

Metodología mixta de selección de materiales aplicada en la escogencia del material para un dedo de pinza de sujeción de un manipulador industrial

Royman J. López Beltrán*, Jaime Torres S.**

Resumen

El diseño mecánico implica muchas fases, siendo una de las más importantes la selección de un material óptimo para lograr un alto rendimiento en el componente diseñado. Para mejorar la fase de selección del material se han desarrollado muchas herramientas avanzadas. Actualmente se pueden encontrar programas que contienen extensas bases de datos con las principales propiedades del material, tales como el Cambridge Material Selector. Sin embargo, hay algunas propiedades que no tienen suficiente documentación en estos programas. Por ejemplo, existen limitaciones para obtener los valores de propiedades como la resistencia a la fluencia en compresión. Para estos eventos sería muy importante investigar sobre nuevas metodologías de selección, que pueden estar referenciadas en otras, para ejecutar una fase de selección de materiales eficiente y rápida.

En este trabajo se desarrolla una metodología mixta de selección de materiales. Basándose en una combinación del método de selección de materiales Ashby y del cálculo experimental de propiedades mecánicas para soportar la escogencia, se presentan los resultados del proceso de selección aplicado a un dedo de una pinza de sujeción de un manipulador industrial.

Palabras clave: Selección de materiales, índice de rendimiento, metodología Ashby, dedo, pinza de sujeción.

Abstract

Mechanical design compiles some phases, and one of the most important is the selection of an optimum material to obtain a better performance in the designed component. In order to improve the material selection phase in mechanical design, multiples advanced tools have been built up. Nowadays, we can find software which contains extents databases with lots of material properties, such as the Cambridge Material Selector. However, there are some properties which don't have enough documentation in that kind of softwares. For example, we can find limitations to obtain the values of properties such as the compression yielding strength. For those situation, It is very important to look for new methodologies, maybe referenced in other ones, to allow an efficient and quick material selection phase. In this investigation, a mixed material selection methodology is developed. Based on a combination

Fecha de recepción: 25 de febrero del 2002

* Ingeniero Mecánico, Universidad del Norte. Actualmente cursa estudios de Maestría en Ingeniería Mecánica en la misma universidad. Miembro del Grupo de Automatización y Robótica de la Universidad del Norte. (rjlopez@unimail.uninorte.edu.co)

** Ingeniero Metalúrgico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; International Welding Engineer, IIW. Mannheim, Alemania; Ph.D. en Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Valencia, España. (jtorres@uninorte.edu.co).

of Ashby selection charts and the experimental computation of mechanical properties to support the chosen method, we present the results applied to the material selection process of a finger to be used in an industrial manipulator gripper.

Key words: Material selection, performance index, Ashby methodology, gripper, finger.

1. INTRODUCCIÓN

La finalidad de este trabajo radica en la determinación, utilizando una metodología mixta que combina la metodología Ashby desarrollada en University of Cambridge con la experimentación a través de ensayos mecánicos, del material más adecuado para la construcción de los dedos de una pinza mecánica para sujeción de piezas por fricción, con objeto de implementarla en un manipulador de tipo industrial. En el proceso de selección fueron tenidas en cuenta las restricciones dadas por la aplicación y se desarrollaron los ensayos necesarios para complementar de manera experimental la escogencia.

2. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE MATERIALES ASHBY

Este método de selección de materiales fue desarrollado por M.F. Ashby en 1992 [1] y radica principalmente en la optimización del proceso de diseño, basándose en la selección más apropiada de material para la aplicación establecida.

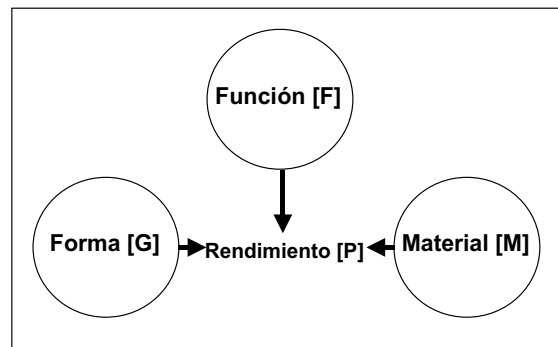


Figura 1. Metodología Ashby para el optimizar la fase de diseño

Según esta metodología, existe un parámetro de rendimiento P que puede permitir la optimización del proceso de diseño de un componente dado. Dicho parámetro o índice de rendimiento depende de la forma del componente, de la función y las exigencias físicas a las cuales se encuentre sometido y del material del cual se encuentre constituido. Esta función se expresa bajo la siguiente notación:

$$P(\text{rendimiento}) = f\{[F],[G],[M]\} \quad (\text{Ec.1})$$

Separando cada uno de los índices de forma independiente se obtiene:

$$P = f_1[F] f_2[G] f_3[M] \quad (\text{Ec.2})$$

La metodología Ashby busca optimizar el índice de rendimiento en el proceso de diseño desde el punto de vista de la selección más adecuada para el material y según las restricciones dadas por la función que va a ejercer el componente y por la configuración geométrica del mismo. Para mejorar el índice de rendimiento se busca minimizar la expresión que representa el índice del material, manteniendo los demás índices constantes.

Una vez se ha identificado el índice de material se procede a realizar la selección mediante las cartas de selección de materiales Ashby. A través de dichas cartas se puede seleccionar los materiales con base en las propiedades más relevantes identificadas en el índice del material, orientando la selección al material cuya combinación de propiedades otorgue el más bajo índice de selección. En la figura 2 es posible apreciar una de las cartas genéricas para la selección de materiales, obtenidas a partir del *Cambridge Material Selector* y basadas en la metodología Ashby.

Figura 2. Carta genérica de selección de materiales [2]

3. PINZAS MECÁNICAS DE SUJECIÓN POR FRICCIÓN

Las pinzas mecánicas son elementos terminales que utilizan dedos como mecanismos para la manipulación de objetos (piezas). Hay que tener en cuenta que el mecanismo debe ser capaz de sostener la pieza en forma segura, garantizando una sujeción adecuada de la pieza y evitando el deslizamiento de la misma durante el transporte.

Existen dos tipos de cierres o formas de sostener la pieza dentro de la pinza. La primera forma consiste en el cierre por forma o constricción, en la cual la pinza se cierra hasta una posición de tal forma que la pieza no se pueda mover. En este tipo de cierre, los elementos terminales de la pinza, dedos, poseen extensiones que le permiten ajustarse a la forma de la pieza que se va a sujetar. El otro tipo de cierre es el cierre por fricción, en el cual la pieza se sujeta a los dedos debido a la fricción existente entre éstos. En este caso, las fuerzas aplicadas sobre la pieza deben generar fuerzas de rozamiento suficientes para retener la pieza en contra de la gravedad, la aceleración y otras fuerzas que se puedan presentar durante los ciclos de operación del dispositivo.

El método de rozamiento suele convertirse en el diseño de pinza más económico, fácil de implementar y se adapta sin problemas a una gran cantidad de piezas. En la figura 3 se observa un diagrama de cuerpo libre de una pieza de trabajo sostenida por una pinza de sujeción por fricción. En dicho diagrama, F_g representa la fuerza que aplica cada dedo de la pinza sobre la pieza que se debe sostener y W el peso de la pieza.

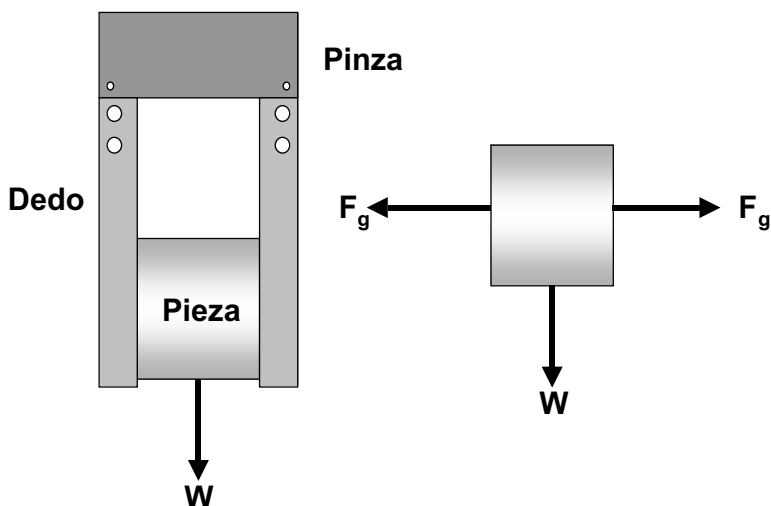


Figura 3. Diagrama de cuerpo libre de la pieza de trabajo

Teniendo como referencia el caso que se presenta en la figura 3, en el cual la única fuerza que produce que la pieza se resbale es el peso de la misma, se tiene la siguiente ecuación [3]:

$$\mu n_f F_g = W \quad (\text{Ec.3})$$

La ecuación 3 no es válida para el caso en el cual la fuerza que tiende a sacar la pieza de trabajo de la pinza es superior al peso de la pieza. Tal situación se genera debido a las fuerzas generadas por la aceleración que se puede producir durante el transporte y a los cambios de orientación del movimiento durante dicha aceleración. Para considerar dicho efecto, se modifica la ecuación 3 adicionando un factor g que cobije estos eventos. Se obtiene la siguiente ecuación:

$$\mu n_f F_g = Wg \quad (\text{Ec.4})$$

Donde g toma el valor de 3.0 si la fuerza de aceleración se aplica en el mismo sentido de la fuerza de gravedad; si la aceleración se aplica en sentido contrario a la fuerza de gravedad, g toma el valor de 1.0, y si la aceleración se aplica en dirección horizontal, g toma el valor de 2.0.

4. CARACTERIZACIÓN DE LA PINZA MECÁNICA PARA ESTUDIO

En este caso se evaluará la metodología de selección de materiales en los dedos para agarre de una pinza por fricción. Se escogió una pinza simple, es decir, que posee un solo dispositivo de agarre en la muñeca para la sujeción de un solo elemento a la vez. La pinza se estructura con dos dedos para sostener la pieza, lo que es altamente útil para operaciones de ensamble en las cuales se somete la pinza a sollicitaciones continuas de carga y descarga.

En estas aplicaciones se prefiere fabricar los dedos de un material relativamente blando, con el fin de que las piezas no sufran ningún tipo de averías al ser transportadas por la pinza. Sin embargo, para garantizar las condiciones de cierre por fricción es necesario que la superficie que se encuentra en contacto con la pieza no posea una baja rugosidad superficial, factor que se encuentra asociado con el proceso de manufactura del elemento. En la figura 4 se puede observar la disposición dinámica de las articulaciones de la pinza de sujeción.

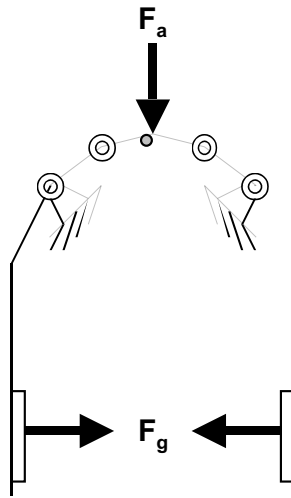


Figura 4. Disposición dinámica de las articulaciones de la pinza

Para evitar tendencia de giro de la pieza durante los movimientos de aceleración de la pinza, se asume que la fuerza F_g se encuentra aplicada a lo largo del centro de masa de la pieza.

En la figura 5 se muestra el modelo tridimensional de la pinza en estudio, con sus respectivos componentes.

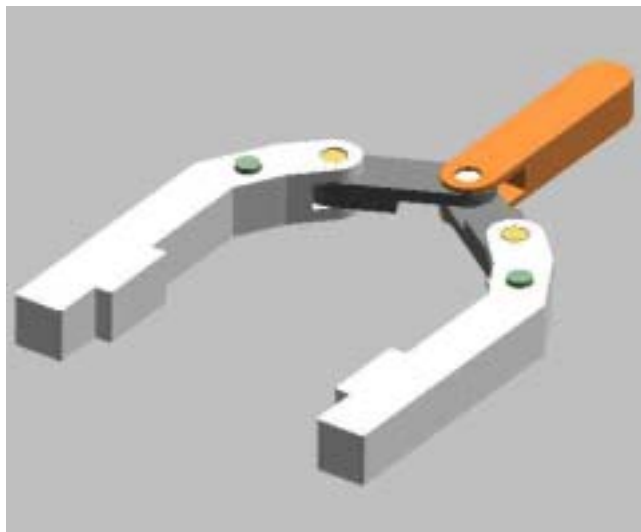


Figura 5. Esquema tridimensional de la pinza

5. SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA EL DEDO DE LA PINZA

5.1. Restricciones del material

Dadas las condiciones de operación y los requerimientos funcionales dados por la aplicación, es necesario establecer las restricciones que estarán asociadas al proceso de selección:

- Se requiere un material con baja dureza para el dedo, con el fin de evitar averías durante la labor de agarre.
- Se requiere un alto coeficiente de fricción entre los materiales del dedo y la pieza con el fin de incrementar la fuerza de agarre entre dicha pieza y la pinza.
- Se requiere que el material del dedo posea una alta tenacidad, para evitar la fractura durante el movimiento de cierre de la pinza.
- Se debe garantizar que durante el proceso de fabricación del dedo la zona que estará en contacto con la pieza de trabajo adquiera una rugosidad adecuada para aumentar la fricción.
- Preferiblemente, seleccionar un material ligero, para minimizar el consumo de energía en la apertura y cierre del dedo.
- Seleccionar, en la medida que se garanticen los requerimientos anteriores, un material económico.

