

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PRENSA PARA LA  
FABRICACIÓN DE MONOLITOS DE HASTA 50 MM DE  
ALTO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**MANUEL OSWALDO RECALDE CALAHORRANO**  
oswaldo\_recalde@hotmail.com

**DIRECTOR: MSC. HERNAN PATRICIO ESTUPIÑÁN MELO**  
patricio.estupinan@epn.edu.ec

**QUITO, MAYO 2010**

## DECLARACIÓN

MANUEL OSWALDO RECALDE CALAHORRANO, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es mi autoría, que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación anterior; y que se han consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, según lo establecido en la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y la normativa institucional vigente.

---

MANUEL OSWALDO RECALDE CALAHORRANO

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por: MANUEL OSWALDO RECALDE CALAHORRANO, bajo mi supervisión.

---

Msc. PATRICIO ESTUPIÑÁN

## **AGRADECIMIENTOS**

A toda mi pequeña familia que supo estar en aquellos momentos dando su apoyo y energía incondicional.

Un especial agradecimiento a la Empresa ECOENERGY Cia. Ltda. representada por Esteban y Pablo, por su ayuda proporcionada. A mis compañeros de trabajo que me apoyaron continuamente en esta lucha.

Un agradecimiento especial al Dr. Víctor Cárdenas y al Ing. Patricio Flor, por la ayuda brindada en la corrección del presente proyecto.

El más sincero agradecimiento a la persona que desde casi tres años me ha formado dentro y fuera de las aulas de clase, y que me brindó su amistad durante todo este tiempo, el conocimiento es el valor más importante y es aún más cuando se lo comparte, no cambie nunca su manera de ser, muchas gracias Ing. Patricio Estupiñán.

Agradezco además a todos los que conforman y conformaron el Laboratorio de Metalografía por la ayuda en aquellos momentos de apuro que nunca faltan.

## DEDICATORIA

A mi pequeña gran familia Manuel, Susana, Diego, Sandra y mi Chiquita Maite.

*Oswaldo*

## INDICE

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>PROCESOS CATALÍTICOS</b> .....	<b>1</b>
1.1  INTRODUCCIÓN .....	1
1.2  CATÁLISIS.....	2
1.3  TIPOS DE CATÁLISIS .....	3
1.3.1  CATÁLISIS HOMOGÉNEA .....	3
1.3.2  CATÁLISIS ENZIMÁTICA .....	4
1.3.3  CATÁLISIS HETEROGÉNEA.....	5
1.4  APLICACIONES DE LA CATÁLISIS .....	7
1.4.1  PROCESAMIENTO DE ENERGÍA.....	8
1.4.2  PRODUCTOS QUÍMICOS A GRANEL .....	8
1.4.3  QUÍMICA FINA.....	9
1.4.4  PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS .....	9
1.4.5  BIOLOGÍA .....	9
1.4.6  EN EL MEDIO AMBIENTE .....	9
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>11</b>
<b>ESTUDIO DE LOS MONOLITOS UTILIZADOS PARA REACTORES CATALÍTICO</b> .....	<b>11</b>
2.1  INTRODUCCIÓN .....	11
2.2  DEFINICIÓN DE MONOLITO .....	12
2.3  FORMAS DE LOS MONOLITOS .....	13
2.3.1  ESTRUCTURA.....	13
2.3.2  MATERIAL .....	14
2.3.3  FORMA EXTERNA.....	17
2.3.4  CANALES.....	18
2.4  APLICACIONES DE LOS MONOLITOS EN REACTORES CATALÍTICOS.....	19
2.4.1  MONOLITOS DE CARBON ACTIVADO .....	20
2.4.2  CONVERTIDORES CATALÍTICOS PARA AUTOS.....	21

2.4.3 CONVERTIDORES CATALÍTICOS EN LA INDUSTRIA .....	23
<b>CAPITULO 3.....</b>	<b>24</b>
<b>DISEÑO DE MATRIZ Y PRENSA PARA LA FABRICACIÓN DEL MONOLITO PROTOTIPO.....</b>	<b>24</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	24
3.2 ESPECIFICACIONES INICIALES.....	24
3.2.1 FORMA Y DIMENSIÓN DE LA CELDA UNITARIA.....	24
3.2.2 FORMA Y DIMENSIÓN EXTERNA .....	25
3.2.3 DENSIDAD DE CELDA .....	25
3.2.4 DIMENSIONES DE DISEÑO.....	27
3.2.5 CARACTERÍSTICA DEL FLUIDO .....	27
3.2.6 REOLOGÍA DEL FLUIDO.....	29
3.3 DESARROLLO DE ECUACIONES PARA DISEÑO DE CABEZA EXTRUSORA.....	29
3.3.1 CÁLCULO DEL ÁNGULO ÓPTIMO .....	29
3.3.2 ESFUERZO DE EXTRUSIÓN .....	38
3.3.3 CÁLCULO DEL ESPESOR DE PARED DE LA CABEZA EXTRUSORA .....	45
3.4 DISEÑO DE PRENSA EXTRUSORA .....	46
3.4.1 PARÁMETROS DE DISEÑO.....	46
3.4.2 TIPO DE PRENSA EXTRUSORA .....	47
3.4.3 DESARROLLO DE ECUACIONES .....	47
3.5 MATERIAL PARA EXTRUSORA .....	49
3.6 OBTENCIÓN DE VALORES.....	50
3.6.1 DATOS DE ENTRADA.....	50
3.6.2 EJEMPLO DE CÁLCULO .....	51
<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>54</b>
<b>PROCESO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>54</b>
4.1 OBTENCIÓN DE MEZCLAS.....	54
4.1.1 MARCHA EXPERIEMENTAL.....	55

4.1.2	OBTENCIÓN DE MEZCLA ADECUADA .....	56
4.2	OBTENCIÓN DE MONOLITO.....	57
4.3	ENSAYOS DE COMPRESIÓN .....	58
<b>CAPITULO 5</b>	.....	<b>59</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	.....	<b>59</b>
5.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
5.1.1	PRESIÓN DE EXTRUSIÓN .....	59
5.1.2	ESPESOR DE PARED DE CILINDRO.....	59
5.1.3	ESPESOR DE PARED DE DADO EXTRUSOR.....	60
5.1.4	ÁNGULO ÓPTIMO PARA EXTRUSIÓN.....	60
5.1.5	MEZCLA IDEAL DE EXTRUSIÓN.....	60
5.1.6	MONOLITO PROTOTIPO ANÁLISIS GEOMÉTRICO Y DIMENSIONAL.....	61
5.1.7	CAPACIDAD DE APILAMIENTO DE MONOLITO PROTOTIPO .....	65
5.2	RESULTADOS.....	65
<b>CAPITULO 6</b>	.....	<b>66</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	.....	<b>66</b>
6.1	CONCLUSIONES .....	66
6.2	RECOMENDACIONES .....	67
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	.....	<b>68</b>
<b>ANEXO N°1. PROCESO DE ITERACIÓN</b>	.....	<b>70</b>
<b>ANEXO N°2. PLANOS DE PRENSA EXTRUSORA</b>	.....	<b>71</b>
<b>ANEXO N°3. ENSAYO DE COMPRESIÓN</b>	.....	<b>72</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura N°2.2-1</b> Monolitos cerámicos.....	13
<b>Figura N°2.3-1</b> Ejemplo de monolito de una sola pieza.....	14
<b>Figura N°2.3-2</b> Ejemplo de monolito de sección compuesta .....	14
<b>Figura N°2.3-3</b> Ejemplos de monolitos metálicos .....	15
<b>Figura N°2.3-4</b> Monolitos cerámicos.....	17
<b>Figura N°2.3-5</b> Forma externa de monolitos para aplicaciones determinadas.....	18
<b>Figura N°2.3-6</b> A. Sección cuadrada. B. Sección hexagonal. C. Sección sinusoidal .....	19
<b>Figura N°2.4-1</b> Aplicaciones de monolitos en el control medioambiental .....	20
<b>Figura N°2.4-2</b> . Monolito de carbón activad .....	21
<b>Figura N°2.4-3</b> Esquema de monolito de dos fases .....	22
<b>Figura N°2.4-4</b> Sección de convertidor catalítico.....	22
<b>Figura N°2.4-5</b> Distribución de monolitos en lechos catalizadores .....	23
<b>Figura N°3.2-1</b> Comparación del valor de pérdida de carga .....	26
<b>Figura N°3.3-1</b> Diagrama de esfuerzos en el proceso de extrusión .....	30
<b>Figura N°3.3-2</b> Diagrama de velocidad en el proceso de extrusión.....	30
<b>Figura N°3.3-3</b> Diagrama de cuerpo Libre .....	38
<b>Figura N°4.1-1</b> Materiales Utilizados .....	54
<b>Figura N°5.1-1</b> Monolito obtenido por proceso de extrusión.....	62
<b>Figura N°5.1-2</b> . Sección longitudinal del monolito obtenido .....	62
<b>Figura N°5.1-3.</b> Sección longitudinal de monolito .....	63
<b>Figura N°5.1-4.</b> Sección transversal de monolito.....	63
<b>Figura N°5.1-5</b> Simetría de sección transversal de monolito .....	64
<b>Figura N°5.1-6</b> . Deformación de orificio en la fila superior del monolito .....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.3-1</b> Algunas aleaciones utilizadas para monolitos metálicos .....	15
<b>Tabla 2.3-2</b> Materiales utilizados en la preparación de monolitos.....	16
<b>Tabla 3.2-1</b> Tabla de configuraciones de celdas y dimensiones de monolitos .....	26
<b>Tabla 3.2-2</b> Tabla de resumen de dimensiones de diseño matriz extrusora.....	27
<b>Tabla 3.4-1</b> Parámetros de diseño para una prensa extrusora.....	46
<b>Tabla 4.1-1</b> Elementos que conforman la mezcla de un monolito.....	54
<b>Tabla 4.1-2</b> Tabla de experimentación de compuestos .....	55
<b>Tabla 4.1-3</b> Tabla comparativa de las mezclas establecidas.....	56
<b>Tabla 5.1-1</b> Valor de presión de pistón .....	59
<b>Tabla 5.1-2</b> Valor de espesor de pared para el cilindro extrusor.....	59
<b>Tabla 5.1-3</b> Valor de espesor de pared para el dado extrusor.....	60
<b>Tabla 5.1-4</b> Valor de ángulo óptimo .....	60
<b>Tabla 5.1-5</b> Resultado Mezcla ideal.....	61
<b>Tabla 5.1-6</b> Resultado de prueba de compresión a monolito prototipo.....	65

## RESUMEN

El presente Proyecto de Titulación, *“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PRENSA PARA LA FABRICACIÓN DE MONOLITOS DE HASTA 50 MM DE LARGO.”*, fue realizado en seis capítulos, los cuales se resumen de la siguiente manera:

El Capítulo 1, realiza un estudio muy general de los procesos catalíticos que se producen en los convertidores catalíticos, analizando los fenómenos que intervienen en estos procesos.

El Capítulo 2, da una visión amplia de lo que son los monolitos utilizados en la industria, además las aplicaciones que ellos tienen en la protección medioambiental tanto para efluentes gaseosos como líquidos.

El Capítulo 3, expone la modelación matemática para el diseño de la cabeza extrusora, estableciendo los parámetros óptimos para el proceso de extrusión con utilización de la menor cantidad de energía. Además, establece los parámetros de diseño para la elaboración de una prensa para la extrusión de los monolitos.

El Capítulo 4, muestra el proceso experimental para la obtención de la masa adecuada para el proceso de extrusión, generando varios ensayos experimentales con compuestos y mezclas establecidos en la literatura estudiada.

El Capítulo 5, expone y analiza los resultados obtenidos tanto en la modelación matemática como en el proceso experimental, indicando estos resultados en tablas.

El Capítulo 6, expone las conclusiones de este trabajo

## **PRESENTACIÓN**

La contaminación atmosférica representa un peligro considerable para la salud humana, la flora, la fauna y el ambiente en general, ya que se incrementa con el creciente desarrollo y concentración de la población en grandes núcleos urbanos. La aparición de nuevas industrias y tecnologías conllevan a un mayor consumo energético, el cual se alcanza generalmente con combustibles fósiles.

Una de las tecnologías en la que se pretende ingresar en el control medio ambiental, es la utilización de monolitos catalíticos para filtros. La necesidad de la obtención de estos elementos denominados “monolitos” es el punto de partida para establecer el presente trabajo, ya que con un diseño adecuado de un sistema de prensado se obtendrán prototipos para su posterior impregnación de catalizadores.

Con el trabajo que se propone se estaría incursionando por primera vez en el país en el desarrollo de este tipo de tecnología. Se está realizando un aporte crucial para la protección medio ambiental, ya que al preparar los monolitos para los reactores catalíticos estamos contribuyendo en la reducción de los agentes contaminantes, dejando así un legado para nuestras futuras generaciones.

# CAPÍTULO 1

## PROCESOS CATALÍTICOS

### 1.1 INTRODUCCIÓN<sup>1</sup>

En un sentido general, cualquier cosa que aumenta la velocidad de un proceso es un "catalizador", un término derivado del griego, que significa "anular", o "desatar", o "recoger". La frase procesos catalizados fue acuñada por Jöns Jakob Berzelius en 1836, para describir las reacciones que son acelerados por sustancias que permanecen sin cambios después de la reacción.

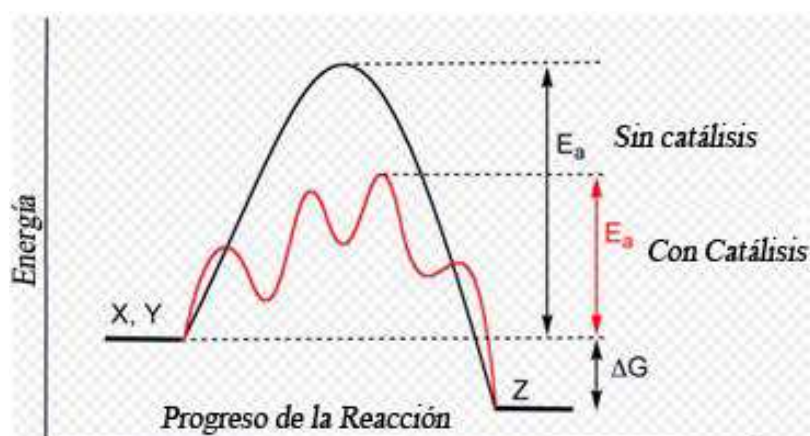
Otro de los primeros químicos involucrados en la catálisis fue Alexander Mitscherlich quien se refirió a los procesos de contacto y Johann Wolfgang Döbereiner que habló de acción de contacto y cuyo encendedor basado en hidrógeno y una esponja de platino se convirtió en un gran éxito comercial en la década de 1820. Humphry Davy descubrió el uso de platino en la catálisis. En la década de 1880, Wilhelm Ostwald en la Universidad de Leipzig inició una investigación sistemática de las reacciones que eran catalizadas por la presencia de los ácidos y las bases, y encontró que las reacciones químicas ocurren a una velocidad finita y que estas velocidades pueden utilizarse para determinar la fuerza de ácidos y bases. Por este trabajo, Ostwald fue galardonado en 1909 con el Premio Nobel de Química.

