



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

# **Diseño de una mezcla con materiales reciclados para producción de adoquines**

## **TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecánico**

## **P R E S E N T A N**

Juan Manuel Morales Jimenez  
Daniel Suaste Gutiérrez  
Angel Omar Avila Ruiz

## **DIRECTORA DE TESIS**

Dra. Alejandra Castro González



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## JURADO ASIGNADO

<b>PRESIDENTE:</b>	<b>M. en I. Augusto Sanchez Cifuentes</b>
<b>VOCAL:</b>	<b>Dra. Alejandra Castro González</b>
<b>SECRETARIO:</b>	<b>M. en I. Juan Carlos Cedeño Vázquez</b>
<b>1er. SUPLENTE:</b>	<b>Dr. Ing. Jorge Luis Romero Hernández</b>
<b>2do. SUPLENTE:</b>	<b>M. en I. Agustín Eduardo Bravo Bernard</b>

### **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

### **ASESORA DEL TEMA:**

**Dra. Alejandra Castro González**

---

### **SUSTENTANTES:**

**Avila Ruíz Angel Omar**

---

**Morales Jimenez Juan Manuel**

---

**Suaste Gutiérrez Daniel**

---

## **Agradecimientos**

Con especial dedicatoria para mis padres, Juan y María, sabiendo que no existe forma de agradecer por todo el sacrificio que hicieron por mí, por los consejos y valores para hacer de mí una mejor persona cada día, pero sobre todo por todo el cariño que han brindado.

A mis familiares, amigos y personas cercanas, quienes fueron parte fundamental para mi vida, por apoyarme, por creer en mí, por brindarme su cariño y por ser un motor para seguir adelante.

A mis padrinos, por brindarme sus consejos, por creer en mi capacidad profesional y sus valiosos consejos.

A Daniel y Omar su gran amistad e incondicional apoyo.

**Juan Manuel Morales Jimenez**

Le doy gracias a mis papás Carlos y Graciela, a mi hermano Iván, por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida, por estar ahí en los momentos más difíciles, por esta siempre conmigo y ahora cumpliendo uno de mis grandes sueños: ser ingeniero.

A Daniel y a Juan, ya que con ustedes fue posible cumplir este sueño, a todos mis amigos de la facultad, por todos esos momentos que pasamos juntos, y la confianza que han depositado en mí, han sido como unos hermanos, no me queda más que decirles gracias.

**Angel Omar Avila Ruiz**

*A mis padres Mónica y Jaime*

Por ser un ejemplo de perseverancia y trabajo, inculcando siempre el mejor de los ejemplos en mi vida y brindarme su apoyo incondicional estando siempre en los momentos más complicados. Porque sin ustedes, hoy no habría sido posible pintar un osito llamado título.

*A mi hermana Andrea*

Por ser un pilar fundamental en mi vida, apoyarme siempre y ser un ejemplo en todo sentido, por tu calidad humana y lo oportuno de tus comentarios.

*A mis abuelitos*

Gilberto, Carmen, Jesús y Leticia por ser una guía constante en mi vida e impulsarme en mis objetivos.

*A Carmina Cherizola*

Gracias tía por tu enorme ayuda en momentos difíciles y recibirme siempre con gran cariño.

*A Jesús Suaste*

Gracias tío por siempre abrirme las puertas de tu casa y recibirme siempre con gran cariño.

*A todos mis familiares*

Gracias por confiar en mí y ser el gran bastión que me sostiene.

*A Juan Manuel y Omar*

Ser parte fundamental de este proyecto, y amigos incondicionales, sin ustedes no habría sido posible.

*A mis amigos*

Por apoyarme en mi vida académica y personal a lo largo de mi vida, creer en mi y estar siempre en los momentos importantes.

*A Juan Carlos*

Amigo, gracias por tus enseñanzas y apoyo, un abrazo hasta donde te encuentres.

**Daniel Suaste Gutiérrez**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirnos las puertas y ser nuestra segunda casa, por dejarnos formar parte de esta gran comunidad universitaria.

A la Facultad de ingeniería por ser fuente de inspiración para mejorar en nuestra vida profesional comprometidos con nuestro país, pero sobre todo por ayudarnos a mejorar como seres humanos.

A nuestra directora de tesis la Dra. Alejandra Castro González por su valioso tiempo, por su apoyo y sabiduría.

Al Sr. Rafael Flores Ramos por su tiempo e interés en el proyecto.

A la Delegación Tlalpan por abrirnos las puertas y contribuir al caso de estudio.

A todos nuestros profesores por sus enseñanzas y contribuir a nuestra formación académica y profesional.



## ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>VI</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVO</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
1.1 Historia del adoquín	3
1.2 Materiales de fabricación de adoquines convencionales	4
1.3 Proceso de fabricación del adoquín	5
1.4 Tipos de máquinas para producción de adoquines	8
1.4.1 Máquina manual	8
1.4.2 Centrales automáticas	10
1.4.3 Máquinas automáticas	11
1.4.4 Máquinas semiautomáticas	12
1.4.5 Máquina móvil automática	13
1.5 Uso del adoquín en México y otros países	13
1.6 Normatividad	16
<b>CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS</b>	<b>24</b>
2.1 Desechos de construcción	24
2.2 Panorama en el mundo	25
2.3 Panorama en México	25
2.4 Contaminación de desechos de llanta	27
2.4.1 Panorama en el mundo	28
2.4.2 Panorama en México	30
2.5 Modelos de diseño	30
2.5.1 Modelo de diseño de Pahl y Beitz	32
2.5.2 Modelo de diseño de Stuart Pugh	35



# ÍNDICE

---

2.5.3 Modelo de diseño de Ullman	38
2.5.4 Modelo de diseño de Hong-Sen Yan	42
2.5.5 Elección de un modelo de diseño	47
<b>CAPÍTULO 3. Materiales y métodos</b>	<b>51</b>
3.1 Caso de estudio delegación Tlalpan	51
3.2 Metodología	54
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS</b>	<b>59</b>
4.1 Mezcla de las materias primas	59
4.1.1 Descubrimiento de las materias primas	59
4.1.2 Diseño conceptual para la mezcla	60
4.1.3 Desarrollo de las mezclas	62
4.2 Procesado del adoquín	67
4.2.1 Herramienta	67
4.2.2 Desarrollo de herramienta	74
4.2.3 Manufactura de la máquina	75
4.3 Producto terminado	85
4.3.1 Desarrollo del producto	85
4.3.2 Pruebas al producto terminado	86
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES</b>	<b>98</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>101</b>





## ÍNDICE DE FIGURAS

---

	Página	
Figura 1.1	Máquina bloquera manual 1	8
Figura 1.2	Máquina bloquera manual 2	9
Figura 1.3	Central de producción de prefabricados de concreto	11
Figura 1.4	Máquina automática de prefabricación de concreto	11
Figura 1.5	Máquina semiautomática	12
Figura 1.6	Máquina móvil de prefabricados de concreto	13
Figura 1.7	Esquema de pavimento de adoquines	21
Figura 1.8	Esquema de tipos de tránsito	22
Figura 2.1	Reúso de llanta	29
Figura 2.2	Esquema del modelo de diseño de Pahl y Beitz	34
Figura 2.3	Esquema del modelo de diseño de Pugh	39
Figura 2.4	Esquema del modelo de diseño de Ullman	43
Figura 2.5	Diagrama del modelo de diseño de Hong-Sen Yan	48
Figura 3.1	Fotografía del río Magdalena en la delegación Tlalpan	51
Figura 3.2	Fotografía tomada de un camión de la delegación Tlalpan cargado de llantas de desechos	52
Figura 3.3	Recaudación de desechos de construcción por parte de la delegación Tlalpan	53
Figura 3.4	Deterioro del río Magdalena y tiraderos clandestinos de desechos en la delegación Tlalpan	54
Figura 3.5	Mapa de planeación para el desarrollo de la mezcla	56
Figura 3.6	Mapa de planeación para el desarrollo de la herramienta	56
Figura 3.7	Mapa de planeación para el desarrollo del adoquín	57
Figura 3.8	Ensayo de compresión para una de las probetas	57
Figura 3.9	Diagrama de bloques de la metodología del proyecto	58
Figura 4.1	Efecto de la relación agua-cemento en la resistencia a la compresión y a la tensión por flexión a los 28 días	65
Figura 4.2	Concepto 1 para el procesado del adoquín	69
Figura 4.3	Concepto 2 para el procesado del adoquín	71
Figura 4.4	Concepto 3 para el procesado del adoquín	73
Figura 4.5	Corte de lámina galvanizada	75
Figura 4.6	Doblado de lámina galvanizada	76
Figura 4.7	Doblado de pestañas	76
Figura 4.8	Molde terminado	77



## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 4.9	Placas hexagonales	78
Figura 4.10	Cilindros, motor, molde y placas para tapa del molde	79
Figura 4.11	Estructura para la tapa del molde	79
Figura 4.12	Estructura para el molde	80
Figura 4.13	Estructuras para la tapa y para el molde	80
Figura 4.14	Unión de estructura y molde	81
Figura 4.15	Tapa del molde	81
Figura 4.16	Unión del cilindro a la estructura del molde	82
Figura 4.17	Cilindro y tapa para fabricación de probetas	83
Figura 4.18	Cilindros y tapas para fabricación de probetas	83
Figura 4.19	Motor montado a la herramienta	84
Figura 4.20	Herramienta terminada para la fabricación de adoquines	84
Figura 4.21	Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla B	87
Figura 4.22	Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla B-2	88
Figura 4.23	Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla B-5	89
Figura 4.24	Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla B-10	90
Figura 4.25	Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla R	91
Figura 4.26	Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla R-2	92
Figura 4.27	Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla R-5	93
Figura 4.28	Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla R-10	94
Figura 4.29	Gráfica de esfuerzo-deformación de todas las probetas con cascajo blanco	96
Figura 4.30	Gráfica de esfuerzo-deformación de todas las probetas con cascajo rojo	96
Figura 4.31	Probeta ensayada a compresión	97
Figura 4.32	Adoquín hecho con mezcla B-2	97



## ÍNDICE DE TABLAS

---

		Página
Tabla 1.1	Uso per cápita de adoquines de hormigón en pavimentación	14
Tabla 1.2	Uso de adoquines de pavimento en Alemania en 1972	15
Tabla 1.3	Superficies pavimentadas en Rotterdam, Holanda	15
Tabla 1.4	Clasificación del producto	17
Tabla 1.5	Resistencia a la compresión en los adoquines	19
Tabla 1.6	Absorción total del agua en 24 horas	19
Tabla 1.7	Muestreo de adoquines	20
Tabla 1.8	Vehículos pesados por día	23
Tabla 2.1	Composición en peso de los residuos de construcción y demolición producidos en obras de construcción	24
Tabla 2.2	Porcentajes de residuos de la construcción reciclados en diversos países	25
Tabla 2.3	Analogía de etapas de los modelos de diseño	50
Tabla 4.1	Mezcla proporcionada por empresa maquiladora de adoquines	61
Tabla 4.2	Conceptos (mezclas) propuestos para las mezclas de adoquines	62
Tabla 4.3	Porcentajes de algunas mezclas utilizadas en el trabajo de investigación de López	63
Tabla 4.4	Porcentajes de mezcla para adoquines	66
Tabla 4.5	Relación de mezcla de cascajo blanco y rojo variando el porcentaje de desechos de llanta	66
Tabla 4.6	Algunas especificaciones tomadas de la norma NMX-C-314_ONNCCE-2014	85
Tabla 4.7	Resultados de ensayo de compresión de la mezcla B	86
Tabla 4.8	Resultados de ensayo de compresión de la mezcla B-2	87
Tabla 4.9	Resultados de ensayo de compresión de la mezcla B-5	88
Tabla 4.10	Resultados de ensayo de compresión de la mezcla B-10	89
Tabla 4.11	Resultados de ensayo de compresión de la mezcla R	90
Tabla 4.12	Resultados de ensayo de compresión de la mezcla R-2	91
Tabla 4.13	Resultados de ensayo de compresión de la mezcla R-5	92
Tabla 4.14	Resultados de ensayo de compresión de la mezcla R-10	93
Tabla 4.15	Resultados de ensayo de compresión de todas las probetas	95



## RESUMEN

---

Este trabajo propuso el uso de residuos de construcción y de llanta como materia prima en la elaboración de adoquines. Se determinaron en 8 mezclas distintas: variando desde 0%, 2%, 5% y 10% de llanta en peso para cada mezcla y utilizando dos tipos distintos de desechos de construcción (desecho únicamente de concreto y desecho de varios materiales). Para el comportamiento del material en adoquines se realizaron, para cada una de las mezclas propuestas, probetas cilíndricas que se sometieron a ensayos de compresión. Se diseñó, construyó y se puso en operación un equipo para fabricar el adoquín con un motor de 1/30 Hp. Esto simuló el equivalente a una máquina en una empresa de producción de adoquines de gran capacidad para tener las condiciones de elaboración del adoquín más apegadas a la realidad.

Al procesar los datos obtenidos de los ensayos, se observó que a pesar de ser un material compuesto (cerámico y polímero) el comportamiento es muy similar al de un cerámico, aunque el aumento de la cantidad de llanta en la mezcla se reflejó en una mayor ductilidad y menor resistencia. Se logró una resistencia máxima con desechos de construcción y sin llanta de  $8.86 \text{ MPa}$ , con una mezcla de porcentajes en peso de 0% de llanta, 42.4% de agregado grueso, 26.35% de agregado fino, 18.66% de cemento y 12.59% de agua. Y una resistencia máxima con desechos de construcción y llanta de  $6.38 \text{ MPa}$ , con una mezcla de 2% de llanta, 42.4% de agregado grueso, 24.35% de agregado fino, 18.66% de cemento y 12.59% de agua, estas dos mezclas son de desechos de construcción únicamente de concreto.



## INTRODUCCIÓN

---

El uso y consumo desmedido de recursos naturales ha tenido un impacto en la cultura de reciclado y el uso de energías renovables está teniendo un impacto en la industria y conciencia de las personas alrededor del mundo, contribuyendo a la innovación e investigación de alternativas sustentables en casi todos los rubros existentes.

En los países industrializados más del 50 % de residuos es únicamente de desechos de construcción, solo algunos países como Holanda reciclan un 90 % de estos desechos, al contrario de España que sólo recicla un 5 %, mientras que en México el 12 %. Otra gran problemática son los neumáticos usados que se desechan cada año. Únicamente en España, por año, se genera aproximadamente 300,000 toneladas y reciclándose un pequeño porcentaje. Alemania, por otra parte, recicla aproximadamente un 60 % de los desechos de llanta que genera. Un factor muy importante que atañe a estas dos problemáticas es el mal manejo final de estos desechos, ya que existe una gran cantidad de tiraderos clandestinos causando un importante foco de contaminación. Estos dos problemas año con año van en aumento, pues al no degradarse, tanto las llantas como el cascajo, se acumulan sin que exista alguna medida efectiva para mitigarlo.

En México el panorama es similar al del resto del mundo, se generan anualmente 6 millones de toneladas de residuos de obras y demolición y 40 millones de llantas de desecho, de los cuales una mínima parte tiene un manejo adecuado o es destinado para ser reutilizado o reciclado.

Es por ello, la originalidad de este trabajo de tesis ya que se busca conocer el comportamiento de estos dos materiales al implementarlos como materia prima para la elaboración de adoquines que puedan ser utilizados en vialidades, ya que con estos materiales se puede resolver otra problemática aparte de las ya mencionadas, que es el mantenimiento de áreas recreativas como la pavimentación de diversas zonas alrededor de todo el país.



## OBJETIVO

---

Determinar la mezcla ideal con materiales reciclados para la producción de adoquines realizando pruebas de compresión de acuerdo a la normatividad y manufacturando una máquina para la fabricación tanto de probetas como del adoquín.

### **Objetivos específicos**

Los objetivos del presente trabajo son:

- Dar a conocer la situación de contaminación por residuos de construcción y de llanta en México y en el mundo contribuyendo a la difusión de este tipo de información.
- Fomentar la cultura del reciclaje y reúso de desechos de construcción y de llanta ayudando a la correcta disposición de estos residuos.
- Determinar las ventajas de los pavimentos de adoquines comparándolas con los adoquines convencionales.



# CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

## 1.1 Historia del adoquín

La historia de los adoquines ha estado estrechamente ligada a la evolución de las vías urbanas. En la época medieval, las calles servían tanto para permitir el acceso de peatones, carros o animales, como lugar de vertido de aguas negras. Estos vertidos obligaban a pavimentarlas con elementos que facilitaran un rápido drenaje y permitiera el movimiento de personas y vehículos de tracción animal. Para realizar las obras de pavimentación se crearon gremios de especialistas, estableciéndose escuelas de oficios con una clara jerarquía de maestros, oficiales y aprendices. En esta época, la mayoría de estos gremios se preocupaba solamente de las características superficiales de la vía, cuando se incrementó el número de vehículos y su peso, empezó a considerarse el comportamiento de la subestructura del firme (base, sub-base y explanada) (MTCE, 2004).

Históricamente, los cuatro tipos de adoquines que se han utilizado para pavimentar áreas urbanas son los adoquines de piedra, los de madera, los cerámicos y los de hormigón. Los primeros adoquines de piedra que se utilizaron fueron guijarros de río colocados sobre una capa de arena sellándose las juntas con una argamasa de cal y arena. Los adoquines de madera se usaron en la primera mitad del siglo XIX, como una alternativa a los adoquines de piedra, para intentar reducir así, el nivel de ruido que provocaban las ruedas de acero y las herraduras de los animales. De todos modos, aunque el nivel sonoro era inferior a los de piedra, se degradaban rápidamente a la intemperie y tras la aparición de los neumáticos se abandonaron.

Los ladrillos cerámicos utilizados como material de pavimentación se han estado utilizando durante los últimos 5,000 años, desde Mesopotamia, habiéndose demostrado su aptitud para usos peatonales o de bajos requerimientos. Los ladrillos cerámicos en pavimentación se colocaban sobre una capa de arena que también servía para rellenar las juntas, siendo su principal problema el rápido desgaste de su superficie, con la



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

consiguiente reducción de su vida útil y de su resistencia al deslizamiento. Por último, se hace mención a los adoquines de hormigón, que comenzaron a fabricarse por primera vez, a finales del siglo XIX. Rápidamente se comprobó que proporcionaban una mayor uniformidad y unos costos más reducidos que los adoquines de piedra y los cerámicos.