5.2. Análisis dinámico del dedo de la pinza

Analizando la dinámica del dispositivo se pretende encontrar la función objetivo que actuará como el índice de rendimiento en la etapa del diseño. Esta función debe ser la que describa de forma más completa las restricciones de geometría, funcionalidad y requerimientos de material dadas en la aplicación en estudio.

En la figura 6 se muestra claramente el modelo dinámico planteado para el dedo de la pinza. La función objetivo seleccionada ha sido la fuerza F_w que debe proporcionar el actuador de desplazamiento lineal que suministre la entrada de movimiento controlado en el dispositivo.

La figura 6 incluye, además del diagrama de cuerpo libre del dedo, el diagrama de cuerpo libre del conjunto *bielas-juntas rotacionales*, que permiten la transmisión del movimiento entre el actuador y los dedos de la pinza.

Tomando la condición crítica para el deslizamiento, en la cual el factor g tomaría el valor de 3.0, y dos dedos en la pinza, se obtiene la siguiente expresión para la función objetivo del diseño:

$$F_a = 3 \left(\frac{L_1 + L_2}{L_3} \right) \frac{W}{\mu} \quad (\text{Ec.5})$$

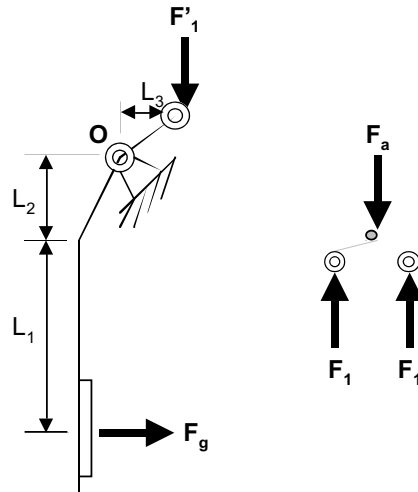


Figura 6. Modelo dinámico del dedo

En la figura 7 se observa una vista en perspectiva isométrica del dedo de la pinza planteado en el diseño:

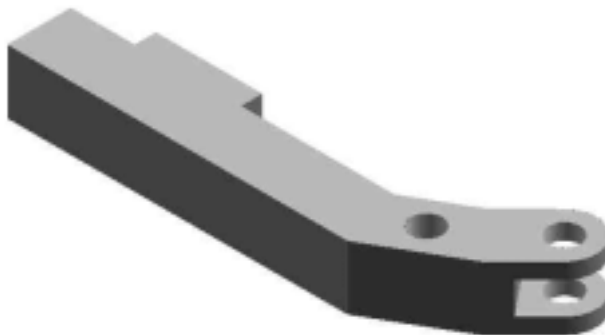


Figura 7. Representación tridimensional del dedo de la pinza de agarre por fricción

5.3. Determinación del índice de selección de material

Para proceder con la selección de materiales se identifican cada uno de los índices correspondientes a la funcionalidad, la geometría y el material de la aplicación correspondiente. Dada la ecuación 6, la identificación de parámetros se desarrolla de la siguiente forma:

$$P\{F_a\} = f_1\{W\}f_2\left\{\frac{L_1 + L_2}{L_3}\right\}f_3\left\{\frac{1}{\mu}\right\} \quad (\text{Ec.6})$$

Luego el índice de selección de material viene dado por:

$$f_3 = \left[\frac{1}{\mu}\right] \quad (\text{Ec.7})$$

Una vez se ha identificado el índice de selección de material es necesario orientar la escogencia hacia su minimización, en vista de que esto mejorará ostensiblemente el parámetro de rendimiento. Para minimizar el índice de la ecuación 7 es necesario maximizar el coeficiente de fricción.

Según lo establecido por la Ley de Coulomb, el coeficiente de fricción depende de los materiales de los elementos estructurales que se encuentran en contacto superficial. No existen cartas de selección Ashby para el coeficiente de fricción, debido a que se necesitaría una carta específica para cada tipo de material, lo que implica una base de datos demasiado extensa.