La ciencia de la catálisis es una respuesta práctica moderna a la antigua piedra filosofal que los alquimistas de la Edad Media buscaban afanosamente para transformar metales baratos en oro, la sustancia más apreciada para ese entonces. Ahora, no se busca la transformación en oro, sino la transformación de materias primas baratas en materias primas con alto valor agregado, con mucha utilidad en el mundo de hoy.

## 1.2 CATÁLISIS

“La palabra Catálisis viene de dos palabras griegas, el prefijo Kata que significa disminución y del verbo Lysis cuyo significado es romper. Berzelius probablemente utilizó el vocablo catálisis para denotar la ruptura de las fuerzas que inhiben la reacción entre moléculas”<sup>2</sup>

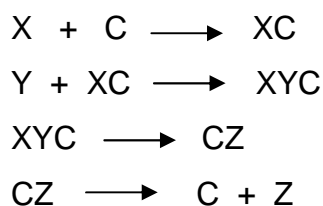
Catálisis se refiere a la aceleración o la desaceleración de la tasa de una REACCIÓN QUÍMICA mediante una sustancia, llamada catalizador, que no es modificada por la reacción.



**Figura 1.2-1** Diagrama genérico de energía potencial mostrando el efecto de un catalizador en un ejemplo de reacción química  $X+Y$  para producir  $Z$ <sup>1</sup>.

La catálisis es crucial para cualquier forma de vida, ya que hace que las reacciones químicas ocurran mucho más rápido o lento, a veces por un factor de varios millones de veces más de lo que sería "por sí mismas"<sup>3</sup>.

El siguiente es un esquema de una reacción catalítica, donde C es el catalizador, X y Y son los reactivos y Z es el producto.



Pequeñas cantidades del catalizador son necesarias para acelerar el proceso de reacción.

Un error muy común que se comete es creer que el catalizador "permite que la reacción ocurra", que la reacción no ocurriría sin la presencia del dicho catalizador. Sin embargo, un catalizador no puede hacer que una reacción termodinámicamente desfavorable se realice, más bien, solamente puede acelerar la reacción que es termodinámicamente favorable. La reacción puede realizarse en ausencia del catalizador aunque quizás demasiado lento como para ser observada.

Se estima que casi el 90% de todos los productos químicos producidos comercialmente involucran catalizadores en alguna etapa de su proceso de fabricación<sup>1</sup>.

### **1.3 TIPOS DE CATÁLISIS<sup>1</sup>**

Para un estudio amplio de los procesos catalíticos, es posible separar el fenómeno catalítico en tres campos independientes catálisis homogénea, catálisis heterogénea y catálisis enzimática.

#### **1.3.1 CATÁLISIS HOMOGÉNEA**

La catálisis homogénea se da cuando los elementos que intervienen en la reacción, reactivos y catalizador se encuentran en la misma fase sea líquida o gaseosa.

En la catálisis homogénea se tiene un acceso más fácil al mecanismo de reacción y por lo tanto se puede dominar de una mejor manera el proceso catalítico.

Una de las ventajas de este tipo de catálisis es la ausencia de efectos de envenenamiento tan frecuentes en la catálisis heterogénea, que obliga a realizar procesos posteriores de eliminación de impurezas. Con la aparición de los compuestos organometálicos la catálisis homogénea ha sido decisiva en la

aplicación industrial ya que con estos compuestos se tienen altos rendimientos, así como productos de alta pureza

Algunos de los procesos industriales que ocupan compuestos órgano metálicos son:

- Proceso oxo o reppe de carbonilación de olefinas: ácido acético
- Polimerización de olefinas: polietileno
- Adición de olefinas: polibutadieno
- Oxidación de olefinas: óxido de propileno
- Oxidación de alcanos y arenos: ácidoterafílico, adípico
- Polimerización-condensación: fibra de poliéster.

Estas reacciones ocurren a bajas temperaturas y poseen una selectividad elevada, esto se logra mediante una adecuada selección del metal de transición de los ligandos, del disolvente y de las condiciones de reacción.

Uno de los inconvenientes de la catálisis homogénea es la dificultad de separar el catalizador del medio reaccionante.

La catálisis homogénea en solución (fase líquida) ha sido objeto de muchos estudios y una de ellas es la catálisis ácido-base. La constatación de que un ácido aceleraba u orientaba ciertas reacciones químicas, se tradujeron en una serie de aplicaciones industriales como la esterificación, la saponificación, la hidrólisis, la halogenación, etc.

### **1.3.2 CATÁLISIS ENZIMÁTICA**

La mayoría de las reacciones que ocurren en los sistemas vivos son catalizadas por proteínas conocidas como enzimas.

Las enzimas reciben su nombre en función de su actividad específica, por ejemplo la enzima ureasa cataliza con eficiencia la hidrólisis de la urea, las proteasas actúan sobre las proteínas, las amidasas sobre las midas, etc.



A veces las enzimas son inactivas catalíticamente si no se encuentran en presencia de ciertos iones metálicos.

Los mecanismos de reacción de las enzimas son muy complejos, los cuales implican un número de etapas elementales cada una de las cuales puede incluir interacciones complejas entre varios grupos de las moléculas de la enzima y el sustrato.

En las reacciones catalíticas de las enzimas las velocidades de reacción, así como los mecanismos se ven afectados por cambios en la concentración, el pH y la temperatura.

### **1.3.3 CATÁLISIS HETEROGÉNEA**

La catálisis heterogénea es en la que el catalizador es insoluble en los sistemas químicos en los cuales provoca la transformación y forma una fase distinta muy a menudo sólida.

La característica principal es de la catálisis heterogénea es la existencia de dos fases y una superficie de contacto. La reacción se lleva a cabo en esta superficie de contacto y el fluido es una fuente de moléculas por transformar o que ya fueron transformadas.

*“La habilidad de un compuesto para actuar como catalizador en un sistema específico depende de su naturaleza química. En la catálisis heterogénea, el fenómeno catalítico está relacionado con las propiedades químicas de la superficie del sólido que se ha elegido como catalizador”<sup>2</sup>*

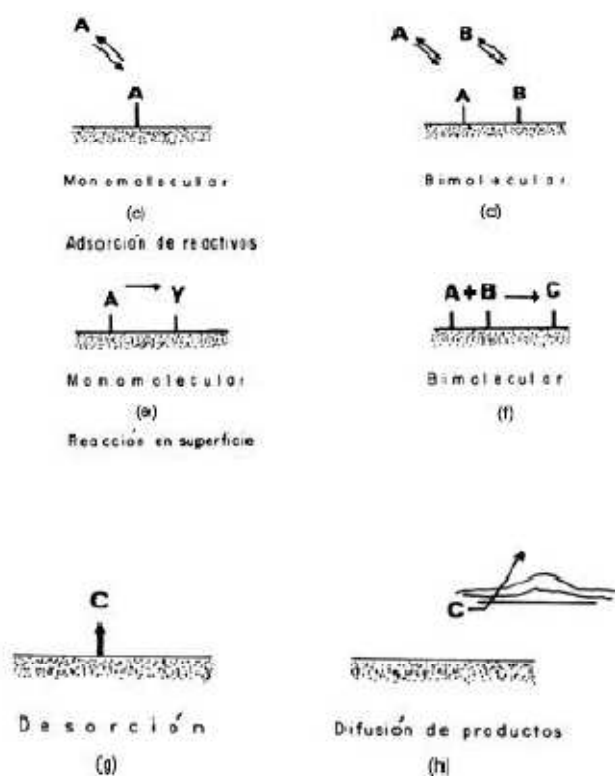
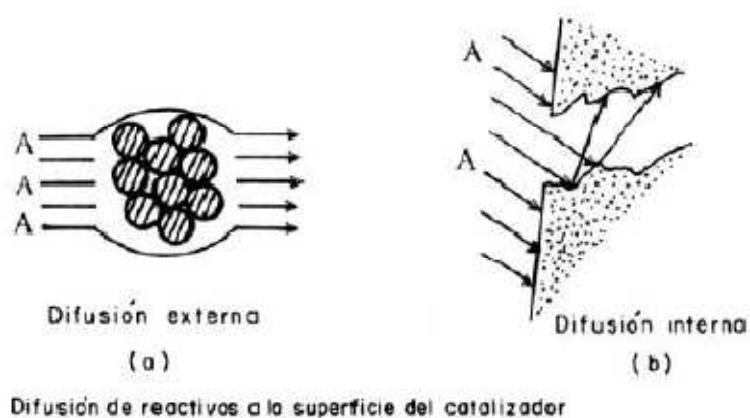
La catálisis heterogénea está limitada por el campo de fuerzas del sólido y se limita a algunos pocos angstroms. La mayoría de los catalizadores sólidos son metales, óxidos, sulfuros metálicos o sales con alta energía reticular.

La adsorción de moléculas de una fase fluida (gas o líquido) en la superficie de un sólido está estrechamente ligada a este tipo de catálisis. Todos los sólidos tienen la propiedad de fijar (adsorber) en su superficie las moléculas, átomos, o iones que se encuentran a su alrededor.

Cualquier reacción que tome lugar en una superficie comprende de los siguientes pasos:

- Difusión de reactivos a la superficie
- Adsorción de los reactivos
- Reacción en superficie
- Desorción de los productos
- Difusión de productos hacia la fase fluida.

La figura 1.3.1 describe los pasos que tienen lugar en una reacción en una superficie. El primero y el último paso son rápidos por lo tanto cualquiera de los otros pasos son los limitantes en cualquier reacción heterogénea, y por la experimentación la reacción en superficie es la que lleva un mayor tiempo.



**Figura 1.3-1** Esquemas de pasos que toman lugar en una superficie <sup>2</sup>.

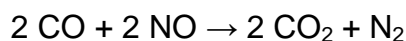
## 1.4 APLICACIONES DE LA CATÁLISIS<sup>1,2,3</sup>

Se pensaría que la catálisis se aplica únicamente a nivel biológico. Su aplicación práctica más extensa se ha hecho en el campo de la industria petroquímica, a través de procesos tales como el cracking (la ruptura de hidrocarburos pesados

en hidrocarburos más pequeños para su uso como gasolina, principalmente), el reformado de combustibles, los procesos de hidrotreatmento (hidrodesulfuración, hidrogenitrogenación, hidrodemetalización) para reducir las impurezas del petróleo, entre otros.

#### **1.4.1 PROCESAMIENTO DE ENERGÍA**

La refinación del petróleo es una aplicación de la catálisis, se la utiliza en la rotura de hidrocarburos de cadena larga en trozos más pequeños (craqueo catalítico), en el reformado de la nafta y el reformado con vapor (conversión de hidrocarburos en gas de síntesis), la quema de combustibles provenientes del petróleo son tratados a través de la catálisis, los convertidores catalíticos rompen algunos subproductos nocivos de los gases de escape en los automóviles



El Biodiesel y los biocombustibles para su elaboración y procesamiento requieren un tratamiento mediante catalizadores inorgánicos.

#### **1.4.2 PRODUCTOS QUÍMICOS A GRANEL**

Algunos productos químicos se obtienen a gran escala a través de la oxidación catalítica, mediante la utilización de oxígeno, por ejemplo:

- Ácido nítrico: a partir de amoníaco
- Ácido sulfúrico: a partir de dióxido de azufre a trióxido de azufre
- Ácido tereftálico: a partir de p-xileno.
- Acrilonitrilo: a partir de propano y amoníaco

Otros productos son generados por reducción, a menudo por el proceso de hidrogenación, por ejemplo:

- Amoníaco: se prepara a través del proceso de Haber a partir de nitrógeno.
- Metanol: a partir de monóxido de carbono

Algunos polímeros de derivados de etileno y propileno, poliésteres, las poliamidas y los isocianatos son obtenidos a través de la catálisis.

### **1.4.3 QUÍMICA FINA**

Química fina se refiere a compuestos utilizados en procesos farmacéuticos. Por lo que para elaborar muchos productos farmacéuticos se utiliza procesos catalíticos.

### **1.4.4 PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS**

La aplicación de la catálisis en este campo es la hidrogenación (reacción con el hidrógeno gas) de las grasas usando níquel como catalizador para la producción de margarina. Otros productos se preparan a través de biocatálisis

### **1.4.5 BIOLOGÍA**

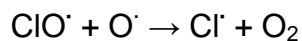
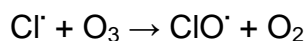
En la naturaleza las enzimas con catalizadores en el metabolismo y el catabolismo.

Un reactivo particularmente importante es las reacciones enzimáticas es el agua, que es el producto de muchas de las reacciones en que se forman enlaces y un reactivo en muchos procesos en que se rompen enlaces.

### **1.4.6 EN EL MEDIO AMBIENTE**

La catálisis posee un impacto en el medio ambiente mediante el aumento de la eficiencia de los procesos industriales, pero también juega un papel directo en el

medio ambiente. Un ejemplo de ello es el notable papel catalítico de los radicales libres en la destrucción del ozono. Los radicales se forman por la acción de la radiación ultravioleta sobre los clorofluorocarburos.



La catálisis también ha hecho que otros campos y aplicaciones del conocimiento hayan tenido grandes progresos, tales como la industria farmacéutica y biotecnología (producción de etanol y otros tipos de fermentaciones enzimáticas, antibióticos), la ciencia de materiales (fibras sintéticas, plásticos, y otros, aunque gran parte de estos hacen parte de la industria petroquímica), control de la contaminación e ingeniería ambiental (reducción de óxidos de nitrógeno, convertidores catalíticos en automóviles, reducción de compuestos azufrados), la industria de fertilizantes (síntesis de amoníaco, producción de hidrógeno), etc

## **CAPÍTULO 2.**

# **ESTUDIO DE LOS MONOLITOS UTILIZADOS PARA REACTORES CATALÍTICO**

### **2.1 INTRODUCCIÓN<sup>4</sup>**

El diseño y desarrollo de los catalizadores para realizar procesos de descontaminación exige una serie de factores. El sistema de filtración catalítico debe poseer una alta actividad, selectividad y vida útil, además que en lo posible no deben alterar las condiciones de operación del proceso productivo como presión, temperatura y velocidad de flujo. Se exige que la pérdida de carga producida por el conjunto sea lo menos posible, dado que un posible taponamiento de la salida repercutirá en el costo de producción.

Se desarrolló en los años 60 diferentes tipos de catalizadores de flujo paralelo formados por placas o tubos. El desarrollo de estos prototipos iniciales, derivó en el apareamiento de los catalizadores denominados panal de abeja.

El uso de materiales cerámicos en la construcción de soportes catalíticos en la actualidad es más frecuente, ya que se pueden fabricar una gran diversidad de formas geométricas al mismo tiempo que su porosidad y área superficial específica puede ser controlada. Existen algunos métodos y técnicas para la fabricación de barras, tubos y perfiles, para luego de acuerdo a su forma y aplicación puedan ser apilados para la construcción de reactores catalíticos.

Una de las técnicas para el conformado de los monolitos es la extrusión, en la cual se hace una masa constituida por una mezcla de diferentes compuestos entre los cuales se tiene: polvos cerámicos, plastificantes, solventes y dispersantes. Esta masa será deformada plásticamente haciéndola pasar a través

de un dado cuya sección transversal dará a la masa la forma geométrica final deseada<sup>5</sup>.