Fue en Holanda y Alemania donde mayoritariamente se usaron durante la primera mitad del siglo XX, y donde primeramente se empezó a investigar sobre diferentes formas y modelos de colocación. Al principio, los adoquines de hormigón simplemente imitaban a los de piedra, con las consiguientes limitaciones estéticas, resultando más fácil tanto su fabricación como su colocación. Más tarde, conforme los procesos de fabricación fueron mejorando, se empezaron a introducir formas dentadas o curvas, donde las tolerancias dimensionales eran ya muy pequeñas. Esto permitió que las cuadrillas de colocación no fuesen tan especializadas como antes, y que los adoquines se adaptasen mejor a cualquier alineación. La evolución técnica se disparó en la década de los 70s, provocando la aparición de numerosos sistemas de fabricación, modelos de adoquines y principalmente, el abaratamiento de los costos de fabricación y colocación (Cabezas, 2014).

### **1.2 Materiales de fabricación de adoquines convencionales**

Para la elaboración de los adoquines solo se necesita de materiales de origen pétreo, de fácil utilización y modulación, al contrario de los que sucede con los pavimentos flexibles en los que es necesario el uso de materiales derivados del petróleo, que además de caros son contaminantes. Existe control en la fabricación de cada pieza y pueden ser considerados productos mucho más fiables y consistentes para pavimentos, como su fabricación es relativamente sencilla se lo considera un elemento bastante barato. Básicamente los requisitos que deben cumplir los agregados son:





## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

### a) Agregado fino

Se utiliza arena natural o manufacturada (o una combinación de ambas) constituida de granos duros, que esté libre de materia orgánica. Las partículas no tendrán formas alargadas sino esféricas o cúbicas.

### b) Agregado grueso

El árido grueso debe consistir en grava, grava triturada, piedra triturada o una combinación de estos. Los agregados deberán almacenarse separadamente en sitios limpios, libres de residuos y materias orgánicas.

### c) Agua

El agua es utilizado tanto en el amasado como en el curado, es un componente esencial en las mezclas de concreto y morteros pues al entrar en contacto con el cemento genera el proceso de hidratación que permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante, esto desencadena en una serie de reacciones que terminan entregando al material sus propiedades físicas y mecánicas, su buen uso se convierte en el parámetro principal de evaluación para establecer el eficiente desempeño del concreto en la aplicación (Cabezas, 2014).

### 1.3 Proceso de fabricación del adoquín

La elaboración el adoquín comienza en la cantera, en donde se extrae la materia prima para su fabricación, adicionalmente se debe tomar muy en cuenta la normatividad y procesos de obtención de la materia prima a utilizar. Por otro lado, a pesar de haber variaciones en el proceso de elaboración dependiendo del fabricante, los siguientes pasos son en general el método a seguir (Cabezas, 2014).



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

Los pasos convencionales para la elaboración de adoquines son:

### **a) Dosificado**

Como su nombre lo indica, el primer paso consiste en dosificar los distintos materiales para la elaboración del adoquín. Las proporciones de cada uno deben seleccionarse de modo de utilizar los materiales en la forma más económica, siempre y cuando se garantice que el producto final cumpla con las propiedades adecuadas, asimismo se pueden consultar tablas con proporciones aproximadas, la proporción más utilizada es 1:3:1 (cemento, arena, grava) pero siempre tomando estos valores únicamente como una referencia, ya que hay varios factores que pueden influir como lo son:

- El tipo de cemento utilizado
- La humedad en el ambiente
- La granulometría de los agregados

### **b) Mezclado**

Una vez definidas las proporciones, se procede al mezclado, en donde los materiales se mezclan de forma mecánica hasta obtenerse una mezcla homogénea y uniforme.

En primera instancia se coloca el cemento y los agregados en una mezcladora para que se combinen en seco, se le añaden agua y se continúa mezclando hasta obtener una composición homogénea. La duración deberá tener el tiempo necesario para que la grava (agregado fino y grueso) sea cubierta en su totalidad por la pasta de agua, cemento y agregados.

### **c) Moldeado**

Éste paso se debe realizar inmediatamente después del mezclado, ya que la mezcla no debe secarse o presentar signos de fraguado, además los moldes deben de estar



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

completamente limpios y es deseable que se encuentren a una temperatura superior a los 5 °C. A continuación éstos se llevan a una máquina de vibro-compactación. Bajo los moldes se coloca un tablero previamente cubierto con aceite quemado o diésel. El tiempo de vibración y compactación dependerá de las características de la mezcla y de la resistencia que se desee ya que el vibrado cumple una importante función pues saca la mayor cantidad de aire y por ende aumentan las propiedades mecánicas finales, sin embargo una buena aproximación son alrededor de 12 segundos. Una vez terminado éste proceso se retira el excedente de la superficie y se procede a la compactación hasta conseguir la altura deseada del adoquín para finalmente desmoldarlos.

### **d) Secado**

Después del desmolde de los adoquines se los coloca en el área de secado, ésta área debe estar protegida del sol y del viento para evitar que el agua contenida en el adoquín se evapore muy rápido, lo que provoca grietas y poros en su estructura que lo debilitan considerablemente. Éste proceso dura entre 6 y 8 horas, aunque es recomendable levantar el tablero hasta el día posterior a su fabricación (Cabezas, 2014).

### **e) Curado**

Consiste en regar periódicamente los adoquines simulando una leve llovizna, esto para conservar la humedad y lograr que la reacción química del cemento con el agua continúe hasta lograr las resistencias deseadas. Es importante almacenar los adoquines con una separación suficiente para humedecerlos por todos sus costados. Un curado inadecuado, es equivalente a emplear una menor dosis de concreto, lo que provoca agrietamientos y bajas resistencias, de ahí la importancia de éste paso (Cabezas, 2014).

## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

### 1.4 Tipos de máquinas para producción de adoquines

#### 1.4.1 Máquina manual

Este es uno de los modelos más difundidos en zonas rurales. El concreto se prepara en una mezcladora o manualmente, y se deposita por los operarios, comúnmente mediante palas, directamente en el molde. La vibración se obtiene gracias a un eje con una masa excéntrica solidaria a una plataforma, y en los modelos más rudimentarios, no se cuenta con ningún mecanismo que cumpla la función. La fuerza de los apisonadores proviene únicamente de la gravedad y la fuerza humana. Todos los componentes son accionados de manera manual, y en el mejor de los casos con sistemas de palancas. En la Figura 1.1 se muestra una máquina similar a la descrita. Un modelo ligeramente más sofisticado, que el mencionado con anterioridad, es el mostrado en la Figura 1.2 (Corzo y Cuatin, 2011).



Figura 1.1 Máquina bloquera manual 1 (Corzo y Cuatin, 2011)

El modelo mostrado en la Figura 1.2 tiene un sistema de vibración por masas excéntricas, y los apisonadores bajan por gravedad. El desmolde se efectúa mediante un mecanismo



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

de palancas, accionado por operarios. Para operar de manera continua, la máquina requiere de al menos 6 operarios distribuidos de la siguiente manera:

- Dos operarios para fabricar el producto terminado y transportarlo hasta el área de secado.
- Dos operarios para depositar el concreto en el molde y accionar las palancas para el desmolde.
- Dos operarios para transportar el material a la mezcladora y accionarla.

El esquema antes descrito puede ser complementado con diferentes accesorios para incrementar la productividad:

- Tolva con compuerta manual para dosificar el material en el molde.
- Banda transportadora desde la mezcladora hasta la máquina.
- Automatización parcial de algún proceso como la vibro-compactación o el desmolde (Corzo y Cuatin, 2011).



Figura 1.2 Máquina bloquera manual 2 (Corzo y Cuatin, 2011)



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

### 1.4.2 Centrales automáticas

Este tipo de máquinas sustituyen sistemas automatizados integrados en los que todo el proceso se lleva a cabo de manera automática. Se utiliza para producciones muy elevadas de más de 40,000 unidades por jornada de 8 horas. Maquinarias de este tipo pueden observarse en la Figura 1.3. El funcionamiento de la máquina mostrada en la Figura 1.3, es de la siguiente manera:

- La materia prima para la elaboración del concreto es depositada en sitios que poseen dosificadores automáticos.
- El material es transportado desde los sitios hasta la mezcladora mediante bandas transportadoras.
- Desde la mezcladora, mediante bandas transportadoras, el material es trasladado hasta un sistema de distribuidor cuya función es la de dosificar la cantidad justa de material en el molde.
- Las placas para el producto terminado ingresan de manera automática a la máquina. Incluso algunos modelos cuentan con algún sistema de las placas antes de su intento al sistema.
- Se produce la vibro-compactación. Las vibraciones se obtienen mediante masas excéntricas o, en modelos más sofisticados, mediante vibradores electromecánicos.
- Se produce el desmolde del producto que va saliendo de manera automática a una banda transportadora. Algunas variantes de maquinaria cuentan con cepillos rotatorios que pulen las imperfecciones del producto
- El producto es apilado de manera semiautomática o automática, mediante sistemas robotizados (Corzo y Cuatin, 2011).



Figura 1.3 Central de producción de prefabricados de concreto (Corzo y Cuatin, 2011)

### 1.4.3 Máquinas automáticas

Este tipo de máquina puede observarse en la Figura 1.4. Esta máquina es similar a la descrita en el apartado 1.4.2, sin embargo ciertos procesos ya no son ejecutados por elementos integrales de la maquina o sistema. Estos procesos son:

- Dosificación automática de los ingredientes para la elaboración del concreto.
- Alimentación y limpieza automática de las placas para el producto terminado.
- Corrección de imperfecciones del producto.
- Apilamiento automático del producto (Corzo y Cuatin, 2011).



