



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA



**“GUÍA DEL EXAMEN GENERAL PARA EL
EGRESO DE LA LICENCIATURA EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL. CONCEPTOS Y APLICACIONES EN
EL ÁREA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
PROCESOS DE MANUFACTURA.”**

TRABAJO ESCRITO

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO INDUSTRIAL

PRESENTA
SERGIO GARCÍA GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS:
M. I. SILVINA HERNÁNDEZ GARCÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D. F. 2007



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.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
I.1	Perfil del egresado	1
I.2	Definición del problema	2
II.	MÉTODOS	3
II.1	Método del caso	4
II.2	Métodos aplicados	4
II.3	Áreas de conocimiento	5
III.	CONCEPTOS Y APLICACIONES DE LA MECÁNICA DE SÓLIDOS BÁSICA	11
III.1	Fuerza axial, cortante, momento flexionante y cálculo de vigas	14
III.2	Análisis de esfuerzo	19
III.3	Análisis de deformación	21
III.4	Elementos sujetos a torsión	23
III.5	Deformación térmica	31
III.6	Deflexión de vigas	33
IV.	CONCEPTOS Y APLICACIONES DE LOS PROCESOS DE CONFORMADO DE MATERIALES	36
IV.1	Extrusión	38
IV.2	Fundición	41
IV.3	Recalcado	50
IV.4	Extrusión y soplado	54
IV.5	Embutido	56
V.	CONCEPTOS Y APLICACIONES DE LOS PROCESOS DE CORTE DE MATERIALES	62
V.1	Torneado	63
V.2	Taladrado	66
V.3	Fresado	70
V.4	Brochado	75
V.5	Maquinado electroquímico ECM	78
V.6	Maquinado por electrodescarga EDM	80
V.7	EDM por corte con alambre	81
VI.	RESULTADOS	88
VII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	89
VIII.	CONCLUSIONES	89
IX.	APÉNDICE	90
X.	BIBLIOGRAFÍA	98

Guía del examen general para el egreso de la licenciatura en Ingeniería Industrial. Conceptos y aplicaciones en el área de Ingeniería Mecánica y Procesos de Manufactura.

INTRODUCCIÓN

El campo de la ingeniería se divide en diversas disciplinas como la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Civil, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Química, Ingeniería Metalúrgica y también la Ingeniería Industrial de la que se tratará el siguiente trabajo.

La industria nacional e internacional requiere de egresados del ramo, quienes mediante su labor impulsen y modernicen las estructuras existentes dentro de los sectores productivo, comercial y de servicios. Así en México, esta disciplina debe contribuir a renovar la organización productiva y apoyar la industria en su conjunto, a fin de colocarla en un nivel competitivo, tanto en el mercado interno como en el externo.

Aunque en un principio la Ingeniería Industrial se inició con un Análisis sobre el Trabajo y la administración científica, posteriormente, profundizó en Estudios de Métodos, Planeación y Control de la Producción, Investigación de Operaciones y Control de la Calidad. En las últimas décadas ha rebasado el ámbito de la industria, aplicándose también a instituciones de servicios de salud, transporte, comercio, finanzas, seguridad industrial, ecología, entre otros.

El campo de acción del ingeniero industrial abarca los sistemas operativos y productivos, así como los financieros y los administrativos. Dentro de estas ramas sus principales actividades consisten en la integración, diseño, control, desarrollo e innovación de procesos y sistemas.

Su ejercicio profesional adopta diversas modalidades, desempeñándose como: ingeniero de todo el amplio espectro de la producción, ejecutivo, investigador, consultor y generador de empresas. Estas funciones las lleva a cabo dentro de las áreas de Planeación, Producción, Sistemas, Calidad, Materiales, Procesos Industriales, Capacitación, Proyectos, Envase y Embalaje, Logística, Reingeniería, Administración, Finanzas y Dirección de Empresas, a fin de optimizar los procesos industriales comerciales y de servicios, ostentando una competitividad internacional.

Perfil del egresado¹

Una vez concluida la licenciatura, el egresado contará con conocimientos de carácter formativo e informativo en las Ciencias Básicas, Ciencias de la Ingeniería, Ingeniería Aplicada y Ciencias Sociales y Humanidades los cuales le serán de

¹ <http://www.ingenieria.unam.mx/carreras/industrial.html>

utilidad durante su quehacer profesional para lograr su realización integral. Éstos constituirán también la base para especializarse, emprender estudios de Posgrado, y sobre todo, para mantenerse actualizado respecto a los constantes avances en el desarrollo de técnicas y las tecnologías de la Ingeniería Industrial. Asimismo, es importante que para desenvolverse profesionalmente en cualquier país maneje al menos un idioma extranjero, preferentemente el inglés.

De la misma manera, poseerá aptitudes y habilidades necesarias para su desarrollo como profesional ético, que le permitirán actuar con responsabilidad y con vocación de servicio a la sociedad e integrar grupos interdisciplinarios y multidisciplinarios, conformados por otros especialistas de la ingeniería y de otras profesiones.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

Respondiendo a la nueva opción para titulación por medio de un examen general de conocimientos, se pretende hacer una guía que abarque los temas más representativos en cada materia.

El objetivo de este trabajo es reunir, en una guía práctica, los conocimientos más importantes y relevantes de esta carrera, dando una visión amplia de las relaciones que existen entre los diversos temas de una manera diferente utilizando como una de las bases principales los casos.

Una parte de este trabajo tocará temas como la ciencia de los materiales, sus propiedades y los procesos de manufactura que se realizan con éstos, por lo que se analizarán los siguientes métodos y se utilizarán los más adecuados.

MÉTODOS²

Hay varios tipos de métodos para realizar un trabajo o una investigación, su uso depende del estudio que realicemos y pueden complementarse cuando sea necesario.

1. *Deductivo*

El método deductivo va de lo general a lo particular. Es aquel que parte de datos generales aceptados como válidos, para deducir, por medio del razonamiento lógico, varias suposiciones.

Muchos trabajos de investigación se realizan con apoyo en la llamada doctrina o dogmática, o sea los estudios realizados por especialistas en determinada área de las ciencias, dichos estudios se encuentran en libros, artículos, etcétera.

2. *Inductivo*

El método inductivo va de lo particular a lo general. Es aquel que establece un principio general una vez realizado el estudio y análisis de hechos o fenómenos en particular.

Este método se emplea en la investigación de campo, a sea en la llamada empírica o sociológica, a través de encuestas, entrevistas, censos u observaciones.

3. *Analítico*

Analizar significa desarticular, separar, clasificar. El método analítico consiste en la desmembración de un todo, descomponiéndolo en sus elementos para observar las causas, la naturaleza y los efectos.

El método analítico se usa en las primeras etapas de la investigación, como son la elección del tema, la elaboración del plan de trabajo y recopilación de material.

4. *Sintético*

La síntesis es el método de razonamiento que tiende a reconstruir un todo mediante los elementos distinguidos por el análisis. Es, en consecuencia, una exposición breve y metódica, un resumen.

El análisis proporciona el material requerido por la síntesis. Se usa para construir el trabajo final sobre el cual se asienta la estructura del escrito.

² Miguel López Ruiz. *Elementos para la investigación*. Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Investigaciones Jurídicas. México. 1998.

5. Histórico

En ocasiones hay que recurrir a la historia para ver la forma y las condiciones de cómo evolucionó un fenómeno para llegar a la forma actual. De esta manera se interpreta y comprenden mejor hechos y sucesos.

Este método se usa para elaborar el capítulo de antecedentes o evolución de un problema en un trabajo de investigación. Se vale de la heurística, es decir, la búsqueda o investigación de documentos o fuentes históricas. Así mismo, para hacer la reconstrucción mental de los hechos del pasado se recurre a la "hermenéutica", o arte de interpretar los textos.

6. Exegético

Es la operación racional de interpretación de las leyes, a través del análisis de su contenido, el tiempo y las características en que se produjeron éstas, así como los motivos de su creación.

7. Comparativo

Este método consiste en la operación de contraste entre elementos similares o diferentes, para después sacar una conclusión lógica. Por ejemplo, comparar el sistema de conmutación de penas de un país con el otro.

8. Método del caso

Este método considera que la práctica sobre la solución de problemas diversos cambia nuestra actitud frente a lo nuevo que pudieran ser dichos problemas.

Un principio importante en el que se basa este método es que aprender implica descubrir, explicar en nuestras propias palabras y saber comunicarlo a otras personas.

MÉTODOS APLICADOS

Por la amplitud de este trabajo y de acuerdo con el objetivo, los métodos que se utilizarán serán el método del caso, el analítico y el sintético, para la selección y planteamiento de temas, preguntas y problemas que sean de contenido fundamental para el egresado de la carrera de Ingeniería Industrial.

La base de este trabajo es el método del caso, ya que se presentan algunos análisis posibles de situaciones prácticas que existen en la empresa creando una actitud que nos permita profundizar siempre en los problemas y tomar así, las decisiones más acertadas.

Para alcanzar el objetivo ya mencionado se utilizará como complemento el método analítico para la organización del material en general y la recopilación del material bibliográfico y el método sintético ya que se pretende incluir, cuando sea necesario, una explicación breve que contenga los conceptos y aplicaciones fundamentales para las áreas de estudio ya mencionadas.

También se plantearán preguntas frecuentes con las que posiblemente se enfrente el ingeniero industrial en su quehacer cotidiano. Para dar solución a las preguntas será necesario que el estudiante recurra a diferentes fuentes para ver y recordar temas que se van relacionando a lo largo de toda la carrera.

Las técnicas que se utilizarán consistirán básicamente en la revisión de los programas de estudio de las asignaturas de la carrera de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería, selección de material pertinente para cada área, recopilación de la información más importante para presentarla a los profesores que estén más relacionados con las áreas que integran este trabajo, complementándolo con sus opiniones.

ÁREAS DE CONOCIMIENTO



FIG. 1.1

Esta guía se limitará a dos áreas en particular, específicamente de las ciencias de la ingeniería e ingeniería aplicada que son la mecánica de sólidos básica, los procesos de conformado y corte de materiales, según la figura 1.1. Para el estudio de estas áreas utilizaremos el método del caso que aproxima al ingeniero a la realidad laboral.

Método del caso³

En el quehacer del ingeniero se presentan situaciones diferentes que debe resolver, mismas que significan más oportunidades de someter a prueba su pensamiento, habilidades, conocimientos, entre otros recursos donde es necesaria una reacción rápida y eficaz.

Como ingenieros industriales un paso fundamental de nuestro aprendizaje es el poder observar de manera crítica cada situación, de modo que generemos preguntas sobre lo desconocido, lo que nos rodea en nuestro trabajo y verlo por partes, integrándolas al sistema que pertenecen y por medio de las preguntas generar respuestas que enriquecerán nuestro conocimiento por medio del deseo de aprender.

Cada perturbación en nuestra vida representa la oportunidad de cambiar y conseguir que lo emotivo de esta experiencia reafirme el conocimiento y el aprendizaje siga su evolución.

Por medio del método del caso podríamos describir las fases del aprendizaje así:

- La primera es de aceptar que no podemos pensar en todo lo que nuestros compañeros de trabajo o estudio pueden pensar.
- La segunda parte es aceptar con facilidad y naturalidad las necesidades de contar con la ayuda ajena.
- Por último el efecto más importante del método del caso es el de lograr que nuestro pensamiento sea independiente, aún de quienes parecen más expertos.

El método del caso consiste en el uso de sucesos reales como herramienta pedagógica para contrastar los conocimientos aprendidos en el aula con su aplicación en situaciones reales. Exige asumir el papel de protagonistas-practicantes en vez de mantener una actitud de teórica-observador y, por tanto, obliga a los participantes en un curso de formación a intentar salvar la distancia entre teoría y práctica.

Adicionalmente, crea un diálogo en el aula que rompe con los esquemas tradicionales de la lección magistral, implica a los participantes en su propio aprendizaje y facilita el trabajo en grupos.

Los estudios de caso deben cumplir una serie de condiciones para asegurar su utilidad pedagógica:

- 1) Autenticidad: Ser una situación concreta, sacada de la realidad.

³ <http://www.gestiopolis.com/canales2/rrhh/1/metcasos.htm>

- 2) Urgencia de la situación: Ser una situación problemática que provoca un diagnóstico o una decisión.
- 3) Orientación pedagógica: Ser una situación que puede proporcionar información y formación en un dominio del conocimiento o de la acción.

Justificación de la técnica

Este método de trabajo didáctico tiene un notable interés principalmente en aquellas áreas que requieren un entrenamiento para la formación teórica práctica de los estudiantes. Se pueden apuntar cinco razones fundamentales que avalan su eficacia:

- I. Los estudiantes desarrollan mejor sus capacidades mentales evaluando situaciones reales y aplicando conceptos que aprendiendo estos mismos conceptos simplemente a partir de ejemplos teóricos que están con frecuencia alejados de la vida real.
- II. Los estudiantes aprenden a desarrollar conceptos nuevos y a aplicar aquellos ya establecidos a situaciones novedosas. Por tanto, los estudiantes de este método estarán mejor preparados que los que sólo hayan aprendido de memoria los conceptos existentes.
- III. Los estudiantes asimilan mejor las ideas y conceptos que utilizan ellos mismos en el transcurso de la resolución de los problemas surgidos de la realidad documentado en los casos.
- IV. El trabajo en grupo y la interacción con otros estudiantes, necesarios en la práctica del método del caso, constituyen una preparación eficaz en los aspectos humanos de la gestión.
- V. Dado que esta técnica convierte a los estudiantes en participantes activos de su propio aprendizaje facilita la expresión de opiniones, creencias, actitudes y valores, además ayuda a desarrollar las siguientes habilidades:
 - La capacidad de observar en profundidad la realidad.
 - La comprensión de los fenómenos y hechos sociales.
 - La definición de la situación problemática sobre la que hay que operar.
 - La conceptualización de la relación entre teoría y acción.
 - La toma de decisiones.
 - El trabajo cooperativo.

El Proceso Operativo

La secuencia de operaciones que los participantes han de llevar a cabo constituye un proceso muy estructurado en la forma, pero con una gran flexibilidad respecto a los contenidos. Se centran básicamente en tres etapas:

Familiarización con el tema y los protagonistas a través de la lectura y formación de una impresión global y general sobre el caso.

Análisis detenido del relato que debe finalizar con una formulación de los problemas, la naturaleza de las decisiones a tomar y la identificación de los elementos principales que influyen sobre las acciones que se puedan emprender.

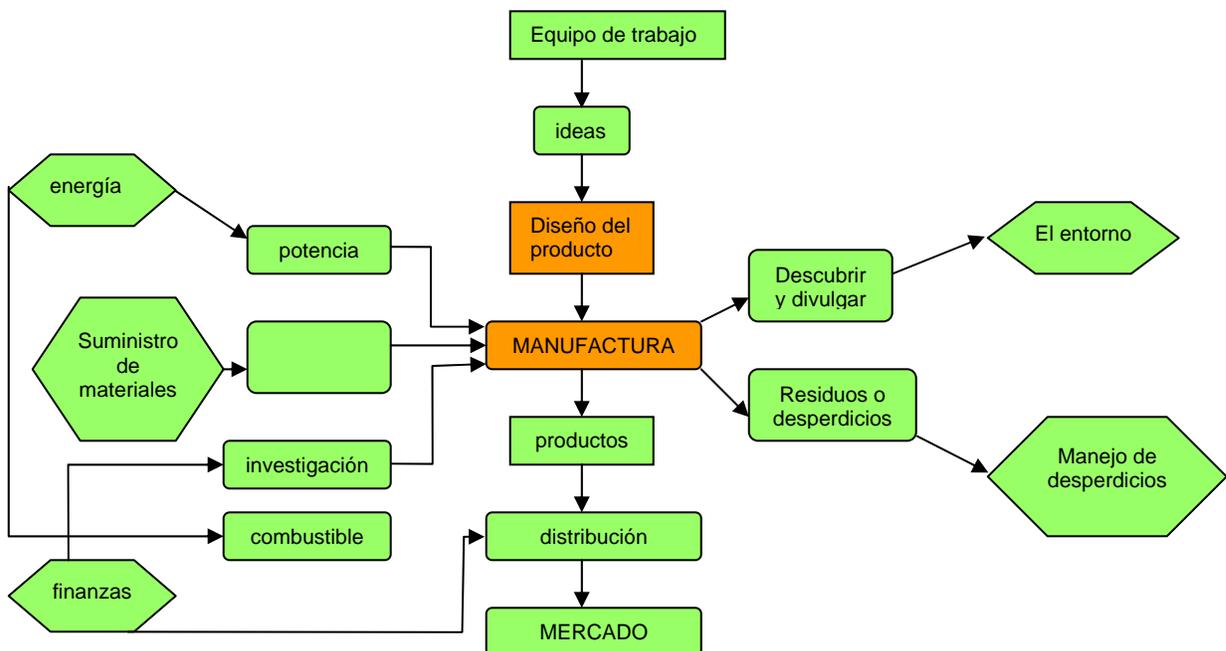
Preparación de las recomendaciones operativas para dar solución al caso estudiado.

Los participantes deben examinar con imparcialidad los documentos que se les proporcionan, identificar la información complementaria que necesitan, reflexionar y debatir sobre lo que debería hacerse para solucionar los problemas detectados.

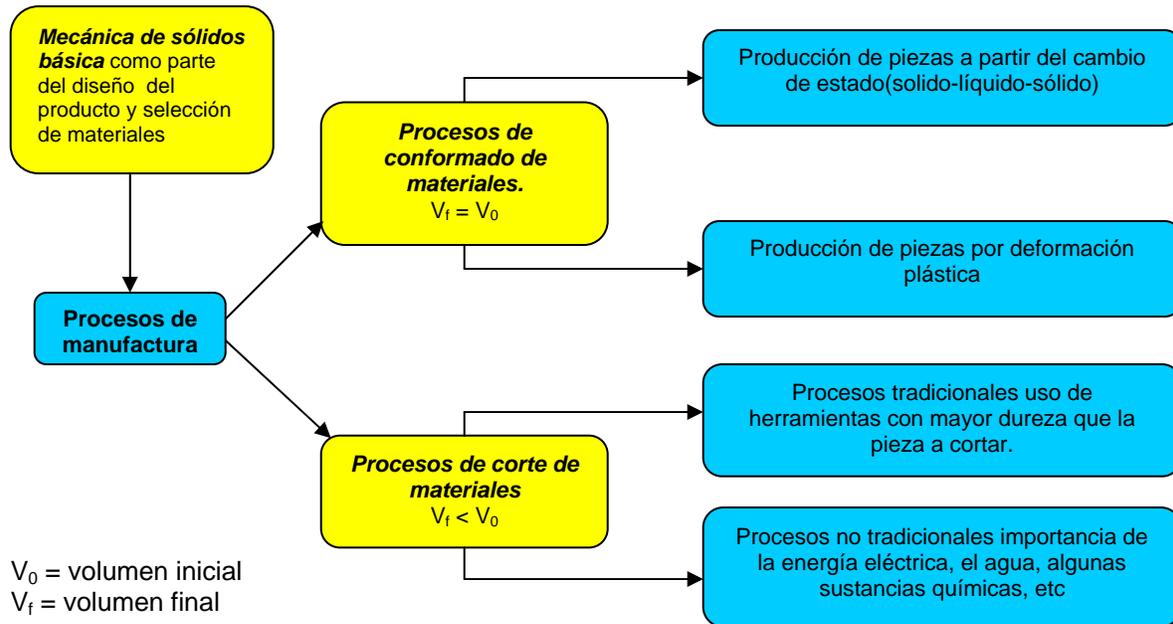
Es un proceso pedagógico flexible y abierto, en que las decisiones y soluciones a los problemas no están dadas a priori, sino que pueden cambiar en función de los supuestos teóricos y metodológicos que sirvan de punto de partida a las personas concretas que realice el estudio.

Finalmente, vemos que por medio del método del caso se pueden utilizar realmente los conocimientos tanto teóricos como los que dan la experiencia y que nos brindan todas las herramientas para enfrentar con éxito cualquier situación donde se necesite una mejora, pues nadie nos especificará cuál es el problema, sino que seremos capaces de descubrirlo y dar una diversidad de soluciones que nos lleven a alcanzar el objetivo del ingeniero industrial.

La importancia del dominio de las áreas del conocimiento que se consideran en este trabajo se observa en la representación del sistema de manufactura, donde el ingeniero industrial debe tener una visión que integre todas estas áreas con la finalidad de ofrecer soluciones para el beneficio de la empresa.



Para la participación en este sistema de manufactura podremos apoyarnos en la ingeniería aplicada como se muestra a continuación:



**GUÍA DEL EXAMEN GENERAL PARA EL EGRESO DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL. CONCEPTOS Y APLICACIONES EN EL ÁREA DE
INGENIERÍA MECÁNICA Y PROCESOS DE MANUFACTURA.**

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS Y APLICACIONES DE LA MECÁNICA DE SÓLIDOS BÁSICA

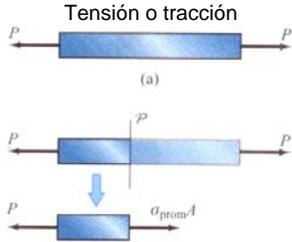
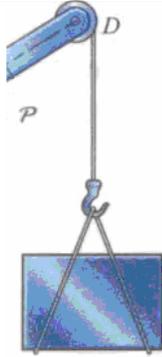
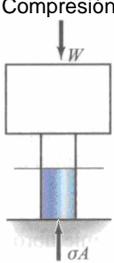
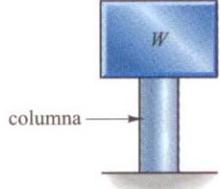
CONCEPTOS Y APLICACIONES DE LA MECÁNICA DE SÓLIDOS BÁSICA

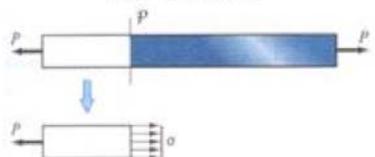
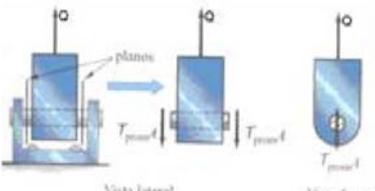
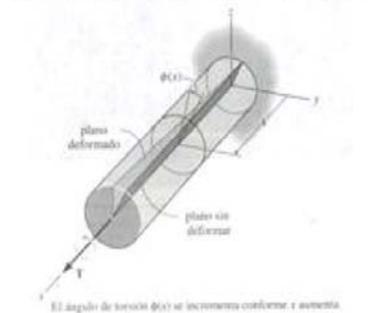
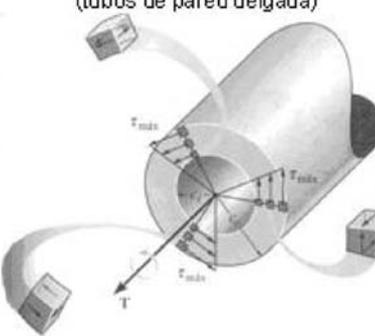
Los casos presentados en esta área del conocimiento pretenden pasar del marco teórico a situaciones reales que se pueden presentar en la práctica de la Ingeniería Industrial, con la finalidad de desarrollar un interés especial en diversos temas que a veces resultan difíciles de comprender si se plantean desde un punto de vista alejado de la práctica.

El principal interés en la mecánica de sólidos corresponde al área de diseño que debe tener en cuenta diversos factores a los que se someten los elementos mecánicos estructurales, para lo cual es importante reconocer y recordar los tipos de cargas, esfuerzos, deformaciones a los que se sujetan dichos elementos para evitar la falla, asegurar el buen funcionamiento, evitar accidentes y contratiempos. Ya conocidas las cargas se deben tener en cuenta propiedades importantes para el diseño, selección y presentar diferentes opciones para elegir los materiales más adecuados para la manufactura de los elementos estudiados.

Aquí se trata de desarrollar la habilidad del ingeniero de analizar un problema dado en forma lógica conociendo el tipo de esfuerzo y deformación en sólidos deformables para aplicarlo al análisis y diseño de estructuras ingenieriles y componentes de máquinas.

En la siguiente tabla se muestran los principales tipos de esfuerzo, así como las ecuaciones usadas en su análisis.

TIPOS DE ESFUERZO	NOMBRE	ANÁLISIS	CASOS O EJEMPLOS
ESFUERZO NORMAL O AXIAL	<p>Tensión o tracción</p>  <p>(a)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Esfuerzo normal promedio $\sigma_{prom} = \frac{P}{A}$ <ul style="list-style-type: none"> Deformación longitudinal o unitaria $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ 	
	<p>Compresión</p> 	<ul style="list-style-type: none"> Esfuerzo normal promedio $\sigma_{prom} = \frac{P}{A}$ <ul style="list-style-type: none"> Deformación total $\delta = \frac{PL}{AE}$	

<p>ESFUERZO CORTANTE</p>	<p>Cortante simple</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Esfuerzo cortante promedio $\tau_{prom} = \frac{F}{A}$	
	<p>Cortante doble</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Esfuerzo cortante promedio $\tau_{prom} = \frac{Q}{2A}$	
	<p>Torsión en ejes de sección circular sólida</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Par de torsión $T = \frac{P}{\omega}$ • Momento polar de inercia $J = \frac{\pi D^4}{32}$ • Ecuación general de torsión para esfuerzo máximo $\tau_{max} = \frac{Tc}{J} \text{ si } z_p = c$ <p>entonces $\tau_{max} = \frac{T}{2}$</p> <ul style="list-style-type: none"> • Para el ángulo de torsión $\phi = \frac{TL}{JG}$ 	
	<p>Torsión en ejes de sección circular hueca (tubos de pared delgada)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Las ecuaciones para una barra de sección sólida también se aplican en el análisis para las huecas. $z_p = \frac{\pi}{16} \left(\frac{D_o^4 - D_i^4}{D_o} \right)$ <ul style="list-style-type: none"> • $D_i = \sqrt[4]{D_o^4 - \frac{16z_p}{\pi}}$ • Espesor mínimo "t" recomendado: $t = r_o - r_i$ donde $r_o = \frac{D_o}{2}$ y $r_i = \frac{D_i}{2}$ 	
<p>Esfuerzo normal máximo en vigas</p>	<p>Viga de sección rectangular sólida</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Momento polar de inercia $I = \frac{1}{12} bh^3$ • Esfuerzo normal máximo 	

		$\sigma_{\max} = \frac{My}{I}$	
Deflexión en vigas simplemente apoyadas	<p>Método de área-momento</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pendiente $\theta_{\max} = \frac{-PL^2}{16EI}$ <ul style="list-style-type: none"> • Deflexión $y = \frac{-PL^3}{48EI}$	

FUERZA AXIAL, CORTANTE, MOMENTO FLEXIONANTE Y CÁLCULO DE VIGAS.

