



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

SELECCIÓN DE MATERIALES DE UN
TROQUEL PROGRESIVO PARA UNA
MORDAZA J
(CES-EDUPACK 2017)

Tesis

Que para obtener el título de:

INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

PRESENTA:

ISABEL NOHEMI ZACARIAS SALVADOR

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2018





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO

| | |
|----------------------|-------------------------------------|
| Presidente | Prof. Arámburo Pérez Gerardo |
| Vocal | Prof. Ramírez Vieyra José Guadalupe |
| Secretario | Prof. Ojeda Ramírez Balbina |
| 1er. suplente | Prof. Aranda Villada Víctor Antonio |
| 2do. suplente | Prof. Flores Rosas Clara Saraid |

Lugares donde se desarrolló el trabajo:

Edificio D circuito interior. Ciudad Universitaria. UNAM, 04510
Coyoacán, Ciudad de México

Taller manufacturas R&R ubicado en San Benito mz. 632 lote 11, Col.
Santa Úrsula, Coyoacán, CP. 04600 Ciudad de México.

Asesor del tema:

M. EN C. BALBINA OJEDA RAMÍREZ

Firma

Supervisor del tema:

ARQ. ARTURO RESENDIZ CABALLERO

Firma

Sustentante:

ISABEL NOHEMI ZACARIAS SALVADOR

Firma

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| Índice de figuras | viii |
| Índice de tablas | ix |
| Justificación | 1 |
| Resumen | 2 |
| Introducción | 3 |
| Hipótesis | 5 |
| Objetivos | 5 |
| 1. Marco Teórico | 6 |
| Primera parte. Metodología general del diseño | 6 |
| 1.1 Selección de materiales | 7 |
| 1.1.1 Criterio y herramientas para la selección de materiales | 11 |
| 1.1.1.1 Método tradicional | 11 |
| 1.1.1.2 Mapas de materiales | 12 |
| 1.1.1.3 Método con ayuda de base de datos | 13 |
| 1.1.1.3.1 CES-Edupack | 14 |
| 1.1.2 Índice de desempeño de un material | 19 |
| Segunda parte. Troqueles y troquelado | 21 |
| 1.2 Conformado en frío de la chapa metálica | 21 |
| 1.2.1 Tipos de troqueles | 22 |
| 1.2.1.1 Elementos de un troquel progresivo | 25 |
| 1.2.2 Fuerzas ejercidas en un troquel | 31 |
| 1.2.2.1 Fuerza de corte | 32 |
| 1.2.2.2 Fuerza de doblado | 33 |
| 1.2.2.3 Resistencia de los punzones al pandeo | 34 |
| 1.2.3 Problemas que afectan el proceso de fabricación | 35 |
| 1.2.3.1 Diseño de la matriz progresiva | 36 |
| 1.2.3.2 Prensa | 36 |
| 1.2.3.3 Materia prima | 37 |
| 1.2.3.4 Tipo de transformación | 37 |

| | |
|--|-----------|
| 1.2.3.4.1 Corte | 37 |
| 1.2.3.4.2 Doblado | 37 |
| 1.2.3.5 Geometría de la pieza | 38 |
| 1.2.3.6 Mantenimiento deficiente | 38 |
| Tercera parte. Materiales generalmente utilizados..... | 39 |
| 1.3 Aceros para herramientas | 39 |
| 2. Desarrollo del proyecto | 41 |
| 2.1 Metodología | 41 |
| 2.2 FUNCIÓN | 43 |
| 2.2.1 Pieza a troquelar | 43 |
| 2.2.2 Troquel progresivo | 44 |
| 2.3 RESTRICCIONES | 45 |
| 2.3.1 Propiedades que debe cumplir el material | 46 |
| 2.3.2 Como se fabrica un troquel | 46 |
| 2.3.3 Perfil ambiental del proceso de troquelado | 47 |
| 2.3.4 Distribución de procesos | 47 |
| 2.3.4.1 Elementos de acción directa..... | 48 |
| 2.3.4.2 Elementos auxiliares | 48 |
| 2.3.4.3 Elementos de soporte | 49 |
| 2.4 OBJETIVO | 49 |
| 2.4.1 Índice de desempeño. | 49 |
| 3. Resultados y análisis de resultados..... | 52 |
| 3.1 Selección de materiales por el método tradicional | 52 |
| 3.2 Selección de materiales aplicando el método de Ashby en el software CES-Edupack..... | 55 |
| 4. Conclusiones | 74 |
| 5. Bibliografía | 75 |
| Apéndice I | 78 |
| Apéndice II..... | 79 |
| Apéndice III | 84 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Etapas del procesamiento de diseño | 7 |
| Figura 2. Universo de los materiales | 8 |
| Figura 3. Estructura jerárquica para la clasificación de materiales, que termina con un registro..... | 9 |
| Figura 4. Mapa de materiales (módulo de Young vs densidad). | 13 |
| Figura 5. Metodología Ashby para optimizar la etapa de diseño | 20 |
| Figura 6. Troqueladora de carrera variable 60 TON (Taller de manufacturas R&R) | 22 |
| Figura 7. Matriz simple (de una estación o un paso) | 23 |
| Figura 8. Matriz compuesta (de dos o tres estaciones o pasos) | 24 |
| Figura 9. Matriz progresiva..... | 25 |
| Figura 10. Elementos de un troquel progresivo. | 26 |
| Figura 11. Clasificación de los aceros para herramientas AISI. | 40 |
| Figura 12. Mordaza J. (Taller de manufacturas R&R) | 43 |
| Figura 13. Diseño de la Mordaza J. (Taller de manufacturas R&R) | 44 |
| Figura 14. Troquel progresivo para una mordaza J. (Taller de manufacturas R&R) | 45 |
| Figura 15. Elementos de acción directa | 48 |
| Figura 16. Elementos de soporte | 49 |
| Figura 17. Mapa de materiales con la pendiente que minimiza la masa y maximiza el módulo de Young (Módulo de Young vs densidad). | 56 |
| Figura 18. Mapa de materiales con un límite en el módulo de Young (Módulo de Young vs densidad). | 57 |
| Figura 19. Mapa de materiales con un límite en la densidad (Módulo de Young vs densidad). | 58 |
| Figura 20. Diagrama booleano del comportamiento frente a solventes orgánicos. | 59 |
| Figura 21. Mapa de materiales con un límite en el comportamiento frente a solventes orgánicos. (Módulo de Young vs densidad). | 59 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 22. Diagrama booleano del conformado en frío. | 60 |
| Figura 23. Mapa de materiales con un límite que no pueden ser deformados en frío. (Módulo de Young vs densidad). | 61 |
| Figura 24. Diagrama de barras del precio de los materiales (MXN/Kg)... .. | 62 |
| Figura 25. Diagrama de barras del precio de los materiales (MXN/Kg) con un límite de costo | 63 |
| Figura 26. Mapa de materiales con un límite de precio. (Módulo de Young vs densidad) | 64 |
| Figura 27. Diagrama de barras del precio de los materiales (MXN/Kg) con un límite de precio. | 65 |
| Figura 28. Mapa de materiales con un límite de precio. (Módulo de Young vs densidad) | 65 |
| Figura 29. Diagrama de barras de la dureza Vickers (HV) de los materiales (MXN/Kg) con un límite de costo. | 66 |
| Figura 30. Mapa de materiales con un límite de dureza. (Módulo de Young vs densidad) | 67 |
| Figura 31. Diagrama de barras del esfuerzo de fatiga 10⁷ ciclos (MPa)... | 68 |
| Figura 32. Mapa de materiales con un límite de dureza. (Módulo de Young vs densidad) | 69 |
| Figura 33. Mapa de materiales con un límite de disponibilidad. (Módulo de Young vs densidad) | 70 |
| Figura 34. Diagrama de barras de precio (MXN/Kg) tomando en cuenta el acero AISI 4140. | 71 |
| Figura 35. Diagrama de barras de precio (MXN/Kg) de los resultados de la selección. | 72 |
| Figura 36 Diagrama de barras del coeficiente de expansión térmica ($\mu\text{strain}/^{\circ}\text{C}$) de los resultados de la selección. | 73 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Propiedades y comportamientos considerados en la selección de materiales..... | 10 |
| Tabla 2. Condiciones límite para seleccionar un material | 19 |
| Tabla 3. Materiales utilizados en el taller de manufactura R&R y la consultada en la bibliografía | 52 |
| Tabla 4. Dureza de las piezas con tratamiento térmico de temple y revenido, para la producción de la matriz de un troquel | 53 |
| Tabla 5. Método de Ashby aplicado a la selección de materiales del troquel progresivo..... | 55 |
| Tabla 6. Resultados de la selección (28 materiales) | 68 |
| Tabla 7. Proveedores y aceros vendidos en México..... | 70 |
| Tabla 8. Resultados de la selección y propiedades a considerar. | 74 |

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad existe una gran cantidad de materiales que pueden ser aplicados a la ingeniería. Un diseñador con experiencia, puede seleccionar al material que más se adecue a sus necesidades. Sin embargo, una empresa emplea el mismo material porque ya está probado, lo cual se debe principalmente a cuestiones económicas o de accesibilidad, esto puede hacernos caer en el error de no innovar o buscar nuevos materiales que a la larga abaraten un producto y mejoren la eficiencia de un componente.

El estudio de los materiales se enfoca principalmente a las propiedades de estos, sin embargo no se toma en cuenta el diseño de la herramienta. Es por ello que desde hace algunos años, la enseñanza de la ingeniería tiende a destacar los factores que intervienen en el diseño. Se pueden diseñar nuevos materiales con combinaciones únicas de propiedades. Alternativamente, el diseño puede involucrar la selección de un nuevo material que tiene mejores propiedades. [1]

RESUMEN

El diseño de un producto ingenieril es una actividad compleja ya que es multidisciplinaria y está enfocada a la solución de problemas. El uso de herramientas como lo es el CES Edupack hace que la etapa de selección de materiales sea más rápida y eficiente. Sin embargo requiere tener conocimientos de los requerimientos del producto. El presente trabajo describe la selección de material para un troquel progresivo de una mordaza J calibre 14 (0.075 in) que en las condiciones de trabajo adecuadas, se deben fabricar 10,000 piezas diarias con una vida de 1, 000,000 de piezas antes de ser reparado o remplazado.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene por objeto el estudio particular de la selección de materiales de un troquel progresivo cuidadosamente analizado, de manera que se verá el procedimiento y razonamiento involucrado en el proceso de toma de decisiones.

El diseño de un producto es multidisciplinario, es decir, un esfuerzo combinado de un equipo compuesto de profesionales de las disciplinas de ingeniería pertinentes, los cuales evalúan críticamente la conformidad del producto con los requerimientos del diseño.

Con base a lo anterior la resolución de problemas de diseño en ingeniería es todo un proceso; el cual comienza con el análisis de las necesidades, en donde se obtienen especificaciones preliminares y en donde el mayor trabajo consiste en formular preguntas, ¿Cuál es su geometría?, ¿Está sometido a cargas? Si es así, ¿qué cargas, de qué magnitud y en qué puntos actúan sobre él?, ¿Qué tipos de esfuerzos inducen dichas cargas?, ¿Qué material se empleará para construirlo?, ¿Cómo se relaciona la resistencia del material con los esfuerzos inducidos? , ¿Cómo se fabricará dicho elemento? entre otras.

Para ello se debe identificar el factor de diseño, el cual es alguna característica o consideración que influye en el diseño de un elemento, o quizá, en todo el sistema, por lo general se tiene que tomar alguno de esos factores en caso un de diseño determinado. En

ocasiones alguno de esos factores será crítico y si se satisfacen sus condiciones, ya no será necesario considerar los demás.

El troquelado es un proceso que consta de diferentes etapas que van desde el diseño de la secuencia de trabajo a la configuración, construcción y puesta a punto del propio troquel; todas ellas implican precisión y exactitud. Los fabricantes cuidan meticulosamente la creación de cada troquel como piezas únicas e irrepetibles. Cada uno de ellos es construido tomando en cuenta el trabajo que va a realizar, las características de la prensa, el material a troquelar y el número de piezas a producir.

El diseño de máquinas se interesa fundamentalmente por los materiales sólidos que realizan funciones estructurales (soportar adecuadamente las tensiones y experimentar deformaciones controladas), funciones de guiado (deslizamiento y adherencia, resistencia a la abrasión) y otras funciones (contención de líquidos, protección de aspectos estéticos y relación con el usuario).

El software Ces- Edupack es una herramienta que permite realizar un análisis gráfico de la selección de materiales. Esta herramienta obtiene los datos de los materiales ahorrando tiempo, proporciona una base de datos completa de materiales e información de procesos, y una variedad de recursos de apoyo como son: libros de texto, conferencias, proyectos y ejercicios.

HIPÓTESIS

Mediante el uso del software CES- Edupack, de la información competente y del proceso (parámetros de operación, requerimientos y propiedades) se podrá seleccionar el material idóneo para la elaboración de un troquel progresivo y esta selección permitirá obtener materiales con propiedades mecánicas adecuadas a menores costos.

OBJETIVOS

- Identificar y conocer los parámetros de operación.
- Realizar un análisis de los requerimientos para la selección de materiales.
- Aprender el uso de herramientas informáticas, específicamente para la selección de materiales.

1. MARCO TEÓRICO

PRIMERA PARTE. METODOLOGÍA GENERAL DEL DISEÑO

La selección de materiales para las distintas piezas o componentes de un conjunto mecánico es una de las decisiones centrales del proceso de diseño de una máquina. El conjunto de etapas previas a la selección comprenden:

- **Aclaración de la necesidad.** Implica analizar y enunciar el problema con claridad.
- **Diseño conceptual.** Generar posibles soluciones, planes o métodos para resolver el problema
- **Diseño en formulación.** Se formulan y evalúan con mayor detalle las dos o tres soluciones o planes conceptuales seleccionados.
- **Diseño en detalle.** Considera el gran número de pequeños pero importantes detalles que la elaboración o fabricación del producto o componente.
- **Manufactura / montaje**

La figura 1 muestra un resumen de las actividades completas que llevan a la selección del material más adecuado. [2]

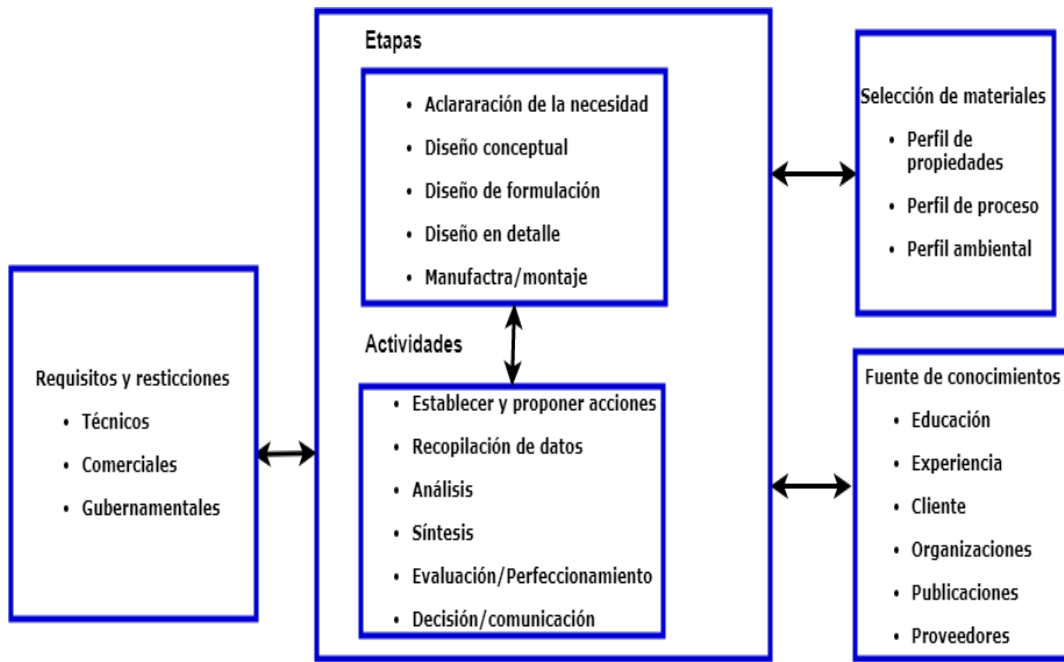


Figura 1. Etapas del procesamiento de diseño [2]

1.1 SELECCIÓN DE MATERIALES

Para elegir y utilizar los materiales adecuados, los ingenieros necesitan métodos, para seleccionar en el amplio universo de los materiales y procesos, que cumplan los requisitos de diseño. Y por supuesto, necesitan sentido común; es decir la capacidad de utilizar la experiencia y el conocimiento del mundo en general, para reconocer las opciones inspiradas y rechazar aquellas que no son prácticas. [3]

El "universo" de los materiales es el punto de partida, en la figura 2 se muestran las familias de polímeros, metales, cerámicas, vidrios, materiales naturales y los híbridos que pueden ser sintetizados combinando las familias anteriores. [3]

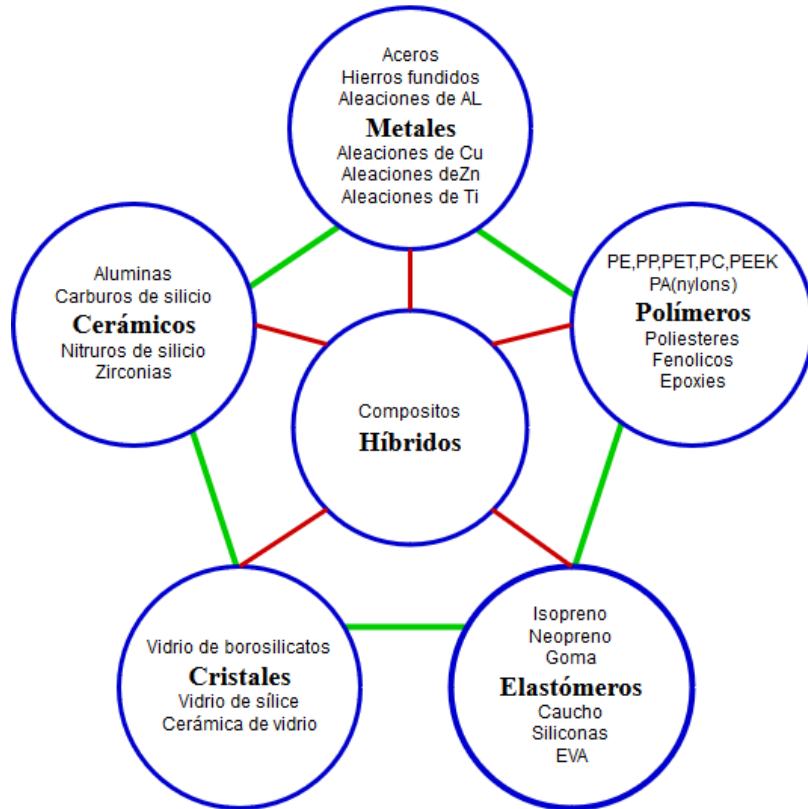


Figura 2. Universo de los materiales [3]

La figura 3 sugiere una organización jerárquica de la población de materiales, cada familia abarca clases, subclases y miembros. Cada uno se caracteriza por un conjunto de atributos que incluyen sus propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, ópticas y químicas, sus características de procesamiento, su costo y disponibilidad y las consecuencias ambientales de su uso. Una adecuada selección de

materiales y procesos garantiza a los diseñadores de partes mecánicas su correcto funcionamiento (performance) de los componentes diseñados. [5]

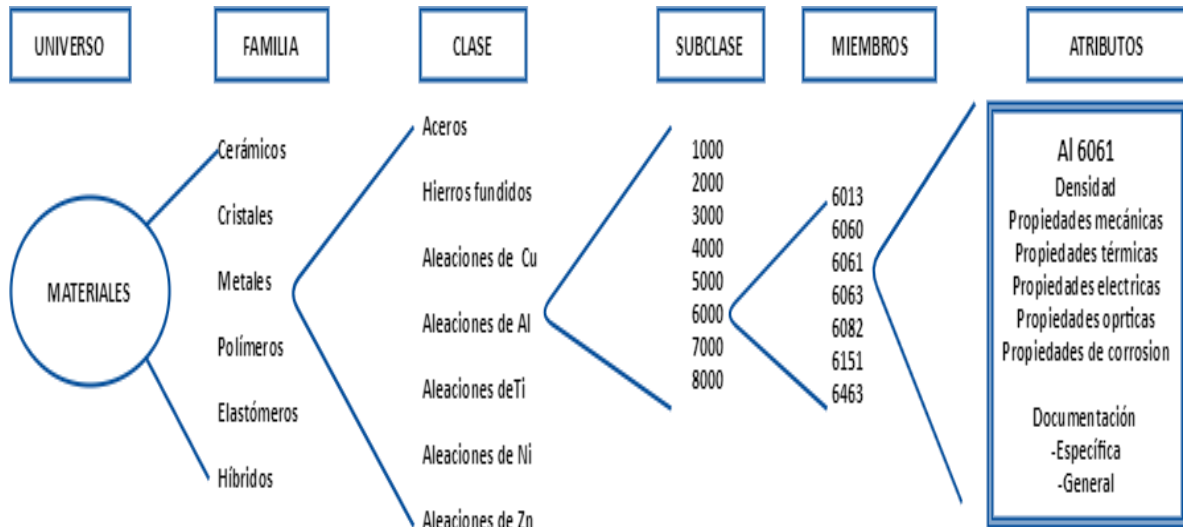


Figura 3. Estructura jerárquica para la clasificación de materiales, que termina con un registro. [3]

Una vez que se tiene el diseño, el ingeniero debe cumplir con los requisitos para seleccionar el material, así como el proceso para obtenerlo completamente terminado.