Figura 1.4 Máquina automática de prefabricación de concreto (Corzo y Cuatin, 2011)

## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

### 1.4.4 Máquinas semiautomáticas

Son máquinas para producciones más modestas, de 8,000 a 15,000 unidades por día. Tienen cierto grado de automatización, no obstante, muchas de las operaciones para la fabricación debe ser asistida por operadores. Usualmente la compactación y el desmolde se ejecutan mediante mecanismos accionados por cilindros neumáticos o hidráulicos. La distribución del material en el molde se ejecuta de manera semiautomática. El material es dosificado y dispuesto en el molde con la ayuda de un operador que para este efecto emplea accesorios incluidos en la máquina. Una máquina de este tipo puede observarse en la Figura 1.5 (Corzo y Cuatin, 2011).



Figura 1.5 Máquina semiautomática (Corzo y Cuatin, 2011)



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

### 1.4.5 Máquina móvil automática

Constituye un tipo de máquina novedosa que opera bajo un principio diferente a las citadas anteriormente. La máquina tiene la capacidad de desplazarse sobre un terreno plano e ir depositando a intervalos regulares el producto. Para esto la unidad móvil cuenta con sistemas de distribución, vibro-compactación y desmolde. Una máquina de estas características se muestra en la Figura 1.6. La ventaja fundamental de este tipo de máquina es que se prescinde de la infraestructura necesaria para transportar el producto y apilarlo, no obstante, una desventaja importante es que la materia prima debe ser transportada cada vez a una ubicación diferente, dependiendo de donde se encuentre el sistema (Corzo y Cuatin, 2011).



Figura 1.6 Máquina móvil de prefabricados de concreto (Corzo y Cuatin, 2011)

### 1.5 Uso de adoquín en México y otros países

El aumento considerable del tráfico vehicular en la Ciudad De México y las consecuencias de las lluvias orillan al Ayuntamiento capitalino a sustituir el adoquín por concreto hidráulico en algunas calles del perímetro A y B del Centro Histórico, respetando siempre los lineamientos del gobierno federal para la conservación de las calles y de la



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

infraestructura urbana. Un ejemplo de ello es la ciudad de San Luis Potosí, en donde se atiende de forma integral las deficiencias de cuatro calles del Centro Histórico para devolverles su funcionalidad, pero respetando las indicaciones marcadas por la representación local del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), dentro de los programas para la recuperación del centro histórico, se verifica el proceso de retiro y de recuperación de las piezas del adoquín, así como su reusó en otras vialidades (Vargas, 2016).

Los adoquines de hormigón para pavimentos producen una superficie durable y resistente, capaz de soportar las altas cargas del tránsito. Los adoquines pueden ser fabricados en una gran variedad de colores y formas para producir efectos estéticos muy agradables. Haciendo referencia al panorama mundial, en la Tabla 1.1 se muestra el uso de los adoquines de hormigón para pavimentación en términos relativos a la población de algunos países.

Tabla 1.1 Uso per cápita de adoquines de hormigón en pavimentación (a partir de PCR, 1997)

País	Población millones	Pavimento de adoquines colocados millones de m <sup>2</sup>	Per cápita m <sup>2</sup> /persona
Alemania	65	65.00-102.00	1.00-1.60
Holanda	15	14.88	0.99
Australia	16	4.00	0.25
Canadá	27	4.50	0.17
Reino Unido	65	8.00	0.12
Estados Unidos	225	6.90	0.03

La buena apariencia estética de los adoquines para pavimentación es universal y por ello tienen mucha aceptación de parte de los arquitectos, desarrolladores y paisajistas de los Estados Unidos. Solamente el 5% de las ventas de adoquines se dirigen a aplicaciones industriales. El grueso de las ventas se dirige al sector de residencias y una pequeña parte



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

a municipalidades u obras públicas como parques, aceras, etc. Estas proporciones de uso contrastan fuertemente con las de otros países. La Tabla 1.2 ilustra las proporciones de uso de los adoquines en Alemania del Oeste en 1972, sobretodo en calles e industrias. Por otro lado, en ese mismo año Dinamarca registró un 40% de uso dirigido al sector industrial.

Tabla 1.2 Uso de adoquines de pavimento en Alemania (a partir de PCR, 1997)

Aplicación	Uso %
Calles	36.40
Zonas industriales	29.10
Entradas privadas	12.50
Vías peatonales	12.00
Parques, escuelas	6.80
Otros	3.20

En Rotterdam, la pavimentación modular, que incluye principalmente adoquines, es el material dominante para superficies, tal como se ve en la Tabla 1.3. Con base en estos ejemplos, parece que hay muchas aplicaciones potenciales, que tienen una gran expectativa de crecimiento en cuanto al uso de estos adoquines (PCR, 1997).

Tabla 1.3 Superficies pavimentadas en Rotterdam, Holanda (a partir de PCR, 1997)

Función pavimento	Área total %	Hormigón asfáltico %	Hormigón modular %
Calles principales	17	50	50
Calles acceso	11	36	64
Calles industriales	11	5	95
Calles peatonales	3	25	75
Calles residenciales	53	6	94
Otras calles y vías	5	39	61
Total	100	19	81



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

### 1.6 Normatividad

Con el objetivo de homologar el rendimiento de los adoquines en un contexto como el de nuestro país y puedan tener características prácticamente iguales sin importar el fabricante, es necesario estandarizar el producto por medio de una norma y ser inspeccionados antes de colocarlos en su sitio final. Para el caso de México la norma referida es la NMX-C-314-ONNCCE-2014. Para ello, hay ciertos parámetros que se describen en dicha norma, algunos de los cuales se muestran a continuación.

#### a) Definiciones

**Área expuesta.-** Es el área de la proyección horizontal de la figura delimitada por las caras verticales y que queda expuesta al tránsito vehicular o peatonal.

**Dimensiones.-** Se toma como largo la dimensión del lado mayor del rectángulo de menor área que envuelve a la figura del área expuesta y como ancho al lado menor de dicho rectángulo.

**Dimensiones modulares.-** El ancho y largo modular serán las distancias entre centroides de dos adoquines acoplados en la posición que llevarán en el pavimento, en dirección del ancho y del largo del adoquín respectivamente.

**Tránsito ligero.-** Es aquel que tiene un número de vehículos acumulados equivalentes a ejes sencillos de 8.2 t, menos de  $5 \times 10^5$  ejes durante la edad de diseño del pavimento.

**Tránsito medio.-** Es aquel que tiene un número de vehículos acumulados equivalentes a ejes sencillos de 8.2 t, mayor de  $5 \times 10^5$  ejes y menor de  $5 \times 10^6$  durante la edad de diseño del pavimento.



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

**Tránsito pesado.**- Es aquel que tiene un número de vehículos acumulados equivalentes a ejes sencillos de 8.2 t, mayor de  $5 \times 10^6$  ejes durante la edad de diseño del pavimento.

**Tránsito peatonal.**- Es aquel destinado únicamente para la circulación de personas.

### b) Clasificación

Los productos objeto de esta norma se clasifican en 4 tipos, como se indica en la Tabla 1.4, de acuerdo al uso a que se destina el adoquín.

### c) Especificaciones

**Cemento.**- El cemento empleado para la fabricación de adoquines, debe cumplir con las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE.

Tabla 1.4 Clasificación del producto (NMX-C-314-ONNCCE, 2014)

Tipo	Espesor mínimo nominal mm	Uso
A	60	Tránsito peatonal
B	60	Tránsito ligero
C	80	Tránsito medio
D	80	Tránsito pesado

**Agregados.**- Los agregados finos y gruesos empleados para la fabricación de adoquines deberán cumplir con los requisitos establecidos y la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

**Agua.-** El agua utilizada en la fabricación de adoquines debe cumplir con los requisitos establecidos en la norma mexicana NMX-C-112-ONNCCE.

**Aditivos.-** En la elaboración del concreto para adoquines se permite el uso de aditivos que mejoren las propiedades del producto, y se deben cubrir con las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-255-ONNCCE.

**Geometría.-** La desviación máxima de la arista de las piezas respecto a una línea recta perpendicular al lado contiguo no debe ser mayor que 1%. La cara base y la cara de vista deben ser paralelas con una diferencia no mayor de 0.5° (aproximadamente un milímetro vertical por cada cien milímetros horizontales).

**Dimensiones.-** El espesor mínimo de los adoquines, según el uso, es el especificado en la Tabla 1.4. El ancho de la sección mínima de los adoquines no debe ser menor de 80 mm ni mayor de 250 mm, la relación largo ancho debe estar entre 1 y 2, y la relación largo a espesor no debe ser menor de 2 ni mayor de 5. El área expuesta no debe tener un área mayor que 650 cm<sup>2</sup>. El área de la superficie de desgaste del adoquín, limitado por un chaflán de sección recta o curva no debe ser menor del 70% del área expuesta.

**Tolerancias dimensionales.-** Las dimensiones de cada pieza no deben diferir de las nominales en más de  $\pm 2$  mm en dimensiones horizontales ni más de  $\pm 3$  mm en el espesor.