1.- A una empresa dedicada a la producción de sistemas transportadores le han encargado un sistema de bandas sobre rodillos como el que se muestra en la figura 1.2, éste será usado para transportar cajas. Por experiencia siempre se prefiere prever cada detalle para evitar el costo adicional por el desperdicio de materiales. Otro punto de gran importancia es la satisfacción del cliente, por lo que se prefiere que todos los equipos cuenten con la información técnica de cada parte de los sistemas, para poder evitar fallas que acorten la vida útil de estos productos. El cliente a pedido un sistema que ocupará una viga de apoyo que soportará las cargas de 2 kN, 1.5 kN y 2.5 kN mismas que se deben aplicar repetidamente muchos miles de veces. Se usará una barra de sección circular de 38.1 mm de diámetro como viga para que se acople con otros elementos del sistema por lo que se ha pedido al Ingeniero Industrial especificar un acero

adecuado que permita el transporte sin que haya una deformación que afecte el desempeño del sistema.



FIG. 1.2

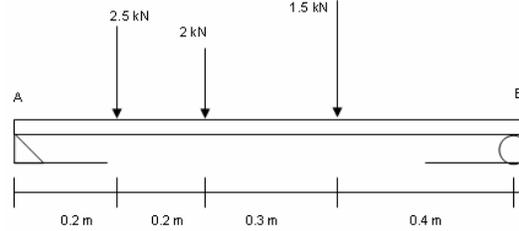


FIG. 1.3

Hacemos el diagrama de cuerpo libre y usamos el método de secciones.

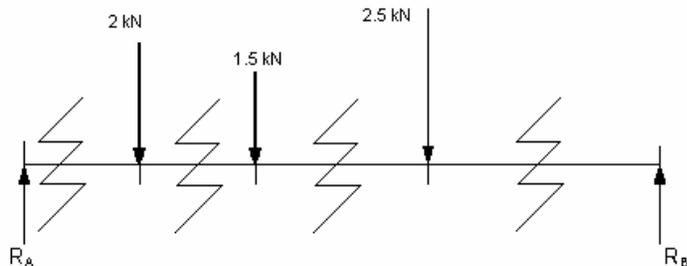


FIG. 1.4

$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 \\ \sum M_A &= 0 \end{aligned}$$

Cálculos de R_A y R_B :

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0 &\rightarrow R_A + R_B - 2 \text{ kN} - 1.5 \text{ kN} - 2.5 \text{ kN} = 0 \\ R_A + R_B &= 6 \text{ kN} \dots \text{ec. 1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M_A = 0 &\rightarrow -2(0.2) - 1.5(0.4) - 2.5(0.7) + R_B(1.1) = 0 \\ -0.4 - 0.6 - 1.75 - 1.1 R_B &= 0 \end{aligned}$$

$$R_B = \frac{2.75}{1.1} = 2.5 \text{ kN}$$

Con el valor encontrado de R_B sustituimos en la ec. 1:

$$R_A + R_B = 6 \text{ kN} \rightarrow R_A + 2.5 = 6 \text{ kN} \rightarrow R_A = 3.5 \text{ kN}$$

Cálculo de las fuerzas cortantes internas, por el método de secciones:

$$0 < X < 0.2$$

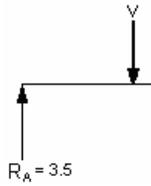


FIG. 1.5

$$\sum V = 0 \rightarrow 3.5 - V = 0 \rightarrow V = 3.5 \text{ kN}$$

$$0.2 < X < 0.4$$

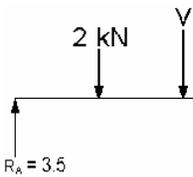


FIG. 1.6

$$\sum V = 0 \rightarrow 3.5 - 2 - V = 0 \rightarrow V = 1.5 \text{ kN}$$

$$0.4 < X < 0.7$$

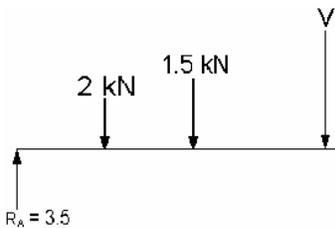


FIG. 1.7

$$\sum V = 0 \rightarrow 3.5 - 2 - 1.5 - V = 0 \rightarrow V = 0 \text{ kN}$$

$$0.7 < X < 1.1$$

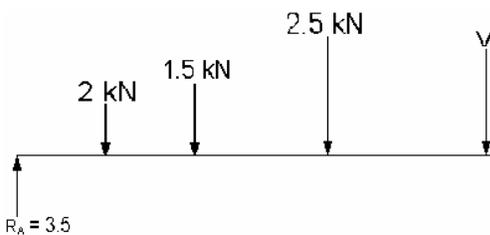


FIG. 1.8

$$\sum V = 0 \rightarrow 3.5 - 2 - 1.5 - 2.5 - V = 0 \rightarrow V = -2.5 \text{ kN Cortante negativo}$$

Momentos flectores

$$0 < X < 0.2$$

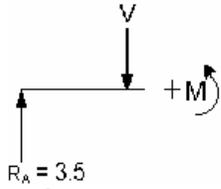


FIG. 1.9

$$\sum M = 0 \rightarrow -R_A(X) + M = 0 \rightarrow M = R_A(X) \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M = 3.5(0.2) \text{ kN}\cdot\text{m} \rightarrow M = 0.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$0.2 < X < 0.4$$

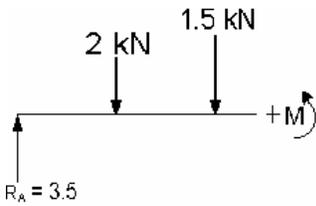


FIG. 1.10

$$\sum M = 0 \rightarrow -3.5(X) + 2(X - 0.2) + M = 0 \rightarrow$$

$$M = 3.5(X) - 2(X - 0.2) \text{ kN}\cdot\text{m} \rightarrow M = 3.5(0.4) - 2(0.4 - 0.2) = 1.4 - 0.4 = 1 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$0.4 < X < 0.7$$

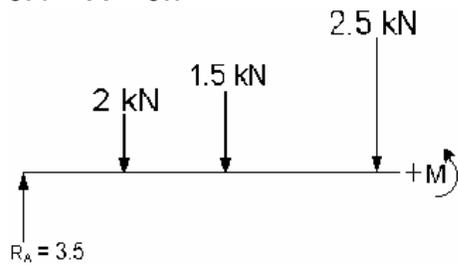


FIG. 1.11

$$\sum M = 0 \rightarrow -3.5(X) + 2(X - 0.2) + 1.5(X - 0.4) + M = 0 \rightarrow$$

$$M = 3.5(X) - 2(X - 0.2) - 1.5(X - 0.4) \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M = 3.5(0.7) - 2(0.7 - 0.2) - 1.5(0.7 - 0.4) = 2.45 - 1.0 - 0.45 = 1 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

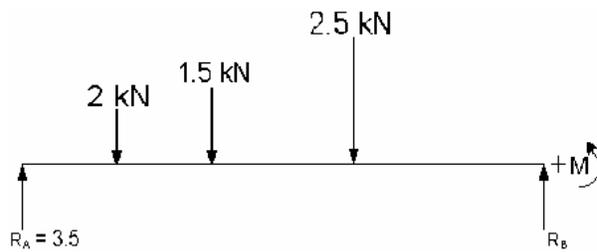


FIG. 1.12

$$\sum M = 0 \rightarrow -3.5(X) + 2(X - 0.2) + 1.5(X - 0.4) + 2.5(X - 0.7) + M = 0 \rightarrow$$

$$M = 3.5(X) - 2(X - 0.2) - 1.5(X - 0.4) - 2.5(X - 0.7) \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M = 3.5(1.1) - 2(1.1 - 0.2) - 1.5(1.1 - 0.4) - 2.5(1.1 - 0.7) = 0 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

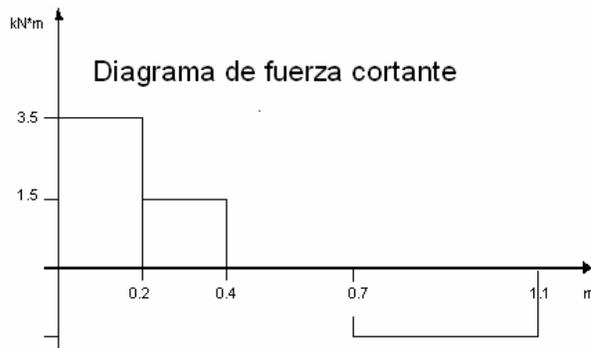


FIG. 1.13

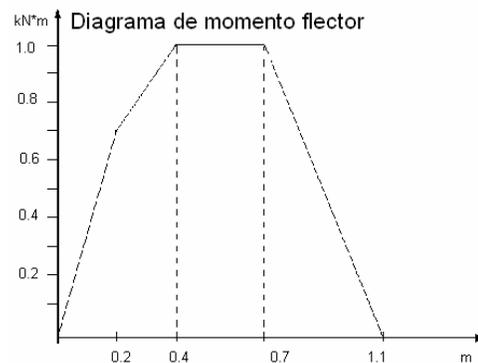


FIG. 1.14

Especificación del acero adecuado.

Las cargas son repetidas, la viga tiene que ser circular, $D = 38.1 \text{ mm}$.

De la figura 1.14 vemos que el momento flexionante máximo es de $1 \text{ kN}\cdot\text{m}$ donde se aplican las cargas de 1.5 kN y 2.5 kN .

La fórmula¹ para calcular el módulo (s) de sección de un círculo es:

$$S = \pi D^3/32$$

$$S = \pi (38.1\text{mm})^3/32 = 5429.7 \text{ mm}^3$$

Calculamos el esfuerzo máximo $\sigma_{\text{máx}}$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{M}{S} = \frac{1.0 \text{ kN}\cdot\text{m}}{5429.7 \text{ mm}^3} \times \frac{10^3 \text{ mm}}{1 \text{ m}} \times \frac{10^3 \text{ N}}{1\text{kN}} = 184.17223 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 184.17223 \text{ MPa}$$

¹ Ver "Apéndice", tabla 9.

Como la carga es repetida, el acero seleccionado deberá ser muy dúctil.²

$$\text{Entonces } \sigma_d = \frac{s_u}{8}$$

Como el esfuerzo máximo es $\sigma_{\text{máx}} = 184.17 \text{ MPa}$ es el esfuerzo de diseño.

$$\sigma_{\text{máx}} = \sigma_d = 184.17 \text{ MPa}$$

Calculamos la resistencia última:

$$s_u = \sigma_d(8) = (184.17 \text{ MPa})(8) = 1473.3778 \text{ MPa}$$

Decidimos usar acero³, tenemos:

Se seleccionan materiales con buena ductilidad y una resistencia última de por lo menos 1473.37 MPa.

Damos como opciones:

AISI 4140 OQT 700 con $s_u = 1593 \text{ MPa}$ y 12 % de alargamiento que indica ductilidad adecuada.

AISI 5160 OQT 1300 con $s_u = 1813 \text{ MPa}$ y 9 % de alargamiento.

ANÁLISIS DE ESFUERZO

2.- En una fábrica se producen algunas piezas pequeñas para automóviles, entre las que se encuentran los cojinetes, piezas que una vez que salen del proceso son transportadas a una área dedicada a la inspección pieza por pieza, que fue definida por el departamento de calidad, la banda transportadora que las lleva se ha detenido y el ingeniero encargado del mantenimiento de las máquinas se percató de que una cuña que conecta a una flecha y una polea de la banda transportadora ha sufrido demasiado desgaste y es la causante del problema. El ingeniero ha tomado las medidas y la única que puede determinar con precisión es la longitud de la cuña $l = 25 \text{ mm}$ ya que debido al desgaste, el ancho $d = h$ (la altura, como se observa en la figura 1.18) de la cuña ha cambiado. Si se sabe que la flecha transmite un par de torsión de $100 \text{ N}\cdot\text{m}$ de la flecha al cubo y que el esfuerzo cortante en la cuña es de 35 MPa . ¿Cuál será el ancho d más adecuado para la cuña?

² *Ibid.*, tabla 3.

³ Ver apéndice, tabla 8.

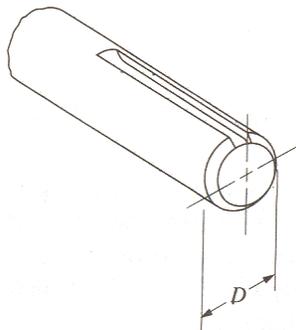
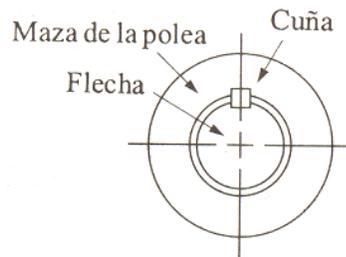
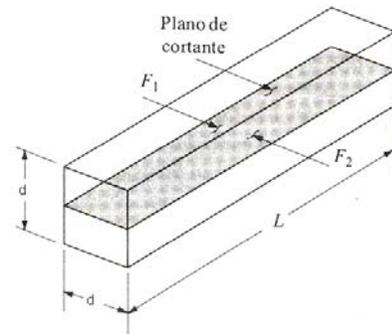


FIG. 1.15



Vista del extremo de la flecha
FIG. 1.16



Vista ampliada de la cuña
FIG. 1.17

Solución

$$F = 200 \text{ N}$$

$$T_{\text{perm}} = 35 \text{ MPa}$$

$$l = 25 \text{ mm}$$

$$d = ?$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{V}{A}$$

En magnitud

$$T = M = F \cdot R$$

$$T = v \cdot R$$

$$100 \text{ N} \cdot \text{m} = v \cdot R \text{ como el radio es } 20 \text{ mm} = 0.02 \text{ m}$$

$$v = 100 / 0.02 = 5 \text{ kN}$$

$$T_{\text{permitido}} = T_{\text{aplicado}} = 35 \text{ MPa}$$

$$35 \text{ MPa} = (5 \text{ kN}) / A$$

A = área de la sección que nos interesa

$$A = l \cdot d$$

$$d = \frac{5 \text{ kN}}{l (35 \text{ MPa})} = \frac{5}{(0.025)(35)} =$$

$$d = 0.00571428 \text{ m} = 5,71 \text{ mm}$$

Esta será la dimensión aceptable para la cuña que tendrá forma cuadrada en su sección transversal.

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN

3.- En una empresa se producen tanques para gas L. P., los de mayor volumen de producción son los de capacidades de 10, 20 y 30 kg, estos son fabricados con base y tapa idénticas que posteriormente se unen a cilindros de lámina por medio de soldadura con máquinas automáticas. Para que la unión sea la correcta y los tanques pasen las pruebas hidrostáticas, las tolerancias en las dimensiones se deben respetar para que el cilindro, la base y la tapa coincidan. En la figura 1.19 se muestra la prensa de marco C que realiza el embutido y troquelado para hacer la base y la tapa de los tanques. El martinete se impulsa hacia abajo con una gran fuerza, cerrando los troqueles y formando la pieza; esta acción provoca que el extremo abierto de la prensa tienda a expandirse, algo indeseable. El Ingeniero Industrial encargado de supervisar que se cumplan las especificaciones de calidad ha detectado que algunos tanques no cumplen con las pruebas hidrostáticas pues tienen fugas mínimas pero suficientes para el rechazo, por lo que son enviados al área de soldadura manual lo cual representa un incremento en costos. Después de analizar cada parte del proceso se ha comprobado que las bases y las tapas tienen una variación en su diámetro. Para limitar la expansión en la prensa que provoca el defecto, el ingeniero propone como solución es instalar dos varillas de sección circular a través de la abertura del marco C y se asegurarán con una carga de tensión muy alta. Durante la operación descrita se aplica una fuerza de tensión máxima de 40,000 libras a los rodillos con choque moderado. Si el largo inicial de estas varillas es de 1.5 m y el alargamiento debido a la carga no debe exceder de 0.15 mm para cumplir con las dimensiones de la base y la tapa. ¿Cuál debe ser el diámetro de las varillas? Para minimizar el desperdicio de lámina con la que se hacen estos tanques, así como evitar enviar los tanques al área de soldadura manual.

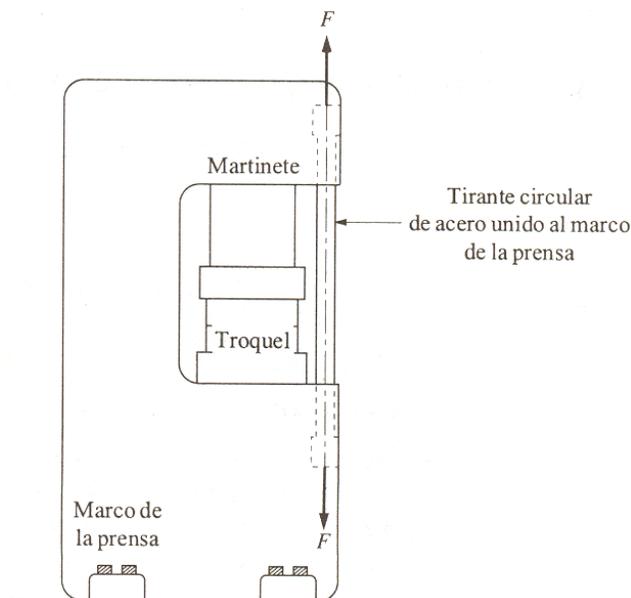


FIG. 1.18

Solución:

$$1lb_f = 4.4482 N$$

La deformación axial total, $\delta = 0.15mm$

La carga axial en cada varilla = 20000 lb = 88.964 kN

Como las varillas serán de acero, el módulo de elasticidad $E = 207 \text{ GPa} = 207 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$.

$$\text{La deformación total } \delta = \frac{PL}{AE} = 0.15mm$$

donde:

$P = 88964 \text{ N}$ es la carga aplicada en cada varilla.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \text{ pues la sección de las varillas es circular.}$$

$$L = 1.5 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{PL}{AE} \Rightarrow A = \frac{PL}{\delta E} = \frac{(88964 N)(1500mm)}{\left(207 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2}\right)(0.15mm)} = 0.0042977m^2$$

$$A = 0.0042977m^2 * \frac{10^6 mm^2}{1m^2} = 4297.7mm^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4(4297.77mm^2)}{3.1415927}} = 73.973581mm \text{ así } D = 3 \text{ pulg} = 76.2 \text{ mm}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow A = \frac{(3.1415927)(76.2mm)^2}{4} = 4560.36mm^2$$

Como se trata de una carga repetida, se recomienda que el esfuerzo de diseño¹

sea $\sigma_d = \frac{s_u}{8}$ si $\sigma_d = \sigma \Rightarrow s_u = 8\sigma$.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{88964 N}{4560.36mm^2} = 19.508 \frac{N}{mm^2} = 19.508 MPa$$

Así la resistencia última:

$$s_u = 8\sigma = 8(19.508 MPa) = 156.06 MPa$$

¹ Ver "Apéndice", tabla 3.

Concluimos que casi cualquier acero² tiene una resistencia última mucho mayor que 156.06 MPa, entonces la sección circular tendrá un diámetro $D = 76.2$ mm y podemos escoger el acero trabajado en caliente AISI 1020 ya que debe ser el de menor costo y tiene una resistencia última de 448 MPa, cumpliendo muy bien con el uso que se le dará.

ELEMENTOS SUJETOS A TORSIÓN

La torsión se refiere a la tendencia a la rotación alrededor del eje longitudinal de una barra al estar sometida por momentos o pares de torsión. Algunos ejemplos de elementos sujetos a un par de torsión se presentan al girar un desarmador, en los ejes de impulsión, ejes de transmisión, ejes de hélices, barras de dirección, taladros, etc.

Los miembros cilíndricos que transmiten potencia por medio de rotación se denominan ejes, por ejemplo el eje impulsor de un automóvil o el eje de la hélice de un barco. La mayor parte de los ejes tienen secciones circulares sólidas o tubulares.

La fórmula de la torsión

El momento polar de inercia para una sección transversal circular es: $J = \frac{\pi D^4}{32}$;

donde D es el diámetro de la sección circular.

Para el esfuerzo cortante máximo tenemos la siguiente ecuación: $\tau_{,max} = \frac{Tc}{J}$ esta muestra que el esfuerzo cortante es proporcional al par aplicado T e inversamente proporcional al momento polar de inercia. El radio de la sección circular queda representado por la letra c .

Si definimos $z_p = \frac{J}{c} = \frac{\pi * D^4}{\frac{32}{D}} = \frac{\pi D^3}{16}$ y le llamamos módulo de sección polar

podemos tener una expresión generalizada de torsión. $\tau_{,max} = \frac{Tc}{J} \Rightarrow \tau_{max} = \frac{T}{z_p}$.

Los tubos circulares resisten con más eficiencia cargas de torsión que las barras sólidos. Los esfuerzos cortantes en una barra circular sólida son máximos en el borde exterior de la sección transversal y cero en el centro; por tanto, en un eje sólido la mayor parte del material está sometido a un esfuerzo considerablemente menor que el esfuerzo cortante máximo.

² *Ibid.*, tabla 8.

En contraste, en un tubo hueco la mayor parte del material está cerca del borde exterior de la sección transversal, donde los esfuerzos cortantes son grandes.

Para un tubo tenemos que el momento polar de inercia $J = \frac{\pi}{32}(D_o^4 - D_i^4)$; donde D_o es el diámetro exterior y D_i el diámetro interior.

Entonces si la reducción en peso y el ahorro del material son importantes, es aconsejable usar un tubo circular para los impulsores, los de hélices, los ejes de generadores, entre otros.

4.- Inicialmente una empresa dedicada a la producción de envases de vidrio contaba con bastante espacio para almacenar la materia prima. Ahora ese lugar será empleado para la construcción de una nave donde se van a fabricar envases de plástico. El nuevo almacén ha quedado retirado del horno, por lo que uno de los ingenieros debe diseñar una transportadora cuya transmisión sea una flecha de sección circular transversal sólida, sometida a un par de torsión de 800 N*m. ¿Cuál será la decisión del ingeniero en cuanto al diámetro y al acero más adecuado para el uso mencionado de esta flecha, para que el proceso continúe pues los principales clientes son las cervecerías que requieren que la entrega de sus pedidos de envases se efectúen de manera puntual.

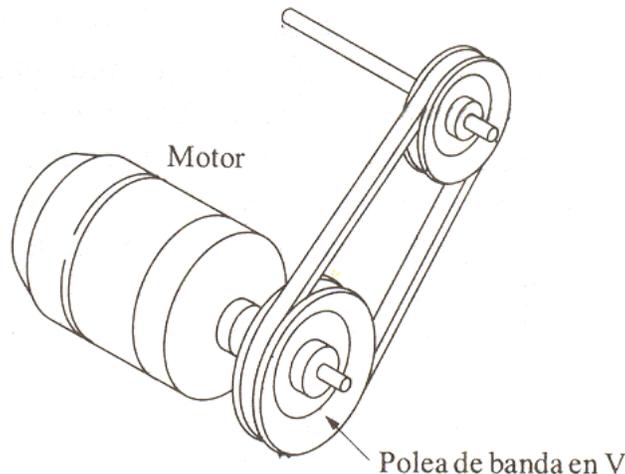


FIG. 1.19

Solución

El acero usado debe ser dúctil para que soporte cargas de impacto o choque con un buen porcentaje de alargamiento. Aunque existen muchas opciones, para este caso seleccionamos³ el acero AISI 1141 OQT 1300 con $\sigma_y = 469 MPa$ y un 28 % de alargamiento.

³ Ver "Apéndice", tabla 8.

El esfuerzo cortante torsional es $\tau = \frac{Tc}{J}$.

$c = \frac{D}{2}$, D es el diámetro de la sección transversal y c el radio

$J = \frac{\pi D^4}{32}$ para una sección transversal circular sólida⁴.

$z_p = \frac{J}{c} = \frac{\frac{\pi D^4}{32}}{\frac{D}{2}} = \frac{\pi D^3}{16}$, z_p es el módulo de sección polar⁵

$$\tau_{max} = \frac{Tc}{J} = \frac{T}{z_p}$$

Escogemos un factor de seguridad de 6 que corresponde al diseño para cargas de

choque⁶, así: $\tau_d = \frac{\sigma_y}{2N} = \frac{469 MPa}{2(6)} = 39.1 MPa = 39.1 \frac{N}{mm^2}$

Con el valor de z_p se puede calcular el diámetro buscado

$$z_p = \frac{T}{\tau_d} = \frac{800 N * m}{39.1 \frac{N}{mm^2}} * \frac{10^3 mm}{1m} = 20.5 * 10^3 mm^3$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{16z_p}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{16(20.5 * 10^3) mm^3}{\pi}} = 47.1 mm \approx 50 mm$$

Así el diámetro de la flecha será D = 50 mm y se fabricará de acero AISI OQT 1300.