Los métodos para la selección de materiales consideran una serie de propiedades entre físicas, mecánicas, térmicas, eléctricas así como comportamientos del material, que determinan la utilidad técnica del mismo. Algunas de estas propiedades y comportamientos se muestran en la tabla 1. [3]

Tabla 1. Propiedades y comportamientos considerados en la selección de materiales. [2]

| Propiedades insensibles a la microestructura | Propiedades sensibles a la microestructura |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Densidad • Módulo de elasticidad, E • Conductividad térmica • Coeficiente de expansión térmica lineal • Punto de fusión, Tf • Velocidad de corrosión uniforme, mm/año • Costo por unidad de masa | <ul style="list-style-type: none"> • Resistencia (a la fluencia, a la tracción, última, etc.) • Tenacidad a la fractura, K_{ic} • Resistencia a la fatiga y propiedades cíclicas, fatiga por corrosión • Resistencia a la termofluencia • Energía de impacto • Dureza |
| Comportamientos | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Facilidad de colado • Facilidad para tratar térmicamente • Conformabilidad • Maquinabilidad • Soldabilidad • Ductilidad | |

Debido a que la cantidad de propiedades que afectan a la selección de materiales es extensa, ésta se hace de acuerdo con las propiedades determinadas por el componente a diseñar y sustentados con criterios como disponibilidad, facilidad de obtención, vida de servicio, factores ambientales y costos, entre otros. De esta forma se llega a la selección de un único tipo de material, el cual debe resultar el más apropiado para la aplicación. La tarea de selección es la de combinar la elección del material con los requisitos del diseño. [3]

Para la utilización de cualquiera de los métodos de selección de materiales existentes, se debe partir de la etapa conceptual, en la

cual se identifica una categoría o categorías muy amplias como posibles materiales a usar.

1.1.1 Criterio y herramientas para la selección de materiales

Los materiales a veces se eligen por ensayo y error o simplemente sobre la base de lo que se ha utilizado anteriormente. Si bien este enfoque funciona con frecuencia, no siempre conduce a la optimización o la innovación. El uso de las computadoras ha revolucionado el proceso de diseño. Hoy en día es posible generar bases de datos de propiedades, que permitan la recuperación instantánea y a su vez pueden integrarse en el proceso de diseño.

La mayoría de los métodos parte de la disponibilidad de una amplia variedad de materiales, para lo cual se centran en analizar las propiedades que exige el componente a diseñar y fabricar se necesita cumplir con los criterios generales de la selección de materiales a decir: el perfil de propiedades, el perfil de proceso y el perfil ambiental. [6]

1.1.1.1 Método tradicional.

Este método se realiza la selección del material adecuado para un uso determinado basándose en modelos aplicados con anterioridad y que funcionan correctamente. Con este el ingeniero de materiales escoge el material que cree más adecuado, con base en la experiencia de partes que tienen un funcionamiento similar y que han mostrado

buenos resultados. El método mantiene buena aceptación debido a lo siguiente:

- El ingeniero se siente seguro con un material usado y ensayado.
- En algunos casos esto contribuye a la estandarización del stock.
- Las características de proceso son bien conocidas.
- La disponibilidad del material está asegurada.

Sin embargo, el uso de este método, en ocasiones conduce a serios problemas, ya que no se hace un estudio real del ambiente de trabajo del componente o equipo, el cual puede ser decisivo a la hora de escoger el material.

1.1.1.2 Mapas de materiales

Este método se apoya en gráficas (conocidas como mapas de materiales), en las que se relacionan por pares ciertas propiedades de los materiales. El método fue diseñado exclusivamente para ser utilizado durante la etapa conceptual de la selección de materiales. En estos mapas se puede hacer una aproximación del material más adecuado (perteneciente a una determinada familia de materiales), con base en la relación de las propiedades más importantes que debe cumplir el componente. Como ejemplo de un par de propiedades que relacionan en estos mapas están el módulo de elasticidad en función de la densidad, como se muestra en la figura 4.

Como es de esperarse, rara vez el comportamiento de un componente depende sólo de una propiedad. De igual manera, diagramas como los

de Ashby [6], muestran que las propiedades de las diferentes clases de materiales pueden variar en amplios intervalos (dependiendo del estado de estos), formando grupos que se ubican en áreas cerradas, zonas o campos en tales diagramas. Eso significa que una misma familia de materiales puede tener una apreciable variación en sus propiedades, generando un campo o zona en los mapas. En estos mapas se relacionan entre otras, propiedades como resistencia, módulo de Young, densidad, tenacidad, conductividad térmica, costos, etc.

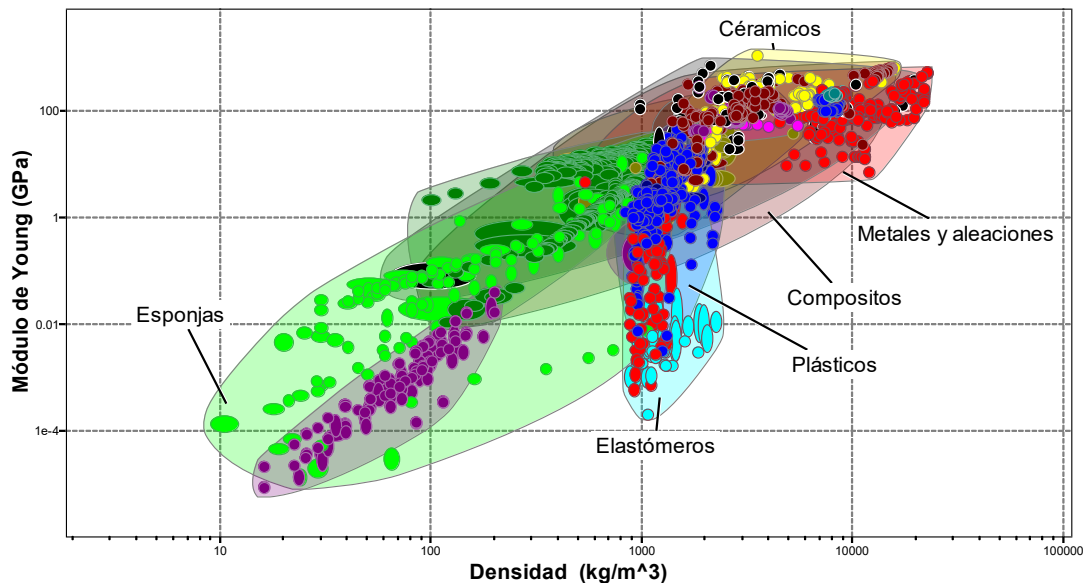


Figura 4. Mapa de materiales (módulo de Young vs densidad).

1.1.1.3 Método con ayuda de bases de datos.

En Internet existe una amplia gama de bases de datos [7] sobre materiales, que han sido construidas para comercialización libre o son distribuidas por vendedores de materiales. Estas son el resultado

de investigaciones en ensayos de materiales. Y se dividen básicamente en dos categorías, numéricas y literarias o de referencias bibliográficas. Dentro de las más importantes están el banco de datos de la ASTM (American Society for Testing and Materials), la SAE (Society of Automotive Engineers), la ASM (American Society for Metals), la AISI (American Iron and Steel Institute), la NASA (National Aeronautics and Space Administration), etc. Una base de datos pública que ha adquirido gran importancia por la cantidad de datos y variedad de materiales que maneja puede ser consultada en la página web www.matweb.com. La selección de materiales con ayuda de éstas bases de datos parte del conocimiento de las principales propiedades que deben tener para un fin específico. El programa pide entonces el valor aproximado de las propiedades que debe cumplir el componente y lista uno o varios materiales que pueden servir. Son varias las fuentes donde se compilan bases de datos. [8]

1.1.1.3.1 CES-Edupack

CES-EduPack es un software de selección de materiales con el cual se encuentra en su amplia base de datos aquel material o proceso que se adapta mejor a determinadas exigencias y condiciones.

El CES-EduPack fue fundado en el trabajo pionero del conocido educador de materiales Profesor Michael Ashby, trabajando con colegas de la Universidad de Cambridge y de todo el mundo. Se ha desarrollado durante más de veinte años trabajando estrechamente con la red global de usuarios y colaboradores del CES-EduPack, y a

través del trabajo del equipo CES EduPack con sede en Granta. En Cambridge, Reino Unido, ideó y sistematizó una metodología para la selección de materiales. [9]

Este software ayuda a combinar la experiencia ingenieril con información de otras fuentes de referencia de confianza. Está basado tanto en contribuciones de consorcios industriales como en la inigualable experiencia de Granta (organización más grande a nivel mundial dedicada únicamente a la tecnología de información sobre materiales), y en la implementación de tecnología de información de materiales en entornos de ingeniería reales. [9]

El objetivo de éste, es analizar datos de materiales, creando una valiosa información que puede ser aplicada posteriormente a la toma de mejores decisiones sobre materiales en todas las áreas de actividad de la empresa, como optimización del rendimiento, costo del producto, solución de problemas regulatorios u otros problemas estratégicos. La principales funciones se enlistan a continuación: [9]

- Realizar decisiones correctas sobre materiales desde las primeras fases de desarrollo del producto.
- Aumentar la confianza en las decisiones y generar nuevas ideas.
- Seleccionar utilizando un método probado verificable y repetible.
- Obtener acceso rápido a datos de materiales confiables, ahorrando tiempo.
- Aplicar estudios de casos industriales reales.

- Fomentar el aprendizaje interdisciplinario, la comunicación y el intercambio de recursos.

Más de 800 universidades de todo el mundo utilizan este programa, aunque no sólo son exclusivas para éstas ya que gran cantidad de empresas y entidades mundialmente conocidas también se han beneficiado de sus servicios, algunas de ellas tan importantes como: Ferrari, Renault F1, Intel, NASA, etc.

Es una herramienta con un gran potencial. En su base de datos podemos encontrar hasta más de 3000 materiales diferentes, más de 200 procesos, **todo tipo de datos técnicos, "notas científicas"** e información completa e ilustrativa de todos estos materiales y procesos. [9]

NIVEL 1 (Iniciación)

En este nivel se pueden encontrar 67 materiales diferentes, los más utilizados de entre las distintas familias son: metales y aleaciones, cerámicas (técnicas y no técnicas), polímeros, elastómeros, espumas, compuestos, vidrios y materiales naturales. [9]

Dispone de 77 procesos diferentes, los más utilizados son: conformado mecánico, tratamiento superficial y unión.

En cuanto al contenido de este nivel, se puede encontrar una descripción detallada del material o proceso, una imagen, un producto familiar, usos típicos y datos técnicos básicos para propiedades generales, mecánicas, térmicas, eléctricas, etc. [9]

NIVEL 2 (Intermedio)

En este nivel se pueden encontrar 98 materiales y 109 procesos, los más utilizados, más algunos otros no tan comunes, se encuentran las mismas familias que en el nivel anterior, sin embargo la información es complementada con datos numéricos, propiedades, pautas de diseño y notas técnicas. [9]

NIVEL 3 (Avanzado)

Se trata del nivel más complejo de todos, en él se pueden encontrar 3968 materiales y 230 procesos diferentes, todos ellos de uso avanzado, utilizado en campos como la aeronáutica, arquitectura e ingeniería civil, bio-materiales, etc.

La selección de materiales en Ces-Edupack se puede realizar mediante las etapas Graph, limit o Tree, o en una combinación de las anteriores. [9]

Etapas gráficas (Graph)

Consiste en una selección del material o proceso mediante la gestión de los datos que muestra una gráfica determinada. Antes de generar una gráfica se deben especificar dos atributos uno para el eje de las ordenadas y otro para el de las abscisas. En función de los atributos que se hayan seleccionado pueden aparecer distintos tipos de gráficas como: el diagrama de burbujas, el diagrama Booleano, el diagrama de barras y el diagrama de rangos.

Etapas límite (limit)

Contiene diagramas como en la etapa anterior, el método de selección es diferente pero ambas comparten algo en común, los atributos. En la etapa Graph se fijaban estos a los ejes de coordenadas para generar una gráfica en esta etapa se dispone de los mismos atributos que en la etapa anterior pero esta vez el usuario debe dar un valor. [9]

El método de aplicación de esta etapa consiste en asignar un rango de valores a aquellos parámetros que van a intervenir en nuestra selección, por lo tanto es importante saber el orden dimensional en el que se mueven los parámetros que van a intervenir en la selección. [9]

Etapas árbol (Tree)

Es una etapa complemento de las dos anteriores. Funciona a modo de filtro y con tan solo esta no se pueden realizar selecciones. Esta etapa se encarga de extraer de la base de datos aquello que el usuario desee. [9]

Combinación de las tres diferentes etapas

Se puede ser más preciso a la hora de realizar la selección si se conoce perfectamente la función de cada una de las etapas y se es capaz de interpretar cuáles pueden ser las más útiles cuando se nos presenta un problema. [9]

1.1.2 Índice de desempeño de un material

Cualquier componente de ingeniería tiene una o más funciones: soportar una carga, contener una presión, transmitir calor, etc. Al diseñar el componente, el diseñador tiene un objetivo: hacerlo lo más barato posible, tal vez, o como ligero, o como seguro, o tal vez una combinación de estos.

Esto debe lograrse sujeto a restricciones: que ciertas dimensiones son fijas, que el componente debe soportar la carga o presión sin falla, que puede funcionar en un cierto rango de temperatura y en un ambiente dado, y muchas más.

La función, el objetivo y las restricciones (Tabla 2) definen las condiciones límite para seleccionar un material y, en el caso de los componentes que soportan carga, una forma para su sección transversal. [3]

Tabla 2. Condiciones límite para seleccionar un material

| | |
|---------------|---|
| Función | "¿Qué hace el componente?" |
| Objetivo | "¿Qué se maximiza o se minimiza?" |
| Restricciones | "¿Qué condiciones no negociables deben cumplirse?" "¿Qué condiciones negociables pero deseables...?" |

En base a esta metodología, debe determinarse un Índice de desempeño de un material (Objetivo), que puede permitir la optimización del proceso de diseño de un componente dado. Dicho parámetro o índice de desempeño dependerá de la forma del

componente, de la función y de las exigencias físicas a las cuales se encuentre sometido y del material del cual se encuentre constituido (Figura 5). [6] Esta función se expresa bajo la siguiente notación:

$$D = f (F, G, M) \dots \dots \dots (1)$$

F = Exigencias funcionales

G= Exigencias geométricas

M= Propiedades de los materiales

Esta función se puede construir de una composición de funciones:

$$D = f_1 (F) * f_2 (G) * f_3 (M) \dots \dots \dots (2)$$

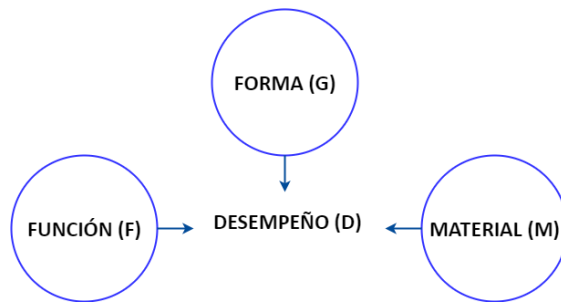


Figura 5. Metodología Ashby para optimizar la etapa de diseño [6]

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 desempeño se busca minimizar la expresión que representa el índice del material,

manteniendo los demás índices constantes. Una vez que se ha identificado el índice de material se procede a realizar la selección. [6]

SEGUNDA PARTE. TROQUELES Y TROQUELADO

1.2 Conformado en frío de la chapa metálica

El conformado en frío o estampado de la chapa metálica abarca, una serie de procesos productivos de gran importancia dentro de la industria, ya que permite obtener elementos más ligeros, resistentes y económicos que los resultantes de otros procesos, como fundición, forja, etc., por lo que se emplean en una gran variedad de sectores tales como: automotriz, aeronáutica, electrónica, etc. Se define como el conjunto de operaciones con las cuáles, sin producir virutas, se somete una chapa plana a una o más transformaciones, con el fin de obtener una pieza que tenga una forma geométrica propia, sea ésta plana o hueca. En otros términos, la chapa es sometida a una deformación plástica. [10]

La transformación de la lámina se realiza mediante herramientas especiales denominadas troqueles o matrices, anclados con fuerza sobre prensas de gran precisión y velocidad (Troqueladora, figura 6). El objeto de este proceso es poner en marcha una estrategia de producir más y mejor, en la que influyen factores relacionados con la máquina, los troqueles, el material, la producción y las características geométricas de la pieza. [10]



Figura 6. Troqueladora de carrera variable 60 TON (Taller de manufacturas R&R)

1.2.1 Tipos de troqueles

Para fabricar grandes series de piezas de chapa existen tres alternativas principales:

- **Matriz simple (de una estación o un paso).**

Es una matriz que ejecuta una sola fase de todo un proceso productivo, por lo que si hay varias fases, tendrá que haber tantas matrices simples como operaciones a realizar. Se utilizan para fabricar piezas sencillas como arandelas, accesorios y pequeñas partes para electrodomésticos (Figura 7). [11]

Ventajas:

1. Fácil diseño.
2. Baja inversión económica.
3. Posibilidad de reutilización de la matriz.

Inconvenientes:

1. Difícil automatización del proceso.
2. Mayor mano de obra.
3. Necesidad de varias matrices simples.
4. Necesidad de varias prensas.
5. Costo de la pieza elevado.
6. Menor producción

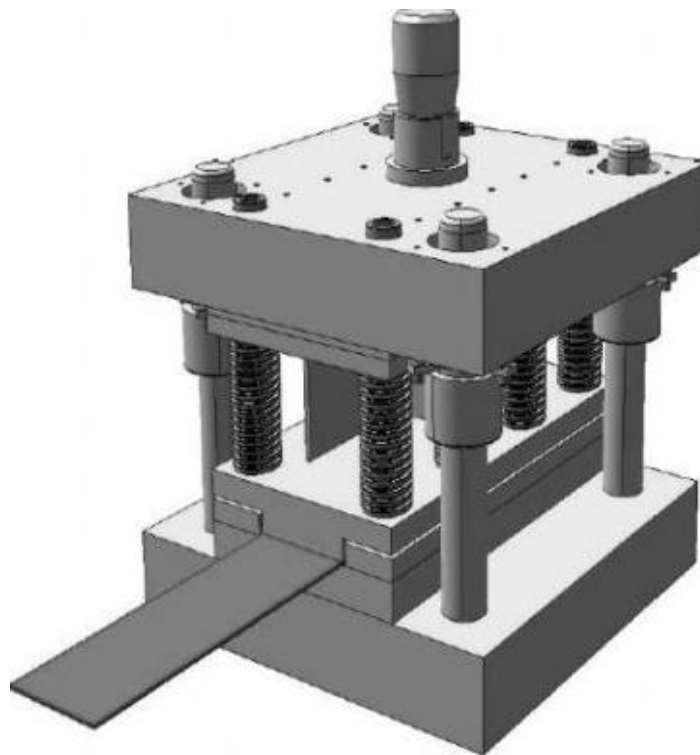


Figura 7. Matriz simple (de una estación o un paso).