**Resistencia a la compresión.-** De acuerdo al uso a que se destinan, los adoquines deben satisfacer los requisitos de resistencia que aparecen en la Tabla 1.5 a la entrega del producto, con ayuda del método de ensaye descrito en la norma mexicana NMX-C-036-ONNCCE.



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

Tabla 1.5. Resistencia a la compresión en los adoquines (NMX-C-314-ONNCCE, 2014)

Tipo	Resistencia media MPa (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia mínima individual MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
A	29.4 (300)	24.5 (250)
B	39.2 (400)	35.3 (360)
C	44.1 (450)	39.7 (405)
D	55.0 (560)	50.0 (510)

**Absorción total de agua.**- De acuerdo al uso al que se destinan, los adoquines deben satisfacer los requisitos de absorción total de agua en 24 h que aparecen en la Tabla 1.6 a la entrega del producto.

**Resistencia a la abrasión.**- El resultado del método de ensayo de la prueba de chorro de arena no debe representar una pérdida de volumen mayor a 15 cm<sup>2</sup> por cada 50 cm<sup>2</sup> del área sometida al disparo (0.3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>) y la reducción de espesor no debe ser mayor a 3 mm.

Tabla 1.6 Absorción total del agua en 24 horas (NMX-C-314-ONNCCE, 2014)

Tipo	Absorción media %	Absorción máxima individual %
A	8	11
B	7	9
C	7	9
D	5	7

### d) Muestreo

**Número de muestras.**- El muestreo debe ser aleatorio y el número de piezas debe ser según lo indicado a la Tabla 1.7. Se deben tomar 20 piezas adicionales por cada 50,000



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

piezas que sobrepasen a las 100,000. La verificación de requisitos geométricos debe efectuarse aleatoriamente en cuando menos la cuarta parte de las piezas muestreadas.

**Identificación de las muestras.**- Cada muestra debe marcarse de la forma que pueda ser identificada en cualquier momento sin dañar la pieza (NMX-C-314-ONNCCE, 2014).

### e) Pavimento de adoquines

Capas que componen el pavimento de adoquines:

**Capa superficial.**- También denominada rodadura, está compuesta por los adoquines, dicha capa está en contacto directo con el tránsito. El espesor de los adoquines será variable de acuerdo al tipo de uso al que se encuentren. La capa de adoquines será correctamente trabada, sellada con arena fina (que penetrará en las juntas entre cada adoquín para evitar que haya espacios vacíos), y posteriormente compactada.

Tabla 1.7 Muestreo de adoquines (NMX-C-314-ONNCCE, 2014)

Tamaño del lote (piezas)	Número de piezas	Mínimo de piezas a ensayar		
		Absorción y dimensiones	Resistencia a la compresión	Resistencia a la abrasión
Hasta 50,000 o por día	20	5	5	10
De 50,001 hasta 100,000	40	10	10	20

**Paquete estructural.**- Esta base está compuesta por materiales seleccionados y puede estar conformado por diferentes diseños estructurales, de acuerdo al tránsito, las cargas



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

que deba soportar y la calidad del suelo. En la Figura 1.7 se muestran los diferentes componentes del paquete estructural, los cuales son:

- Sub-rasante: terreno natural adecuadamente compactado hasta alcanzar una capacidad portante mínima.
- Sub-base: constituida por material granular seleccionado y compactado.
- Base: Principal elemento portante de la estructura, realizado con material de menor granulometría que el anterior y compactado.
- Capa de nivelación: Base de apoyo de los adoquines, destinada a absorber diferencias de manera que éstos una vez compactados formen una superficie homogénea.

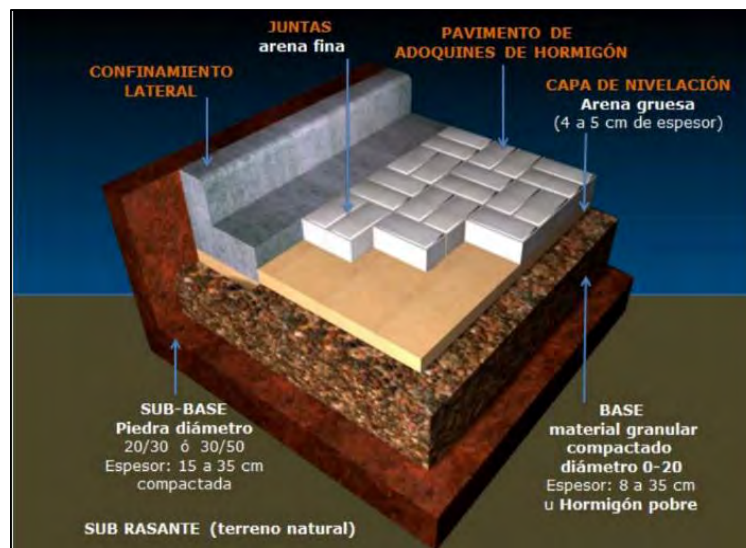


Figura 1.7 Esquema de pavimento de adoquines (CORBLOCK, 2016)

### f) Tipo de tránsito

Para un correcto diseño del pavimento es muy importante considerar el tipo de tráfico al que estará destinada el área a pavimentar, contemplando las cargas e intensidad de uso a las que éste se encontrará sometido. El tipo de tránsito que tiene la calle se determina



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

sumando los vehículos que pasan durante una semana y dividir éste resultado por siete, para obtener un promedio diario. Al considerar la clasificación de vehículos pesados, se deberá tener en cuenta a los que poseen 6 o más llantas (camiones, ómnibus, etc.). En la Figura 1.8 se indican las diferentes categorías de tráfico.

- Tránsito ligero: Son aquellos espacios donde transitan personas y bicicleta.
- Tránsito medio: Vialidades con un flujo constante de automóviles ligeros y motocicletas, en estas están prohibidos los vehículos de gran tonelaje como son camiones de carga, tractores, etc.
- Tránsito pesado: Vialidades en las que es permitido el tránsito de vehículos pesados.
- Tránsito industrial: Son aquellos espacios en los que transitan constantemente vehículos pesados que se utilizan en la industria como lo son grandes tractores, buldócer etc. También son aquellos espacios en donde puede haber tránsito de aeronaves.

En la Tabla 1.8 se especifican los diferentes tipos de tránsito según el número de vehículos pesados que transitan diariamente (CORBLOCK, 2016).

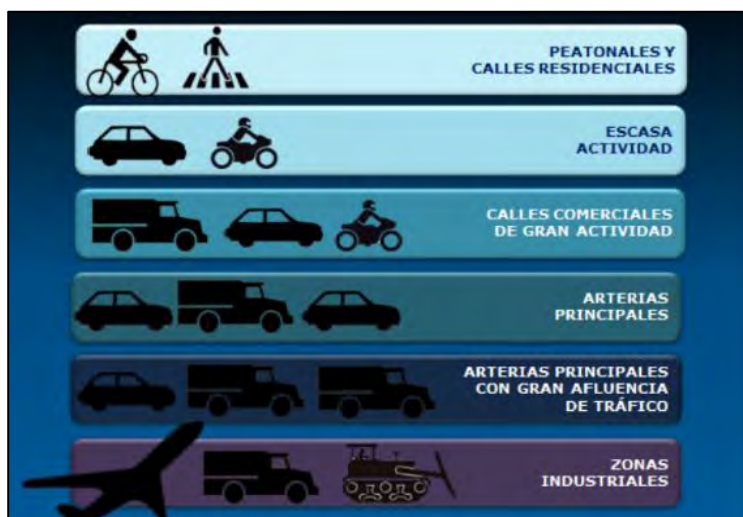


Figura 1.8 Esquema de tipos de tránsito (CORBLOCK, 2016)



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

Tabla 1.8 Vehículos pesados por día (elaboración a partir de CORBLOCK, 2016)

Número de vehículos pesados por día	1 a 5	6 a 20	21 a 50	51 a 200
Tipo de tránsito	Tránsito ligero	Tránsito medio	Tránsito Pesado	Tránsito Industrial



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

### 2.1 Desechos de construcción

Los desechos de construcción son todos aquellos materiales generados durante la realización o ejecución de una obra civil, así como por los procesos de demolición y remodelación. En las obras civiles de construcción, los residuos están referidos a aquellos componentes excedentes, que no forman parte de la estructura integral de la obra, o que han sido descartados debido al propio proceso constructivo; como por ejemplo: el material producto de la preparación del terreno, aquellos materiales que por sus propiedades físico químicas no pueden ser reutilizados en la obra, los materiales de embalaje, materiales y sustancias utilizados por los equipos de movimiento de tierras, residuos generados por el personal que trabaja en la ejecución de la obra, y residuos de oficinas. En la Tabla 2.1 se exponen sus porcentajes (Martel, 2008; Moran y col., 2010).

Tabla 2.1. Composición en peso de los residuos de construcción y demolición producidos en obras de construcción (Moran y col, 2010).