5.- El Ingeniero Industrial encargado del departamento de calidad en una fábrica de botes y lanchas, efectúa las pruebas a un nuevo modelo. En el nuevo modelo se emplea una flecha motriz que tiene un diámetro de 3 pulgadas y se debe conectar con un perno al cubo de la hélice como lo muestra la figura 1.22. Durante la prueba se presentó la falla del perno, que fue seleccionado para este modelo. En su reporte el ingeniero debe incluir las recomendaciones para las posibles mejoras en cada modelo, por lo que procede a determinar el diámetro adecuado para este perno, sin que sea demasiado grande, ya que entonces podría fallar la

⁴ *Ibid.*, tabla 9.

⁵ *Ibidem.*

⁶ Ver apéndice, tabla 6.

flecha donde se hace la perforación para insertar el perno. Él sabe que generalmente el par de torsión es constante, donde en condiciones extremas la flecha motriz transmite 80 hp cuando gira a 525 rpm , ¿qué decisión deberá tomar el ingeniero para la selección del diámetro y material para que el perno sea seguro en las condiciones a las que estará expuesto?

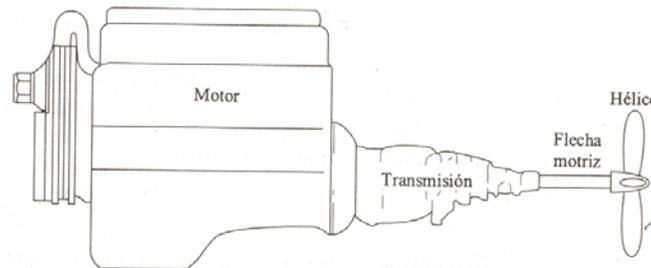


FIG. 1.20

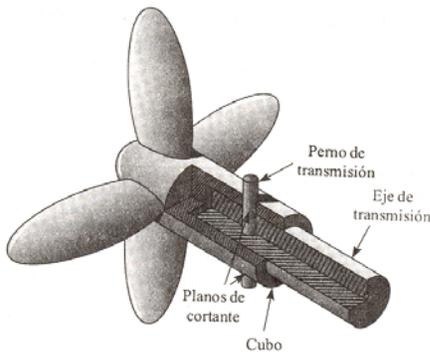


FIG. 1.21

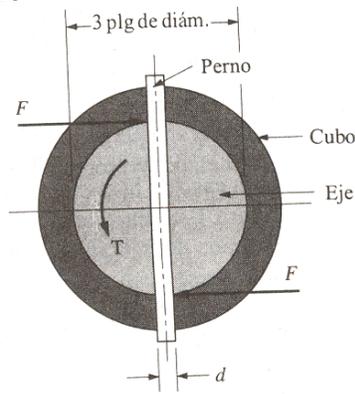


FIG. 1.22

Solución

$$Pot = 80 \text{ hp}$$

$$n = 525 \text{ rpm}$$

Calculamos el par de torsión

$$n = 525 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} = 54.977 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$1 \text{ hp} = 6600 \frac{\text{lb} * \text{pulg}}{\text{s}}$$

$$Pot = 80 \text{ hp} * \frac{6600 \frac{\text{lb} * \text{pulg}}{\text{s}}}{1 \text{ hp}} = 528000 \frac{\text{lb} * \text{pulg}}{\text{s}}$$

$$Pot = Tn \Rightarrow T = \frac{Pot}{n} = \frac{528000 \frac{lb * pulg}{s}}{54.97 \frac{rad}{s}} = 9603.864 lb * pulg$$

El material debe tener buena ductilidad y resistencia debido a la carga, usando el criterio de diseño para determinar la fuerza cortante⁷ tenemos:

$$\tau_d = \frac{s_y}{4}$$

Si seleccionamos acero estirado en frío AISI 1141 con $s_y = 95000 psi$ y un 14 % de alargamiento⁸, ya que es recomendable para este uso:

$$\tau_d = \frac{95000 psi}{4} = 23750 psi = 23750 \frac{lb}{pulg^2}$$

Sabemos que el par de torsión es $T = FD$ donde D es el diámetro de la flecha, calculamos ahora la magnitud de la fuerza.

$$F = \frac{T}{D} = \frac{9605.23 lb * pulg}{3 pulg} = 3201.746 lb$$

Ya conocidos tanto el esfuerzo cortante al que estará sometido el perno como también la fuerza, determinamos el área que posteriormente usaremos para conocer al diámetro del perno buscado.

$$\tau_d = \frac{F}{A} \Rightarrow A = \frac{F}{\tau_d} = \frac{3201.746 lb}{23750 \frac{lb}{pulg^2}} = 0.1348 pulg^2$$

La sección transversal del perno es circular, por lo tanto el diámetro será:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \Rightarrow d_{perno} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(0.1348 pulg^2)}{3.1415927}} = 0.414 pulg \approx \frac{7}{16} pulg$$

Entonces el perno tendrá un diámetro de $\frac{7}{16} pulg$ y el material seleccionado para fabricarlo es acero AISI 1141 estirado en frío lo cual evitará su falla.

⁷ Ver apéndice, tabla 4.

⁸ Ver apéndice, tabla 2.

6.- En una fábrica de maquinaria y tractores agrícolas se desea diseñar para un tractor una flecha motriz como un tubo de pared delgada, ya que resultaría más barata que una barra de sección circular sólida, y una ventaja es que el proceso para fabricarla es el mismo para ambos tipos. El motor del tractor entrega 200 hp cuando está girando a 1200 rpm. El diámetro exterior de esta flecha es de 3 pulgadas. El Ingeniero Industrial que participa en el diseño de algunas piezas debe determinar cuál debe ser el espesor mínimo para la pared de la flecha y el acero más conveniente para hacerla.

Solución

Primero calculamos el par de torsión.

$$1hp = 550 \frac{lb * pie}{s}$$

$$Pot = 200hp \left(\frac{550 \frac{lb * pie}{s}}{1hp} \right) = 110000 \frac{lb * pie}{s}$$

Para la velocidad angular ω tenemos:

$$\omega = 1200 \frac{rev}{min} * \left(\frac{2\pi rad}{1rev} \right) * \left(\frac{1min}{60s} \right) = 125.664 \frac{rad}{s}$$

$$P = T\omega \Rightarrow T = \frac{P}{\omega} = \frac{110000 \frac{lb * pie}{s}}{125.664 \frac{rad}{s}} = 875 lb * pie$$

Podemos considerar que la flecha experimentará carga de choque por las dimensiones y el uso que se le da a un tractor, por lo tanto seleccionamos un material dúctil con un porcentaje de alargamiento mayor al 10 %.

Aunque hay varios tipos de acero⁹ que cumplen con las necesidades se selecciona el acero AISI 4140 OQT 1300 cuyos datos son:

Resistencia a la cedencia $s_y = 101$ ksi y un porcentaje de alargamiento del 23 %.

Ahora determinamos el esfuerzo cortante de diseño aceptable, considerando que la carga es de impacto o choque torsional para la flecha consideramos un factor de seguridad¹⁰ $N = 6$.

⁹ Ver "Apéndice", tabla 8.

$$\tau_d = \frac{s_y}{2N} \text{ con un factor de seguridad } N = 6 \Rightarrow \tau_d = \frac{s_y}{12} = \frac{101ksi}{12} = 8.4166ksi$$

Conocido el par de torsión al que se somete la flecha, determinamos el módulo de sección polar z_p considerando que se trata de una flecha hueca.

$$z_p = \frac{T}{\tau_d} = \frac{875lb * pie \left(\frac{12pulg}{1pie} \right)}{8416.66 \frac{lb}{pulg^2}} = 1.247525pulg^3$$

$$\text{Para una flecha hueca } z_p = \frac{J}{c} = \frac{\pi}{32} (D_o^4 - D_i^4) * \frac{1}{\frac{D_o}{2}} = \frac{\pi}{16} \left(\frac{D_o^4 - D_i^4}{D_o} \right)$$

$$z_p = \frac{\pi}{16} \left(\frac{D_o^4 - D_i^4}{D_o} \right) \Rightarrow D_i = \sqrt[4]{D_o^4 - \frac{16z_p D_o}{\pi}} = \sqrt[4]{(3pulg)^4 - \frac{16(1.247525pulg^3)(3pulg)}{3.1415927}}$$

$$D_i = 2.8053783pulg$$

Donde D_i es el diámetro interno máximo permisible para esta flecha hueca.

Podemos recomendar un D_i que esté cercano a un tamaño básico preferido inferior al D_i encontrado.

$$D_{i(\text{encontrado})} = 2.8053pulg \Rightarrow D_{i(\text{recomendado})} = 2.75pulg = 2 \frac{3}{4} pulg$$

Ahora el espesor mínimo “t” recomendado sería:

$$t = r_o - r_i; \text{ donde } r_o = \frac{D_o}{2} \text{ y } r_i = \frac{D_i}{2}$$

$$t = \frac{3pulg}{2} - \frac{2.75pulg}{2} = 0.125pulg$$

Finalmente la flecha motriz se fabricaría de acero AISI 4140 OQT 1300 y el espesor mínimo recomendado para esta flecha sería $t = 0.125$ pulg. con un diámetro exterior $D_o = 3$ pulg. y un diámetro interior $D_i = 2.75$ pulg.

¹⁰ *Ibid.*, tabla 6.

7.- Debido al crecimiento de la población en una ciudad el suministro de energía eléctrica ya no es suficiente. La construcción de una nueva central hidroeléctrica ha comenzado gracias al paso de un río que es adecuado para la construcción de una presa en una zona cuyas características geográficas facilitarían el proyecto. Se desea mejorar el servicio y por experiencia se sabe que es preferible un buen diseño de los elementos que participan en la producción de la energía eléctrica, pues es más caro reparar cuando una falla se convierte en un problema mayor que daña otras partes del sistema generador. El Ingeniero Industrial que participa con el equipo encargado de la obra debe aprovechar los recursos de los que dispone, procurando ahorrar y teniendo presente el buen funcionamiento de la central; él se encargará de recomendar el tipo de acero conveniente para el uso que se dará a la flecha que conecta a la turbina con el alternador y que tiene 24 pulgadas de diámetro y gira en promedio a 90 rpm, además se sabe que las turbinas tienen una capacidad nominal de 9000 hp con una capacidad de sobrecarga de 10 000 hp.

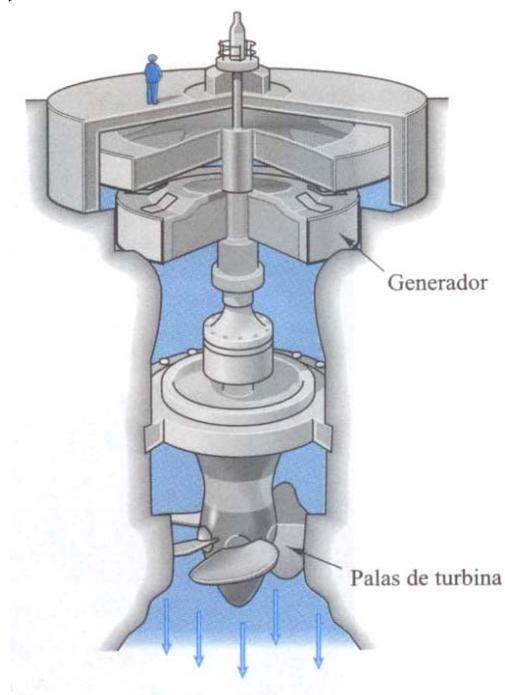


FIG. 1.23

Solución

Tomando en cuenta las condiciones en las que trabajara el equipo se procede a hacer los cálculos.

Para la velocidad angular ω tenemos:

$$\omega = 90 \frac{rev}{min} * \left(\frac{2\pi rad}{1 rev} \right) * \left(\frac{1 min}{60 s} \right) = 9.424778 \frac{rad}{s}$$

Calculamos el par de torsión T:

$$P = T\omega \Rightarrow T = \frac{P}{\omega} = \frac{(10000hp) \left(\frac{550 \frac{lb \cdot pie}{s}}{\frac{rad}{s}} \right)}{9.4247 \frac{rad}{s}} = 583568.116 lb \cdot pie$$

El módulo de sección polar lo calculamos con:

$$z_p = \frac{J}{c} = \frac{\pi}{32} (D^4) * \frac{1}{D} = \frac{\pi D^3}{16} = \frac{\pi (24 \text{ pulg})^3}{16} = 2714.336 \text{ pulg}^3$$

Ahora determinamos el esfuerzo cortante torsional en la flecha.

$$\tau_d = \frac{Tc}{J}; \text{ pero } z_p = \frac{J}{c} \Rightarrow \tau_d = \frac{T}{z_p} = \frac{583568.116 lb \cdot pie \left(\frac{12 \text{ pulg}}{1 \text{ pie}} \right)}{2714.336 \text{ pulg}^3} = 2579.9375 \frac{lb}{\text{pulg}^2}$$

Como requerimos un material dúctil, puesto que la carga corresponde a un tipo de choque ocasionado por el flujo de agua, usamos para choque torsional un factor de seguridad¹¹ N = 6.

Diseño por esfuerzo cortante

$$\tau_d = \frac{s_y}{2N} \Rightarrow s_y = \tau_d (2)(6) = 2579.9375 \frac{lb}{\text{pulg}^2} (12) = 30959.25 \frac{lb}{\text{pulg}^2} = 30.960 \text{ ksi}$$

Vemos que varios tipos de acero¹² cumplen con $s_y = 30.96$ ksi, pero debido al ambiente donde esta flecha tiene contacto con el agua siempre recomendamos el acero AISI 4140 OQT 1100.

DEFORMACIÓN TÉRMICA

Una máquina o una estructura se podría deformar o verse sometida a esfuerzo por cambios de temperatura además de la aplicación de cargas.

¹¹ Ver "Apéndice", tabla 6.

¹² Ver "Apéndice", tabla 8.

En algunas regiones los elementos de puentes y otros componentes estructurales se ven expuestos a temperaturas que oscilan desde -34 °C hasta 43 °C. Los vehículos y la maquinaria que operan a la intemperie experimentan variaciones de temperatura similares.

Con frecuencia, una pieza de una máquina comienza a trabajar a temperatura ambiente y luego se calienta demasiado durante su funcionamiento. Algunos ejemplos son piezas de motores, hornos, máquinas cortadoras de metal, trenes de laminación, equipo de moldeo y extrusión de plásticos, equipo procesador de alimentos, compresores de aire, mecanismos hidráulicos y neumáticos, entre otros.

Cuando una pieza metálica se calienta se expande; si la expansión no se restringe, las dimensiones de la pieza se incrementan pero en el metal no se genera esfuerzo. Sin embargo en algunos casos la pieza se restringe, lo que impide que cambien sus dimensiones. En tales circunstancias se presentan esfuerzos.

Los diferentes materiales cambian de dimensiones a diferentes tasas cuando se exponen a cambios de temperatura. La mayoría de los materiales se dilatan al aumentar la temperatura, aunque algunos se contraen y otros permanecen del mismo tamaño.

El coeficiente de expansión térmica (α incluido en el apéndice) es la propiedad de un material que indica la cantidad de cambio unitario dimensional con un cambio unitario de temperatura. Dicho de otra manera, α es la medida del cambio de longitud de un material por longitud unitaria con un cambio de 1 grado. En el Sistema Internacional de Unidades las unidades que se usan son $m(m/^{\circ}C) = ^{\circ}C^{-1}$, y en el Sistema Inglés son $pulg(pulg/^{\circ}F) = ^{\circ}F^{-1}$.

Para determinar el cambio de longitud de un miembro estructural se puede usar la fórmula: $\delta = \alpha * L * \Delta t$. Donde:

$\delta =$ cambio de longitud

$L =$ longitud original del miembro estructural

$\Delta t =$ cambio de temperatura

8.- El Ingeniero Industrial que participa en el diseño de un nuevo automóvil revisa las dimensiones de las varillas de empuje durante su desempeño ya que es preferible prever que cambios podrían afectar el funcionamiento del sistema que comenzar la fabricación o pedir piezas cuyas dimensiones no sean las adecuadas. Ahora el ingeniero procede a calcular la tolerancia que se debe tener entre algunas piezas y las varillas de empuje que accionan las válvulas en un motor de seis cilindros; las varillas son de acero AISI 1040 y tienen una longitud de 625 mm y 8 mm de diámetro a la temperatura de 15 °C, si se ha determinado que durante el funcionamiento del motor llegan a tener temperaturas de 116 °C, ¿de qué

magnitud es la variación en cuanto a la longitud para poder considerarla junto con la instalación de las otras piezas del mecanismo de válvulas.

Solución

Sabemos que las varillas tienen una longitud $L = 625 \text{ mm}$

Temperatura inicial $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura final $t_2 = 116 \text{ }^\circ\text{C}$

El coeficiente de expansión térmica α para el acero AISI 1040 es¹³:

$$\alpha = 11.3 * 10^{-6} \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$$

Así el cambio en la longitud δ en las varillas será:

$$\delta = \alpha L \Delta t = 11.3 * 10^{-6} \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right] (625 \text{ mm})(116^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) = 0.7133125 \text{ mm}$$

Este incremento en la longitud de las varillas es reportado por el Ingeniero Industrial para que lo considere el resto del equipo y sea tomado en cuenta en el funcionamiento con las demás piezas del motor.

DEFLEXIÓN EN VIGAS

El huso de un torno o prensa taladradora y el árbol de una fresadora portan herramientas de corte para maquinarse metales. La deflexión del huso o del árbol tendría un efecto adverso en la precisión de la máquina. El tipo de carga y apoyo de estos elementos de máquina indican que son vigas sujetas a cargas que originan deflexión.

El equipo de precisión para medición también se debe diseñar para que sea rígido. La deflexión provocada por la aplicación de las fuerzas de medición reduce la precisión de la medición deseada.

Las flechas transmisoras de potencia que portan engranes deben ser suficientemente rígidas para garantizar que los dientes de los engranes se traben adecuadamente. La deflexión excesiva de las flechas tendería a separar los engranes compañeros, lo que haría que el punto de contacto entre los dientes de los engranes no fuera el óptimo. La generación de ruido, la reducción en la capacidad de transmitir potencia y el desgaste incrementado serían el resultado.

Los pisos de edificios deben ser suficientemente rígidos para soportar las cargas esperadas. Los ocupantes del edificio no deben notar las deflexiones del piso. Las máquinas y otros equipos requieren de pisos estables para su adecuado

¹³ Ver "Apéndice", tabla 5.

funcionamiento. Las vigas que soportan cielos rasos enyesados no se deben deflexionar en exceso para que no se agriete el yeso.

Los bastidores de vehículos, máquinas formadoras de metal, aparatos automáticos y equipo de proceso también deben poseer suficiente rigidez para garantizar el funcionamiento adecuado del equipo soportado por el bastidor. La cabeza de un torno, la corona de una prensa punzonadora, la estructura de un mecanismo de ensamble automático y el chasis de un camión son algunos ejemplos.

9.- En una fábrica en la que una máquina es utilizada para insertar bujes a presión en una pieza fundida, como se muestra en la figura, requiere de una viga simplemente apoyada que soporte el cilindro hidráulico que realiza esta operación. La fuerza ejercida durante la operación es de 15 kN. Se tiene disponible una viga rectangular, de 25 mm de espesor y 100 mm de altura, de acero. Debido a que se necesita cierta precisión en la operación se desea determinar si la deflexión de esta viga durante la operación es muy elevada para modificar el diseño o aceptarlo y dejarlo como se muestra en la figura 1.24.

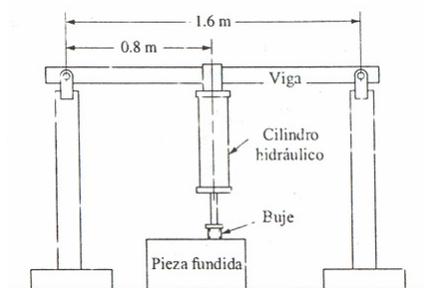


FIG.1.24

Solución

La carga es $P= 15$ kN aplicada en centro de la viga como una reacción hacia arriba.

El claro $L = 1.6$ m de la viga

Para determinar la deflexión máxima “y” en esta viga de sección transversal rectangular usamos:

$$y = \frac{PL^3}{48EI}$$

Donde $E = 207$ GPa es el modulo de elasticidad a tensión para el acero.

$$I_x = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.025m(0.10m)^3}{12} = 2.0833 * 10^{-6} m^4$$

$$y = \frac{PL^3}{48EI} = \frac{15 * 10^3 N (1.6m)^3}{48 \left(207 * 10^9 \frac{N}{m^2} \right) (2.0833 * 10^{-6} m^4)} = 2.968 * 10^{-3} m = 2.9681 mm$$

Si la operación requiere de cierta tolerancia, podemos ver que reduciendo la longitud del claro la deflexión será menor pues estas características son directamente proporcionales.

Si modificamos el claro de la viga de 1.6 m a 0.8 m tenemos que la deflexión es:

$$y = \frac{PL^3}{48EI} = \frac{15 * 10^3 N (0.8m)^3}{48 \left(207 * 10^9 \frac{N}{m^2} \right) (2.0833 * 10^{-6} m^4)} = 3.71 * 10^{-4} m = 0.371 mm$$

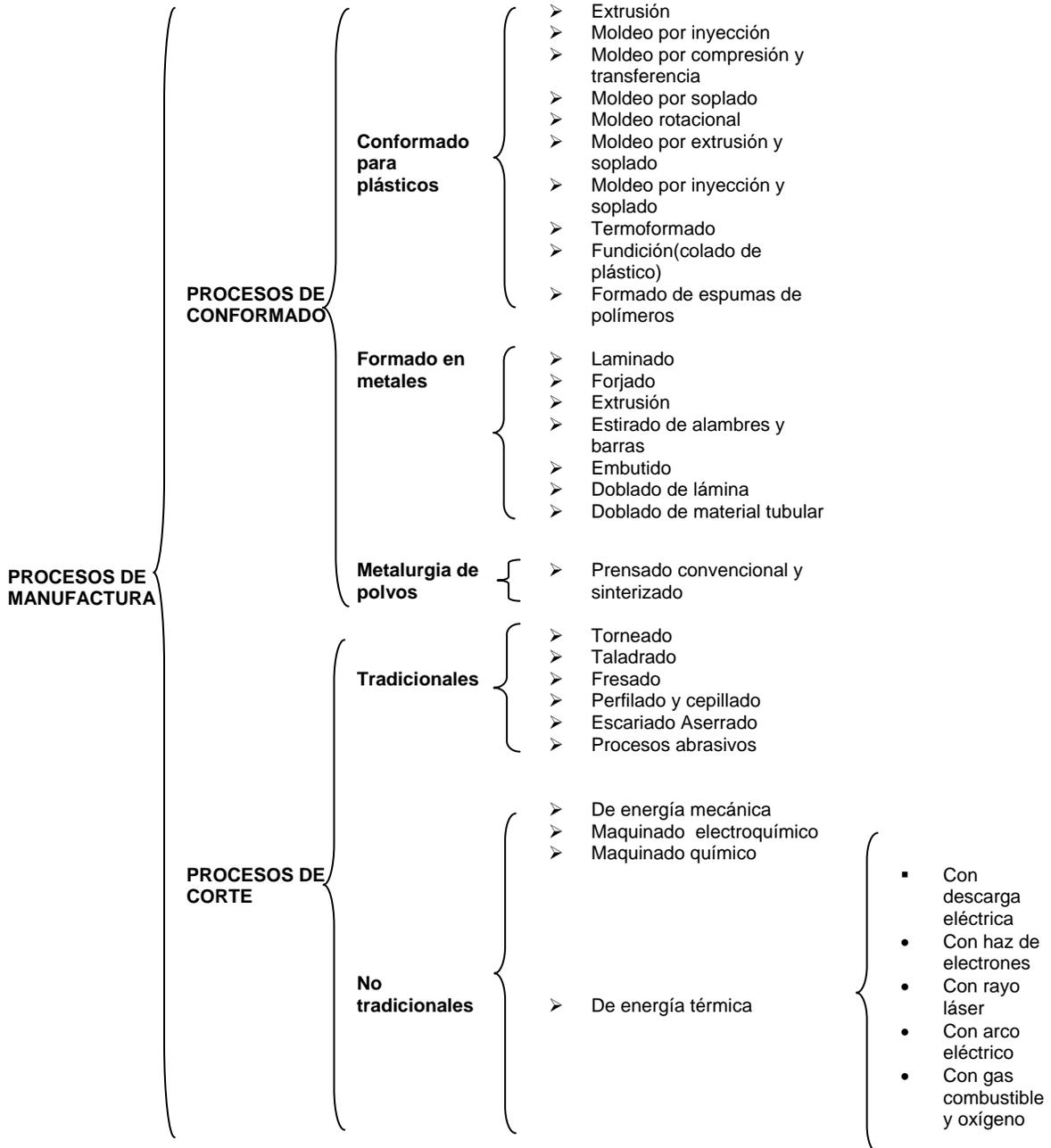
Con esta modificación la deflexión no será un factor negativo para llevar a cabo esta operación.

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS Y APLICACIONES DE LOS PROCESOS DE CONFORMADO DE MATERIALES

CONCEPTOS Y APLICACIONES DE LOS PROCESOS DE CONFORMADO DE MATERIALES

Los procesos de manufactura como se dijo en la parte introductoria juegan un papel muy importante en la vida diaria ya que muchos de los productos, maquinaria y equipo con que se producen se pueden fabricar ya sea por medio del conformado de materiales o por el corte de materiales cuando la forma que se requiere es de mayor complejidad. En seguida se presenta la división de dichos procesos, aunque sólo se tomarán como casos algunos de estos.



La manufactura es posible gracias a la tecnología, por medio de esta se generan los bienes necesarios y utilizados en nuestra vida diaria para hacerla más cómoda.

Al ser tan amplia la gama de procesos este trabajo sólo trata algunos casos donde se pueden conocer los principios fundamentales a considerar en la producción de piezas de plástico o metálicas.

EXTRUSIÓN

La extrusión es un proceso que moldea materiales termoplásticos convirtiéndolos en láminas, tubos o formas que deben tener una sección transversal constante y a veces irregular.