- **Matriz compuesta (de dos o tres estaciones o pasos)**

Son herramientas que permiten aprovechar la fuerza ejercida por la prensa realizando dos o más operaciones en cada golpe y agilizando el proceso. Generan mayor productividad y se utilizan para conformar los lavaplatos, utensilios, recipientes, **partes de estufas...etc.** (Figura 8). [11]

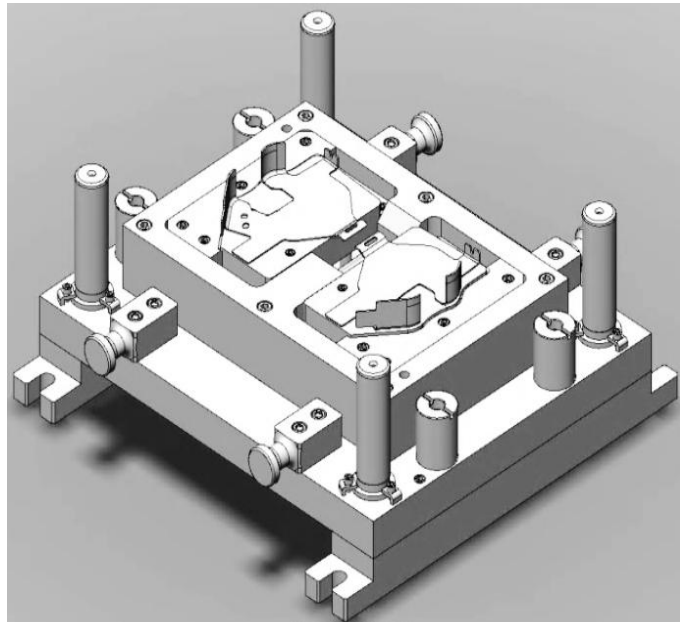


Figura 8. Matriz compuesta (de dos o tres estaciones o pasos).

- **Matriz progresiva.**

Matriz concebida para ejecutar automáticamente y simultáneamente las diferentes fases de un proceso. La fabricación de piezas mediante estas matrices se efectúa a partir de una tira de material continúa, que entra por un costado de la matriz y va avanzando por el interior; y, simultáneamente, se van ejecutando las distintas fases del proceso hasta obtener la pieza final (Figura 9). [11]

Ventajas:

1. Fácil automatización del proceso de fabricación.
2. Reducción de la mano de obra.
3. Utilización de una sola matriz.
4. Utilización de una sola prensa.
5. Mayor producción.
6. Costo de la pieza bajo.
7. Mayor aprovechamiento del material.

Inconvenientes:

1. Mayor complejidad en el diseño
2. Costo elevado.

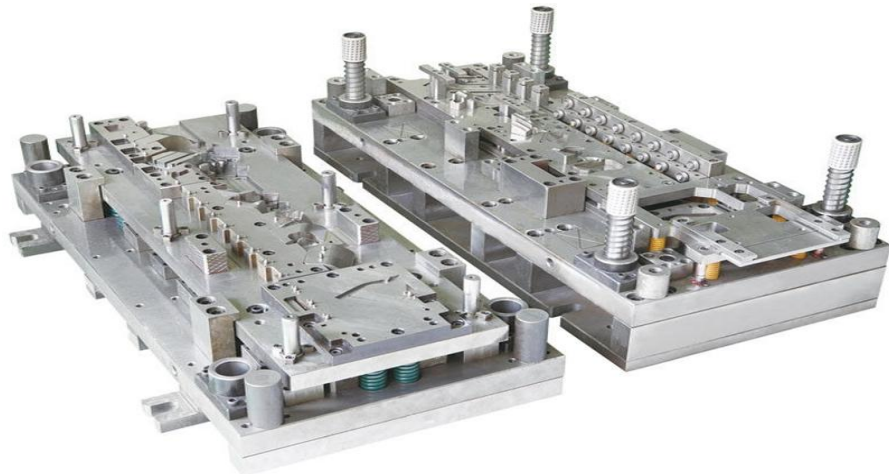


Figura 9. Matriz progresiva.

1.2.1.1 Elementos de un troquel progresivo

Los troqueles cuentan con una serie de elementos constructivos que cumplen con una misión específica dentro del conjunto general del

trabajo para el cual han sido fabricados. Estos componentes, por sus características mecánicas, deben estar cuidadosamente diseñados para lograr el objetivo de producir piezas sin ningún defecto. [12]

A continuación se describen partes que están en las matrices progresivas independientemente de su tamaño (Figura 10).

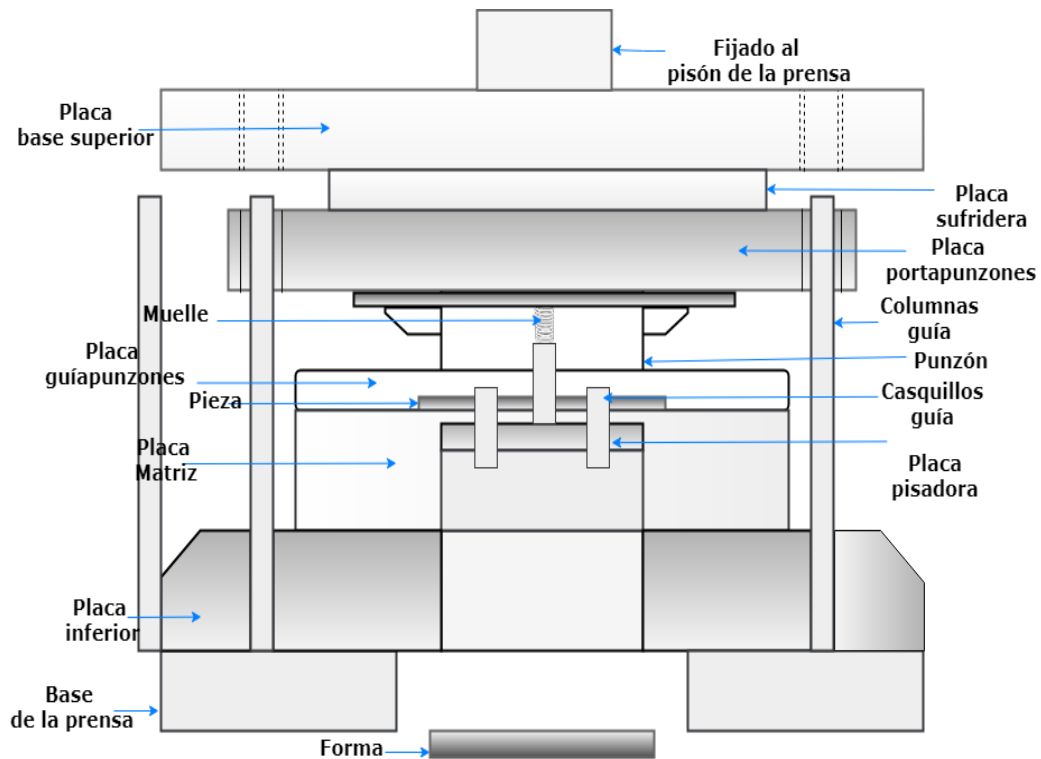


Figura 10. Elementos de un troquel progresivo.

- **Placa matriz**

La placa matriz, junto con los punzones, es la parte más importante de un utillaje. Está provista de una serie de agujeros cuya forma y situación sobre la placa se corresponden con la de los punzones. [12]

- **Placa inferior**

La placa base inferior tiene la misión de soportar el utillaje, apoyarlo sobre la mesa de la prensa y absorber los esfuerzos que se producen sobre la matriz durante el proceso de trabajo. [13]

- **Guías de banda**

Las guías de banda consisten en dos reglas prismáticas, van enclavijadas paralelas entre sí con la finalidad de guiar longitudinal y transversalmente la tira de chapa en su desplazamiento por el interior de la matriz. [13]

- **Placa sufridera**

La placa sufridera se utiliza como apoyo para evitar el recalado o clavado de los punzones en la placa base superior, absorbiendo sobre su superficie los sucesivos impactos que recibe de los elementos que golpean sobre ella. Estos impactos se producen cada vez que los punzones cortan o doblan la chapa. [13]

- **Placa base superior**

La placa base superior constituye el soporte sobre el cual van enclavijados mediante tornillos y pasadores, formando un único bloque, todos los elementos de la parte móvil del utillaje. Lleva un

agujero roscado para sujetar el utillaje, mediante un vástago, al cabezal de la prensa. [13]

- **Placa guíapunzones**

La placa guíapunzones está guiada mediante casquillos y columnas y sirve de soporte a la placa pisadora y a los componentes del sistema elástico de pisado. También tiene la función de guiar los punzones durante su recorrido y evitar su pandeo. [13]

- **Placa pisadora**

La placa pisadora tiene la función de guiar los punzones y facilitar la extracción de la chapa, así como la de mantener la chapa plana y sujeta durante su transformación. [13]

- **Vástago**

El vástago sirve para fijar la parte móvil del utillaje al cabezal de la prensa. [13]

- **Placa portapunzones**

La placa portapunzones es el componente de la matriz que lleva alojados los punzones, de forma que estos se desplazan solidarios a la placa según el movimiento rectilíneo alternativo de trabajo que describe la máquina [13]

- **Punzones**

Los punzones son los principales elementos activos de un utillaje. Su misión consiste en cortar la chapa según la sección de su plano de trabajo, que, generalmente se corresponde con la figura o forma que se desea obtener. [13]

- **Buterolas**

Las buterolas no son más que pequeñas matrices independientes con la forma que se requiere embutir. Se recurre a este sistema con el fin de simplificar la matriz principal y dotarla de un mejor mantenimiento en caso de rotura. [13]

- **Columnas guía**

Las columnas guía son piezas cilíndricas que forman parte del sistema de guiado y alineado de un utillaje. De dimensiones robustas, estos elementos aseguran una perfecta alineación de la parte móvil respecto a la parte fija del útil. [13]

- **Pasadores**

Los pasadores son unas columnillas cilíndricas que tienen como misión posicionar los distintos elementos sobre los que van montados, dentro de un agujero escariado y ajustados a presión. [13]

- **Topes guía**

Los topes guía son unos tornillos que se utilizan como guía de los elementos elásticos de las matrices con pisador para reducir la torcedura de los muelles durante su flexión. A la vez, cuando la matriz está abierta, son los elementos responsables de mantener la parte móvil del utillaje formando un solo bloque. [13]

- **Muelles**

Los muelles utilizados en matricería son de tipo helicoidal, trabajan a compresión y tienen su principal aplicación en las matrices dotadas de sistema elástico para pisado de la chapa. También se utilizan para trabajos de extracción de la chapa. [13]

- **Tornillos**

Los elementos de fijación que normalmente se utilizan en matricería son tornillos de rosca métrica de cabeza cilíndrica allen, aunque en ocasiones, y por el mínimo espesor de los elementos a sujetar, se utilizan también tornillos allen de cabeza cilíndrica de altura reducida, o tornillos allen de cabeza cónica. [13]

- **Casquillos guía**

Al igual que las columnas guía, los casquillos guía son piezas cilíndricas que forman parte del sistema de guiado y alineado de un utillaje. [13]

1.2.2 Fuerzas ejercidas en un troquel

El troquel debe ejercer distintas fuerzas dependiendo de las operaciones que valla a realizar, como son el corte, punzonado, doblado, embutido y estampado. Hay esfuerzos que el troquel debe soportar como lo es la resistencia al pandeo.

El más común es el troquelado de corte, utilizado para arrancar parte **del material de la lámina con el 'macho' y la matriz; por su parte, en el punzonado, el troquel, por impacto, abre agujeros en la lámina,** mientras que en el proceso de doblado la herramienta, al aplicar fuerza sobre la pieza, la flexiona y efectúa pliegues simples o complejos en el material.

El embutido es una operación de formado de láminas metálicas que se usa para hacer piezas de forma acoplada, de caja y otras formas huecas más complejas. Se realiza colocando una lámina de metal sobre la cavidad de un dado y empujando el metal hacia la cavidad de éste con un punzón. El proceso de embutido se utiliza ampliamente en la industria metalúrgica, para fabricar tapas, como las de las botellas de cerveza y gaseosa, o como las de tarros de pintura, también para hacer lavaplatos, ollas y otros productos en forma de recipientes. [11]

Mientras que el estampado se utiliza para crear indentaciones a través de la compresión ejercida en el metal, mediante dos moldes. [12]

1.2.2.1 Fuerza de corte

Para troquelar la pieza, se debe conocer la fuerza de corte necesaria para llevar a cabo el proceso, ya que ésta determina el tamaño o tonelaje de la prensa requerida. [14]

La fuerza necesaria para cortar una pieza de chapa depende del material a cortar, de las dimensiones de este corte y del espesor de la chapa, ésta fuerza está dada por la ecuación (3):

$$F_c = \sigma_c * P * s \dots \dots \dots (3)$$

Dónde:

σ_c = resistencia al corte (Kg/mm²)

P = perímetro del punzón (mm)

s = espesor de la chapa (mm)

La fuerza que se requiere para separar los punzones del trozo de chapa adherida a estos, una vez ha sido efectuado el corte es la fuerza de extracción, ésta depende de la naturaleza del material a cortar, de su espesor, de la forma de la figura y del material circundante a su perímetro de corte. La fuerza de extracción se puede aproximar a un 10% de la fuerza de corte: [14]

$$F_e = (\sigma_c * P * s) * 0.1 \dots \dots \dots (4)$$

Al finalizar un proceso de corte, la pieza recién cortada tiene tendencia, por expansión o por rozamiento, a quedarse adherida en el interior de la matriz. Este hecho se produce mientras que la pieza no

traspasa la vida de la matriz, puesto que esta zona no tiene inclinación ninguna. Al producirse el corte siguiente, la última pieza cortada empujará a la anterior, obligando a ésta a bajar por el interior de la matriz. Y así sucesivamente hasta que la primera pieza caiga por gravedad, ante la imposibilidad de quedarse adherida a la matriz. Esta adherencia o rozamiento de las piezas en el interior de la matriz representa una fuerza adicional a tener en cuenta, que llamaremos fuerza de expulsión y que debe calcularse sobre un 1,5% del valor de la fuerza de corte: [14]

$$F_{exp} = (\sigma_c * P * s) * 0.015 \dots \dots \dots (5)$$

1.2.2.2 Fuerza de doblado

El doblado de la pieza es un punto crítico en un troquel, puesto que dependiendo del material de la chapa y del espesor hay doblados que serían muy difíciles. Como dato es importante recordar que para obtener una deformación permanente es importante superar el límite elástico y para que no se lleve a cabo una rotura el estiramiento no puede superar el valor de alargamiento del material. La fuerza de doblado se calculará con la siguiente fórmula: [14]

$$F_D = \frac{b * s * Kd}{6} \dots \dots \dots (9)$$

Dónde:

b = ancho del material a doblar (mm)

s = espesor de la chapa (mm)

K_d = coeficiente de resistencia a la flexión (N/mm^2)

1.2.2.3 Resistencia de los punzones al pandeo

El pandeo es un fenómeno de inestabilidad elástica que puede darse en elementos comprimidos esbeltos y, que se manifiesta por la aparición de desplazamientos importantes transversales a la dirección principal de compresión. [14]

Debido a su forma de trabajar, los punzones están sometidos a un esfuerzo de pandeo igual a la fuerza de cizalladura que realizan. Para calcular la carga crítica axial se recurre a la fórmula de Euler

$$F = \frac{\pi^2 E I_g}{L_{max}^2} \dots \dots \dots (6)$$

Dónde:

E =Módulo de elasticidad (N/mm^2)

I_g = Momento de inercia de la sección transversal del punzón con respecto al eje que pasa por su centro de gravedad (mm^4).

L_{max} =Longitud de pandeo (mm).

La longitud máxima de un punzón para evitar el fenómeno de pandeo se puede calcular mediante la ecuación número 7. Teniendo en cuenta que para la rotura por cizalladura, la carga crítica axial (F) deberá ser igual a la de corte (F_c).

$$L_{max} = \sqrt{\pi^2 * E * I / F_c} \dots \dots \dots (7)$$

El momento de inercia para un punzón cilíndrico es:

$$I_g = \frac{\pi R^4}{4} \dots \dots \dots (8)$$

1.2.3 Problemas que afectan el proceso de fabricación

Los problemas que pueden afectar el proceso de fabricación son, principalmente, debidos a:

- a) Un diseño incorrecto de la matriz progresiva.
- b) La prensa.
- c) La materia prima.
- d) El tipo de transformación.
- e) La geometría de la pieza.
- f) Un mantenimiento deficiente

1.2.3.1 Diseño de la matriz progresiva

Un mal diseño de la matriz progresiva es el error que más problemas puede acarrear en un proceso de fabricación, ya que será causante del paro de la producción y, si no se resuelve ese problema, causante del costo de volver a realizar el proyecto y la construcción de otra matriz progresiva. Los problemas debidos al diseño de la matriz progresiva pueden estar causados por:

- Proyecto poco adecuado.
- Materiales inadecuados.
- Deficiente pilotaje de la banda.

- Banda poco resistente.
- Punzones poco dimensionados.
- Placas poco resistentes.
- Tolerancias incorrectas.
- Falta de pasos de transformación.

1.2.3.2 Prensa

La prensa puede ser causante de paros en el proceso de producción y de fabricación de piezas mal acabadas. Con la sustitución de la prensa, aunque esto puede no ser una opción, o arreglando la avería, el problema quedaría solucionado. Estos problemas, causados por la prensa, pueden ser debidos a:

- Poca fuerza de la prensa.
- Velocidad de la prensa muy rápida.
- Carrera insuficiente.
- Alimentador inadecuado.

1.2.3.3 Materia prima

El material escogido para la banda de chapa puede acarrear diferentes problemas, sobretodo en la calidad de las piezas a fabricar, debidos a:

- Material poco adecuado.
- Propiedades muy variables.
- Espesor irregular.
- Anchura irregular.

- Desprendimientos y adherencias.
- Impurezas o escorias.
- Rayas sobre el material.
- Superficie muy rugosa.

1.2.3.4 Tipo de transformación

1.2.3.4.1 Corte

El tipo de transformación de la chapa, en el caso de que sea un proceso de corte, puede acarrear los siguientes problemas:

- Desgaste excesivo de los punzones.
- Rotura de los punzones.
- Rotura de muelles.
- Rebabas en la pieza

1.2.3.4.2 Doblado

El tipo de transformación de la chapa, en el caso de que sea un proceso de doblado, puede acarrear los siguientes problemas:

- Retorno elástico de la pieza.
- Rotura de piezas.
- Marcas sobre las piezas.
- Excesivas laminaciones en las piezas.

1.2.3.5 Geometría de la pieza

La forma de la pieza a fabricar puede acarrear distintos problemas a la hora de transformar la chapa mediante la matriz progresiva. Estos problemas son debidos a:

- Radios muy pequeños.
- Aristas muy vivas.
- Doblados muy complejos.
- Tolerancias muy severas.
- Embutición muy profunda.
- Cortes muy pequeños.
- Doblados muy agudos.
- Perfiles muy irregulares.

1.2.3.6 Mantenimiento deficiente

Un mantenimiento deficiente o incorrecto puede acarrear problemas en la calidad de las piezas fabricadas y en las máquinas por causas como:

- Deficiente afilado de punzones y matrices.
- Fatiga y rotura de muelles.
- Alturas desiguales de punzones.
- Desgaste prematuro de afilados.
- Rotura de punzones.
- Temple inadecuado

TERCERA PARTE.

MATERIALES QUE GENERALMENTE SE UTILIZAN

Al realizar un análisis de la función de un troquel al seleccionar materiales hay propiedades que solo cubren los aceros de herramientas.

1.3 ACEROS PARA HERRAMIENTAS Y MAQUINARIA

Los aceros para herramientas se usan para maquinar y formar otros materiales y, por lo tanto, se diseñan para tener alta dureza y durabilidad bajo severas condiciones de servicio. Los tratamientos térmicos para los aceros para herramientas son similares a aquellos realizados en aceros de baja aleación endurecibles, es decir, que las propiedades finales se obtienen con austenización, formación de martensita y revenido. Sin embargo, la mayoría de los aceros para herramientas son muy aleados y se deben tomar precauciones especiales durante el procesado para alcanzar un balance apropiado de carburos aleados en una matriz de martensita revenida para una dada aplicación como herramienta. Los principales elementos de aleación de los aceros para herramienta son: carbono, tungsteno, molibdeno, manganeso, vanadio, níquel, cobalto etc. [14]

Los distintos tipos de aceros se categorizan dentro de una serie de clases en concordancia con la clasificación que realiza la AISI (American Iron and Steel Institute) (Figura 11) y la SAE (Society of

Automotive Engineers). Se identifican por una letra que representa la química, una característica única o el uso de esa clase de acero. [14]

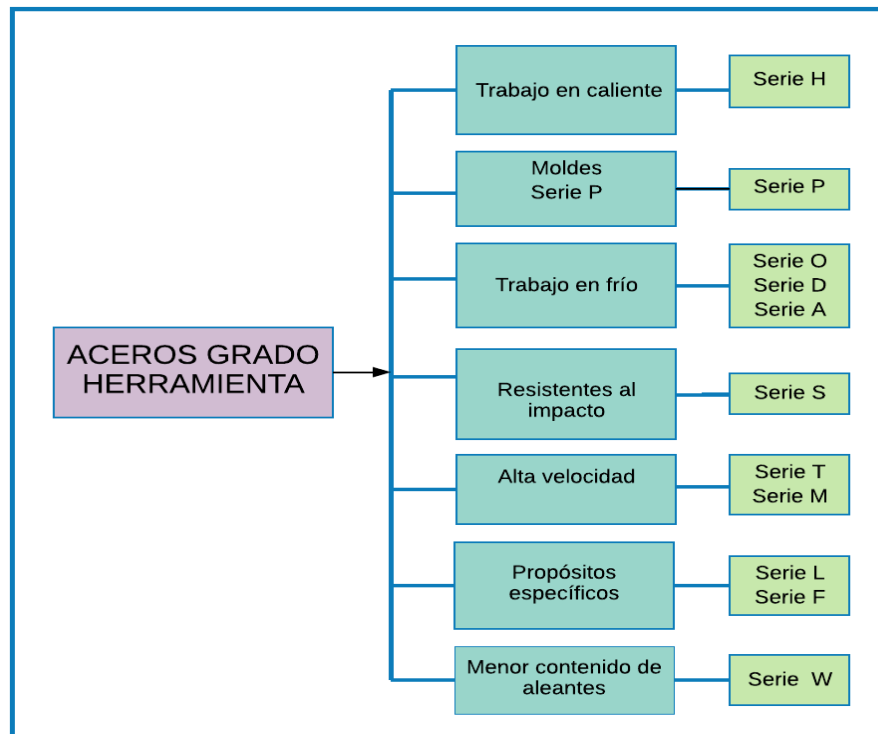


Figura 11. Clasificación de los aceros para herramientas AISI.

