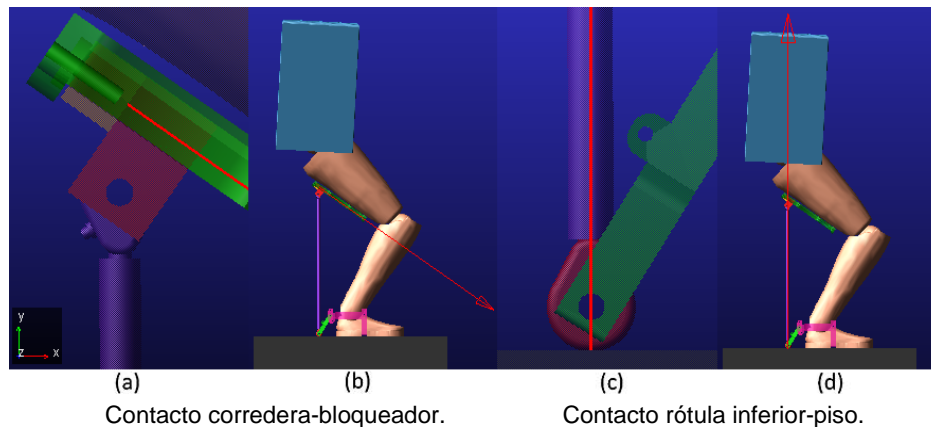


Figura 5 Fuerzas ocasionadas por la interacción entre las piezas de la silla/exoesqueleto.

Para que la silla/exoesqueleto sea desplegada se requiere que el mecanismo llegue a la segunda fase de accionamiento, es decir, el contacto entre la rótula inferior contra el piso (figura 5c); esto ocasiona que la pieza denominada corredera comience a desplazarse con una trayectoria recta hasta que toque con el bloqueador (figura 5a). Cuando esta última interacción sucede la silla/exoesqueleto está totalmente desplegada y pasa de ser mecanismo a estructura, la cual por definición no tiene partes móviles. Mientras tanto, estas piezas en contacto están mutuamente sometidas a esfuerzos de compresión. Las fuerzas resultantes de la interacción entre la corredera y el bloqueador, y las de la interacción entre la rótula inferior y el piso se muestran en las figuras 5b y 5d, respectivamente.

En la tabla 2 se muestran las magnitudes de los componentes de cada una de las fuerzas obtenidas mediante simulaciones. La tabla 2 señala que la fuerza resultante generada por la rótula inferior y el piso, tiene un único componente en dirección del eje Y+; este hecho es resultado del diseño estructural de la silla/exoesqueleto, ya que al quedar la barra de soporte posicionada verticalmente en la fase final la carga es transmitida uniformemente sobre su sección transversal evitando de esta manera que falle por flexión lateral. Por otro lado, la fuerza resultante del contacto entre la corredera y el bloqueador tiene tres componentes debido a la disposición final de ambas piezas al momento de su interacción.

Tabla 2 Fuerzas presentes en la fase final de la silla/exoesqueleto.

Componente de la fuerza	Contacto entre la corredera y el bloqueador (N)	Contacto entre la rótula inferior y el piso (N)
Fx	42.3763	0
Fy	-29.0053	-91.4364
Fz	-0.0743	0

Análisis estático de la silla/exoesqueleto

Utilizando el software de análisis de elemento finito Nastran In-CAD se realizaron dos estudios a los componentes mecánicos de las figuras 5a y 5c, respectivamente, en la configuración final de la silla/exoesqueleto. El primer estudio es un análisis estructural estático y se enfoca en conocer el factor de

seguridad mínimo para identificar los valores de esfuerzos permisibles a los cuales pueden estar sometidos estos componentes. El factor de seguridad se define como una razón entre la resistencia real y la resistencia requerida [Gere, 2016]; por tal motivo, para constatar que la resistencia real de la estructura de la silla/exoesqueleto sea mayor que la resistencia requerida, mediante el uso de Nastran In-CAD se obtienen los valores de los esfuerzos causados por la carga del usuario en turno. Posteriormente, utilizando los coeficientes de esfuerzo de cedencia (tabla 3), se calcularon los factores de seguridad mínimos para cada una de las estructuras analizadas. (Los resultados del análisis estructural estático se muestran en la siguiente sección).