El material plástico seco, normalmente en forma de gránulos o polvo, se coloca en una tolva que alimenta una cámara larga y cuidadosamente calentada. Dentro de la cámara un tornillo giratorio mezcla el plástico para producir un fundido uniforme y lo obliga a pasar por el orificio de una matriz. El salir el material extruido de la matriz, se hace pasar por un medio enfriador (aire o agua) mediante un transportador o algún otro mecanismo de tracción. Se solidifica tomando la forma de la sección transversal de la abertura del dado.

La tubería u otras secciones transversales huecas se hacen con matrices que tienen un corazón (o mandril) para formar el hueco. Se introduce aire a través del corazón y se inyecta dentro del hueco de la extrusión mientras sale de la matriz. El aire da soporte al interior de la extrusión y evita que se colapse durante el enfriamiento. Generalmente, la tubería pasa por el interior de otra matriz o de un mandril de enfriamiento para mantener su concentricidad.

Las operaciones secundarias que se hacen línea abajo son muchas veces tan importantes en la manufactura de un producto extruido como la extrusión misma. Entre las operaciones que se realizan en línea encontramos el corte a la longitud deseada, aplicación de películas (como para simular veteado de madera, hule espuma, cinta protectora, etc.), troquelado (para tener agujeros especiales, ranuras o cortes que no son posibles extruir, grabados, formado o ensamblado.

Productos obtenidos

Las secciones extruidas pueden ser tan pequeñas como un hilo y tan grandes como una tubería de 300 mm (12 pulgadas) de diámetro, casi cualquier forma con una sección transversal constante puede ser adecuada para extrusión. La longitud puede ser tan larga como se quiera ya que el material se alimenta en forma continua a través del extrusor. La pieza terminada puede ser tan corta como una fracción de pulgada si el extruido se corta en fragmentos. Tanto los termoplásticos rígidos como los flexibles se pueden extruir.

La extrusión se emplea muchas veces para molduras de puertas, ventanas y pisos. Encuentran uso como tiras de desgaste en componentes de chumaceras de baja fricción, tuberías, sellos, arneses de cables y muchos otros componentes.

El encamado es otra técnica común de extrusión. Permite que longitudes continuas de alambre sólido o tiras de metal queden encamadas (parcial o totalmente) en el perfil termoplástico extruido. La ventaja del encamado de metal es que se tiene el máximo de integridad estructural con el calor, color y resistencia química del plástico extruido.

Teoría de la extrusión de plásticos

En esta operación el material se transporta del cilindro hacia la abertura del dado por la acción del tornillo extrusor, cuyo funcionamiento está determinado por su geometría y su velocidad de rotación, esto se refleja en la siguiente ecuación de la velocidad del flujo volumétrico por arrastre:

$$Q_d = 0.5\pi^2 D^2 \frac{Nd}{60} \cos A \sin A$$

Ya que otro elemento importante es el dado extrusor, también se debe tener en cuenta que este origina un flujo a contrapresión que depende las dimensiones del tornillo, la viscosidad del polímero fundido y del gradiente de presión estática.

$$Q_b = P \frac{\pi D d^3 \sin^2 A}{12\eta L}$$

Donde para ambas ecuaciones las variables son las siguientes:

- D = el diámetro de la paleta del tornillo, en pulg o en mm
- N = la velocidad de rotación del tornillo en $\frac{rev}{seg}$
- A = el ángulo de la paleta o hélice del tornillo
- P = la presión estática en $\frac{lb}{pulg^2}$ o $\frac{MPa}{m}$
- L = la longitud del cilindro en pulg o mm
- η = la viscosidad en $\frac{lb - seg}{pulg^2}$ o $\frac{N - seg}{m^2}$

10.- En una fábrica se producen perfiles y tubos de diferentes secciones transversales, en esta ocasión se tiene un pedido urgente de 2000 piezas de un tubo de PVC de 19.685 pies de largo y un diámetro exterior de 2 pulgadas y 3/32 de espesor, y el cliente pide que se le entregue en una semana, se cuentan con 50 piezas en el almacén. Debido a la existencia de otros pedidos, sólo hay

disponibles 2 días para dedicarlos a otro trabajo y una máquina extrusora disponible, cuyas características preferibles de operación para cumplir con los lineamientos de calidad son las siguientes:

El cilindro extrusor tiene un diámetro de 2.5 pulg. El tornillo gira a 60 rev/min; la profundidad del canal = 0.20 pulg. Y su ángulo de paleta o aspa = 17.5°. La presión estática en el extremo del dado del cilindro es de 800 lb/pulg² y la longitud del cilindro es 50 pulg. La viscosidad de fusión del polímero es 150×10^{-4} lb-seg/pulg.

Tomando en cuenta que esta máquina tiene un mantenimiento diario de media hora y existen actualmente dos turnos de 8 horas. El Ingeniero Industrial encargado del control de producción quiere determinar si es posible entregar este pedido a tiempo, de lo contrario ¿qué ajuste podría sugerir para lograrlo y que el cliente quede satisfecho?

Solución

$$D = 2.5 \text{ pulg.}$$

$$N = 60 \text{ rpm}$$

$$d = 0.2 \text{ pulg}$$

$$\angle A = 17.5^\circ$$

$$P = 800 \text{ lb/pulg}^2$$

$$L = 50 \text{ pulg}$$

$$\eta = 150 \times 10^{-4} \text{ lb*seg/pulg}^2$$

$$Q_x = Q_d - Q_b$$

Donde

Q_x : es la velocidad de flujo resultante del polímero fundido en el extrusor

Q_d : es la velocidad de flujo volumétrico por arrastre

Q_b : es el flujo a contrapresión

$$Q_d = 0.5 \pi^2 D^2 \frac{Nd}{60} \cos A \sin A$$

$$Q_d = 0.5 \pi^2 (2.5 \text{ pulg})^2 \left(\frac{60 \frac{\text{rev}}{\text{min}}}{60 \frac{\text{seg}}{\text{min}}} \right) (0.2) \cos 17.5^\circ \sin 17.5^\circ$$

$$Q_d = 1.7691 \text{ [pulg}^3/\text{s]}$$

$$Q_b = P \frac{\pi D d^3 \sin^2 A}{12 \eta L} = \frac{\left(800 \frac{lb}{pulg^2}\right) \pi (2.5 pulg) \left((0.2 pulg)^3\right) (\sin 17.5^\circ)^2}{12 \left(150 \times 10^{-4} \frac{lb \cdot seg}{pulg^2}\right) (50 pulg)}$$

$$Q_b = 0.5050227 \left[pulg^3 / s \right]$$

$$Q_x = 1.7691 - 0.50502 = 1.2640 \left[\frac{pulg^3}{s} \right]$$

Así determinamos la velocidad de producción del tubo:

$$A_{\text{sección transversal del tubo}} = \frac{\pi}{4} \left[(2 pulg)^2 - (1.90625)^2 \right] = 0.28762 pulg^2$$

$$\text{vel de prod del tubo} = \frac{Q_x}{A} = \frac{1.2640 \frac{pulg^3}{seg}}{0.2862 pulg^2} = 4.4164 \frac{pulg}{seg}$$

Tiempo para producir 1 tubo.

$$t_{\text{prod}} = \frac{L_{\text{tubo}}}{V_{\text{prod}}} = \frac{236.22 \frac{pulg}{pieza}}{4.4164 \frac{pulg}{seg}} = 53.487 \frac{seg}{pieza}$$

Tiempo disponible en esta máquina = 2 días * (16 - 0.5 horas/día) = 31 horas

Producción de tubos en 31 horas

$$Pr od_{(31hrs)} = \frac{t_{\text{disponible}}}{t_{\text{prod}(1tubo)}} = \frac{111600 seg}{53.487 \frac{seg}{pieza}} = 2086.4883 piezas$$

Concluimos que si es posible entregar este pedido a tiempo sin recurrir a las horas extra o modificar la velocidad de producción.

FUNDICIÓN

Proceso de producción de piezas metálicas a través del vertido de metal fundido sobre un molde hueco, por lo general hecho de arena. El principio de **fundición** es simple: se funde el metal, se vacía en un molde y se deja enfriar, existen todavía muchos factores y variables que se deben considerar para lograr una operación

exitosa de fundición. La fundición es un antiguo arte que todavía se emplea en la actualidad, aunque ha sido sustituido en cierta medida por otros métodos como el fundido a presión (método para producir piezas fundidas de metal no ferroso, en el que el metal fundido se inyecta a presión en un molde o troquel de acero), la forja (proceso de deformación en el cual se comprime el material de trabajo entre dos dados usando impacto o presión para formar la parte), la extrusión (es un proceso de formado por compresión en el cual el metal de trabajo es forzado a fluir a través de la abertura de un dado para darle forma a su sección transversal), el mecanizado y el laminado (es un proceso de deformación en el cual el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos opuestos).

Procesos de Fundición

La realización de este proceso empieza lógicamente con el molde. La cavidad de este debe diseñarse de forma y tamaño ligeramente sobredimensionado, esto permitirá la contracción del metal durante la solidificación y enfriamiento. Cada metal sufre diferente porcentaje de contracción, por lo tanto si la presión dimensional es crítica la cavidad debe diseñarse para el metal particular que se va a fundir. Los moldes se hacen de varios materiales que incluyen arena, yeso, cerámica y metal. Los procesos de fundición se clasifican de acuerdo a los diferentes tipos de moldes.

Proceso

Se calienta primero el metal a una temperatura lo suficientemente alta para transformarlo completamente al estado líquido, después se vierte directamente en la cavidad del molde. En un molde abierto el metal líquido se vacía simplemente hasta llenar la cavidad abierta. En un molde cerrado existe una vía de paso llamada sistema de vaciado que permite el flujo del metal fundido desde afuera del molde hasta la cavidad, este es el más importante en operaciones de fundición.

Cuando el material fundido en el molde empieza a enfriarse hasta la temperatura suficiente para el punto de congelación de un metal puro, empieza la solidificación que involucra un cambio de fase del metal. Se requiere tiempo para completar este cambio de fase porque es necesario disipar una considerable cantidad de calor. El metal adopta la forma de cavidad del molde y se establecen muchas de las propiedades y características de la fundición. Al enfriarse la fundición se remueve del molde; para ello pueden necesitarse procesamientos posteriores dependiendo del método de fundición y del metal que se usa. Entre ellos tenemos:

- El desbaste del metal excedente de la fundición.
- La limpieza de la superficie.
- Tratamiento térmico para mejorar sus propiedades.

- Pueden requerir maquinado para lograr tolerancias estrechas en ciertas partes de la pieza y para remover la superficie fundida y la microestructura metalúrgica asociada.

Fundición a la arena

Existen dos métodos diferentes por los cuales la fundición a la arena se puede producir. Se clasifica en función de tipo de modelo usado, ellos son: modelo removible y modelo desechables.

En el método empleando modelo removible, la arena comprimida alrededor del modelo el cual se extrae más tarde de la arena. La cavidad producida se alimenta con metal fundido para crear la fundición. Los modelos desechables son hechos de poliestireno y en vez de extraer el modelo de la arena, se vaporiza cuando el metal fundido es vaciado en el molde.

Para entender el proceso de fundición, es necesario conocer como se hace un molde y factores como el procedimiento de moldeo, modelo, arena, corazones, equipo metálico, metal, vaciado y limpieza.

Fundición Centrífuga

La colada de la fundición centrífuga se realiza haciendo girar el molde alrededor de un eje horizontal o vertical, con lo cual la fuerza centrífuga obliga al metal fundido a rellenar todas las cavidades del molde.

Este procedimiento se aplica principalmente para moldear piezas de revolución, como tubos, casquillos, anillos, etc., sin necesidad de machos, pues la fuerza centrífuga proyecta el metal fundido sobre las paredes del molde, formando un tubo cuyo espesor estará en función de la cantidad de metal colado.

También se pueden moldear por centrifugación piezas de cualquier forma situadas en moldes simétricos con relación a un eje de giro, cuyos canales de alimentación parten del centro del molde a los que llega el metal por el bebedero colado en el eje.

Los moldes permanentes se han hecho frecuentemente en la fundición centrífuga de magnesio. Desde entonces las piezas de fundición de magnesio son forzadas nuevamente al molde, las piezas se enfrían mas rápidamente y el aire o gas atrapados se eliminan entre el molde y el material.

La fundición centrífuga es un método en el que aprovecha la fuerza centrífuga que se puede generar al hacer girar el metal en torno de un eje. Existen tres tipos de fundición centrífuga: fundición centrífuga real, fundición semicentrífuga y centrifugado.

Fundición centrífuga real

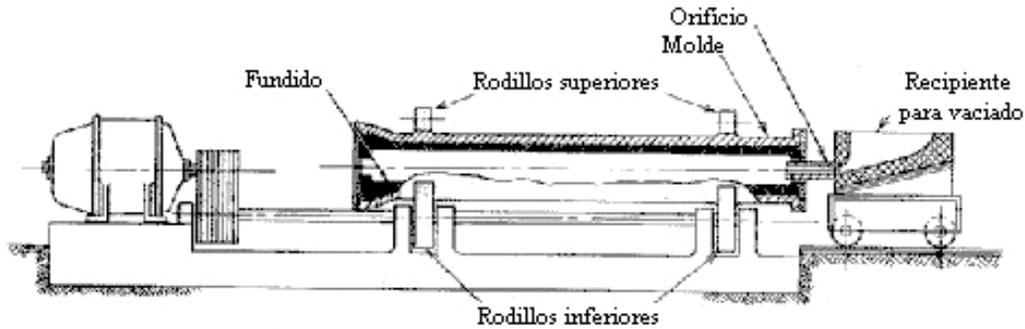
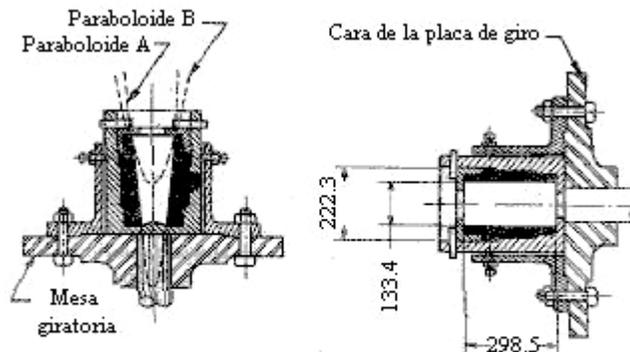


FIG. 1.25

Es el procedimiento utilizado para la fabricación de tubos sin costura, camisas y objetos simétricos, los moldes se llenan del material fundido de manera uniforme y se hace girar al molde sobre su eje de rotación.

Fundición semicentrífuga

Es un método en el que el material fundido se hace llegar a los extremos de los moldes por la fuerza centrífuga que genera hacer girar a los moldes, los extremos se llenan del material fundido, con buena densidad y uniformidad. El centro tiene poco material o de poca densidad. Por lo regular el centro en este tipo de sistemas de fundición es maquinado posteriormente.

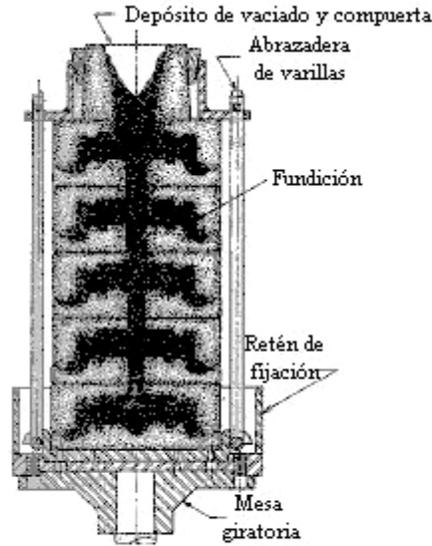


Método de fundición centrífuga real, para cilindros de motor radial.

FIG. 1.26

Centrifugado

Es un sistema donde por medio de un tallo se hace llegar metal fundido a racimos de piezas colocadas simétricamente en la periferia. Al poner a girar el sistema se genera fuerza centrífuga la que es utilizada para aumentar la uniformidad del metal que llena las cavidades de los moldes.



*Moldeo cemicentrífugo, en montón,
de ruedas de ferrocarril.*

FIG. 1.27

Aunque en la fundición centrífuga hay limitaciones en el tamaño y forma de piezas fundida, se pueden hacer desde anillos de pistón de pocos gramos de peso y rodillo para papel que pesen arriba de 40 toneladas, Blocks de maquinas en aluminio.

Teoría de la fundición

Tiempo de solidificación

Un defecto que se presenta con frecuencia en las fundiciones se debe a la contracción que provoca la aparición de una especie de cavidad en la fundición también conocida como rechupe. Para minimizar o anular el rechupe se pueden sobredimensionar las cavidades de los moldes e incluir una mazarota bien diseñada que alimente metal líquido al proceso durante el enfriamiento y compensar así la contracción por solidificación.

El tiempo total de solidificación es el tiempo necesario para que la fundición solidifique después del vaciado, este tiempo se puede obtener por una relación empírica conocida como regla de Chvorinov:

$$t_{st} = K \left(\frac{V}{A} \right)^n \text{ donde}$$

t_{st} = tiempo de solidificación total en min.

A = el área total de la fundición en pulg^2 o cm^2

V = el volumen de la fundición en $pu\lg^3$ o cm^3

K = la constante del molde (datos experimentales) en $\frac{\text{min}}{pu\lg^2}$ o $\frac{\text{min}}{cm^2}$

n = es un exponente que generalmente toma un valor de 2.

Esta regla indica que una fundición con una relación alta de volumen a área superficial se enfriará y solidificará más lentamente que otra con una relación más baja.

En otras palabras el cálculo del tiempo de solidificación total puede ser aprovechado para el diseño de la mazarota, ya que el t_{st} de la mazarota debe exceder al t_{st} de la fundición para eliminar problemas por contracción.

Flotación en la fundición en arena

Si la fundición lleva alguna cavidad, es necesario emplear un corazón que generalmente se hace de arena y en ocasiones puede requerir de sujetadores para soportar la fuerza de flotación originada por el metal que desplaza dicho corazón, de acuerdo con el Principio de Arquímedes.

La fuerza que tiende a levantar al corazón es igual al peso del líquido menos el peso del corazón mismo, esto es:

$$F_{flot} = W_{metal} - W_{corazon} \Rightarrow F_{flot} = \rho_{metal} Vg - \rho_{arena} Vg \quad \text{donde:}$$

F_{flot} = la fuerza de flotación, en N o lb.

ρ_{metal} = densidad del metal, en $\frac{lb}{pu\lg^3}$ o $\frac{g}{cm^3}$ o $\frac{kg}{m^3}$

ρ_{arena} = densidad de la arena, en $\frac{lb}{pu\lg^3}$ o $\frac{g}{cm^3}$ o $\frac{kg}{m^3}$

g = gravedad, $9.81 \frac{m}{s^2}$ o $32.2 \frac{pie}{s^2}$ o $386.2 \frac{pu\lg}{s^2}$

V = volumen del corazón, en m^3 o cm^3 o $pu\lg^3$

La fuerza de flotación representa un riesgo durante el vaciado ya que puede mover al corazón y afectar la fundición. Para eliminar este riesgo se pueden colocar sujetadores que mantengan al corazón en su lugar.

11.- El año pasado, en una fundidora se instaló un sistema formal de administración de materiales en sus instalaciones que trabajan desde hace 5

años. La productividad total antes de instalar el sistema era de \$1.11/dólar en términos de dólares constantes respecto al año 1. Este año (año 6), la empresa mostró un mejoramiento en su productividad total del 10 % sobre la del año pasado, debido principalmente al sistema de administración de materiales. Se proyecta la misma tasa de crecimiento en la productividad total para los próximos cuatro años. Se planea instalar un sistema MRP completo dentro de 8 años y este sistema en realidad tendrá un impacto negativo de 3 % en la productividad total en los primeros 2 años después de su instalación por el alto costo de ponerlo en marcha, pero después de los 2 años se espera una ganancia en la productividad total a una tasa del 5 % anual.

El Ingeniero Industrial que participa en este proyecto está revisando los procesos de fabricación de los productos para trabajar e identificar donde se pueden conseguir mejoras para que el sistema funcione de acuerdo con lo esperado y se han detectado algunos problemas en algunos productos estos son una pieza de aluminio en forma de tubo, una biela y uno de los productos hechos por fundición centrífuga.

El primer producto que se revisa es una pieza de aluminio en forma de tubo que es parte de un molino para carne. El corazón de arena usado para conservar la cavidad tiene un volumen de 2.2 dm^3 , debido a que en ésta se colocan otras piezas es importante lograr que las dimensiones sean las adecuadas. Los defectos que provocan que la pieza no tenga las características deseadas tienen que ver con la fuerza de flotación que provoca que el corazón se mueva durante el vaciado del metal pues el número de sujetadores que se deben colocar tiene que ser suficiente mientras la operación se lleva a cabo, cada uno soporta una fuerza de 27 N. ¿Cuál es el número mínimo de sujetadores que deben colocarse abajo y arriba del corazón?

El segundo producto es una biela en cuyo proceso se ha detectado un defecto relacionado con la contracción, lo cual provoca que se tengan rechazos de este producto, así se tiene que volver a procesar generando pérdidas por el tiempo empleado, el costo del combustible, entre otros. La biela tiene un extremo sólido de 80 mm de diámetro y una altura de 50 mm. La parte es alimentada del extremo grande y se coloca un rebosadero en el extremo pequeño. Para asegurar que está bien diseñada es necesario calcular las dimensiones de un rebosadero con relación de $h=1.2d$; donde h es la altura y d el diámetro de este rebosadero al cual le toma un 50% más de tiempo para solidificar comparado con el extremo pequeño eliminando de esta forma el defecto por la contracción.

También se están presentando problemas con un producto de aluminio hecho por el método de fundición centrífuga. En este proceso han tenido problemas con la uniformidad de la pieza, provocada por la "luvia" que se origina porque la velocidad de rotación no es suficiente, para corregir este problema han aumentado la velocidad a un extremo tal que el consumo de energía eléctrica es exagerado y a veces el molde no resiste la presión. Lo mejor es recomendar la velocidad

adecuada y suficiente para lograr que los productos cumplan con las características deseadas y el consumo de energía no sea excesivo.

La experiencia ha mostrado que un buen colado centrífugo se obtiene del aluminio si se gira a velocidad suficiente para crear una presión de 250 KPa en su periferia. Se supone que el colado es continuo desde su centro de gravedad, alrededor del cual se gira hacia su periferia. ¿A qué velocidad debe girarse este colado simétrico de aluminio de 500 mm de diámetro? $\rho_{Al} = 2.699 [g / cm^3]$

SOLUCIÓN FUNDICIÓN 1.

$$V = 2.2 \text{ dm}^3 \qquad F_{flot} = ?$$

Aluminio

$$\rho_{Al} = 2.7 [g / cm^3]$$

$$F_{flot} = mg \rightarrow \text{pero } m = \rho V \rightarrow F_{flot} = \rho Vg$$

$$F_{flot} = \left(2700 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \right) \left(2.2 \times 10^{-3} [m^3] \right) \left(9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \right)$$

$$F_{flot_{Al}} = 58.27 [N]$$

$$\# \text{ sujetadores} = \frac{f_{flot}}{f_{sujetador}} = \frac{58.27 N}{27 N} = 2.1581 \approx 3 \text{ sujetadores}$$

Para resistir la fuerza de flotación deberán colocarse 3 sujetadores abajo y 3 arriba, evitando así defectos en la pieza.

FUNDICIÓN 2

$$\frac{h}{d} = 1.2 \rightarrow h = 1.2d$$

$$t_{S_R} = 1.5 t_{solpieza} \rightarrow K \left(\frac{V}{A} \right)_R^2 = 1.5 K \left(\frac{V}{A} \right)_{pieza}^2$$

$$\left[\frac{(\pi d^2 / 4)h}{2(\pi d^2 / 4) + \pi dh} \right]^2 = 1.5 \left[\frac{\frac{\pi(8)^2}{4}(5)}{2\left(\frac{\pi(8)^2}{4}\right) + \pi(8)(5)} \right]^2$$

Como $h=1.2d$ se sustituye:

$$\left[\frac{d / 4(1.2d)}{d / 2 + 1.2d} \right] = 1.5 \left(\frac{80}{72} \right)^2 \rightarrow \frac{0.3d}{1.7} = 1.85$$

$$d = 7.7[cm] \quad h = 1.2(7.7) \rightarrow h = 9.25[cm.]$$

Con estas dimensiones del rebosadero se espera que la biela ya no presente defectos.

FUNDICIÓN 3.

$$P = 250 \text{ Kpa}$$

$$D = 500mm \rightarrow R = 0.25m$$

Para el aluminio calculamos la velocidad con $N = \sqrt{\frac{1800P}{\rho\pi^2 R^2}}$, con los datos tenemos:

$$N = \sqrt{\frac{1800(250 \cdot 10^3) Pa}{\left(2699 \frac{kg}{m^3}\right)(\pi)^2 (0.25m)^2}} = 519.89[RPM] \approx 520[RPM]$$

Con esta medida se espera que se ahorre energía, tiempo y gastos para preparar el molde.

Después de analizar el proceso de producción de las piezas mencionadas se espera que el sistema de administración de materiales cumpla con las expectativas y tenga un resultado positivo en la productividad total, al poder aprovechar mejor los recursos con los que se cuenta.

El impacto del sistema MRP ocurre en el año 8 como se indica, así que calculamos la productividad para los años 6 y 7, al 10 % de mejoramiento anual.