Los monolitos cerámicos en forma de estructuras celulares o de panales de abeja, son muy utilizados como soporte catalítico en sistemas de reducción de agentes contaminantes como los NOx en centrales de generación térmica y en los sistemas catalíticos instalados en los vehículos<sup>6</sup>.

Los materiales de estos elementos se destacan por su alta resistencia mecánica, estabilidad térmica y por presentar una porosidad bastante uniforme

## 2.2 DEFINICIÓN DE MONOLITO

Según algunos autores, se tiene las siguientes definiciones de monolitos:

*“Los monolitos –estructuras unitarias atravesadas longitudinalmente por canales paralelos-”<sup>7,9</sup>*

Los monolitos son elementos cerámicos con altas áreas superficiales y porosidades. Estos cuerpos cavernosos son frecuentemente empleados en aplicaciones catalíticas como tratamiento de aguas y control en las emisiones contaminantes.

La sección transversal de estos productos posee diferentes formas geométricas, las cuales permiten obtener altas superficies específicas. La forma del monolito permite su posterior apilamiento para la construcción de los reactores catalíticos como se muestra en la figura N°2.2-1



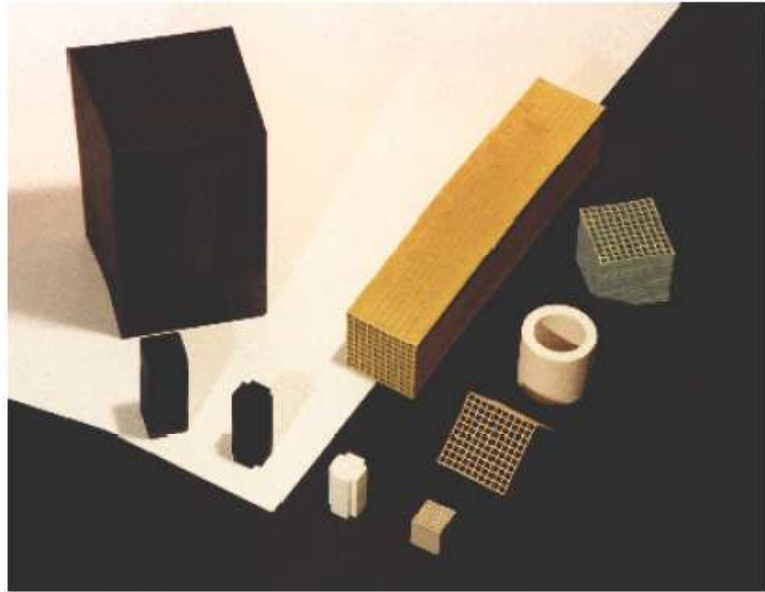


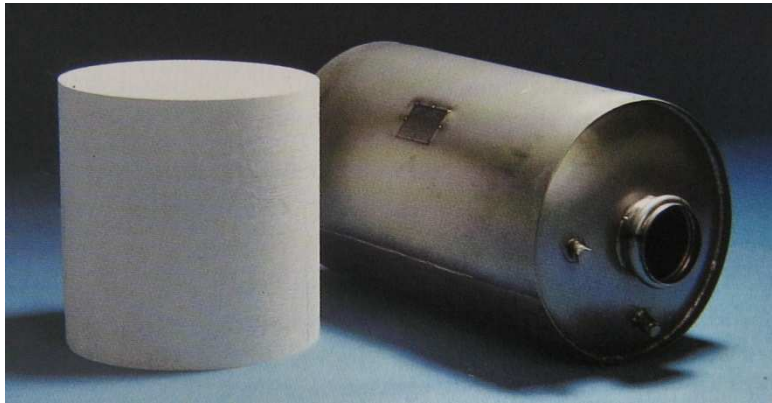
Figura N°2.2-1 Monolitos cerámicos<sup>9</sup>

## 2.3 FORMAS DE LOS MONOLITOS

### 2.3.1 ESTRUCTURA

La estructura de los monolitos es establecida por la aplicación en la cual se desempeñará, ya que el diseño de los reactores catalíticos está sujeto a las condiciones del equipo y de su funcionamiento. De acuerdo a este criterio los monolitos pueden:

- **De una pieza.**- Se los utiliza en reactores catalíticos de una sola fase
- **De secciones compuestas.**- Se los utiliza en reactores catalíticos de de varios pasos, y en la industria en filtros de gran tamaño



**Figura N°2.3-1** Ejemplo de monolito de una sola pieza<sup>4</sup>



**Figura N°2.3-2** Ejemplo de monolito de sección compuesta<sup>4</sup>

## 2.3.2 MATERIAL

Los materiales utilizados para la elaboración de monolitos son de diferentes tipos, se puede tener de tipo cerámico y metálico.

### 2.3.2.1 Metálicos

Se puede tener monolitos de:

- Aleaciones Ferríticas
- Aluminio



**Figura N°2.3-3** Ejemplos de monolitos metálicos<sup>4</sup>

**Tabla 2.3-1** Algunas aleaciones utilizadas para monolitos metálicos<sup>4</sup>

Aleación Fe-Cr	Composición 2	Composición 3
C ≤ 0,03%	Fe 70 a 80%	Fe 6 a 70%
Si 0,2 a 0,4%	Cr 10 a 12%	Cr 20%
Cr 15 a 22%	Al 5 al 10%	Al 5%
Al 4 a 5,2%		
Y 0,05 a 0,4%		

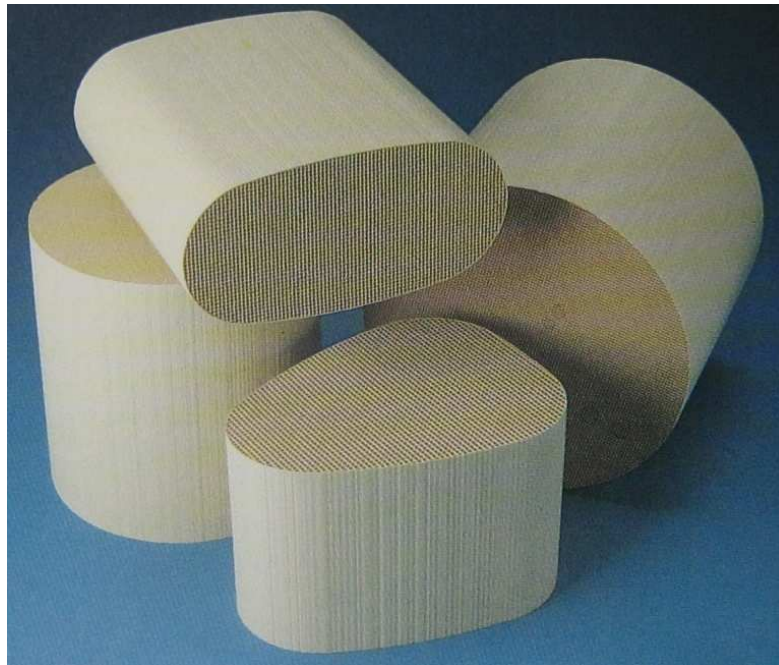
### 2.3.2.2 Cerámicos

Los monolitos pueden ser construidos con materiales cerámicos. Este tipo de material permite la obtención de diferentes formas de los monolitos por el proceso de extrusión. Dentro de los cerámicos se tiene los siguientes materiales con mayor frecuencia de uso para la construcción de estos elementos.

**Tabla 2.3-2** Materiales utilizados en la preparación de monolitos<sup>4,9</sup>

Material	Composición	Máxima temperatura °C	Coefficiente de expansión térmica (0 a 1000°C), °C <sup>-1</sup>
Alúmina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1800	8.8 x 10 <sup>-6</sup>
Sílice	SiO <sub>2</sub>		
Dióxido de titanio	TiO <sub>2</sub>		
Zirconia	ZrO <sub>2</sub>		
Carburo de Silicio	SiC		
Nitruro de silicio	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>		
Carbón Activado	C		
Aluminato de Magnesio	MgO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Zeolita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub>		
Cordierita	2MgO·2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5SiO <sub>2</sub>	1350	1.1 x 10 <sup>-6</sup>
Alúmina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1800	8.8 x 10 <sup>-6</sup>
Mullita	3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>	1650	4.2 x 10 <sup>-6</sup>
Sepiolita	3SiO <sub>2</sub> ·2MgO		
Silicato de litio-aluminio	Li <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·4SiO <sub>2</sub>	1300	0.6 x 10 <sup>-6</sup>
Titanato de Aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·TiO <sub>2</sub>	1700	0.8 x 10 <sup>-6</sup>

En la tabla se muestran algunos materiales que son utilizados en la preparación de monolitos. En algunos casos se emplean mezclas como son los casos de cordierita-mullita, aluminato de magnesio-zirconia, etc. Con polvo de estos materiales se forman unas pastas o barros a los que se pueden incorporar plastificantes, aglomerantes temporales y permanentes, gelificantes, lubricantes, etc., para facilitar su conformado y mejorar las propiedades mecánicas y texturales del producto terminado.



**Figura N°2.3-4** Monolitos cerámicos<sup>4</sup>

### **2.3.3 FORMA EXTERNA**

La forma es independiente de cada aplicación. Las formas más comunes de los monolitos son:

- Circular
- Elipsoidal

- Cuadrada
- Hexagonal
- Triangular



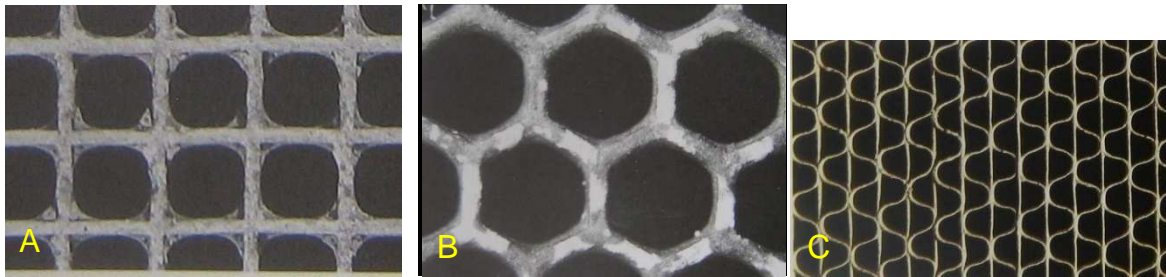
**Figura N° 2.3-5** Forma externa de monolitos para aplicaciones determinadas<sup>4</sup>

#### 2.3.4 CANALES

La sección transversal de los canales puede tener forma circular, hexagonal, rectangular, triangular o sinusoidal, de las cuales los más comunes son los de forma cuadrada en el caso de cerámicos y sinusoidal en los monolitos metálicos.

El número de canales o celdas por unidad de superficie de la sección transversal está comprendido entre 1-100 celdas/cm<sup>2</sup>, con espesores de pared que varía entre 0,15 y 2.5 mm dependiendo del proceso que se va a aplicar<sup>9</sup>.





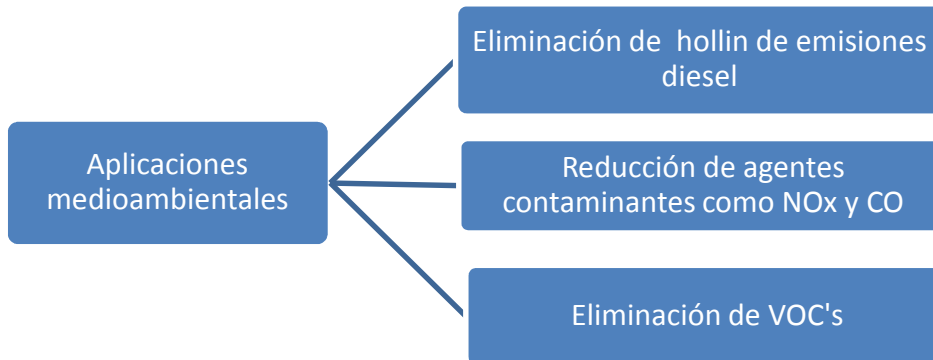
**Figura N° 2.3-6 A.** Sección cuadrada. **B.** Sección hexagonal. **C.** Sección sinusoidal<sup>9</sup>

Por ejemplo, el objetivo principal en las aplicaciones a automóviles es reducir el espacio ocupado por el catalizador, por lo que se ha ido aumentando la densidad de celda hasta alcanzar valores de 140 celdas/cm<sup>2</sup> con monolitos de cordierita. Algunos monolitos metálicos se han preparado con una densidad de celda de 155 celdas/cm<sup>2</sup> de sección transversal, preparados a partir de placas de acero corrugado sobre el que se coloca el recubrimiento, antes de ser enrollados sobre sí mismos para preparar el monolito.

Se debe tomar en cuenta para la elección de la densidad de celda el tipo de material particulado que está presente en la corriente de gas, ya que si la densidad es muy pequeña se puede tener taponamientos del monolito. Así mismo se debe considerar que la forma de la celda afecta en los fenómenos de transferencia de calor y de materia.

## **2.4 APLICACIONES DE LOS MONOLITOS EN REACTORES CATALÍTICOS**

Los catalizadores estructurados -o monolitos catalíticos- se pueden utilizar para tratar efluentes de combustión gaseosos y también efluentes líquidos. El objetivo de su empleo es reducir la concentración de algún compuesto nocivo antes de descargar el efluente al medioambiente.



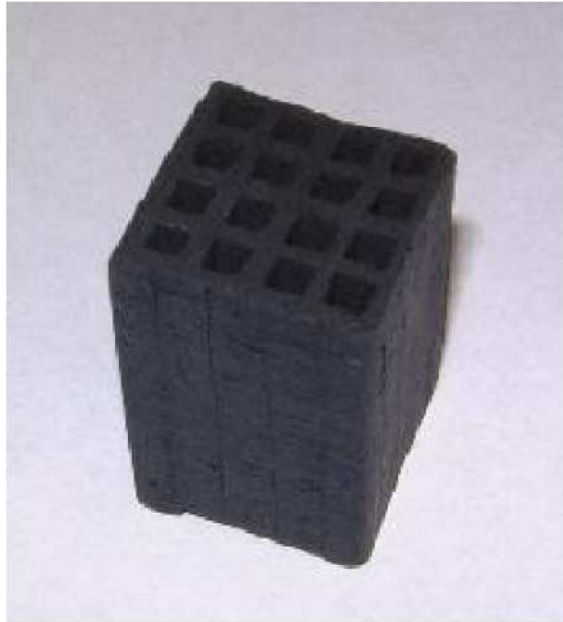
**Figura N°2.4-1** Aplicaciones de monolitos en el control medioambiental

Se puede realizar una clasificación de los monolitos de acuerdo a su utilización, la cual los cataloga en monolitos para fuentes fijas y fuentes móviles. Entre los monolitos de fuentes fijas se tienen los que se utilizan en la industria como lechos de tratamiento de efluentes líquidos o gaseosos, y para fuentes móviles como convertidores catalíticos de autos. Para objeto de este estudio de las aplicaciones de los monolitos, no se realiza ninguna clasificación, únicamente se detallan.

#### **2.4.1 MONOLITOS DE CARBÓN ACTIVADO<sup>11</sup>**

Estos monolitos son usados en aplicaciones como almacenamiento de gas para disminuir los espacios entre las partículas y optimizar la capacidad de adsorción del carbón activado. Estos monolitos tienen la ventaja sobre el carbón activado normal ya que generan una menor pérdida de presión en flujos de aire y de líquidos.