Tabla 3 Propiedades mecánicas de los materiales de interés.

Material	Densidad (ton/mm ³)	Módulo de elasticidad (MPa)	Relación de Poisson	Esfuerzo de cedencia (MPa)
Aluminio 6061	6.89E+4	2.7E-9	0.33	275
Acero	2.05E+5	7.7E-9	0.3	250
ABS	2.24E+3	1.06E-9	0.38	20
PRFC*	1.33E+5	1.43E-9	0.39	300

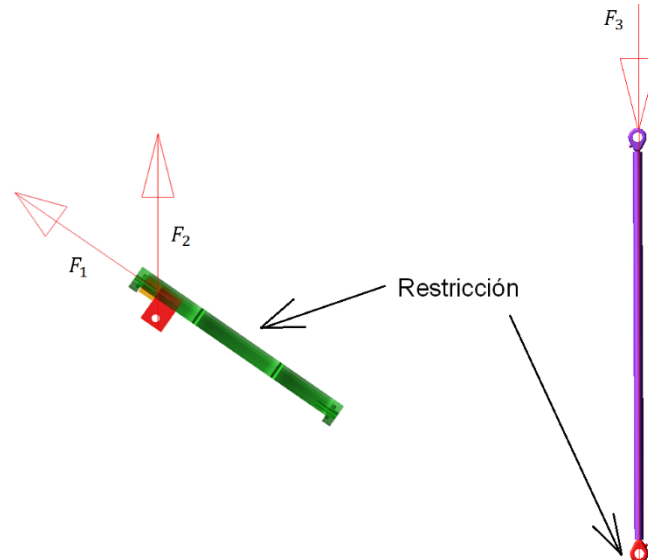
**PRFC, polímero reforzado con fibra de carbono.*

El segundo estudio realizado es un análisis de pandeo, un tipo de falla muy común en elementos críticos de soporte de cargas como columnas y otros elementos esbeltos en compresión [Gere, 2016]. En palabras de [Pytel, 2011], una columna es un elemento axial sometido a compresión, lo bastante delgado respecto de su longitud para que bajo la acción de una carga gradualmente creciente se rompa por flexión lateral o pandeo ante una carga mucho menor que la necesaria para romperlo por aplastamiento. El análisis por pandeo se enfoca en examinar el comportamiento estático de la barra de soporte ya que es una barra prismática cuya longitud es más de diez veces su dimensión transversal, además de que está sometida a compresión. Como resultado de este análisis se obtuvo el valor del factor crítico, un parámetro con el cual es posible conocer la carga crítica la cual indica los límites tolerables de carga a la cual la barra de soporte puede someterse permaneciendo recta.

Configuración previa al análisis estructural estático

Para comenzar el análisis de elemento finito se deben establecer algunos parámetros para configurar la simulación, los más destacados son la restricción de movimiento que se le aplica a los componentes, así como las magnitudes y puntos de aplicación de las cargas (en Newtons) que actuarán sobre estos. En la figura 6 se muestran los diagramas de cuerpo libre de los dos conjuntos de elementos mecánicos que serán analizados.

En la figura 6a se encuentra el conjunto corredera-bloqueador; estas piezas fueron inmobilizadas de la parte trasera de la base de la corredera y sobre este conjunto actúan dos cargas: $F_1 = (-42.3763, +29.0053, +0.0743)$ es la fuerza de interacción que se origina por el contacto entre la corredera y el bloqueador, y $F_2 = (0, +91.4364, 0)$ es la fuerza de reacción que ejerce el conjunto barra de soporte-rótula inferior sobre la corredera y el bloqueador. Por otra parte, en la figura 6(b) se muestra el conjunto barra de soporte-rótula inferior los cuales fueron restringidos en la superficie inferior de la rótula inferior, sobre ellos actúa una carga de compresión $F_3 = (0, -91.4364, 0)$ generada por el peso de la mitad del cuerpo del usuario.



a) conjunto corredera-bloqueador. b) conjunto rótula inferior-barra de soporte.

Figura 6 Diagramas de cuerpo libre para el análisis estructural estático

Es importante recordar que la silla/exoesqueleto actualmente está fabricada con aluminio, por tanto, el primer análisis estructural estático se realizará considerando las propiedades mecánicas de dicho material. (Posteriormente se determinarán los resultados del análisis estructural estático de la silla/exoesqueleto bajo la suposición de que sus piezas están fabricadas con materiales distintos, de tal manera que sea posible comparar las ventajas y desventajas que estos ofrecen).