Así la productividad total "PT" para los años 6 y 7 sería:

$$PT_6 = PT_5 \cdot 1.10 = 1.11 \cdot 1.1 = \$1.221/\text{dólar}$$

$$PT_7 = PT_6 * 1.10 = 1.221 * 1.1 = \$1.343/\text{dólar}$$

El sistema de administración de materiales tiene un impacto positivo del 10 % anual se espera que el MRP tenga un impacto negativo del 3 % por año, con lo que el efecto neto da + 7 % para los años 8 y 9.

$$PT_8 = PT_7 * 1.07 = 1.343 * 1.07 = \$1.437/\text{dólar}$$

$$PT_9 = PT_8 * 1.07 = 1.437 * 1.07 = \$1.538/\text{dólar}$$

Como del año 10 en adelante, el efecto positivo de la administración de materiales combinado con el MRP es 15 % anual.

$$PT_{10} = PT_9 * 1.15 = 1.538 * 1.15 = \$1.768/\text{dólar}$$

$$PT_{11} = PT_{10} * 1.15 = 1.768 * 1.15 = \$2.034/\text{dólar}$$

$$PT_{12} = PT_{11} * 1.15 = 2.034 * 1.15 = \$2.339/\text{dólar}$$

Lo anterior refleja un incremento en la productividad total, aunque sabemos que para que se logren estos resultados es necesario dar seguimiento a las diversas actividades que se desarrollen en esta fundidora pues cada parte debe mejorar y mantenerse o procurar que lo planeado se lleve a cabo.

RECALCADO

En el recalcado en frío se aplica una fuerza por medio de uno o más golpes de una herramienta. Dicha fuerza desplaza el metal de una parte o en todo el pedazo de metal, alambre o barra. Este flujo maleable produce una sección de diferentes contornos, mayor en la sección transversal que la del material original. La fuerza generalmente se aplica con un punzón móvil que forma la porción del metal que sobresale de una matriz estacionaria. Algunas piezas se recalcan en un punzón, otras en la matriz, otras tanto en el punzón como en la matriz y otras entre el punzón y la matriz.

Productos obtenidos

El recalcado en frío está indicado para producciones de alto volumen de piezas relativamente pequeñas. La hechura de cabezas de una amplia variedad de sujetadores es, aún, la mayor aplicación individual de este proceso. Sin embargo, cuando se combina con otras operaciones de formado como extrusión, perforado, canteado y roscado, se aplica en forma creciente a la producción de muchas piezas diferentes.

Los materiales utilizados llegan a 50 mm (2 pulgadas) o más de diámetro. El tamaño de las piezas recaladas varía desde bolas de ½ mm (0.020 pulgadas) de diámetro hasta grandes ejes, piñones con vástago y otras piezas que llegan a pesar 3.2 kg (7 lb) o más. Las piezas recaladas más largas son de alrededor de 230 mm (9 pulgadas) de largo, aunque algunas máquinas especiales pueden manejar piezas más largas. Los materiales usados van desde aluminio hasta los

aceros al carbón. Los aceros inoxidables así como las aleaciones de cobre y níquel, también se recalcan en frío.

Las aplicaciones habituales del recalcado en frío incluyen, además de los sujetadores (tornillos) convencionales, las siguientes piezas: válvulas, perillas, espaciadores, contactos eléctricos, levas, postes terminales, ejes, rodillos, bolas, terminales eléctricas, bases para transistores, pernos para reloj, conexiones para cables, cuerpos para bujías, carcasas para uniones o soquets, árboles y ejes, siluetas de engranes, pistones, conexiones para manguera, tapones para tubería, bujes para ruedas, etc.

12.- Una empresa que fabrica diversos artículos de ferretería produce clavos. El Ingeniero Industrial que verifica la calidad de los productos está encargado en el área de producción y necesita calcular la longitud necesaria de alambre para ejecutar la operación de encabezamiento de uno de sus productos y verificar además que dicha dimensión no exceda tres veces el diámetro del alambre inicial ya que esta es una condición que por medio de la práctica se ha determinado para evitar el doblado o arrugas en este producto, y por economía, la pieza debe diseñarse a fin de requerir el número mínimo de golpes. La operación de encabezamiento se ejecuta en frío para producir la cabeza de un clavo de acero.

El coeficiente de resistencia del acero es $K = 80000 \frac{lb}{pulg^2}$ y el exponente de endurecimiento por deformación es $n = 0.24$. El coeficiente de fricción en la interfase de trabajo es 0.1. El alambre del cual se hace el clavo es de 3/16 de pulgada de diámetro. La cabeza tiene un diámetro de 3/8 de pulgada y espesor de 1/16 de pulgada. Para ejecutar esta operación adecuadamente se necesita ajustar el tope hasta donde llegue el extremo de alambre con la longitud para el encabezamiento, ¿cuál será la longitud del alambre que se debe proyectar fuera del dado para proveer el volumen suficiente de material en esta operación de recalcado? Y cuál será la fuerza máxima que debe aplicar el punzón para formar la cabeza.

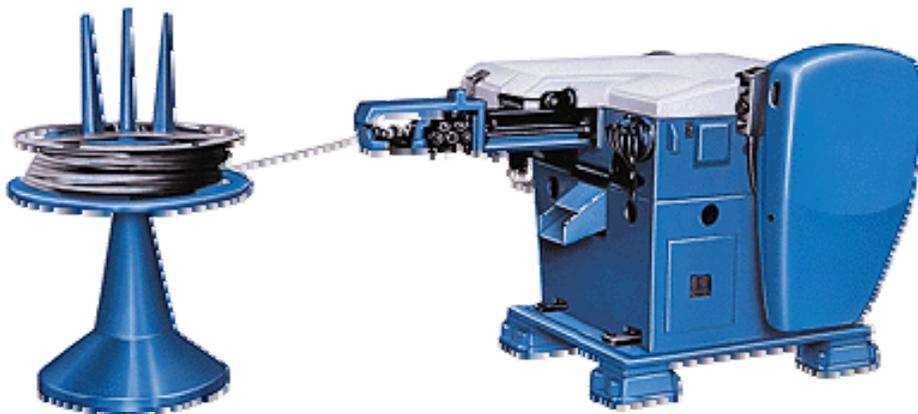


FIG. 1.28

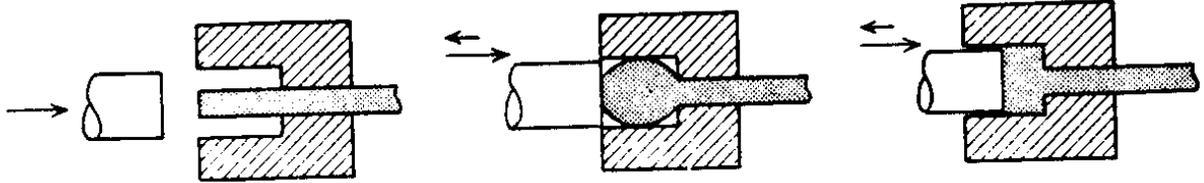


FIG. 1.29

Solución:

Como en este proceso no hay rebaba tenemos que el volumen inicial es igual al volumen final.

$$V_i = V_f \Rightarrow A_i h_i = A_f h_f \text{ Donde:}$$

A_i es el área inicial determinada por la sección transversal del alambre

h_i es la longitud buscada para ajustar el tope y ejecutar la operación

$d_i = 3/16$ pulgada

A_f es el área de la región circular de la cabeza del clavo

$h_f = 1/16$ pulgada, es el espesor de la cabeza del clavo

$d_f = 3/8$ pulgada

$$A_i = \frac{\pi d_i^2}{4} = \frac{\pi \left(\frac{3}{16} \text{ pulg} \right)^2}{4} = 0.0276116 \text{ pulg}^2$$

$$A_f = \frac{\pi d_f^2}{4} = \frac{\pi \left(\frac{3}{8} \text{ pulg} \right)^2}{4} = 0.1104466 \text{ pulg}^2$$

$$V_f = A_f h_f = 0.110446 \text{ pulg}^2 \left(\frac{1}{16} \text{ pulg} \right) = 0.069029 \text{ pulg}^3$$

$$V_i = V_f = 0.069029 \text{ pulg}^3 = A_i h_i \Rightarrow h_i = \frac{0.069029 \text{ pulg}^3}{0.0276116 \text{ pulg}^2} = 0.2499995 \text{ pulg} \approx \frac{1}{4} \text{ pulg}$$

La longitud de alambre proyectada fuera del dado será $\frac{1}{4}$ de pulgada.

Para la fuerza máxima que debe aplicar el punzón tenemos:

$$K = 80,000 \text{ lb/pulg}^2$$

$$n = 0.17$$

$\mu = 0.1$ es el coeficiente de fricción

En el momento en que hace contacto con el dado superior $h = \frac{1}{4}$ pulg y $F = 0$

Al principio de la fluencia h es ligeramente menor de $\frac{1}{4}$ pulgada y asumimos que $\varepsilon = 0.002$ la deformación.

$$Y_f = K\varepsilon^n = 80000 \frac{lb}{pulg^2} (0.002)^{0.17} = 27814.1047 \frac{lb}{pulg^2}$$

El diámetro es aproximadamente $D_i = 3/16$ pulg y $A_i = 0.0276116$ pulg². Para estas condiciones el factor de forma es:

$$K_f = 1 + \frac{0.4\mu D_i}{h_i} = 1 + \frac{0.4(0.1)\left(\frac{3}{16} pulg\right)}{\frac{1}{4}} = 1.03$$

La fuerza de forjado es:

$$F = K_f Y_f A = 1.03 \left(27814.1047 \frac{lb}{pulg^2} \right) (0.0276116 pulg^2) = 791.03323 lb$$

El esfuerzo real que experimenta el material durante el proceso es:

$$\varepsilon = \ln \frac{h_i}{h_f} = \ln \left(\frac{\frac{1}{4} pulg}{\frac{1}{16} pulg} \right) = 1.38629$$

$$Y_f = K\varepsilon^n = 80000 \frac{lb}{pulg^2} (1.38629)^{0.17} = 84567.8706 \frac{lb}{pulg^2}$$

$$K_f = 1 + \frac{0.4\mu D_{fi}}{h_f} = 1 + \frac{0.4(0.1)\left(\frac{3}{8} pulg\right)}{\frac{1}{16}} = 1.24$$

La fuerza máxima que debe aplicar el punzón para formar la cabeza es:

$$F_{max} = K_f Y_f A = 1.24 \left(84567.8706 \frac{lb}{pulg^2} \right) (0.1104466 pulg^2) = 11581.88988 lb$$

La longitud de alambre proyectada fuera del dado será $\frac{1}{4}$ de pulgada. Con estas condiciones el Ingeniero Industrial puede continuar con la producción de este producto.

EXTRUSIÓN Y SOPLADO

El proceso por soplado es una técnica cuyo objetivo es formar objetos termoplásticos huecos. Se aplica aire a presión dentro de una pequeña pieza hueca de plástico calentado (llamada parison) inflándola como globo y presionándola contra las paredes del molde, para tomar la forma de la cavidad del molde. Allí se enfría y endurece, el molde se abre y la pieza se expulsa.

En el moldeo soplado por extrusión, el parison se extruye como un tubo. Éste se inserta en el molde de soplado con un extremo acoplado a un perno o aguja de soplado. Al cerrar el molde, el tubo se oprime en ambos extremos y se corta. Después de que el tubo ha sido cortado se infla y la pieza se forma, se abre el molde y la pieza se expulsa y el exceso de material adyacente se elimina.

En el moldeo soplado por inyección, el parison se forma por moldeo de inyección en lugar de extrusión. Se moldea sobre un mandril para dar la forma hueca, y este mandril transfiere el parison caliente al molde de soplado y luego funciona como boquilla de soplado.

Productos obtenidos

El moldeo por soplado produce objetos de pared delgada, huecos o tubulares. Los recipientes de varios tamaños y formas son los productos predominantes en el moldeo por soplado.

Los espesores de pared de los recipientes domésticos varían desde 0.4 mm (0.015 pulgadas) hasta alrededor de 3 mm (1/8 de pulgada). El espesor de las paredes en el área del cuello de un recipiente es normalmente mayor que en el cuerpo para dar superficies de sellado seguro para las tapas o artefactos surtidores, las paredes se pueden adelgazar considerablemente por debajo de los valores nominales en otras áreas donde el material se estira para formar el molde.

La aplicación más común es en recipientes para líquidos y otros productos utilizados en el hogar como botes para agua, botellas para detergentes, suavizantes y blanqueadores, aceites comestibles y shampoos, recipientes para varios cosméticos y medicinas.

Otro gran mercado es el de juguetes moldeados por soplado, que van desde pelotas sencillas y bates de peso ligero hasta muñecas complicadas y animales de juguete. También se fabrican por moldeo soplado contenedores especializados como estuches para instrumentos y herramientas, compartimientos para guantes de automóviles, etc.

13.- En una nueva fábrica de refrescos han aparecido algunos problemas en el área de producción de botellas de PET (Tereftalato de polietileno) ya que algunos parison se revientan antes de terminar la operación de soplado. El Ingeniero Industrial sabe que esto genera desperdicios que representan costos y deben

evitarse. El parison se extruye de un dado con diámetro exterior de 11.5 mm y diámetro interior de 7.5 mm. La dilatación observada en el dado es 1.25. El parison se usa para moldear por soplado este envase que tiene un diámetro exterior de 112 mm; se sabe que el problema se origina por la presión máxima de aire cuando comienza el soplado. El Ingeniero Industrial debe determinar cuál debe ser la presión máxima que se tiene que aplicar si el esfuerzo máximo a la tensión para el PET es de 55 MPa, lo cual reducirá los desperdicios y garantizará el abasto de estos envases al área de llenado; ¿cuál sería el espesor de pared correspondiente al envase?

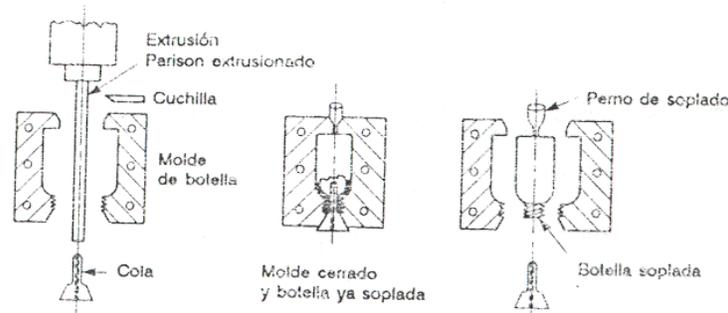


FIG. 1.30

Solución:

Tenemos que para el dado el diámetro exterior es $D_{extd} = 11.5mm$ y el $D_{intd} = 7.5mm$

La relación de dilatación para el espesor de pared es $r_{st} = \frac{t_p}{t_d}$ donde t_p es el espesor de la pared que se dilata al salir del dado de extrusión y t_d es el espesor del tubo justo en el dado.

$$r_{st} = 1.25$$

$$r_{st} = \frac{t_p}{t_d} \Rightarrow t_p = r_{st} t_d = 1.25(11.5mm - 7.5mm) = 5.625mm$$

El diámetro medio del tubo en el dado es la media entre el diámetro exterior del dado y el diámetro interior del dado.

$$D_d = \frac{D_{extd} + D_{intd}}{2} = \frac{11.5mm + 7.5mm}{2} = 9.5mm$$

La relación de dilatación del espesor de la pared es proporcional al cuadrado de la relación de dilatación del diámetro.

$$r_{st} = r_{sd}^2 \Rightarrow r_{sd} = \sqrt{r_{st}} = \sqrt{1.25} = 1.1180339$$

Así el espesor de pared del envase es:

con D_m = diámetro exterior del envase

$$t_m = \frac{r_{sd}^3 t_d D_d}{D_m} = \frac{(1.1180339)^3 (4.5mm)(9.5mm)}{112mm} = 0.533436mm$$

Finalmente la presión de aire durante el moldeo por soplado, $\sigma = 55MPa$ es el esfuerzo máximo a la tensión para el PET, así la presión máxima sería:

$$p = \frac{2\sigma_m}{D_m} = \frac{2(55MPa)(0.533436mm)}{112mm} = 0.52391118MPa = 523.91KPa$$

Con esta presión máxima se evitará que el parison se reviente y se garantizará el abasto de botellas.

EMBUTIDO

14.- El Ingeniero Industrial que se encuentra en el área de producción en una fábrica de utensilios de cocina ha detectado un defecto de arrugado en la pestaña remanente de uno de sus productos, una olla, debido a que la fuerza de sujeción es muy pequeña, este problema retrasa lo planeado en producción, para evitarlo es necesario corregir la fuerza de sujeción aplicada. Para esta operación de embutido se tiene que el diámetro interior de la olla es de 200 mm y su altura de 150 mm. El espesor del disco de lámina usado es de 6 mm y su diámetro inicial es de 300 mm. el radio del punzón y el dado esa de 6.35 mm, la resistencia a la tensión del aluminio 2024 (empleado en la fabricación de esta olla) es de 485 MPa y la resistencia a la fluencia del metal es de 180 MPa. Se considera apropiado determinar la fuerza de embutido, la relación de embutido, la reducción y la fuerza de sujeción, con la que se evitará el defecto en esta olla.

Solución:

Para la relación de embutido tenemos que:

$$DR = \frac{D_b}{D_p} \text{ donde } D_b \text{ es el diámetro inicial del disco y } D_p \text{ el diámetro del punzón.}$$

$$DR = \frac{300mm}{200mm} = 1.50$$

La reducción r es:

$$r = \frac{300m - 200mm}{300mm} = 0.3333 = 33.33\%$$

La relación de espesor al diámetro es:

$$\frac{t}{D_b} = \frac{6mm}{300mm} = 0.02 = 2\% , t \text{ es el espesor inicial de la forma.}$$

La fuerza de embutido requerida para realizar la operación la obtenemos de:

$$F = \pi D_p t (TS) \left(\frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right), \text{ donde TS es la resistencia a la tensión.}$$

$$F = \pi (200mm)(6mm) \left(485 \frac{N}{mm^2} \right) \left(\frac{300mm}{200mm} - 0.7 \right) = 1462725.56112 N$$

$$1ton = 8899.632 N$$

$$F = 164.3579ton$$

Para la fuerza de sujeción tenemos:

Donde Y es el esfuerzo a la fluencia y R_d el radio de la esquina del dado

$$F_h = 0.015Y\pi \left[D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2 \right]$$

$$F_h = 0.015 \left(180 \frac{N}{mm^2} \right) \pi \left[(300mm)^2 - (200mm + 2.2(6mm) + 2(6.35))^2 \right] = 330458.7312 N$$

$$F_h = 330458.7312 N * \frac{1ton}{8899.632 N} = 37.13ton$$

$$DR = \frac{300mm}{200mm} = 1.50 \text{ (relación de embutido)}$$

$$r = \frac{300m - 200mm}{300mm} = 0.3333 = 33.33\% \text{ (es la reducción).}$$

$$F_h = 330458.7312 N * \frac{1ton}{8899.632 N} = 37.13ton \text{ (fuerza de sujeción)}$$

$$F = 164.3579ton = 165 ton \text{ (fuerza de embutido)}$$

Con estas fuerzas aplicadas al disco durante esta operación, desaparecerá el defecto de arrugado de la pestaña del producto.

15.- En una fábrica de aparatos eléctricos se desea hacer una caja para un nuevo diseño de un instrumento eléctrico que puede fabricarse ya sea con un compuesto de amina urea por moldeo en compresión o de butirato de celulosa por moldeo de inyección. El volumen del artículo es de 150 cm^3 (9 in^3). El compuesto de urea cuesta 12 centavos/cm^3 (1.97 cent/in^3). Se necesitan 90 segundos para moldear una pieza en un molde que cuesta \$1500. El compuesto de celulosa cuesta 18 centavos/cm^3 (2.95 cent/in^3). Una pieza puede moldearse en 15 segundos, pero el molde de inyección cuesta \$4500. El tiempo de producción tiene un valor de \$12/hora. Con estas condiciones el Ingeniero Industrial debe reducir el costo para producir este artículo ¿Cuándo se debe seleccionar cada material y proceso?

Solución

Necesitamos evaluar cuál de los dos procesos es más conveniente y cuántas unidades justifican su uso.

Entonces para el proceso de moldeo por compresión del compuesto amina urea tenemos un costo total de:

$$C_{total(amino\ urea)} = C_{compuesto} + C_{molde} + C_{tiempo} = 150 * \left(\frac{12}{100} \$ \right) X + 1500 + 90s * \left(\frac{1hora}{3600s} \right) * \left(12 \frac{\$}{hora} \right) X =$$

$$C_{total(amino\ urea)} = 1500 + 0.48X$$

Para el proceso de moldeo por inyección del compuesto butirato de acetato de celulosa el costo total.

$$C_{total(BAC)} = C_{compuesto} + C_{molde} + C_{tiempo} = 150 * \left(\frac{18}{100} \$ \right) X + 4500 + 15s * \left(\frac{1hora}{3600s} \right) * \left(12 \frac{\$}{hora} \right) X =$$

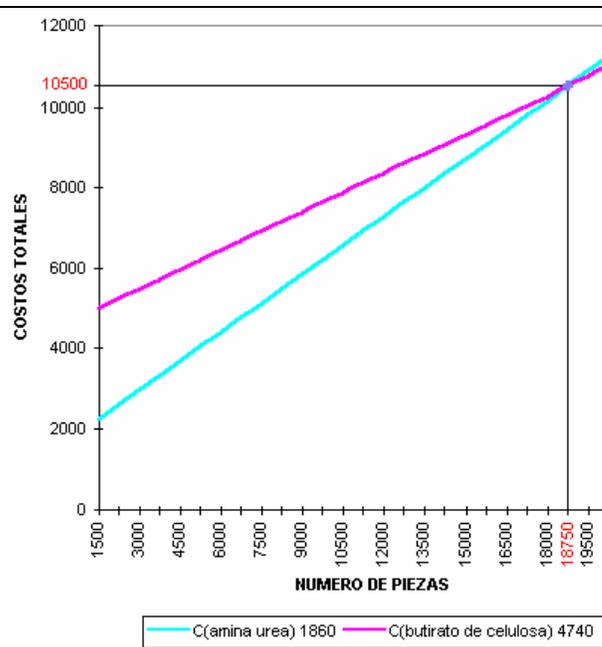
$$C_{total(amino\ urea)} = 4500 + 0.32X$$

Con estos resultados podemos buscar el número de unidades a las cuáles ambos procesos tienen el mismo costo de producción. Igualando costos totales.

$$4500 + 0.32X = 1500 + 0.48X$$

$$0.16X = 3000 \Rightarrow X = 18750 \text{ piezas}$$

Piezas	C(amina urea)	C(butirato de celulosa)
6000	4380	6420
6750	4740	6660
7500	5100	6900
8250	5460	7140
9000	5820	7380
9750	6180	7620
10500	6540	7860
11250	6900	8100
12000	7260	8340
12750	7620	8580
13500	7980	8820
14250	8340	9060
15000	8700	9300
15750	9060	9540
16500	9420	9780
17250	9780	10020
18000	10140	10260
18750	10500	10500
19500	10860	10740
20250	11220	10980
21000	11580	11220
21750	11940	11460



Así con estos resultados podemos concluir que:

- ⇒ de 1 a 18750 piezas es preferible usar el proceso de moldeo por compresión
- ⇒ de 18750 piezas en adelante conviene más el proceso de moldeo por inyección

16.- Una fábrica que produce artículos de plástico cuenta con el equipo necesario para producir sus artículos y de vez en cuando se presenta una situación en la que la producción se puede hacer de diversas maneras para el mismo producto. Ahora un engrane de nylon puede moldearse por inyección o maquinarse en barra pues el equipo para cualquiera de estas opciones está disponible. Se tiene que comparar entre estas dos formas cuál será la más conveniente si se sabe que un dado de moldeo por inyección cuesta \$4800 y el material usado para producir una pieza tiene un costo de \$0.656, mientras que la operación \$0.0372 por pieza. Por otro lado el material para maquinado cuesta \$0.263 por pieza y el tiempo de operación \$1.14 por pieza. De acuerdo con lo anterior cuál será la decisión que tomará el Ingeniero Industrial encargado del control de la producción si se necesitara una producción de: a) 1000 engranes, b) 3000 engranes y c) 6000 engranes.

Solución

Para el proceso por maquinado de barra tenemos sólo el costo de material por pieza y el costo generado por el tiempo de operación.

$$\text{a) Para 1000 engranes } C_{\text{total}} = 1000 \text{ piezas} \left(0.263 \frac{\$}{\text{pieza}} \right) + 1000 \text{ piezas} \left(1.14 \frac{\$}{\text{pieza}} \right) = \$1403$$

$$\text{b) Para 3000 engranes } C_{\text{total}} = 3000 \text{ piezas} \left(0.263 \frac{\$}{\text{pieza}} \right) + 3000 \text{ piezas} \left(1.14 \frac{\$}{\text{pieza}} \right) = \$4209$$

$$\text{c) Para 6000 engranes } C_{\text{total}} = 6000 \text{ piezas} \left(0.263 \frac{\$}{\text{pieza}} \right) + 6000 \text{ piezas} \left(1.14 \frac{\$}{\text{pieza}} \right) = \$8418$$

Para la fabricación del engrane por moldeo por inyección tenemos:

$$\text{a) } C_{\text{total(inyeccion)}} = 1000 \text{ piezas} \left(0.656 \frac{\$}{\text{pieza}} \right) + 1000 \text{ piezas} \left(0.0372 \frac{\$}{\text{pieza}} \right) + 4800 = \$5493.2$$

$$\text{b) } C_{\text{total(inyeccion)}} = 3000 \text{ piezas} \left(0.656 \frac{\$}{\text{pieza}} \right) + 3000 \text{ piezas} \left(0.0372 \frac{\$}{\text{pieza}} \right) + 4800 = \$6879.6$$

$$\text{c) } C_{\text{total(inyeccion)}} = 6000 \text{ piezas} \left(0.656 \frac{\$}{\text{pieza}} \right) + 6000 \text{ piezas} \left(0.0372 \frac{\$}{\text{pieza}} \right) + 4800 = \$8959.2$$

Concluimos que será mejor la fabricación del engrane por medio del maquinado de la barra pues comparando los costos para las diferentes cantidades de engranes es menor el costo para el proceso por maquinado de las barra, lo cual se debe al costo del dado.