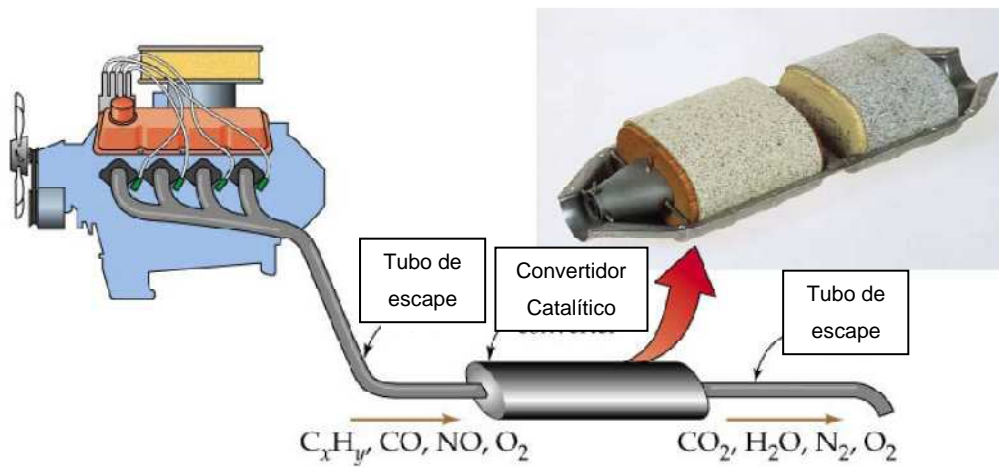
**Figura N°2.4-2.** Monolito de carbón activado<sup>11</sup>

#### **2.4.2 CONVERTIDORES CATALÍTICOS PARA AUTOS**

Los gases de escape de los vehículos son una importante fuente de contaminación, especialmente en las grandes ciudades, donde el número de vehículos tiende a aumentar día a día. Por este motivo y como aporte a las soluciones de la problemática de la contaminación ambiental, se han desarrollado dispositivos denominados catalizadores, o convertidores catalíticos

La utilización de elementos que permitan obtener una reducción en las emisiones contaminantes en los autos han sido desarrollados, estos elementos denominados convertidores catalíticos, son monolitos con una forma determinada. En estos monolitos se encuentran impregnados elementos que permiten la adsorción de los elementos contaminantes, permitiendo una disminución de los mismos.

En la actualidad se han desarrollado sistemas catalíticos de una o dos fases, permitiendo una mayor retención de los contaminantes.



**Figura N° 2.4-3** Esquema de monolito de dos fases<sup>10</sup>

El propósito del convertidor catalítico de un auto es remover los indeseados gases contaminantes - monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) - desde el escape de gases son convertidos estos por reacciones químicas a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O) y nitrógeno (N<sub>2</sub>).



**Figura N° 2.4-4** Sección de convertidor catalítico

### 2.4.3 CONVERTIDORES CATALÍTICOS EN LA INDUSTRIA

En los procesos industriales se utilizan los monolitos en procesos de filtración de aire y de agua. Se utilizan lechos de filtración, los cuales comprenden una cantidad de monolitos uniformemente distribuidos en secciones y capas.

Estas secciones son apiladas para aumentar la superficie de contacto con el flujo, permitiendo reducir los agentes contaminantes presentes en el fluido por un proceso de adsorción.

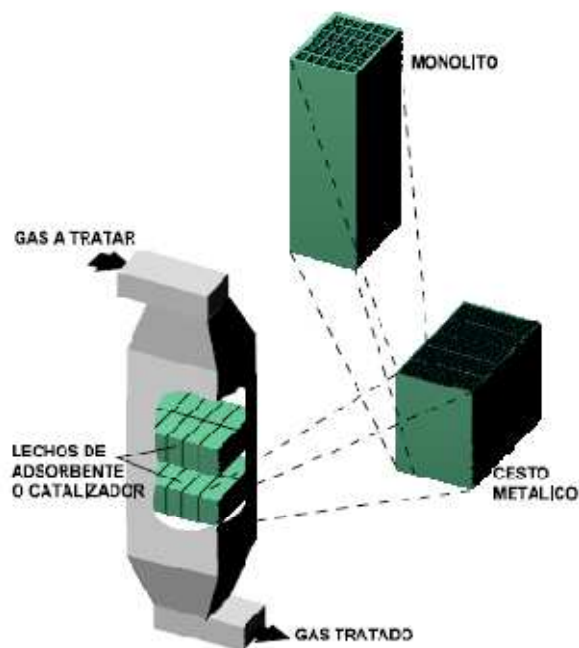


Figura N°2.4-5 Distribución de monolitos en lechos catalizadores<sup>9</sup>

## **CAPITULO 3**

# **DISEÑO DE MATRIZ Y PRENSA PARA LA FABRICACIÓN DEL MONOLITO PROTOTIPO**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

La matriz de extrusión es la parte fundamental del sistema, ya que ésta permite obtener la forma final del elemento llamado monolito con la forma y dimensión predeterminada, de ahí la importancia del diseño de este elemento.

### **3.2 ESPECIFICACIONES INICIALES**

#### **3.2.1 FORMA Y DIMENSIÓN DE LA CELDA UNITARIA**

##### **3.2.1.1 Forma de la celda unitaria**

Existe una variedad de formas en las celdas unitarias de los monolitos, pero una de las formas más eficientes para la impregnación del catalizador y de menor complejidad en su construcción, es la celda de forma cuadrada.

##### **3.2.1.2 Dimensión de la celda unitaria**

Por la complejidad en la construcción se establece un tamaño de celda acorde a la tecnología de construcción que actualmente se encuentra en el país, por lo tanto se estable las siguientes dimensiones

- **Ancho: 2 mm**
- **Largo: 2 mm**
- **Espesor de pared: 2 mm**

Por las condiciones de construcción y su complejidad se establece un ancho de pared de 2 mm, ya que el proceso de conformado mecánico de la matriz para un espesor menor sería demasiado costoso y complicado.

### 3.2.2 FORMA Y DIMENSIÓN EXTERNA

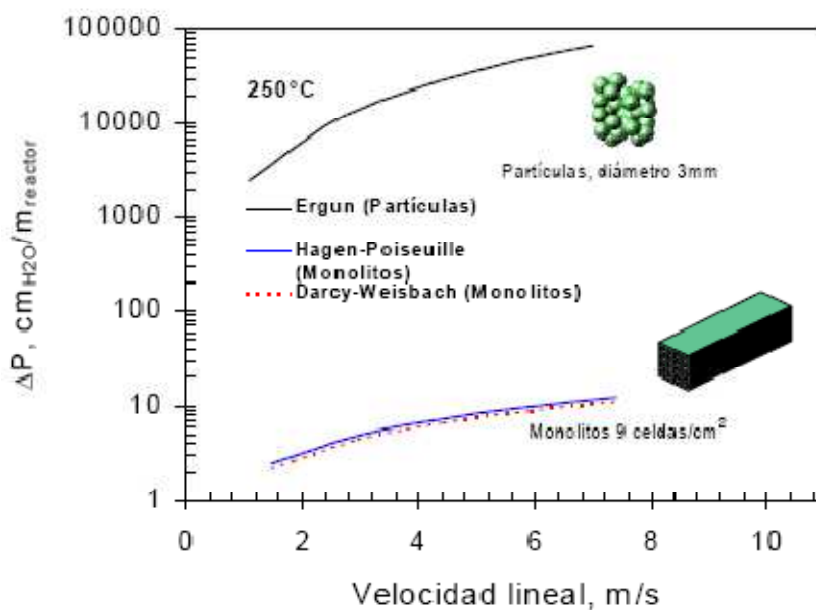
Existe una variedad de formas y tamaños de los monolitos, las mismas que dependen de la necesidad de la forma, tamaño y capacidad de los reactores catalíticos y de las centrales de filtración. Dependiendo la aplicación por ejemplo se pueden encontrar de forma redonda u ovalada para aplicaciones en reactores catalíticos de vehículos y cuadrada, triangular y hexagonal cuando se encuentran empaquetados<sup>9</sup>.

En este caso existe la necesidad de cubrir un requerimiento con las siguientes características:

- **Forma:** Cuadrangular
- **Dimensiones:** 20 mm de ancho, 20 mm de largo y 50 mm de profundidad. Estas medidas pueden variar un porcentaje máximo de 10%

### 3.2.3 DENSIDAD DE CELDA

La densidad de celda está limitada por algunos factores entre los cuales son: la tecnología en el medio para la construcción de la matriz y, la pérdida de carga que se produce cuando un flujo atraviesa longitudinalmente el monolito. En la figura 3.2-1 se muestra una comparación de la pérdida de carga producida por convertidores catalíticos con medios esféricos y con medios monolíticos.



**Figura N°3.2-1** Comparación del valor de pérdida de carga para un catalizador monolítico y un catalizador conformado con esferas de superficie geométrica equivalente<sup>9</sup>

El factor tecnología juega un papel importante, ya que se puede elegir una densidad de celda muy alta, aunque no se pueda construir una matriz para su extrusión. La distribución de las celdas debe ser uniforme. La tabla muestra las diferentes combinaciones posibles que se puede obtener con los datos establecidos para la celda unitaria.

**Tabla 3.2-1** Tabla de configuraciones de celdas y dimensiones de monolitos

Celda Unitaria		Distribución	Cantidad de celdas	Ancho de pared	Dimensión monolito		Densidad de celda
Ancho	Largo				Ancho	Largo	
mm				mm	Mm		celdas/cm <sup>2</sup>
2	2	2 x 2	4	2	10	10	4
2	2	3 x 3	9	2	14	14	4,6
2	2	4 x 4	16	2	18	18	4,9
2	2	5 x 5	25	2	22	22	5,2
2	2	6 x 6	36	2	26	26	5,3

Por lo tanto y por lo expuesto se establece una densidad de celda de 5 celdas por  $\text{cm}^2$ .

### 3.2.4 DIMENSIONES DE DISEÑO

Las dimensiones de diseño para la matriz extrusora se resumen en la Tabla 3.2-2.

**Tabla 3.2-2** Tabla de resumen de dimensiones de diseño para el diseño de la matriz extrusora.

<b>Celda Unitaria</b>	<b>Forma:</b> Cuadrangular
	<b>Ancho x largo</b> 2 x 2 mm
	<b>Ancho de pared:</b> 2 mm
<b>Monolito</b>	<b>Densidad de celda:</b> 5 celdas/ $\text{cm}^2$
	<b>Forma:</b> Cuadrada
	<b>Dimensiones externas:</b> Ancho x largo x profundidad 22 x 22 x 50 mm

### 3.2.5 CARACTERÍSTICA DEL FLUIDO<sup>14</sup>

El comportamiento de fluido está determinado por el comportamiento del mismo frente a un esfuerzo externo por lo tanto, se define como fluido Newtoniano cuando el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la tasa de deformación, mientras que se define como fluido no Newtoniano a aquellos fluidos

en los cuales el esfuerzo de corte no es directamente proporcional a la relación de deformación.

El comportamiento de mezclas pastosas y de masas es característico de un fluido No Newtoniano.

Los fluidos No Newtonianos se los puede clasificar con respecto a su comportamiento en el tiempo, es decir pueden ser dependientes o independientes del tiempo.

#### **3.2.5.1 Fluidos no newtonianos independientes del tiempo**

- **Fluidos Seudoplásticos.-** La viscosidad aparente disminuye con el aumento de la relación de deformación.
- **Fluidos Dilatantes.-** Cuando la viscosidad aparente aumenta con el incremento de la relación de deformación.
- **Fluidos plástico de Bingham o ideal.-** Fluido que se comporta como un sólido hasta que se excede un esfuerzo de deformación.

#### **3.2.5.2 Fluidos no newtonianos independientes dependientes del tiempo**

- **Fluidos Thixotrópicos.-** muestran una reducción de la viscosidad aparente con el tiempo ante la aplicación de esfuerzo de corte constante.
- **Fluido Reopéticos.-** Muestran un aumento de la viscosidad aparente con el tiempo.
- **Fluidos viscoelásticos.-** Después de la deformación algunos fluidos regresan a su forma original cuando se libera el esfuerzo aplicado



Se establece para el cálculo del número de Reynolds que el fluido es un FLUIDO NO NEWTONIANO y se lo cataloga como un FLUIDO PLÁSTICO DE BINGHAM O IDEAL.

### 3.2.6 REOLOGÍA DEL FLUIDO

La reología intenta definir la relación entre el esfuerzo aplicado sobre un material y la deformación o flujo resultante. El valor del esfuerzo planteado es una aproximación de un modelo ya planteado y semejante al establecido en este estudio

## 3.3 DESARROLLO DE ECUACIONES PARA DISEÑO DE CABEZA EXTRUSORA<sup>10</sup>

### 3.3.1 CÁLCULO DEL ÁNGULO ÓPTIMO

Para coordenadas esféricas ( $r, \varphi, \theta$ ), las componentes de velocidad son:

$$\dot{U}_r = v = -v_f \cdot r_f^2 \cdot \left( \frac{\cos \theta}{r^2} \right) \quad [3.1]$$

$$\dot{U}_\theta = \dot{U}_\varphi = 0$$

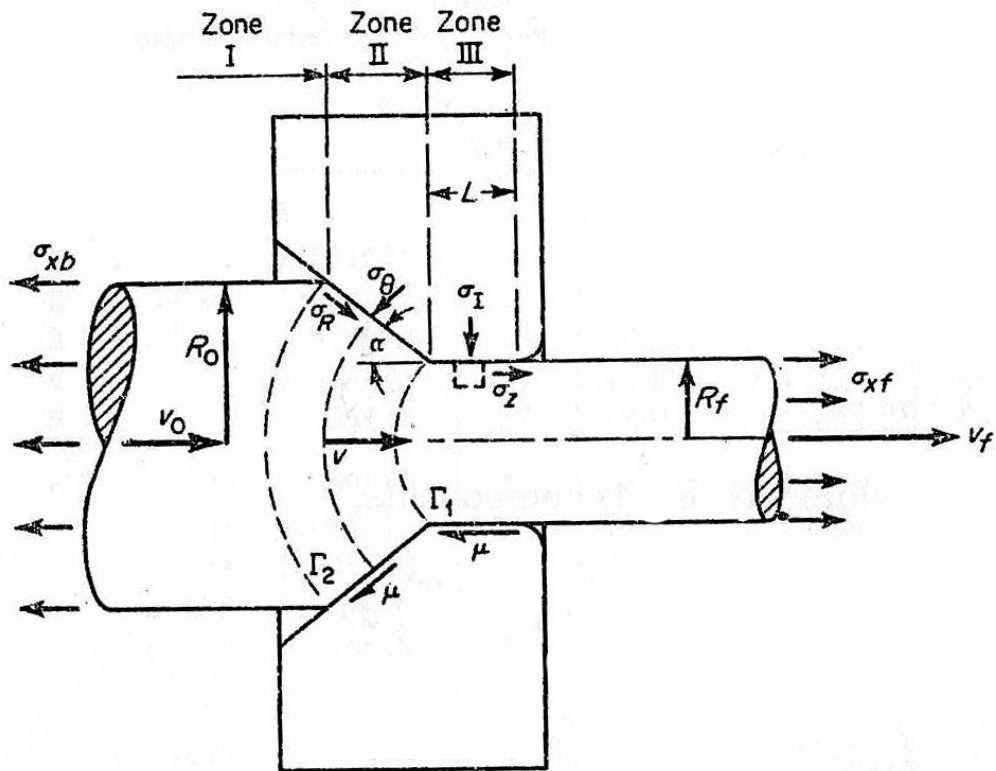


Figura N° 3.3-1 Diagrama de esfuerzos en el proceso de extrusión<sup>10</sup>

Para las regiones se tiene:

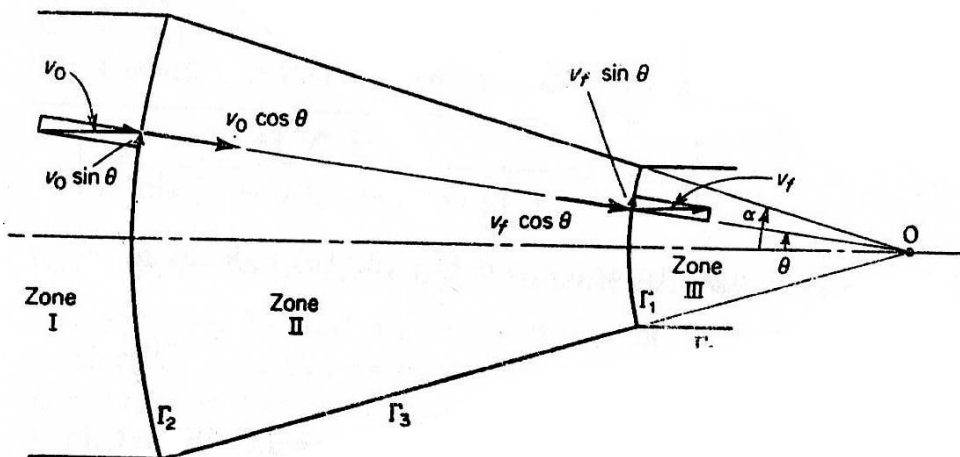


Figura N° 3.3-2 Diagrama de velocidad en el proceso de extrusión<sup>10</sup>

$$\Gamma_1 : \Delta_v = v_f \cdot \sin \theta \quad [3.2]$$

$$\Gamma_2 : \Delta_v = v_0 \cdot \sin \theta = v_f \left( \frac{R_f^2}{R_0^2} \right) \sin \theta \quad [3.3]$$

$$\Gamma_3 : \Delta_v = v_f \cdot r_f^2 \left( \frac{\cos \alpha}{r^2} \right) \quad [3.4]$$

$$\Gamma_4 : \Delta_v = v_f \quad [3.5]$$

Estudio en la zona III:

$$R = r_f \cdot \sin \theta$$

$$dR = r_f \cdot \cos \theta \cdot d\theta$$

$$\dot{V} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot dR \cdot v_f = 2 \cdot \pi \cdot v_f \cdot r_f^2 \cdot \sin \theta \cos \theta \cdot d\theta \quad [3.6]$$

Estudio en la zona II:

$$\dot{V} = -2\pi \cdot r \cdot \sin \theta \cdot r \cdot d\theta \left( -v_f \cdot r_f^2 \frac{\cos \theta}{r^2} \right) = -2\pi \cdot r \cdot \sin \theta \cdot r \cdot d\theta \cdot \dot{U}_r \quad [3.7]$$

Reemplazando la EC 3.6 en la EC 3.7

$$U_r = -v_f \cdot r_f^2 \left( \frac{\cos \theta}{r^2} \right) \quad [3.8]$$

La energía está definida como:

$$\dot{W}_f = - \int_{st} T_i \cdot v_i \cdot ds = -\pi \cdot v_f \cdot R_f^2 \cdot \sigma_{xf} \quad [3.9]$$

$$\dot{W}_b = - \int_{st} T_i \cdot v_i \cdot ds = \pi \cdot v_0 \cdot R_0^2 \cdot \sigma_{xb} \quad [3.10]$$

La Energía Interna de deformación está definida por la ecuación:

$$\dot{W}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_0 \int_V \sqrt{1/2 \cdot \dot{\xi}_{ij} \cdot \dot{\xi}_{ij}} \cdot dV \quad [3.11]$$

Donde:

$$\dot{\xi}_{rr} = -2\dot{\xi}_{\theta\theta} = 2 \cdot v_f \cdot r_f^2 \left( \frac{\cos \theta}{r^3} \right) \quad [3.12]$$

$$\dot{\xi}_{r\theta} = \frac{1}{2} \cdot v_f \cdot r_f^2 \left( \frac{\sin \theta}{r^3} \right) \quad [3.13]$$

$$\dot{\xi}_{\theta\varphi} = \dot{\xi}_{r\varphi} = 0 \quad [3.14]$$

Reemplazando las ECs 3.11 y 3.12 en la ecuación EC 3.10 se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{W}_i &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_0 \int_V v_f \cdot r_f^2 \frac{1}{r^3} \sqrt{3 \cos^2 \theta + \frac{1}{4} \sin^2 \theta} \cdot dV \\ \dot{W}_i &= 2 \cdot \sigma_0 \cdot v_f \cdot r_f^2 \int_V \frac{1}{r^3} \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \theta} \cdot dV \end{aligned} \quad [3.15]$$

Derivando el volumen se tiene

$$dV = 2\pi \cdot r \cdot \sin \theta \cdot r \cdot d\theta \cdot dr \quad [3.16]$$

Reemplazando la EC 3.16 en la EC 3.15 se tiene:

$$\dot{W}_i = 4\pi \cdot \sigma_0 \cdot v_f \cdot r_f^2 \int_{\theta=0}^{\alpha} \left( \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \theta} \cdot \sin \theta \int_{r=r_f}^{r_0} \frac{dr}{r} \right) d\theta$$

$$\dot{W}_i = 4\pi \cdot \sigma_0 \cdot v_f \cdot r_f^2 \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_f}\right) \int_{\theta=0}^{\alpha} \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \theta} \cdot \sin \theta \, d\theta$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_i &= 2\pi \cdot \sigma_0 \cdot v_f \cdot r_f^2 \\ &\cdot \left( 1 - \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{11}{12} \cdot \sin^2 \alpha} + \frac{1 - 11/12}{\sqrt{11/12}} \right. \\ &\cdot \left. \ln \frac{1 + \sqrt{11/12}}{\sqrt{11/12} \cos \alpha + \sqrt{1 - 11/12 \cdot \sin^2 \theta}} \right) \ln\left(\frac{r_0}{r_f}\right) \end{aligned} \quad [3.17]$$

Donde:

$$\frac{r_0}{r_f} = \frac{R_0}{R_f} \quad y \quad r_f = \frac{R_f}{\sin \alpha} \quad [3.18]$$

Reemplazando la EC 3.18 en la EC 3.17 se tiene que:

$$\dot{W}_i = 2\pi \cdot \sigma_0 \cdot v_f \cdot R_f^2 \cdot f(\alpha) \cdot \ln \frac{R_0}{R_f} \quad [3.19]$$

$$\begin{aligned} f(\alpha) &= \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left( 1 - \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{11}{12} \cdot \sin^2 \alpha} + \frac{1}{\sqrt{11 \cdot 12}} \right. \\ &\cdot \left. \ln \frac{1 + \sqrt{11/12}}{\sqrt{11/12} \cos \alpha + \sqrt{1 - 11/12 \cdot \sin^2 \theta}} \right) \end{aligned} \quad [3.20]$$

### Discontinuidad de la velocidad y factor de fricción

Al lado izquierdo de  $\Gamma_1$ , la componente de la velocidad normal a  $\Gamma_1$  es  $|\dot{U}_r| = v_f \cdot \cos \theta$ , la componente de la velocidad axial  $v_f$  en la zona III normal a la superficie  $\Gamma_1$  es la misma  $v_f \cdot \cos \theta$ . Paralelo a estas superficies  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$ , la

componente de la velocidad no es necesariamente igual. Esta diferencia es llamada velocidad discontinua y es calculada en magnitud en cada región por  $\Delta v$ .

Se define que, las superficies  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  son superficies de velocidad discontinua

La energía consumida a lo largo de estas superficies se define por:

$$\dot{W}_{S_{1,2}} = \int_{\Gamma_1 \Gamma_2} \tau \cdot \Delta v \cdot ds = \int_{\Gamma_1} \tau \cdot \Delta v \cdot dA + \int_{\Gamma_2} \tau \cdot \Delta v \cdot dA \quad [3.21]$$

Donde:

$$\tau = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad [3.22]$$

Entonces se reemplaza la EC 3.22 en la EC 3.21 y se tiene

$$\begin{aligned} \dot{W}_{S_{1,2}} &= 4\pi \cdot v_f \cdot r_f^2 \cdot \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_{\theta=0}^{\alpha} \sin^2 \theta \cdot d\theta \\ \dot{W}_{S_{1,2}} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \cdot \pi \cdot v_f \cdot r_f^2 [\alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha] \\ \dot{W}_{S_{1,2}} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \cdot \pi \cdot v_f \cdot R_f^2 \left( \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \quad [3.23] \end{aligned}$$

Para la porción cónica de la superficie  $\Gamma_3$ , se tiene una velocidad discontinua:

$$\Delta v = v_f \cdot \frac{r_f^2}{r^2} \cdot \cos \alpha = v_f \left( \frac{R_f^2}{R^2} \right) \cos \alpha \quad [3.4]$$

$$ds = 2\pi R \cdot \frac{dR}{\sin \alpha} \quad [3.24]$$

Y si la constante de fricción es asumida como  $m$  se tiene:

$$\tau = m \cdot \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad [3.25]$$

De la EC 3.21 las pérdidas por fricción en  $\Gamma_3$  son:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{S_3} &= \int_{\Gamma_3} \tau \cdot \Delta v \cdot ds = \int_{R=R_f}^{R_0} \frac{2\pi R}{\sin \alpha} \cdot v_f \cdot \left(\frac{R_f}{R}\right)^2 (\cos \alpha) \cdot m \cdot \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \cdot dR \\ \dot{W}_{S_3} &= 2\pi \cdot v_f R_f^2 (\cot \alpha) \cdot m \cdot \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_{R=R_f}^{R_0} \frac{dR}{R} \\ \dot{W}_{S_3} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \cdot \pi \cdot m \cdot v_f \cdot R_f^2 (\cot \alpha) \cdot \ln \frac{R_0}{R_f} \quad [3.26] \end{aligned}$$

La energía consumida en la superficie cilíndrica  $\Gamma_4$  de la EC 3.21, tomando en cuenta un factor de fricción constante es:

$$\dot{W}_{S_4} = \int_{\Gamma_4} \tau \cdot \Delta v \cdot ds = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \cdot \pi \cdot m \cdot v_f \cdot R_f \cdot L \quad [3.27]$$

La energía total consumida a lo largo de las superficies de discontinuidad está dada por la relación:

$$\begin{aligned} \dot{W}_S &= \dot{W}_{S_{1,2}} + \dot{W}_{S_3} + \dot{W}_{S_4} \\ \dot{W}_S &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \cdot \pi \cdot m \cdot v_f \cdot R_f^2 \left[ \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha + m \cdot (\cot \alpha) \ln \left( \frac{R_0}{R_f} \right) + m \cdot \frac{L}{R_f} \right] \quad [3.28] \end{aligned}$$

El esfuerzo aplicado es obtenido a través de las ecuaciones de  $\dot{W}_b, \dot{W}_f, \dot{W}_i, \dot{W}_S$ , donde se obtiene la relación:

$$\begin{aligned} \dot{W}_b &= -\dot{W}_f - \dot{W}_i - \dot{W}_S \\ \pi \cdot v_0 \cdot R_0^2 \cdot \sigma_{xb} &= \pi \cdot v_f \cdot R_f^2 \cdot \sigma_{xf} - 2\pi \cdot \sigma_0 \cdot v_f \cdot R_f^2 \cdot f(\alpha) \cdot \ln \frac{R_0}{R_f} - \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \cdot \pi \\ &\quad \cdot m \cdot v_f \cdot R_f^2 \left[ \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha + m \cdot (\cot \alpha) \ln \left( \frac{R_0}{R_f} \right) + m \cdot \frac{L}{R_f} \right] \\ \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0} &= \frac{\sigma_{xf}}{\sigma_0} - 2f(\alpha) \cdot \ln \frac{R_0}{R_f} \\ &\quad - \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha + m \cdot (\cot \alpha) \ln \left( \frac{R_0}{R_f} \right) + m \cdot \frac{L}{R_f} \right] \quad [3.29] \end{aligned}$$

Para la estimación del ángulo óptimo se puede obtener a partir de la derivación de la relación  $\frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0} \right) = 0$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} [f(\alpha)] \ln \frac{R_0}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left[ \left( 1 - \frac{\alpha \cdot \cos \alpha}{\sin \alpha} \right) - \frac{1}{2} m \cdot \ln \frac{R_0}{R_f} \right] &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial \alpha} [f(\alpha)] &= \frac{2}{\sin \alpha} \left[ \sqrt{1 - 11/12 \sin^2 \alpha} - \cos \alpha f(\alpha) \right] \quad [3.30] \end{aligned}$$

Insertando la relación  $\frac{\partial}{\partial \alpha} [f(\alpha)]$  EC 3.30 y dividiendo para  $\sin^2 \alpha$  se tiene:

$$\begin{aligned} 2 \sin \alpha \left[ \sqrt{1 - 11/12 \sin^2 \alpha} - \cos \alpha f(\alpha) \right] \ln \frac{R_0}{R_f} + \\ + \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2(1 - \alpha \cdot \cot \alpha) - m \cdot \ln \frac{R_0}{R_f} \right] &= 0 \quad [3.31] \end{aligned}$$



$$\alpha \cdot \cot \alpha = \frac{\alpha \cdot \cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{\alpha}{\alpha - \alpha^3/3! + \alpha^5/5! - \alpha^7/7! + \dots} \left( 1 - \frac{\alpha^2}{2!} + \frac{\alpha^4}{4!} - \frac{\alpha^6}{6!} + \dots \right)$$

$$= \frac{1 - \alpha^2/2! + \alpha^4/4! - \alpha^6/6! + \dots}{1 - \alpha^2/3! + \alpha^4/5! - \alpha^6/7! + \dots}$$

$$\frac{\alpha \cdot \cos \alpha}{\sin \alpha} = 1 - \frac{1}{3}\alpha^2 - \frac{1}{45}\alpha^4 - \dots \quad [3.32]$$

Donde

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} [f(\alpha)] = 0 \quad [3.33]$$

Y tomando solo dos de los valores en la aproximación de  $\frac{\alpha \cdot \cos \alpha}{\sin \alpha}$  y reemplazando las ECs 3.32 y 3.33 en EC 3.31 se tiene:

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left[ \left( 1 - 1 + \frac{1}{3}\alpha^2 \right) - \frac{1}{2} m \cdot \ln \frac{R_0}{R_f} \right] = 0$$

$$(\alpha^2) = \frac{3}{2} m \cdot \ln \frac{R_0}{R_f}$$

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{3}{2} m \cdot \ln \frac{R_0}{R_f}} \quad [3.34]$$

Este ángulo obtenido es muy pequeño, se encuentra en magnitudes cercanas a 2 grados, ya que para obtener esfuerzos pequeños la conicidad del elemento extrusor debe tender a valores cercanos a cero.

