

Proyecto de integración en ingeniería mecánica I

Modalidad: Proyecto tecnológico.

Diseño, construcción y evaluación de un dado de extrusión para fabricar monolitos cerámicos de cordierita.

Presenta:

Daniel Herrera Toribio.

2133036023

daniel_h_t@outlook.com

Aarón Iván Luna Rodríguez.

2092016689

makoloud66@hotmail.com

Asesores:

Dr. José Luis Contreras Larios.

jlcl@correo.azc.uam.mx

Dr. Zeferino Damián Noriega.

zdn@correo.azc.uam.mx

Trimestre 18-I

México D. F. abril 2018

Yo, José Luis Contreras Larios, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

A rectangular area that has been redacted, likely containing a signature or stamp.

Dr. José Luis Contreras Larios.

Yo, Zeferino Damián Noriega, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Dr. Zeferino Damián Noriega.

Yo, Daniel Herrera Toribio, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Daniel Herrera Toribio.

Yo, Aarón Iván Luna Rodríguez, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Aarón Iván Luna Rodríguez.

AUTORIZACIÓN DE INSCRIPCIÓN A PROYECTO DE INTEGRACIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA

PI-A-MEC

Trimestre en que se autoriza la propuesta:

17 P

Fecha: 24/07/2017

PI-A-MEC 024/17

DATOS DEL ALUMNO

Nombre: Daniel Herrera Toribio

Matrícula: 2133036023

Correo personal: daniel_h_t@outlook.com

ASESOR RESPONSABLE / DATOS DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Empresa: Dr. José Luis Contreras Larios

No. económico: 7536

Adscripción/Departamento/Sección: Departamento de energía

Área de investigación: Procesos de la industria química

Correo institucional: jlc@azc.uam.mx

COASESOR O ASESOR EXTERNO / JEFE O RESPONSABLE LEGAL DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Jefe o Responsable legal: Dr. Zeferino Damian Noriega

No. económico/Teléfono: 17421

Adscripción/Puesto: Departamento de energía

Área de investigación/Departamento: Sistemas mecánicos de frontera

Correo electrónico: zdn@azc.uam.mx

MODALIDAD DEL PROYECTO

☒ Proyecto tecnológico

☐ Proyecto de investigación

☐ Estancia profesional

☐ Experiencia profesional

TÍTULO DEL PROYECTO

Diseño, construcción y evaluación de un dado de extrusión para fabricar monolitos cerámicos de cordierita.

Proyecto de Integración asociado a un Proyecto de Investigación: ☒ No ☐ Si

Clave (?):

OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y evaluar un dado de extrusión para obtener monolitos de cordierita con una densidad de 200 a 300 celdas por pulgada cuadrada.

UNIDADES DE ENSEÑANZA APRENDIZAJE ASOCIADAS AL PROYECTO DE INTEGRACIÓN

Clave	UEA	UEA Autorizada	Vigencia
1100118	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica I	..51	Inicio
1100128	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica II		17-0
1100138	Introducción al Trabajo de Investigación en Ingeniería Mecánica		Término
			18-1

Nombre y firma del Coordinador de Estudios

ing. 

ing. 



Originals: Coordinador de Estudios, Coordinación de Sistemas Escolares.
Copias: Alumno, Asesor(es).

Revisión: Febrero 2016

AUTORIZACIÓN DE INSCRIPCIÓN A PROYECTO DE INTEGRACIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA

PI-A-MEC

Trimestre en que se autoriza la propuesta:

17 P

Fecha:

24/07/2017

PI-A-MEC

024/17

DATOS DEL ALUMNO

Nombre: Aarón Iván Luna Rodríguez

Matrícula:

209201689

Correo personal:

makoloud66@hotmail.com

ASESOR RESPONSABLE / DATOS DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Empresa: Dr. José Luis Contreras Larios

No. económico: 7536

Adscripción/Departamento/Sección: Departamento de Energía

Área de investigación: Procesos de la Industria Química

Correo institucional: jlcl@azc.uam.mx

COASESOR O ASESOR EXTERNO / JEFE O RESPONSABLE LEGAL DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Jefe o Responsable legal: Dr. Zeferino Damián Noriega

No. económico/Teléfono: 17421

Adscripción/Puesto: Departamento de Energía

Área de investigación/Departamento: Sistemas Mecánicos de Frontera

Correo electrónico: zdn@azc.uam.mx

MODALIDAD DEL PROYECTO

☒ Proyecto tecnológico

☐ Proyecto de investigación

☐ Estancia profesional

☐ Experiencia profesional

TÍTULO DEL PROYECTO

Diseño, construcción y evaluación de un dado de extrusión para fabricar monolitos cerámicos de cordierita.

Proyecto de Integración asociado a un Proyecto de Investigación: ☒ No ☐ Si

Clave (2):

OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y evaluar un dado de extrusión para obtener monolitos de cordierita con una densidad de 200 a 300 celdas por pulgada cuadrada.

UNIDADES DE ENSEÑANZA APRENDIZAJE ASOCIADAS AL PROYECTO DE INTEGRACIÓN

Clave	UEA	UEA Autorizada	Vigencia
1100118	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica I	51	Inicio
1100128	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica II		17 O Término
1100138	Introducción al Trabajo de Investigación en Ingeniería Mecánica		18 I

Nombre y firma del Coordinador de Estudios

[Firma]

Ing. Rofny Pérez Moreno



Originales: Coordinador de Estudios, Coordinación de Sistemas Escolares.
Copias: Alumno, Asesor(es).

Revisión: Febrero 2016

Resumen

En este trabajo se diseñó, construyó y se puso a prueba un dado de extrusión para fabricar monolitos cerámicos de cordierita. En la industria especializada, a este tipo de monolito — después de haber sido sinterizado— se le aplica un recubrimiento de materiales catalizadores heterogéneos, y posteriormente, con un proceso de encapsulado y enlatado, se fabrican convertidores catalíticos. Los convertidores catalíticos modifican la estructura molecular de los gases contaminantes producto de la quema de combustibles fósiles, transformando la gran mayoría de ellos en gases inocuos para la salud y para el medio ambiente.

Con el propósito de aumentar el área de contacto de los gases de combustión con el monolito, la estructura de éste se compone de celdas de sección transversal homogénea cuadrada. Tomando como punto de partida el estado del arte en torno a esta tecnología, se diseñó un dado capaz de extruir piezas de pasta precursora de cordierita. Posteriormente, aplicando los procesos de manufactura no convencional de electroerosión por penetración y por hilo, y empleando como material de trabajo el acero inoxidable AISI 304, se logró construir un dado de extrusión con una densidad de 324 celdas por pulgada cuadrada en el área comprendida dentro de un círculo de 50 mm de diámetro. El dado de extrusión diseñado y construido es de utilidad en la investigación y el desarrollo de procesos de impregnación de monolitos producidos con compuestos catalizadores heterogéneos.

Se hizo la selección de la mezcla idónea después de evaluar las diferentes proporciones de los componentes químicos que forman la pasta precursora de la cordierita, eligiendo la más adecuada para la extrusión. Dicha mezcla se utilizó en el proceso de extrusión de este trabajo.

Se realizaron pruebas de extrusión en una extrusora radial, empleando un cedazo de acero inoxidable y la pasta seleccionada obteniendo filamentos tipo “fideo” para la obtención de *pellets* cerámicos. Posteriormente se montó el acoplamiento que incluye el dado construido, y se realizaron pruebas de extrusión axial. La presión en sentido axial, dentro de la cámara de acumulación de la pasta, fue insuficiente para provocar el flujo a través de los orificios de alimentación del dado.

Finalmente, se propone una solución para aumentar el trabajo de flujo realizado por el husillo al desplazar la pasta, y así incrementar la presión en el tramo en que se observó mayor acumulación de la misma.

RESUMEN	2
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	6
MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES.	7
JUSTIFICACIÓN	8
OBJETIVOS	9
OBJETIVOS PARTICULARES.	9
INTRODUCCIÓN	10
PROPIEDADES Y ESTRUCTURA DE LOS MATERIALES CERÁMICOS	10
CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES CERÁMICOS EN FUNCIÓN DE SUS APLICACIONES	12
PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS MATERIALES CERÁMICOS	13
ASPECTOS GENERALES DE LOS MATERIALES CERÁMICOS AVANZADOS	14
ASPECTOS MINERALÓGICOS DE LA CORDIERITA	16
PROPIEDADES DE LA CORDIERITA SINTÉTICA	17
SÍNTESIS DE LA CORDIERITA	19
LA CORDIERITA COMO SOPORTE DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO AUTOMOTRIZ	19
REOLOGÍA DE LA CORDIERITA	20
HERRAMIENTAS PARA EL DISEÑO MECÁNICO.	21
TIPOS DE ESFUERZOS	21
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	22
FACTOR DE DISEÑO O FACTOR DE SEGURIDAD.	23
RESISTENCIA A LA FATIGA	25
ESTIMACIÓN TEÓRICA DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA.	26
ESTIMACIÓN TEÓRICA DEL DIAGRAMA ESFUERZO VS CICLOS.	28
DESARROLLO DEL PROYECTO	29
GEOMETRÍA DEL DADO	29
FUERZAS INVOLUCRADAS EN EL DADO.	35

CALCULO DEL FACTOR DE DISEÑO BASADOS EN EL MÉTODO DE PUGSLEY.	36
PARÁMETROS DE TRABAJO.	37
CORRECCIÓN DEL ESFUERZO A LA FATIGA.	40
ESTIMACIÓN DEL DIAGRAMA ESFUERZO VS CICLOS.	42
<u>ACOPLAMIENTO EXTRUSORA – DADO.</u>	<u>45</u>
<u>MANUFACTURA DE LAS PIEZAS.</u>	<u>46</u>
TORNEADO	47
TALADRADO	50
MACHUELEADO	51
FRESADO	52
ELECTROEROSIONADO	53
SOLDADURA	57
<u>RESULTADOS</u>	<u>58</u>
<u>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</u>	<u>60</u>
<u>CONCLUSIONES</u>	<u>61</u>
<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>63</u>
<u>APÉNDICE 1 DIBUJOS TÉCNICOS.</u>	<u>64</u>

Índice de figuras

Figura1 Monolito Cerámico, Corning.	9
Figura 2 Diagrama de la clasificación general de los materiales. Extrusion in ceramics Händle F.	10
Figura 3 Ejemplo enlace iónico o electrocovalente del NaCl. Britanica.com	11
Figura 4 Ejemplo de enlace covalente del H ₂ O. Britanica.com	11
Figura 5 Proceso convencional d procesamiento de materiales cerámicos. Askeland.	13
Figura 6 Cristal de cordierita, variedad iolita. mineralman.com/cordierite040813	17
Figura 7 Estructura cristalina de la cordierita Interceram.	17
Figura 8 Curvas de expansión térmica típicas de la cordierita	18
Figura 9 Detalle del aspecto común de las celdas de panal de un monolito cerámico de cordierita. Corning.	20
Figura 10 Tipos de esfuerzos.	22
Figura 11 Diagrama esfuerzo vs deformación unitaria, ingenierocivilinfo.com	22
Figura 12 Diagrama S-N Mott.	25
Figura 13 Fórmulas para áreas esforzadas al 95% de diversas secciones, notas Ricardo Yañes 2015.	27
Figura 14 Vista frontal (A) y vista isométrica (B) del monolito de cordierita.	30
Figura 15 Arreglos en los canales de alimentación.	30
Figura 16 Área de contacto con la presión.	31
Figura 17 Estructura interna del dado de extrusión, (Patente US 0178769)	32
Figura 18 Características dimensionales del monolito.	32
Figura 19 Tipos de área en un monolito.	33
Figura 20 Secciones del dado	35
Figura 21 Esquema del proceso de extrusión.	35
Figura 22 Fuerzas involucradas en el dado.	36
Figura 23 Principales partes que conforman al dado de extrusión.	38
Figura 24 Área de mayor esfuerzo (esfuerzo cortante).	38
Figura 25 Esfuerzo cortante actuando sobre el dado.	39
Figura 26 Área esforzada al 95% de una sección rectangular sólida.	41
Figura 27 Diagrama esfuerzo vs ciclos del dado.	44
Figura 28 Extrusora FUJI PAUDAL Modelo: EXK-1.	45
Figura 29 Acoplamiento dado - extrusora	45
Figura 30 Corte de los bloques.	46
Figura 31 Torneado y producción de orificios, kalpakjian.	47
Figura 32 Principales partes de un torno, kalpakjian.	48
Figura 33 Porta-insertos e insertos.	48
Figura 34 Proceso de torneado, UAM-Azc.	49
Figura 35 Principales partes de un taladro de un taladro de banco, kalpakjian.	50
Figura 36 Proceso de barrenado, UAM Azc.	50
Figura 37 Principales partes de un machuelo, kalpakjian.	51
Figura 38 Machueleado de la pieza D-1	51
Figura 39 Principales partes de una fresadora vertical, kalpakjian.	52

<i>Figura 40 Operaciones de fresado, kalpakjian.</i>	52
<i>Figura 41 Proceso de fresado.</i>	53
<i>Figura 42 Electroerosión por penetración, Kalpakjian.</i>	54
<i>Figura 43 Orificios de alimentación, manufacturado por el proveedor Hilomatrix.</i>	54
<i>Figura 44 Electroerosión por hilo, Kalpakjian.</i>	55
<i>Figura 45 Soporte del dado para el proceso de electroerosión.</i>	56
<i>Figura 46 a) Geometría del dado, b) Ranuras del dado.</i>	56
<i>Figura 47 Proceso de soldado por arco de gas, kalpakjian.</i>	57
<i>Figura 48 a) Retención del dado b) Acoplamiento extrusora-dado.</i>	57
<i>Figura 49 Ensamble de cedazo para flujo radial para la obtención de filamentos tipo "fideo"</i>	59
<i>Figura 50 Ensamble del dado para la obtención de monolitos.</i>	60
<i>Figura 51 Esquema de la extrusión de pasta con el dado para monolitos.</i>	60
<i>Figura 52 Desmontaje del dado para su observación; (A) dado con los orificios de alimentación obstruidos, (B) canal de alimentación del acoplamiento.</i>	61
<i>Figura 53 Propuesta del acoplamiento de un husillo con ajuste reducido.</i>	62

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Clasificación de los productos cerámicos en función de sus aplicaciones.</i>	12
<i>Tabla 2 Propiedades específicas del material requeridas en productos cerámicos de alto desempeño. Händle.</i>	15
<i>Tabla 3 Productos cerámicos avanzados típicos y sus aplicaciones en los distintos mercados. Händle.</i>	16
<i>Tabla 4 propiedades nominales de este óxido de fases múltiples</i>	18
<i>Tabla 5 Valores para calcular el factor de diseño n.</i>	24
<i>Tabla 6 Dimensiones del monolito con un espesor de pared de 0.25mm</i>	33
<i>Tabla 7 Dimensión del monolito con un espesor de pared de 0.4mm</i>	34
<i>Tabla 8 Porcentaje de los componentes empleados en la mezcla precursora de cordierita</i>	58

Marco teórico y antecedentes.

La influencia antropogénica en el medio ambiente ha provocado el mayor desafío que ha tenido que enfrentar la humanidad. Existe un consenso científico en que este fenómeno es un hecho inequívoco, causado por la acción del hombre, detonada a través de sus excesivas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Uno de los mensajes claves del 5° Informe de evaluación del clima (AR5, 2013/14) del *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) indica que “La influencia humana en el sistema climático es clara y va en aumento, sus impactos se observan en todos los continentes. Si no se les pone freno, el cambio climático hará que aumente la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles en las personas y los ecosistemas. Sin embargo, existen opciones para la adaptación al cambio climático y con actividades de mitigación rigurosas, se puede conseguir que los impactos del cambio climático permanezcan en un nivel controlable creando un futuro más claro y sostenible”. (Mena , 2017)

Para limitar el calentamiento del medio global en la superficie a no más de 2°C, respecto de la época preindustrial, umbral definido como máximo por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNCC), se requerirán fuertes reducciones de las emisiones de estos gases a la atmosfera, lo que supondrá un importante reto tecnológico, económico, institucional y de comportamiento, involucrando a toda la humanidad. (Mena , 2017)

El cambio climático es una de las principales preocupaciones de los últimos años. El uso excesivo de combustibles fósiles aunado a la falta de ética en la humanidad ha acentuado el problema, causando diversas enfermedades entre ellas las respiratorias, una gran parte de los gases expulsados a la atmosfera se debe a máquinas de combustión interna, en su mayoría vehículos automotores empleados en el transporte urbano de las ciudades.

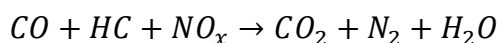
Nueve de cada diez personas respiran aire insalubre. La contaminación del aire es un asesino invisible que puede estar acechando, por ejemplo, en el camino de vuelta a casa e incluso en nuestros hogares. (OMS, 2016)

El sector del autotransporte es uno de los principales emisores de contaminantes a escala nacional en México, siendo responsable de 90.03 por ciento de las emisiones de monóxido de carbono (CO) y de 45.67 por ciento de óxidos de nitrógeno (NOx), en todo el país. Los especialistas indicaron que los vehículos que actualmente se venden en México cuentan con algunas tecnologías que permitirán alcanzar estándares más limpios, como aquellas que mejoran la oxigenación del combustible y otras como los controles electrónicos para motores

y catalizadores de oxidación para maquinas a diésel, así como catalizadores de tres vías. (Navarro, 2014)

Para tener mejor la calidad del aire en México, es urgente eliminar las emisiones contaminantes usando nuevas tecnologías, pero pasarán varias décadas para contar con vehículos con cero emisiones contaminantes que se puedan emplear cotidianamente, además de que dejemos de usar combustibles fósiles como principal fuente de energía. Por tal motivo este escenario es aún lejano. Sin embargo, es posible minimizar las emisiones contaminantes empleando convertidores catalíticos que funcionen de manera adecuada en los medios de transporte.

Un convertidor catalítico es un dispositivo empleado para incrementar la velocidad de una reacción química; implementando estos dispositivos en máquinas de combustión interna como motores de los sistemas de autotransporte, podemos acelerar la siguiente reacción:



De esta forma, los gases expulsados a la atmosfera resultan en su mayoría inocuos para la salud y para el medio ambiente. Es importante mencionar que el convertidor catalítico debe ser reemplazado cuando éste reduzca su eficiencia reactiva. De acuerdo a la Agencia de Protección del medio Ambiente de EE.UU. (en inglés *Environmental Protection Agency*, *EPA*), se sugiero hacer el cambio de convertidor catalítico a lo más cada 5 años. (EPA, 1989)

La composición de un convertidor catalítico varía en función del tipo de combustible quemado, ya sea diésel, gasolina u otro combustible como etanol. La diferencia principal radica en los compuestos que se le impregnan al monolito de cordierita.

Justificación

En el laboratorio de catálisis de la UAM Azcapotzalco, a cargo del Dr. José Luis Contreras Larios, se realizan investigaciones y pruebas para los diferentes compuestos catalíticos y se estudia su desempeño en la conversión de las emisiones. Sin embargo, para poder profundizar en estudios y pruebas es necesario contar con monolitos de cordierita que son el sustrato de un convertidor catalítico.

Un monolito cerámico es una estructura de un solo cuerpo conformado por cordierita. La estructura del monolito consta de celdas por lo general cuadradas que forman numerosos ductos a través de los que pasan los gases emitidos por la quema de combustibles fósiles; para que el proceso catalítico se lleve a cabo de manera eficiente y rápida, es importante maximizar el área de contacto entre los gases emitidos y el sustrato. Podemos relacionar el área de contacto con la cantidad de celdas por pulgada cuadrada con las que cuenta un monolito.



Figura1 Monolito Cerámico, Corning.

En México, la producción de monolitos es escasa a nivel nacional, debido a que la fabricación está mayormente bajo el dominio de empresas trasnacionales que comercializan este tipo de dispositivos. Esto evidencia la necesidad de importar grandes cantidades para satisfacer la demanda en las armadoras automotrices y en los campos de investigación. *Corning Incorporated* uno de los pioneros y principales productores de estos soportes cerámicos, con una gran variedad de productos. Los monolitos de cordierita más comerciales son aquellos con una densidad de 350 a 400 celdas por pulgada cuadrada (del inglés *cells per square inch*, en adelante cpsi), aunque la densidad de celdas va en ascenso.

Objetivos

Diseñar y construir un dado de extrusión para fabricar monolitos con una densidad de 200 a 300 cpsi, usando una extrusora radial monohusillo marca FUJI PAUDAL Modelo: EXK-1.

Objetivos particulares.

- Investigar las propiedades mecánicas de la cordierita.
- Calcular los valores de los esfuerzos de trabajo a los que estará sometido el dado.
- Realizar el diseño del dado en el software Inventor.
- Seleccionar el material del dado.
- Realizar simulación de esfuerzos con el software ANSYS.¹
- Fabricar el dado de extrusión.
- Ensamblar el dado con el extrusor.
- Extruir monolitos de cordierita.
- Evaluar los monolitos producidos.

¹ En las licencias de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería se puede llevar a cabo actividades de docencia únicamente y está restringido el uso para la investigación, así como la publicación de resultados en congresos, revistas y en los proyectos de integración y tesis de posgrado." http://cbi.azc.uam.mx/es/CBI/Recursos_Tec_Alumnos

Introducción

Los materiales cerámicos son parte del grupo de materiales no metálicos e inorgánicos que incluye el vidrio, las rocas y los aglutinantes inorgánicos, como el cemento, la cal y el yeso. Esencialmente, se preparan de materiales que se encuentran directamente en la naturaleza.

En el continente europeo, se consideran cerámicos aquellos materiales no metálicos e inorgánicos, que tienen una estructura por lo menos en un 30% cristalina, que son insolubles en agua y cuya microestructura es producto de la acción de la temperatura. (Händle F., 2009)

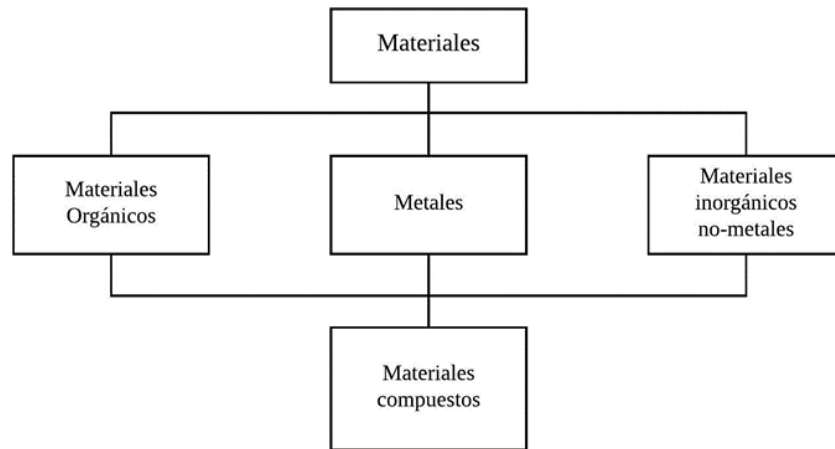


Figura 2 Diagrama de la clasificación general de los materiales. Extrusion in ceramics Händle F.