Sin embargo, existe una aproximación que permite expresar el coeficiente de fricción en función de otros parámetros como la resistencia última a la tracción y la resistencia a la fluencia por compresión del más ligero de los materiales en contacto. Esta aproximación es dada por R. L. Norton [4] y se define de la siguiente forma:

$$\mu = \frac{1}{3} \left(\frac{S_{us}}{S_{yc}} \right) \quad (\text{Ec.8})$$

5.4. Preselección del material

Debido a que las cartas de selección de material disponibles en el *Cambridge Material Selector* no poseen los valores de la resistencia a la fluencia en compresión, se implementó una metodología mixta de selección de materiales.

Dicha metodología consiste en la preselección de dos materiales que cumplieran con la mayoría de las restricciones especificadas en el numeral 5.1, a los cuales se les

calculó, mediante la realización de ensayos de compresión, el valor de la resistencia a la fluencia en compresión.

En la etapa de preselección fueron escogidos dos tipos de materiales para realizar la selección final: Aluminio 6061 y teflón. Influyó notablemente en la selección, además de las restricciones dadas en 5.1, la combinación de ligereza y resistencia en los materiales seleccionados y la consecución de éstos en el mercado local. La composición química del aluminio tomado para la prueba fue caracterizada por J. E. Torres [5] y se muestra en la tabla 1.

Tabla 1
Composición química del aluminio 6061 utilizado para pruebas

Al	98.67	Si	0.381	Fe	0.193	Cu	0.005	Mn	0.008
Mg	0.716	Cr	0.001	Ti	0.210	Zn	0.005	Pb	0.001
Sn	0.001	Li	0.003	B	0.0001	Na	0.0006		

5.5. Determinación experimental de la resistencia a la fluencia en compresión de los materiales preseleccionados

Se procedió a determinar de forma experimental la resistencia a la fluencia por compresión para el aluminio 6061 y el teflón mediante un ensayo de compresión de tipo convencional. Para la realización de dicho ensayo se utilizaron probetas de 15 mm de diámetro para el aluminio y 15.7 mm de diámetro para el teflón, que conservaban la relación 2.5:1 en longitud y diámetro para evitar el efecto de pandeo durante la compresión. Los resultados de los ensayos para la determinación de la resistencia a la fluencia por compresión en cada material se encuentran registrados en las tablas 2 y 3:

Tabla 2
Resultados para el aluminio 6061

Corrida	Carga (Tf)	Resistencia (Mpa)
1	1,12	56,38
2	1,08	54,37
3	1,13	56,88
4	1,12	56,38

Media (Mpa)	Desv. estándar (Mpa)
56,00	1,12

Tabla 3
Resultados para el teflón

Corrida	Carga (Tf)	Resistencia (Mpa)
1	0,16	7,08
2	0,15	6,64
3	0,15	6,64
4		0,15 6,64

Media (Mpa)	Desv. estándar (Mpa)
6,75	0,22

5.6. Etapa de selección final

Primero se desarrolló la selección cuantificando los valores del coeficiente de fricción utilizando los valores promedio de S_{yc} obtenidos en el ensayo de compresión y datos de S_{ut} y S_{us} obtenidos en tablas. Posteriormente se contrastó dicha elección utilizando las cartas de selección Ashby.

En las tablas 4 y 5 se encuentran documentadas las principales propiedades del aluminio 6061 y del teflón PTFE grado 8, tomados de *MatWeb* [6]:

Tabla 4
Valores de las principales propiedades para el aluminio 6061

Propiedad	Valor
Densidad	2700 Kg/m ³
S_{ut}	125 Mpa
E	69000 Mpa

Tabla 5
Valores de las principales propiedades para el PTFE grado 8

Propiedad	Valor
Densidad	2160 Kg/m ³
S_{us}	5 Mpa
E	460 Mpa

Para el cálculo de la resistencia última a corte para el aluminio, se tomó el criterio del máximo esfuerzo cortante, que expresa lo siguiente:

$$S_{us} = 0.577S_{ut} \quad (\text{Ec.9})$$

Reemplazando y realizando los cálculos respectivos en las ecuaciones 6 y 9 se obtienen los resultados tabulados en la tabla 6:

Tabla 6
Valores calculados para los coeficientes de fricción

Material	Coefficiente de Fricción
Aluminio 6061	0,43
PTFE grade 8	0,25

Para validar la escogencia se desarrollará el proceso de selección gráfica mediante las cartas de Ashby disponibles para comparación. La selección de las cartas se hizo con base en las restricciones definidas en 5.1. Se utilizaron las cartas *Strength-Density*, para comparar la relación resistencia - peso de cada uno de los materiales en cuestión, y *Strength – Toughness*, para comparar la relación resistencia – tenacidad [2].