3. Resultados

La figura 7 indica que el esfuerzo máximo de compresión ejercida sobre el conjunto corredera-bloqueador fabricados de aluminio 6061 es de 3.538 MPa. Las principales zonas afectadas son los orificios de la corredera los cuales se unen a la rótula superior y a la barra de soporte, así como los dos extremos de las superficies en contacto de ambas piezas. La corredera presenta un esfuerzo máximo de 3.538 MPa.

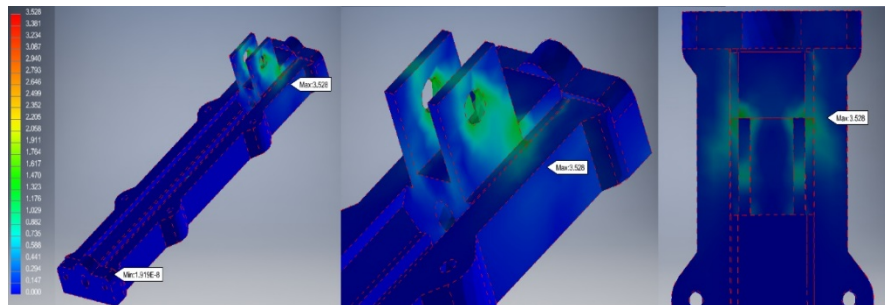


Figura 7 Análisis de elemento finito corredera, bloqueador y la base de la corredera.

Para determinar el factor de seguridad n se debe obtener la razón entre la resistencia real y la resistencia requerida, tal y como se muestra en la ecuación 1.

$$\text{Factor de seguridad, } n = \frac{\text{Resistencia real}}{\text{Resistencia requerida}} \quad (1)$$

Sustituyendo la resistencia requerida (3.538 MPa) y la resistencia real (esfuerzo de cedencia del aluminio 6061 de la tabla 3 en la ecuación 1, obtenemos:

$$\text{Factor de seguridad, } n = \frac{275}{3.538} = 77.727$$

Para evitar la falla el factor de seguridad debe ser >1.0 , por lo tanto, para las condiciones dadas de carga y material de fabricación de las piezas, el factor de seguridad en ecuación 2 es muy grande. [Gere, 2016] menciona que cuando el factor de seguridad es muy bajo, la probabilidad de falla será alta, y la estructura inaceptable; si es muy grande, la estructura será un desperdicio de materiales y tal vez inadecuada para su función (por ejemplo, podría ser muy pesada).

Con respecto al análisis estructural realizado al conjunto de componentes de la figura 8, se sabe que la pieza que está sometida a mayor esfuerzo es la rótula superior con un valor de 3.044 MPa en la sección de acoplamiento con la barra de soporte (figura 8a). La rótula inferior también presenta esfuerzo en su acoplamiento con la barra de soporte (figura 8b), y la barra de soporte permanece casi intacta (figura 8c). El factor de seguridad para este conjunto de componentes es de $n = 90.341$, lo cual es un factor de seguridad $\gg 1$ para las condiciones de carga dadas considerando que el material de fabricación es aluminio 6061.

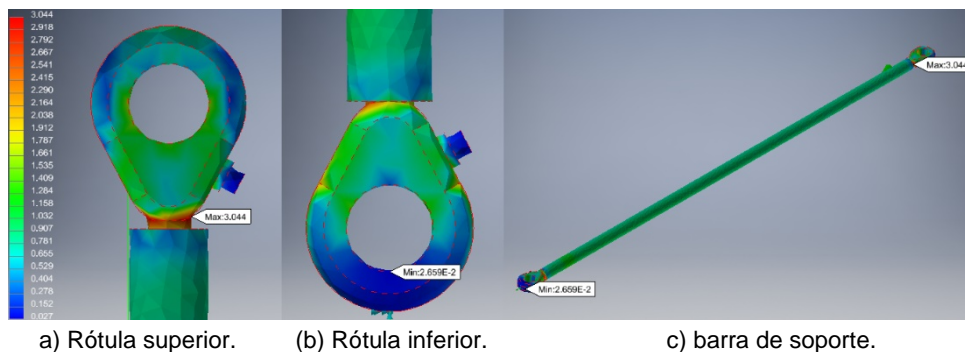


Figura 8 Análisis de elemento finito rótulas inferior y superior, y la barra de soporte.