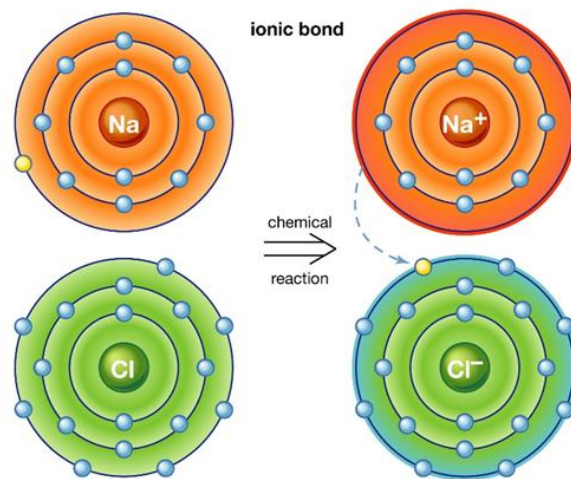
Propiedades y estructura de los materiales cerámicos

Las propiedades de los materiales cerámicos, como las de todos los materiales, están establecidas por los tipos de átomos que tienen presentes, los tipos de enlaces entre los átomos y la estructura en la que están configurados. El tipo de enlace y la estructura ayudan a determinar qué tipo de propiedades tendrá el material.

Las cerámicas tienen por lo general una combinación de enlaces fuertes llamados iónicos, que ocurren entre un metal y un no metal e involucran la atracción de cargas opuestas cuando los electrones se transfieren del metal al no-metal; y covalentes, que ocurren entre dos no metales e involucran la compartición de átomos. La fuerza de un enlace iónico depende de la magnitud de la carga en cada ion y del radio de cada ion.

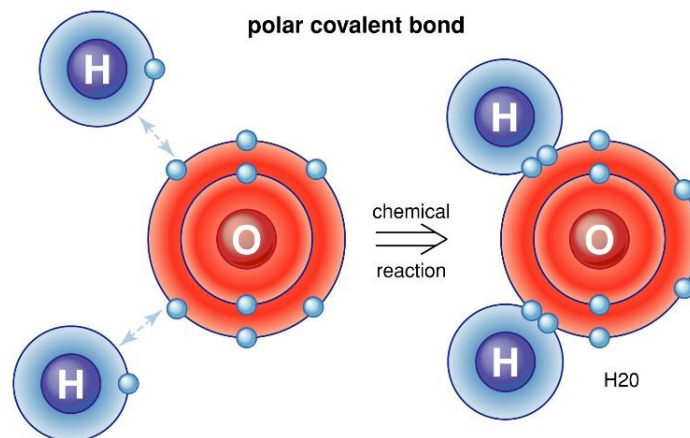
A mayor número de electrones compartidos, mayor es la fuerza de atracción, o mayor es el enlace covalente. Estos enlaces dan como resultados un alto módulo elástico y una alta dureza, altos puntos de fusión, baja expansión térmica y buena resistencia química. Por otro lado, los materiales cerámicos son también duros y generalmente frágiles (a menos que el

material sea fortalecido por medio de tratamientos de refuerzo o por otros medios), lo que los lleva a que, cuando fallan, la mayoría lo hace por fractura. (Ceramics.org, 2018)



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Figura 3 Ejemplo enlace iónico o electrocovalente del NaCl. Britanica.com



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Figura 4 Ejemplo de enlace covalente del H₂O. Britanica.com

Funcionalmente, se consideran cerámicos a los materiales que además de contar con las características mencionadas previamente, tienen las propiedades cerámicas típicas, como alta resistencia térmica, resistencia a la corrosión e insolubilidad en el agua. Otras características importantes de los materiales cerámicos son su elevada temperatura de fusión y su alta resistencia a la compresión. Como se mencionó anteriormente, presentan un comportamiento frágil a la tensión. Los valores de la resistencia a la tensión y a la flexión muestran variaciones considerables, ya que la resistencia de los materiales cerámicos depende de la distribución de los tamaños de las imperfecciones y no se ve afectada por los movimientos de dislocaciones. Los materiales cerámicos no siempre son frágiles. A rapideces de deformación

más lentas y a elevadas temperaturas, muchos materiales cerámicos con un tamaño de grano muy fino muestran un comportamiento superplástico. (Askeland, Fulay, Whright. W. J, Hernández , & Romo Muñoz, 2012)

Clasificación de los materiales cerámicos en función de sus aplicaciones

El actual desarrollo de los materiales cerámicos ha llevado a clasificarlos según la función que están destinados a cumplir, independientemente del producto que se trate. Por lo común, el material debe de cumplir más de una función. Para fines prácticos, a continuación, se incluye una clasificación general según las aplicaciones y los usos generales de los productos cerámicos. (Ambrosio Mari, 1998)

Tabla 1 Clasificación de los productos cerámicos en función de sus aplicaciones.

Denominación	Definición general y ejemplos
Cerámica roja	Productos de arcilla cocida, generalmente porosos: ladrillos, tejas, bloques, cañerías, revestimientos, objetivos artísticos
Cerámica blanca	Productos de caolín, feldespato-cuarzo, porosos o no: lozas, porcelanas para vajilla, revestimientos, sanitarios y usos técnicos diversos
Refractarios	Productos resistentes a temperaturas elevadas: sílico-aluminosos, de alta alumina, básicos, electrofundidos, etc.
Vidrios	Productos no cristalinos, generalmente transparentes o translúcidos: vidrios planos, envases, vajilla, vidrios técnicos, fibras, esmaltes
Cementos	Productos que presentan características aglomerantes y adhesivas al ser mezclados con agua: cemento portland, cementos aluminosos, yeso, cales, etc.
Abrasivos	Productos de alta dureza usados para cortar y pulir: esmeril, carburo de silicio, diamante, carburos metálicos, etc.
Cerámicas especiales	Productos cerámicos no comprendidos en los grupos anteriores

Proceso de fabricación de los materiales cerámicos

Hasta hace unas décadas, los materiales cerámicos se formaban por medio del proceso secuencial de mezclado de polvos, moldeado y sinterizado. Este proceso general —en el que figura la fabricación de monolitos de cordierita, así como muchos tipos de piezas de cerámicas— es el siguiente:

Figura XX Proceso convencional de procesamiento de materiales cerámicos. **Askeland 6ta edición.**

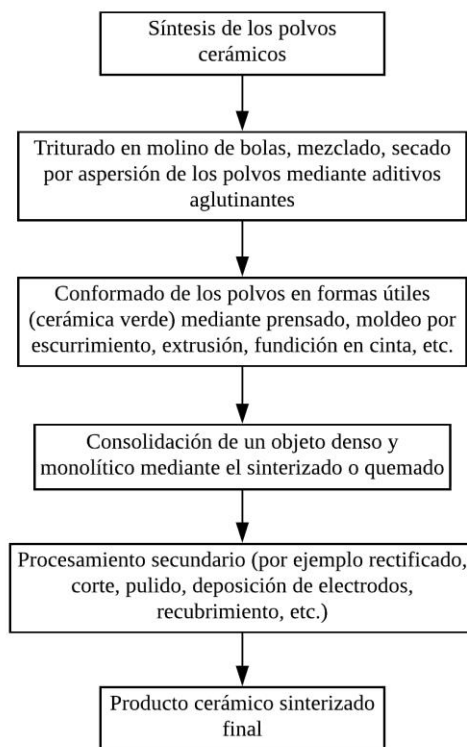


Figura 5 Proceso convencional d procesamiento de materiales cerámicos. Askeland.

La fabricación de un polvo cerámico se expresa también como la síntesis de los materiales cerámicos. Una vez sintetizado el polvo cerámico, se prepara con el fin de formarlo por triturado, molido, separación de impurezas, mezclado de polvos diferentes, secado, secado por aspersión para formar aglomerados blandos. Posteriormente se utilizan distintas técnicas como compactación, fundición en cinta, extrusión o moldeo por escurrimiento, para convertir los polvos correctamente procesados a la forma deseada, conocida como cerámica verde. La cerámica verde es el material cerámico que aún no se ha sinterizado. A continuación, se consolida la cerámica verde por medio de un tratamiento de alta temperatura conocido como

sinterizado o quemado. En este proceso, se calienta la cerámica verde a una temperatura elevada, utilizando un tratamiento térmico con atmósfera controlada, a fin de obtener un material denso. El material cerámico se somete después a operaciones adicionales como el rectificado, pulido o maquinado, fijado de terminales, depósito de electrodos o recubrimientos. (Askeland, Fulay, Whright. W. J, Hernández , & Romo Muñoz, 2012)

Existen casos de piezas cerámicas que se producen por medio de la fusión y el posterior mezclado de sus componentes, por la descomposición de compuestos químicos en estado gas/vapor, o basándose en el estado coloidal de los materiales precursores. (Händle F., 2009)

Aspectos generales de los materiales cerámicos avanzados

Si bien los materiales cerámicos han sido utilizados por el hombre desde épocas prehistóricas, solo a partir del siglo XX se ha logrado un conocimiento científico avanzado sobre los mismos (Ambrosio Mari, 1998)

Hasta bien entrado el siglo XX, la disponibilidad de materias primas dictaba qué material se podía fabricar, y las propiedades de un producto cerámico podían mejorarse en algunos casos por medio del control de la temperatura y de la preparación de la mezcla. A partir de la segunda guerra mundial, la investigación y desarrollo en materiales cerámicos se intensificó, teniendo efecto hasta nuestros días. En 1940, se usaban ya productos de grafito para reactores nucleares en EE. UU. En 1943 los circuitos impresos en esteatita se lanzaron al mercado. Se ha dado una transición imperceptible del uso de cerámicos convencionales a materiales de alto desempeño o avanzados, como son los productos cerámicos técnicos o ingenieriles. (Händle F., 2009)

A partir de la segunda mitad del siglo XX (1952) llegaron las fibras cerámicas; los diamantes sintéticos en 1955; Óxido de aluminio (Al_2O_3) traslúcido en 1959; materiales aislantes altamente refractarios (usados en cápsulas espaciales) en 1961. Los ejemplos anteriores figuran en la lista de materiales cerámicos avanzados.

Al hablar de materiales cerámicos avanzados (también llamados de ingeniería), se hace referencia a los materiales no tradicionales fabricados a partir de nuevas materias primas (por lo general productos químicos muy puros y con características granulométricas muy acotadas), mediante nuevos procesos que permiten la obtención de productos mejorados o nuevos, con propiedades definidas dentro de límites muy estrictos y con mayor resistencia a los esfuerzos mecánicos, a las altas temperaturas, a la corrosión, etc. Los materiales cerámicos tienen aplicaciones muy específicas en tecnologías de punta como la microelectrónica, la optoelectrónica, los vehículos de transporte de alta velocidad, los vehículos espaciales, los nuevos sistemas de producción de energía, la industria nuclear, etc., hasta el punto en que, sin ellos, estas tecnologías no hubieran podido llegar a su desarrollo actual. También entran en esta expresión los materiales tradicionales pero fabricados con tecnologías mejoradas o nuevas. (Ambrosio Mari, 1998)

Tabla 2 Propiedades específicas del material requeridas en productos cerámicos de alto desempeño. Händle.

Cerámicas de silicato	Cerámicas de ingeniería, otras
♦ Resistencia a la abrasión / a las rayaduras	♦ Resistencia a la abrasión
♦ A prueba de fuego / no flamables	♦ Bioinertes / biocompatibles
♦ Resistencia a la corrosión	♦ Alta dureza
♦ Resistencia a la luz solar	♦ Resistencia a altas temperaturas
♦ Origen natural	♦ Resistencia a la corrosión
♦ Resistencia al agua	♦ Resistencia mecánica
♦ Resistencia al clima	♦ Baja densidad

Los materiales cerámicos convencionales y avanzados, tienen una combinación única de propiedades que ningún otro material posee, como se indica

Tabla 2 Propiedades específicas del material requeridas en productos cerámicos de alto desempeño.

Una piedra angular de los materiales cerámicos avanzados se estableció en 1973 con el desarrollo de cerámicas precursoras. Sus materiales iniciadores no son inorgánicos, sino orgánicos; algo impensable anteriormente. Esta categoría también incluye los cerámicos biomorfos. Los materiales celulares y espumosos con poros abiertos y cerrados son variantes que abrieron nuevas direcciones en la tecnología. El desarrollo de materiales cerámicos ha sido desde hace tiempo materia interdisciplinaria. (Händle F., 2009)

La siguiente tabla indica algunas aplicaciones los productos cerámicos avanzados que se han desarrollado.

Tabla 3 Productos cerámicos avanzados típicos y sus aplicaciones en los distintos mercados. Händle.

Aplicación	Productos típicos	Desde
Armamento	Chalecos protectores, blindaje	1990
Bio-implantes	Huesos, rótulas, etc.	1969
Industria Computacional	Sustratos, etc.	1943
Industria Eléctrica	Superconductores cerámicos	1986
Industria Electrónica	Transistores, sustratos, imanes	1943
Generación de energía	Celdas de combustible cerámicas	1993
Energía nuclear	Absorbedores, barras de combustible	1940
Industria de Telecomunicaciones	Capacitores, piezocerámicos	1932
Ingeniería mecánica	Cojinetes, sellos, tornillos	1990
Sistemas médicos	Tomografías, instrumentos quirúrgicos	1985
Aeroespacial	Boquillas quemadoras, escudos de calor	1961
Protección ambiental	Convertidores catalíticos, filtros de membranas	1975
Transporte	Discos de frenos, válvulas, etc.	1999

Aspectos mineralógicos de la cordierita

La cordierita es un mineral de magnesio, aluminio y silicato ($\text{MgAl}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$) que se encuentra en estado natural. Pertenece a la clase de los silicatos y a la subclase de los ciclosilicatos (grupo andalucita-silimanita-cianita). La variedad iolita, que es su piedra preciosa, es bien conocida entre coleccionistas y entusiastas. (Chowdury a. & G. K., 2007)

La cordierita fue descrita en 1809 con precisión por el geólogo y mineralogista Pierre Louis Cordier, e identificada y nombrada en su honor como un mineral específico en 1813. El inusual color azul-violeta de la cordierita es atractivo, y puede ser comparada con un zafiro ligeramente azul con tinte purpúreo. Es por esto que a veces se le llama “zafiro de agua”. (Chowdury a. & G. K., 2007)

Los colores disponibles de la cordierita cristalina (en estado natural), son: azul, azul grisáceo, azul violeta, gris, amarillo, café, verde, etc. Una de las características más notables de la cordierita es su pleocroísmo, o habilidad para cambiar de color en función de la dirección de la luz que incide en ella. Generalmente, es “tricroica”. Los minerales asociados con la cordierita son la almandina, el corindón, la andalucita, la biotita y los feldespatos. (Chowdury a. & G. K., 2007)



Figura 6 Cristal de cordierita, variedad iolita. mineralman.com/cordierite040813

Propiedades de la cordierita sintética

La cordierita es un material cerámico avanzado con muchas aplicaciones en las que se aprovechan sus propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas únicas; es además un material que se puede sintetizar. Su fórmula química es $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$, y es conocida por su coeficiente de expansión térmica inusualmente bajo, su baja capacidad térmica, su baja densidad y su alta resistencia al choque térmico. Su estructura cristalina es de simetría ortorrómbica en su forma de baja temperatura, se caracteriza por sus anillos de seis miembros y se construye con tetraedros de Silicato (SiO_4) y de Aluminato (AlO_4). (Chowdury a. & G. K., 2007)

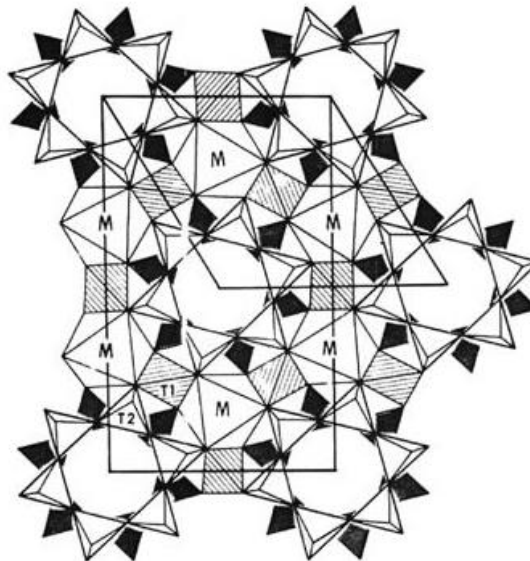


Figura 7 Estructura cristalina de la cordierita Interceram.

Tabla 4 propiedades nominales de este óxido de fases múltiples

Propiedad	Valor con unidades
Densidad	2.0 - 2.53 [g/cm ³]
Punto de fusión	1470 [°C]
Coeficiente de expansión térmica (de 25 a 1000°C)	1.4 - 2.6 × 10 ⁻⁶ [1/K]
Módulo de elasticidad	139 - 150 [GPa]
Resistencia a la flexión a temperatura del recinto	120 - 145 [MPa]
Constante dieléctrica relativa	5.0 [K & tanδ @ 1MHz]

En altas temperaturas (aproximadamente de 300 hasta 1200 °C), el incremento en el movimiento por el incremento en la energía de sus átomos se distribuye en rotación y torsión de sus anillos.

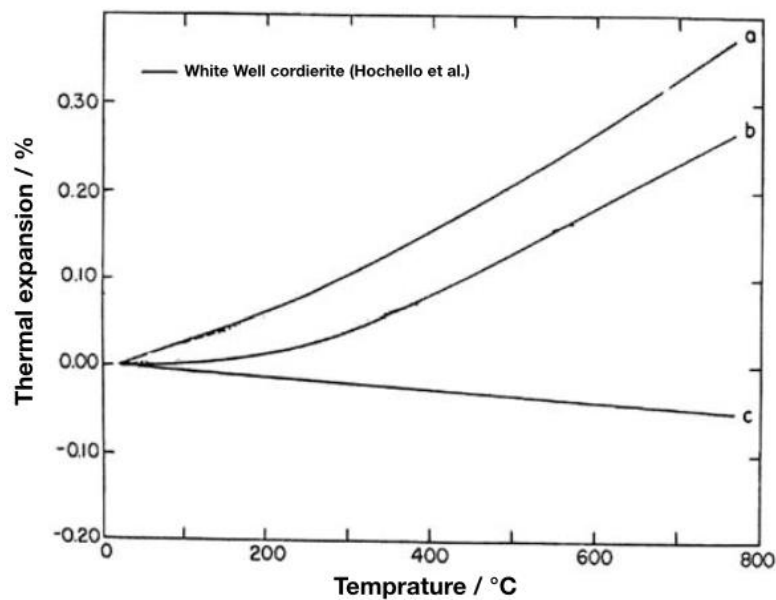


Figura 8 Curvas de expansión térmica típicas de la cordierita

La cordierita es utilizada ampliamente como recubrimiento de hornos de cocción de cerámica debido a sus propiedades refractarias. También tiene aplicaciones avanzadas en aislantes eléctricos, resistores de alto desempeño, soportes de elementos de calentamiento, boquillas de quemadores, aislantes de juntas, hornos con formas especiales, soportes de catalizadores en escapes, filtros, entre otras.

Síntesis de la cordierita

La cordierita —considerada un vidrio cerámico de ingeniería (Ambrosio Mari, 1998)— se puede sintetizar por medio de la quema de materiales cerámicos naturales como arcilla, talco, sílice y alúmina a 1340-1450 °C. Sin embargo, este proceso no entrega cuerpos teóricamente densos, ya que no pueden ser quemados hasta su madurez debido a la excesiva transformación del talco y la arcilla en vidrio y debido a que la cordierita se fusiona a 1460°C para formar mullita (Chowdury a. & G. K., 2007). Los cuerpos con alto contenido de cordierita tienen inevitablemente un pequeño margen de cocción, con el inconveniente de que, si la cocción es a menor temperatura que la apropiada, la cordierita no se desarrolla bien, y si se sobrepasa dicha temperatura, ésta se descompone en mullita y forsterita, ambas con mucho mayor coeficiente de expansión térmica. (De Aza, S & Espinosa de los Monteros, 1967)

Para evitar esto, se puede pre-calcinar una mezcla precursora de cordierita hasta obtener polvos idóneos (talco pre-calcinado y α -alúmina) y después se combina con arcilla. (Chowdury a. & G. K., 2007). Es conveniente también realizar la preparación de cordierita por medio de la adición de los óxidos específicos de magnesio, de silicio y de aluminio, para obtener resultados más confiables a la hora del sinterizado.

La cordierita como soporte del convertidor catalítico automotriz

La investigación en materiales de ingeniería ha tenido avances recientes en la fabricación de soportes monolíticos de cordierita para convertidores catalíticos en formas de panal y en espumas cerámicas. (Chowdury a. & G. K., 2007)

Los monolitos en forma de panal (en inglés *honeycombs*) se usan como soportes de convertidores catalíticos para la remoción de emisiones de gases y de partículas, y para reducir las emisiones de óxidos nitrosos de las plantas de generación de energía. Las espumas cerámicas llaman la atención en la industria de los soportes catalíticos debido a su alta estabilidad térmica, su alta porosidad y la alta tortuosidad de sus superficies respecto de los monolitos en forma de panal. Sin embargo, la tecnología de los monolitos de cordierita de panal sigue vigente y sus procesos de fabricación siguen mejorando. (Chowdury a. & G. K., 2007)

Existen trabajos en los que se evalúa el desempeño de los monolitos cerámicos con recubrimientos de catalizadores heterogéneos en la transformación de las emisiones contaminantes. En el trabajo de Yamuna et al. se prepararon soportes o sustratos de panal y de tipo *pellet* basados en una composición de cordierita a base de caolín, y se monitoreó su eficiencia en la catálisis de emisiones contaminantes de vehículos con motores de dos tiempos. Se reportó una remoción del 78% de monóxido de carbono (CO) y de 82% de hidrocarburos de los gases de escape bajo condiciones de ralentí. (Chowdury a. & G. K., 2007)

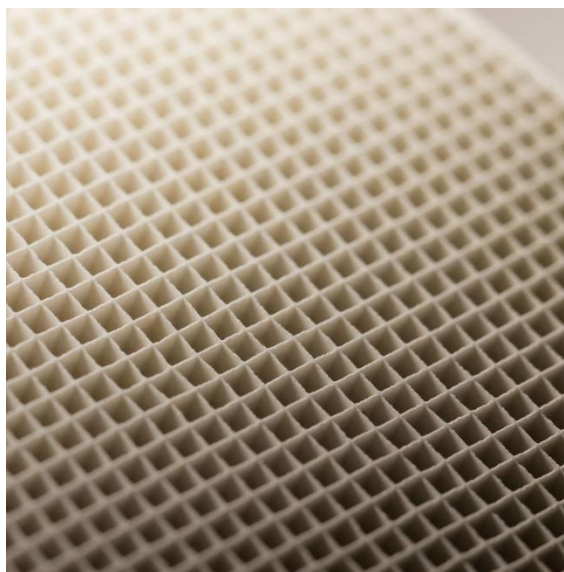


Figura 9 Detalle del aspecto común de las celdas de panal de un monolito cerámico de cordierita. Corning.

Reología de la cordierita

Un monolito cerámico está hecho de materiales que no son extrudables en su estado original, y es necesario alcanzar la extrudabilidad por medio de la incorporación de aditivos que se encargan de influir en la reología o propiedades de flujo de la mezcla obtenida. Los resultados que se tengan en la extrusión de un material cerámico como la cordierita dependen fuertemente de la plasticidad de la mezcla que se extruye. Por lo tanto, es necesario atender el aspecto de la reología del material cerámico a extruir. Las propiedades del material que son importantes en la extrusión pueden ser caracterizadas y cuantificadas por medio de mediciones reológicas. La reometría capilar permite llevar a cabo distintas pruebas de extrudabilidad, que van desde la evaluación de idoneidad, hasta la optimización de procesos y productos por medio de determinaciones complejas de las propiedades de la mezcla. (Händle F., 2009)

Herramientas para el diseño mecánico.

El objetivo de un diseño mecánico es obtener un producto útil que satisfaga las necesidades de un cliente, y además sea seguro, eficiente, confiable, económico y de manufactura práctica. Para poder diseñar una pieza mecánica es necesario conocer el tipo de esfuerzos a los que estará sometida.