Figura 8. Carta genérica de selección *Strength – Density* [2]

Figura 9. Selección gráfica en la carta *Strength – Density* para metales [2]

Figura 10. Selección gráfica en la carta *Strength – Density* para polímeros [2]

Figura 11. Carta genérica de selección *Strength – Toughness* [2]

Figura 12. Carta de selección *Strength – Toughness* para metales [2]

Figura 13. Carta de selección *Strength – Toughness* para polímeros [2]

Los cálculos de las relaciones desarrollados a partir de las cartas Ashby se presentan en la tabla 7:

Tabla 7
Relaciones de selección calculadas a partir de las cartas Ashby

Relación	MATERIAL	
	Aluminio 6061	PTFE grade 8
Resistencia/Densidad	$4.54 \cdot 10^5 \text{ m}$	$1.44 \cdot 10^5 \text{ m}$
Resistencia/Tenacidad	$12.49 \cdot 10^3 \text{ m}^{-1}$	$3.09 \cdot 10^3 \text{ m}^{-1}$

CONCLUSIONES

En los resultados registrados en la tabla 6 se observa que el aluminio 6061 otorgaría un coeficiente de fricción más alto que el teflón de referencia PTFE grado 8. Como se satisface la condición para minimizar el índice de selección de material, se considera al aluminio como el material óptimo entre los preseleccionados para fabricar los dedos de una pinza de agarre por fricción para un manipulador industrial.

Para soportar dicha selección se evaluaron ciertas relaciones dadas por las restricciones establecidas para el material en la sección 5.1, las cuales deberían ser mayores en el material seleccionado para la aplicación. En la tabla 7 se observa que dichas relaciones en el aluminio 6061 superan en magnitud de 3 a 4 veces las relaciones encontradas para el teflón. Lo anterior ratifica la selección del aluminio para esta aplicación.

La metodología presentada en esta investigación puede ser aplicable a aquellos casos en los cuales el índice de selección del material no se pueda obtener con las propiedades registradas en las cartas de selección Ashby o en las bases de datos disponibles. La secuencia metodológica para la realización del análisis sería:

- Determinar la función objetivo.
- Determinar el índice de selección de material.
- Establecer las restricciones del material.
- Realizar la preselección de los materiales.
- Obtener mediante ensayos y/o fuentes bibliográficas las propiedades no disponibles en las cartas Ashby.
- Soportar la selección tomando relaciones a partir de las restricciones del material.
- Buscar las condiciones óptimas de las relaciones basándose en el material seleccionado.

Una validación posterior para esta técnica puede ser la selección de un material para una aplicación similar pero con una mayor cantidad de materiales y, por ende, realizando una mayor cantidad de pruebas. Esta selección puede estar soportada con la realización de ensayos tecnológicos sobre los prototipos finales.

LISTA DE SÍMBOLOS

P = Índice de rendimiento

F = Índice de funcionalidad

G = Índice de geometría

M = Índice de material

F_g = Fuerza que aplica cada uno de los dedos sobre la pieza

W = Peso de la pieza

n_f = Número de dedos de la pinza

m = Coeficiente de fricción entre el material de la pieza y el material del dedo

g = Factor que tiene en cuenta el efecto combinado de la gravedad y la aceleración

F_a = Fuerza que suministra el actuador

F_l y F'_l = Par de acción y reacción que se produce en el conjunto bielas-juntas rotacionales

S_{ut} = Resistencia última de tracción

S_{us} = Resistencia última a cortante

S_{yc} = Resistencia a la fluencia en compresión

E = Módulo de elasticidad

Referencias

- [1] ASHBY, Michael. *Material selection in mechanical design*, 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1999.
- [2] <http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/tutorial/IE/>
- [3] GROOVER, Mikell; *et al.* *Robótica Industrial: Tecnología, Programación y Aplicaciones*. Madrid, McGraw-Hill, 1989.
- [4] NORTON, Robert L. *Machine Design an integrated approach*. New Jersey, Prentice-Hall, 1996.
- [5] TORRES S, Jaime. Optimización de un procedimiento de soldadura MIG para la aleación de aluminio AA 6061-T6 a través del control del calor suministrado. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia (España), 2001.
- [6] <http://enr.bd.psu.edu/rcv/>