La ecuación para la obtención del valor de  $T$  es:

$$T = \frac{R_0 - R_f}{\tan \alpha_{opt}} = \frac{R_0 - R_f}{\tan \sqrt{\frac{3}{2} m \cdot \ln \frac{R_0}{R_f}}} \quad [3.35]$$

### 3.3.2 ESFUERZO DE EXTRUSIÓN

Para determinar el esfuerzo necesario para la extrusión, es necesario introducir en el diagrama de cuerpo libre el esfuerzo cortante presente en las paredes inclinadas de la cabeza extrusora. Esta es una aproximación con la fricción de COULOMB. En la figura N° 3.3-3 se propone el diagrama de cuerpo libre para este análisis.

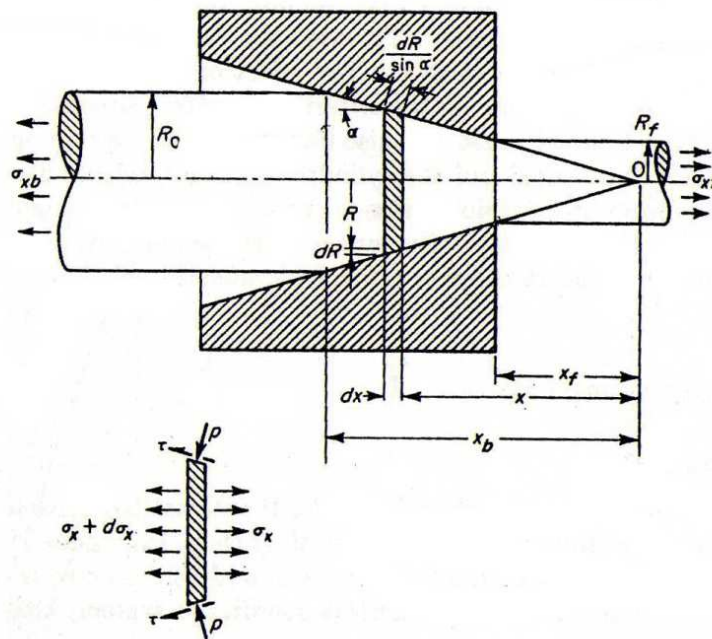


Figura N° 3.3-3 Diagrama de cuerpo Libre<sup>10</sup>

Se asume que el esfuerzo  $\sigma_x$  sobre la sección transversal se encuentra uniformemente distribuido, este es normal a la superficie y no posee componente

del esfuerzo de corte. En la superficie cónica de la cabeza extrusora, la presión “ $p$ ” es normal a la superficie y existe el cortante  $\tau$  paralela a la superficie.

La suma de fuerzas actuando en el cuerpo libre debe ser cero.

La suma de las fuerzas es la dirección  $x$  es:

$$\begin{aligned} & (\sigma_x + d\sigma_x)\pi(R + dR)^2 - \sigma_x \cdot \pi \cdot R^2 \\ & = \pi R(Rd\sigma_x + 2 \cdot d\sigma_x \cdot dR) + \\ & + \pi \cdot dR(Rd\sigma_x + \sigma_x \cdot dR + d\sigma_x \cdot dR) \end{aligned} \quad [3.36]$$

La componente normal de la presión en la cabeza extrusora en la dirección  $x$  es:

$$2 \cdot \pi \cdot R \frac{dR}{\sin \alpha} \cdot p \cdot \sin \alpha = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot dR \quad [3.37]$$

La componente del esfuerzo cortante en la dirección  $x$  es:

$$2 \cdot \pi \cdot R \frac{dR}{\sin \alpha} \cdot \tau \cdot \cos \alpha = 2 \cdot \pi \cdot \tau \cdot \cot \alpha \cdot R \cdot dR \quad [3.38]$$

Realizando la suma de las fuerzas Ecs 3.36, 3.37 y 3.38 se tiene:

$$Rd\sigma_x + 2 \cdot \sigma_x \cdot dR + 2dR(p + \tau \cdot \cot \alpha) = 0 \quad [3.39]$$

Se asume el coeficiente de fricción de Coulomb entre el material a ser extruido y el metal se tiene un esfuerzo cortante:

$$\tau = \mu \cdot p$$

Reemplazando  $\tau$  en la ecuación se tiene:

$$Rd\sigma_x + 2 \cdot \sigma_x \cdot dR + 2 \cdot p \cdot dR \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha}\right) = 0 \quad [3.40]$$

Para ángulos de cono  $\alpha$  muy pequeños se asume que  $p$  es aproximadamente normal a la dirección del esfuerzo  $\sigma_x$ , lo cual conlleva a considerar a  $p$  y  $\sigma_x$  como esfuerzos principales, aplicando el criterio de von Mises se tiene:

$$\sigma_x + p = \sigma_0 \quad [3.41]$$

Se define a:

$$B = \frac{\mu}{\tan \alpha} \quad [3.42]$$

Reemplazando la EC 3.42 en EC 3.40 se tiene

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_x}{\sigma_x \cdot B - \sigma_0(1+B)} &= \frac{2 \cdot dR}{R} \\ \int \frac{d\sigma_x}{\sigma_x \cdot B - \sigma_0(1+B)} &= \int \frac{2 \cdot dR}{R} \\ \frac{1}{B} \cdot \ln[\sigma_x B - \sigma_0(1+B)] &= 2 \cdot \ln(CR) \end{aligned}$$

Donde C es la constante de integración. Resolviendo para  $\sigma_x$  :

$$\sigma_x = \frac{CR^{2B}}{B} + \frac{1+B}{B} \sigma_0 \quad [3.43]$$

$$\sigma_x|_{x=x_f} = \sigma_{x_f} \quad y \quad R = R_f$$

$$\sigma_{x_f} = \frac{CR_f^{2B}}{B} + \frac{1+B}{B} \sigma_0$$

$$C = \frac{B}{R_f^{2B}} \left( \sigma_{x_f} - \frac{1+B}{B} \sigma_0 \right) \quad [3.44]$$

Reemplazando la EC 3.44 en la EC 3.43 se tiene

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_0} = \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{R}{R_f} \right)^{2B} \right] + \frac{\sigma_{x_f}}{\sigma_0} \left( \frac{R}{R_f} \right)^{2B} \quad [3.45]$$

Para  $x = x_b$  y  $R = R_0$

$$\frac{\sigma_{x_b}}{\sigma_0} = \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{R_0}{R_f} \right)^{2B} \right] + \frac{\sigma_{x_f}}{\sigma_0} \left( \frac{R_0}{R_f} \right)^{2B} \quad [3.46]$$

Para el caso de la extrusión el esfuerzo  $\sigma_{x_f}$  es cero lo que reduce la expresión a

$$\frac{\sigma_{x_b}}{\sigma_0} = \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{R_0}{R_f} \right)^{2B} \right]$$

$$P_p = \sigma_{x_b} = \frac{1+B}{B} \cdot \sigma_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{R_0}{R_f} \right)^{2B} \right] \quad [3.47]$$

Donde  $P_p$  es la presión necesaria para vencer los esfuerzos de corte del fluido a través de la del sistema extrusor para obtener la forma requerida del monolito.

La presión de extrusión  $P_p$  necesaria para realizar el proceso de extrusión se obtiene a partir de las siguientes relaciones:

$$r_x = \frac{R_0}{R_f} \quad [3.48]$$

Donde  $r_x$  es la relación de extrusión.

Para determinar el esfuerzo real en la extrusión, dado que la deformación ideal ocurre sin fricción:

$$\varepsilon = \ln r_x \quad [3.49]$$

Bajo la suposición de deformación ideal la presión del pistón puede obtenerse de la siguiente ecuación:

$$P_p = \sigma_o \cdot \varepsilon \quad [3.50]$$

Donde el esfuerzo  $\sigma_o$  es el esfuerzo a la fluencia del material

La extrusiones un proceso con fricción entre el material y el elemento extrusor, la presión real es mayor que la que se obtendría por la ecuación que supone extrusión sin fricción.

Una ecuación empírica propuesta por Johnson estima la deformación como sigue:

$$\varepsilon = a + b \cdot \ln r_x \quad [3.51]$$

a y b son constantes empíricas para el ángulo dado. Los valores típicos de estas constantes son:

$$a = 0,8 \quad b = 1,2 \text{ a } 1,5$$

El efecto de la fricción entre las paredes del recipiente y el material a extruir ocasiona que la presión del pistón sea más grande. Se puede realizar la aproximación de la siguiente manera:

$$\frac{P_f \cdot \pi \cdot D_o^2}{4} = \mu \cdot P \cdot \pi \cdot D_o \cdot L \quad [3.52]$$

Donde:

$P_f$ : presión adicional requerida para superar la fricción

$\frac{\pi \cdot D_o^2}{4}$ : Área de la sección transversal del fluido

$\mu$  : Coeficiente de fricción en la pared del recipiente.

$P$ : Presión del fluido contra la pared del contenedor

$\pi \cdot D_o \cdot L$ : Área de la interface entre el fluido y la pared del recipiente

El esfuerzo de fricción iguala a la resistencia a la fluencia cortante del material es cuando ocurre la adherencia a la pared del recipiente el material, por lo tanto:

$$Y_s \cdot \pi \cdot D_o \cdot L = \mu \cdot P \cdot \pi \cdot D_o \cdot L \quad [3.53]$$

Donde  $Y_s$  es la resistencia a la fluencia cortante, igualando las EC 3.53 y EC 3.52 y si  $Y_s = \sigma_o/2$

$$\frac{P_f \cdot \pi \cdot D_o^2}{4} = \mu \cdot P \cdot \pi \cdot D_o \cdot L = Y_s \cdot \pi \cdot D_o \cdot L$$

$$P_f = \sigma_o \frac{2L}{D_o} \quad [3.54]$$

Con este razonamiento se puede calcular la presión del pistón  $P_p$  necesaria para el proceso de extrusión incluido la fricción, sumando las ECs 3.50 y 3.54

$$P_p = \sigma_o \left( \varepsilon + \frac{2L}{D_o} \right) \quad [3.55]$$

### 3.3.2.1 Determinación de los factores $m$ y $\mu$ definidos como coeficientes de fricción

Para establecer “ $m$ ” se tiene la siguiente relación:

$$m = \frac{16}{Re} \quad [3.56]$$

Donde: L: longitud de cabeza

$\bar{v}$ : Velocidad media del fluido

Re: Reynolds del fluido

g: gravedad

$\bar{D}$ : Diámetro medio

El valor de “ $m$ ” debe estar dentro del rango de 0 a 1.

Cálculo de Re para un fluido no Newtoniano en condición de flujo laminar es<sup>14</sup>:

$$Re = \frac{D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{K \cdot 8^{n-1} \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n} \quad [3.57]$$

$v$ : velocidad media del fluido (m/s)

$\rho$ : densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

K: índice de consistencia (N.s/m<sup>2</sup>)

n: índice de comportamiento de flujo

D: diámetro medio del tubo (m)

Para establecer  $\mu$  se establece a partir de valores experimentales según la fricción existente entre estas superficies. Este valor debe estar entre 0 y 1



Para el cálculo de la densidad del fluido se realiza en base experimental, aplicando la siguiente relación:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{V_T} \quad [3.58]$$

Los valores experimentales se encuentran en el Anexo. N°

### 3.3.3 CÁLCULO DEL ESPESOR DE PARED DE LA CABEZA EXTRUSORA

Para realizar el cálculo del espesor de la pared de la cabeza extrusora se realiza las siguientes consideraciones de análisis.

- Se considera al sistema como un recipiente a presión, ya que se puede considerar como un recipiente cerrado capaz de almacenar un fluido a presión.
- Se considera que el sistema es un recipiente de pared delgada, por lo tanto  $D/e \geq 10$ .
- Se realiza la modelación para obtener el espesor de pared, asumiendo que el sistema es una cabeza cónica bajo presión interna.

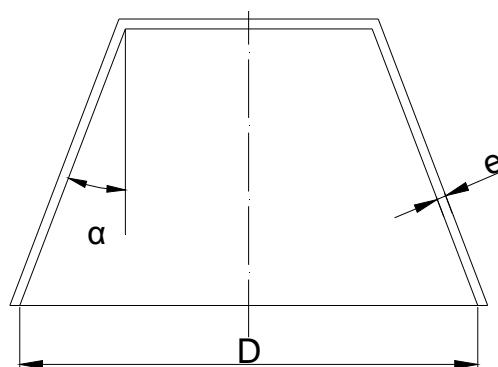


Figura 3.3-1 Esquema de cabeza cónica<sup>16</sup>

- La presión se encuentra uniformemente distribuida en toda la superficie de la pared.

Para el cálculo del espesor “e” de la pared de la cabeza extrusora se aplica la siguiente relación<sup>17</sup>:

$$e = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \cos \alpha \cdot (\sigma - 0.6 \cdot P)} \quad [3.59]$$

Donde:

e: espesor de pared

P: presión de pistón

$\sigma$ : esfuerzo del material

### 3.4 DISEÑO DE PRENSA EXTRUSORA

#### 3.4.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

De los cálculos realizados se establece los siguientes parámetros de diseño para la prensa los cuales se muestran en la Tabla 3.4-1.

**Tabla 3.4-1** Parámetros de diseño para una prensa extrusora

DETALLE	VALOR
Presión de necesaria	830000 Pa
Velocidad de avance del fluido a la salida del fluido	2 mm/s

Por lo tanto, para la elección de una prensa se debe considerar los parámetros definidos en la Tabla 3.4-1.

### 3.4.2 TIPO DE PRENSA EXTRUSORA

Una prensa extrusora es un dispositivo que mediante el movimiento de un émbolo en un cilindro genera el movimiento de un fluido en su interior, el cual atraviesa un dado con una forma dada.

El movimiento del émbolo se encuentra dado por diferentes mecanismos como por ejemplo: movimiento de un tornillo en el interior de una tuerca, por movimiento de un pistón neumático o por el movimiento de un pistón hidráulico.

Se elige el sistema de émbolo cilindro accionado mediante el movimiento de un tornillo en una tuerca, ya que permite variar las velocidades de avance del fluido en el interior del cilindro.

### 3.4.3 DESARROLLO DE ECUACIONES

#### 3.4.3.1 Cálculo de espesor de pared de cilindro

Se asume que el cilindro de la prensa es un cilindro de pared delgada, es decir que la relación de diámetro de cilindro y espesor de pared es mayor a 10.

$$D_i/t \geq 10$$

La presión interna actúa sobre la superficie lateral del cilindro con espesor “*t*” y un diámetro “*D<sub>i</sub>*”.

Por lo tanto se aplica la ecuación EC 3.60 para el cálculo del espesor en cilindros de pared delgada:

$$\sigma = \frac{P \cdot D_i}{2 \cdot t} \quad [3.60]$$

### 3.4.3.2 Tornillo

Una prensa en la que su movimiento es generado por un tornillo, puede ser accionada de forma manual o de forma mecánica. Por ser un análisis tipo laboratorio, se escoge el accionamiento manual mediante una manivela.