Materiales	Composición %
<b>Fracción pétreo</b>	<b>75</b>
Ladrillo, azulejos y otros cerámicos	54
Hormigón	12
Piedra	5
Arena, grava y otros áridos	4
<b>Resto</b>	<b>25</b>
Madera	4
Vidrio	0.5
Plástico	1.5
Metales	2.5
Asfalto	5
Yeso	0.2
Basura	7
Papel	0
Otros	4



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

### 2.1.1 Panorama en el mundo

No existe consenso mundial sobre el volumen total de desechos de construcción. Estos van a depender de las tecnologías, idiosincrasia, nivel cultural de los profesionales del sector, entre otros. Por otro lado, Aldana y Serpell (2012) realizaron una investigación sobre residuos en el mundo y declararon que el 35% pertenecen a la industria de la construcción. Según estimaciones diversas, tomando como base a Aldana y Serpell (2012), los porcentajes de residuos de construcción generados y de residuos de la construcción reciclados en diversos países se encuentran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Porcentajes de residuos de la construcción reciclados en diversos países (Aldana y Serpell, 2012)

País	Residuos de construcción %	Residuos reciclados %
Alemania	19	17
Francia	25	15
Holanda	26	90
Italia	30	9
Reino Unido	50	45
España	70	5
Finlandia	13 y 15	45
Australia	20 y 30	51
Brasil	20 y 30	8
Japón	36	65
Estados Unidos	20 y 29	30

### 2.1.2 Panorama en México

De acuerdo con la empresa SICA (2011), entre los escasos datos que se tienen para estimar la generación y composición de los residuos de la Industria de la construcción en la República Mexicana, se ha encontrado que forman entre el 15% al 20% del total de



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

residuos sólidos municipales. Así mismo, se estimó en el año de 2001 que se producían alrededor de 19,200 ton/día (7,008,000 ton/año) de este tipo de desechos en todo el país.

Por otro lado, de acuerdo con estudios realizados en países en los que se presentan condiciones similares a las de México, tales como el Brasil, Colombia, Ecuador y Nicaragua entre otros, se estima que la corriente de estos residuos, pueden llegar a constituir alrededor de un 40% del flujo total de desechos sólidos recolectados; sin embargo, la generación y composición de los residuos provenientes de la industria de la construcción varía considerando que dentro de ésta actividad, se aplican diversos métodos constructivos, amén de existir una gama muy amplia de actividades tales como: demolición, desmantelamiento, excavaciones, ampliaciones, remodelaciones y construcciones nuevas; así como de los métodos constructivos que ejecute cada una de estas actividades. La generación promedio calculada a nivel nacional de los residuos de la construcción y demolición, provenientes de obras para vivienda, comercios, industria e infraestructura, fue de 13,130 ton/día en el año 2005. Es decir, 4,792,450 toneladas de residuos de la construcción calculadas para el año de 2005.

Los materiales de la industria de la construcción (demolición, mantenimiento y construcción civil en general), se estiman en 3,300 toneladas diarias y representan otros 20.3 % de los residuos sólidos que se generaron en la Ciudad de México en el año 2004. La Secretaria de Medio Ambiente de la Ciudad de México, reconoció que la falta de tiraderos legales de cascajo en la ciudad es un problema muy grave (SICA, 2011). De acuerdo con información de la Secretaría de Medio Ambiente, en la ciudad existen sólo dos sitios autorizados por el gobierno local, en las delegaciones Iztapalapa y Tláhuac. El resto de tiraderos legales en el Valle de México están ubicados en el Estado de México, en los municipios de Huixquilucan, Zumpango, Naucalpan, Ixtapaluca, Huehuetoca, Acolman, Calimaya, Chalco, Coacalco y Texcoco (Montes, 2011).



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

Como lo reportó el diario *Texta* (2016), durante la sesión de la Diputación Permanente de la Asamblea Legislativa del Distrito Federal (ALDF) en Agosto de 2016, el presidente de la Comisión de Vigilancia de la Auditorio Superior de la Ciudad de México citó datos de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) según los cuales a nivel nacional se estima una generación anual de 6 millones de toneladas de residuos de obras y demolición; es decir, 17 mil toneladas diarias en promedio, de las cuales al menos 7 mil provienen de obras que se ejecutan en la Ciudad de México. Se observa claramente el aumento de estos residuos en años anteriores comparados a datos más recientes. Es un hecho que estos residuos crecerán de manera acelerada al paso de los años, por lo que es necesario crear infraestructura y normatividad para que se integren a un ciclo de vida acorde a las necesidades ambientales que se requieren hoy en día, mejorando así la calidad de vida de las personas.

### **2.2 Contaminación de desechos de llanta**

En la cadena del ciclo de vida de un producto, es fundamental considerar qué se hará con éste una vez que haya cumplido la función primaria para la que fue concebido, es decir, dar opciones para que al final del mismo se reintegre a otra cadena de valor o a los ciclos naturales. Para el caso de las llantas, ésta consideración final no se hizo desde un principio, lo que desembocó en que sea un hecho común desecharlas en cementerios de llantas, tiraderos clandestinos o basureros provocando graves problemas ambientales y de salud pública en las inmediaciones de dichas locaciones. Los neumáticos usados, por lo general, se desechan de alguna de las siguientes formas:

- Los mayoristas de servicio automotriz (generadores) contratan un servicio de recolección particular que las transporta hasta un almacén temporal, para posteriormente enviarlas a empresas que las utilizan como combustible alternativo



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

- Los generadores minoristas utilizan el servicio de recolección pública de residuos; éste, a su vez, las transporta a plantas de selección y aprovechamiento, a estaciones de transferencia de residuos o al sitio de disposición final, donde son separadas y enviadas a un almacén para ser recuperadas en pequeñas cantidades.
- Los generadores o transportistas también las echan indiscriminadamente en tiraderos a cielo abierto o en sitios clandestinos, lo que deriva en la disposición inapropiada y la acumulación no controlada

Otra práctica habitual es la quema de las llantas para la obtención de energía eléctrica, utilizándolas como combustible de las calderas generadoras de vapor que a su vez mueve una turbina produciendo electricidad, la cual por lo general es utilizada para la operación de las plantas de reciclaje. Estas prácticas no son del todo amigables con el medio ambiente, ya que la quema de estos productos derivados del petróleo produce una gran cantidad de gases tóxicos que contribuyen a una calidad del aire mala y por ende un problema de contaminación de otro tipo, es decir se soluciona un problema de contaminación por residuos sólidos y se genera un problema de contaminación del aire más grave.

### **2.2.1 Panorama en el mundo**

El problema de la contaminación causada por los neumáticos viejos, es a nivel global, por ejemplo, solo en España se generan alrededor de 300,000 toneladas de neumáticos usados cada año, pero únicamente una pequeña parte se recicla. Casi la mitad de esta cantidad de desechos no está controlado y el resto se acumula en vertederos controlados. Una gran diferencia frente a países ejemplares como Francia, Alemania y Austria, donde la media de reciclaje alcanza un 60 por ciento de reciclaje. Por otro lado, se estima que en América del norte las llantas consideradas como desechos, tienen un valor en el mercado



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

del reciclaje de aproximadamente 6,000 millones de USD, mientras que en Europa, esa cifra asciende a los 3,000 millones (Hernández, 2014; TIN, 2013).

Lo anterior presenta un panorama desolador, ya que en la mayoría de los países, se hace caso omiso de las normatividades correspondientes a la disposición final de éstos productos. El reciclaje de llanta y su utilización en asfalto es una idea que comenzó a ponerse en práctica en los años sesenta en Estados Unidos y desde entonces se han conseguido grandes avances. De hecho, son muchas las propuestas al respecto, y los estudios y nuevas iniciativas no dejan de multiplicarse en todo el mundo. En la Figura 2.1 se puede observar un gran ejemplo de reusó de llanta (Isan, 2015).



Figura 2.1 Reúso de llanta (Isan, 2015)



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

### 2.2.2 Panorama en México

Actualmente se tiran 40 millones de llantas al año en nuestro país, de éstas, solo un 12% se recicla o reutiliza; así, hay un inventario de aproximadamente 300 millones de llantas desechadas que resultan contraproducentes, pues representan un foco de propagación de plagas como roedores o mosquitos y pueden ser muy peligrosas en caso de incendio al ser difíciles de apagar, su quema incontrolada genera sustancias cancerígenas; además, son un recurso utilizable desperdiciado. De continuar con esta tendencia, para el año 2018 habrá cerca de 500 millones de llantas en desecho, lo cual representa una oportunidad para reutilizarlas.

Los principales cementerios de llantas están en el Cerro del Centinela en Mexicali, Baja California; el Ejido Lázaro Cárdenas en Tijuana, Baja California; Nogales, Sonora; Ciudad Juárez, Chihuahua; Matamoros y Reynosa, Tamaulipas y en el Bordo de Xochiaca, Ciudad de México. El problema de acumulación es particularmente agudo en la frontera norte debido al flujo de llantas que hay de Estados Unidos a México; a consecuencia de las normas de eficiencia energética, en Estados Unidos se desechan neumáticos que para los estándares mexicanos son aprovechables, por lo que hay un mercado importante de llantas de medio uso que ingresan al territorio nacional (TIN, 2013).

### 2.3 Modelos de diseño

La metodología de diseño data desde los años 50, cuando el proceso de diseño se convirtió en un objeto de estudio y en el que han intervenido una cantidad considerable de investigadores y expertos del tema. Los primeros trabajos de investigación se centraron en el desarrollo de métodos de diseño que definieran y orientaran el proceso de diseño. Los diferentes trabajos realizados bajo este enfoque han dado lugar a diferentes



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

modelos de diseño que se clasifican en dos grupos: modelos descriptivos y modelos prescriptivos (Cross, 2000; Phal y col., 2007).