Existen varios factores que pueden afectar el desempeño de una pieza mecánica, sin embargo, los principales son la fatiga y el desgaste. La fatiga se refiere al daño estructural debido a numerosos ciclos de carga y descarga, mientras que el desgaste se debe principalmente al roce o fricción entre piezas mecánicas, como por ejemplo los engranes en el interior de una caja de velocidades.

Tipos de esfuerzos

Se puede definir el esfuerzo como la resistencia interna que ofrece la unidad de área de un material contra una carga externa aplicada. Los esfuerzos normales (σ) pueden ser de tensión o de compresión. (L. Mott, 2006)

Una de las metas principales del análisis de esfuerzos es determinar el punto, dentro de un elemento sometido a cargas, que soporta el máximo nivel de esfuerzo. A los esfuerzos de tensión y compresión se les conoce como esfuerzos normales, y se muestran actuando perpendicularmente sobre caras opuestas del elemento, los esfuerzos de tensión tienden a jalar al elemento, mientras que los de compresión tienden a aplastarlo. (L. Mott, 2006)

Los esfuerzos cortantes se deben al cortante directo, al cortante vertical en las vigas o a la torsión. En cada caso, la acción de un elemento sujeto al corte es una tendencia por cortar al elemento, al ejercer un esfuerzo hacia abajo en una cara, y al mismo tiempo se ejerce un esfuerzo hacia arriba sobre la cara paralela opuesta. (L. Mott, 2006)

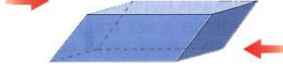
Tipo de esfuerzo			Tipo de deformación
Tensión	Compresión	Cizalla	
			
			
			

Figura 10 Tipos de esfuerzos.

Propiedades de los materiales

Los elementos de máquinas suelen fabricarse con materiales metálicos y/o aleaciones de ellos; es importante conocer los límites de resistencia de cada material. Estos límites de resistencia por lo general se ven reflejados en un típico diagrama esfuerzo vs deformación, donde se distinguen diversos puntos de interés.

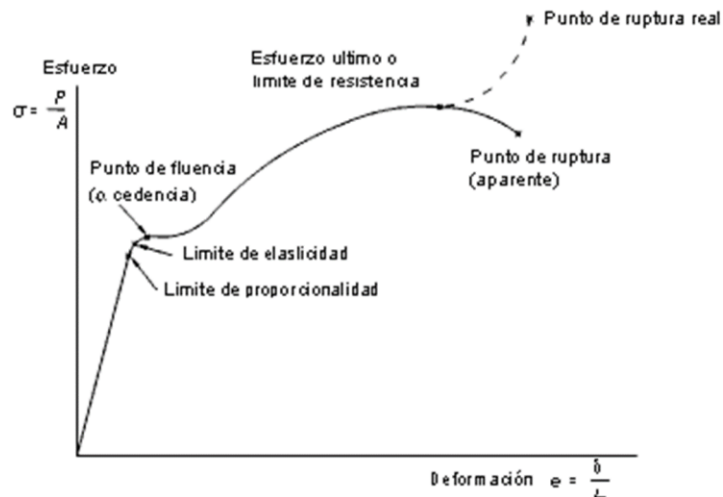


Figura 11 Diagrama esfuerzo vs deformación unitaria, ingenierocivilinfo.com

El límite de proporcionalidad representa una sección recta que obedece la ley de Hooke donde el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria, es decir, regresa al mismo punto de partida al dejar de aplicar la carga externa.

El límite de elasticidad es un punto muy cercano al límite de proporcionalidad, al llegar a este punto la pieza mecánica funciona en estado elástico, sin embargo, al dejar de aplicar la carga la pieza no regresa a su forma original y sufre una pequeña deformación.

El punto de fluencia representa el esfuerzo que genera una deformación plástica, este punto no implica variaciones grandes de esfuerzo, inclusive el esfuerzo puede ser nulo, lo que representa es la cedencia del material o vencimiento debido a la carga.

La resistencia a la tensión o esfuerzo máximo permisible representa el punto máximo antes de que la pieza sufra una fractura debido a una carga a la que está sujeta.

El punto de ruptura como su nombre lo indica es una fractura en el material y debido a la instrumentación se reporta un punto de ruptura aparente donde se toma en cuenta la deformación unitaria sin embargo el real está referido al área de la sección.

Factor de diseño o factor de seguridad.

Se define el factor de diseño como un número mayor a la unidad que nos permite cubrir cierta incertidumbre provocada en un diseño debido a errores en el modelo matemático, a la teoría de falla utilizada o a las características de los materiales utilizados.

El factor de diseño se refiere a la relación entre los esfuerzos máximo permisible y el esfuerzo normal de diseño.

$$n_s = \frac{\sigma_{permisible}}{\sigma_{diseño}}$$

Calcular el factor de diseño se complica cuando no se tienen los parámetros establecidos en normas, por tal motivo se emplean métodos experimentales como por ejemplo el método de Pugsley.

$$n_s = n_{A,B,C} * n_{D,E}$$

Donde:

$n_s \rightarrow$ Factor de diseño

$n_{A,B,C} \rightarrow$ Factor de diseño que involucra las características A, B y C

$n_{D,E} \rightarrow$ Factor de diseño que involucra las características D y E

$A \rightarrow$ Calidad de los materiales.

$B \rightarrow$ Control sobre la carga aplicada.

$C \rightarrow$ Exactitud del análisis de esfuerzo.

$D \rightarrow$ Peligro para el personal.

$E \rightarrow$ Impacto económico.

Tabla 5 Valores para calcular el factor de diseño n .

Característica			B			
			MB	B	R	P
A=MB	C=	MB	1.1	1.3	1.5	1.7
		B	1.2	1.45	1.7	1.95
		R	1.3	1.6	1.9	2.2
		P	1.4	1.75	2.1	2.45
A=B	C=	MB	1.3	1.55	1.8	2.05
		B	1.45	1.75	2.05	2.35
		R	1.6	1.95	2.3	2.65
		P	1.75	2.15	2.55	2.95
A=R	C=	MB	1.5	1.8	2.1	2.4
		B	1.7	2.05	2.4	2.75
		R	1.9	2.3	2.7	3.1
		P	2.1	2.55	3.0	3.45
A=P	C=	MB	1.7	2.05	2.4	2.75
		B	1.95	2.35	2.75	3.25
		R	2.2	2.65	3.1	3.55
		P	2.45	2.95	3.45	3.95
		MB	Muy bien			
		B	Bien			
		R	Regular			
		P	Pobre			

Característica		D		
		NS	S	MS
E	NS	1.0	1.2	1.4
	S	1.0	1.3	1.5
	MS	1.2	1.4	1.6
		NS	No serio	
		S	Serio	
		MS	Muy serio	

Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un material es la capacidad de resistir ciclos de cargas. Si la cantidad de ciclos es infinita, el valor del esfuerzo se llama límite de fatiga, y suele representarse en un diagrama esfuerzo vs ciclos (S-N).

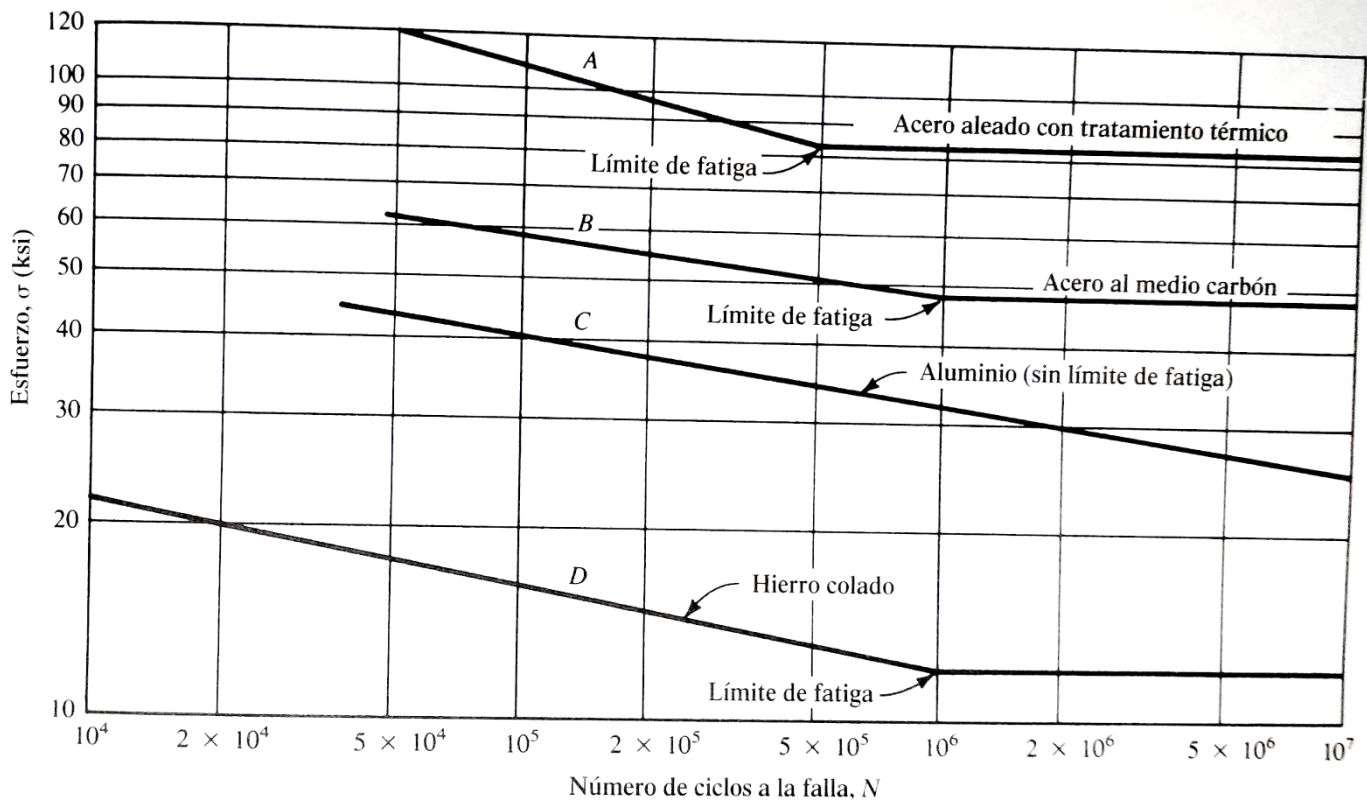


Figura 12 Diagrama S-N Mott.

La resistencia a la fatiga la podemos calcularla como:

$$s_e = 0.5 \text{ (Resistencia a la tension)}$$

Estimación teórica de la resistencia a la fatiga.

En base al elemento que vamos a diseñar y a sus condiciones de trabajo podemos calcular la resistencia a la fatiga teóricamente, así como su ciclo de vida.

Asignamos un esfuerzo a la fatiga de acuerdo con el tipo de material con el que contamos y su resistencia a la tensión.

Acero	Se= 0.5 Sut	Para Sut < 1400 MPa
	Se= 700 MPa	Para Sut ≥ 1400MPa
Hierros	Se= 0.4 Sut	Para Sut < 400 MPa
	Se= 160 MPa	Para Sut ≥ 400 MPa
Aluminio	Se= 0.4 Sut	Para Sut < 330 MPa
	Se= 130 MPa	Para Sut ≥ 330 Mpa
Aleaciones de cobre	Se= 0.4 Sut	Para Sut < 280 Mpa
	Se= 100 MPa	Para Sut ≥ 280 Mpa

Factores de Marin de corrección de la tensión de resistencia a la fatiga.

$$S'_e = K_{Carga} K_{Tamaño} K_{Superficie} K_{Temperatura} K_{Confiabilidad} S_e$$

Efectos de la carga (K_{Carga})

Tipo de Carga	K_{Carga}
Flexión	1.0
Carga axial	0.7
Torsión pura	1.0

Efectos dimensionales ($K_{Tamaño}$)

Cilindros giratorios.

Para diámetros	$K_{Tamaño}$
$d \leq 0.3 \text{ in (8mm)}$	1.0
$0.3 \text{ in} < d \leq 10 \text{ in}$	$0.869 d^{-0.097}$
$8 \text{ mm} < d \leq 250 \text{ mm}$	$1.189 d^{-0.097}$
Para tamaños mayores	0.6

Para piezas con otras formas

$$d_{equivalente} = \sqrt{\frac{A_{95}}{0.0766}}$$

Donde A_{95} es la porción de la sección transversal de una pieza no redonda, que esta esforzada entre el 95% y 100% de su esfuerzo máximo.

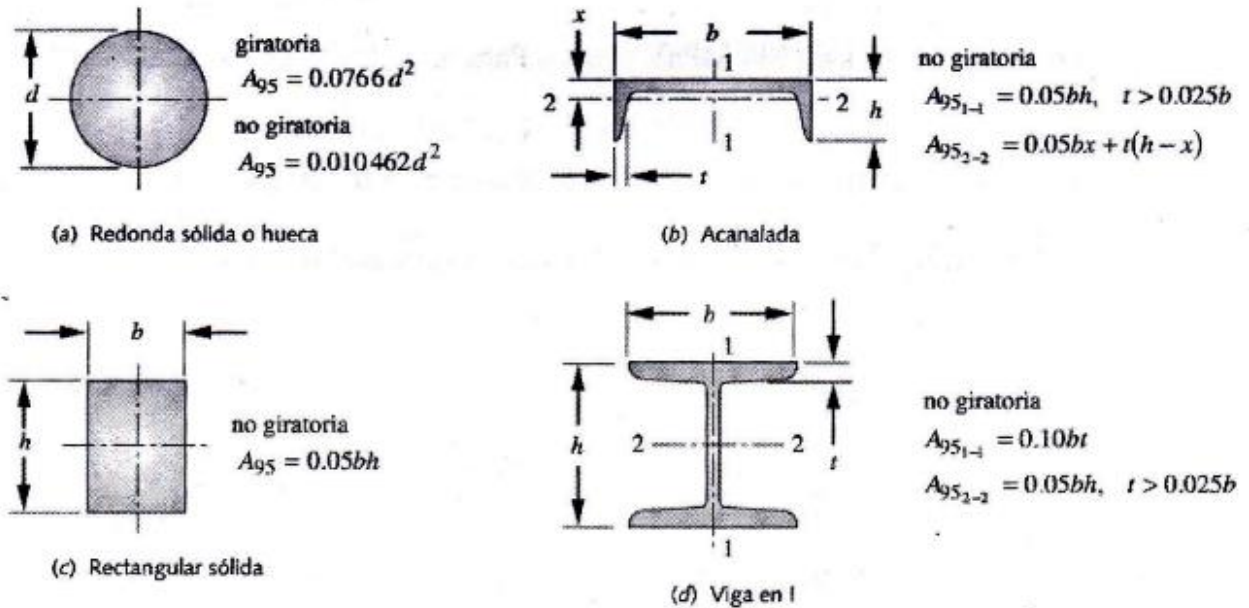


Figura 13 Fórmulas para áreas esforzadas al 95% de diversas secciones, notas Ricardo Yañes 2015.

Efectos superficiales ($K_{Superficie}$)

$$K_{Superficie} = \alpha(Sut)^{\beta}$$

Coeficientes para la ecuación de factor superficial

	Factor α		Exponente β
Acabado superficial	MPa	Ksi	
Rectificado	1.58	1.34	-0.085
Maquinado o estirado en frio	4.51	2.7	-0.265
Rolado en caliente	57.7	14.4	-0.718
Forjado	272	39.9	-0.995

Efecto de la temperatura ($K_{Temperatura}$)

Temperatura	$K_{Temperatura}$
Para $T \leq 450^{\circ}\text{C}$ (850°F)	1.0
$450^{\circ}\text{C} < T \leq 550^{\circ}\text{C}$	$1 - 0.0058(T - 450)$

$850^{\circ}\text{F} < T \leq 1020^{\circ}\text{F}$	$1-0.0032(T-840)$
---	-------------------

Confiabilidad ($K_{\text{Confiabilidad}}$)

El factor de confiabilidad depende de la probabilidad de supervivencia a una tensión en particular.

Confiabilidad %	$K_{\text{Confiabilidad}}$
50	1.0
90	0.897
95	0.868
99	0.814
99.9	0.753
99.99	0.702
99.999	0.659

Estimación teórica del diagrama esfuerzo vs ciclos.

El diagrama de esfuerzos vs ciclos de vida nos permite saber un aproximado de la vida útil de nuestro elemento debido a cargas.

Para calcular la resistencia media que se da a $N=10^3$ ciclos.

Flexión	$S_m = 0.9 S_{ut}$
Carga axial	$S_m = 0.75 S_{ut}$

Ecuación de la línea de S_m a S_e o S_f

$$S_n = aN^b \quad \text{o} \quad \log(S_n) = \log(a) + b \log(N) \text{ lo}$$

Donde:

$S_n \rightarrow$ es la resistencia a la fatiga a cualquier ciclo N

a y b son constantes definidas por las condiciones de frontera.

Para determinar la constante b :

$$b = \frac{1}{z} \log\left(\frac{S_m}{S_e}\right)$$

Donde

$$z \rightarrow \log(N_1) - \log(N_2)$$

Para determinar la constante a :

$$\log(a) = \log(S_m) - b \log(N_1) = \log(S_m) - 3b$$

Donde:

$N_1 \rightarrow$ siempre son 1000 ciclos

Valores típicos de Z

N_2	z
$1E^6$	-3.0
$5E^6$	-3.699
$1E^7$	-4.0
$5E^7$	-4.699
$1E^8$	-5.0
$5E^8$	-5.699
$1E^9$	-6.0
$5E^9$	-6.699

Desarrollo del proyecto

Geometría del dado

El método convencional para fabricar monolitos cerámicos es la extrusión; para obtener estos monolitos conformados, se usan dados de extrusión, que les dan la forma final a los cuerpos de pasta.

La extrusión es el proceso de obtención de longitudes ilimitadas con una sección transversal constante, conformando el material al obligarlo a pasar a través de una boquilla bajo condiciones controladas. (Anguita Delgado, 1977)

El dado que se empleará en este trabajo, debe extruir monolitos en forma de cilindros, dentro de cuyas paredes existen celdas que por lo general tienen una geometría en forma de panal cuadrangular (en inglés *honeycomb*), en la patente (United States Patente nº 0178769 A1, 2006) se proponen celdas en forma cuadrada.

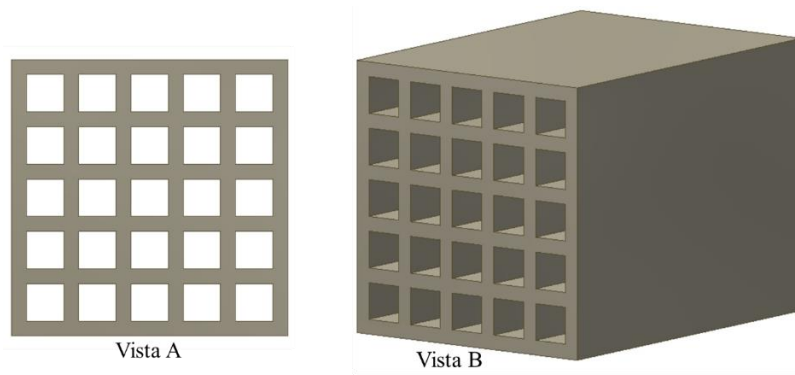


Figura 14 Vista frontal (A) y vista isométrica (B) del monolito de cordierita.

Para poder extruir las paredes de las celdas se utilizan orificios de alimentación circulares colocados de manera paralela al canal de alimentación principal. Existen varias maneras de repartir los orificios de alimentación; la finalidad es extruir homogéneamente las paredes de las celdas.

En la patente (Europa Patente nº EP 0083850, 1987), se propone que los canales de alimentación estén centrados en cada vértice formado por las paredes del monolito (Arreglo A) esto con la finalidad de repartir uniformemente la mezcla, por otro lado, en la patente (United States Patente nº 0178769 A1, 2006), se propone que los canales de alimentación estén de igual forma en la intersección de las paredes, sin embargo, el arreglo de los canales es diferente, logrando un arreglo tipo escalera (Arreglo B).

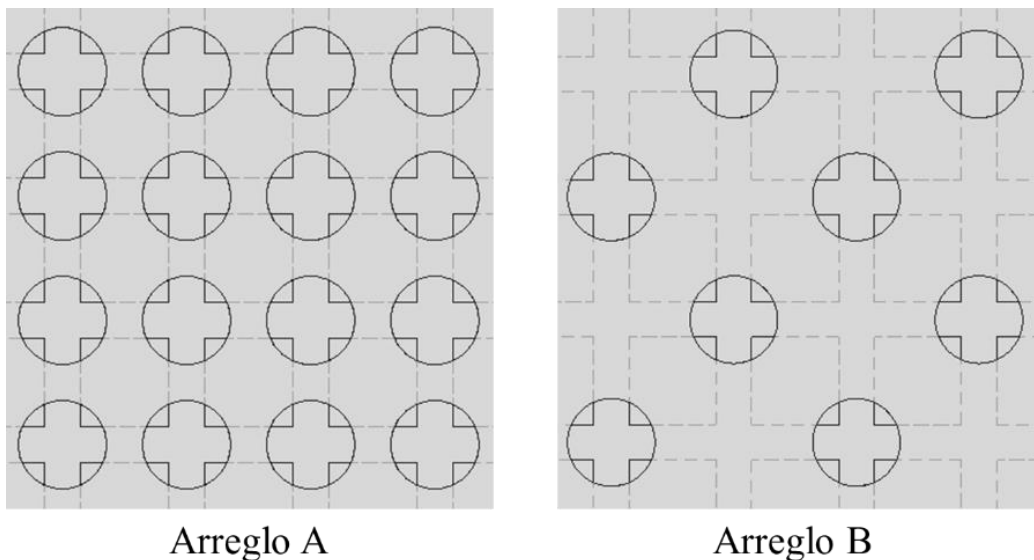


Figura 15 Arreglos en los canales de alimentación.

En los dos arreglos propuestos anteriormente se puede notar la diferencia de áreas, el arreglo B tiene aproximadamente 33% más área que el arreglo A.

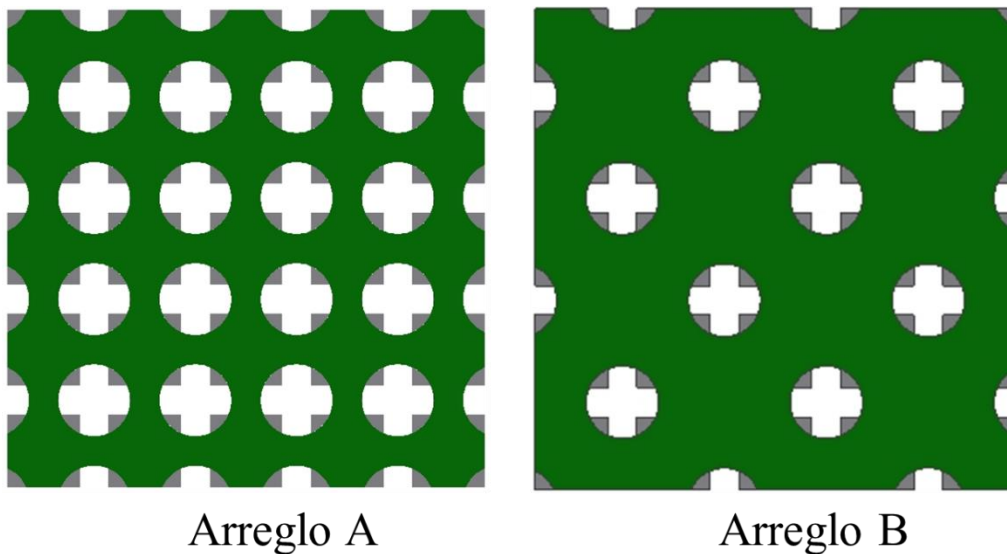


Figura 16 Área de contacto con la presión.