Las principales propiedades de los aceros para herramientas son los siguientes:

- Resistencia al desgaste
- Tenacidad
- Dureza al rojo
- Maquinabilidad
- Templabilidad

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 METODOLOGÍA

1. Análisis de las propiedades indispensables que deberá cumplir el material para el correcto funcionamiento del troquel.

- Se realizaron visitas al taller para analizar el proceso de troquelado y observar las variables más importantes en el conformado de la chapa, se realizó ensayo de dureza HRC a los materiales que fueron sometidos a tratamiento térmico por la empresa para determinar el rango de durezas que deben cumplir.
- Se revisó la bibliografía para la construcción de troqueles y se comprendió el tema de una manera teórica, comparando así los materiales que se utilizan.
- Se determinó la función del troquel, las principales restricciones a tomar en cuenta para la selección de materiales por la metodología de Michael Ashby y el índice de desempeño del material teniendo en cuenta que se debe maximizar el esfuerzo y minimizar la masa.
- Se realizó un análisis de la selección de materiales por el método tradicional.

2. Se utilizó el software Ces-Edupack para la selección de materiales.

a) Creación de diagramas.

- Para la creación de un diagrama se elige la orden SELECT y se activa la etapa gráfica (GRAPH).

b) Introducción de límites

- En la orden SELECT se activa la etapa límite (LIMIT) o con los cuadro de selección se limita el valor deseado de las propiedades que se requieren restringir.

c) Aplicación de filtro

- Se va a la orden SELECT y se activa la etapa de árbol (TREE), seleccionando del índice jerárquico o subfamilia deseada y pulsar INSERT

3. Finalmente una vez que se tienen los materiales seleccionados se realiza un análisis para ver cuál cumple con las expectativas del material requerido y se selecciona.

2.2 FUNCIÓN

Troquel progresivo para fabricar 1, 000,000 de mordazas J de acero rollado en frío para troquelado profundo calibre 14. El proceso de troquelado lleva en si las siguientes funciones:

- **Corte**
- **Doblado**
- **Estampado**
- **Embutido**

2.2.1 PIEZA A TROQUELAR

La pieza a fabricar por el troquel (figura 12), debe tener 3 orificios, en uno de ellos entra un tornillo de 1/4", la medida del orificio es un poco mayor ya que después de maquilarla se le hace una cuerda para atornillarla. Este componente estará sometido a grandes cargas de trabajo debido a que debe fabricar 1, 000,000 de piezas.



Figura 12. Mordaza J. (Taller de manufacturas R&R)

El proyecto parte de la necesidad de fabricar mordazas J con una lámina calibre 14 por lo que se tienen que realizar el diseño (Figura 13).

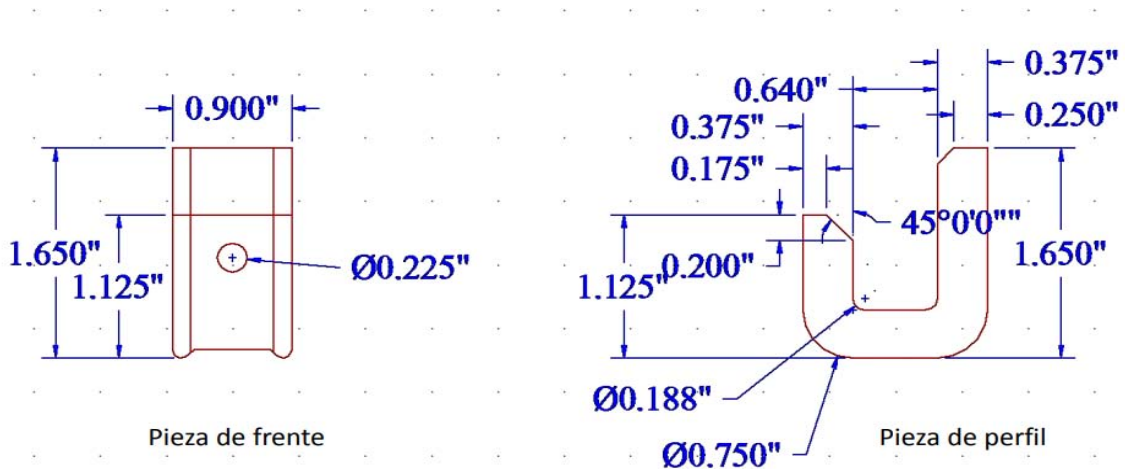


Figura 13. Diseño de la Mordaza J. (Taller de manufacturas R&R)

2.2.2 TROQUEL PROGRESIVO

En este caso al ser una gran producción (1.000.000 piezas), y al tratarse de un proceso de fabricación en el que hay varias operaciones distintas, lo más recomendable es escoger la alternativa de la matriz progresiva, ya que si se escogiera la matriz simple, habría que realizar una matriz por cada operación, es decir, habría que realizar el diseño de varias matrices. Además, el costo aumentaría, ya que habría que utilizar más prensas, con lo que aumentaría la mano de obra y disminuiría la producción. Con la matriz progresiva se abaratará el costo de la pieza, se tendrá un alto grado de automatización en el proceso de fabricación, se reducirá la mano

de obra, se conseguirá un mayor aprovechamiento del material y una mayor producción. Por lo tanto, la alternativa más adecuada para este proceso de fabricación es diseñar una matriz progresiva.

Una vez que se tiene la pieza se realiza el diseño del troquel para que en una serie de pasos produzca la pieza deseada (figura 14).

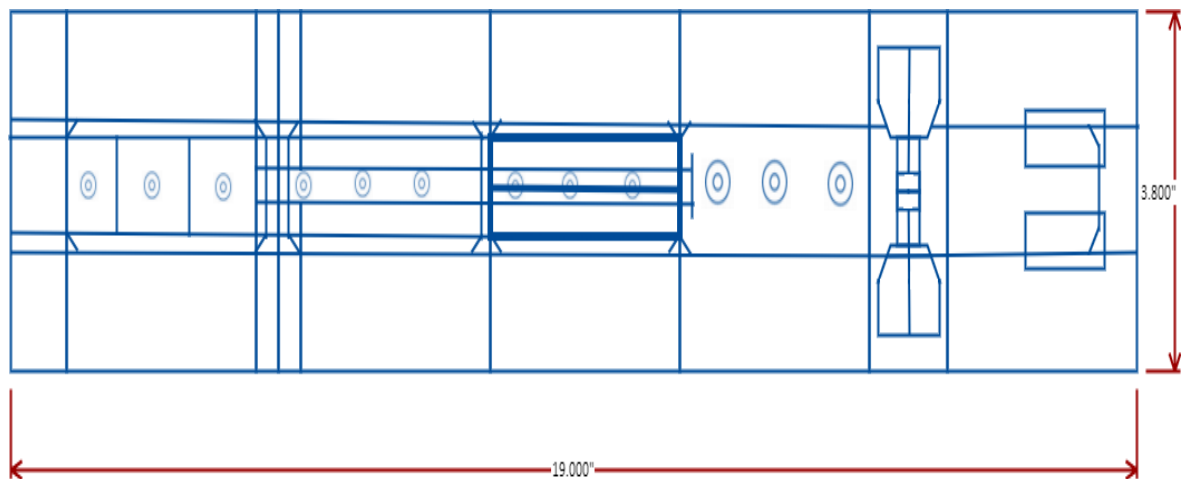


Figura 14. Troquel progresivo para una mordaza J. (Taller de manufacturas R&R)

2.3 RESTRICCIONES

Una de las tareas más desafiantes es la selección adecuada del material para un herramental. Un ingeniero debe elegir la combinación óptima de propiedades en un material al menor costo posible sin comprometer la calidad. Ya descrita la pieza problema se tiene que comprender el proceso de troquelado mecánico el cual es parte del conformado en frío de la chapa metálica. Se realizaron

visitas al taller para comprender el proceso y familiarizarse con él observando las variables que influyen en el mismo.

2.3.1 Propiedades que debe cumplir el material

- El material debe ser resistente al desgaste, debe soportar grandes cargas de trabajo diarias.
- Debe tener de una dureza tal que la matriz y los punzones sean capaces de troquelar una lámina calibre 14.
- El costo del material debe ser accesible para obtener la mayor ganancia posible.
- Material resistente al impacto.
- Material resistente a la fatiga.
- Material debe ser vendido en México.

2.3.2 Como se fabrica un troquel

El maquinado del troquel es un proceso costoso por lo que se busca un material que tenga la dureza correcta para que el maquinado sea más rápido y a la vez cumpla con la función. La realización de cualquier proyecto de utillaje posee además una serie de fases en relación al proceso constructivo, el orden adecuado es el siguiente:

1. Recepción de materias primas.
2. Desbaste de materiales.
3. Mecanizados.
4. Tratamientos térmicos.

5. Corte por hilo, electroerosión.
6. Rectificados.
7. Ajustes.
8. Montaje.
9. Pruebas.

2.3.3 Perfil ambiental del proceso de troquelado

Se ha de tener en cuenta y valorar el posible impacto medioambiental que pueda producir la matriz progresiva que se ha diseñado. Para poder minimizar el impacto ambiental producido por la matriz diseñada se debe obtener el máximo rendimiento en la producción de las piezas.

El rendimiento es el parámetro que determina el grado de aprovechamiento del material. Es un factor clave, tanto por motivos económicos como medioambientales. Un mayor rendimiento se traduce en un mayor beneficio económico y un menor consumo de recursos energéticos y materia prima, así como en un menor impacto ambiental.

2.3.4 Distribución de procesos

La estructura del troquel se debe diseñar tomando como punto de partida la distribución de procesos, por esto es tan importante realizar una buena planificación de los mismos en la que se tenga muy en cuenta todas las posibles incidencias que puedan surgir. El éxito en la

obtención de la pieza dependerá en gran medida de la selección de materiales para los mismos, se tienen:

En base a su funcionalidad:

- Elementos de acción directa.
- Elementos de soporte.
- Elementos auxiliares.

2.3.4.1 Elementos de acción directa

Hace referencia a todos aquellos componentes que actúan directamente en el conformado del material (Figura 15).

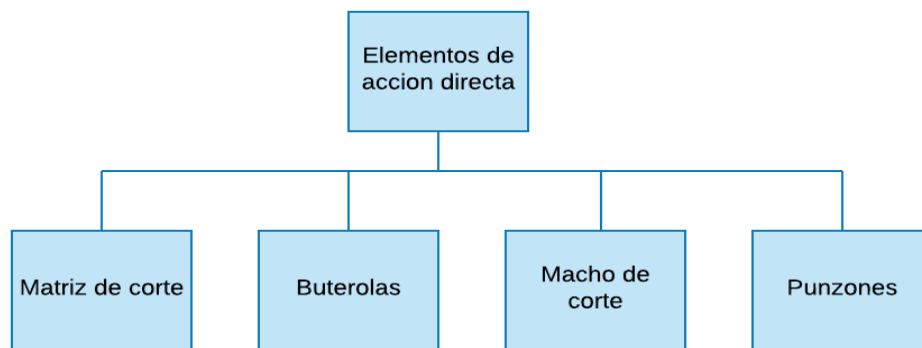


Figura 15. Elementos de acción directa

2.3.4.2 Elementos auxiliares

Para la construcción y funcionamiento de los troqueles se requiere de una gran variedad de componentes complementarios como, casquillos, sujetadores, tornillos de fijación, tornillos de apriete, guías,

sistemas de amarre y bridas de sujeción, adiprenes, muelles, empujadores, centradores, entre otros. Todos ellos forman el complejo y efectivo sistema del troquelado.

2.3.4.3 Elementos de soporte

Los elementos de soporte son aquellos en los que los elementos de acción directa están apoyado y recibe los impactos pero en menor proporción. (Figura 16)

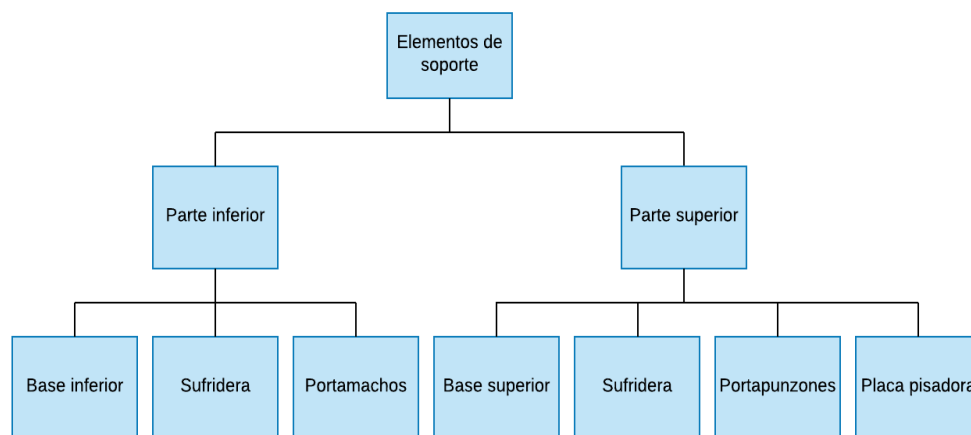


Figura 16. Elementos de soporte

2.4 OBJETIVO

2.4.1 Índice de desempeño

En el proceso de troquelado siempre que se le aplique una carga a un material sufre un cambio de forma, esta forma puede o no volver a recuperar su estado original dependiendo de la intensidad de la carga

de acuerdo al diagrama esfuerzo deformación, para que el material no sufra cambios debe estar por debajo de la zona elástica.

Al realizar un análisis de lo que tiene que cubrir la pieza observamos que sus principales funciones son las de cortar, doblar, estampar y embutir por lo que la fuerza que rige cada uno de estos pasos es la de pandeo debido a que es la fuerza que tiene que soportar el utillaje para no ser deformado a cargas de compresión constante ya que si existe un pandeo en alguna de las piezas el troquel deja de funcionar.

Así que si cubrimos esta en automático tendremos cubierta las fuerzas de doblar, embutido, estampado y corte. Los punzones, los machos de corte, las buterolas y la matriz de corte deberán trabajar dentro de la zona elástica del material.

Los requerimientos son:
Minimizar la **masa** (ρ)
Maximizar el esfuerzo (E)

$$m = \rho LA \dots \dots \dots (9)$$

Partiendo de la ecuación 6 se obtiene que la fuerza crítica será la de pandeo:

$$F_{crit} = \frac{\pi^2 EI_g}{L_{max}^2} \dots \dots \dots (10)$$

Sustituyendo el momento de inercia en la carga crítica se obtiene:

$$F_{crit} = \frac{\pi^3 ER^4}{4L_p^2} \dots \dots \dots (11)$$

Despejando R:

$$R = \left(\frac{4F_{crit}L_p^2}{\pi^3 E} \right)^{1/4} \dots \dots \dots (12)$$

Sustituyendo en la función objetivo, operando la raíz, las potencias y simplificando se obtiene:

$$m = \left(\frac{4F_{crit}}{\pi^{1/2}} \right)^{1/2} (L_p^2) \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right)$$

$$F = \left(\frac{F_{crit}^{1/2}}{\pi^{1/2}} \right) \dots \dots \dots \text{Requerimientos}$$

$$G = (L_p^2) \dots \dots \dots \text{Geometria}$$

$$M = \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \dots \dots \dots \text{Material}$$

$$M = \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \dots \dots \dots (13)$$

Aplicando logaritmos:

$$\text{Log } M = \text{Log } \frac{\rho}{E^{1/2}} \dots \dots \dots (14)$$

Por propiedades de los logaritmos se desarrolla:

$$\text{Log } M = \text{Log } \rho - \text{Log } E^{\frac{1}{2}} = C$$

$$\text{Log } M = \text{Log } \rho - \frac{1}{2} \text{Log } E = C$$

$$\frac{1}{2} \text{Log } E = \text{Log } \rho - C$$

$$\text{Log } E = 2\text{Log } \rho + C$$

Se obtiene la última ecuación:

$$\text{Log } E = 2\text{Log } \rho + C \dots \dots \dots (15)$$

Donde la pendiente es igual a 2, por lo tanto el índice de desempeño es 2.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 SELECCIÓN DE MATERIALES POR EL MÉTODO TRADICIONAL.

Tomando en cuenta como referencia la literatura consultada y la experiencia del TALLER MANUFACTURAS R&R, se tienen las siguientes posibilidades (Tabla 3).

Tabla 3. Materiales utilizados en el taller de manufactura R&R y la consultada en la bibliografía [7, 9, 10, 11, 12, 13,14]

| Componente del troquel | Material | Tratamiento |
|-------------------------------|---|-------------------------------|
| Base superior | A 36, SAE-AISI 1045 | Temple y revenido |
| Base inferior | A 36, SAE-AISI 1045 | Temple y revenido |
| Sufrideras | SAE-AISI 1045, SAE/AISI O1, SAE/AISI O6 | El material ya viene templado |
| Portapunzones | SAE-AISI 1045, SAE/AISI O1, SAE/AISI O2, SAE/AISI A2, SAE/AISI D2, SAE/AISI D3, SAE/AISI D6 | Temple y revenido |
| Punzones | SAE/AISI D3, SAE/AISI D6 | Temple y revenido |

Con estos datos y el material proporcionado por el taller de manufactura se llevaron a cabo los tratamientos térmicos de temple y

revenido de las piezas en un horno elaborado por ellos mismos, donde se obtuvieron las durezas de las piezas (Tabla 4).

El tratamiento térmico de temple se llevó a cabo a un color rojo intenso (900°C) enfriado en aceite y después se realiza un revenido a un color café (340-380°C) con enfriamiento al aire.

La tabla 4 presenta la dureza de las piezas con temple y revenido, medidas en el laboratorio de posgrado y el laboratorio 110 D.

Tabla 4. Dureza de las piezas con tratamiento térmico de temple y revenido, para la producción de la matriz de un troquel

| Pieza | Posgrado Dureza RC PROMEDIO | Laboratorio110 D Dureza RC PROMEDIO |
|----------------------|-----------------------------------|---|
| O1 Temple y Revenido | 55.16 ±0.46 | 57.75 ±1.50 |
| O1 de Llegada | 21.7 ±0.48 | 21.6 ±2.97 |
| D2 Temple y Revenido | 61.04 ±0.38 | 56.4 ±2.97 |
| D2 de Llegada | 18.22 ±0.63 | 20 ±4.30 |

Si observamos las durezas tomadas de los tratamientos térmicos en el taller podemos observar en la tabla 6 que se obtuvo una mayor dureza en el acero AISI O1 debido a que las condiciones en las que se hace el tratamiento no son las adecuadas sin embargo al taller le funciona, y siempre obtienen durezas en este rango cuando algún cliente les pide una dureza exacta entonces mandan las piezas a un

lugar especializado de tratamientos térmicos donde aseguran dar la dureza exacta con la mínima contracción posible, y como es de esperarse el costo del troquel se eleva.

Al realizar las distintas visitas al taller mecánico y trabajar con distintos tipos de acero se puede percatar que la maquinabilidad de ellos depende de que tan duro esté, así como de posibles fallas si se realiza un tratamiento térmico inadecuado, se observó el cambio de dimensiones de las piezas al realizar los mismos. Se estudiaron las variables que afectan el proceso de troquelado observando que en sí, la selección de materiales se realiza porque ese material les funciona bien y aseguran una cantidad de piezas dependiendo su complejidad y de la chapa que van a conformar. Regularmente están acostumbrados a utilizar los aceros AISI O1 y AISI D2 por economía.