Los modelos descriptivos suelen identificar la importancia de generar un concepto de solución al principio del proceso. Esta solución inicial se somete a análisis, evaluación, refinamiento y desarrollo. A veces, por supuesto, en el análisis y la evaluación aparecen defectos fundamentales en la solución inicial y tiene que ser abandonada, un nuevo concepto es generado y el ciclo empieza de nuevo. El proceso es heurístico: usando la experiencia previa, las directrices generales y reglas prácticas que conducen a lo que el diseñador espera ser la dirección correcta, pero sin garantía absoluta de éxito (Cross, 2000). Los modelos prescriptivos tratan de persuadir o animar a los diseñadores a adoptar mejores caminos de trabajo. Por lo general, ofrecen un procedimiento más algorítmico y sistemática a seguir. Muchos de estos modelos prescriptivos han hecho hincapié en la necesidad de un trabajo más analítico que precede a la generación de conceptos de solución (Cross, 2000). Por tanto, estos modelos han tendido a sugerir una estructura básica para el proceso de diseño dotada de análisis, síntesis y evaluación (Cross, 2000; Jones, 1992):

- Análisis: listado de todos los requerimientos de diseño y de la reducción de estos a un conjunto completo de especificaciones de desempeño relacionados lógicamente.
- Síntesis: búsqueda de posibles soluciones para cada especificación de desempeño individual y la construcción de los diseños completos de éstos con el menor compromiso posible.
- Evaluación: valoración de la precisión con la que los diseños alternativos cumplen con los requerimientos de desempeño para el funcionamiento, la fabricación y las ventas antes de seleccionar el diseño final. Dentro de los modelos prescriptivos se distinguen los modelos



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

propuestos por Pahl y col., Hong-Sen Yan, Ullman y Pugh. Desde el punto de vista de cómo se llevan a cabo las fases para evolucionar el diseño, los modelos citados proponen diferentes métodos de ejecución. Por ejemplo, los modelos de Pahl y Beitz y de Ullman proponen que las fases se ejecuten de forma secuencial pero realizando iteraciones entre ellas, mientras que el modelo de Pugh propone que las fases se ejecuten de forma secuencial. El modelo de Hong-Sen Yan muestra un proceso secuencial basado en técnicas creativas (Arconada y Zambrano, 2015).

### **2.3.1 Modelo de diseño de Pahl y Beitz**

Pahl y Beitz describen un modelo de carácter iterativo compuesto por cuatro etapas, incluyendo un número de pasos que guían el diseño de un producto desde cero hasta la especificación completa, como se muestra en la Figura 2.2. Las etapas son la planeación y clarificación de la tarea, el diseño conceptual, el diseño de realización y el diseño de detalle. Estas cuatro etapas se desarrollan en orden secuencial. Una vez terminada la primera etapa, el diseñador se pasa a la siguiente etapa que al concluirla propicia el inicio de la etapa posterior, y así sucesivamente. Dichas etapas se describen a continuación.

#### **a) Planeación y clarificación de la tarea**

Independientemente de que la tarea se base en una propuesta de producto derivado de un proceso de planificación del producto o en una orden específica del cliente, es necesario aclarar la tarea dada con mayor detalle antes de comenzar el desarrollo del producto. El propósito de esta clarificación de la tarea consiste en recoger información acerca de los requerimientos que tienen que ser cumplidos por el producto, y también sobre las limitaciones existentes y su importancia. Esta actividad resulta en la especificación de la información en forma de una lista de requerimientos que se centra y está en sintonía con los intereses del proceso de diseño y las etapas de trabajo



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

posteriores. La fase de diseño conceptual y etapas posteriores deben basarse en este documento, que debe ser actualizado continuamente.

### **b) Diseño conceptual**

Esta etapa se logra mediante la abstracción de los problemas esenciales, el establecimiento de estructuras de función, en busca de los principios de trabajo apropiados y luego combinar estos principios en una estructura de trabajo. El diseño conceptual resulta en la especificación de una solución de principio (concepto).

### **c) Diseño de realización**

Durante esta etapa, los diseñadores, a partir de un concepto (solución de principio), determinan la estructura de la construcción (diseño general) de un sistema técnico de acuerdo con criterios técnicos y económicos. El diseño de realización resulta en la especificación de un diseño. Frecuentemente es necesario para producir varios diseños preliminares a escala simultáneamente o sucesivamente con el fin de obtener más información acerca de las ventajas y desventajas de las diferentes variantes. Se puede conseguir un mejor diseño con la combinación apropiada y la eliminación de puntos débiles. Este diseño definitivo proporciona un medio para comprobar la función, la fuerza, la compatibilidad espacial, etc, y es también en esta etapa donde la viabilidad financiera del proyecto debe ser evaluada.

### **d) Diseño de detalle**

Durante esta etapa, los arreglos, las formas, las dimensiones y las propiedades superficiales se establecen en su forma final. Los materiales son especificados, las posibilidades de producción son evaluadas, los costos calculados, y se elaboran todos los planos y otros documentos de producción. El diseño de detalle tiene un gran impacto en los costos de producción y la calidad, y, por lo tanto, el éxito en el mercado. En la Figura 2.2 se muestra un diagrama de este modelo de diseño (Pahl y col., 2007).

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

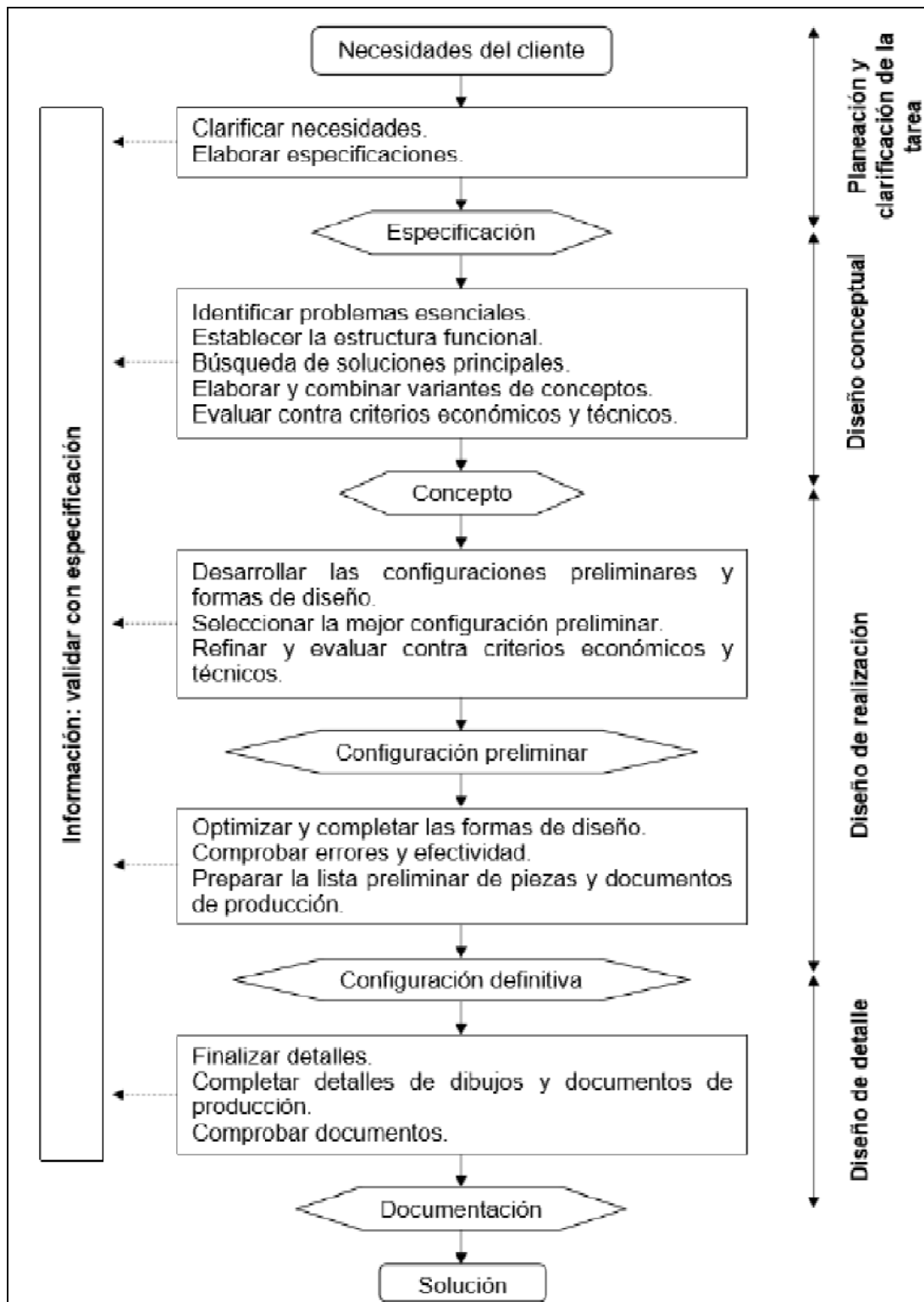


Figura 2.2. Esquema del modelo de diseño Pahl y Beitz (Pahl y col., 2007)



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

### 2.3.2 Modelo de diseño de Stuart Pugh

Pugh (1991), concibe un modelo de diseño pensado en el diseño total, que lo define como la actividad sistemática necesaria para satisfacer una necesidad, que va desde la identificación de la necesidad del mercado o del usuario hasta la venta del producto. Además, es una actividad que involucra productos, procesos, personas y organización. El diseño total puede ser representado por un núcleo central, o núcleo de diseño, que contempla las actividades imprescindibles en todo proceso de diseño. El núcleo de diseño está compuesto por las necesidades del mercado, la especificación del diseño del producto, el diseño conceptual, el diseño de detalle, la fabricación y las ventas. Estas actividades son las etapas que caracterizan al modelo de Pugh ilustrado en la Figura 2.3. Pugh (1991) propone algunas herramientas o técnicas directamente relacionadas con el núcleo de diseño, las cuales se presentan como entradas al núcleo en cada una de las seis etapas del modelo de diseño. Puede que sean técnicas de análisis, síntesis, toma de decisiones, modelado, etc., pero todas son aplicables a cualquier producto, y son por lo tanto independientes de la disciplina o de la tecnología.