Prosiguiendo con el análisis de resultados, la tabla 4 contiene información acerca de los factores de seguridad obtenidos al proponer tres materiales distintos para la fabricación de los elementos mecánicos de la figura 7: acero, plástico ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), y polímero reforzado con fibra de carbono (PRFC). El factor de seguridad mínimo en cada caso es distinto debido a los valores de esfuerzos de cedencia inherentes a cada material (ver tabla 3). Por otro lado, el esfuerzo máximo para los cuatro casos es muy similar ya que el análisis estructural realizado es estático, lo cual significa que la fuerza P que actúa sobre

el área transversal A de las piezas bajo consideración es la misma, tal y como lo estipula la ecuación $\sigma = P/A$ para determinar la magnitud de los esfuerzos σ . La tabla 4 señala que para la carga estática ocasionada por la mitad del peso del usuario (32.5 kg) al sentarse sobre la silla/exoesqueleto, el aluminio 6061 presenta un comportamiento mecánico muy adecuado.

Tabla 4 Factores de seguridad de las piezas de la figura 7 usando cuatro materiales.

Materiales	Esfuerzo máximo (MPa)*	Factor de seguridad mínimo
Aluminio 6061	2.947	93.315
Acero	2.957	84.545
ABS	2.946	6.788
PRFC	2.949	101.729

*Sometidas a las fuerzas de contacto de la corredera y el bloqueador, de la tabla 2.

De manera similar, el acero, y el PRFC, un material compuesto que se caracteriza por tener una combinación de ligereza de peso y elevada rigidez, cumplen de manera sobrada con el factor de resistencia requerido. Por último, el material con menor factor de seguridad es el ABS, un termoplástico que es comúnmente utilizado como material de impresión en impresoras 3D; su factor de seguridad no es muy grande ($n = 6.788$), por lo cual es posible pensar que para el usuario de la silla/exoesqueleto este material cumple con las especificaciones de diseño. Esta aseveración es precipitada ya que es imprescindible considerar otros factores técnicos de diseño. El segundo análisis estructural estático se efectuó sobre las piezas de la figura 8 siguiendo el mismo procedimiento que se detalló anteriormente para las piezas de la figura 7. El resultado de este análisis se muestra en la tabla 5, la cual reitera las buenas propiedades de resistencia que los cuatro materiales proveen a las piezas de la silla/exoesqueleto; el aluminio, el acero, y el PRFC tienen un factor de seguridad $\gg 1$, y el factor de seguridad del plástico ABS es el más moderado.

Otro factor sustancial en el diseño técnico de la silla/exoesqueleto es su peso. El factor de peso debe estar íntimamente ligado al análisis estructural puesto que la masa total de la silla/exoesqueleto dependerá del material que se seleccione para la fabricación de sus componentes. La tabla 6 presenta la masa total de una de las

secciones de la silla/exoesqueleto (figura 4), al considerar cada uno de los cuatro materiales de interés para la fabricación de sus componentes.

Tabla 5 Factores de seguridad de las piezas de la figura 8 usando cuatro materiales.

Materiales	Esfuerzo máximo (MPa)*	Factor de seguridad mínimo
Aluminio 6061	4.735	58.078
Acero	4.804	52.039
ABS	4.496	4.448
PRFC	4.439	67.582

*Sometidos a las fuerzas de contacto de la barra de soporte y las rótulas, de la tabla 2.

Tabla 6 Masa total de la mitad de la silla/exoesqueleto.