17.- Bolsas para empaque son fabricadas mediante soplado de película de PEBD (Polietileno de Baja Densidad, 0.920 g/cm^3). La bolsa más empleada, y por lo tanto la más vendida, es de 60 cm de longitud y 50 cm de ancho, con un espesor de $25 \mu\text{m}$ y el precio de esta resina es de \$0.8 por kg. El Ingeniero Industrial encargado de la producción de bolsas sugiere el uso de un polietileno de mayor densidad (0.922 g/cm^3) cuyo precio es de \$0.96 por kg, ya que se podría tener una reducción de costos. Después de realizar pruebas de resistencia con este material y debido a que se observó que es de mayor resistencia, el espesor puede reducirse a $18 \mu\text{m}$, igualando con esto la resistencia de la bolsa de $25 \mu\text{m}$. Si los demás costos de producción permanecen iguales, ya que se usa el mismo equipo y personal de producción, el ingeniero debe analizar si es conveniente económicamente esta propuesta.

Solución

$$1\text{cm} = 10000\mu\text{m} \Rightarrow 2.5 \times 10^{-3}\text{cm}$$

$$V_{\text{cm}} = 25\mu\text{m}$$

Para el PEBD

$$\text{Vol. bolsa} = (60[\text{cm}])(50[\text{cm}])(2.5 \times 10^{-3}[\text{cm}]) = 7.5\text{cm}^3$$

Cantidad de PEBD empleado en una pieza:

$$7.5\text{cm}^3 \left(0.920 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] \right) = 6.9\text{g}$$

Precio de 1 pieza:

$$6.9[\text{g}] \left(\frac{1\text{hg}}{1000\text{g}} \right) \left(\frac{\$0.8}{\text{hg}} \right) = \$0.00552$$

Para el polietileno de mayor densidad:

$$\text{Vol. bolsa} = (60[\text{cm}])(50[\text{cm}])(1.8 \times 10^{-3}[\text{cm}]) = 5.4\text{cm}^3$$

Cantidad de polietileno para 1 pieza:

$$5.4\text{cm}^3 \left(0.922 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] \right) = 4.9788\text{g}$$

Precio de 1 pieza:

$$4.9788(\text{g}) \left(\frac{1\text{hg}}{1000\text{g}} \right) \left(\frac{\$0.96}{\text{hg}} \right) = \$0.00478$$

Por lo tanto sí es conveniente económicamente la propuesta ya que el costo por pieza es menor y el uso no se ve alterado ya que ambos tipos de bolsa aunque tienen diferente espesor y diferente material, poseen la misma resistencia y su uso puede ser el mismo.

CAPÍTULO 3

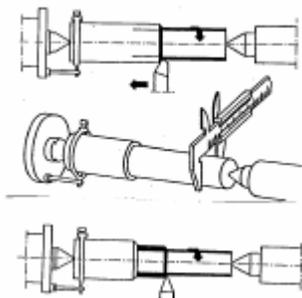
CONCEPTOS Y APLICACIONES DE LOS PROCESOS DE CORTE DE MATERIALES

CONCEPTOS Y APLICACIONES DE LOS PROCESOS DE CORTE DE MATERIALES

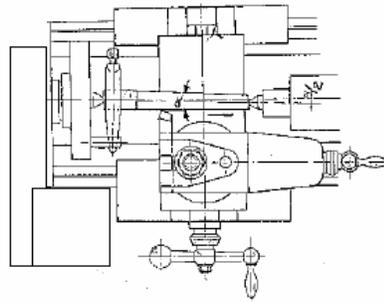
TORNEADO

El torneado es una operación convencional para remoción de material que produce superficies por rotación en la pieza de trabajo. Igual que con otras operaciones de maquinado, con el torneado se remueve material por proceso de corte para producir la forma, tamaño ya acabado de superficie deseados. Se suele efectuar al hacer que las herramientas de corte, de diferente configuración y que trabajan en forma separada o simultánea, se muevan en una trayectoria precisa con respecto a una pieza de trabajo en rotación. Las piezas de trabajo que por lo general son de metal en forma de barras, tubos, piezas fundidas y forjadas se sujetan por medio de platos, boquillas y puntas. La pieza gira en torno a su eje central y a la línea de centros del husillo de la máquina.

Entre las operaciones que se pueden efectuar en el torno se encuentran el refrentado, desvastado, torneado cónico, ranurado y recorte, roscado, torneado con trazador, escariado o rimado, ensanchado con buril.



Cilindrado
FIG. 1.31



Torneado cónico
FIG. 1.32

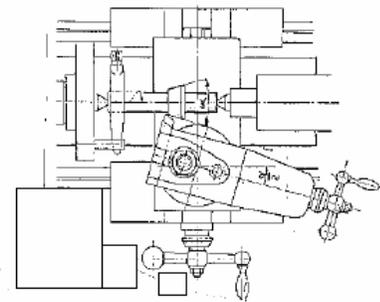
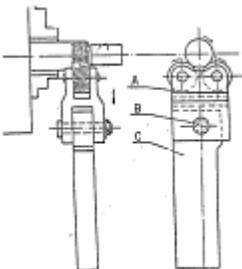
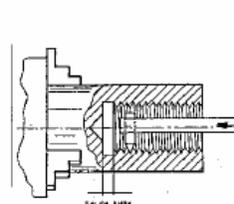


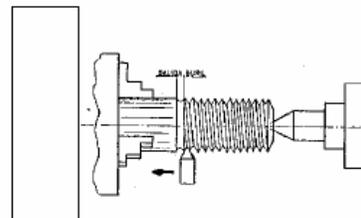
FIG. 1.33



Moletado
FIG. 1.34



Roscado interior con buril



Roscado exterior con buril

Roscado
FIG. 1.35

FIG. 1.36

Hay una gran variedad de tornos y el más sencillo y básico es el torno horizontal. La acción de la herramienta es paralela y transversal al eje de rotación. En casi todos los casos, las herramientas de corte son de montaje individual o en una torreta para herramientas en una corredera transversal, y se utilizan en orden conforme avanza el trabajo.

El material se puede pasar a lo largo del husillo hueco y sujetarlo con un plato (chuck) o con puntas. Las piezas de trabajo irregulares como las fundidas y las forjadas se suelen sujetar con platos.

Los tamaños de los tornos horizontales varían en capacidad de volteo de 150 mm (6 pulgadas) a 1.5 m (60 pulgadas) y longitudes de bancada desde 1 m (40 pulgadas) hasta 15 m (50 pies). Los tornos tienen movimiento automático del carro y de la corredera transversal. El torno de banco es un tipo más pequeño de torno horizontal y se considera más adecuado para piezas de trabajo pequeñas y ligeras. El torno para herramentista o taller mecánico es similar al torno horizontal, pero está construido con especificaciones más precisas. Suele tener una gama amplia de velocidades y avances.

En el torno de revólver (de torreta), llamado a veces máquina manual para hacer tornillos, las herramientas de corte se pueden seleccionar, preajustar y montar en una torreta hexagonal fija en un carro, y éste a su vez, montado en la bancada del torno. El carro suele ser motorizado, e incluye un mecanismo para alinear la torreta. La corredera transversal tiene una torreta de 4 posiciones de alineación rápida y un portaherramientas montado en la parte trasera. Hay disponibles topes de acción directa para todas las herramientas de corte, pero en los tornos que no tienen control automático, por computadora o numérico, el operador es el que debe accionar las herramientas.

La capacidad del plato de boquilla es entre 4.8 y 110 mm (3/16 a 4 ½ pulgadas). La capacidad máxima del plato es de 250 a 380 mm (10 a 15 pulgadas). Los aditamentos para alimentación de barras son comunes.

Los tornos con control numérico o por computadora tienen un control automático continuo de la trayectoria del movimiento de las herramientas. Los tornos pueden ser horizontales, de banco o de torreta que a veces incluye la capacidad para contorneado completo con dos torretas de seis estaciones. Una torreta de montaje lateral sustituye a la corredera transversal de un torno estándar de torreta. El torno controlado por computadora o con control numérico tiene la ventaja de la repetibilidad automática de la operación de maquinado; se almacenan en una memoria todas las instrucciones para su empleo posterior. Si se requiere es posible modificar rápidamente las especificaciones de la pieza.

Productos obtenidos

Las piezas de trabajo pueden variar en tamaño desde componentes diminutos de una válvula de aguja que pesan unos cuantos gramos hasta enormes rodillos

torneados que pesan muchas toneladas. Si se requieren superficies de precisión cuando alguna zona tiene forma redonda, es muy posible que se emplee el torneado. Esto es más común cuando esa superficie hace contacto con una pieza movable o se utiliza para sellamiento. El torneado también se puede aplicar cuando la operación primaria no produce la configuración deseada, por ejemplo, cuando se requieren rebajos o ranuras anulares en piezas recaladas en frío o hechas de polvo de metal.

Algunas piezas torneadas comunes producidas en diversos tornos son tambores y discos de frenos, piezas de válvulas, boquillas, tubo y conexiones de tubo (incluso tes y codos), rodillos de diferentes clases, pistones, rotores de turbinas, cubos, cigüeñales, árboles, pasadores y ejes, cañones de armas y manijas.

18.- En una empresa productora de arandelas, bujes, cojinetes y otros productos obtenidos a partir de lámina de acero, desde sus inicios han dependido de precios y condiciones de sus proveedores. Ahora quieren fabricar su propia lámina e introducirla así a su producción. Debido a las normas existentes en el sector automotriz como la QS 9000 y a las exigencias en cuanto a tolerancias en las dimensiones de sus productos, es necesario que el molino laminador funcione satisfactoriamente, una de las piezas más importantes de éste son los rodillos. Por el momento se desea conocer los parámetros esenciales para el maquinado de algunas piezas, este es el caso del torneado del diámetro exterior de los rodillos para el molino laminador de acero. En el paso final, el diámetro inicial es de 26.25 pulgadas y la longitud de 48.0 pulgadas. Las condiciones de corte serán: avance de 0.0125 pulg/rev y profundidad de corte de 0.125 pulgadas. Se usará una herramienta de corte de carburo cementado, y los parámetros de la ecuación de Taylor de vida de la herramienta para este montaje son: $n = 0.25$ y $c = 1300$. Es conveniente operar a una velocidad de corte de tal manera que la herramienta no necesite cambiarse durante la operación, ya que el Ingeniero Industrial encargado del mantenimiento debe procurar tener ahorros en el uso de sus herramientas y equipo, por lo que procede a determinar la velocidad de corte que hará que la vida de la herramienta sea igual al tiempo requerido para completar esta operación de torneado.

Solución

Tenemos que:

$$\varnothing_{ini} = 26.25 \text{ pulg}$$

$$l = 48 \text{ pulg}$$

$$n = 0.25$$

$$c = 1300 \text{ ft/min}$$

$$f = 0.0125 \text{ pulg/rev}$$

$$d = 0.125 \text{ pulg}$$

$$t_{herram} = t_{maq}$$

$$v_c = \pi ND \Rightarrow N = \frac{v_c}{\pi D}$$

$$t_{maq} = \frac{l}{fN} = \frac{48}{0.0125c}$$

$$v_c t^n = c \Rightarrow v_c t^{0.25} = 1300$$

$$v_c t^n = c \Rightarrow t = \left(\frac{c}{v_c} \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{c^{\frac{1}{n}}}{v_c^{\frac{1}{n}}}$$

$$t_{maq} = \frac{l\pi D}{fv_c} \Rightarrow \frac{c^{\frac{1}{n}}}{v_c^{\frac{1}{n}}} = \frac{l\pi D}{fv_c} \Rightarrow fv_c c^{\frac{1}{n}} = v_c^{\frac{1}{n}} l\pi D \Rightarrow v_c^{\frac{1}{n}} (v_c)^{-1} = \frac{fc^{\frac{1}{n}}}{l\pi D} \Rightarrow v_c^{\frac{1}{n}-1} = \frac{fc^{\frac{1}{n}}}{l\pi D}$$

Sustituyendo:

$$v_c^{\frac{1}{0.25}-1} = \frac{0.0125[(1300)(12)]^{\frac{1}{0.25}}}{48(\pi)(26.25)} \Rightarrow v_c^{4-1} = 1.87 * 10^{11} \Rightarrow v_c = \sqrt[3]{1.87 * 10^{11}}$$

$$v_c = 5718.68 \frac{pulg}{min} \Rightarrow v_c = 5718.68 \frac{pulg}{min} * \frac{1pie}{12pulg} = 476.56 \frac{pie}{min}$$

Con esta velocidad de corte la vida de la herramienta será igual al tiempo $t = 14.76$ segundos requerido para completar la operación de torneado.

TALADRADO

El taladrado es un proceso de maquinado para producir o agrandar un agujero con una herramienta rotatoria de corte llamada broca. Entre las operaciones relacionadas con el taladrado se encuentran las siguientes:

- a) Escariado. Usado para agrandar ligeramente un agujero, suministrar una mejor tolerancia y mejorar su acabado superficial.
- b) Roscado interior. Se realiza por medio de un machuelo en un agujero existente.
- c) Abocardado. Se produce un agujero escalonado en el cual un diámetro más grande sigue a un diámetro más pequeño parcialmente dentro del agujero.
- d) Avellanado. Es una operación en que el escalón en el agujero tiene forma de cono para tornillos y pernos de cabeza plana.
- e) Centrado. Se taladra un agujero inicial para establecer con precisión el lugar donde se taladrará el siguiente agujero.
- f) Refrentado. Es una operación similar al fresado que se usa para suministrar una superficie maquinada plana en la parte de trabajo de una área localizada.

Productos maquinados por esta operación

Los agujeros se maquinan en las piezas de trabajo siempre que con el método primario de producción no se producen los agujeros o no tienen el tamaño, exactitud, rectitud, acabado superficial u otras características que requiere la función de la pieza. Los agujeros maquinados suelen desempeñar alguna función mecánica, por ejemplo, servir como chumacera para un eje, pasador o árbol, con o sin un buje insertado o chumacera mecánica, o producir el lugar y soporte para un pasador, tornillo o perno de sujeción, en este caso el agujero puede estar roscado.

Los agujeros para despejo o lubricación se pueden taladrar, pero casi siempre son fundidos, moldeados o punzonados si el proceso lo permite, porque sus dimensiones no son tan críticas.

Los agujeros ensanchados de rectificados se hacen en componentes en donde se requiere gran exactitud en el diámetro, ubicación, rectitud o sentido. Son más comunes para bajas cantidades de producción, que no justifican el empleo de dispositivos para taladrar y cuando el material es difícil de maquinar, lo cual hace más necesario el uso de herramientas de punta de carburo.

Las piezas típicas con agujeros ensanchados o rectificados incluyen cajas de engranes, brazos de máquinas de coser, chumaceras, cilindros hidráulicos, carcasas de bombas, portatroqueles para troquelado de metales, bastidores de máquinas herramientas y muchos otros componentes de máquinas.

19.- El Ingeniero Industrial que participa en la planeación de un proyecto de una constructora, que hará una nueva línea del metro cuya longitud total será de 12 km, debe determinar los tiempos para efectuar diversas operaciones y considerarlos para saber que modificaciones hacer cuando así se requiera. Él desea saber cuánto tiempo empleará en la operación de taladrado de las planchuelas de junta del riel y los mismos rieles; si el agujero tendrá 5/8 pulg de diámetro y cada riel de 6 m, al igual que las planchuelas, llevan 3 perforaciones en cada extremo para efectuar la unión. Además se tiene en cuenta que se usan 2 planchuelas para unir dos rieles (una a cada lado de estos). Se dispone de un taladro de husillos múltiples que puede hacer 18 perforaciones simultáneas donde se ocupan 4 minutos para cargarlo y descargarlo. Se ha considerado que para cada broca la velocidad de corte será de 75 ft/min con un avance de 0.012 pulg/rev y un ángulo convencional de $\theta = 118^\circ$ en donde la profundidad de cada agujero es de $\frac{3}{4}$ de pulg. Si los rieles y las planchuelas tienen una dureza Brinell 200 HB, ¿cuál será el tiempo empleado en esta operación para considerarlo en la planeación así como la potencia que usará el taladro cuya eficiencia es del 70 % cuando se usa 8 hrs en promedio al día?

$$D = 5/8 \text{ pulg}$$
$$l = \frac{3}{4} \text{ pulg}$$
$$v_c = 75 \text{ ft/min}$$

$$\eta = 70\% = 0.7$$

$$f = 0.012 \text{ pulg/rev}$$

$$N = \frac{v_c}{\pi D}$$

$$t_{maq} = \frac{l + A}{f_r}$$

$$A = \frac{D}{2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$f_r = fN$$

$$A = \frac{D}{2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} = \frac{5/8 \text{ pulg}}{2 \tan\left(\frac{118^\circ}{2}\right)} = 0.817 \text{ pulg}$$

$$N = \frac{v_c}{\pi D} = \frac{(75 \text{ ft/min})(12 \text{ pulg/ft})}{\pi(5/8 \text{ pulg})} = 458 \text{ rpm}$$

$$t_{maq} = \frac{l + A}{f_r} = \frac{3/4 \text{ pulg} + 0.817 \text{ pulg}}{5.5 \text{ pulg/min}} = 0.17 \text{ min} = 10.22 \text{ seg}$$

$$f_r = fN = (0.012 \text{ pulg/rev})(458 \text{ rev/min}) = 5.496 \text{ pulg/min} \approx 5.5 \text{ pulg/min}$$

$$t_{operacion(1agujero)} = t_{operacion(18agujeros)} = t_C + t_D + t_{maq} = 4 \text{ min} + 0.17 \text{ min} = 4.17 \text{ min}$$

Por ser un taladro de husillos múltiples.

Tiempo que tomará hacer los agujeros en todos los rieles y las planchuelas:

Si son 12 km y se usan 2 rieles de 6m de longitud, uno para cada lado, entonces el número de rieles usados será:

$$\# \text{ rieles} = \left(\frac{12000 \text{ m}}{6 \text{ m}}\right)(2) = 4000 \text{ rieles}$$

planchuelas = (2)(# rieles) = 8000 planchuelas, ya que se ocupan 2 planchuelas para unir, 1 a cada lado de 1 par de rieles.

Si tanto rieles como planchuelas tendrán 6 agujeros (3 en cada extremo) con las mismas dimensiones, entonces el tiempo para taladrar será:

$$\#agujeros = (4000 + 8000)(6) = 84000agujeros$$

Si se hacen 18 agujeros en cada carga, entonces esta operación de taladrado se repite:

$$\#derepeticiones = \frac{\#agujeros_{total}}{\#agujeros_{carga}} = \frac{84000}{18} = 4666.66repeticiones \approx 4667repeticiones$$

Tiempo total dedicado a esta operación.

$$t_{total} = 4.17min(4667) = 19461.39min$$

$$t_{total} = 324.35h \approx 325h$$

Si en cada día se trabajan 8 horas diarias:

$$t_{(dias)} = \frac{t_{total}}{8 \frac{h}{dia}} = \frac{325h}{8 \frac{h}{dia}} = 40.625dias \approx 41dias$$

La potencia del taladro será:

$$Pot_{(lagujero)} = \frac{Pot_{unitaria} \dot{V}}{\eta}$$

$$\text{de tablas: } Pot_{unitaria} = 0.6 \frac{HP}{\frac{pulg^3}{min}}$$

$$\dot{V} = f_r a \quad a = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \left(\frac{5}{8} pulg\right)^2}{4} = 0.3067 pulg^2$$

$$\dot{V} = f_r a = \left(5.5 \frac{pulg}{min}\right) (0.3067 pulg^2) = 1.687 \frac{pulg^3}{min}$$

$$Pot_{(lagujero)} = \frac{Pot_{unitaria} \dot{V}}{\eta} = \frac{\left(0.6 \frac{HP}{\frac{pulg^3}{min}}\right) \left(1.69 \frac{pulg^3}{min}\right)}{0.7} = 1.446HP$$

Para 18 agujeros la potencia es:

$$Pot_{18} = 18(1.446HP) = 26.03HP \qquad Pot_{18} = 27HP$$

Finalmente concluimos que la potencia del taladro será de 27 HP y para esta operación se dedicarán 41 días hábiles con 8 horas de uso del taladro para considerarlo dentro de la planeación del proyecto.

FRESADO

El proceso de remoción de materiales a producir superficies planas, formas o perfiles con un cortador rotatorio se llama fresado. Por lo general, el eje o husillo giratorio y el cortador permanecen estacionarios y la pieza de trabajo se mueve en los ejes X, Y o Z.

Productos maquinados mediante esta operación

El fresado es una forma eficaz para remover grandes cantidades de material, así como un método eficiente para producir contornos y formas de alta precisión. Su empleo principal es para producir superficies planas y ranuras. Cuando se requiere un ajuste muy preciso entre las piezas, cuando hay que sellar, o simplemente, se desea un ajuste exacto, las operaciones con fresadora resultarán ventajosas. Algunas de las características que se producen con el fresado son ranuras y cuñeros (chaveteros), incluso ranuras para destornillador. Las superficies contorneadas incluyen cremalleras y engranes, formas helicoidales, trinquetes (matracas), catarinas, levas y superficies a las que se da un contorno para mejorar su aspecto.

Los componentes comunes que se producen con las fresadoras incluyen bloques y cabezas (culatas) de cilindros de motores para vehículos, llaves españolas y otras herramientas de mano, cajas de engranes, soportes, costillas, conexiones, bridas, tirantes, vigas, bombas, prensas para imprimir, componentes de máquinas herramientas, piezas de aviones, compresores; de hecho, en todas las máquinas, en particular si son para trabajo pesado o de precisión se emplean piezas hechas por fresado. Otra aplicación común es el fresado de superficies, antes del rectificado de superficies.

Fresado periférico

También se le llama fresado plano, el eje de la herramienta es paralelo a la superficie que se está maquinando y la operación se realiza por los bordes de corte en la periferia exterior del cortador. En este existen varios tipos de fresado periférico:

- Fresado de placa: en esta el ancho de la fresa se extiende más allá de la pieza de trabajo en ambos lados.
- Fresado de ranuras: aquí el ancho de la fresa es menor que el de la pieza de trabajo, creando una ranura en el trabajo y cuando la fresa es muy delgada, esta operación puede generar un corte o una ranura muy delgada y se le llama fresado aserrado.
- Fresado lateral: en este se maquina el lado de una pieza de trabajo.
- Fresado paralelo simultáneo: el corte tiene lugar en ambos lados del trabajo, dejando libre una parte central.

En esta operación hay dos direcciones opuestas de rotación que puede tener la fresa con respecto al trabajo, en el fresado ascendente la dirección del movimiento de los dientes de la fresa es opuesto a la dirección de avance cuando cortan el trabajo. En el fresado descendente la dirección del movimiento de la fresa es la misma que la dirección de avance cuando los dientes cortan el trabajo.

20.- En una empresa dedicada a la fabricación de moldes, troqueles, cabezas de cilindros de motores para automóviles, piezas de máquinas herramientas, entre otros productos, es conveniente planear y organizar la producción de dichas piezas para evitar los tiempos muertos tanto de máquinas como de operadores. Se fabricarán unos dados para una prensa destinados a la producción de charolas de acero inoxidable rectangulares. La pieza se va a maquinar por fresado periférico y mide 300 mm de largo por 200 mm de ancho y será de acero aleado (dureza 300 HB) que tiene una energía específica de $2.5 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{mm}^2$. La fresa tiene un diámetro de 75 mm y tiene 4 dientes. Las condiciones de corte serán $v = 80 \text{ m}/\text{min}$, $f = 0.2 \text{ mm}/\text{diente}$ y $d = 7 \text{ mm}$. Para cumplir con tiempos planeados para la producción de cada pieza se debe calcular el tiempo para cada maquinado pues las máquinas deben ser utilizadas por el costo que representa su inactividad de estas. Así calcularemos el tiempo para desbastar 49 mm de altura de esta pieza y cuál será la potencia nominal del motor para el primer paso si tiene una eficiencia del 80 %.

Solución:

$$d = 7 \text{ mm}$$

$$v = 80 \text{ m}/\text{min}$$

$$f_d = 0.2 \text{ mm} / \text{diente}$$

$$E_c = 2.5 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{mm}^2$$

$$D = 75 \text{ mm}$$

$$n_d = 4 \text{ dientes}$$

$$l = 300 \text{ mm}$$

$$w = 200 \text{ mm}$$

$$\eta = 80\%$$

Cantidad de material removido por unidad de tiempo:

$$\dot{v} = f_r w d$$

$$f_r = f_d n_d N$$

$$N = \frac{v_c}{\pi D} = \frac{80 \frac{m}{min}}{\pi(0.075m)} = 339.531 \frac{rev}{min}$$

$$f_r = \left(0.2 \frac{mm}{diente}\right) \left(4 \frac{dientes}{rev}\right) \left(339.531 \frac{rev}{min}\right) = 271.625 \frac{mm}{min}$$

$$\dot{v} = f_r w d = \left(271.625 \frac{mm}{min}\right) (200mm)(7mm) = 380274.72 \frac{mm^3}{min}$$

$$\dot{v} = 3.80274 * 10^{-4} \frac{m^3}{min}$$

Es la cantidad de material removido por unidad de tiempo.

Tiempo para desbastar 49 mm de altura de la pieza:

$$t_{maq} = \frac{l + A}{f_r}$$

$$A = \sqrt{d(D-d)} = \sqrt{(7)(75-7)} = \sqrt{7(68)} = \sqrt{476} = 21.817mm$$

$$t_{maq(d=7mm)} = \frac{300mm + 21.817mm}{271.625 \frac{mm}{min}} = 1.185min$$

$$t_{maq(d=49mm)} = 7 t_{maq(d=7mm)} = 7(1.185min) = 8.295min$$

Es el tiempo para desbastar 49 mm de altura de la pieza.