Para la fabricación del dado se toma como referencia la patente (United States Patente nº 0178769 A1, 2006) que hace alusión a modificaciones en los orificios de alimentación mencionados en la patente (United States Patente nº US, 5,066,215, 1991), en el diseño se muestra canales de alimentación en forma de círculos con un arreglo tipo escalera.

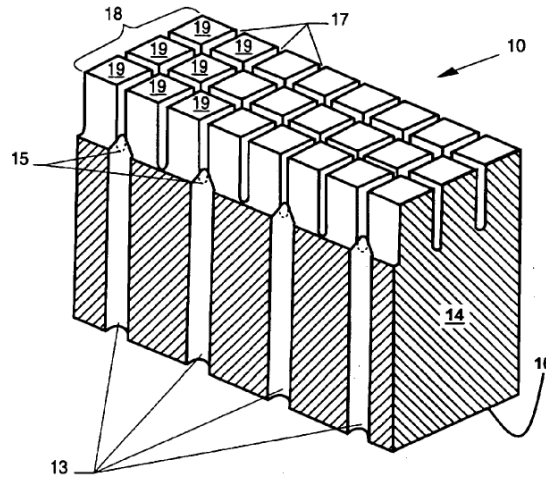


Figura 17 Estructura interna del dado de extrusión, (Patente US 0178769)

Los monolitos cuentan con una densidad de 15 a 90 celdas por centímetro cuadrado (100-600 CPSI), esto se logra gracias a las delgadas paredes de cada celda que pueden llegar a tener un espesor de 0.0065 pulgadas e incluso menores (se tiene conocimiento de sustratos con paredes ultradelgadas de hasta 0.002 pulgadas. (Corning incorporated, 2005) para poner en contexto los números anteriores, el espesor de la pared (ϵ_p) es de aproximadamente la mitad del diámetro de una típica mina de grafito utilizada en un portaminas.

El área transversal a través de la que los gases fluirán está conformada por el espesor de la celda (ϵ_c); esto representa de 50% a 80% del área abierta en un monolito. (Corning, 2018)

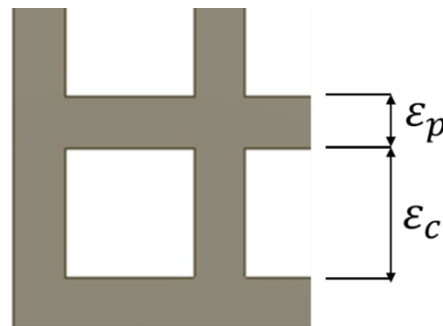


Figura 18 Características dimensionales del monolito.

Suponiendo un cuadrado con una dimensión de una pulgada (25.4mm) en cada lado, podemos seccionar un lado con un cierto número de celdas (n), de esta manera podemos calcular las paredes de cada sección ($n-1$). Conociendo el espesor de la pared se puede calcular el espesor de cada celda y así obtener la influencia directa del área abierta y el perímetro (que demarca el área axial) que entra en contacto con los gases.

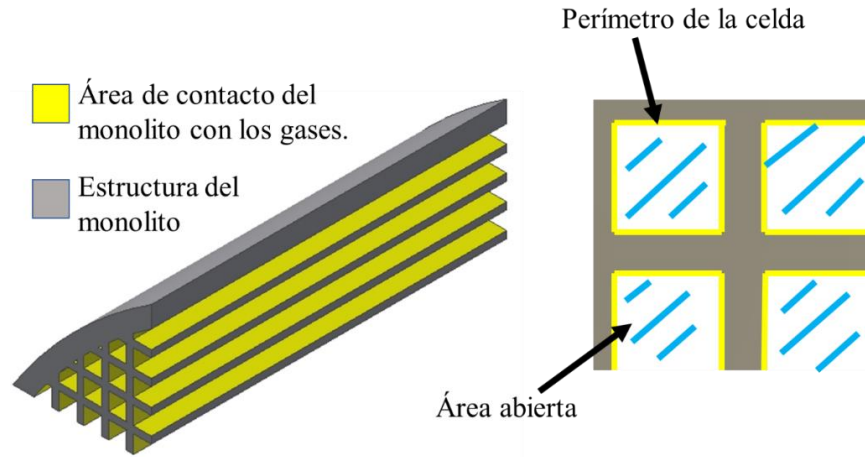


Figura 19 Tipos de área en un monolito.

$$\varepsilon_c = \frac{25.4mm - (n - 1) * \varepsilon_p}{n}$$

Para calcular el porcentaje de área abierta se requiere conocer la densidad de celdas multiplicada por el área de cada celda y dividiendo el producto en una pulgada cuadrada.

$$\%A_a = \frac{(n * \varepsilon_c)^2}{(25.4mm)^2} \times 100$$

Para calcular el área de contacto con los gases multiplicamos el perímetro que suman todas las celdas por el largo del monolito, que para esta fabricación se conseguirán monolitos con una dimensión de 10cm de largo.

$$A_c = n^2 * 4\varepsilon_c * l$$

En la siguiente tabla podemos observar cómo cambian los valores de espesor de cada celda, así como el área de contacto con los gases; esto es de suma importancia.

Tabla 6 Dimensiones del monolito con un espesor de pared de 0.25mm

ε_p	0.25mm	[mm]		[mm ²]
n	CPSI	ε_c	$\%A_a$	A_c
15	225	1.46	74.34	131400
16	256	1.353125	72.65	138560
17	289	1.25882353	70.98	145520
18	324	1.175	69.34	152280
19	361	1.1	67.71	158840

20	400	1.0325	66.10	165200
21	441	0.97142857	64.50	171360
22	484	0.91590909	62.93	177320
23	529	0.86521739	61.38	183080
24	576	0.81875	59.85	188640
25	625	0.776	58.34	194000

Para seleccionar la densidad de celdas deseadas, debemos tomar en cuenta las dimensiones que resultan, y así escoger el mejor proceso de manufactura y el tipo de materiales involucrados.

Uno de los principales obstáculos es generar las paredes tan delgadas, por tal motivo se dedicó tiempo a investigar qué procesos de manufactura podríamos utilizar. Fue así como se eligió el proceso de electroerosión por hilo, que se explicará más adelante; en los talleres de manufactura por electroerosión visitados, se nos informó que el espesor de pared más delgado que podíamos lograr maquinar era de 0.4mm. Esto nos llevó a proponer que los espesores de las celdas cambiaran respecto de lo mostrado en la tabla anterior y se decidió diseñar el dado con una densidad de 324 CPSI. Este valor de la densidad de celdas cumple con la restricción de espesor de pared, que en el dado se verá reflejada como el espesor de la ranura.

Tabla 7 Dimensión del monolito con un espesor de pared de 0.4mm

ε_p	0.4mm	[mm]		[mm ²]
n	CPSI	ε_c	% A_a	A_c
15	225	1.32	60.77	118800
16	256	1.2125	58.34	124160
17	289	1.11764706	55.96	129200
18	324	1.03333333	53.62	133920
19	361	0.95789474	51.34	138320
20	400	0.89	49.11	142400
21	441	0.82857143	46.93	146160
22	484	0.77272727	44.80	149600
23	529	0.72173913	42.71	152720
24	576	0.675	40.68	155520
25	625	0.632	38.69	158000

La geometría del dado contempla los aspectos de montaje a la extrusora, así como la geometría del monolito que debe extruir, los principales aspectos se pueden contemplar en la siguiente imagen.

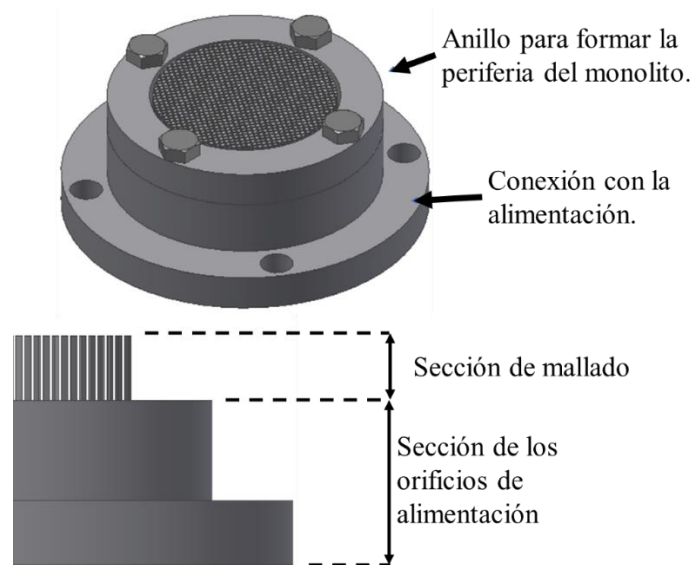


Figura 20 Secciones del dado

Fuerzas involucradas en el dado.

Se necesita saber el tipo de esfuerzos que debe resistir el dado y es necesario conocer bajo qué fuerzas mecánicas está trabajando el dado a causa de una extrusión de cordierita.

En el siguiente esquema podemos observar de una manera simplificada el comportamiento de la extrusora; el rodete o pistón (según sea el caso) proporcionan una fuerza P utilizada para mover el material a extruir dentro de la cámara, obligándolo a pasar por el dado con una presión menor llamada presión de entrada (P_e), el dado debe resistir la presión P_e a la que es sometido sin llegar a la deformación, ya que esto ocasionaría imperfecciones en los canales del monolito.

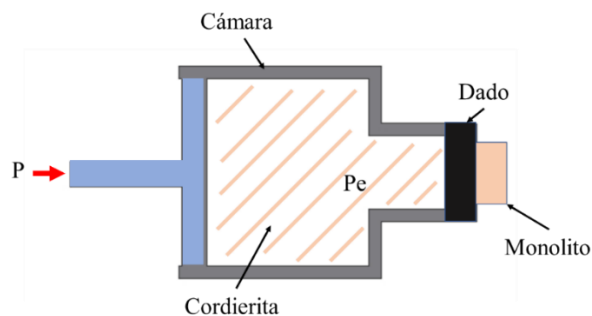


Figura 21 Esquema del proceso de extrusión.

La presión de entrada P_e se puede simplificar como una fuerza F equivalente, aplicada en el centroide de la circunferencia por donde pasa la cordierita causando reacciones en la conexión entre la extrusora y el dado.

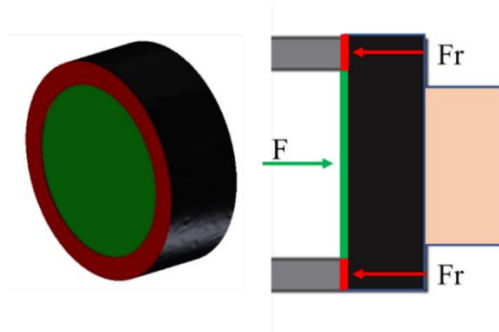


Figura 22 Fuerzas involucradas en el dado.

El esfuerzo cortante directo se produce cuando la fuerza aplicada tiende a cortar al elemento como si fuera unas tijeras, o cuando se usa un troquel para perforar una lámina.

$$\tau = \frac{F}{A_s}$$

Donde:

$\tau \rightarrow$ Esfuerzo cortante

$F \rightarrow$ Fuerza

$A_s \rightarrow$ Área sujeta al esfuerzo cortante

El área del dado que estará en contacto con la presión suministrada es de suma importancia ya que esto ocasiona alteraciones en la cantidad de esfuerzo axial que debe soportar la pieza, entre mayor área de contacto tenga la fuerza con el dado, menor será el esfuerzo que debe soportar.

$$\sigma = \frac{F}{A_n}$$

Donde:

$\sigma \rightarrow$ Esfuerzo axial

$F \rightarrow$ Fuerza $A_n \rightarrow$ Área normal

Calculo del factor de diseño basados en el método de Pugsley.

$$n_s = n_{A,B,C} * n_{D,E}$$

Donde:

$n_s \rightarrow$ Factor de diseño

$n_{A,B,C} \rightarrow$ Factor de diseño que involucra las características A, B y C

$n_{D,E} \rightarrow$ Factor de diseño que involucra las características D y E

$A \rightarrow$ Calidad de los materiales. Le asignamos la letra B debido a que el acero empleado no presenta imperfecciones superficiales.

$B \rightarrow$ Control sobre la carga aplicada. Al control le asignamos la letra R ya que no contamos con una regulación de velocidad en el rodete de la extrusora.

$C \rightarrow$ Exactitud del análisis de esfuerzo. Se le asigna R ya que no existe evidencia sobre la regulación.

$D \rightarrow$ Peligro para el personal. Se le asigna NS ya que no está en peligro ningún tipo de vida.

$E \rightarrow$ Impacto económico. Se le asigna S ya que es una inversión de una sola persona.

Usando la tabla de Pugsley y sustituyendo valores obtenemos un factor de diseño:

$$n_s = n_{A,B,C} * n_{D,E} = 2.3 * 1 = 2.3$$

Parámetros de trabajo.

El dado estará conformado en forma cilíndrica con un diámetro aproximado de 2 pulgadas (restringido por el tamaño de la extrusora). Para tomar una idea del tamaño total del dado se usó la patente (Europa Patente nº EP 0083850, 1987) como referencia.

Para la extrusión de material cerámico como lo es la cordierita se requieren presiones que están dentro del rango de 1 a 2 MPa, tomados del informe *Rheological studies on cordierite honeycomb extrusion*. (Nath Das, Madhusoodana, & Okada , 2002)

Debido a que la mezcla precursora de cordierita contiene cantidades de agua (lo cual lo hace un compuesto corrosivo) el material que se empleará en la elaboración del dado es acero inoxidable.

De acuerdo con las normas AISI ² las propiedades del acero inoxidable AISI 304 el límite de fluencia es de 241 MPa. Es importante conocer este esfuerzo para colocarnos dentro de la zona elástica de un material en un diagrama esfuerzo vs deformación, puesto que si rebasamos este límite la pieza sufrirá una deformación permanente debido a la carga aplicada.

El mayor esfuerzo al que estará sometido el dado es en el área conformada por la periferia circunferencial y la profundidad de los canales de alimentación. A continuación, se muestra de una manera visual la estructura del dado.

² American Iron and Steel Institute (Instituto americano del hierro y el acero)

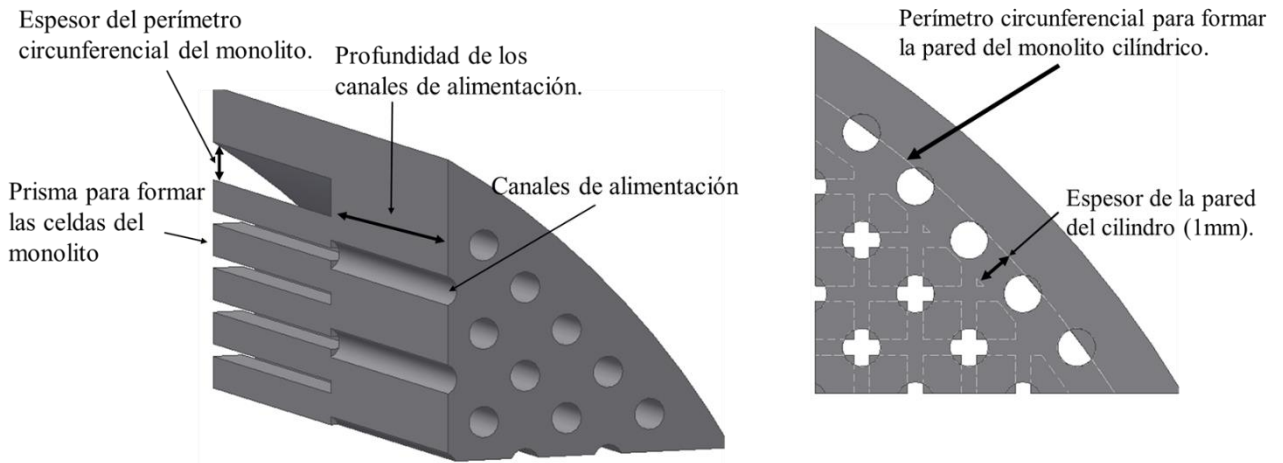


Figura 23 Principales partes que conforman al dado de extrusión.

Como se puede observar a continuación el área no está completamente regida por el perímetro circunferencial del monolito, esta sección interrumpida representa alrededor de un 75% ³ del perímetro total.

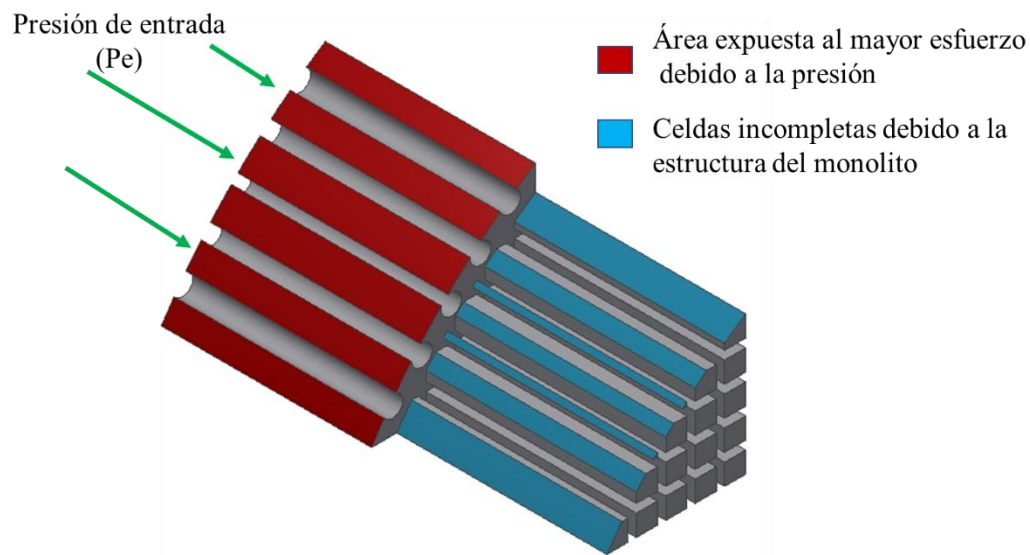


Figura 24 Área de mayor esfuerzo (esfuerzo cortante).

La fuerza la podemos calcular del siguiente despeje:

$$F = P \cdot A$$

³ Cálculo hecho a partir de una sección radial de 15° cartesianos de una circunferencia de 52mm.

Considerando que el área de extrusión está constituida por una circunferencia con un diámetro de 52mm:

$$A_n = \frac{\pi d^2}{4} \rightarrow \frac{\pi (0.052m)^2}{4} = 0.002123m^2$$

$$F = 2MPa * 0.002123 m^2 = 4.247KN$$

Para saber la longitud mínima que deben de tener los canales de alimentación se calcula el área expuesta al corte sin sobrepasar el límite de fluencia y ocupando el factor de diseño n_s .

$$A_s = \frac{n_s F}{\sigma_c}$$

Donde $\sigma_c \rightarrow$ Esfuerzo a la fluencia del material

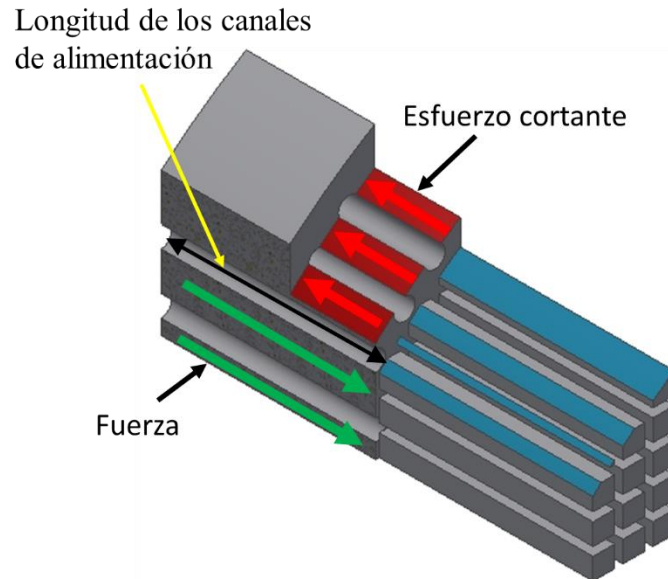


Figura 25 Esfuerzo cortante actuando sobre el dado.

$$A_s = \pi * d * l \rightarrow A_s = (\pi) * (0.75)(0.052m) * l$$

Donde: $l \rightarrow$ Longitud de los canales de alimentación.

Entonces podemos calcular la longitud mínima que debe de tener el canal de alimentación para estar dentro de la zona elástica.

$$l = \frac{n_s F}{\sigma_c * 0.75 * \pi * d}$$

$$l_{min} = \frac{2.3 * 4.247 \text{ KN}}{(241 \text{ MPa}) * (0.75) * \pi * 0.052 \text{ m}} = 3.308 \times 10^{-4} \text{ m} \rightarrow 330 \mu\text{m}$$

La longitud mínima resulta ser muy pequeña puesto que conocemos la longitud mínima podemos proponer la longitud de los canales mayor a medio milímetro y estaríamos dentro de la zona elástica.

Corrección del esfuerzo a la fatiga.

Calculo de S_e

$$S_e = 0.5 (241 \text{ MPa}) = 120.5 \text{ MPa}$$

Efecto de la carga (K_{carga})

Tipo de Carga	K_{carga}
Flexión	1.0
Carga axial	0.7
Torsión pura	1.0

El dado estará expuesto a una carga axial, por lo tanto:

$$K_{carga} = 0.7$$

Efecto dimensional ($K_{Tamaño}$)

Considerando una longitud en los canales igual a 25.4mm y un 75% de la circunferencia de 52mm

Ocupamos la opción c para calcular el área esforzada al 95%.

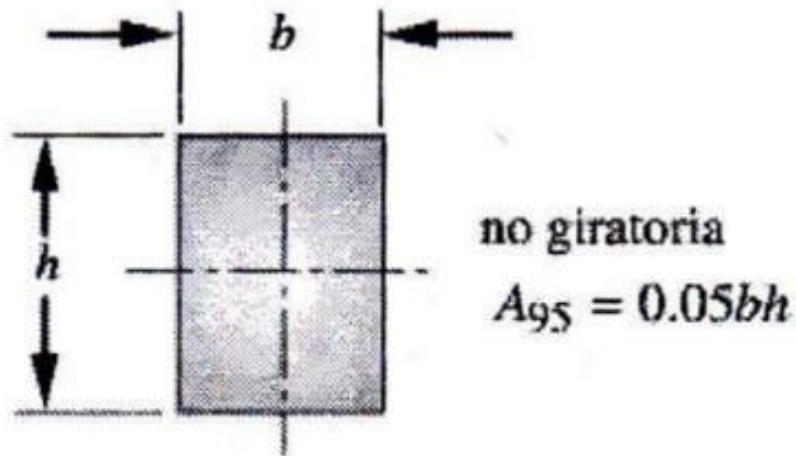


Figura 26 Área esforzada al 95% de una sección rectangular sólida.

$$A_{95} = 0.05(.75 * \pi * 52mm) (25.4mm) = 155.60$$

$$d_{equivalente} = \sqrt{\frac{155.60}{0.0766}} = 45.07mm.$$

Para diámetros	$K_{Tamaño}$
$d \leq 0.3 in (8mm)$	1.0
$0.3 in < d \leq 10in$	$0.869 d^{-0.097}$
$8mm < d \leq 250mm$	$1.189 d^{-0.097}$
Para tamaños mayores	0.6

$$K_{Tamaño} = 0.6$$

Efectos superficiales ($K_{Superficie}$)

$$K_{Superficie} = \alpha(Sut)^\beta$$

Coeficientes para la ecuación de factor superficial

	Factor α		Exponente β
Acabado superficial	MPa	Ksi	
Rectificado	1.58	1.34	-0.085
Maquinado o estirado en frio	4.51	2.7	-0.265
Rolado en caliente	57.7	14.4	-0.718
Forjado	272	39.9	-0.995

El proceso de maquinado es rectificado, por lo tanto:

$$K_{Superficie} = 1.58(140MPa)^{-0.085} = 1.038$$

Efecto de la temperatura ($K_{Temperatura}$)

Temperatura	$K_{Temperatura}$
Para $T \leq 450^{\circ}C$ ($850^{\circ}F$)	1.0
$450^{\circ}C < T \leq 550^{\circ}C$	$1-0.0058(T-450)$
$850^{\circ}F < T \leq 1020^{\circ}F$	$1-0.0032(T-840)$

La temperatura no rebasara los $450^{\circ}C$, por lo tanto:

$$K_{Temperatura} = 1$$

Confiabilidad ($K_{Confiabilidad}$)

El factor de confiabilidad depende de la probidad de supervivencia a una tensión en particular.