3.2 SELECCIÓN DE MATERIALES APLICANDO EL MÉTODO DE ASHBY EN EL SOFTWARE CES-EDUPACK.

El primer paso para relacionar los requisitos de diseño con las propiedades del material es una declaración clara de la función, los objetivos y las limitaciones (Tabla 5).

Tabla 5. Método de Ashby aplicado a la selección de materiales del troquel progresivo.

| | |
|---------------|---|
| Función | <ul style="list-style-type: none"> Elasticidad de los materiales para soportar grandes deformaciones bajo la acción de cargas exteriores. Resistencia al Pandeo. |
| Objetivo | <ul style="list-style-type: none"> Se maximiza el esfuerzo y se minimiza el peso. |
| Restricciones | <ul style="list-style-type: none"> Material expuesto a solventes orgánicos. Proceso de conformado en frío. Precio bajo si comprometer propiedades. Dureza del material para reducir costos en el maquinado. La fatiga del material Disponibilidad en México Coefficiente de expansión térmica lo más bajo posible debido al tratamiento térmico. |

El software CES- EduPack contiene 3968 materiales los cuales se ven graficados en el mapa de materiales (Figura 4). Al realizar el análisis con la ecuación de pandeo de Euler (Ecuación 6) y deducir la pendiente, la cual debe tener como función clasificar a los materiales

que quedaran por encima del mapa de materiales, se utiliza el índice de desempeño ya calculado con anterioridad, la pendiente es de 2 y todos los materiales que estén por encima de ella cumplirán con los requisitos dados por el factor de forma, una vez que definimos la pendiente y que ésta debe cumplir que se maximice el esfuerzo y se minimice el peso, se traza en el mapa de materiales dejando solo a los materiales que estén por encima de esta pendiente (Figura 17).

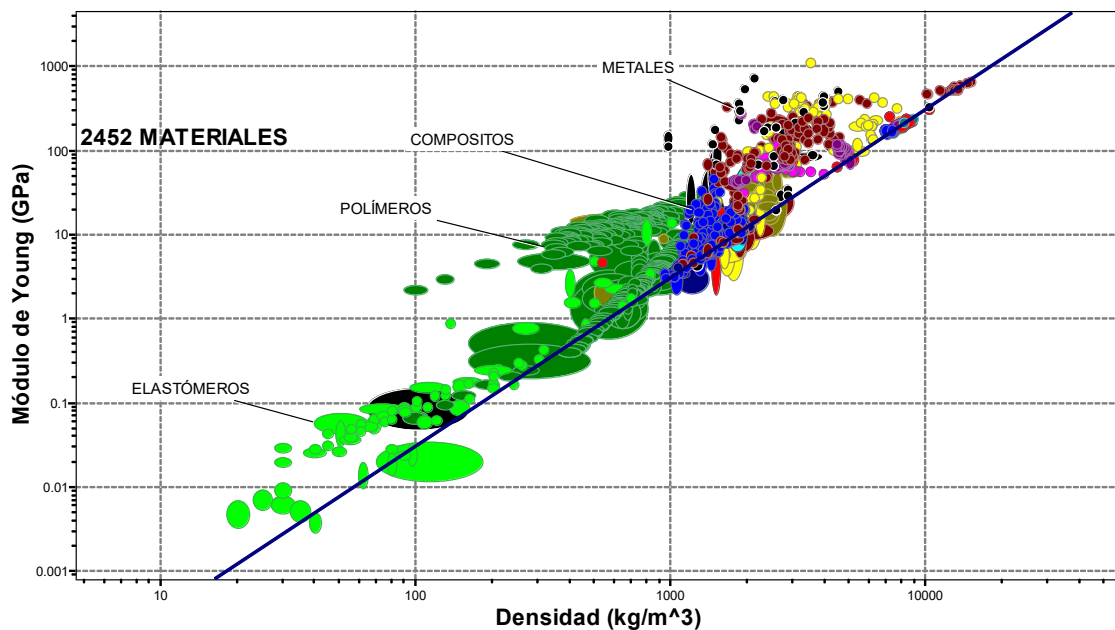


Figura 17. Mapa de materiales con la pendiente que minimiza la masa y maximiza el módulo de Young (Módulo de Young vs densidad).

Se realizó la búsqueda para materiales que puedan transformar la chapa de acero y se fijó un límite de densidad de 7600-7900 (Kg/m³), de aquí se toma el límite en el módulo de Young de 150-250 (GPa). Los datos fueron obtenidos de las citas bibliográficas [13, 14, 15, 16, 17].

Empleando la etapa límite se estableció el módulo de Young y la densidad obteniendo como resultados 925 materiales para el primero (Figura 18) y 639 materiales para el segundo (Figura 19).

Como se mencionó con anterioridad los materiales aptos para el tipo de trabajo que realizará el troquel, deben tener un módulo de Young alto debido a que éste no debe deformarse plásticamente. Entre ellos hay aleaciones de berilio aluminio, algunos compositos, aleaciones de cromo molibdeno, níquel-cromo como también los carburos de tungsteno y los aceros por mencionar algunos.

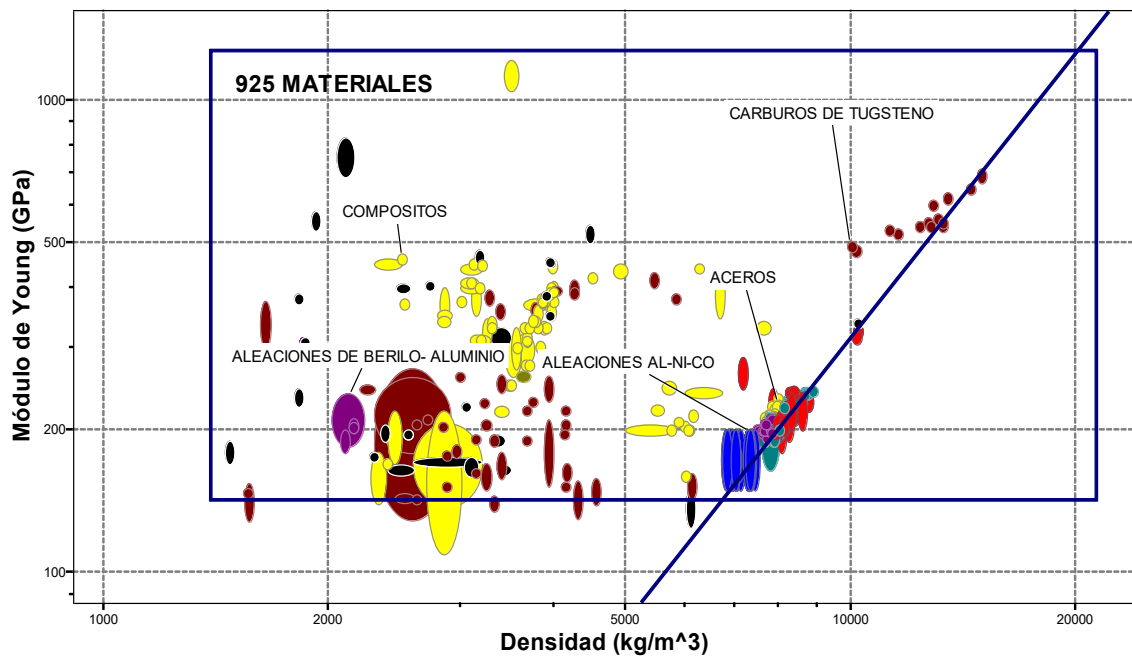


Figura 18 . Mapa de materiales con un límite en el módulo de Young (Módulo de Young vs densidad).

En la figura 19 se observa la clasificación de los aceros; grado herramienta, grado maquinaria, aceros al carbono, hierros fundidos

entre otros, aún hay dentro de la selección materiales como las aleaciones de cromo- molibdeno.

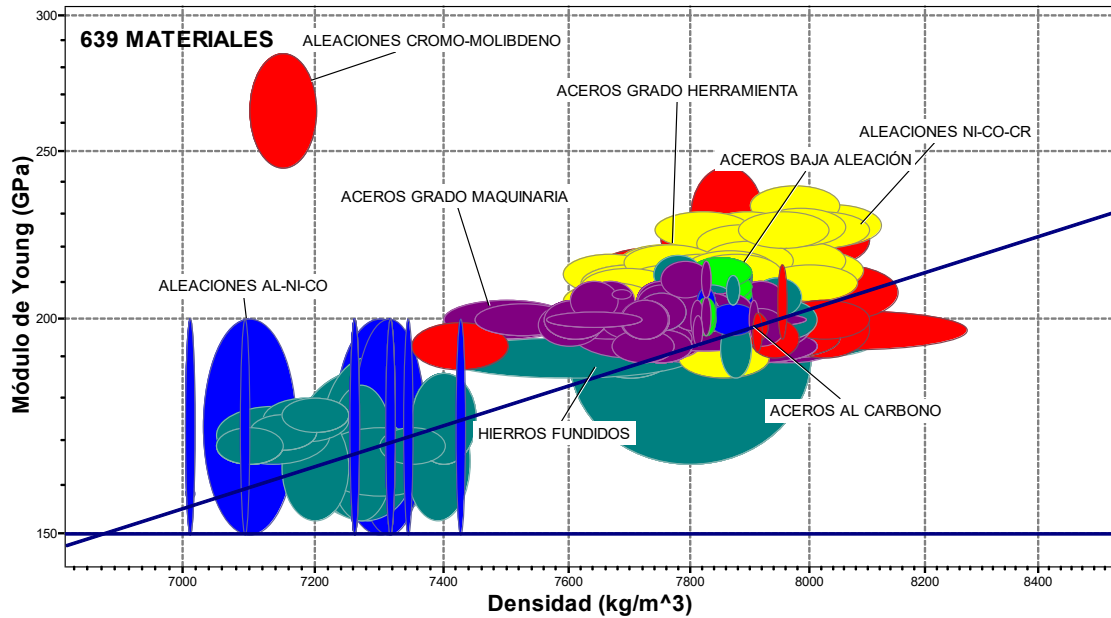


Figura 19. Mapa de materiales con un límite en la densidad (Módulo de Young vs densidad).

Un troquel debe ser lubricado constantemente y por ello ahora se tiene que establecer un límite en el que éste debe tener una aceptable o excelente durabilidad expuesto a solventes orgánicos (Figura 20) para ello se realiza un diagrama booleano, el cual presenta 535 materiales que son excelentes y 2 que son aceptables.



Figura 20. Diagrama booleano del comportamiento frente a solventes orgánicos.

Hasta este momento se tienen 537 materiales que cumplen con esta restricción (Figura 21).

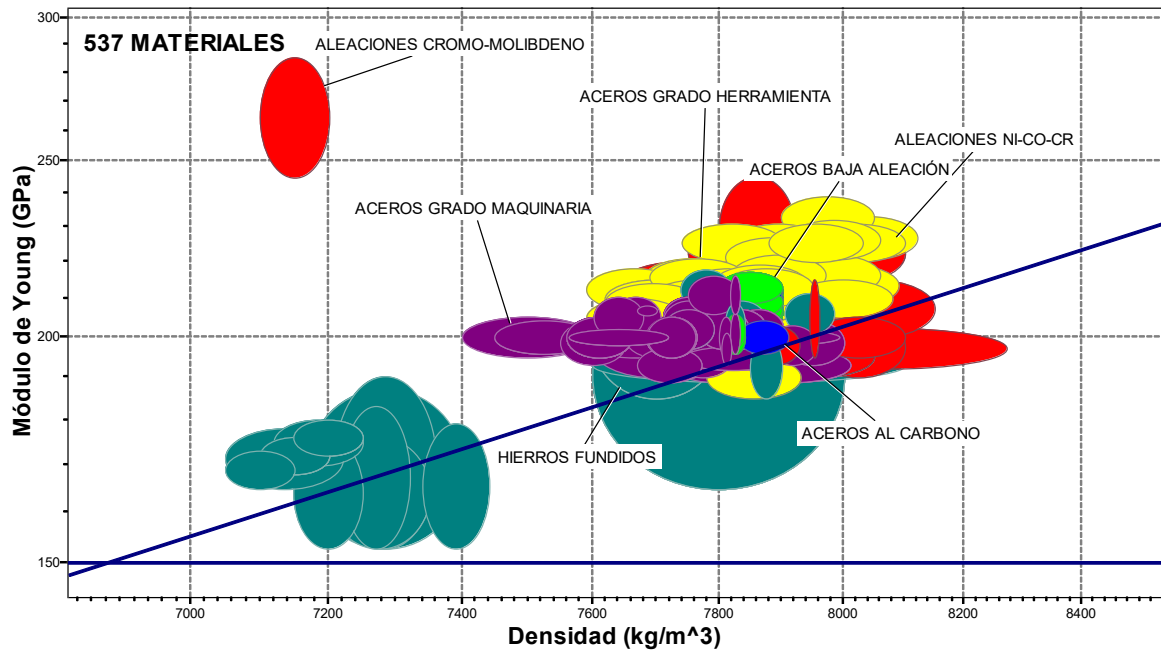


Figura 21. Mapa de materiales con un límite en el comportamiento frente a solventes orgánicos. (Módulo de Young vs densidad).

Se mencionó que el troquelado es un proceso de conformado en frío, es por ello que los materiales de los cuales deben estar fabricados los troqueles no deben tener conformabilidad en frío ya que si la tuvieran entonces éstos se deformarían plásticamente. Por lo que se procede a realizar diagrama booleano y se obtienen 188 materiales dentro de la selección que tienen un a excelente conformabilidad en frío y 140 con una aceptable (Figura 22).

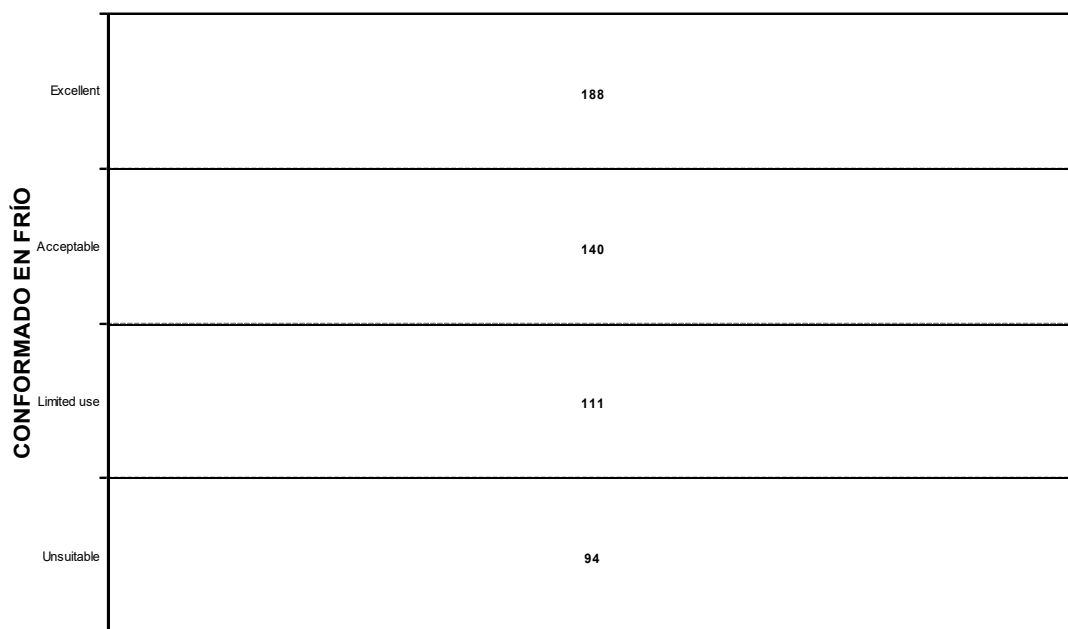


Figura 22. Diagrama booleano del conformado en frío.

Al realizar este filtro tenemos que hay 205 materiales que no son conformables en frío y por ello se pueden utilizar como matrices para conformar a los que quedan fuera de esta selección. Dentro de estos materiales se encuentran los aceros grado maquinaria, aceros grado herramienta, aceros al carbono y algunas aleaciones de Cromo-Molibdeno (Figura 23).

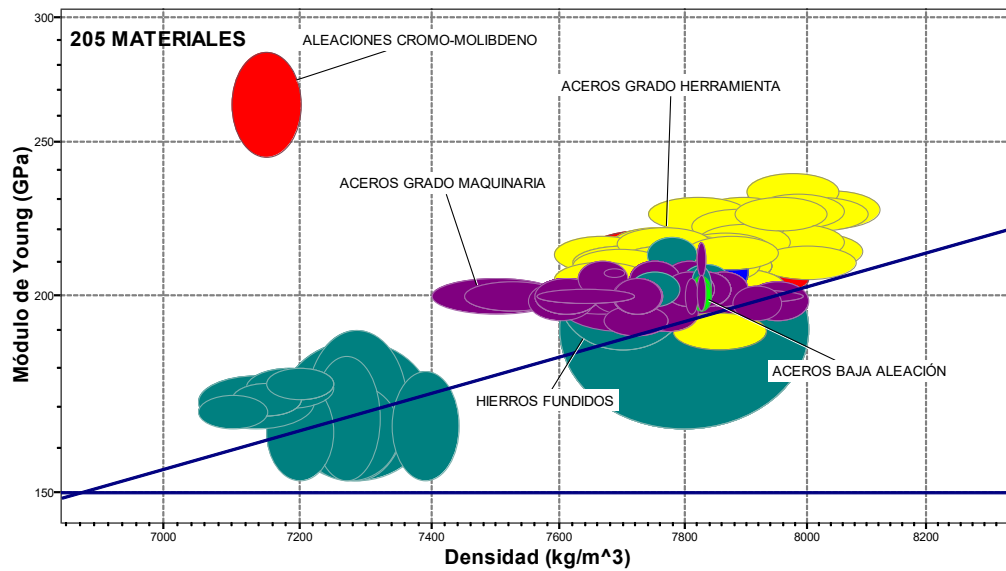


Figura 23. Mapa de materiales con un límite que no pueden ser deformados en frío. (Módulo de Young vs densidad).

Se realiza un diagrama de barras del precio de los materiales estos son altos para los aceros grado maquinaria y las aleaciones Níquel-Cromo y bajos para los hierros fundidos y aceros al carbono (Figura 24).

SELECCIÓN DE MATERIALES DE UN TROQUEL PROGRESIVO PARA UNA MORDAZA J
(CES-EDUPACK 2017)

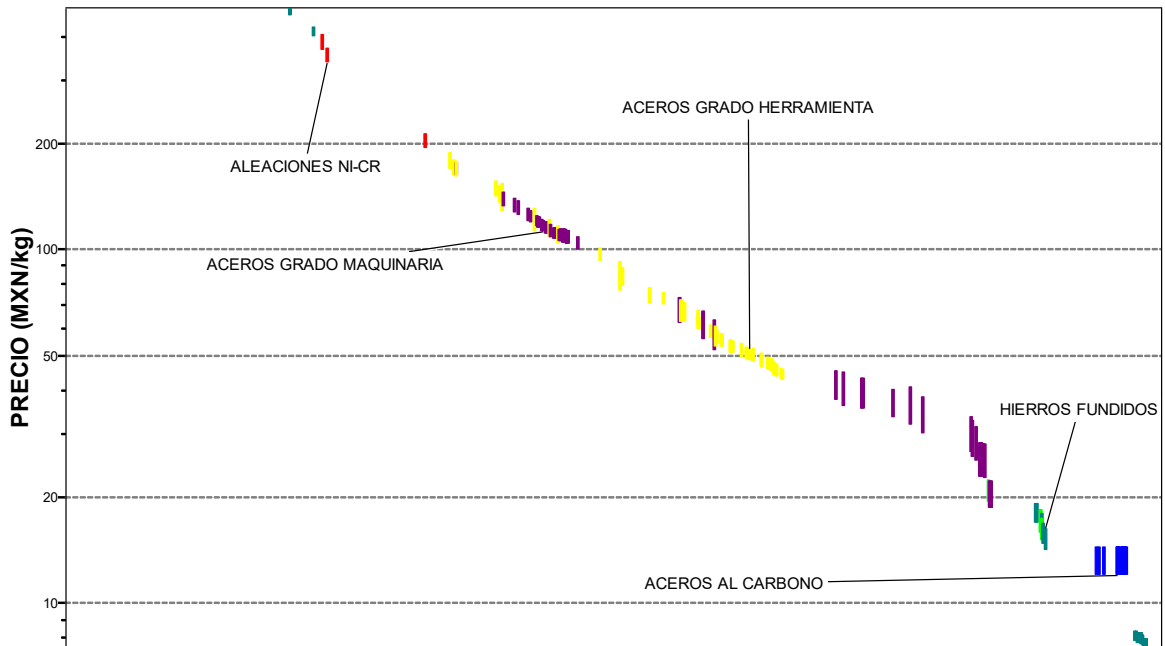


Figura 24. Diagrama de barras del precio de los materiales (MXN/Kg).