Materiales	Densidad (kg/mm ³)	Masa total (kg)
Aluminio 6061	2.74E-06	0.521
Acero	7.801E-06	2.444
ABS	1.07E-06	0.334
PRFC	1.51E-06	0.472

De esta manera, la tabla 6 constata la importancia de seleccionar un material que proporcione un factor de seguridad moderado. De los cuatro materiales candidatos, el acero es el material que ocasionará que la silla/exoesqueleto sea mucho más pesada (2.444 kg); el aluminio es un material resistente y ligero de uso general que mantiene el peso de la silla/exoesqueleto dentro de los límites tolerables (0.521 kg), e incluso su ligereza está cerca de la ligereza que proporciona el PRFC (0.472 kg); por último, el material con el cual la silla/exoesqueleto será más liviana es el plástico ABS con un peso de (0.334 kg). Para finalizar la evaluación del diseño de la silla/exoesqueleto, a continuación, en la tabla 7 se muestran los resultados del análisis de pandeo, el cual se enfoca en examinar a la barra de soporte debido a su posibilidad de fallar por flexión lateral a causa de la carga de compresión a la cual está sometida (figura 6b) en la configuración final de la silla/exoesqueleto.

Al considerar detenidamente los resultados de la tabla 7, algunas de las afirmaciones anteriores referentes a la selección de algún material en función de sus propiedades mecánicas pueden ya no ser válidas debido a la importancia que el análisis de pandeo adquiere.

Tabla 7 Resultados del análisis de pandeo.

Materiales	Factor crítico
Aluminio 6061	5.649
Acero	16.776
ABS	0.184
PRFC	10.982

El factor crítico (ecuación 3) establece una relación entre la carga aplicada (-91.4364 N), y la carga máxima (o carga crítica) a la que puede someterse la barra de soporte permaneciendo recta; para evitar la falla por pandeo el factor crítico debe ser >1.0.

$$\text{Factor crítico} = \frac{\text{Carga crítica}}{\text{Carga aplicada}} \quad (3)$$

De este modo, los resultados de la tabla 7 demuestran las condiciones de rigidez estructural de la barra de soporte, para soportar y transmitir el peso del usuario. Para incrementar la carga crítica de la barra de soporte debe elevarse la rigidez por flexión usando un material más rígido, es decir, utilizando un material con mayor módulo de elasticidad [Gere, 2016]. Siguiendo esta idea, es razonable observar que el acero sea el material con el factor crítico más grande, seguido por el PRFC. El aluminio tiene aproximadamente una tercera parte del factor crítico del acero, lo cual es un valor moderado que satisface los requerimientos técnicos de diseño, y el plástico ABS tiene un factor crítico <1.0, lo cual prevé la falla por pandeo de la barra de soporte tal como lo muestra la figura 8.

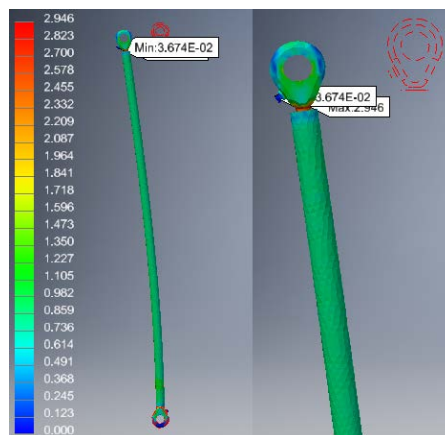


Figura 8 Pandeo barra de soporte considerando el plástico ABS para su fabricación.

Dado que ahora ya se cuenta con la información suficiente acerca del comportamiento mecánico de los materiales candidatos, a continuación, se realiza una comparación para determinar cuál ofrece un equilibrio entre resistencia de la estructura, rigidez del material, peso de los componentes, y el costo del material. Comenzando la examinación con los resultados del análisis de pandeo, el material que debe descartarse en primer lugar es el plástico ABS ya que su factor crítico es <1.0 lo cual indica que la barra de soporte indudablemente fallará por pandeo. Por otro lado, el segundo material que se descarta es el acero debido a que el peso que tendría la silla/exoesqueleto es excesivo para la aplicación, considerando que la silla/exoesqueleto debe ser liviana ya que el usuario la cargará y llevará acoplada a su cuerpo. El tercer material a descartar es el PRFC; aunque ofrece ventajas respecto a los otros tres materiales como ligereza y una rigidez similar a la de los metales, es un material costoso. Por tanto, el material que mantiene un equilibrio entre los cuatro factores que se han analizado es el aluminio 6061.