Confiabilidad %	$K_{Confiabilidad}$
50	1.0
90	0.897
95	0.868
99	0.814
99.9	0.753
99.99	0.702
99.999	0.659

Con una confiabilidad del 99.9%

$$K_{Confiabilidad} = 0.753$$

Ahora calculamos el valor de fatiga teórico:

$$S'_e = K_{Carga}K_{Tamaño}K_{Superficie}K_{Temperatura}K_{Confiabilidad}S_e$$

$$S'_e = 0.7 * 0.6 * 1.038 * 1 * 0.753 * 120.5MPa = 39.557MPa$$

Estimación del diagrama esfuerzo vs ciclos.

Para calcular la resistencia media que se da a $N=10^3$ ciclos.

Flexión	$S_m = 0.9 S_{ut}$
Carga axial	$S_m = 0.75 S_{ut}$

El dado está sometido a una carga axial, por lo tanto:

$$S_m = 0.75 (240MPa) = 180MPa$$

Ecuación de la línea de S_m a S_e o S_f

$$S_n = aN^b \quad o \quad \log(S_n) = \log(a) + b \log(N)$$

Donde:

$S_n \rightarrow$ es la resistencia a la fatiga a cualquier ciclo N

a y b son constantes definidas por las condiciones de frontera.

Para determinar la constante b :

$$b = \frac{1}{z} \log\left(\frac{S_m}{S_e}\right)$$

Donde

$$z \rightarrow \log(N_1) - \log(N_2)$$

Determinado Z en base a la tabla para valores típicos de z con ciclos igual a $1E^6$ resulta $Z = -3$

Determinamos b :

$$b = \frac{1}{-3} \log\left(\frac{180MPa}{39.5MPa}\right) = -0.2195$$

Para determinar la constante a :

$$\log(a) = \log(S_m) - b \log(N_1) = \log(S_m) - 3b$$

Donde:

$N_1 \rightarrow$ siempre son 1000 ciclos

$$\log(a) = \log(180MPa) - 3(-0.2195) = 2.9137$$

$$a = 10^{2.9137} = 819.78$$

Entonces:

S_n es el esfuerzo cortante al que está sometido y lo podemos calcular como:

$$S_n = \frac{F}{A} \rightarrow S_n = \frac{4.247KN}{\pi * (0.052mm) * (0.75) * (0.0254)} = 1.364MPa$$

Para calcular los ciclos de vida debido al esfuerzo aplicado:

$$\log(1.364) = \log(819.78) - 0.2195 \log(N)$$

$$\log(N) = \frac{\log(1.364) - \log(819.78)}{-0.2195} = 12.66$$

Es decir, la pieza bajo el mayor esfuerzo cortante tendrá una vida útil de:

$$N = 10^{12.66} \text{ ciclos}$$

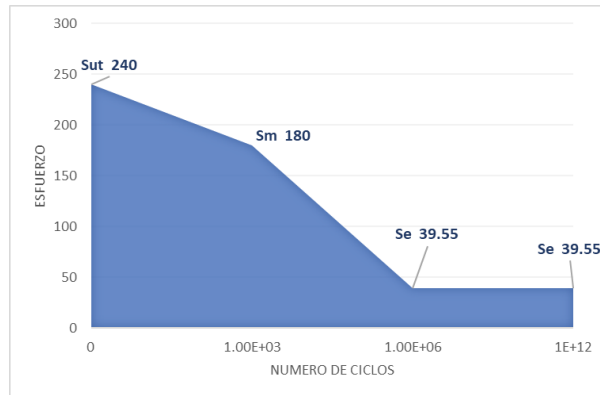


Figura 27 Diagrama esfuerzo vs ciclos del dado.

Acoplamiento extrusora – dado.

El proceso para la obtención de monolitos cerámicos es mediante la extrusión axial. En la UAM, unidad Iztapalapa, en el “Laboratorio de Catálisis y Materiales Avanzados” a cargo del Dr. Gustavo A. Fuentes Zurita, se cuenta con una extrusora radial de fricción viscosa compuesta por un solo tornillo; para unir el dado con la extrusora se requiere de un acoplamiento que favorezca el flujo axial al transportar la cordierita.

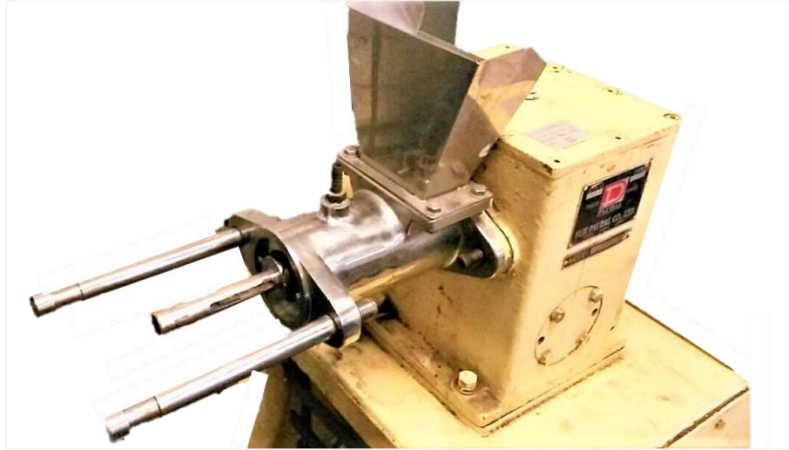


Figura 28 Extrusora FUJI PAUDAL Modelo: EXK-1.

El acoplamiento también estará hecho de acero AISI 304. Dicho acoplamiento requerirá de un elemento retenedor que restrinja las fuerzas desarrolladas en sentido axial que se desarrollan dentro de la cámara de acumulación y que se transfieren a la región de extrusión del dado. La geometría de dicho acoplamiento está delimitada a su vez por la construcción geométrica de la extrusora, ya que debe embonar con el tramo de descarga y deberá montarse en un par de barras laterales con las que cuenta la extrusora para sostener el conjunto acoplamiento-dado-retenedor, esto nos lleva a diseñar el acoplamiento de la siguiente manera:

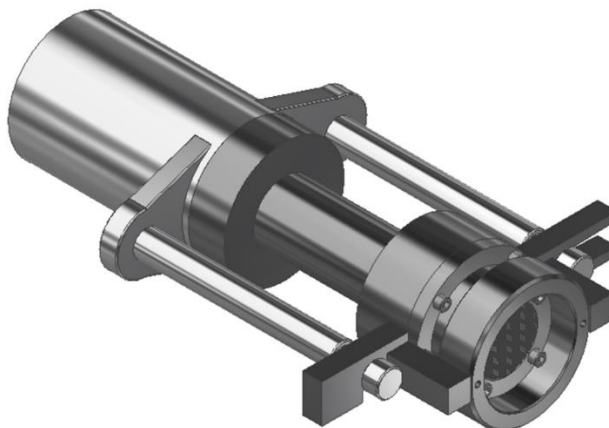


Figura 29 Acoplamiento dado - extrusora

Manufactura de las piezas.

La manufactura es la transformación de materiales a través de procesos que le agregan valor y utilidad a una materia prima. En la fabricación del dado se decidió usar el acero inoxidable debido a que el material a extruir presenta humedad que podría llegar a alterar la geometría del dado, también es necesario considerar la dureza del material, ya que estará sometido a un flujo abrasivo, debido a las necesidades consideramos usar el acero AISI 304, ya que es uno de los más comunes, y cumple con las principales características descritas con anterioridad.

Para poder manufacturar las geometrías circulares partimos de un bloque circular cortándolo con una sierra de cinta horizontal aplicando refrigerante de corte, con dimensiones cercanas a las mencionadas en los dibujos A-1, A-3, D-1, D-2 y R-1.

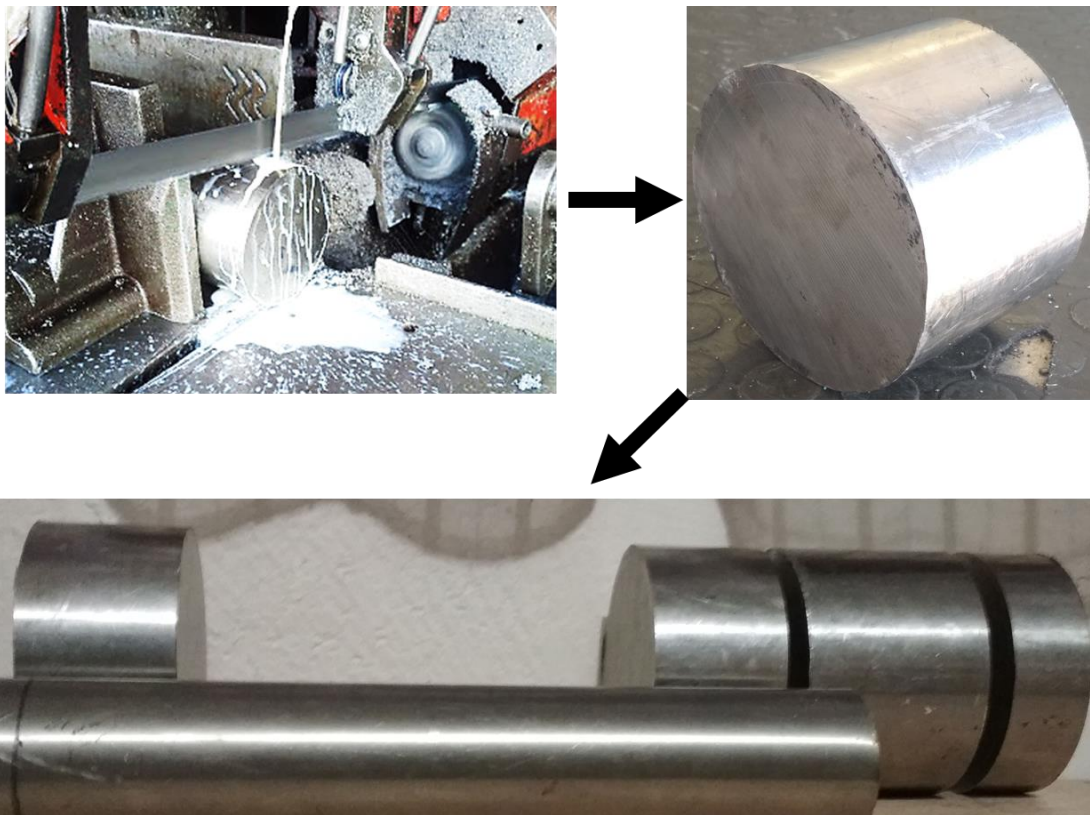


Figura 30 Corte de los bloques.

Torneado

El torneado tiene como objetivo maquinar partes cuya forma es básicamente redonda, existen varias formas de maquinado con el torno como las que se muestran a continuación. (Kalpakjian & R. Schmid, 2014)

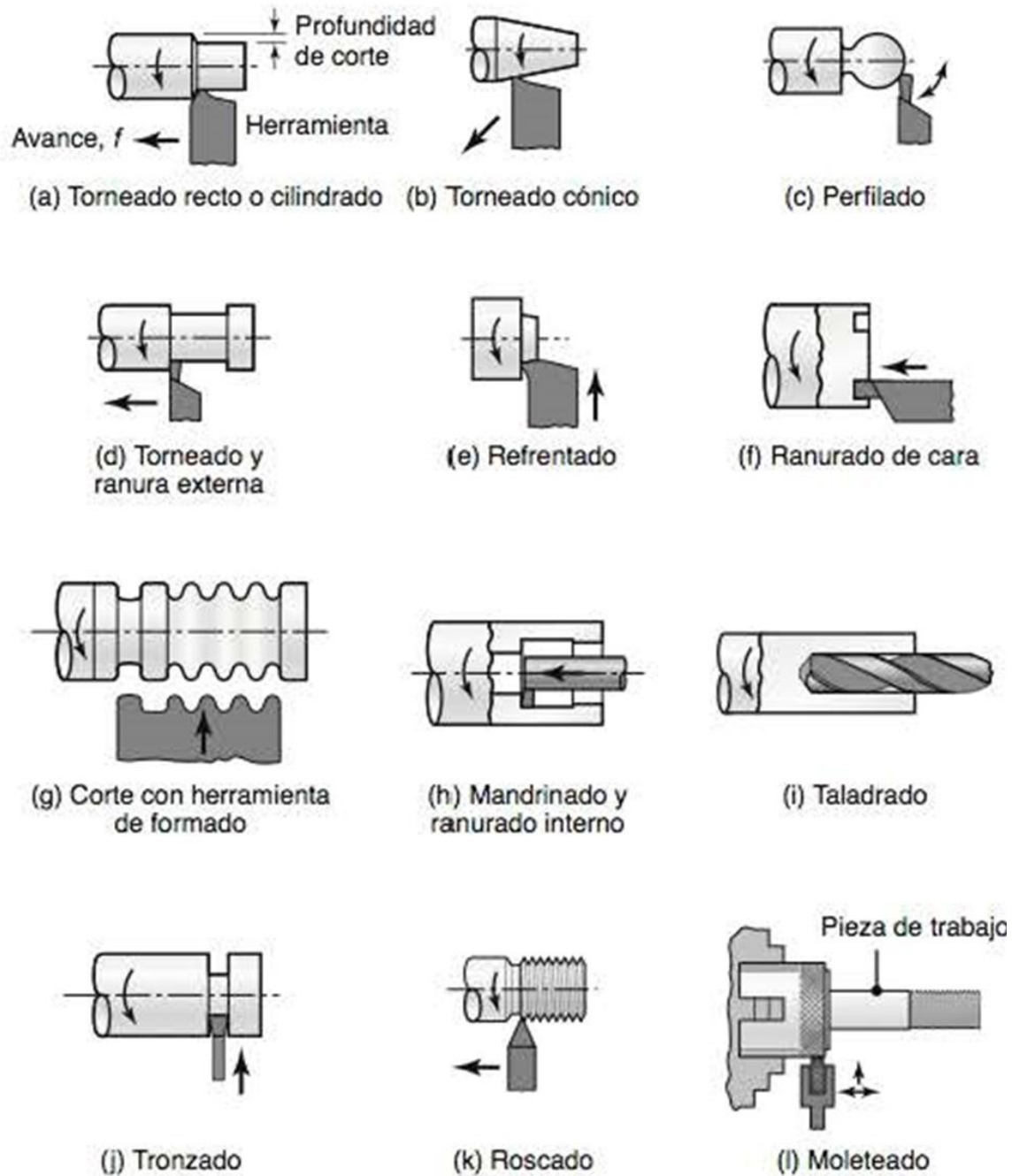


Figura 31 Torneado y producción de orificios, kalpakjian.

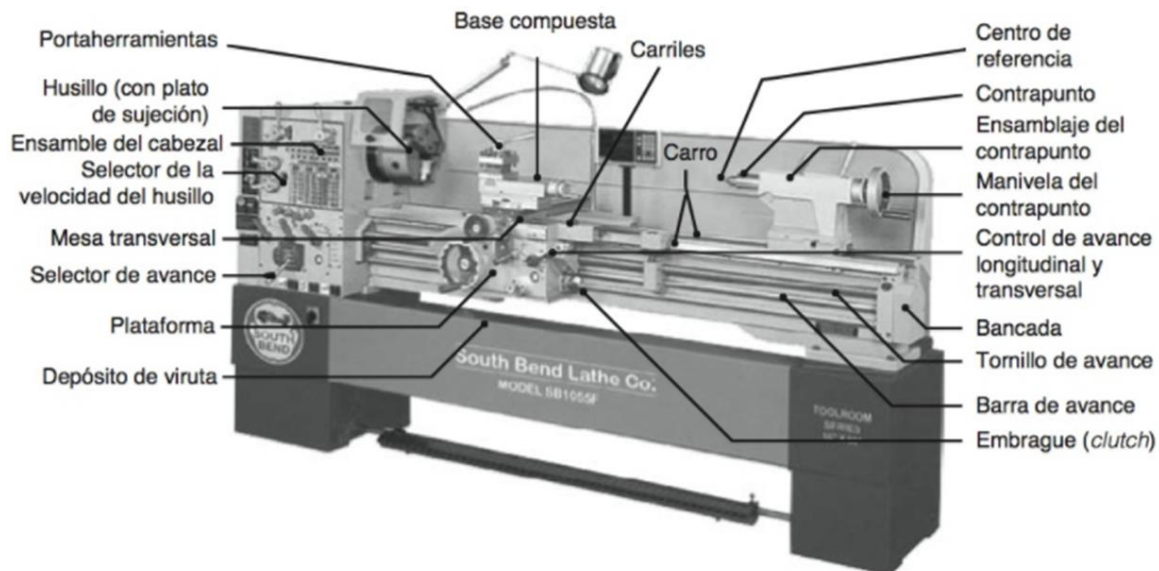


Figura 32 Principales partes de un torno, kalpakjian.

Para maquinar las geometrías de los dibujos A-1, A-3, D-1, D-2 y R-1, fue necesario el uso del torno, acompañado de un porta-insertos MI-JNR- 123 con insertos de carburo de tungsteno y carburo de titanio modelo SP-4036 como herramienta de corte, se decidió usar los insertos en vez del buril, ya que el buril presenta un mayor desgaste y debido a esto debemos afilarlo con una piedra, que suma tiempo a la manufactura, además de que deja acabados más ásperos en la superficie, comparado con los insertos los cuales no es necesario afilar y dejan un mejor acabado en el material.



Figura 33 Porta-insertos e insertos.

En el maquinado con el torno Lux-Matter 1660l se usó una velocidad de rotación de 600 RPM con una velocidad de corte a 0.250mm/rev aplicando refrigerante para minimizar el aumento de la temperatura debido a la fricción del desbaste.

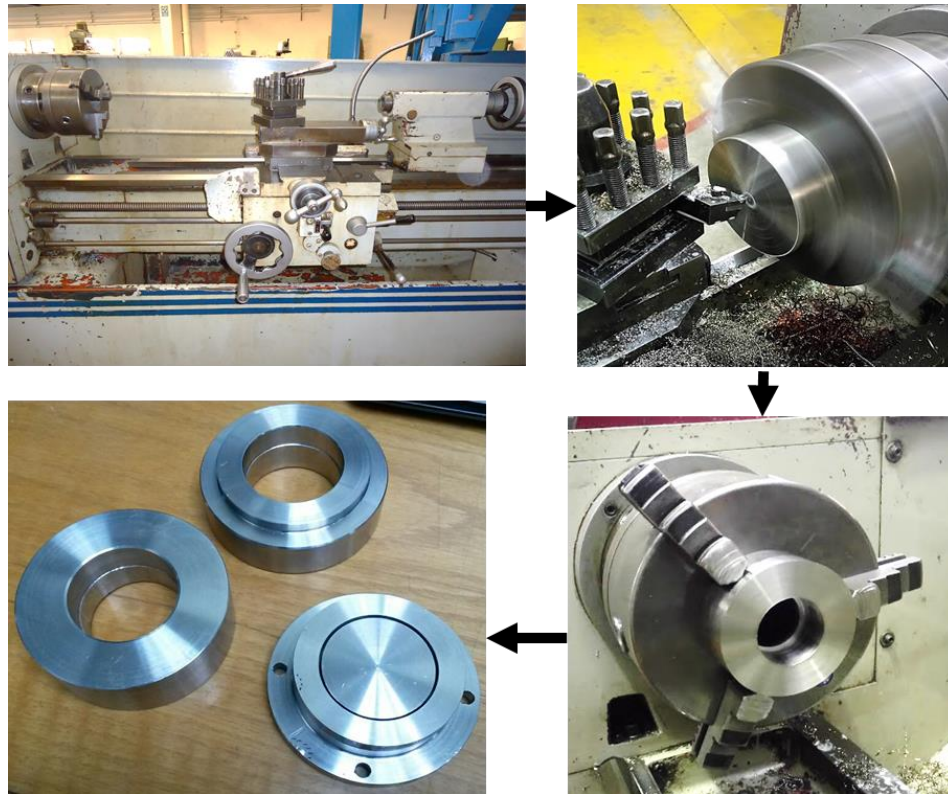


Figura 34 Proceso de torneado, UAM-Azc.

Taladrado

En la unión de piezas se usan por lo general tornillos, remaches, pernos, etc. En la unión del dado se pretende usar tornillos, los cuales facilitan el transporte del equipo y limpieza de estos. Surge la necesidad de producir orificios con ayuda de un taladro de banco y brocas.

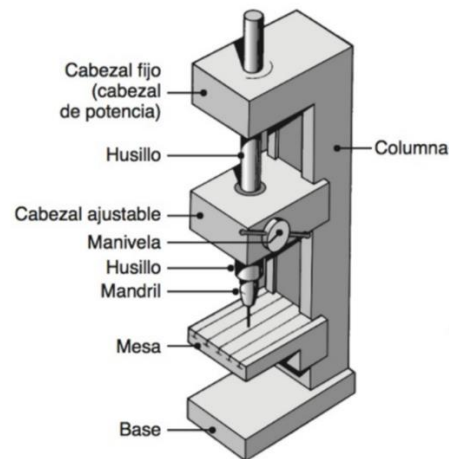


Figura 35 Principales partes de un taladro de un taladro de banco, kalpakjian.

Para producir los orificios se usaron brocas de 17/64 pulg y de 5 mm , para el paso del tornillo y el machuelo respectivamente en las piezas A-3, D-1, D-2 y R-1 con ayuda de la fresadora Birmingham modelo BPS-1649 a una velocidad de 340 RPM y un ángulo perpendicular a la superficie.

En la pieza A-1, se realizaron dos orificios con una broca de 9mm de acuerdo con lo establecido en el dibujo.



Figura 36 Proceso de barrenado, UAM Azc.

Machueleado

Un machuelo es una herramienta de roscado que produce viruta mediante múltiples dientes de corte, aplicando un par de torsión sobre el machuelo ya sea manualmente o con maquinaria con un avance controlado.