De los 205 materiales se limita mediante un cuadro de selección en la zona intermedia para descartar los materiales más económicos y caros.

Dentro de esta selección los resultados son 122 materiales, entre ellos se encuentran los aceros grado herramienta principalmente. Sin embargo hay algunos aceros inoxidables grado maquinaria que pueden funcionar (Figura 25).

SELECCIÓN DE MATERIALES DE UN TROQUEL PROGRESIVO PARA UNA MORDAZA J
(CES-EDUPACK 2017)

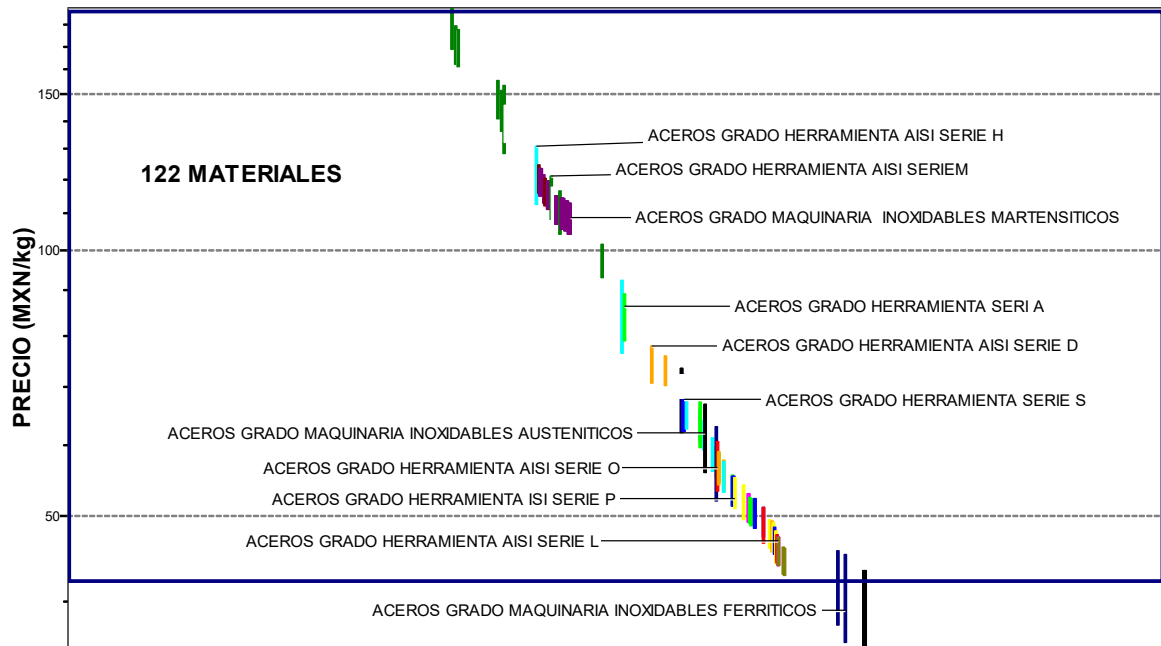


Figura 25. Diagrama de barras del precio de los materiales (MXN/Kg) con un límite de costo.

Los resultados que se arrojan enfatizan que los materiales deben tener propiedades de resistencia al impacto y tenacidad altos cuyas funciones solo las tienen los aceros grado herramienta y maquinaria (Figura 26).

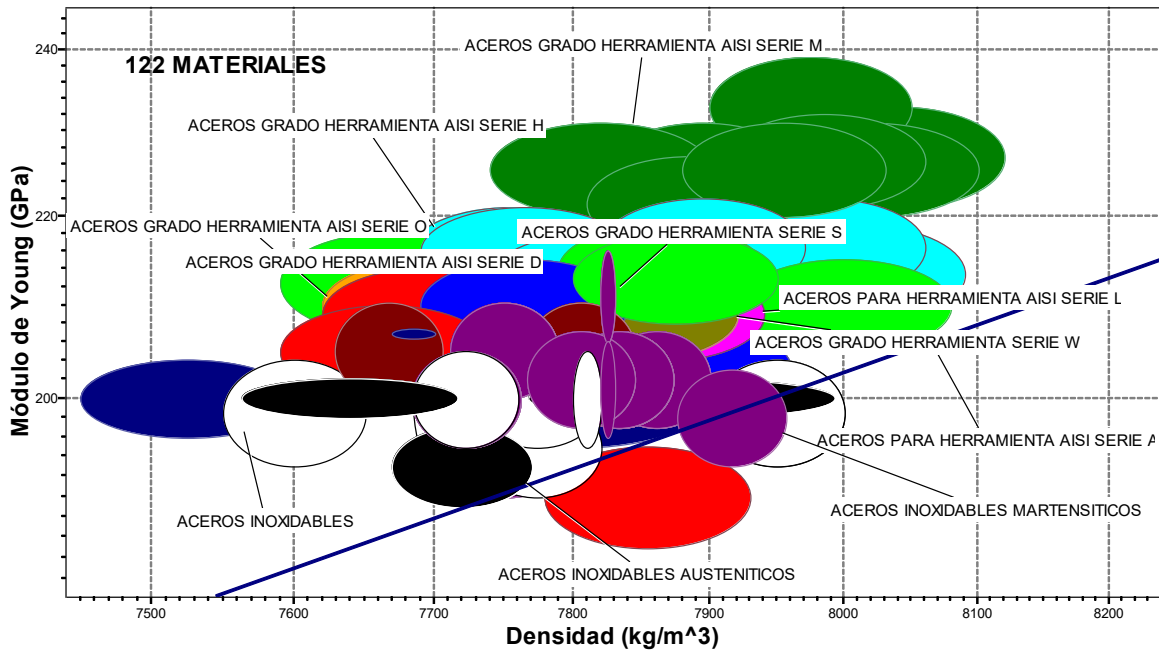


Figura 26. Mapa de materiales con un límite de precio. (Módulo de Young vs densidad)

Se realiza de nuevo un filtro de los de los precios de los 122 resultados anteriores, de los cuales se tienen solo 52 materiales con un precio intermedio y todos ellos son aceros grado herramienta debido a que los grado maquinaria que llegaron hasta el paso anterior son más caros (Figura 27).

Dentro de esta selección tenemos en su mayoría aceros grado herramienta y algunos aceros grado maquinaria (Figura 28).

SELECCIÓN DE MATERIALES DE UN TROQUEL PROGRESIVO PARA UNA MORDAZA J
(CES-EDUPACK 2017)



Figura 27. Diagrama de barras del precio de los materiales (MXN/Kg) con un límite de precio.

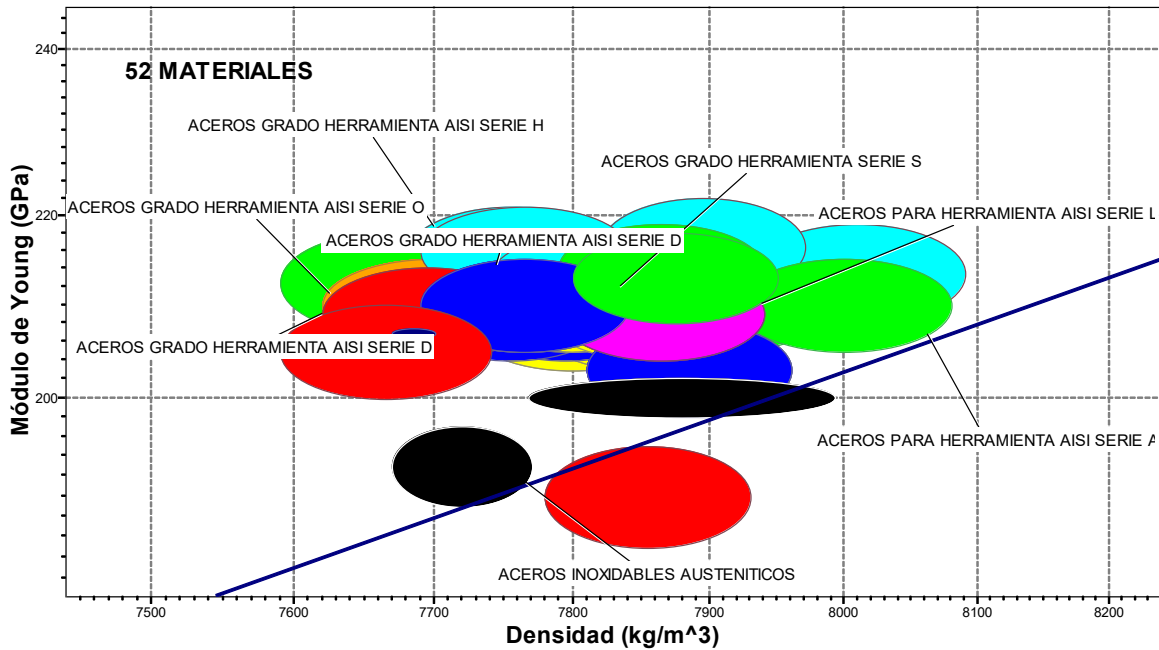


Figura 28. Mapa de materiales con un límite de precio. (Módulo de Young vs densidad)

El maquinado de un troquel requiere de durezas relativamente bajas debido a que entre más duro esté el acero, este sale más caro debido a: el tiempo en que se tarda en los procesos de torneado y corte por erosión por mencionar algunos, las herramientas de construcción del mismo se desgastan más rápidamente. De los 52 resultados obtenidos con anterioridad, se realiza una selección de materiales que cumplan con la dureza que se determinó en el método tradicional (Figura 29).

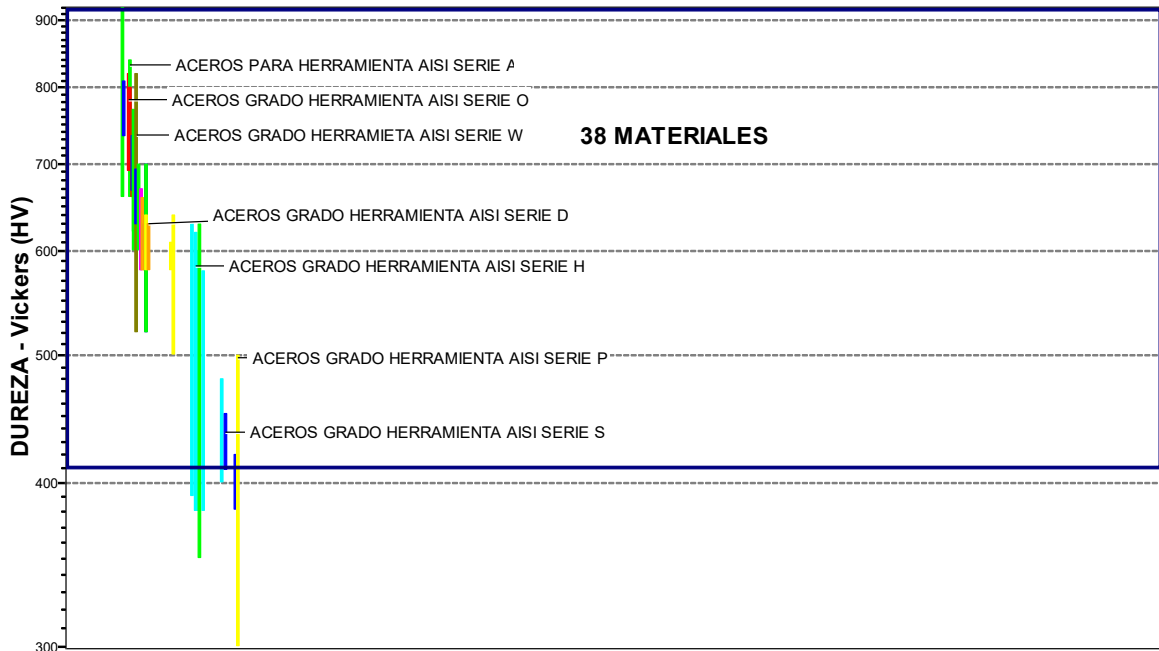


Figura 29. Diagrama de barras de la dureza Vickers (HV) de los materiales (MXN/Kg) con un límite de costo.

Cabe destacar que las herramientas que se deforman durante el servicio poseen una falta de dureza. Ya que la resistencia a la deformación de un acero está relacionada directamente con la ésta y no con el tipo de acero, las acciones correctivas para solucionar la deformación pueden incluir un incremento en la dureza del acero así como un descenso en las cargas de operación. Un cambio en el tipo

de acero no ayudará a resolver un problema de deformación a menos este sea capaz de lograr una mayor dureza.

Quedando así 38 materiales seleccionados en los que en su mayoría son aceros de las series AISI OX, AX y DX (Figura 30).

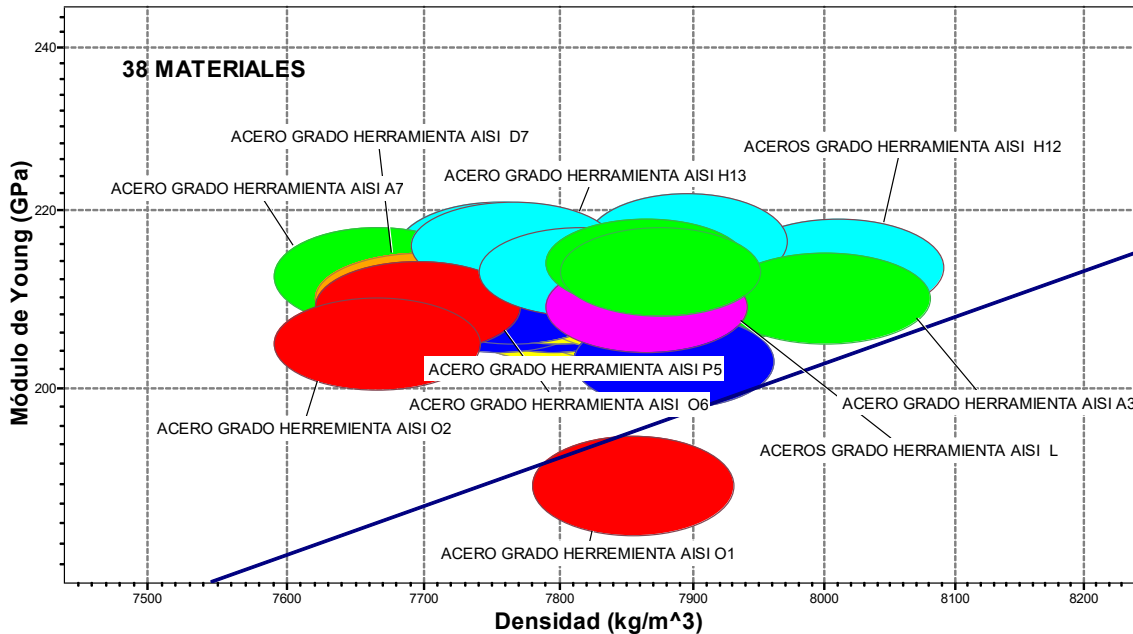


Figura 30. Mapa de materiales con un límite de dureza. (Módulo de Young vs densidad)

Las piezas del troquel están sometidas a soportar fuerzas repetitivas o cíclicas que romperán a tensiones mucho menores que aquellas que puede soportar la pieza bajo la aplicación de una única tensión estática, por lo que se hace un límite de cuadro a aquellos que tengan el mayor esfuerzo de fatiga obteniendo así solo 28 materiales (Figura 31).

**SELECCIÓN DE MATERIALES DE UN TROQUEL PROGRESIVO PARA UNA MORDAZA J
(CES-EDUPACK 2017)**

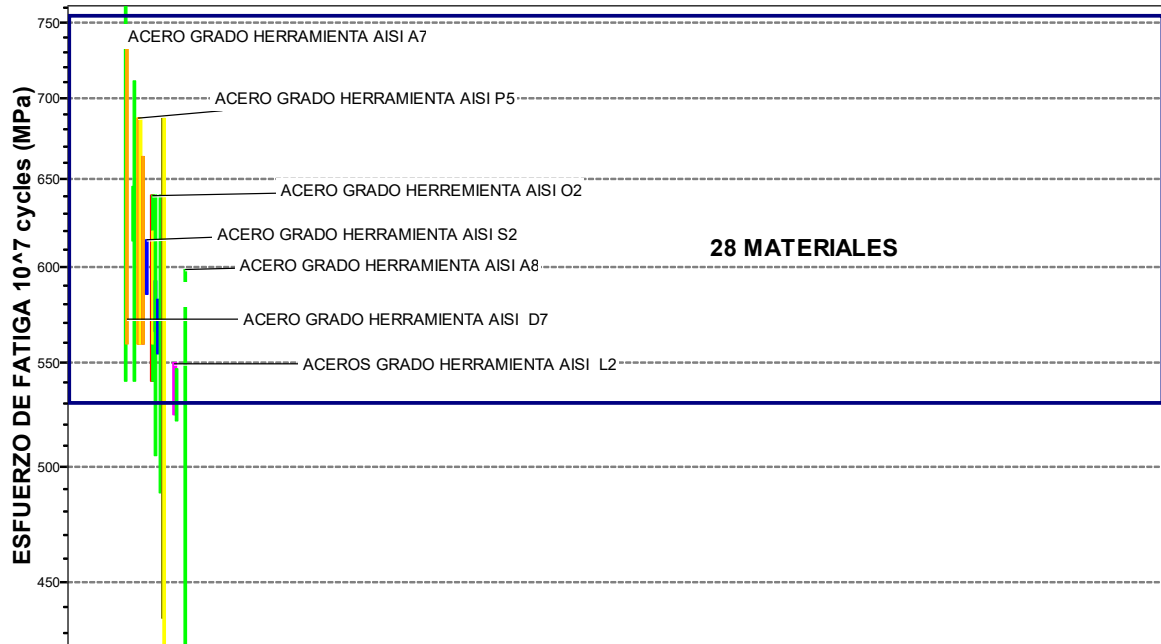


Figura 31. Diagrama de barras del esfuerzo de fatiga 10⁷ ciclos (MPa).

La tabla 6 muestra los 28 resultados de ésta selección.

Tabla 6. Resultados de la selección (28 materiales)

| SERIE A | SERIE L | SERIE O | SERIE S | SERIE W | SERIE D | SERIE P |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| AISI A10 | AISI L2 | AISI O1 | AISI S1 | AISI W2 | AISI D2 | AISI P2 |
| AISI A2 | AISI L6 | AISI O2 | AISI S2 | | AISI D3 | AISI P3 |
| AISI A3 | | AISI O6 | AISI S5 | | AISI D4 | AISI P4 |
| AISI A4 | | AISI O7 | | | AISI D5 | AISI P5 |
| AISI A6 | | | | | AISI D7 | AISI P6 |
| AISI A7 | | | | | | |
| AISI A8 | | | | | | |
| AISI A9 | | | | | | |

Dentro de la selección se encuentran por mencionar algunos el acero AISI O1, AISI D2 los cuales son los más utilizados para la fabricación de troqueles según la bibliografía consultada (Figura 32).