Potencia nominal del motor:

$$Pot = \frac{Pot_{unit} * \dot{v}}{\eta} = \frac{2.5 \frac{N * m}{mm^3} \left(380274.72 \frac{mm^3}{min}\right)}{0.8} = 1188358.5 \frac{N * m}{min}$$

$$Pot = 1188358.5 \frac{N * m}{min} * \frac{1min}{60s} = 19805.975 \frac{N * m}{s} = 19805.975W$$

$$Pot = 19805.975W * \frac{1HP}{746W} = 26.549HP$$

Es la potencia nominal del motor para el primer paso en esta operación.

FRESADO VERTICAL O FRESADO FRONTAL

En este proceso el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de trabajo y el maquinado se ejecuta por los bordes o filos cortantes del extremo y la periferia de la fresa. Existen varios tipos de fresado frontal:

- Fresado frontal convencional: es cuando el diámetro de la fresa es más grande que la superficie de trabajo, por lo que la fresa sobrepasa el trabajo de ambos lados.
- Fresado de frente parcial: en este la fresa sobrepasa el trabajo sólo de un lado.
- Fresado terminal: en este el diámetro de la fresa es menor que el ancho del trabajo, de manera que se corta una ranura dentro de la parte.
- Fresado de perfiles: es una forma de fresado terminal en el cual se corta una parte plana de la periferia.
- Fresado de cavidades: usado para maquinar partes poco profundas.
- Fresado de contorno superficial: en esta la fresa con punta de bola se hace avanzar hacia adelante y hacia atrás, hacia un lado y hacia el otro.

21.- En algunas fábricas se utiliza maquinaria cuyo mantenimiento es una parte esencial del proceso de producción ya que su inactividad representa pérdidas; frecuentemente ocurre que las vibraciones de dichas máquinas provocan desajustes además de afectar a largo plazo la salud de los operarios. Se sabe que las piezas de hierro fundido absorben las vibraciones que ocurren durante el funcionamiento de algunas máquinas, por lo que estas piezas son solicitadas con relativa frecuencia a una empresa dedicada al corte de materiales y fabricación de máquinas herramientas. El Ingeniero Industrial encargado del área de producción debe hacer una evaluación sobre los costos de maquinar algunas piezas solicitadas. Una de estas piezas es una superficie de hierro fundido gris de 150 mm de ancho y 460 mm de longitud, que puede ser maquinada ya sea por una fresadora vertical, empleando un cortador frontal de 200 mm de diámetro que tiene 10 insertos de WC, o con una máquina cepilladora con herramientas de HSS. Si se emplea la fresadora se usará un avance de 0.25 mm por diente y con la máquina cepilladora se usará un avance de 0.38 mm por pasada. El tiempo de preparación para la fresadora es de 60 min y para la máquina cepilladora es de 10 min. El tiempo para cargar y descargar cualquiera de las dos máquinas es de 2 min. Las tarifas de hora/máquina para fresado y para la cepilladora son \$250.00

pesos y \$170.00 pesos, respectivamente. Si para la máquina fresadora se ha elegido una velocidad de corte de 50 m/min y para la cepilladora de 100 m /min, determine ¿cuál máquina deberá ser la más económica para este trabajo?

Solución:

Calculamos el costo para el maquinado con la fresa vertical:

$$v_c = 50 \text{ m/min}$$

$$f_d = 0.27 \text{ mm/diente}$$

$$n_d = 10 \text{ dientes}$$

$$\varnothing_f = 200\text{mm} \Rightarrow A = 100\text{mm} \text{ (A es el radio de la fresa)}$$

$$t_{\text{prep}} = 60 \text{ min}$$

$$t_{c/d} = 2 \text{ min}$$

$$c = \$250 \text{ hr}_{\text{maq}} = \$4.166 \text{ min}_{\text{maq}}$$

$$t_T = t_{\text{prep}} + t_{\text{maq}} + t_{c/d}$$

$$t_{\text{maq}} = \frac{l + A}{f}$$

$$f_r = n_d f_d N = 10 \left(0.25 \frac{\text{mm}}{\text{diente}} \right) \left(\frac{50 * 10^3 \text{ mm}}{(200\text{mm}) * \pi} \right) = 199 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

$$t_{\text{maq}} = \frac{l + A}{f} = \frac{400\text{mm} + 100\text{mm}}{199 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 2.814\text{min}$$

$$t_T = t_{\text{prep}} + t_{\text{maq}} + t_{c/d} = 60\text{min} + 2.814\text{min} + 2\text{min} = 64.814\text{min}$$

$$C_T = 4.1666 \frac{\$}{\text{min}_{\text{maq}}(\text{fresadora})} (64.814\text{min}) = \$270.06 \text{ es el costo por fresado vertical.}$$

Ahora el costo en la máquina cepilladora:

$$v_c = 100 \text{ m/min}$$

$$f_d = 0.38 \text{ mm/pasada}$$

$$t_{\text{prep}} = 10 \text{ min}$$

$$t_{c/d} = 2 \text{ min}$$

$$c = \$170 \text{ hr}_{\text{maq}} = \$2.833 \text{ min}_{\text{maq}}$$

$$\# \text{ pasadas} = \frac{150\text{mm}}{0.38\text{mm}} = 394.736(2) = 789.4 \text{ pasadas}$$

$$t_{pasada} = \frac{0.46m}{100 \frac{m}{min}} = 0.0046min$$

$$t_{maq} = t_{pasada} (\# pasadas) = 0.0046min(789.4) = 3.6312min$$

$$t_T = t_{prep} + t_{maq} + t_{C/D} = 10min + 3.6312min + 2min = 15.6312min$$

$$C_T = 15.631min \left(2.833 \frac{\$}{min_{maq(cepilladora)}} \right) = \$44.29 \text{ es el costo de este maquinado en la cepilladora.}$$

Evidentemente es grande la diferencia en el costo de hacer el maquinado de esta pieza y decidimos usar la máquina cepilladora.

BROCHADO

El brochado es el corte de un material que se puede maquinar al hacer pasar un cortador (brocha) con una serie de dientes escalonados progresivos sobre o través del mismo. Estos dientes avanzan en un plano paralelo a la superficie que se corta, y al remover una cantidad predeterminada de material, se producen contornos o perfiles y acabados de precisión.

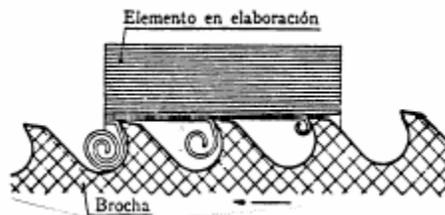


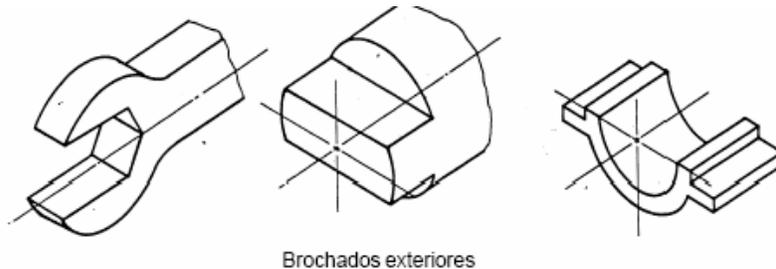
FIG. 1.37

Brochado

Casi siempre los dientes serán contenidos en una sola herramienta llamada brocha, para desbastar y acabar la pieza por completo en una sola carrera, se pueden aplicar carreras adicionales con la misma herramienta, si es posible, o con una serie de herramientas. Hay que cambiar la posición de la herramienta con respecto a la pieza de trabajo en una cantidad igual a la del material eliminado en cada carrera, si se va a utilizar la misma herramienta para carreras múltiples. La brocha se puede empujar o tirar (jalar) vertical u horizontalmente.

Brochado externo

Este método es para maquinar una superficie externa de la pieza; ésta se monta en un sujetador y la brocha en un portaherramienta. Ya sea el portaherramienta o el dispositivo se monta en la corredera motorizada de la máquina brochadora y el otro se mantiene fijo con relación a la superficie que se va a brochar. El “brochado de copa” y el “brochado de horcajadas” son dos procesos en los cuales la pieza de trabajo está rodeada por brochas que ejercen presiones equilibradas para el corte, lo cual elimina la necesidad de sujetadores para la pieza de trabajo.

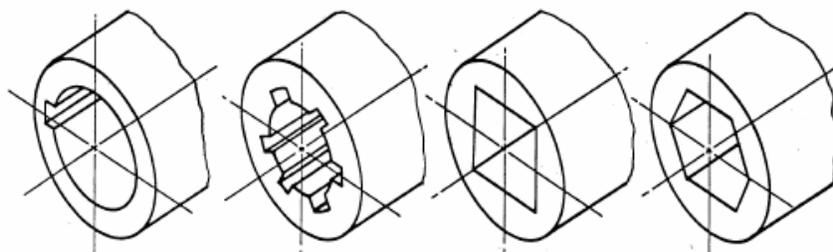


Brochados exteriores

FIG. 1.38

Brochado interno

Este método requiere que haya un agujero o abertura en la pieza de trabajo para introducir la brocha y tirar de ella o empujarla a través de la pieza. Cuando el corte es balanceado, por ejemplo en un agujero redondo o estriado, por lo general la brocha permite posicionar la pieza centralmente al corte. Los cortes desbalanceados requieren guiar la brocha, lo cual se suele lograr con el diseño de la brocha o con dispositivos en guías encima, debajo o a través de la pieza. El “brochado de agujeros ciegos” en los cuales la brocha no puede atravesar la pieza, se efectúa con una sola o un juego de brochas con un número limitado de dientes de corte. Se empuja la herramienta dentro la pieza de trabajo hasta que los dientes pasan las superficies que se ven a cortar y, luego se retrae.



Brochados interiores

FIG. 1.39

Piezas maquinadas por este proceso

Prácticamente cualquier pieza maquinable con arranque de virutas, se puede brochar. En algunas piezas no hay un método alternativo, práctico, de manufactura y hay que brocharlas. Las piezas habituales son las que tienen agujeros cuadrados,

circulares o irregulares, la ranura para la llave en los cilindros de cerraduras, estrías y agujeros correlativos con dientes de lados rectos, espirales, cicloidales o de formas especiales, excéntricas y levas, engranes, trinquetes (matracas) y otras formas complejas que requieren tolerancias y acabados de precisión. Se pueden lograr formas helicoidales y rectas. Los tamaños van desde piezas muy pequeñas hasta algunas que pesan toneladas, como el rotor de una turbina de vapor.

El brochado tiene dos características excepcionales y ventajosas en relación con los procesos convencionales para maquinado: su muy alta velocidad y notable exactitud para las repeticiones. Con frecuencia se utiliza el brochado en sustitución del fresado, cepillado, ranurado, ensanchado, rimado y rectificando. Se produce un acabado fino de superficie debido a la acción de bruñido de los últimos dientes. Por lo general no se requieren operaciones adicionales de acabado de superficie. Las marcas de la herramienta son axiales en vez de circunferenciales.

22.- La sección de desbaste de una brocha elimina material a una profundidad de 4 mm en una superficie de acero con largo de 300 mm y ancho de 50 mm. Cada diente toma un corte de 0.10 mm de profundidad. El paso del diente está dado por la fórmula:

$$paso(mm) = 1.75\sqrt{l \text{ arg ode superficie}(mm)}$$

¿Cuál debe ser el largo de la sección de desbaste?, ¿qué tirón debe ejercer la máquina de brochado si la presión de la viruta es 500 MPa de área de viruta?, ¿qué potencia se requiere para una velocidad de brochado de 5 m/min?

Si se requiere una carrera de 1.4 m para la operación descrita se tiene que el tiempo de carga y descarga en el dispositivo de fijación es 0.10 minutos y el tiempo para posicionar la máquina es 0.03 minutos. ¿Cuál es el tiempo de ciclo por pieza en: una brocha de superficie en un sólo ariete con una velocidad de retorno de 12 m/min?

Solución:

$d = 0.1 \text{ mm}$
 $l = 300 \text{ mm}$
 ancho = 50 mm

$$a) \text{ paso}(mm) = 1.75\sqrt{l \text{ arg ode superficie}(mm)} = 1.75\sqrt{300mm} = 30.31mm$$

$$n_d = \frac{prof_{corte}}{d} = \frac{4mm}{0.1mm} = 40dientes$$

$long_{desbaste} = n_d (paso) = 40dientes(30.31mm) = 1214.4mm$ será el largo de la sección de desbaste.

$$b) F_b = \frac{3}{2} \sigma_{TS} A$$

$$n_{d(corte)} = \frac{l_{pieza}}{paso} = \frac{300mm}{30.31mm} = 9.89 \approx 10 \text{dientes}$$

$$A = n_{d(corte)} dw = 10(0.1mm)(50mm) = 50mm^2$$

$$F_b = \frac{3}{2} \sigma_{TS} A = \frac{3}{2} (500 * 10^6 Pa) (50mm^2) \left(\frac{1m^2}{1 * 10^6 mm^2} \right) = 37.5kN \text{ es la fuerza del tirón.}$$

$$c) Pot = F_b v = 37.5 * 10^3 N \left(5 \frac{m}{min} \right) \left(\frac{1min}{60s} \right) = 3125W \text{ es la potencia para generar la velocidad indicada.}$$

$$d) t_{ciclo} = t_{C/D} + t_{maq} + t_{posic} + t_{retorno}$$

$$t_{maq} = \frac{l}{f} = \frac{1.4m}{5 \frac{m}{min}} = 0.28min$$

$$t_{ret} = \frac{1.4m}{12 \frac{m}{min}} = 0.1166min$$

$$t_{ciclo} = t_{C/D} + t_{maq} + t_{posic} + t_{retorno} = 0.1min + 0.28min + 0.03min + 0.1166min = 0.5267min / pieza$$

MAQUINADO ELECTROQUÍMICO

El maquinado electroquímico (ECM) es lo opuesto de la electrodeposición y consiste en la remoción controlada de metal de la pieza de trabajo por disolución anódica en una celda electrolítica. La pieza de trabajo es el ánodo y una herramienta de configuración especial es el cátodo. El electrolito fluye por una pequeña abertura entre la herramienta y la pieza de trabajo que, por lo general, es de 0.25 mm (0.010 pulgadas) pero puede ser de sólo 0.025 mm (0.001 pulgadas). La rapidez de remoción de metal es proporcional a la densidad de la corriente continua y es elevada, alrededor de 8 a 150 A/cm² (50 a 1000 A/pulg²). El electrolito es una solución de cloruro de sodio u otra sal. Sin embargo para taladrar agujeros pequeños y profundos se utiliza electrolito ácido en algunos procesos. La remoción del metal forma una cavidad en la pieza de trabajo de

forma muy aproximada a la del electrodo o cátodo. Por ello, se pueden cortar formas complejas en una operación.

Piezas y cortes obtenidos por este proceso

El ECM es muy adecuado para materiales y formas difíciles de maquinarse con métodos convencionales. La producción de agujeros pequeños e irregulares es una aplicación común; el tamaño mínimo del agujero es de unos 0.25 mm, aunque es más práctico que sea entre 0.08 y 3 mm (0.030 a 0.125 pulgadas) la profundidad del agujero puede ser de 50 o más veces el diámetro. Debido a que la dureza de la pieza de trabajo no reduce la velocidad de corte, se pueden emplear con facilidad materiales con tratamiento térmico o endurecidos por trabajo. Se perforan cavidades individuales o múltiples en forma simultánea. Según el equipo utilizado otras operaciones son torneado, refrentado, trepanado, perfilado, contorneado, ranurado, realzado, rebabeado, gravado por acción química y marcado. Otra aplicación es la producción de superficies internas rebajadas de diversos contornos. Con el adecuado aislamiento de los electrodos y el control del tiempo de maquinado, se pueden producir contornos internos que serían muy difíciles de lograr con otros métodos.

El ECM se utiliza para piezas de motores "jet", toberas, levas, troqueles para forja, placas de quemadores y otras formas contorneadas. El máximo número de aplicaciones es para la industria aeronáutica.

Las superficies producidas con ECM tienen esquinas lisas y sin rebabas. Con este proceso también se puede maquinarse si se inducen esfuerzos adicionales en la pieza de trabajo. Otra ventaja es que no se produce fragilización de la superficie por el hidrógeno.

25.- Se va a realizar un agujero cuadrado ciego de 20 mm por lado y 60 mm de profundidad por maquinado electroquímico en un bloque de acero para herramientas. La diferencia de potencial entre el material y electrodo debe conservarse en 15 Volts. La eficiencia en este proceso es del 70 %. El avance se ha fijado en 10 mm/min para este material, utilizando un electrodo con una perforación para el suministro del electrolito de 10 mm de diámetro. Si para este material la velocidad de remoción específica es de $2.46 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{A} \cdot \text{seg}$.

- a) ¿Cuál es la potencia que debe suministrarse a la máquina?
- b) ¿Cuál es el tiempo del proceso?
- c) Si se suministra el electrolito a 100 litros/min con una presión de 1.5 Mpa, ¿a qué fuerza hacia arriba se someterá el electrodo?

Solución:

Profundidad = 60 mm
V = 15 Volts

$$\varnothing_{perf} = 10mm$$

$$\eta = 70\%$$

$$C = 2.46 * 10^{-5} \frac{cm^3}{A * seg}$$

$$f = 10 \frac{mm}{min} \Rightarrow f = 10 \frac{mm}{min} * \frac{1min}{60seg} * \frac{1cm}{10mm} = 0.0166 \frac{cm}{seg}$$

$$A = 2cm(2cm) - \frac{\pi}{4} * (1cm)^2 = 3.2146cm^2$$

a) Pot = VI

$$I = \frac{f_r A}{C \eta} = \frac{0.0166 \frac{cm}{seg} (3.2146cm^2)}{2.46 * 10^{-5} \frac{cm^3}{A * seg} (0.7)} = 3111.3A$$

$$Pot = VI = 15Volts(3111.3A) = 46669.5W = 46.6695kW$$

b) $t = \frac{e}{f_r} = \frac{60mm}{10 \frac{mm}{min}} = 6min$

c) $\dot{V}_{elect} = 100 \frac{lt}{min}$

$$P = 1.5 \text{ Mpa}$$

$$P = \frac{F}{A} \Rightarrow F = PA = 1.5 * 10^6 \frac{N}{m^2} \left[\left(\frac{\pi}{4} \right) (0.01m)^2 \right] = 117.8N$$

MAQUINADO POR ELECTRODESCARGA

El proceso de EDM (Electrical-Discharge Machining) de maquinado por electrodescarga (conocido como maquinado por electroerosión) remueve metales mediante una serie de chispas o descargas eléctricas, pequeñas y controladas que erosionan el metal. Estas descargas, que se generan miles de veces por minuto, pasan de un electrodo con carga negativa a la pieza de trabajo con carga positiva. La descarga concentra la energía que vaporiza el metal de la pieza de trabajo en una área muy pequeña. La pequeña cantidad de metal que se vaporiza se solidifica de inmediato y forma una partícula debido al efecto refrigerante del fluido dieléctrico que está en el entrehierro entre el electrodo y la pieza. Como la

partícula es expulsada y se repite el proceso, se forma una cavidad en la pieza de trabajo.

Los electrodos se hacen con numerosos materiales conductores de electricidad, pero el más común y eficiente es el grafito. Otros materiales son el cobre-tungsteno, plata-tungsteno, latón, cobre, aluminio, acero, carburos y tungsteno.

Aunque, por lo general, el electrodo desciende contra la pieza de trabajo con movimiento rectilíneo, también puede girar como si fuera rueda abrasiva o tener movimiento en espiral u orbital para producir formas especiales o distribuir el desgaste en el electrodo.

EDM POR CORTE CON ALAMBRE

Esta es una variante del proceso en el cual un alambre en movimiento constante sustituye al electrodo conformado. El alambre atraviesa la pieza de trabajo por su eje vertical u corta un contorno en el plano horizontal. Por tanto, la operación es más o menos similar al aserrado en contorno con sierra cinta, excepto que la chispa se descarga desde un alambre en vez de utilizar dientes para remover el metal.

Características de las piezas hechas con EDM

- Formas complicadas, por lo general internas, que son imposibles de lograr con maquinado convencional.
- Se hacen con materiales endurecidos u otros difíciles de maquinar o que no es factible maquinarlos con los métodos convencionales.
- Tienen tan alto valor que se puede permitir la remoción lenta del material con EDM.
- Se hacen con materiales conductores de la electricidad.
- Son delicadas y se deben configurar con un proceso que produzca muy baja presión de corte.
- Se requieren agujeros muy profundos y estrechos, en especial si no son redondos o tienen ángulos planos de entrada.
- Se necesita endurecimiento pero el tratamiento térmico después del maquinado puede producir deformación seria y otros problemas.

El EDM no produce rebabas. El límite máximo de tamaño de las piezas está en relación con la disponibilidad de mesas para la máquina y los aspectos económicos de maquinar con la lentitud de maquinar del EDM. Se han construido máquinas para troqueles de embutido de tableros para automóviles. El EDM por corte con alambre se ha utilizado para cortar placas de 150 mm (6 pulgadas) de espesor.

Las limitaciones en las piezas producidas por EDM son:

- El material debe ser conductor de la electricidad.
- Hay una capa delgada de metal muy esforzado y con grietas diminutas en la superficie.
- El acabado de las superficies con EDM a una velocidad de remoción de metal en producción es muy áspero y puede llegar hasta 13 μm (500 μpulg). Para obtener acabados más tersos, hay que reducir la rapidez de remoción del metal. sin embargo, la aspereza en la superficie no es direccional y las producidas con EDM tienen propiedades para retención de lubricante que son deseables en algunas aplicaciones.
- Las cavidades y variaciones en las dimensiones entre pieza y pieza ocurren por el desgaste del electrodo con el trabajo.
- Las cavidades cortadas con EDM pueden tener una ligera conicidad desde el punto de entrada del electrodo.

Las cavidades para troqueles son la aplicación más común del EDM pero se pueden efectuar muchas otras operaciones en el cuarto de herramientas o para producción especial. Las aplicaciones para cuarto de herramientas o taller mecánico incluyen incluyen troquelado, extrusión, trefilado, fundición a presión, troqueles para forjar y moldes para plásticos, así como las herramientas formadoras en especial las de carburo.

APLICACIONES DE EDM PARA PRODUCCIÓN		
Producto	Descripción de operación por EDM	Características del corte con máquina
Carburador	Taladrar agujeros de tobera	Agujero preciso, sin rebabas
Parrilla de automóvil	Recortar rebabas de piezas fundidas a presión	Configuración delicada; sin rebabas
Contactos eléctricos	Recortar los contactos	Sin rebabas; tolerancia precisa
Aspas de turbina de gas	Cortar periferia de la plataforma	Esquina aguda; sin rebabas
Cámara de turbina	Perforar formas aerodinámicas	Configuración de plano aerodinámico; repetitivo; sin rebabas
Aspas de turbina	Perforar agujeros pequeños en ángulo agudo	Agujeros sin rebabas
Intercambiador de calor (regenerador)	Recortar al tamaño	Pieza delicada
Tubo para combustible	Ranurar pared delgada	Pieza delicada; sin rebabas

23.- El Ingeniero Industrial encargado de planear y organizar la producción de los maquinados en una empresa que fabrica intercambiadores de calor, calderas y equipo en acero inoxidable destinado para la industria alimenticia, debe determinar los tiempos de operación para disminuir los tiempos muertos en las máquinas. Si los maquinados son los siguientes.

Maquinado 1: se va a realizar una operación de maquinado por electrodescarga en una lámina de acero inoxidable de 25 mm de espesor usando un electrodo de alambre de latón con un diámetro de 0.2 mm, se sabe que el excedente de corte es de 0.04 mm por ambos lados.

- Usando una corriente de 7 amperes, ¿cuál es la velocidad de avance que se puede usar en la operación?
- Usando una corriente de 7 amperes y si la longitud de maquinado es de 25 cm, ¿cuál es el tiempo de operación?
- Si la corriente se incrementa a 10 amperes, ¿cuál es el tiempo requerido para la misma operación?

Maquinado 2: un agujero de 80 mm de diámetro que se trepana mediante EDM en una placa de acero matriz H13 para trabajo en caliente de 50 mm de espesor. El diámetro interior del electrodo en forma de tubo es de 60 mm. La fuente de poder disponible suministra 10000 A. ignorando el sobrecorte, estime el tiempo necesario para terminar el corte. La velocidad de remoción es de $1.84 \text{ mm}^3/\text{A} \cdot \text{min}$.

Maquinado 1:

Lámina de acero inoxidable, $e = 25 \text{ mm}$

Alambre de latón, $\varnothing = 0.2 \text{ mm}$

Excedente de corte e.c. = 0.04 mm (debe ser por los dos lados)

$i = 7 \text{ A}$

$$\text{a) } \dot{V} = \frac{Ki}{T_F^{1.23}} \text{ con } K = 39.86 \text{ porque } \dot{V} \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right]$$

$$\dot{V} = \frac{Ki}{T_F^{1.23}} = \frac{39.86(7)}{(1540)^{1.23}} = 0.03349 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

$$\text{b) } f = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0.03349 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}}{(0.028 \text{ cm})(2.5 \text{ cm})} = 0.4784 \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

$$t = \frac{l}{f} = \frac{25 \text{ cm}}{0.478 \frac{\text{cm}}{\text{min}}} \Rightarrow t = 52,25 \text{ min}$$

$$c) \dot{V} = \frac{Ki}{T_F^{1.23}} = \frac{39.86(10)}{(1540)^{1.23}} = 0.04785 \frac{cm^3}{min}$$

$$f = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0.04785 \frac{cm^3}{min}}{(0.028cm)(2.5cm)} = 0.6836 \frac{cm}{min}$$

$$t = \frac{l}{f} = \frac{25cm}{0.6836 \frac{cm}{min}} \Rightarrow t = 36.57min$$

Maquinado 2:

Diámetro del agujero, $\varnothing = 80mm$

Espesor de la placa, $e = 50mm$

Diámetro interior del electrodo, $\varnothing_{int} = 60mm$

$i = 10000 A$

$$C = 1.84 \frac{mm^3}{A * min}$$

$$A_T = A_1 - A_2 = \frac{\pi}{4}(80)^2 - \frac{\pi}{4}(60)^2 = 2199.115mm^2$$

$$Vol = A * e = 2199.115mm^2 (50mm) = 109955.743mm^3$$

$$pero Vol = Cit\eta \Rightarrow t = \frac{Vol}{Ci\eta} = \frac{109955.743mm^3}{1.84 \frac{mm^3}{A * min} (10000A)(1)} \Rightarrow t = 5.975min$$

Así los tiempos que considerará son $t_1 = 37 min$ y $t_2 = 6 min$ para su planeación.