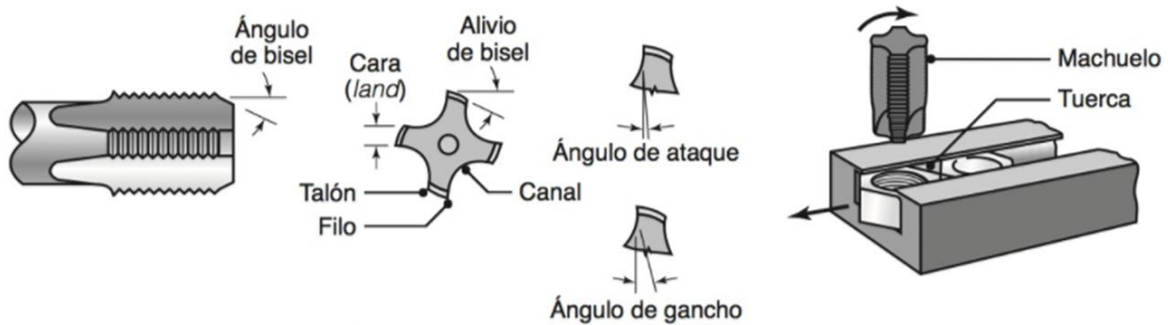


Figura 37 Principales partes de un machuelo, kalpakjian.

Las piezas A-3, D-1 y R-1 se sometieron a este proceso con el machuelo M6 X 1 , aplicando un torque manual con ayuda de una fresadora para asegurar la perpendicularidad con la superficie, además de lubricante para facilitar el recorrido y prolongar la vida útil del machuelo.



Figura 38 Machueleado de la pieza D-1

Fresado

El fresado es un proceso que combina los movimientos rotativos de la herramienta de corte con avance en los distintos ejes de la pieza, logrando geometrías complejas.

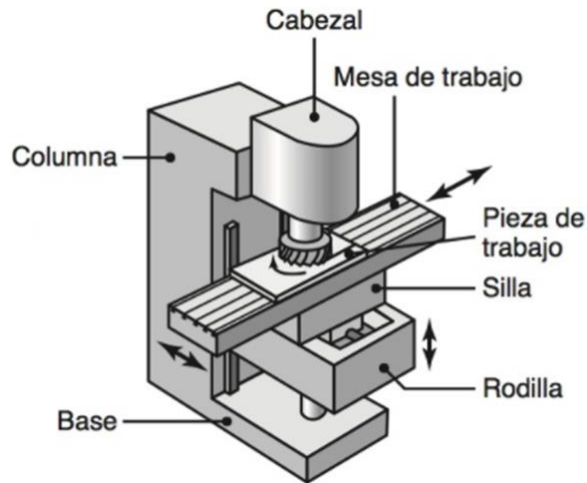


Figura 39 Principales partes de una fresadora vertical, kalpakjian.

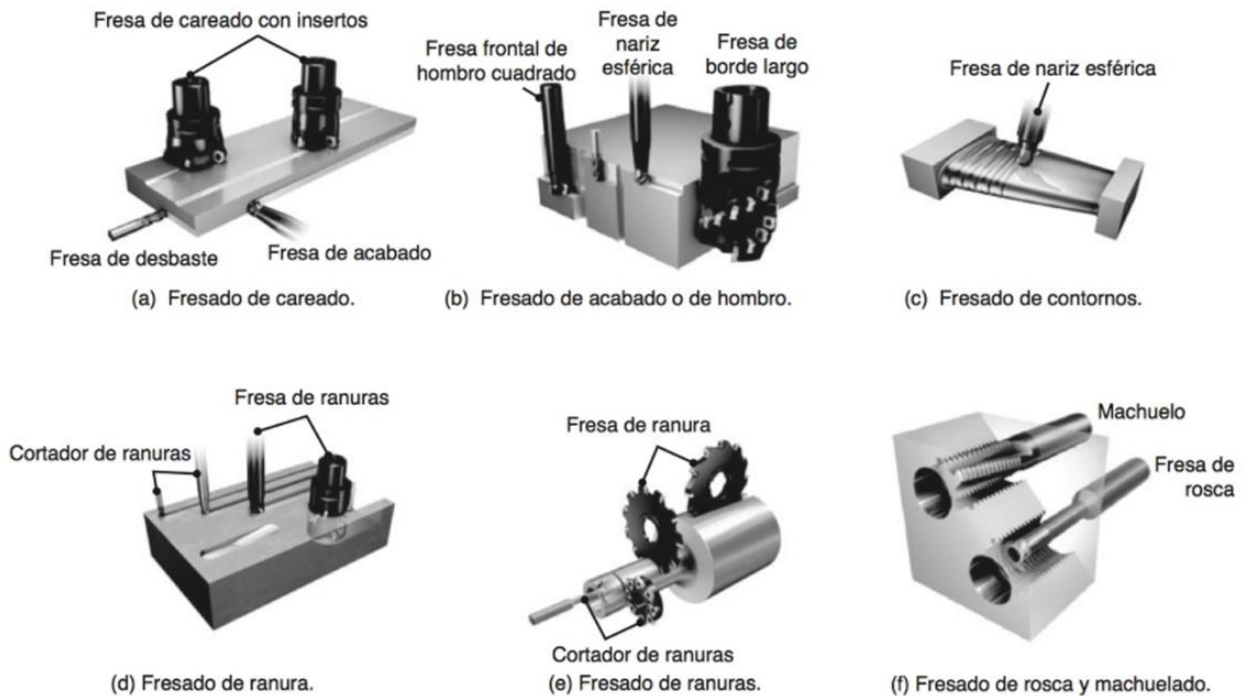


Figura 40 Operaciones de fresado, kalpakjian.

Para manufacturar las piezas R-2, R-3 y R-4 se aplicó fresado frontal y refrentado usando una broca para fresado de 20 mm a una velocidad de 600 rpm con ayuda de refrigerante de corte.



Figura 41 Proceso de fresado.

Electroerosionado

El sistema básico del maquinado por descarga eléctrica consiste en un electrodo y la pieza de trabajo conectada a una fuente de corriente directa, situada en un fluido dieléctrico. Cuando la diferencia de potencial entre la herramienta y la pieza de trabajo es suficientemente alta, se rompe la resistencia del dieléctrico y se descarga una chispa momentánea a través del fluido, lo que remueve una cantidad muy pequeña de metal de la superficie de la pieza de trabajo. La descarga del condensador se repite de manera continua entre 200 y 500 kHz, con voltajes en el rango general de 50 a 380 V y corrientes de 0.1 a 500 A. El volumen de material removido por descarga es común que esté en el rango de 10^{-6} a 10^{-4} mm³. (Kalpakjian & R. Schmid, 2014)

La electroerosión por penetración consiste en la remoción de material con ayuda de un electrodo cuyo avance está controlado para mantener una distancia constante entre la pieza y el electrodo.

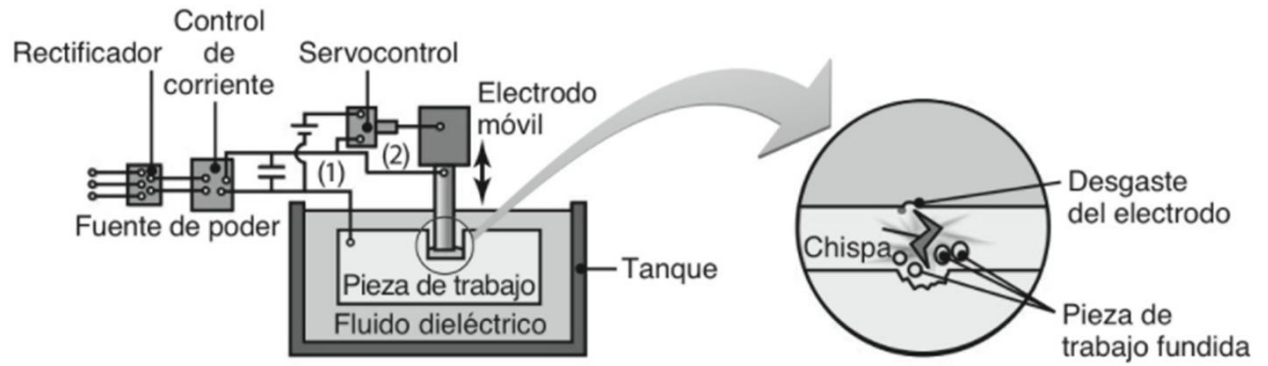


Figura 42 Electroerosión por penetración, Kalpakjian.

Este proceso se usó para crear los orificios de alimentación del dado con un diámetro de 1 mm y profundidad de 25.4 mm.

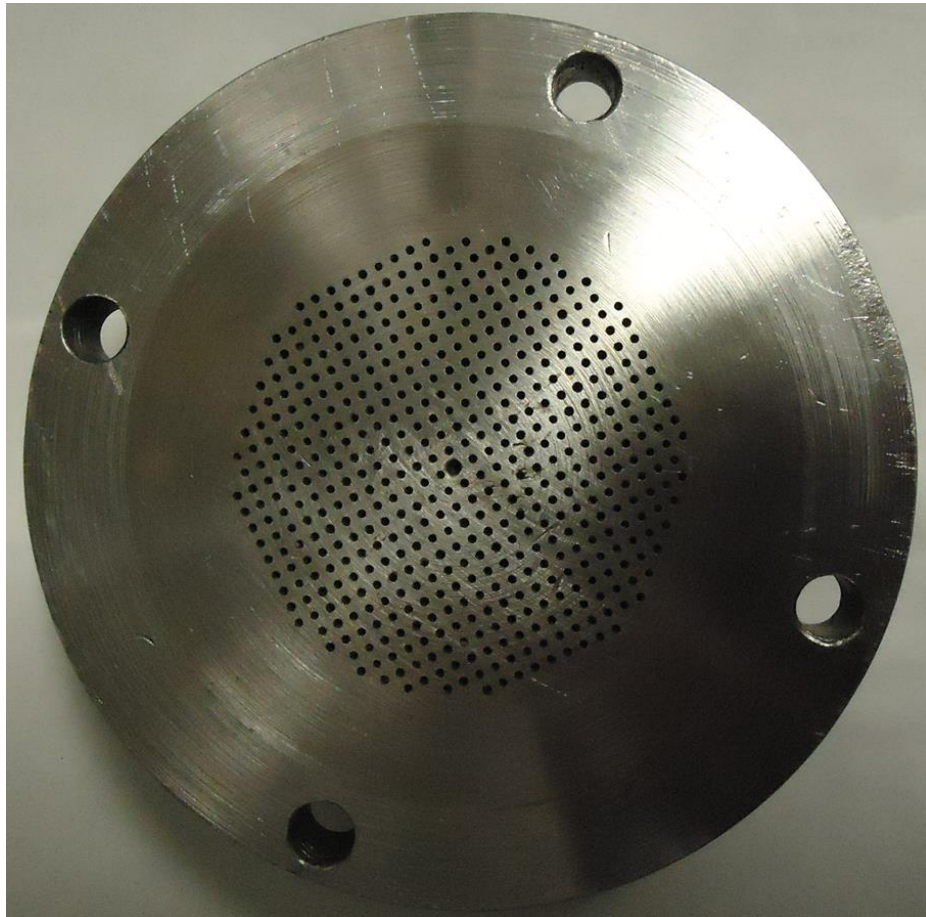


Figura 43 Orificios de alimentación, manufacturado por el proveedor Hilomatrix.

La electroerosión por hilo es un proceso parecido al corte de contorno que se hace con una sierra de cinta, en el cual un cable que se mueve con lentitud y recorre una trayectoria prescrita para cortar la pieza.

El alambre suele estar hecho de latón, cobre, tungsteno o molibdeno; también se usan alambres con recubrimientos de zinc o latón, recubrimientos múltiples y núcleos de acero. El diámetro del alambre por lo general es de alrededor de 0.30 mm (0.012 pulg) para cortes de desbaste y de 0.20 mm (0.008 pulg) para cortes de acabado. El alambre debe tener una conductividad eléctrica elevada y resistencia a la tensión, ya que es común que alcance 60% de su resistencia a la tensión. (Kalpakjian & R. Schmid, 2014)

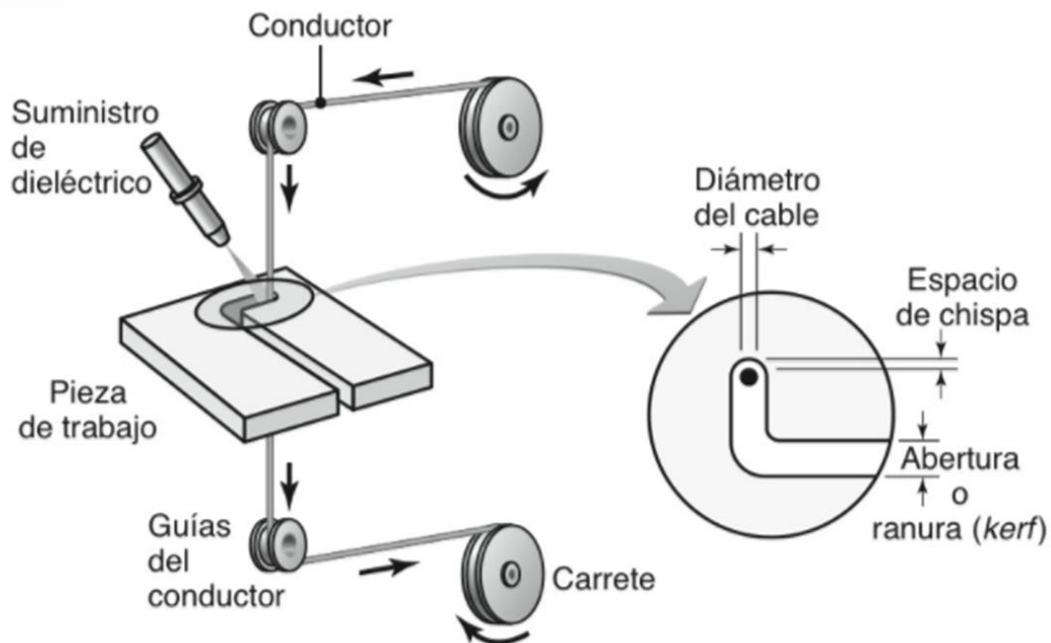


Figura 44 Electroerosión por hilo, Kalpakjian.

Este proceso de manufactura no convencional se implementó para conseguir las ranuras del dado con un espesor de 0.4 mm y una profundidad de 10 mm. para este proceso fue necesario crear una pieza cuadrangular (pieza S-1 fabricada de aluminio) que, al ser ensamblado con el dado, trabajó como soporte de sujeción del dado en la máquina de electroerosión.

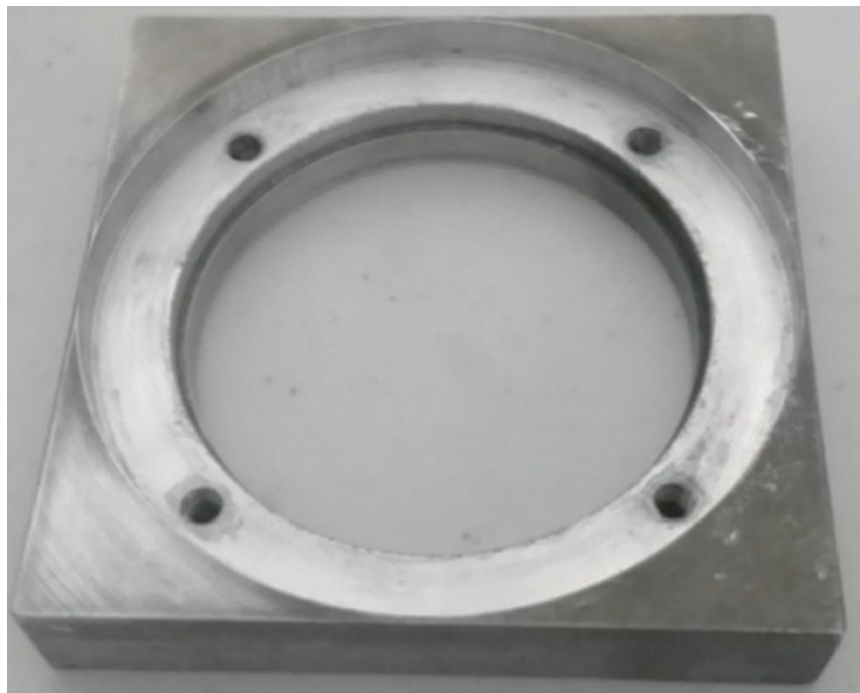
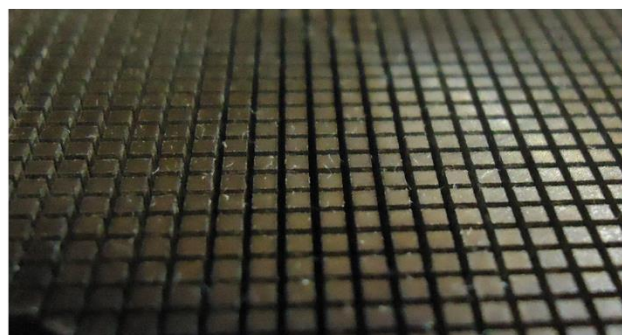


Figura 45 Soporte del dado para el proceso de electroerosión.



a



b

Figura 46 a) Geometría del dado, b) Ranuras del dado.

Soldadura

En la soldadura por arco de gas tungsteno, el metal de aporte es suministrado por un alambre de aporte. Debido a que el electrodo de tungsteno no se consume en esta operación, se mantiene una brecha constante y estable en el arco en un nivel constante de corriente. Los metales de aporte son similares a los metales por soldarse, no se usa fundente. El gas protector por lo general es argón o helio, o una mezcla de ambos. (Kalpakjian & R. Schmid, 2014)

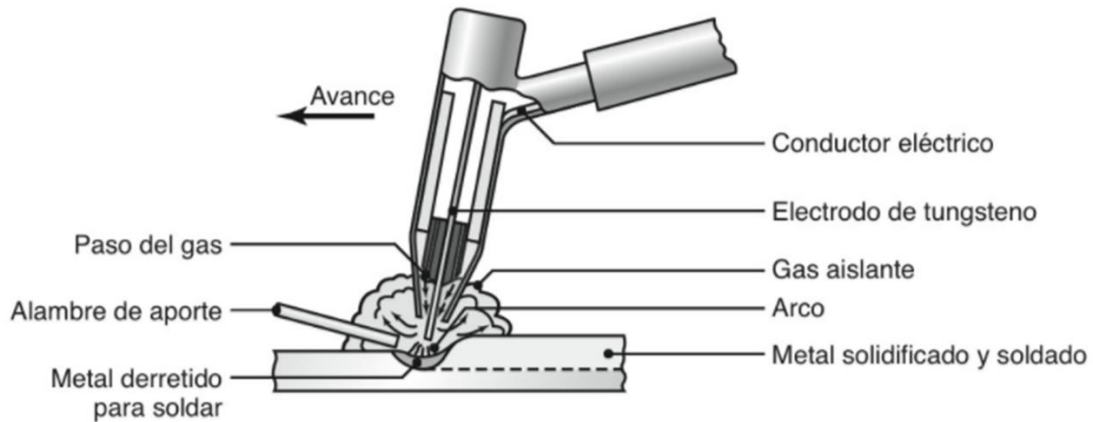


Figura 47 Proceso de soldado por arco de gas, kalpakjian.

La soldadura se usó en la unión de las piezas que conforman el acoplamiento (A-1, A-2 y A-3) y las que conforman la retención (R-1, R-2, R-3 y R-4) empleando acero AISI-304 como material de aporte con gas argón.



a



b

Figura 48 a) Retención del dado b) Acoplamiento extrusora-dado.

Resultados

La extrusora está diseñada para extruir radialmente y producir *pellets*, que tienen distintas aplicaciones, entre ellas procesos catalíticos.

Al hacer la prueba con el arreglo para el que fue fabricada, y usando la pasta con la mezcla seleccionada de compuestos precursores, cuyos porcentajes se anexan en la siguiente tabla, obtuvimos *pellets* tipo “fideo”.

Tabla 8 Porcentaje de los componentes empleados en la mezcla precursora de cordierita

Componente	Porcentaje en masa
MgO	13%
Al ₂ O ₃	36%
SiO ₂	48%
Methylcelulosa	2%
Alcohol polivinílico	1%
H ₂ O	70%



Figura 49 Ensamble de cedazo para flujo radial para la obtención de filamentos tipo "fideo"

Al colocar y probar el dado extrusor de monolitos, la presión en el interior de la cámara de acumulación fue insuficiente, y no fue posible extruir monolitos de la pasta empleada. Esto se puede deber a dos factores principales; la alta viscosidad de la pasta y la baja presión generada por la extrusora en sentido axial, siendo el segundo factor la variable susceptible de control.

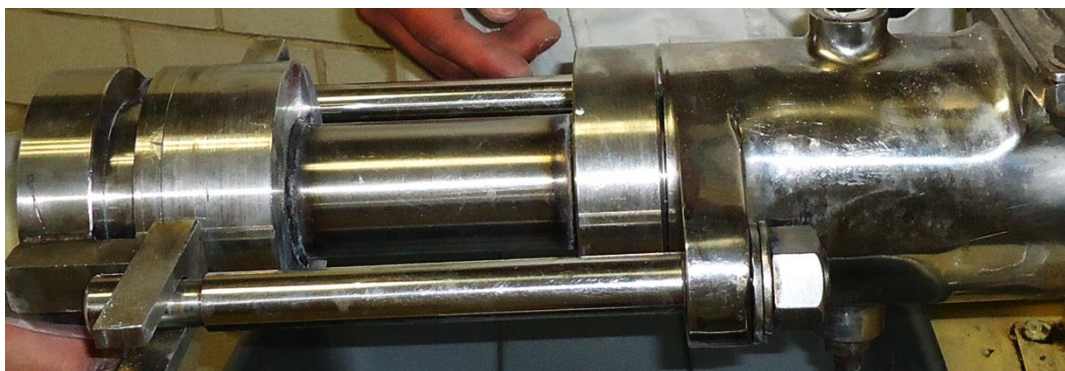


Figura 50 Ensamble del dado para la obtención de monolitos.

Análisis y discusión de resultados

El siguiente esquema representa el flujo resultante de la pasta dentro de la extrusora, e indica el trayecto que debe recorrer ésta para llegar al dado. Se observa el decremento gradual de los valles en el husillo, provocando un menor flujo axial en la pasta para movilizarla y cubrir la distancia requerida.