SELECCIÓN DE MATERIALES DE UN TROQUEL PROGRESIVO PARA UNA MORDAZA J
(CES-EDUPACK 2017)

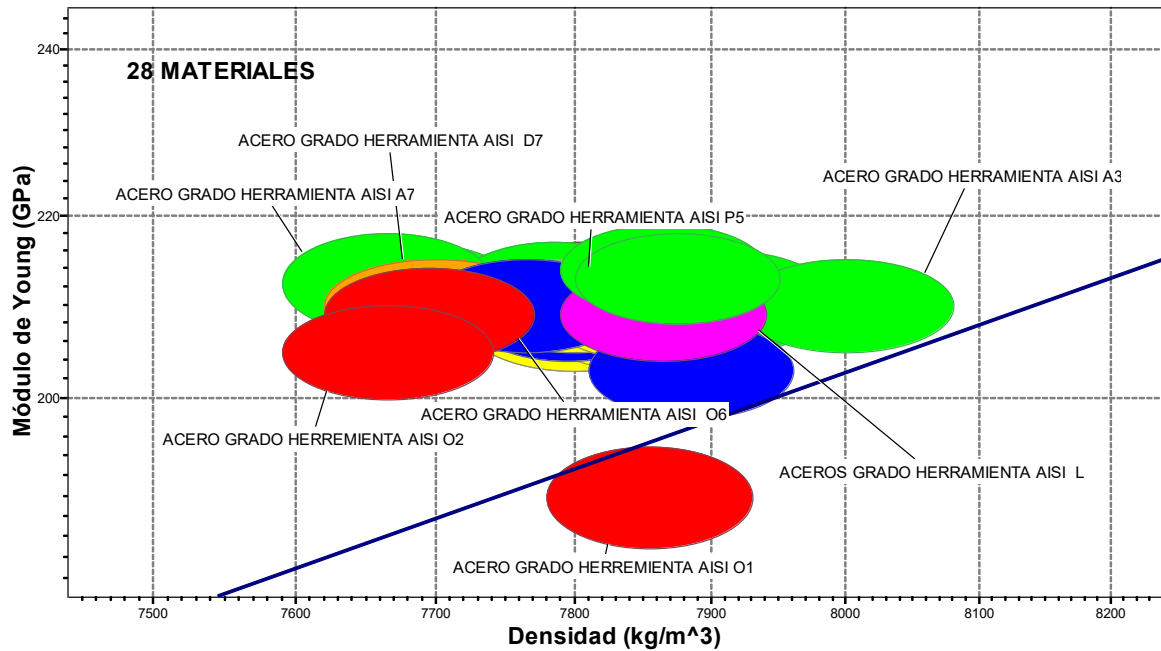


Figura 32. Mapa de materiales con un límite de dureza. (Módulo de Young vs densidad)

De los aceros seleccionados se estima que algunos proveedores en México sólo venden los siguientes aceros en las dimensiones requeridas (Tabla 7).

Tabla 7. Proveedores y aceros vendidos en México.

| AISI | Aceros fortuna | Irsacero | Levinson | Barrgon | Serviacero | SISA |
|------|----------------|----------|----------|---------|------------|------|
| D1 | x | x | | | | |
| D2 | x | x | x | x | x | x |
| O2 | x | x | x | | | |
| D3 | | x | | | | |
| D4 | | x | | | | |
| A2 | | | | | x | x |
| P4 | x | | x | | x | x |
| 4140 | x | x | x | x | x | x |

Entonces al acotar con respecto a la disponibilidad, se observa que solo 7 aceros son los que cumplen con las características que deseamos, además se agrega el acero 4140 para comparar (Figura 33). Se menciona que el acero AISI D2 está por debajo y por eso no se alcanza a distinguir en el mapa de materiales.

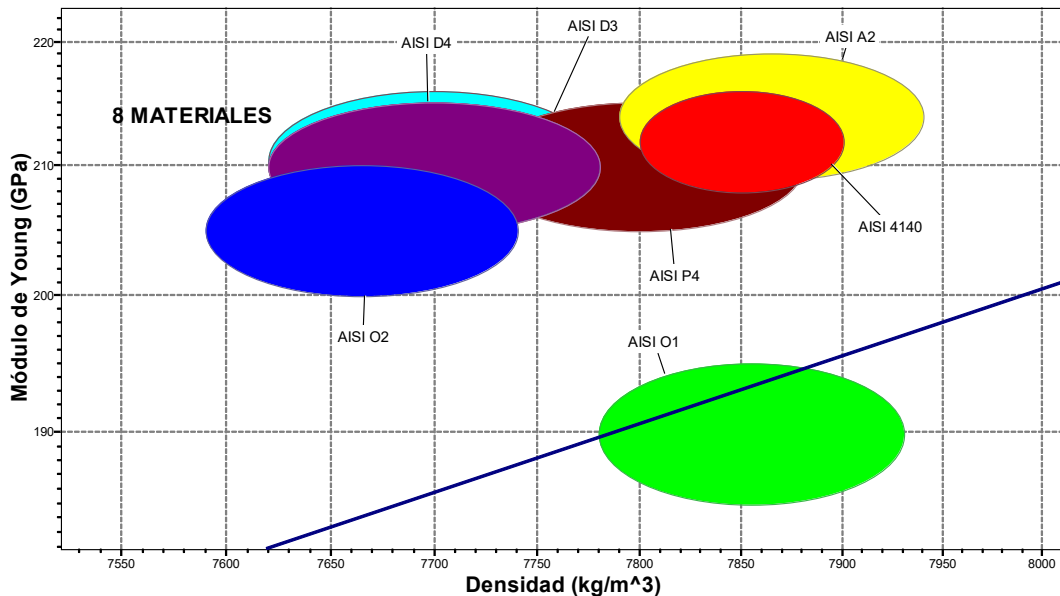


Figura 33. Mapa de materiales con un límite de disponibilidad. (Módulo de Young vs densidad).

Nuevamente se gráfica con respecto al precio donde se observa que el acero AISI 4140 es el más económico. El acero 4140 solo se agregó debido a que en los textos ya mencionados lo utilizan para algunas

partes del troquel sin embargo este no entra en la selección (Figura 34).

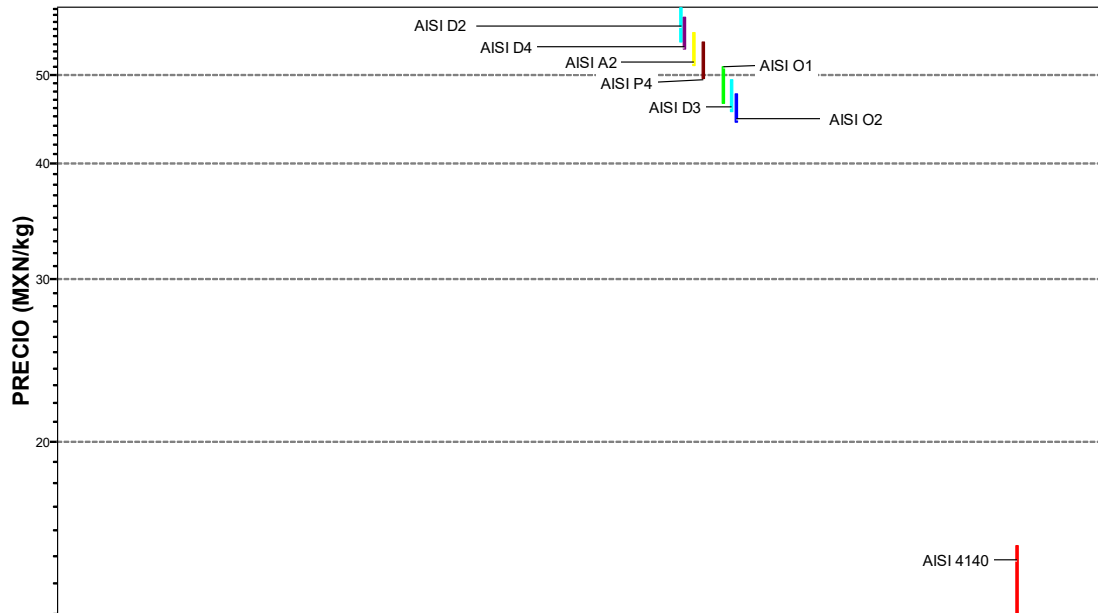


Figura 34. Diagrama de barras de precio (MXN/Kg) tomando en cuenta el acero AISI 4140

Así que de los materiales que si son resultados de la selección el acero AISI O2 es el más económico (Figura 35).

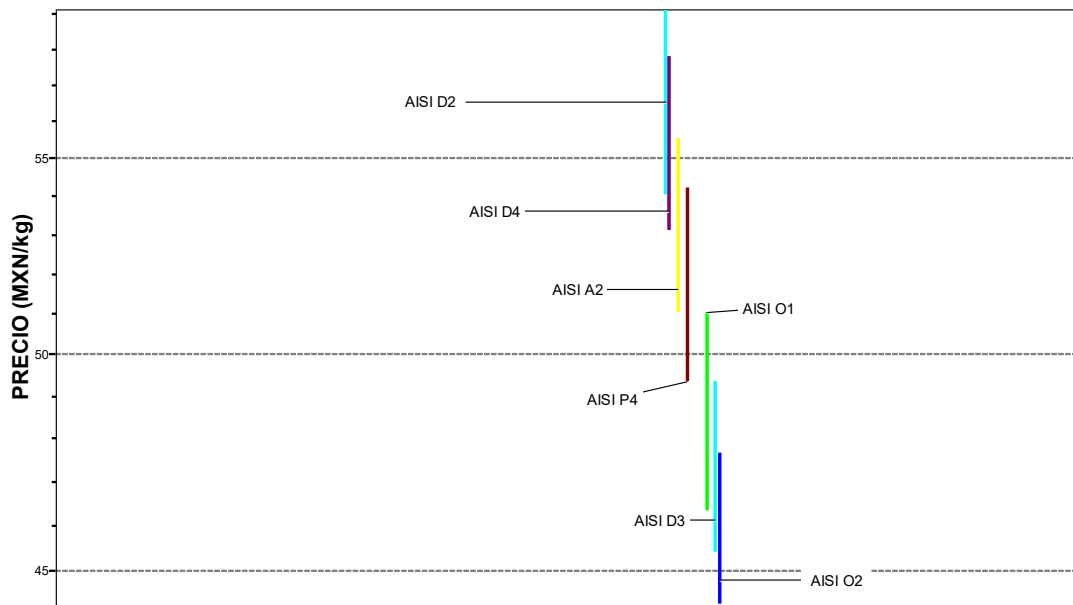


Figura 35. Diagrama de barras de precio (MXN/Kg) de los resultados de la selección.

En la figura anterior se ve que los aceros más económicos son el AISI D3, AISI O1 y AISI O2. Sin embargo una vez maquinadas algunas piezas del troquel deben ser llevadas a tratamiento térmico por lo que su coeficiente de expansión debe ser el menor posible, al realizar un gráfico de éste tenemos que el acero AISI O2 es la mejor opción, debido a que su coeficiente de expansión es el segundo más bajo después del AISI A2 (Figura 36).

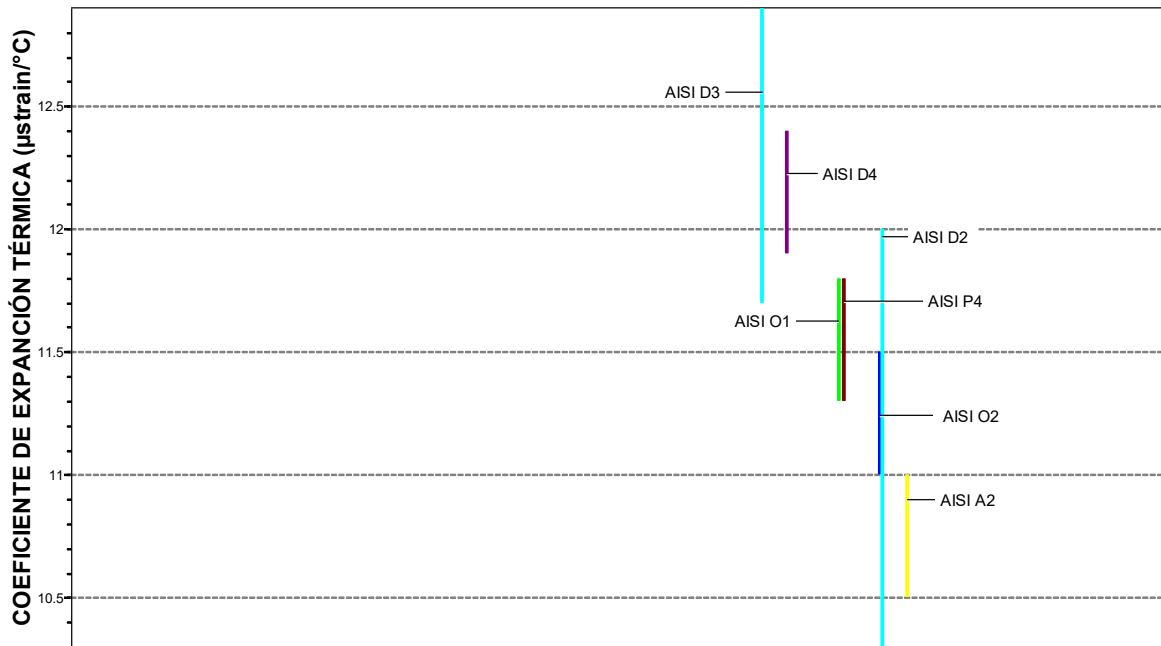


Figura 36. Diagrama de barras del coeficiente de expansión térmica ($\mu\text{strain}/^{\circ}\text{C}$) de los resultados de la selección.

En la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos de la selección con algunas de las propiedades que influyen en la decisión final de la selección.

Se observa que el acero con menor precio es el AISI O2 con un coeficiente de expansión relativamente bajo, se encuentra entre los más bajos en densidad y su módulo de Young no es el más alto pero comparado con el AISI O1 si lo es, por lo que es un buen candidato para realizar un tratamiento térmico sin que este cambie de dimensiones de manera drástica.

Tabla 8. Resultados de la selección y propiedades a considerar.

| Material | Densidad (kg/m ³) | Módulo de Young (GPA) | Precio MXN/m ³ | Coefficiente de expansión térmica μstrain/°C | HRC |
|----------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---|---------|
| AISI A2 | 7.79e3 - 7.94e3 | 209 - 219 | 51 - 55.5 | 10.5 - 11 | 52 - 62 |
| AISI D4 | 7.62e3 - 7.78e3 | 205 - 215 | 53.1 - 57.8 | 11.9 - 12.4 | 58 - 64 |
| AISI D3 | 7.62e3 - 7.78e3 | 205 - 216 | 45.4 - 49.4 | 11.7 - 12.9 | 58 - 64 |
| AISI D2 | 7.62e3 - 7.78e3 | 205 - 215 | 54 - 59.1 | 10.3 - 12 | 58 - 64 |
| AISI O1 | 7.78e3 - 7.93e3 | 185 - 195 | 46.3 - 51 | 11.3 - 11.8 | 57 - 62 |
| AISI O2 | 7.59e3 - 7.74e3 | 200 - 210 | 44.3 - 47.7 | 11 - 11.5 | 57 - 62 |
| AISI P4 | 7.72e3 - 7.88e3 | 205 - 215 | 49.4 - 54.2 | 11.3 - 11.8 | 58 - 64 |

Normalmente, las diferencias pequeñas en la dureza no tienen un efecto significativo en la resistencia al desgaste, pero sí en la resistencia a la deformación.

3. CONCLUSIONES

La selección de materiales utilizando el software Ces-Edupack combinado con el método tradicional y los conocimientos adquiridos en la carrera permiten que el trabajo de búsqueda disminuya, el método de Ashby funciona debido a que por la experiencia del taller y la búsqueda realizada, los materiales como lo son el AISI O1 y el AISI D2 estén dentro de los materiales seleccionados.

Los siete materiales seleccionados tenían propiedades similares pero al tomar en cuenta los criterios de costo y el módulo de Young se puede concluir el material con el que se pueden fabricar los punzones, los machos de corte, las buterolas y la matriz de corte que son los elementos de acción directa.

Con ayuda del Ces-Edupack se determina que el acero AISI O2 es un material que puede disminuir los costos de producción del troquel manteniendo las propiedades mecánicas requeridas debido a que es el material más ligero de todos, su módulo de Young no es el más alto sin embargo considerando el precio, es el material más económico.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ashby, M, F. (1992). Materials Selection in Mechanical Design. Oxford: Pergamon Press.

- [2] Mangonon, Pat. L. (2001). Ciencia de los materiales selección y diseño. México: Prentice Hall

- [3] Ashby, M. F. & D. Cebon. (2007). Teaching Engineering Materials: the CES EduPack. Octubre 10, 2017, de Granta.
Sitio web:
http://web.mit.edu/course/3/3.225/refs/Teaching_Engineering_Materials.pdf

- [4] Farag, M.M. (1989). Selection of Materials and Manufacturing Processes for Engineering Design. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall.

- [5] Ashby, M.F. and Johnson, K. (2009) "Materials and Design, the Art and Science of Material Selection in Product Design", 2nd edition, Butterworth Heinemann, Oxford, UK.

- [6] Tomas, K. F. (1997). Engineering Materials Technology: Structures, Processing, Properties and Selection. Ohio: Ed Prentice Hall.

- [7] González, h., & Mesa g., d. (2004). La importancia del método en la selección de materiales. Scientia Et Technica, X (24), 175-180.

- [8] Ces-Edupack
<http://www.graCntadesing.com>
3/10/2017 13:30pm

- [9] Cerón, H. J. E. Desarrollo de aspectos metodológicos en el diseño de matrices progresivas. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria, 2013.

- [10] Archundia, L.M.A. Diseño y manufactura de un troquel de corte con fines didácticos. Tesis de licenciatura. Facultad de ingeniería UNAM, 2015.

- [11] Castillo, C. J. C. Desarrollo de una técnica de diseño de troqueles de alta velocidad para producir laminación rotoring. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Nuevo León facultad de ingeniería mecánica y eléctrica, 2001.

- [12] Chávez, S. D. et. al. Diseño y fabricación de un troquel para placas de apagador de aluminio. Tesis de licenciatura. Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica IPN 2008.

- [13] Alvarado, M. C. A. et. al. Diseño y fabricación de un troquel para elaborar una arandela por golpe, Norma DIN 125. Tesis de licenciatura. Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica IPN 2008.
- [14] Camarrero, T. J. Matrices moldes y utillajes (2010) S.L. Cie. Inversiones Editoriales Dossat-2000.
- [15] Krauss, G., Steels, Processing, Structure, and Performance, ASM Internacional 2005.
- [16] ASM Metals Handbook, Vol. 1, 10th Ed., Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, 1990.

APÉNDICE I

Fuerzas que soportará el troquel

A continuación se calcula la fuerza de corte requerido de la prensa para la pieza calculado con la fórmula 3.

$$F = \frac{305 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 1.905\text{mm} * 89.85\text{mm} = 52341.20\text{N}$$
$$\frac{52341.20}{1000} = 52.34 \text{ TON}$$

Realizando los cálculos para el rendimiento y eficiencia del troquel
Obtenemos las tres fuerzas principales

Fuerza de corte

$$F_c = 52341.19937\text{N}$$

Fuerza de cote considerando el rozamiento

$$F'_c = 62809.43924 \text{ N}$$

La fuerza de extracción considerando el rozamiento

$$F'_e = 5024.755139\text{N}$$

APÉNDICE II

La Tabla 1. Lista las composiciones químicas nominales y distintas clases de aceros para herramientas que existen.