Se considera los siguientes datos de entrada:

- RPM : 12 rpm son las revoluciones que experimentalmente puede lograr de forma manual una persona sin mucho esfuerzo.
- Velocidad de salida: 2 mm/seg
- Fuerza aplicada: 1639,6 N

$$\frac{V_o}{V_f} = \left(\frac{R_f}{R_o}\right)^2 \quad [3.61]$$

El paso del tornillo se calcula mediante la expresión:

$$V = rpm \cdot paso \quad [3.62]$$

Para calcular el torque aplicado en el tornillo se aplica la relación<sup>18</sup>.

$$T = \frac{F \cdot dm}{2} \left( \frac{l + \pi \cdot \mu \cdot dm}{\pi \cdot dm - \mu \cdot l} \right) \quad [3.63]$$

$$T_c = \frac{F \cdot \mu \cdot dc}{2} \quad [3.64]$$

$$T = lp \cdot F$$

$$lp = \frac{T}{F} \quad [3.65]$$

Donde: lp es la longitud de palanca

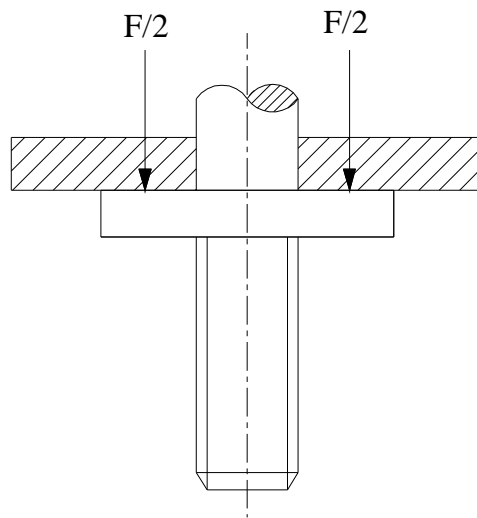


Figura 3.4-1 Detalle de Fuerza en la Rosca<sup>18</sup>

### 3.4.3.3 Palanca

Se calcula mediante la relación<sup>18</sup>:

$$\sigma = \frac{32 \cdot Fa \cdot l}{\pi \cdot d^3} \quad [3.66]$$

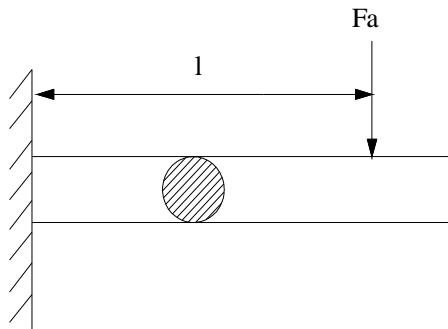


Figura 3.4-2 Diagrama de cuerpo libre

## 3.5 MATERIAL PARA EXTRUSORA

Las consideraciones que se realizan para la selección del material de la extrusora son los siguientes:

- Material con buena resistencia a la corrosión
- Material resistente al desgaste
- Material comercialmente obtenible.

Dadas estas consideraciones se elige los aceros inoxidable como idóneos para esta selección. De entre los más comunes se encuentra el AISI 304 y el AISI 316. Las condiciones no ameritan un acero altamente resistente a la corrosión y a trabajos en altas temperaturas, por lo tanto se escoge el AISI 304 con resistencia de 35 Kpsi.<sup>18</sup>

### **3.6 OBTENCIÓN DE VALORES**

Para realizar el cálculo de los valores mediante la utilización de las ecuaciones planteadas es necesario realizar algunas acotaciones y suposiciones:

- La relación de extrusión es de 2.
- El valor de “m” de estar en el rango de 0 a 1
- El valor de  $\mu$  debe estar en el rango de 0 a 1
- El fluido es un Fluido No Newtoniano

#### **3.6.1 DATOS DE ENTRADA**

Los datos de entrada son los siguientes:

- Diámetro menor: 22 mm
- Diámetro medio: 33 mm
- Velocidad de fluido:  $3,13 \times 10^{-4}$  m/s
- Esfuerzo a la fluencia del material<sup>15</sup>: 60000 Pa
- Longitud de extrusión

### 3.6.2 EJEMPLO DE CÁLCULO

Para el cálculo del ángulo óptimo se obtiene aplicando la EC 3.34

Para establecer la densidad del fluido se establece de acuerdo a la Tabla 6.1-1 de obtención de mezcla ideal y utilizando la EC 3.58.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{V_T} = \frac{60 + 36 + 4 \text{ (gr)}}{90,63 \text{ ml}} = 1,1033 \frac{\text{gr}}{\text{ml}} = 1103 \text{ kg/m}^3$$

Para establecer el Reynolds se aplica la EC 3.57 y EC 3.56

$$Re = \frac{D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{K \cdot 8^{n-1} \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n} = \frac{0,033^1 \cdot 3,13e - 4^{2-1} \cdot 1103}{1 \cdot 8^{1-1} \left(\frac{3+1}{4}\right)^1} = 0,012$$

$$m = \frac{16}{Re} = \frac{16}{0,012} = 1237$$

El valor de m solo puede estar entre 0 y 1 por lo tanto, se toma el valor mayor que es 1.

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{3}{2} m \cdot \ln \frac{R_0}{R_f}} = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \ln \frac{11}{22}} = 1,02^\circ$$

Para la corrección del ángulo óptimo se realiza el cálculo de la presión del pistón con la aplicación de las ecuaciones ECs 3.51 y 3.55

$$\varepsilon = a + b \cdot \ln r_x = 0,8 + 1,5 \ln 2 = 1,835$$

$$P_p = \bar{Y}_f \left( \varepsilon + \frac{2L}{D_o} \right) = 60000 \text{ Pa} \left( 1,835 + \frac{2 \cdot 0,15}{0,022} \right) = 830000 \text{ Pa}$$

Con este resultado se obtiene el valor corregido del ángulo óptimo iterando en la EC 3.45 hasta obtener el valor de  $P_p$ .

$$P_p = \sigma_{x_b} = \frac{1+B}{B} \cdot \sigma_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{R_0}{R_f} \right)^{2B} \right]$$

Para 830 Pa se obtiene un semi ángulo de 23,5 grados.

Para la determinación del espesor de pared de la cabeza extrusora se aplica la ecuación EC 3.59.

$$e = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \cos \alpha \cdot (\sigma - 0.6 \cdot P)} = \frac{120,38 \cdot 1,73}{2 \cdot \cos 23,5 \cdot (35000 - 0,6 \cdot 120,38)} = 3,25 \text{ e} - 3 \text{ pulg}$$

Por motivos comerciales en el mercado se encuentra un espesor de 1mm.

Para la determinación del espesor de la pared del cilindro extrusor se aplica la ecuación EC 3.60

$$\sigma = \frac{P \cdot Di}{2 \cdot t}$$

$$t = \frac{P \cdot Di}{2 \cdot \sigma} = \frac{120,38 \cdot 1,73}{2 \cdot 35000} = 2,97 \text{ e} - 3 \text{ pulg}$$

Por motivos comerciales en el mercado se encuentra un espesor de 1 mm

Se obtiene un valor de paso de 2,5 mm/rev. De lo cual se escoge un tornillo con esa característica.



Para el cálculo del torque se aplica la ecuación ECs 3.63, 3.64:

$$T = \frac{F \cdot dm}{2} \left( \frac{l + \pi \cdot \mu \cdot dm}{\pi \cdot dm - \mu \cdot l} \right) = -308,1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_c = \frac{F \cdot \mu \cdot dc}{2} = \frac{1639,6 \cdot 0,08 \cdot 0,03}{2} = 3,93 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T = 312 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Una persona normal puede aplicar una fuerza de 600 N tomando en cuenta esta consideración el brazo de palanca es:

$$lp = \frac{312}{600} = 0,5 \text{ m}$$

Por lo tanto es necesaria una palanca de 50 cm.

Para el cálculo del diámetro de la palanca se da de la EC 3.66

$$\sigma = \frac{32 \cdot Fa \cdot l}{\pi \cdot d^3}$$

$$d = 10,65 \text{ mm}$$

Por razones comerciales se escoge el diámetro de 12 mm.

Planos de todo el sistema se encuentra en el Anexo N°2

## CAPITULO 4

### PROCESO EXPERIMENTAL

#### 4.1 OBTENCIÓN DE MEZCLAS

Se parte de la literatura en la cual establece la siguiente relación entre los elementos que conforman el monolito:

**Tabla 4.1-1** Elementos que conforman la mezcla de un monolito<sup>5</sup>

Compuesto	% en peso
Cordierita $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$	75
Agua destilada	18
Plastificante Carboximetilcelulosa	7



**Figura N°4.1-1** Materiales Utilizados

Para la experimentación es necesario variar la cantidad de humedad presente en la mezcla, ya que de ésta depende la obtención de un monolito sin variaciones de forma y discontinuidad de material.

Para la experimentación se varía la cantidad de Agua destilada en las siguientes proporciones:

**Tabla 4.1-2** Tabla de experimentación de compuestos

No	Compuesto	% en peso	Compuesto	% en peso	Compuesto	% en peso
1	Cordierita $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$	55	Agua destilada	38	Plastificante Carboximetilcelulosa	7
2	Cordierita $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$	65	Agua destilada	28	Plastificante Carboximetilcelulosa	7
3	Cordierita $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$	75	Agua destilada	18	Plastificante Carboximetilcelulosa	7
4	Cordierita $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$	80	Agua destilada	13	Plastificante Carboximetilcelulosa	7

#### 4.1.1 MARCHA EXPERIEMETAL



- Se pesa en cada uno de los elementos en las proporciones preestablecidas.
- Se mezcla los elementos sólidos, hasta obtener un compuesto homogéneo.
- Se adjunta progresivamente la cantidad de líquido, hasta obtener una masa homogénea de una textura regular.
- Se introduce esta masa homogénea en la prensa extrusora y se obtiene el monolito prueba.
- Si el monolito de prueba no posee las características adecuadas, se toma la mezcla indicada en la literatura y se varía la cantidad de líquido hasta obtener la mezcla ideal mediante prueba y error.



#### 4.1.2 OBTENCIÓN DE MEZCLA ADECUADA

Para determinar la mezcla ideal para la extrusión de los monolitos se varía de acuerdo a la tabla N°4.1-2, partiendo de las mezclas con menor cantidad de humedad y aplicando la marcha experimental propuesta.

De este proceso se obtiene la Tabla 4.1-1, en la cual se realiza un comparación entre las diferentes mezclas establecidas

**Tabla 4.1-3** Tabla comparativa de las mezclas establecidas.

No	Fotografía	Defectos de extrusión
4		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de humedad que produce una mala extrusión</li> <li>• Discontinuidad de material</li> <li>• Pérdida de forma del monolito</li> </ul>
3		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de humedad no adecuada para la extrusión</li> <li>• Discontinuidad de material</li> <li>• Pérdida de forma del monolito</li> </ul>

2		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de humedad no adecuada</li> <li>• Discontinuidad de material Leve</li> <li>• Pérdida de forma del monolito</li> </ul>
1		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de humedad que permite una extrusión casi adecuada</li> <li>• Discontinuidad de material muy leve</li> <li>• Pérdida de forma leve</li> </ul>

## 4.2 OBTENCIÓN DE MONOLITO

Una vez establecida la mezcla ideal, se obtiene el monolito prototipo, el cual dadas las condiciones de la mezcla permite tener uniformidad en el material extruido y una leve pérdida de forma.

La mezcla ideal permite una continuidad del material en toda la extensión de masa extruida

<p>IDEAL</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de humedad que permita la extrusión.</li> <li>• Continuidad total del material</li> <li>• Leve pérdida de forma en la parte externa por forma de movimiento de monolito luego de extrusión</li> </ul>
--------------	---	---

### 4.3 ENSAYOS DE COMPRESIÓN

Del ensayo de compresión realizado a los monolitos prototipo, se obtiene el resultado mostrado en la tabla. Ensayo se encuentra en el Anexo N°3.

## CAPITULO 5

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

##### 5.1.1 PRESIÓN DE EXTRUSIÓN

Al establecer los parámetros o datos de entrada y aplicando la modelación matemática, se obtiene una presión de pistón, la cual permite vencer las fuerzas de rozamiento y la resistencia a la fluencia del material, para permitir su movimiento y posterior extrusión.

El valor de la presión de pistón se muestra en la Tabla 5.1-1

**Tabla 5.1-1** Valor de presión de pistón

Detalle	Valor (Pas)
Presión de pistón	830000

##### 5.1.2 ESPESOR DE PARED DE CILINDRO

Una vez establecida la presión necesaria para el proceso de extrusión, se establece que el espesor de pared calculado para la pared del cilindro de la prensa extrusora es de:

**Tabla 5.1-2** Valor de espesor de pared para el cilindro extrusor

Detalle	Valor (mm)
Espesor de pared	1

### 5.1.3 ESPESOR DE PARED DE DADO EXTRUSOR

Una vez establecida la presión necesaria para el proceso de extrusión, se establece que el espesor de pared calculado para la cabeza extrusora es de:

**Tabla 5.1-3** Valor de espesor de pared para el dado extrusor.

Detalle	Valor (mm)
Espesor de pared	1

### 5.1.4 ÁNGULO ÓPTIMO PARA EXTRUSIÓN

De la modelación establecida en el capítulo 3 se obtuvo un ángulo óptimo, el cual permite realizar una extrusión óptima, que permite un ángulo adecuado con la menor cantidad de energía utilizada en el proceso.

El valor que se muestra en la Tabla N<sup>o</sup>.1-4 se obtuvo al realizar iteraciones en la ecuación EC 3.45 tomando en cuenta que el valor al cual se aproxima es el de 830000 Pa.

**Tabla 5.1-4** Valor de ángulo óptimo

Detalle	Valor (grados)
Ángulo óptimo	23,5

### 5.1.5 MEZCLA IDEAL DE EXTRUSIÓN

La mezcla ideal para la extrusión se establece bajo los parámetros de una buena extrusión, los cuales comprenden humedad adecuada para la extrusión, continuidad en el material, niveles de deformación muy pequeños. La mezcla que comprende una buena extrusión es la que se muestra en la Tabla 5.1-5

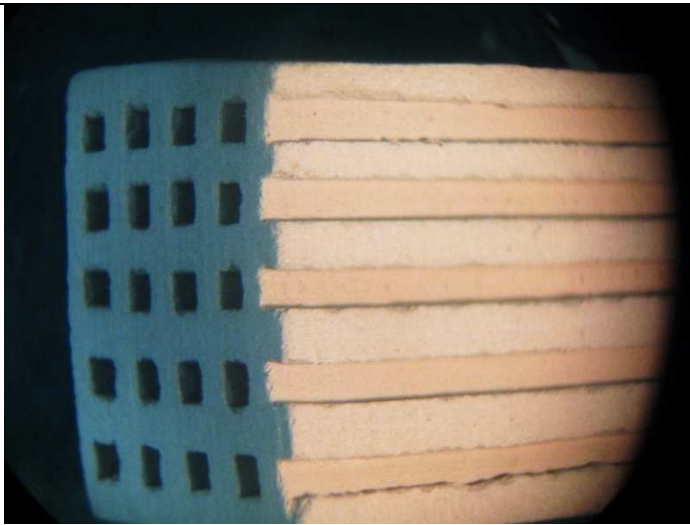


**Tabla 5.1-5** Resultado Mezcla ideal

<b>Compuesto</b>	<b>% en peso</b>	<b>Compuesto</b>	<b>% en peso</b>	<b>Compuesto</b>	<b>% en peso</b>
Cordierita $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$	60	Agua destilada	36	Plastificante Carboximetilcelulosa	4

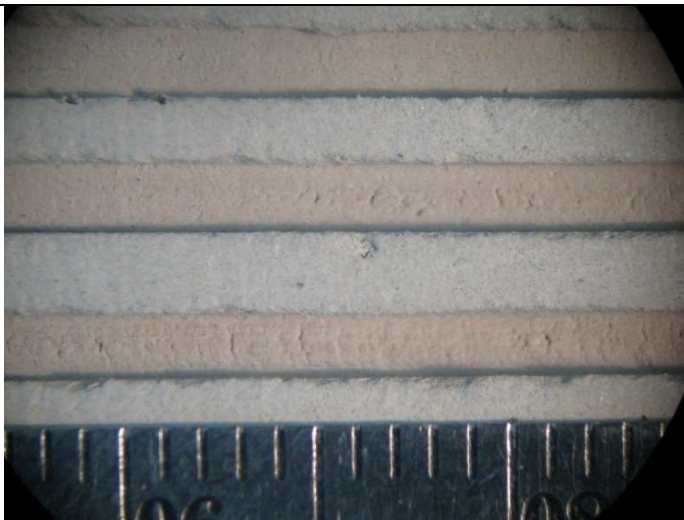
### 5.1.6 MONOLITO PROTOTIPO ANÁLISIS GEOMÉTRICO Y DIMENSIONAL

El monolito obtenido por el proceso de extrusión, es un monolito de un compuesto arcilloso.