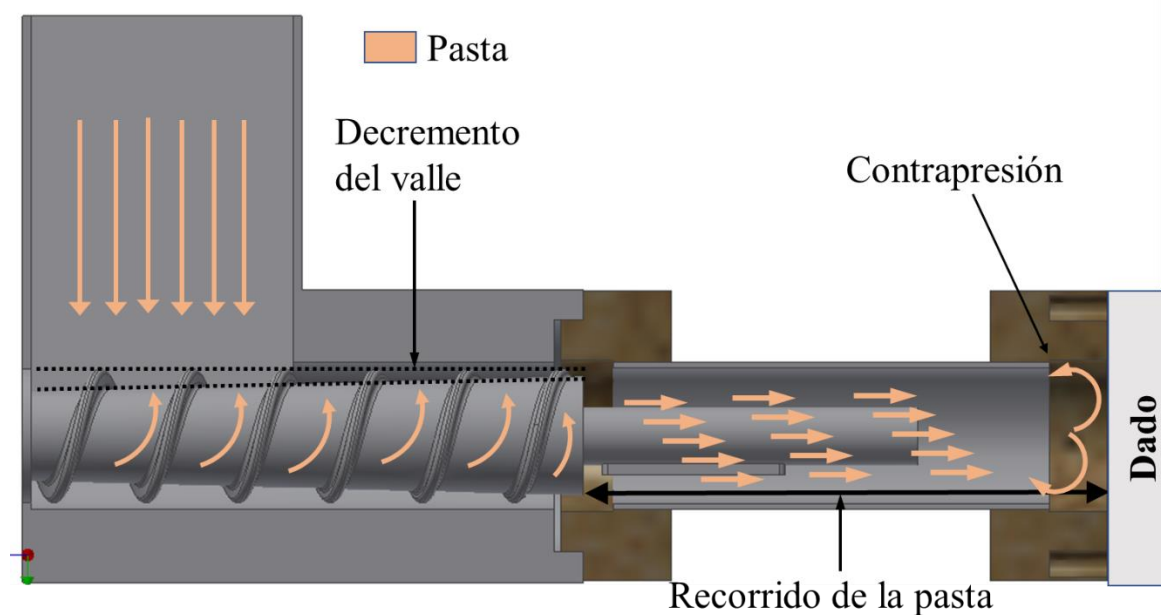
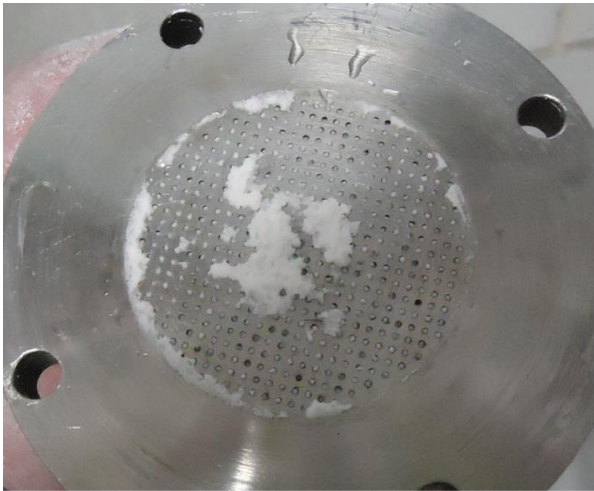


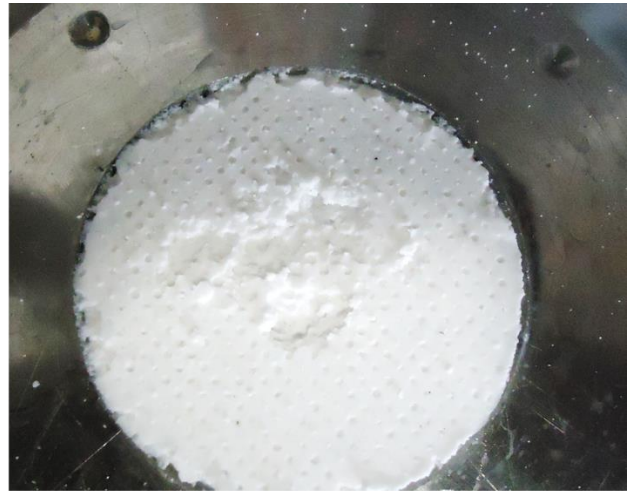
Figura 51 Esquema de la extrusión de pasta con el dado para monolitos.

En la siguiente imagen podemos observar el dado (A) obstruido por la pasta, sin dejar que esta fluya por los canales de alimentación del dado. Por otra parte, podemos observar la cámara de alimentación (B), a través de la cual la pasta hizo por completo su recorrido, pero debido a la reducción en el área de flujo por los orificios del dado, ocurrió una contrapresión que no permite el flujo de la pasta a través de mismo.

el



A



B

Figura 52 Desmontaje del dado para su observación; (A) dado con los orificios de alimentación obstruidos, (B) canal de alimentación del acoplamiento.

Conclusión

Una posible solución a esto es diseñar un husillo nuevo con un mayor valle o acoplar un husillo con un juego reducido al acumulador, lo cual incrementará la presión en el sentido axial y reducirá la contrapresión generada por el dado. La ventaja de acoplar un husillo es un menor costo de manufactura, comparado con la otra alternativa, que es diseñar y construir un nuevo husillo de mayor longitud, que se instalaría desde el tren de potencia de la máquina de extrusión.

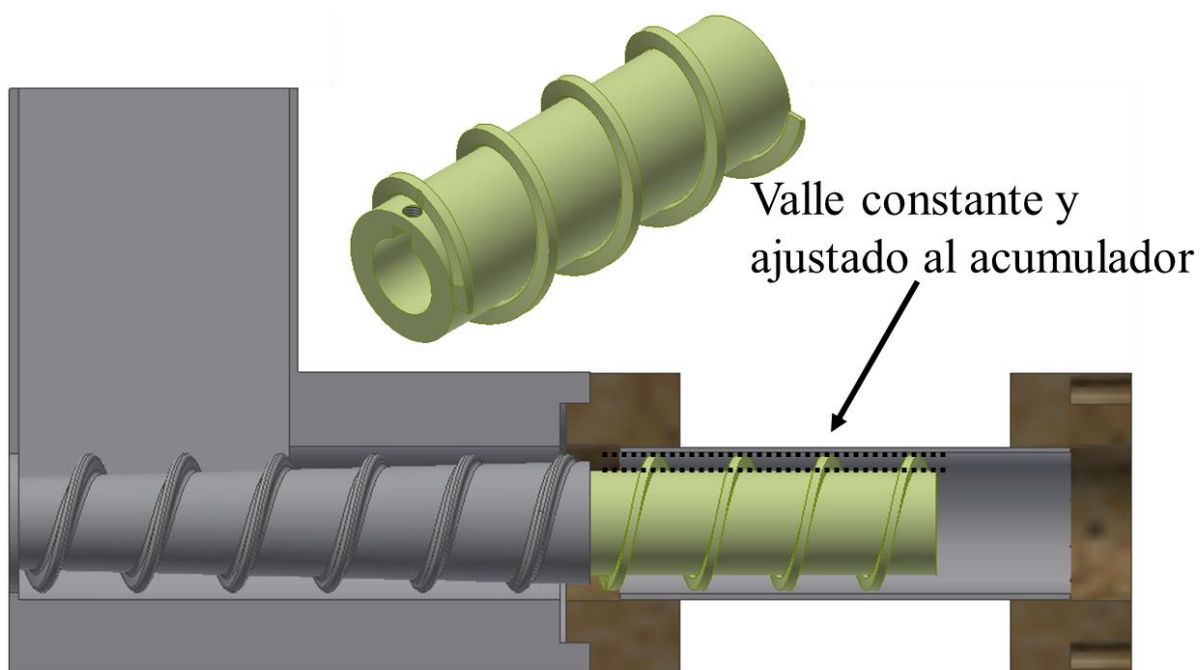


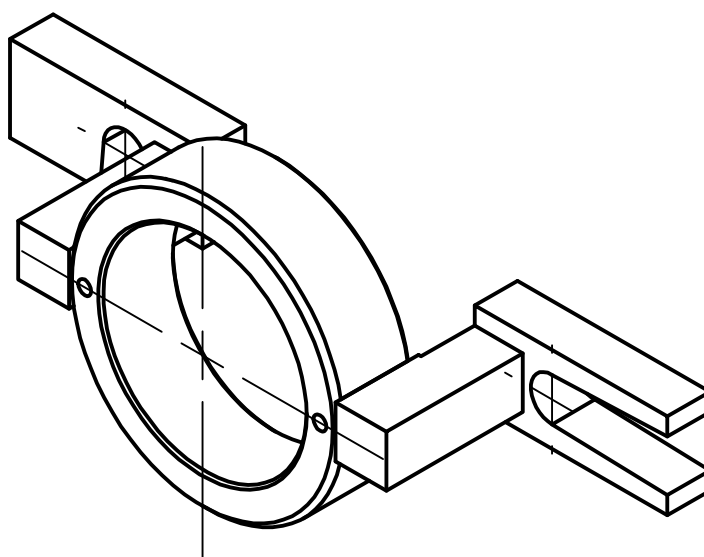
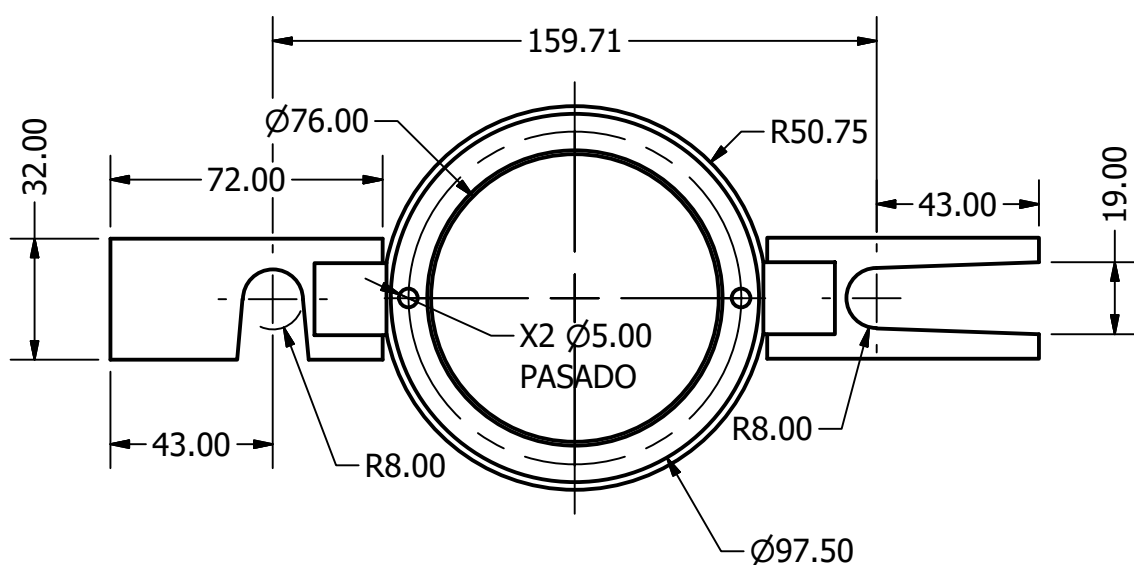
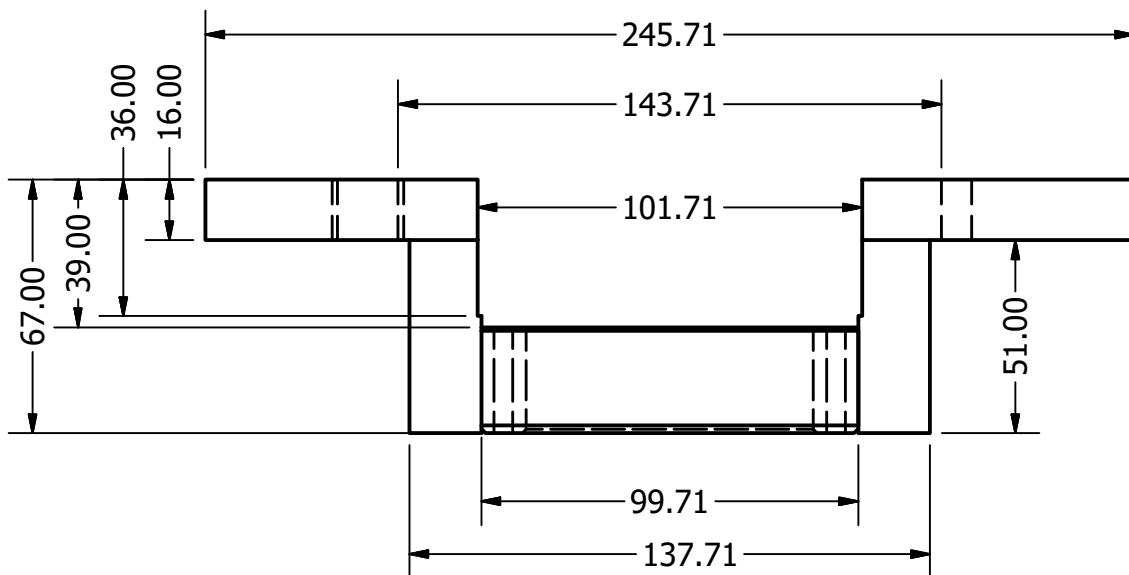
Figura 53 Propuesta del acoplamiento de un husillo con ajuste reducido.

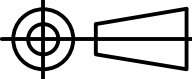
Referencias bibliográficas

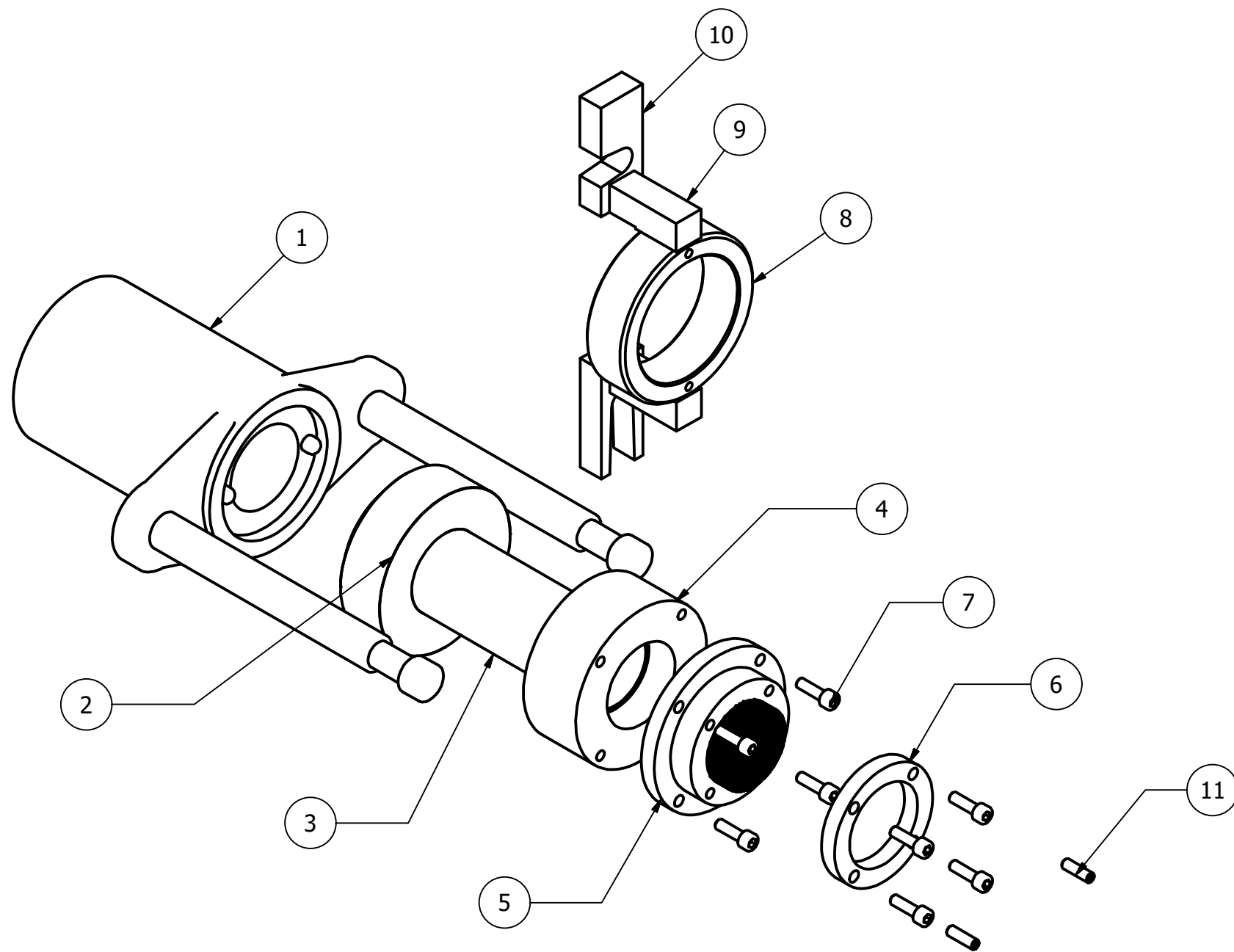
- Ambrosio Mari, E. (1998). *Los materiales ceramicos*. Buenos Aires, argentina: Alsina.
- Anguita Delgado, R. (1977). *Extrusión de Plásticos*. Madrid: H. Blume .
- Askeland, Fulay, Whright. W. J, Hernández , L., & Romo Muñoz. (2012). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Ciudad de méxico: Cengage Learning.
- Ceramics.org. (8 de Abril de 2018). *Ceramics.org*. Obtenido de <http://ceramics.org/learn-about-ceramics/structure-and-properties-of-ceramics>
- Chowdury a., M., & G. K., S. (2007). *Synthesis, Properties and Applications of Cordierite Ceramics*. International Ceramics Interceram.
- Corning. (11 de Febrero de 2018). *Corning*. Obtenido de <http://www.corning.com/worldwide/en.html>
- Corning incorporated. (2005). *Evaluation of a Stronger Ultra Thin Wall Corning Substrate for Improved Performance*. EE. UU.: SAE International.
- De Aza, S, & Espinosa de los Monteros, J. (1967). *Materiales cerámicos de Cordierita* . España.: Bol. Soc.
- Donald Cass, P., & Richard Larue, S. (1991). *United States Patente n° US, 5,066,215*.
- EPA. (1989). *Aftermarket Catalytic Converters: Guide to Their Purchase, Installation, and Use*. EE. UU.: EPA.
- Händle F. (2009). *Extrusion in ceramics*. Berlin, Alemania: Springer.
- James Robert, r. (1987). *Europa Patente n° EP 0083850*.
- Kalpakjian, S., & R. Schmid, S. (2014). *Manufactura, ingeniería y tecnología vol 2*. México: Pearson.
- L. Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson.
- Mena , M. (2017). *Plan de acción nacional de cambio climático*. Chile: Ministerio del medio ambiente .

- Nath Das, R., Madhusoodana, & Okada , K. (2002). *Rheological studies on cordierite honeycomb extrusion*. Europa: Journal of the European Ceramic Society .
- Navarro, I. (20 de Julio de 2014). *Milenio*. Obtenido de http://www.milenio.com/region/Autos-primera-fuente-contaminacion-pais-Mexico-enfermedades-humo-ozono_troposferico_0_338966122.html
- OMS. (2016). *Respira la vida: la contaminación atmosférica mata sin hacer ruido*. Departamento de salud pública, medio ambiente y determinantes sociales de la salud.
- William Brew, T., Sun, Y., Robertson Treacy JR, D., & Jane Walker, J. (2006). *United States Patente n° 0178769 A1*.

Apéndice 1 Dibujos técnicos.

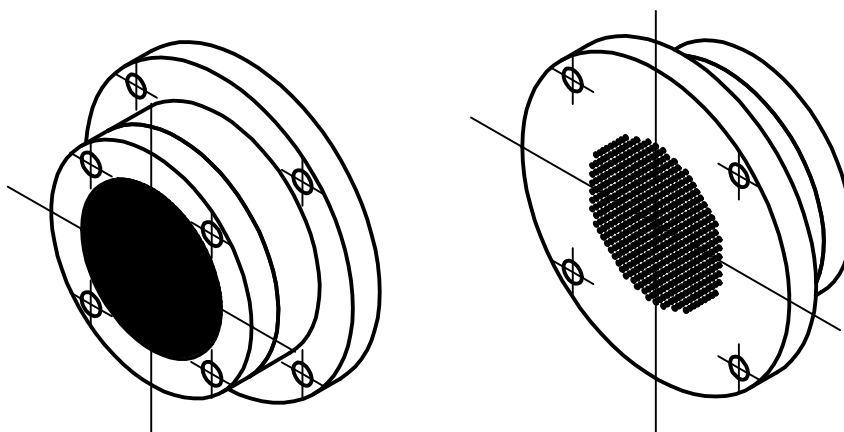
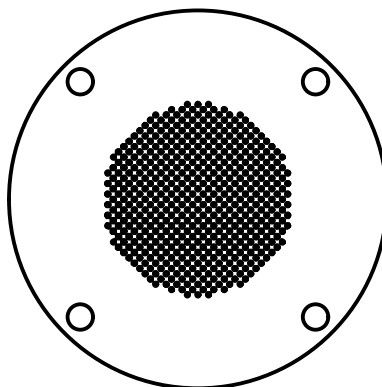
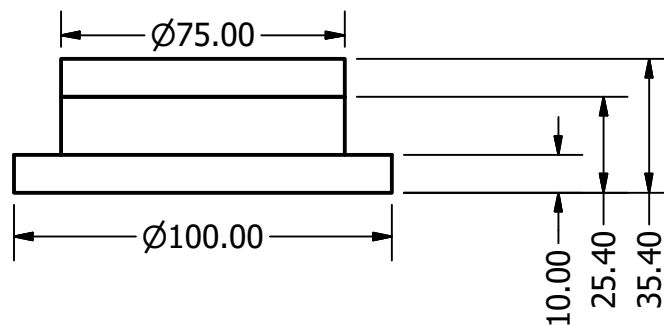
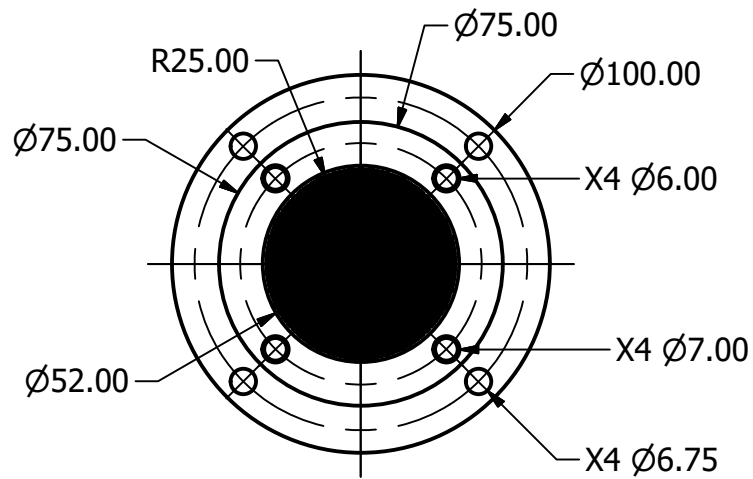


UNIDADES	mm	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD AZCAPOTZALCO	
		ENSAMBLE RETENEDOR	CLAVE RE
FORMATO	A4	DIBUJADO POR AARÓN IVÁN LUNA RODRÍGUEZ / DANIEL HERRERA TORIBIO	FECHA 23/03/2018
ESCALA	1 : 2	MATERIAL ACERO INOXIDABLE AISI 304	1