Tabla 1. Composición química de los aceros grado herramienta.

| | | % composición química | | | | | | | | |
|--|---------------|-----------------------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| AISI | UNS | C | Mn | Si | Cr | V | W | Mo | Co | Ni |
| Aceros de herramientas de endurecimiento al agua | | | | | | | | | | |
| W1 | T72301 | 0.60-1.40(a) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| W2 | T72302 | 0.60-1.40(a) | ... | ... | ... | 0.25 | ... | ... | ... | ... |
| W5 | T72305 | 1.10 | ... | ... | 0.50 | ... | ... | ... | ... | ... |
| Aceros para herramientas resistentes al impacto | | | | | | | | | | |
| S1 | T41901 | 0.50 | ... | ... | 1.50 | ... | 2.50 | ... | ... | ... |
| S2 | T41902 | 0.50 | ... | 1.00 | ... | ... | ... | 0.50 | ... | ... |
| S5 | T41905 | 0.55 | 0.80 | 2.00 | ... | ... | ... | 0.40 | ... | ... |
| S6 | T41906 | 0.45 | 1.40 | 2.25 | 1.50 | ... | ... | 0.40 | ... | ... |
| S7 | T41907 | 0.50 | ... | ... | 3.25 | ... | ... | 1.40 | ... | ... |
| Aceros para herramientas para trabajado en frío (endurecidos en aceite) | | | | | | | | | | |
| O1 | T31501 | 0.90 | 1.0 | ... | 0.50 | ... | 0.50 | ... | ... | ... |
| O2 | T31502 | 0.90 | 1.60 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| O6 | T31506 | 1.45 | 0.80 | 1.00 | ... | ... | ... | 0.25 | ... | ... |
| O7 | T31507 | 1.20 | ... | ... | 0.75 | ... | 1.75 | ... | ... | ... |
| Aceros para herramientas para trabajado en frío (endurecidos al aire) | | | | | | | | | | |
| A2 | T30102 | 1.00 | ... | ... | 5.00 | ... | ... | 1.00 | ... | ... |
| A3 | T30103 | 1.25 | ... | ... | 5.00 | 1.00 | ... | 1.00 | ... | ... |
| A4 | T30104 | 1.00 | 2.00 | ... | 1.00 | ... | ... | 1.00 | ... | ... |
| A6 | T30106 | 0.70 | 2.00 | ... | 1.00 | ... | ... | 1.25 | ... | ... |
| A7 | T30107 | 2.25 | ... | ... | 5.25 | 4.75 | 1.00 | 1.00 | ... | ... |
| A8 | T30108 | 0.55 | ... | ... | 5.00 | ... | 1.25 | 1.25 | ... | ... |
| A9 | T30109 | 0.50 | ... | ... | 5.00 | 1.00 | ... | 1.40 | ... | 1.50 |
| A10 | T30110 | 1.35 | 1.80 | 1.25 | ... | ... | ... | 1.50 | ... | 1.80 |
| Aceros para herramientas para trabajado en frío con alto contenido de cromo y carbono | | | | | | | | | | |
| D2 | T30402 | 1.50 | ... | ... | 12.00 | 1.00 | ... | 1.00 | ... | ... |
| D3 | T30403 | 2.25 | ... | ... | 12.00 | ... | ... | ... | ... | ... |
| D4 | T30404 | 2.25 | ... | ... | 12.00 | ... | ... | 1.00 | ... | ... |
| D5 | T30405 | 1.50 | ... | ... | 12.00 | ... | ... | 1.00 | 3.00 | ... |
| D7 | T30407 | 2.35 | ... | ... | 12.00 | 4.00 | ... | 1.00 | ... | ... |
| Aceros para herramientas de uso especial y baja aleación | | | | | | | | | | |
| L2 | T61202 | 0.50-1.10(a) | ... | ... | 1.00 | 0.20 | ... | ... | ... | ... |
| L6 | T61206 | 0.70 | ... | ... | 0.75 | ... | ... | 0.25© | ... | 1.50 |
| Aceros para herramientas usados en moldes | | | | | | | | | | |
| P2 | T51602 | 0.07 | ... | ... | 2.00 | ... | ... | 2.00 | ... | 0.50 |
| P3 | T51603 | 0.10 | ... | ... | 0.60 | ... | ... | ... | ... | 1.25 |

**SELECCIÓN DE MATERIALES DE UN TROQUEL PROGRESIVO PARA UNA MORDAZA J
(CES-EDUPACK 2017)**

| | | | | | | | | | | |
|--|---------------|------------------|----------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| P4 | T51604 | 0.07 | ... | ... | 5.00 | ... | ... | 0.75 | ... | ... |
| P5 | T51605 | 0.10 | ... | ... | 2.25 | ... | ... | ... | ... | ... |
| P6 | T51606 | 0.10 | ... | ... | 1.50 | ... | ... | ... | ... | 3.50 |
| P20 | T51620 | 0.35 | ... | ... | 1.70 | ... | ... | 0.40 | ... | ... |
| P21 | T51621 | 0.20 | 1.20(Al) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 4.00 |
| Aceros para herramientas para trabajado en caliente (cromo) | | | | | | | | | | |
| H10 | T20810 | 0.40 | ... | ... | 3.25 | 0.40 | ... | 2.50 | ... | ... |
| H11 | T20811 | 0.35 | ... | ... | 5.00 | 0.40 | 1.50 | 1.50 | ... | ... |
| H12 | T20812 | 0.35 | ... | ... | 5.00 | 0.40 | ... | 1.50 | ... | ... |
| H13 | T20813 | 0.35 | ... | ... | 5.00 | 1.00 | 5.00 | 1.50 | ... | ... |
| H14 | T20814 | 0.40 | ... | ... | 5.00 | ... | 4.25 | ... | 4.25 | ... |
| H19 | T20819 | 0.40 | ... | ... | 4.25 | 2.00 | ... | ... | ... | ... |
| % composición química | | | | | | | | | | |
| AISI | UNS | C | Mn | Si | Cr | V | W | Mo | Co | Ni |
| Aceros para herramientas para trabajado en caliente (Tungteno) | | | | | | | | | | |
| H21 | T20821 | 0.35 | ... | ... | 3.50 | ... | 9.00 | ... | ... | ... |
| H22 | T20822 | 0.35 | ... | ... | 2.00 | ... | 11.00 | ... | ... | ... |
| H23 | T20823 | 0.30 | ... | ... | 12.00 | ... | 12.00 | ... | ... | ... |
| H24 | T20824 | 0.45 | ... | ... | 3.00 | ... | 15.00 | ... | ... | ... |
| H25 | T20825 | 0.25 | ... | ... | 4.00 | ... | 15.00 | ... | ... | ... |
| H26 | T20826 | 0.50 | ... | ... | 4.00 | 1.00 | 18.00 | ... | ... | ... |
| Aceros para herramientas para trabajado en caliente (Molibdeno) | | | | | | | | | | |
| H42 | T20842 | 0.60 | ... | ... | 4.00 | 2.00 | 6.00 | 5.00 | ... | ... |
| Aceros para herramientas para trabajado en caliente (patentados) | | | | | | | | | | |
| 6G | | 0.55 | 0.80 | 0.25 | 1.00 | 0.10 | ... | 0.45 | ... | ... |
| 6F2 | | 0.55 | 0.75 | 0.25 | 1.00 | ... | ... | 0.30 | ... | 1.00 |
| 6F3 | | 0.55 | 0.60 | 0.85 | 1.00 | 0.10 | ... | 0.75 | ... | 1.80 |
| Aceros para herramienta de alta velocidad (Tugsteno) | | | | | | | | | | |
| T1 | T12001 | 0.75 | ... | ... | 4.00 | 1.00 | 18.00 | ... | ... | ... |
| T2 | T12002 | 0.80 | ... | ... | 4.00 | 2.00 | 18.00 | ... | ... | ... |
| T2 | T12004 | 0.75 | ... | ... | 4.00 | 1.00 | 18.00 | ... | 5.00 | ... |
| T5 | T12005 | 0.80 | ... | ... | 4.00 | 2.00 | 18.00 | ... | 8.00 | ... |
| T6 | T12006 | 0.80 | ... | ... | 4.00 | 1.50 | 20.00 | ... | 12.00 | ... |
| T8 | T12008 | 0.75 | ... | ... | 4.00 | 2.00 | 14.00 | ... | 5.00 | ... |
| T15 | T12015 | 1.50 | ... | ... | 4.00 | 5.00 | 12.00 | ... | 5.00 | ... |
| Aceros para herramienta de alta velocidad (molibdeno) | | | | | | | | | | |
| M1 | T11301 | 0.80(a) | ... | ... | 4.00 | 1.00 | 1.50 | 8/0.0 | ... | ... |
| M2 | T11302 | 0.85- 1.00(a) | ... | ... | 4.00 | 2.00 | 6.00 | 5.00 | ... | ... |
| M3 | T11303 | 1.05 | ... | ... | 4.00 | 2.40 | 6.00 | 5.00 | ... | ... |
| M3 | T11303 | 1.20 | ... | ... | 4.00 | 3.00 | 6.00 | 5.00 | ... | ... |
| M4 | T11304 | 1.30 | ... | ... | 4.00 | 4.00 | 5.50 | 4.50 | ... | ... |
| M6 | T11306 | 0.80 | ... | ... | 4.00 | 2.00 | 4.00 | 5.00 | 12.00 | ... |
| M7 | T11307 | 1.00 | ... | ... | 4.00 | 2.00 | 1.75 | 8.75 | ... | ... |
| M10 | T11310 | 0.85- 1.00(a) | ... | ... | 4.00 | 2.00 | ... | 8.00 | ... | ... |
| M30 | T11330 | 0.80 | ... | ... | 4.00 | 1.25 | 2.00 | 8.00 | 5.00 | ... |
| M33 | T11333 | 0.90 | ... | ... | 4.00 | 1.15 | 1.50 | 9.50 | 8.00 | ... |
| M34 | T11334 | 0.90 | ... | ... | 4.00 | 2.00 | 2.00 | 8.00 | 8.00 | ... |
| M36 | T11336 | 0.80 | ... | ... | 4.00 | 2.00 | 6.00 | 5.00 | 8.00 | ... |

**SELECCIÓN DE MATERIALES DE UN TROQUEL PROGRESIVO PARA UNA MORDAZA J
(CES-EDUPACK 2017)**

| Aceros para herramienta ultrarrápidos | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----|
| M41 | T11341 | 1.10 | ... | ... | 4.25 | 2.00 | 6.75 | 3.75 | 5.00 | ... |
| M42 | T11342 | 1.10 | ... | ... | 3.75 | 1.15 | 1.50 | 9.50 | 8.00 | ... |
| M43 | T11343 | 1.20 | ... | ... | 3.75 | 1.60 | 2.75 | 8.00 | 8.25 | ... |
| M44 | T11344 | 1.15 | ... | ... | 4.25 | 2.00 | 5.25 | 6.25 | 12.00 | ... |
| M46 | T11346 | 1.25 | ... | ... | 4.00 | 3.20 | 2.00 | 8.25 | 8.25 | ... |
| M47 | T11347 | 1.10 | ... | ... | 3.75 | 1.25 | 1.50 | 9.50 | 5.00 | ... |
| Aceros maraging | | | | | | | | | | |
| Tipo | % composición química | | | | | | | | | |
| | C | Mn | Si | Al | Ti | Mo | Co | Ni | | |
| GRADO 90 | 0.30 máx. | 0.10 máx. | 0.12 máx. | 0.10 | 0.30 | 3.25 | 8.50 | 18.00 | | |
| GRADO 110 | 0.30 máx. | 0.10 máx. | 0.12 máx. | 0.10 | 0.50 | 4.85 | 7.75 | 18.00 | | |
| GRADO 125 | 0.30 máx. | 0.10 máx. | 0.12 máx. | 0.10 | 0.70 | 5.00 | 9.00 | 18.00 | | |

APÉNDICE III

Hoja técnica registrada en el software Ces-Edupack

Tool steel, AISI O2 (oil-hardening cold work)

General information

Designation

AISI O2

Condition

Normalized & annealed; oil quenched;
tempered at 175–260°C

Typical uses

Cutting tools, Single-points types, Milling cutters, Drills, reamers, Taps, Threading dies, Form cutters

Cold-forming dies, Bending, forming, drawing and deep-drawing dies and punches

Shearing tools Dies for piercing, punching and trimming, Shear blades

Die casting and molding dies

Structural parts for severe service conditions

Composition overview

Compositional summary

Fe95-97 / Mn1.4-1.8 / C0.85-0.95 / Cr0.5 / Mo0.3 (impurities: Si<0.5, Ni<0.3, V<0.3, P<0.03, S<0.03)

Material family

Metal (ferrous)

Base material

Fe (Iron)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

| | | | | |
|-----------------|------|---|------|---|
| C (carbon) | 0.85 | - | 0.95 | % |
| Cr (chromium) | 0.5 | | | % |
| Fe (iron) | 95.3 | - | 97 | % |
| Mn (manganese) | 1.4 | - | 1.8 | % |
| Mo (molybdenum) | 0.3 | | | % |
| Ni (nickel) | 0 | - | 0.3 | % |
| P (phosphorus) | 0 | - | 0.03 | % |
| S (sulfur) | 0 | - | 0.03 | % |
| Si (silicon) | 0 | - | 0.5 | % |
| V (vanadium) | 0 | - | 0.3 | % |

Price

Price

* 44.3 - 47.7 MXN/kg

Price per unit volume

* 3.36e5 - 3.7e5 MXN/m³

Physical properties

Density

7.59e3 - 7.74e3 kg/m³

Mechanical properties

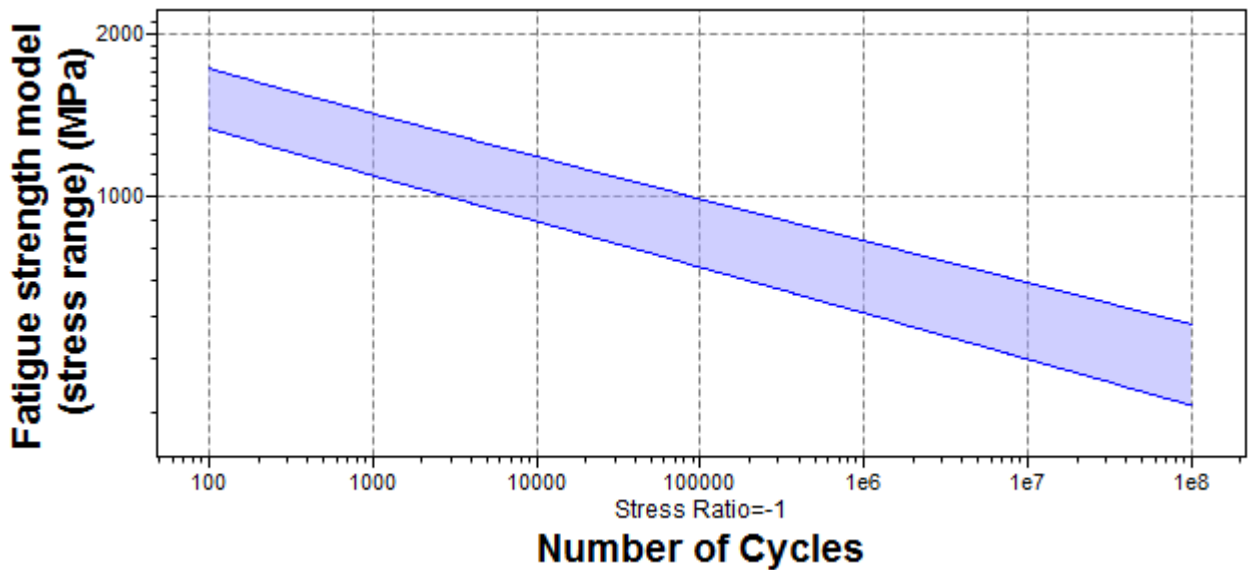
Young's modulus

200 - 210 GPa

**SELECCIÓN DE MATERIALES DE UN TROQUEL PROGRESIVO PARA UNA MORDAZA J
(CES-EDUPACK 2017)**

| | | | | |
|--|----------|---|--------|----------|
| Yield strength (elastic limit) | * 1.8e3 | - | 2.14e3 | MPa |
| Tensile strength | * 2.04e3 | - | 2.36e3 | MPa |
| Elongation | * 3.5 | - | 6.1 | % strain |
| Compressive strength | * 1.8e3 | - | 2.14e3 | MPa |
| Flexural modulus | * 200 | - | 210 | GPa |
| Flexural strength (modulus of rupture) | * 1.8e3 | - | 2.14e3 | MPa |
| Shear modulus | * 77 | - | 81 | GPa |
| Bulk modulus | * 159 | - | 167 | GPa |
| Poisson's ratio | 0.285 | - | 0.295 | |
| Shape factor | 12 | | | |
| Hardness - Vickers | 660 | - | 770 | HV |
| Hardness - Rockwell C | 57 | - | 62 | HRC |
| Fatigue strength at 10 ⁷ cycles | * 540 | - | 641 | MPa |
| Fatigue strength model (stress range) | * 831 | - | 1.1e3 | MPa |

Parameters: Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 2.5e4cycles



| | | | | |
|---|-----------|---|---------|--|
| Mechanical loss coefficient (tan delta) | * 1.73e-5 | - | 2.31e-5 | |
|---|-----------|---|---------|--|

Impact & fracture properties

| | | | | |
|--------------------|--------|---|------|----------------------|
| Fracture toughness | * 19.3 | - | 22.1 | MPa.m ^{0.5} |
|--------------------|--------|---|------|----------------------|

Thermal properties

| | | | | |
|-------------------------------|----------|---|--------|------------|
| Melting point | * 1.73e3 | - | 1.77e3 | K |
| Maximum service temperature | * 438 | - | 488 | K |
| Minimum service temperature | * 200 | - | 220 | K |
| Thermal conductivity | * 41.2 | - | 44.5 | W/m.°C |
| Specific heat capacity | * 470 | - | 489 | J/kg.°C |
| Thermal expansion coefficient | * 11 | - | 11.5 | μstrain/°C |
| Latent heat of fusion | 265 | - | 280 | kJ/kg |

Electrical properties

| | | | | |
|------------------------|---------|---|-------|---------|
| Electrical resistivity | * 24.5 | - | 30.2 | μohm.cm |
| Galvanic potential | * -0.51 | - | -0.43 | V |

Magnetic properties

Magnetic type Magnetic

Optical properties

Transparency Opaque

Critical materials risk

Contains >5wt% critical elements? No

Tool steels

| | |
|-----------------------------------|------|
| Decarburization resistance rating | Good |
| Distortion resistance rating | Good |
| Cracking resistance rating | Good |
| Hot hardness rating | Poor |
| Machinability rating | Good |
| Toughness rating | Poor |
| Wear resistance rating | Poor |

Processing properties

| | | |
|---------------------|-------------|---|
| Metal casting | Unsuitable | |
| Metal cold forming | Limited use | |
| Metal hot forming | Limited use | |
| Metal press forming | Unsuitable | |
| Metal deep drawing | Unsuitable | |
| Machining speed | 6.4 | m/min |
| Weldability | Poor | Preheating and post weld heat treatments are required |
| Notes | | |
| Carbon equivalency | 1.24 | - 1.49 |

Durability

| | |
|------------------------------------|--------------|
| Water (fresh) | Acceptable |
| Water (salt) | Limited use |
| Weak acids | Limited use |
| Strong acids | Unacceptable |
| Weak alkalis | Acceptable |
| Strong alkalis | Limited use |
| Organic solvents | Excellent |
| Oxidation at 500C | Acceptable |
| UV radiation (sunlight) | Excellent |
| Galling resistance (adhesive wear) | Excellent |

Notes

Tool steels are designed for applications which require galling resistance. Commonly nitrided to further improve resistance.

Flammability Non-flammable

Corrosion resistance of metals

Stress corrosion cracking Slightly susceptible

Note Rated in chloride; May be
susceptible in halide,
ammonia, nitrogen, acidic,

**SELECCIÓN DE MATERIALES DE UN TROQUEL PROGRESIVO PARA UNA MORDAZA J
(CES-EDUPACK 2017)**

| | | | | caustic, carbonate environments |
|---|----------|---|-------|------------------------------------|
| Primary production energy, CO2 and water | | | | |
| Embodied energy, primary production | * 29.2 | - | 32.2 | MJ/kg |
| CO2 footprint, primary production | * 2.51 | - | 2.77 | kg/kg |
| Water usage | * 49.8 | - | 55 | l/kg |
| Processing energy, CO2 footprint & water | | | | |
| Casting energy | * 10.9 | - | 12.1 | MJ/kg |
| Casting CO2 | * 0.818 | - | 0.904 | kg/kg |
| Casting water | * 20.6 | - | 31 | l/kg |
| Rough rolling, forging energy | * 16.5 | - | 18.2 | MJ/kg |
| Rough rolling, forging CO2 | * 1.24 | - | 1.37 | kg/kg |
| Rough rolling, forging water | * 8.6 | - | 12.9 | l/kg |
| Extrusion, foil rolling energy | * 32.7 | - | 36.2 | MJ/kg |
| Extrusion, foil rolling CO2 | * 2.45 | - | 2.71 | kg/kg |
| Extrusion, foil rolling water | * 15.5 | - | 23.3 | l/kg |
| Wire drawing energy | * 122 | - | 135 | MJ/kg |
| Wire drawing CO2 | * 9.14 | - | 10.1 | kg/kg |
| Wire drawing water | * 45.9 | - | 68.9 | l/kg |
| Metal powder forming energy | * 38.1 | - | 42 | MJ/kg |
| Metal powder forming CO2 | * 3.05 | - | 3.36 | kg/kg |
| Metal powder forming water | * 41.5 | - | 62.2 | l/kg |
| Vaporization energy | * 1.09e4 | - | 1.2e4 | MJ/kg |
| Vaporization CO2 | * 815 | - | 901 | kg/kg |
| Vaporization water | * 4.53e3 | - | 6.8e3 | l/kg |
| Coarse machining energy (per unit wt removed) | * 2.91 | - | 3.21 | MJ/kg |
| Coarse machining CO2 (per unit wt removed) | * 0.218 | - | 0.241 | kg/kg |
| Fine machining energy (per unit wt removed) | * 24.8 | - | 27.4 | MJ/kg |
| Fine machining CO2 (per unit wt removed) | * 1.86 | - | 2.06 | kg/kg |
| Grinding energy (per unit wt removed) | * 49.1 | - | 54.3 | MJ/kg |
| Grinding CO2 (per unit wt removed) | * 3.68 | - | 4.07 | kg/kg |
| Non-conventional machining energy (per unit wt removed) | * 109 | - | 120 | MJ/kg |
| Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed) | * 8.15 | - | 9.01 | kg/kg |
| Recycling and end of life | | | | |
| Recycle | True | | | |
| Embodied energy, recycling | * 7.79 | - | 8.61 | MJ/kg |
| CO2 footprint, recycling | * 0.612 | - | 0.676 | kg/kg |
| Recycle fraction in current supply | 52.3 | - | 57.8 | % |
| Downcycle | True | | | |
| Combust for energy recovery | False | | | |
| Landfill | True | | | |
| Biodegrade | False | | | |