4. Discusión

Cada uno de los cuatro materiales demuestra cualidades y deficiencias en el diseño de la silla/exoesqueleto. El aluminio es el material que establece un balance de los cuatro aspectos cualitativos que se examinan para la selección del material de fabricación; soporta el peso del usuario en turno (65 kg), e incluso presenta un factor de seguridad $n > 1.0$ lo cual indica que una persona más pesada puede utilizar la silla/exoesqueleto, considerando en todo momento que el factor crítico sea > 1.0 para que la barra de soporte no falle por pandeo. Adicionalmente, al utilizar aluminio la silla/exoesqueleto es ligera (aproximadamente 1 kg, más el peso de las cintas adheribles que la acoplan al cuerpo del usuario). Los otros materiales también ofrecen características adecuadas, no obstante, sus deficiencias tienen un mayor efecto en el diseño de la silla/exoesqueleto. Otra opción que puede resultar conveniente es emplear dos tipos de materiales para la fabricación de los componentes de la silla/exoesqueleto, por ejemplo, el plástico ABS para el conjunto corredera-bloqueador, y para la barra de soporte y las rótulas aluminio. Así, se podrían aprovechar las cualidades de estos materiales.

5. Conclusiones

Mediante el análisis estructural estático y de pandeo ha sido posible caracterizar el comportamiento mecánico de la silla/exoesqueleto bajo la suposición de que está fabricada con los materiales candidatos; cada uno de estos atribuye cualidades favorables para el diseño de la silla/exoesqueleto, no obstante, también tienen efectos adversos al concepto ergonómico que se busca instaurar en la misma. El material que demuestra un equilibrio entre rigidez, ligereza, resistencia a fallar por pandeo, y aspectos económicos es el aluminio; la silla/exoesqueleto fabricada con aluminio soporta eficazmente al usuario estándar. Otro aspecto trascendental que se evidenció por medio de estos análisis es la importancia de la barra de soporte en el diseño de la silla/exoesqueleto expuesta en esta investigación, es decir, el que un material propuesto proporcione resistencia y ligereza no significa que es el idóneo; para llegar a esta decisión debe analizarse que no falle por pandeo como sucedió con el plástico ABS. Mediante este estudio de diseño se estableció una metodología que puede ser utilizada por otros investigadores para prever las condiciones bajo las cuales sus sistemas exoesqueletos se desempeñan adecuadamente. Por otro lado, se ha demostrado por medio de simulaciones que el mecanismo de soporte y descarga hacia el piso de la silla/exoesqueleto cumple su función, no obstante, aún se puede optimizar el diseño para ser tan eficientes como las sillas/exoesqueletos que se están comercializando. Como trabajo a futuro, se realizará el análisis de fatiga de los componentes mecánicos de la silla/exoesqueleto.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] D. Sanz-Merodio, M. Cestari, J. C. Arevalo, and E. García. Gait parameter adaption for lower-limb exoskeletons. IWBBIO, Granada, March 2013.
- [2] Gere J. M., Goodno B. J. Mecánica de Materiales, 8ª ed., Cengage Learning Editores, México, DF, 2016.
- [3] NITTO Co. (2015). Archelis ®: www.archelis.com/.
- [4] H. Zurina, A. Fatin, Musa, M. Hafizuddin, M. H. Aizuddin. The Design and Development of Lower Body Exoskeleton, Part 1, 2nd IDPC, Malaysia, 2015.

- [5] Lockheed Martin Co. (2016). Fortis ® Exoskeleton: lockheedmartin.com/en-us/products/exoskeleton-technologies/industrial.
- [6] López R., Torres J., Salazar S., Lozano R. Desarrollo de un Exoesqueleto para Rehabilitación de Tobillo y Rodilla, RMIB, Vol.35, Abril 2014, pp.13-28.
- [7] Noonee (2014). Noonee ®: www.noonee.com/.
- [8] Pytel A., Singer F. L. Resistencia de Materiales, 11^{ra} ed., Alfaomega Grupo Editor, México, 2011, pp. 356-358.
- [9] Suhail P. S., Akhil R., Muhammed A., Mohammed M. A., Premkrishnan P. Fabrication and Analysis of Chairless Chair, IJIRSET, Vol. 7, 4, April 2008.
- [10] US Bionics Inc. (2018). legX®: <https://www.suitx.com/legx>
- [11] Winter, D. A. Biomechanics and Motor Control of Human Movement, 4th ed., John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2009, pp. 82-85.
- [12] Zoss A., Kazerooni H., Chu A. On the Mechanical Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX), 2005 IEEE/RSJ.