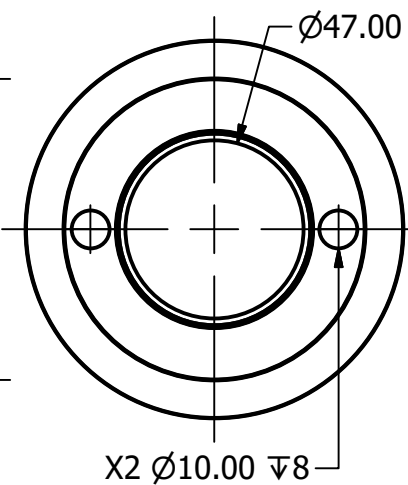
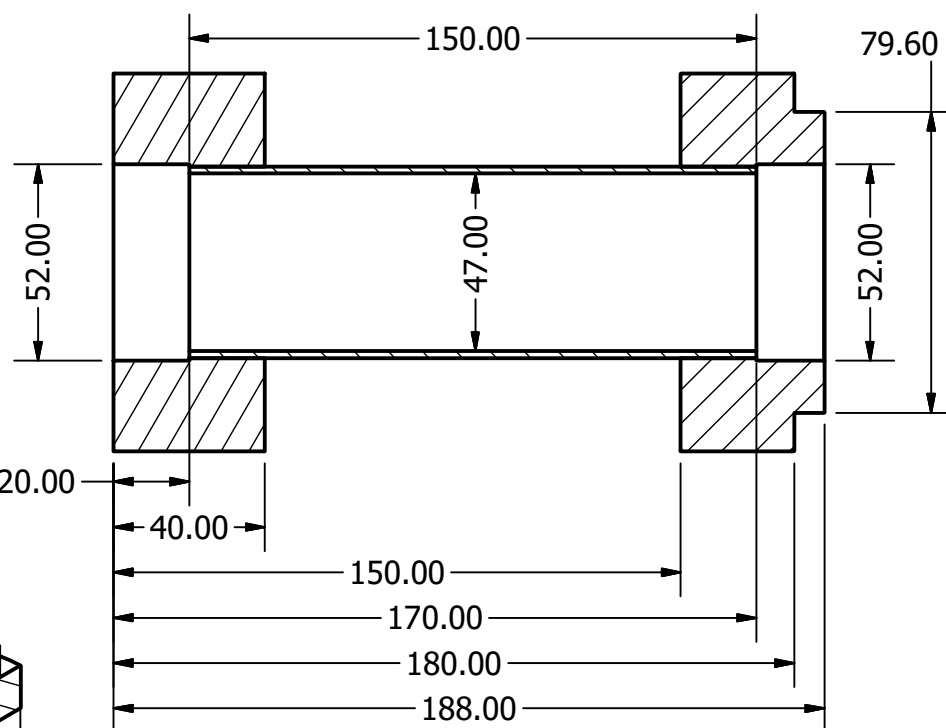
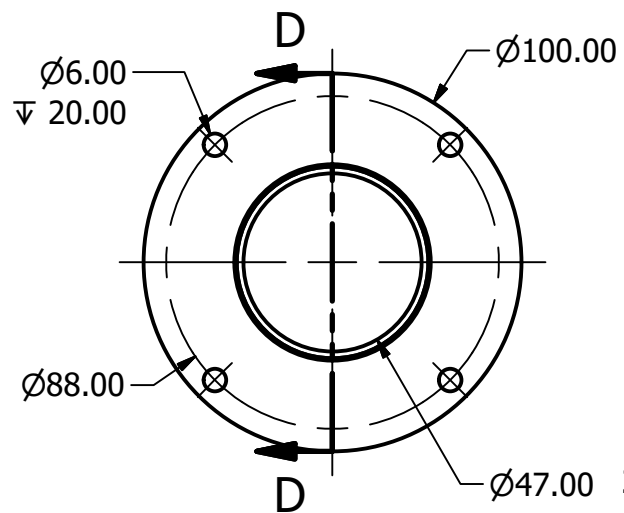


PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Extrusora	
2	1	A1	
3	1	A2	
4	1	PA3	
5	1	D1	
6	1	D2	
7	8	TORNILLO ISO 4762 - M6 x 20	TORNILLO HEXAGONAL CON CABEZA CILINDRICA
8	1	R1	
9	2	R2,R3	
10	2	R4	
11	2	TORNILLO ISO 4026 - M6 x 20	TORNILLO OPRESOR

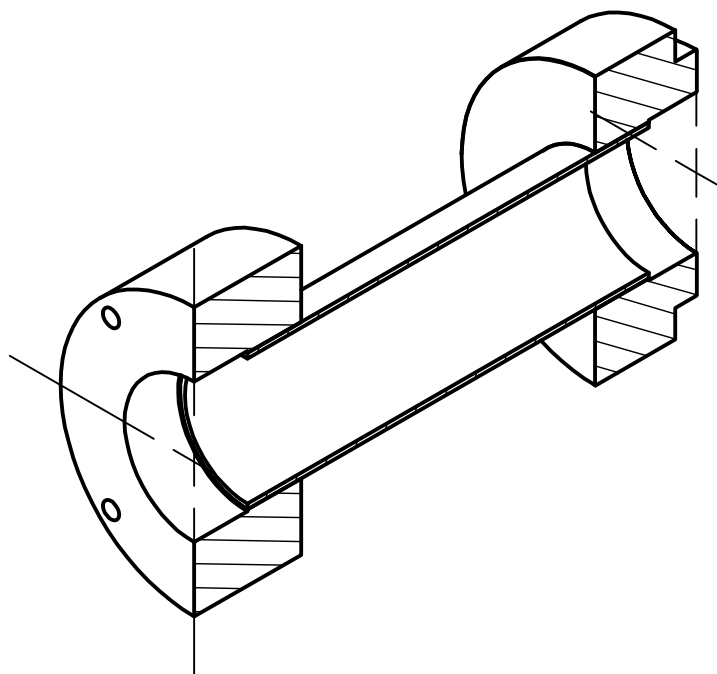
UNIDADES	mm	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD AZCAPOTZALCO	
		ENSAMBLE ACUMULADOR	CLAVE AE
FORMATO	A4	DIBUJADO POR AARÓN IVÁN LUNA RODRÍGUEZ / DANIEL HERRERA TORIBIO	FECHA 23/03/2018
ESCALA	1/3	MATERIAL ACERO INOXIDABLE AISI 304	1



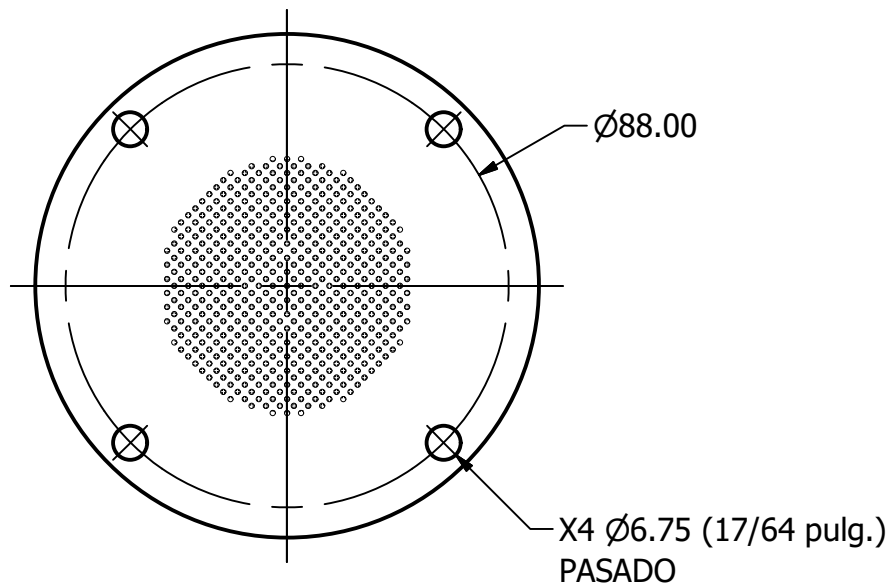
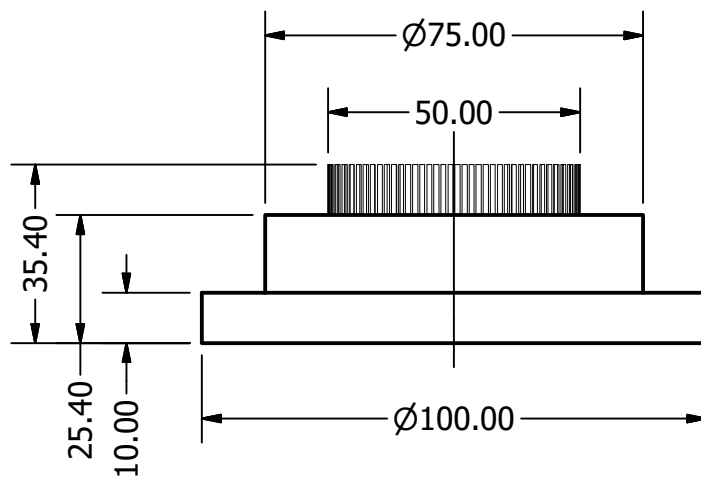
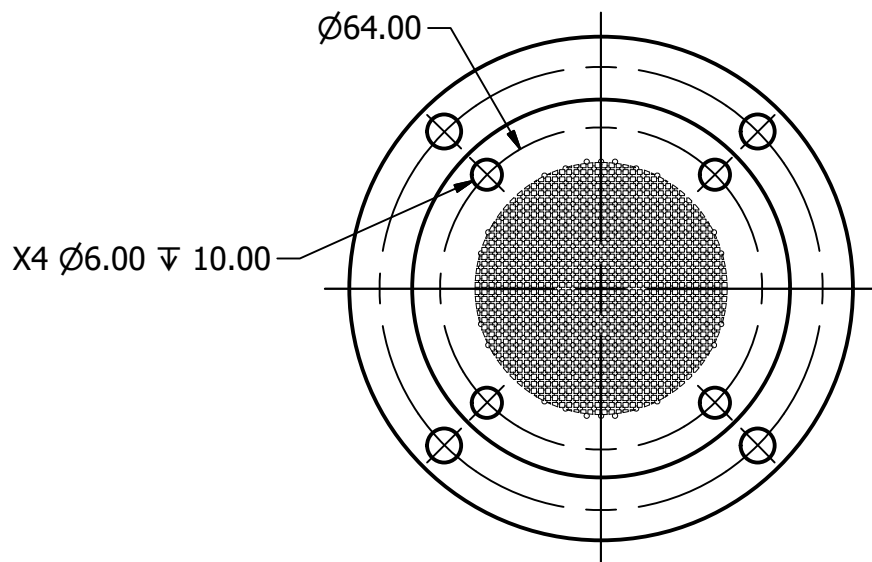
UNIDADES mm	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD AZCAPOTZALCO	
	ENSAMBLE DADO-ANILLO	CLAVE DE
FORMATO A4	DIBUJADO POR AARÓN IVÁN LUNA RODRÍGUEZ / DANIEL HERRERA TORIBIO	FECHA 24/03/2018
ESCALA 1 : 2	MATERIAL ACERO INOXIDABLE AISI 304	1

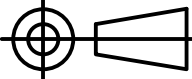


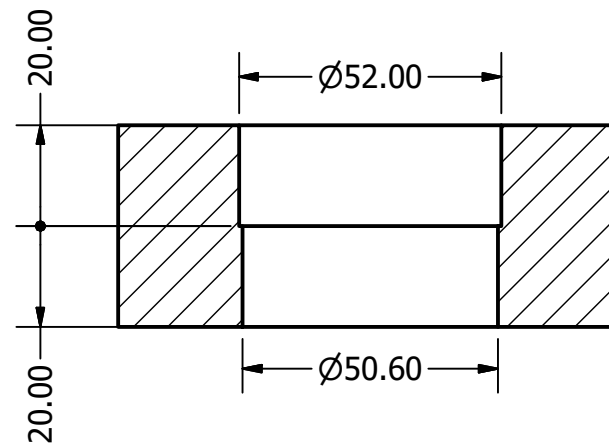
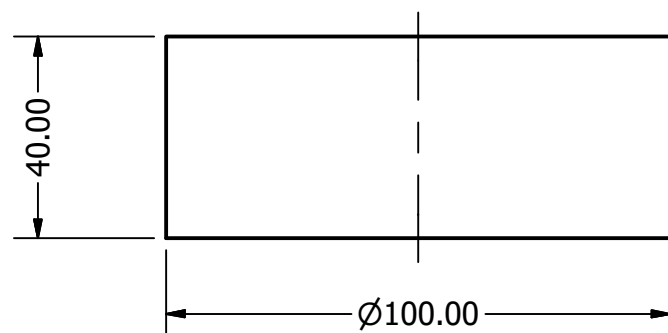
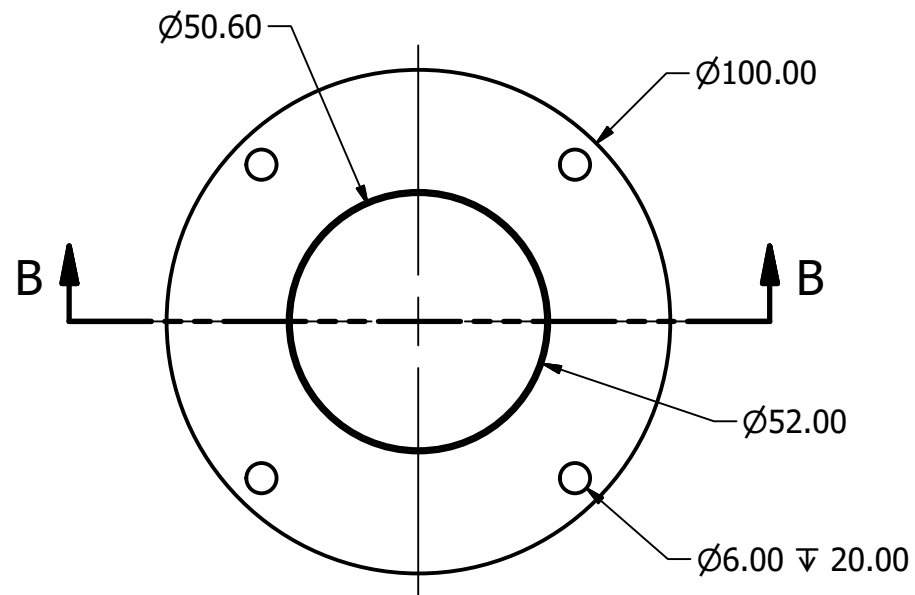
CORTE D-D
1 : 2



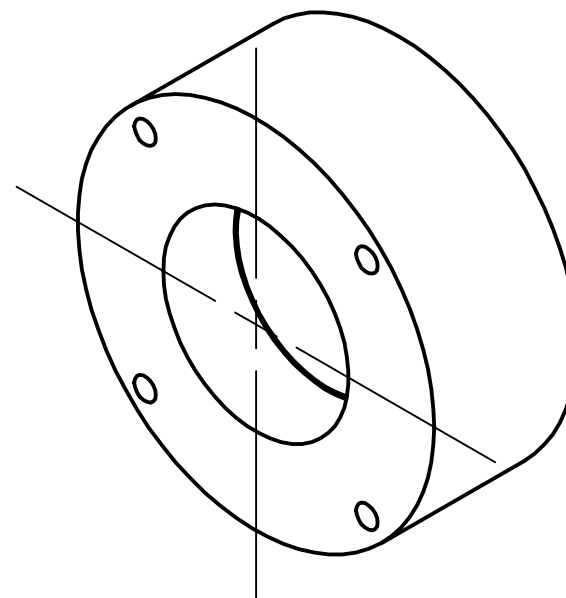
UNIDADES mm	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD AZCAPOTZALCO	
	ENSAMBLE ACUMULADOR	CLAVE AE
FORMATO A4	DIBUJADO POR AARÓN IVÁN LUNA RODRÍGUEZ / DANIEL HERRERA TORIBIO	FECHA 23/03/2018
ESCALA 1 : 2	MATERIAL ACERO INOXIDABLE AISI 304	1

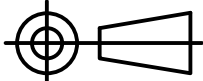


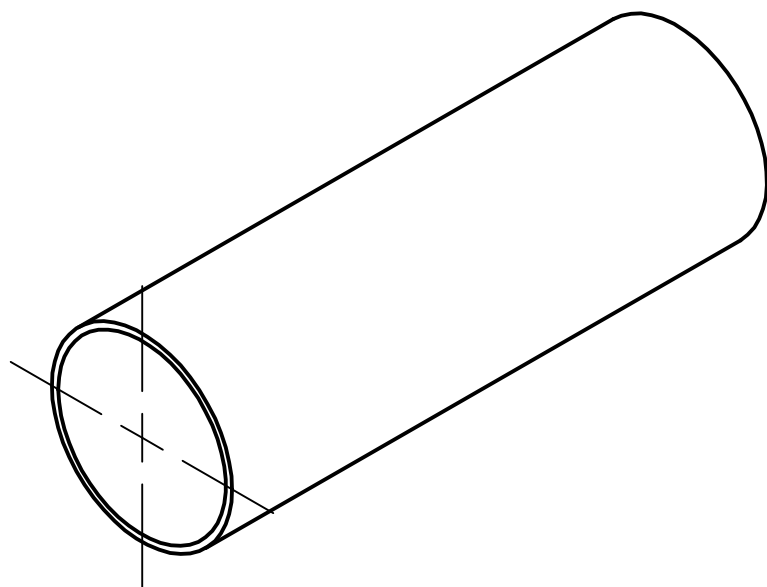
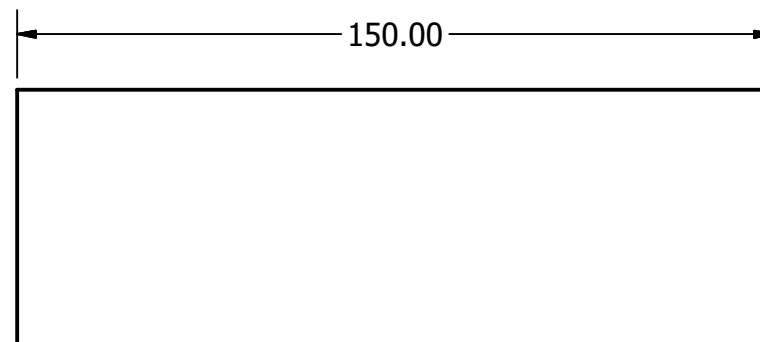
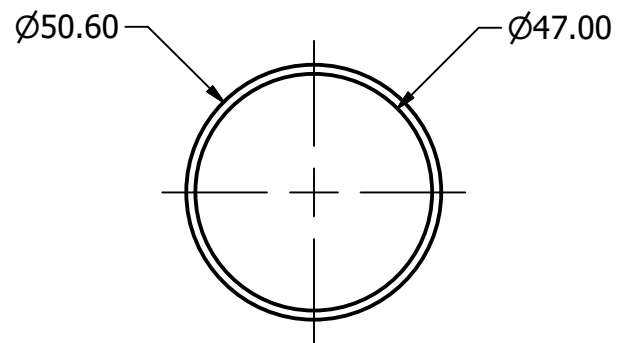
UNIDADES mm	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD AZCAPOTZALCO	
	DADO 324 CPPC, 511 ORIFICIOS	CLAVE A1
FORMATO A4	DIBUJADO POR AARÓN IVÁN LUNA RODRÍGUEZ / DANIEL HERRERA TORIBIO	FECHA 24/03/2018
ESCALA 1 : 2	MATERIAL ACERO INOXIDABLE AISI 304	1

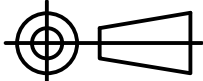


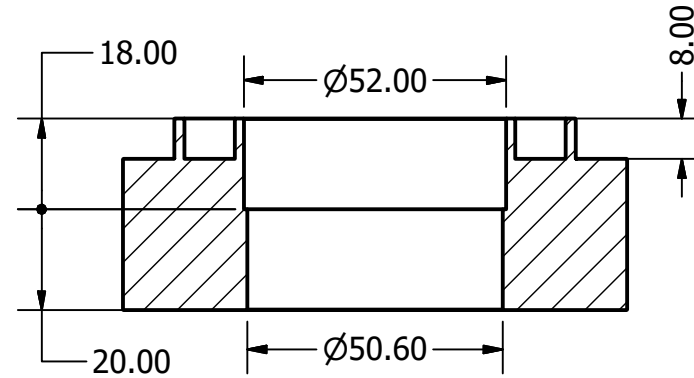
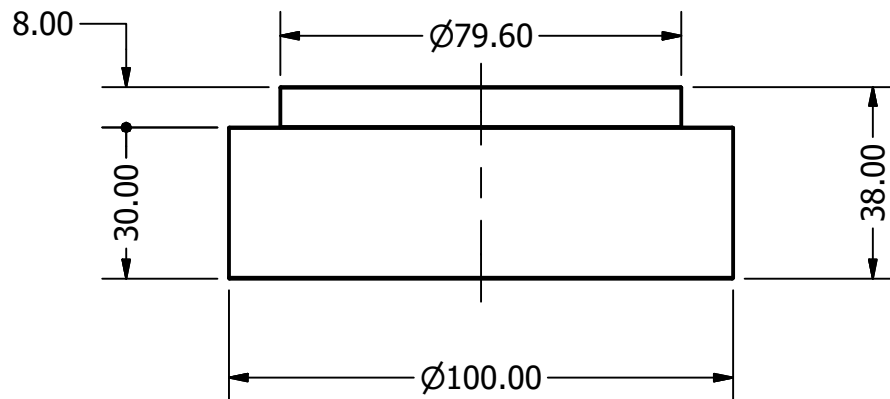
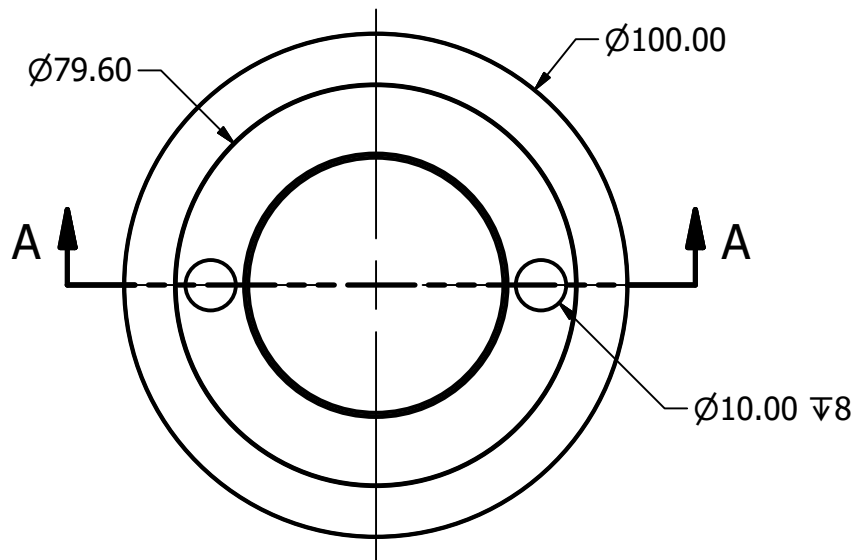
CORTE B-B



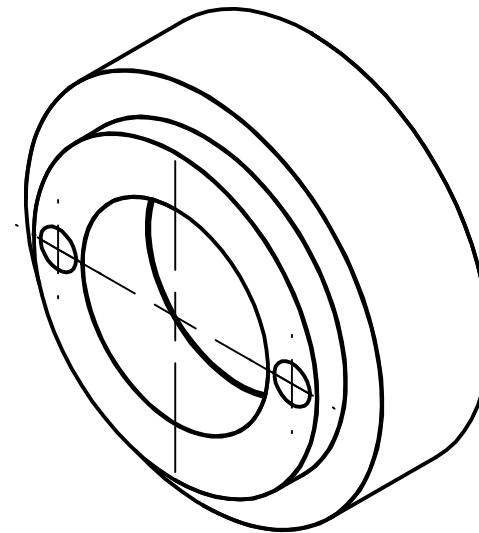
UNIDADES mm	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD AZCAPOTZALCO	
	ANILLO CONECTOR	CLAVE A3
FORMATO A4	DIBUJADO POR AARÓN IVÁN LUNA RODRÍGUEZ / DANIEL HERRERA TORIBIO	FECHA 22/03/2018
ESCALA 1 : 1.5	MATERIAL ACERO INOXIDABLE AISI 304	1

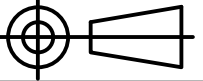


UNIDADES	mm	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD AZCAPOTZALCO	
		TUBO ACUMULADOR	CLAVE A1
FORMATO	A4	DIBUJADO POR AARÓN IVÁN LUNA RODRÍGUEZ / DANIEL HERRERA TORIBIO	FECHA 22/03/2018
ESCALA	1 : 1.5	MATERIAL ACERO INOXIDABLE AISI 304	1



CORTE A-A



UNIDADES	mm	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD AZCAPOTZALCO	
		ANILLO CONECTOR	CLAVE A1
FORMATO	A4	DIBUJADO POR AARÓN IVÁN LUNA RODRÍGUEZ / DANIEL HERRERA TORIBIO	FECHA 22/03/2018
ESCALA	1 : 1.5	MATERIAL ACERO INOXIDABLE AISI 304	1