24.- En una empresa fabricante de diferentes productos dirigidos al sector automotriz se deben tomar decisiones de manera rápida y acertada pues debido a la mala administración han existido pérdidas. Dado unos cambios en el diseño del producto final una pieza estampada se vio afectada, obligando a solicitar un nuevo troquel que estaría listo hasta dentro de 10 semanas y cuyo costo será de 40 000 dólares. Como se encuentra esta empresa en la etapa de prelanzamiento, sus procesos, maquinaria y equipo poco a poco se van asentando, pero no se puede detener la producción. La demanda actual de esta pieza es de 50 bastidores semanales. Mientras les entregan el troquel se fabricará esta pieza maquinándola por electroerosión con alambre para después hacerle un orificio por punzonado y dos operaciones de doblado.

Se ha pensado en fabricar esta pieza uniendo 4 láminas y proceder con el corte por electroerosión. La máquina con que se cuenta para este proceso se comparte con la fabricación de otras piezas por lo que se dispone de un tiempo de 1 hora diaria para este uso. ¿Se logrará tener las 50 piezas que corresponden a la

demanda semanal inicial o se deben comprar por separado a la empresa que fabrica los troqueles? Se debe tener en cuenta que el precio por parar la línea de ensamble del producto final es altísimo y no se puede quedar mal con el cliente.

La operación de maquinado por electrodescarga se realizará en lámina de acero ASTM A1011 HSLAS Grade 45 Clase 2 de 4 mm de espesor usando un electrodo de alambre de latón con un diámetro de 0.2 mm, se sabe que el excedente de corte es de 0.05 mm por ambos lados.

- Usando una corriente de 5 amperes, ¿cuál es la velocidad de avance que se puede usar en la operación?
- Usando una corriente de 5 amperes y tomando en cuenta la longitud de maquinado, ¿cuál es el tiempo de operación?
- Si la corriente se incrementa a 10 amperes, ¿cuál es el tiempo requerido para la misma operación?



FIG. 1.40



FIG. 1.41

Lámina de acero, $e = 4 \text{ mm}$

Alambre de latón, $\varnothing = 0.2 \text{ mm}$

Excedente de corte e.c. = 0.05 mm (debe ser por los dos lados)

Corriente $i = 5 \text{ A}$

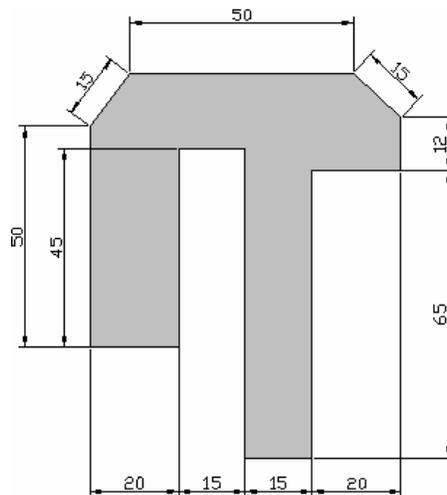


FIG.1.42

$$a) \dot{V} = \frac{Ki}{T_F^{1.23}} \text{ con } K = 39.86 \text{ porque } \dot{V} \left[\frac{cm^3}{min} \right]$$

$$\dot{V} = \frac{Ki}{T_F^{1.23}} = \frac{39.86(5)}{(1400)^{1.23}} = \frac{199.3}{7408.62} = 0.0269 \frac{cm^3}{min}$$

$$b) f = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0.0269 \frac{cm^3}{min}}{(0.03cm)(0.4cm)} = 2.2416 \frac{cm}{min}$$

$$t = \frac{l}{f} = \frac{32.2cm}{2.2416 \frac{cm}{min}} \Rightarrow t = 14.36 \frac{min}{pieza}$$

Ya que se piensan unir cuatro láminas para sacar 4 piezas, tendríamos que el tiempo empleado sería:

$$t_{4\text{ piezas}} = 4 \text{ piezas} * 14.36 \frac{min}{pieza} = 57.44 \text{ min} \approx 1 \text{ hr}, \text{ es decir se tienen 4 piezas por hora}$$

Y como disponemos de 7 horas a la semana para este proceso, tendríamos:

$$Total_{\text{ piezas}} = 4 \frac{\text{ piezas}}{\text{ hr}} * 7 \frac{\text{ hr}}{\text{ semana}} = 28 \frac{\text{ piezas}}{\text{ semana}}$$

Si mantenemos estas condiciones en el corte por electroerosión con alambre no se satisfará la demanda.

Si aumentamos la corriente en este proceso de 5 a 10 amperes:

$$c) \dot{V} = \frac{Ki}{T_F^{1.23}} = \frac{39.86(10)}{(1400)^{1.23}} = 0.0538 \frac{cm^3}{min}$$

$$f = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0.0538 \frac{cm^3}{min}}{(0.03cm)(0.4cm)} = 4.4835 \frac{cm}{min}$$

$$t = \frac{l}{f} = \frac{32.2cm}{4.4835 \frac{cm}{min}} \Rightarrow t = 7.18 \frac{min}{pieza}$$

Ya que se piensan unir cuatro láminas para sacar 4 piezas, tendríamos que el tiempo empleado sería:

$$t_{4\text{ piezas}} = 4\text{ piezas} * 7.18 \frac{\text{min}}{\text{pieza}} = 28.72 \text{ min} \approx \frac{1}{2} \text{ hr} , \text{ es decir se tienen 8 piezas por hora}$$

Y como disponemos de 7 horas a la semana para este proceso, tendríamos:

$$Total_{\text{ piezas}} = 8 \frac{\text{piezas}}{\text{hr}} * 7 \frac{\text{hr}}{\text{semana}} = 56 \frac{\text{piezas}}{\text{semana}}$$

Modificando la corriente se podrían tener las piezas requeridas para el cliente mientras está listo el troquel para la producción en serie.

RESULTADOS

El haber tomado casos de la mecánica de sólidos fue con el objetivo de mostrar la utilidad de la estática, la dinámica y la resistencia de materiales para poder determinar las condiciones a que se somete un material como son los distintos tipos de esfuerzos y sus efectos como las deformaciones y el desgaste.

Una vez conocidas las condiciones en las que va a trabajar algún dispositivo, herramienta, parte del equipo o producto así como la maquinaria es necesario elegir el tipo de material y las dimensiones ya que estos datos son muy importantes para el diseño del producto que debe tomar en cuenta costos bajos sin olvidar el buen funcionamiento y vida del producto.

Por otro lado los procesos de conformado de materiales son la primer fase que hacen posible la transformación de la materia prima para fabricar productos finales o para alimentar otros procesos. El conocer las variables que intervienen en estos procesos es fundamental ya que de esta manera se pueden disminuir desperdicios materiales, ahorrar energía, evitar defectos y agilizar la producción, siempre pensando en obtener mayores utilidades.

En cuanto a los procesos de corte de materiales hay que tener en cuenta el tipo de material que se va a maquinar porque depende de su dureza la selección del tipo de herramientas que puedan desbastarlo con el menor desgaste posible.

Otras veces será necesario el decidir que proceso es el que proporciona el mejor acabado o la obtención de formas muy complejas sin pasar por alto el volumen de producción que se va a tener tanto para el cálculo de costos del producto como para la compra de diversas herramientas y el consumo de energía.

También se puede tener la necesidad de conocer los tiempos en que se va a desarrollar una determinada operación de corte, puesto que el tener una máquina inactiva representa desperdicio de la capacidad de producción real de la planta. El conocer los tiempos en que se producirán los lotes de los distintos productos puede permitir la disminución de los tiempos de entrega para los clientes y con ello lograr la preferencia.

Los casos presentados en este trabajo pretenden ayudar a fortalecer algunos de los conceptos de la carrera de Ingeniería Industrial, ya que por medio de las aplicaciones se le da la debida importancia a los conocimientos tan diversos que se adquieren, pero que en ocasiones permanecen aislados ya sea por la abstracción o porque los campos potenciales para el desarrollo de todo ingeniero son variables y por lo tanto siempre se le presentarán nuevas situaciones donde actuar.

En ocasiones el Ingeniero Industrial encontrará diversas soluciones a un mismo problema pero de él depende la selección de la mejor pues no debe olvidar que el objetivo además es disminuir los diversos costos que harán posible el llevar a

cabo lo planeado, darle seguimiento y tener la idea de seguir adelante ya que siempre se puede mejorar aún más.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Es sabido que enfrentarnos a situaciones desconocidas hacen que nuestra reacción no sea tan rápida y aunque estemos bien preparados en el campo teórico necesitamos algo más: la experiencia laboral.

Es difícil abarcar todas las áreas de trabajo y conocimiento, por lo que la presencia de profesores con amplia experiencia en la industria de productos y servicios, juegan uno de los papeles más importantes para conocer diversas situaciones en las que puede participar el Ingeniero Industrial egresado de esta institución.

Debemos estar consientes de que para lograr que el aprendizaje sea más rápido se busque romper con la idea de la existencia de límites en las distintas áreas de formación que recibimos, pues podemos imaginar una especie de islas de conocimiento si no encontramos los enlaces o relaciones adecuadas que cambien esto y se tenga la solidez suficiente para enfrentar el amplio mar que representa la industria de producción y de servicios.

CONCLUSIONES

La modificación al plan de estudios resultará positiva en la medida que se genere una relación más profunda entre el área de las ciencias básicas, ciencias de la ingeniería, ciencias aplicadas y las humanidades combinadas con el estudio de casos gracias a la experiencia de los ingenieros y profesores en el área laboral, ya que la motivación necesaria para darle sentido a la teoría es observarla en un caso determinado.

El Ingeniero Industrial asimilará mejor las ideas y conceptos que se utilizan en el transcurso de la resolución de los problemas surgidos de la realidad documentado en los casos. Ya en el ambiente laboral se espera que tenga más habilidades gracias a la experiencia que representa el vivir distintas situaciones, el conocer con mayor profundidad los procesos de producción y adaptarse procurando colaborar con su equipo de trabajo.

APÉNDICE

TABLA 1. Principales elementos de aleación en las aleaciones de acero.

Número AISI del acero	Elementos de aleación	Número AISI del acero	Elementos de aleación
10xx	Carbono simple	46xx	Molibdeno-níquel
11xx	Azufre (de corte fácil)	47xx	Molibdeno-níquel-cromo
13xx	Manganeso	48xx	Molibdeno-níquel
14xx	Boro	5xxx	Cromo
2xxx	Níquel	6xxx	Cromo-vanadio
3xxx	Níquel-cromo	8xxx	Níquel-cromo-molibdeno
4xxx	Molibdeno	9xxx	Níquel-cromo-molibdeno (excepto 92xx)
41xx 43xx	Molibdeno-cromo Molibdeno-cromo-níquel	92xx	Silicio-manganeso

TABLA 2. Aleaciones de acero más comunes y usos típicos.

Número AISI del acero	Usos típicos
1020	Acero estructural, barras, placas
1040	Piezas de maquinaria, flechas
1050	Piezas de maquinaria
1095	Herramientas, resortes
1137	Flechas, piezas para tornos de roscar (aleaciones fáciles de maquinar)
1141	Flechas, partes maquinadas
4130	Acero de alta resistencia para usos generales; flechas, engranes, pernos
4140	Igual que 4130
4150	Igual que 4130
5160	Engranes y tornillos de alta resistencia
8760	Herramientas, resortes, cinces

TABLA 3. Criterios para esfuerzo de diseño; esfuerzos normales directos

Forma de carga	Material dúctil	Material quebradizo
Estática	$\sigma_d = s_y / 2$	$\sigma_d = s_u / 6$

Repetida	$\sigma_d = s_u / 8$	$\sigma_d = s_u / 10$
De impacto o de choque	$\sigma_d = s_u / 12$	$\sigma_d = s_u / 15$

TABLA 4. Criterios de esfuerzo de diseño para la determinación de la fuerza cortante.

Forma de carga	Diseño por esfuerzo; materiales dúctiles	
	$\tau_d = s_{ys} / N = 0.5$	$s_y / N = s_y / 2N$
Estática	Use N=2	$\tau_d = s_y / 4$
Repetida	Use N=4	$\tau_d = s_y / 4$
Impacto	Use N=6	$\tau_d = s_y / 4$

TABLA 5. Coeficientes de expansión térmica, α , de algunos metales, vidrio cilindrado, madera y concreto.

Materiales	α	
	$^{\circ}\text{F}^{-1}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Acero, AISI		
1020	6.5×10^{-6}	11.7×10^{-6}
1040	6.3×10^{-6}	11.3×10^{-6}
4140	6.2×10^{-6}	11.2×10^{-6}
Acero estructural	6.5×10^{-6}	11.7×10^{-6}
Hierro fundido gris	6.0×10^{-6}	10.8×10^{-6}
Acero inoxidable		
AISI 301	9.4×10^{-6}	16.9×10^{-6}
AISI 430	5.8×10^{-6}	10.4×10^{-6}
AISI 501	6.2×10^{-6}	11.2×10^{-6}
Aleaciones de aluminio		
2014	12.8×10^{-6}	23.0×10^{-6}
6061	13.0×10^{-6}	23.4×10^{-6}
7075	12.9×10^{-6}	23.2×10^{-6}
Latón, C36000	11.4×10^{-6}	20.5×10^{-6}
Bronce, C22000	10.2×10^{-6}	18.4×10^{-6}
Cobre, C14500	9.9×10^{-6}	17.8×10^{-6}
Magnesio, ASTM AZ63A-T6	14.0×10^{-6}	25.2×10^{-6}
Titanio, Ti-6 ^a 1-4V	5.3×10^{-6}	9.5×10^{-6}
Vidrio cilindrado	5.0×10^{-6}	9.0×10^{-6}
Madera (pino)	3.0×10^{-6}	5.4×10^{-6}

Concreto	6.0×10^{-6}	10.8×10^{-6}
----------	----------------------	-----------------------

TABLA 6. Factores de diseño y esfuerzos cortantes de diseño para metales dúctiles.

Tipo de carga	Factor de diseño	Diseño por esfuerzo cortante $\tau_d = s_y / 2N$
Torsión estática	2	$\tau_d = s_y / 4$
Torsión cíclica	4	$\tau_d = s_y / 8$
Impacto o choque torsional	6	$\tau_d = s_y / 12$

TABLA 7. Indicaciones para determinar el esfuerzo de diseño-esfuerzos flexionantes.

Patrón de carga	Material dúctil	Material quebradizo o frágil
Estática	$\sigma_d = s_y / 2$	$\sigma_d = s_u / 6$
Repetida	$\sigma_d = s_u / 8$	$\sigma_d = s_u / 10$
Impacto o choque	$\sigma_d = s_u / 12$	$\sigma_d = s_u / 15$

TABLA 8. Propiedades representativas de aceros aleados y al carbón.*

Material AISI núm.	Condición †	Resistencia última, s_u		Resistencia a la cedencia, s_y		Porcentaje de alargamiento
		Ksi	MPa	Ksi	MPa	
1020	Recocido	57	393	43	296	36
1020	Laminado en caliente	65	448	48	331	36
1020	Estirado en frío	75	517	64	441	20
1040	Recocido	75	517	51	352	30
1040	Laminado en caliente	90	621	60	414	25
1040	Estirado en frío	97	669	82	565	16
1040	WQT 700	127	876	93	641	19
1040	WQT 900	118	814	90	621	22
1040	WQT 1100	107	738	80	552	24
1040	WQT 1300	87	600	63	434	32
1080	Recocido	89	614	54	372	25

1080	OQT 700	189	1303	141	972	12
1080	OQT 900	179	1234	129	889	13
1080	OQT 1100	145	1000	103	710	17
1080	OQT 1300	117	807	70	483	23
1141	Recocido	87	600	51	352	26
1141	Estirado en frío	112	772	95	655	14
1141	OQT 700	193	1331	172	1186	9
1141	OQT 900	146	1007	129	889	15
1141	OQT 1100	116	800	97	669	20
1141	OQT 1300	94	648	68	469	28
4140	Recocido	95	655	60	414	26
4140	OQT 700	231	1593	212	1462	12
4140	OQT 900	187	1289	173	1193	15
4140	OQT 1100	147	1014	131	903	18
4140	OQT 1300	118	814	101	696	23
5160	Recocido	105	724	40	276	17
5160	OQT 700	263	1813	238	1641	9
5160	OQT 900	196	1351	179	1234	12
5160	OQT 1100	149	1027	132	910	17
5160	OQT 1300	115	793	103	710	23

* Otras propiedades aproximadamente iguales para todos los aceros aleados y al carbón:

Módulo de elasticidad a tensión = 30 000 000 lb/plg² (207 GPa)

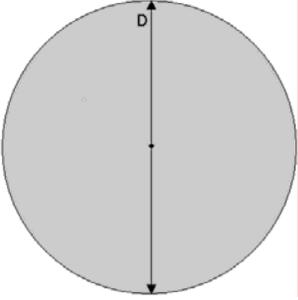
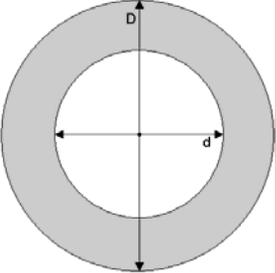
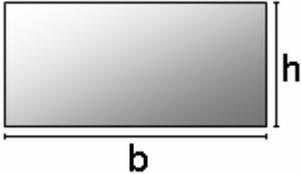
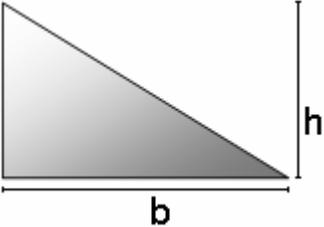
Módulo de elasticidad a cortante = 11 500 000 lb/plg² (80 GPa)

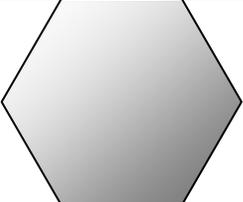
Densidad = 0.283 lb_m/plg³ (7680 Kg/m³)

† OQT significa templado y enfriado en aceite (oil-quenched and tempered). WQT significa templado y enfriado en agua (water-quenched and tempered).

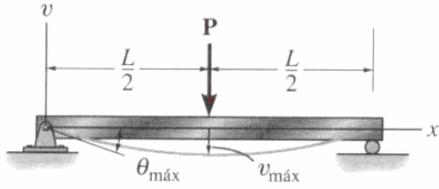
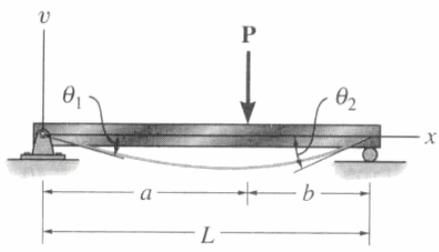
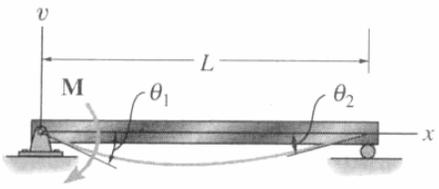
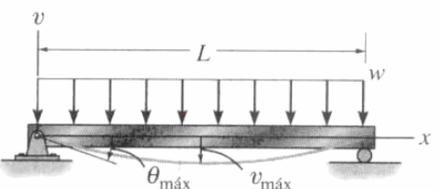
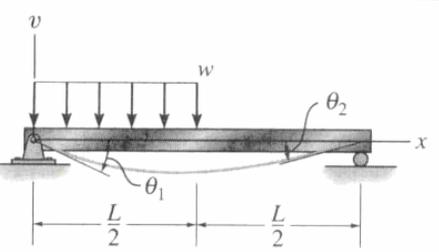
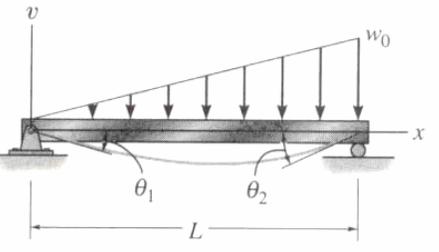
TABLA 9. Propiedades de áreas*

Símbolos que aquí se utilizan
<ul style="list-style-type: none"> • A= área • r= radio de giro = $\sqrt{I / A}$ • I= momento de inercia • J= momento polar de inercia • S= módulo de sección • Z_p= módulo de sección polar
Círculo

	$A = \frac{\pi D^2}{4} = \pi R^2$	$r = \frac{D}{4} = \frac{R}{2}$
	$I = \frac{\pi D^4}{64}$	$J = \frac{\pi D^4}{32}$
	$S = \frac{\pi D^3}{32}$	$Z_P = \frac{\pi D^3}{16}$
Círculo hueco (tubo)		
	$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$	$r = \frac{\sqrt{D^2 + d^2}}{4}$
	$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$	$J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32}$
	$S = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}$	$Z_P = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{16D}$
Cuadrado		
	$A = s^2$	$r_x = \frac{s}{\sqrt{12}}$
	$I_x = \frac{s^4}{12}$	
	$S_x = \frac{s^3}{6}$	
Rectángulo		
	$A = bh$	$r_x = \frac{h}{\sqrt{12}}$ $r_y = \frac{b}{\sqrt{12}}$
	$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad I_y = \frac{hb^3}{12}$	
	$S_x = \frac{bh^2}{6} \quad S_y = \frac{hb^2}{6}$	
Triángulo		
	$A = \frac{bh}{2}$	$r_x = \frac{h}{\sqrt{18}}$

	$I_x = \frac{bh^3}{36}$ $S_x = \frac{bh^2}{24}$	
Hexágono regular		
	$A = 0.866D^2$	$r_x = 0.264D$
	$I_x = 0.06D^4$	
	$S_x = 0.12D^3$	

Pendientes y deflexiones de vigas simplemente apoyadas

Viga	Pendiente	Deflexión
	$\theta_{\text{máx}} = \frac{-PL^2}{16EI}$	$v_{\text{máx}} = \frac{-PL^3}{48EI}$
	$\theta_1 = \frac{-Pab(L+b)}{6EIL}$ $\theta_2 = \frac{Pab(L+a)}{6EIL}$	$v \Big _{x=a} = \frac{-Pba}{6EIL} (L^2 - b^2 - a^2)$
	$\theta_1 = \frac{-ML}{3EI}$ $\theta_2 = \frac{ML}{6EI}$	$v_{\text{máx}} = \frac{-ML^2}{\sqrt{243EI}}$
	$\theta_{\text{máx}} = \frac{-wL^3}{24EI}$	$v_{\text{máx}} = \frac{-5wL^4}{384EI}$
	$\theta_1 = \frac{-3wL^3}{128EI}$ $\theta_2 = \frac{7wL^3}{384EI}$	$v \Big _{x=L/2} = \frac{-5wL^4}{768EI}$ $v_{\text{máx}} = -0.006563 \frac{wL^4}{EI}$ <p>en $x = 0.4598L$</p>
	$\theta_1 = \frac{-7w_0L^3}{360EI}$ $\theta_2 = \frac{w_0L^3}{45EI}$	$v_{\text{máx}} = -0.00652 \frac{w_0L^4}{EI}$ <p>en $x = 0.5193$</p>

Pendientes y deflexiones de vigas en voladizo

Viga	Pendiente	Deflexión
	$\theta_{\text{máx}} = \frac{-PL^2}{2EI}$	$v_{\text{máx}} = \frac{-PL^3}{3EI}$
	$\theta_{\text{máx}} = \frac{-PL^2}{8EI}$	$v_{\text{máx}} = \frac{-5PL^3}{48EI}$
	$\theta_{\text{Fx}} = \frac{-wL^3}{6EI}$	$v_{\text{máx}} = \frac{-wL^4}{8EI}$
	$\theta_{\text{máx}} = \frac{ML}{EI}$	$v_{\text{máx}} = \frac{ML^2}{2EI}$
	$\theta_{\text{máx}} = \frac{-wL^3}{48EI}$	$v_{\text{máx}} = \frac{-7wL^4}{384EI}$
	$\theta_{\text{máx}} = \frac{-w_0L^3}{24EI}$	$v_{\text{máx}} = \frac{-w_0L^4}{30EI}$

BIBLIOGRAFÍA

- Gere, James M. *Mecánica de materiales*. Ed. Thomson Learning. 5ª. Edición. México. 2002. p 187-197
- Hibbeler, R. C. *Mecánica de materiales*. México. Compañía editorial continental. 1994. p. 204.
- López, Ruiz, Miguel. *Elementos para la investigación*. Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Investigaciones Jurídicas. México. 1998.
- Lyndon Edwards & Edean Mark. *Manufacturing with materials*. Ed. Butterworths. Inglaterra. 1990. p 19, 20, 318.
- Mott, Robert L. *Resistencia de materiales aplicada*. México. 3ª edición. Prentice-Hall Hispanoamericana. 1996.
- Riley, William F. *et. al. Mecánica de Materiales*. México. Limusa. 2001.
- Seely, Fred B. *Resistencia de materiales*. México. UTEHA. 1954. P. 44-48, 82-97.
- Smith, William F. *Fundamentos de la ciencia e Ingeniería de Materiales*. Madrid. 3ª edición. McGraw Hill. 1998.

PÁGINAS DE INTERNET CONSULTADAS

<http://www.gestiopolis.com/canales2/rrhh/1/metcasos.htm>