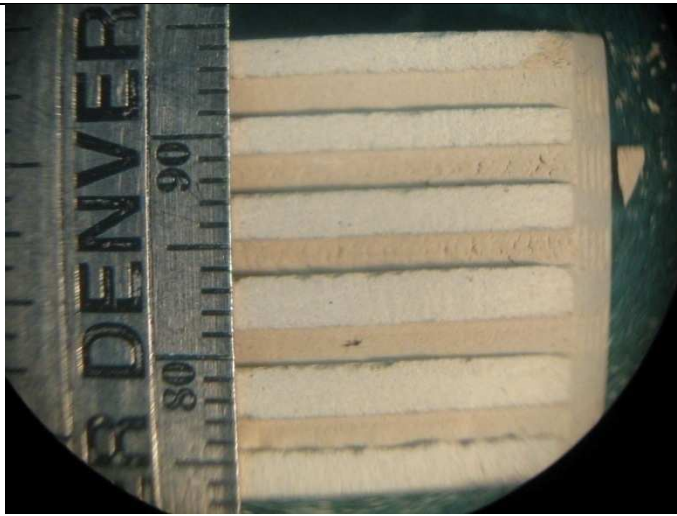
**Figura N° 5.1-1** Monolito obtenido por proceso de extrusión

- Estructura geométrica definida a la forma de la matriz con imperfecciones.
- Pequeñas deformaciones por el proceso de extrusión en su geometría.
- No se presenta agrietamientos iniciales
- No se presenta rotura de material.



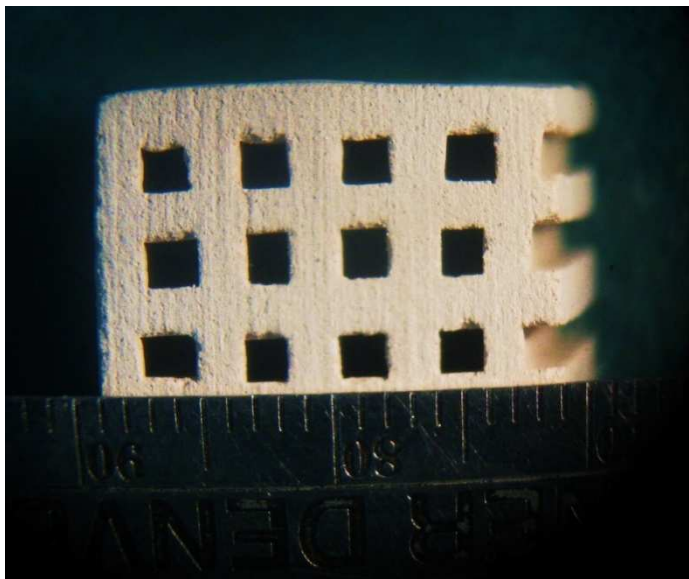
**Figura N° 5.1-2.** Sección longitudinal del monolito obtenido

- Paralelismos de los canales
- No se observan imperfecciones de forma, como rebordes, ondulaturas a lo largo de la sección.
- No se observa pérdidas de material durante el proceso de extrusión en la sección longitudinal



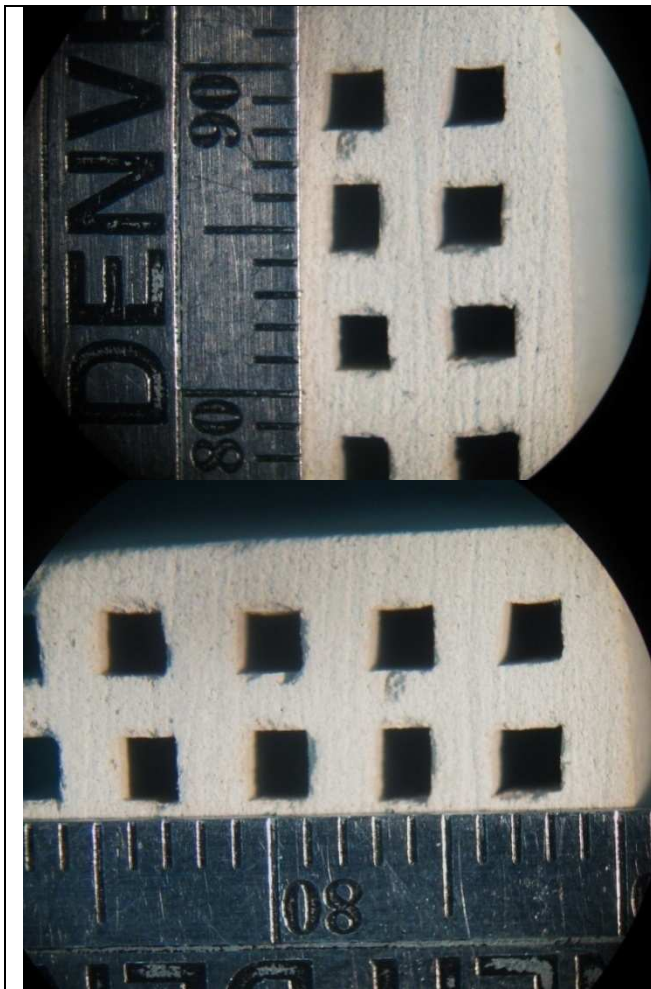
**Figura N°5.1-3.** Sección longitudinal de monolito

- Se observa paralelismo en la sección longitudinal.
- Se observa que las dimensiones de las ranuras son las que posee la cabeza extrusora 2 mm



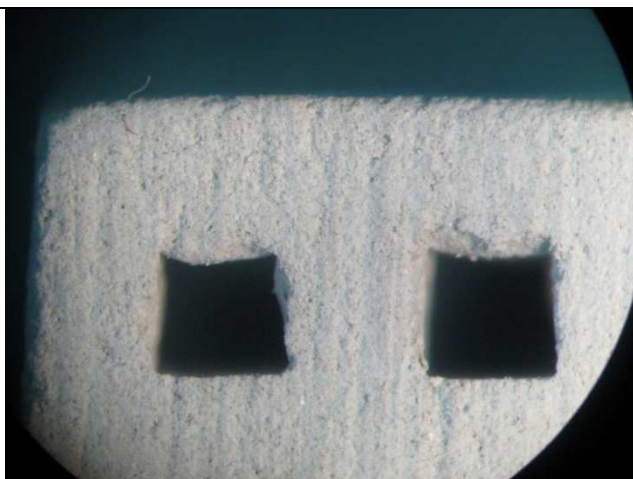
**Figura N°5.1-4.** Sección transversal de monolito

- Paralelismo entre los agujeros cuadrangulares
- Geometría de los agujeros cuadros uniforme, similar a la que se encuentra en la matriz extrusora.
- No se observa ausencia de material por defectos de extrusión.
- Medida de los agujeros acorde con las establecidas. 2x2 mm aproximadamente.



**Figura N° 5.1-5** Simetría de sección transversal de monolito

- Dimensiones de los agujeros acorde con las especificaciones de la matriz extrusora.
- Las dimensiones se aproximan a:
- Agujero: 2x2 mm
- Separación: 2 mm
- No se presenta mal formaciones o ausencia de material en la sección.



**Figura N° 5.1-6.** Deformación de orificio en la fila superior del monolito

- Se observa una deformación cóncava en la pared superior de los agujeros en la fila superior de la extrusión
- El mismo efecto se tiene en la última fila en la parte baja del monolito extruido.

### 5.1.7 CAPACIDAD DE APILAMIENTO DE MONOLITO PROTOTIPO

Una vez realizado el ensayo de compresión, el resultado mostrado en la Tabla 5.1-6 refleja que el monolito puede resistir un apilamiento máximo de 239,48 kg antes de fracturarse:

**Tabla 5.1-6** Resultado de prueba de compresión a monolito prototipo

Detalle	Valor (N)	Valor (kg)
Carga máxima	2347	239,48

Cada monolito posee un peso de: 20 gr por lo tanto es posible apilar hasta 119 monolitos uno sobre otro antes de que estos fallen

## 5.2 RESULTADOS

1. Los parámetros de diseño para la prensa son: la velocidad del fluido y la presión necesaria tanto para vencer el estado de reposo del fluido como las fuerzas de rozamiento entre fluido con el dado extrusor.
2. La modelación matemática del cálculo del ángulo óptimo siempre aproxima el valor del mismo a valores menores que 2 grados, ya que el modelo analiza la utilización de la menor cantidad de energía para el proceso, por lo tanto el ángulo siempre va a tender a valores muy pequeños.
3. Se obtuvo un ángulo óptimo de extrusión de 23,5° luego de la corrección realizada al modelo matemático, el cual permite realizar el proceso de extrusión eficientemente.
4. La reología del fluido es muy importante para el análisis del ángulo óptimo de extrusión, ya que al tener el fluido un esfuerzo al corte diferente, el ángulo puede aumentar o disminuir sustancialmente.
5. Monolito prototipo con buenas características de forma y de dimensión tanto externa como interna.

## **CAPITULO 6**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **6.1 CONCLUSIONES**

1. Se logró cumplir con el objetivo planteado de diseñar y construir una prensa para la fabricación de monolitos de hasta 50 mm de longitud.
2. Se analizó el comportamiento de las diferentes mezclas de materiales establecidas para el análisis logrando obtener una mezcla ideal para un ángulo óptimo, concluyendo que el porcentaje de humedad es fundamental para realizar buenos procesos de extrusión, y obtener monolitos con buenas características de forma y continuidad de material a lo largo de todo el elemento.
3. Por los requerimientos de trabajo de los monolitos con respecto a la temperatura, se concluye que el mejor material para su fabricación es la cordierita, por que posee una alta estabilidad térmica a altas temperaturas.
4. Se determinó que la fabricación de los monolitos a nivel local es factible, es decir su fabricación es posible realizarlo en el país.

Con este estudio se verificó que se puede producir monolitos 100% ecuatorianos, con las mismas características que los importados. El estudio logró colocar un llamado de atención para el desarrollo de esta tecnología en nuestro país, ya que en el desarrollo de técnicas de reducción de contaminantes en el país no se utiliza tecnología propia, la mayor parte por no decir su totalidad, son elementos importados.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda continuar con este tipo de estudio, ya que existe el interés en la actualidad de proteger a nuestro planeta de los agentes contaminantes emitidos a la atmósfera, por lo que la utilización de monolitos es una opción para contrarrestar estos contaminantes.
2. Se debe realizar un estudio de mercado, con el fin de analizar qué tipos de monolitos son los requeridos en el mercado.
3. Utilizar diferentes tipos de mezclas de material base, para verificar cual de ellas permite una mejor calidad de extrusión y un mejor desempeño del monolito sometido a pruebas de laboratorio similares a las de campo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. <http://es.wikipedia.org/wiki/Cat%C3%A1lisis>., 25 de agosto 2009
2. **FUENTES, Sergio; DÍAZ, Gabriela.** *Catalizadores ¿ La piedra Filosofal del siglo XX ?* Distrito Federal, México, 1997.
3. <http://es.wikibooks.org/wiki/Bioqu%C3%ADmica/Cat%C3%A1lisis>., 3 de diciembre de 2009.
4. **HAYES, R.E and KOLACZKOWSKI, S.T.** *Introduction to Catalytic Combustion.* Amsterdam : GIB, 1997.
5. **ROCHA, Enrique, HERNANDEZ, Roberto and GARCÍA, Refugio.** *Producción de cerámicos triangulares base alúmina por la técnica de estresión.* Mexico, 2003.
6. **CYBULSKY.** *Preparación de Materiales Monolíticos Cerámico-Carbono de Tipo Celular.* 1994.
7. **YATES, M.** *Materiales de porosidad controlada para la protección ambiental.* Madrid : Instituto de Catálisis y Petroquímica.
8. **ECOENERGY.** *Presentación de la Empresa.* 2007.
9. **AVILA, Pedro.** *Utilización de catalizadores monolíticos en procesos de descontaminación ambiental.* 1998.
10. **MIRO, Eduardo.** *Catalizadores estructurados para el tratamiento de efluentes gaseosos.* Santa Fé, Argentina : INCAPE, Instituto de investigación en Catálisis y Petroquímica.
11. *Catalizadores.* <http://catalizador.wordpress.com/>.15 de septiembre de 2009.
12. *Catalíticos.* <http://www.cataliticos.cl/pages/informacion4.htm>. 15 de septiembre de 2009.
13. **AVITZUR, Betzalel.** *Metal forming: Processes and analysis.* New York : McGraw-Hill, 1968.
14. **ESQUERRE, Wily.** *Tranvase de chocolate en fase fluida viscosa no newtoniana, cálculo del equipo de bombeo de una planta de chocolate.* Lima - Perú : Universidad Nacional Mayor de San Marcos , 2003.



15. **BELLO, Luis, OSORIO, Perla and AGAMA, Edith.** *Propiedades químicas, fisicoquímicas y reológicas de masas y harinas de maíz nixtamalizado.* Texcoco, México : Agrocienza, 2002.
16. **LEON, Juan.** *Diseño y cálculo de recipientes a sujetos a presión.* Mexico : Inglesa, 2001.
17. **MEGYESY, Eugene.** *Manual de recipientes a presión, diseño y cálculo.* Guanajuato México : Ilumisa, 1992.
18. **SHIGLEY, Joseph.** *Manual de diseño mecánico.* México : McGRAW-HILL, 1989.

## **ANEXO N° 1. PROCESO DE ITERACIÓN**

**ANEXO N° 2. PLANOS DE PRENSA EXTRUSORA**

## **ANEXO N° 3. ENSAYO DE COMPRESIÓN**

### Fotografías de ensayo de compresión



### Falla de material a carga máxima



**Falla de material, línea de fractura.**