#### **a) Necesidades del mercado**

Enfrentarse con la situación de la necesidad del usuario, requiere la investigación de diversos caminos relacionados con el área del producto. Se debe considerar la competencia existente para conocer a fondo el área en la cual se desarrollará el diseño y así trabajar más profesionalmente para obtener un producto que cumpla con lo deseado. Al establecer la verdadera necesidad del usuario o mercado es indispensable adquirir y utilizar mucha información. La adquisición de la información implica saber qué hacer con ella, por lo que es necesario familiarizarse con las técnicas de análisis, por ejemplo el análisis de la competencia. Como consecuencia de la realización de esta investigación, la actividad de diseño posterior se vuelve más rápida y más segura.



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

### **b) Especificación del diseño del producto**

El establecimiento y la evolución de las especificaciones del producto de diseño (PDS) ahora se considera en mayor detalle. Todas las etapas en este modelo de diseño ocupan, en un momento determinado, como referencia básica esta especificación, es decir, se tratará de cumplir con las especificaciones. Hay que considerar que si durante el diseño del producto existe una buena razón por la cual se deban cambiar las PDS, entonces hay que cambiarlas. Las PDS son esenciales en todos los ámbitos de la actividad de diseño, por lo que esta etapa se convierte en la base del proceso de diseño y al final de éste el producto deberá cumplir sin excepción alguna todas y cada una de ellas a pesar de los cambios que se pudieron haber realizado.

Algunos de los aspectos que se deben considerar para establecer las especificaciones con las cuales se desarrolla el diseño son: desempeño, entorno, vida útil, mantenimiento, costo de producción a alcanzar, competencia, transporte, embalaje, cantidad, facilidad de fabricación, tamaño, peso, estética apariencia y acabado, materiales, lapso de vida del producto, estándares, ergonomía, consumidor, calidad y fiabilidad, caducidad, escalas de tiempo, seguridad, limitaciones, patentes, literatura y datos del producto, implicaciones políticas y sociales, aspectos legales, instalación, documentación, y disposición. Una vez concluida esta etapa, será posible continuar con la generación de conceptos que permitirán dar solución a la necesidad planteada en la primera etapa de este modelo (Pugh, 1991).

### **c) Diseño conceptual**

La fase conceptual del núcleo de diseño se refiere a la generación de soluciones para satisfacer la necesidad expresada. Se reconoce que el diseño conceptual, como tal, se puede aplicar tanto al nivel global, como a nivel de subsistemas o de componentes. Sin embargo, este modelo hace referencia a un proceso de diseño total, lo que implica que se





## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

enfoca en un sistema completo como un proceso continuo que considera un conjunto de fases.

- Fase conceptual: se definen representaciones del todo o la totalidad del producto proyectado, es decir, se plantean conceptos.
- Generación de soluciones: se generan soluciones para satisfacer las especificaciones.
- Forma y presentación de conceptos: las ideas generadas para cumplir con las PDS se deben expresar en forma gráfica y esquemática a través de modelos sólidos, lo que podría denominarse diseño 3D, y además deben tener la claridad suficiente para después ser evaluados.
- Evaluación de conceptos: se establecen los criterios que formalizan la elección de la mejor idea.
- Generación del concepto: el resultado de estas fases del diseño conceptual debe ser presentado como un dibujo o esquema que permita establecer su validez ingenieril (Pugh, 1991).

### **d) Diseño de detalle**

Cuando se llega al diseño de detalle, lo que se necesita es aprovechar todo el conocimiento de materiales, técnicas de análisis, tecnología, entorno del diseño, cantidad, vida útil, sobrecarga, carga, estética, etc., para así obtener la documentación que describe a detalle cada componente del producto o el producto total, sin dejar duda alguna de su composición y funcionamiento. De esta etapa se deriva toda aquella especificación que servirá como referencia en procesos posteriores como la fabricación.



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

### **e) Fabricación**

La fabricación es un punto importante que hasta esta etapa no se había considerado. Esto implica tener que establecer un diseño para la fabricación, es decir, elegir el proceso de manufactura que mejor se adecue al diseño obtenido sin dejar de lado las modificaciones en los costos que esto pudiera representar. Los principales aspectos a considerar para elegir el proceso de fabricación adecuado son: reducción al mínimo de los costos de componentes y ensamblaje, elaboración de productos de mayor calidad, producibilidad de piezas y partes, y método de montaje.

### **f) Ventas**

La última etapa que considera Pugh en su núcleo central es la relacionada con la venta del producto, donde se consideran los aspectos concernientes a las necesidades del usuario, tomadas en cuenta en las primeras etapas, en concordancia con el producto obtenido y los canales de distribución, mercadeo y ventas. En la Figura 2.3 se muestra un diagrama de este modelo (Pugh, 1991).

### **2.3.3 Modelo de diseño de Ullman**

Independientemente del producto que está siendo desarrollado o modificado, David G. Ullman propone un conjunto genérico de seis etapas iterativas que se deben realizar en todos los proyectos de diseño. Éstas se enumeran en la Figura 2.4. Este procedimiento de diseño es aplicable al diseño de sistemas, subsistemas, montajes y componentes, todos ellos pueden ser productos nuevos e innovadores, así como permite hacer cambios a los productos existentes. Además, el modelo de Ullman centra el esfuerzo en las primeras fases, donde se toman las decisiones importantes, propicia la comunicación, fomenta la documentación y anima a la recopilación de datos para apoyar la creatividad.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS



Figura 2.3. Esquema del modelo de diseño de Pugh (Pugh, 1991)

Para cada etapa, hay una serie de actividades que se deben llevar a cabo. Ellas son un refinamiento de las fases en el ciclo de vida del producto que son de interés para el diseñador.



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

### **a) Descubrimiento del producto**

Antes de que el diseño original o rediseño de un producto pueda comenzar, se debe establecer la necesidad. Existen tres fuentes principales para los proyectos de diseño: la tecnología de empuje, la demanda de mercado y el cambio del producto. Independientemente de la fuente, una actividad común en la mayoría de las empresas es el mantenimiento de una lista de proyectos potenciales. Puesto que el tiempo y el dinero tienden a ser limitados, la segunda actividad, después de la identificación de los productos, es la elección de uno de ellos para trabajar en él. La demanda de mercado ocurre cuando los clientes adquieren los nuevos productos o solicitan algunas características del producto. Alrededor del 80% del desarrollo de nuevos productos es impulsado por el mercado. Al mismo tiempo, los ingenieros y los científicos tienen ideas para nuevos productos y mejoras en los productos basados en la tecnología. En lugar de ser impulsado por el cliente, estas ideas son impulsadas por las nuevas tecnologías y lo que se aprende durante el proceso de diseño.

### **b) Planeación del proyecto**

La segunda etapa consiste en planificar para distribuir adecuadamente el tiempo y los recursos necesarios que permitirán desarrollar el proceso de diseño. El arduo trabajo de planificación va a desarrollar un programa y la estimación de los costos. El objetivo final de las actividades de esta etapa es la generación de un conjunto de tareas que deben llevarse a cabo y una secuencia para ellas. Los resultados de la planificación se simplifican en un mapa que muestra la programación de las actividades del proceso de diseño del producto (Ullman, 2010).

### **c) Definición del producto**

Durante la fase de definición del producto, el objetivo es entender el problema y sentar las bases para el resto del proyecto de diseño. La primera actividad es la identificación de los clientes para el producto. Esta actividad sirve de base para generar los requerimientos



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

de los clientes. Estos requerimientos se utilizan para evaluar la competencia y para generar las especificaciones de ingeniería, comportamientos medibles del producto a realizar que, más adelante en el proceso de diseño, ayudarán en la determinación de la calidad del producto.

Por último, con el fin de medir la "calidad" del producto, se fijan los objetivos para su desempeño. A menudo, los resultados de las actividades en esta etapa determinan cómo el problema de diseño se descompone en pequeños sub problemas de diseño más manejables. A veces no se conoce suficiente información sobre el producto, y la descomposición se produce más tarde en el proceso de diseño.

### **d) Diseño conceptual**

Un concepto es una idea que está lo suficientemente desarrollada para evaluar los principios físicos que rigen su comportamiento. Confirmando que un concepto funcionará como se esperaba y que, con el desarrollo más razonable, va a cumplir los objetivos fijados. Los conceptos también deben ser lo suficientemente refinados para evaluar las tecnologías necesarias, su arquitectura básica y, en cierta medida, para determinar si es viable su fabricación. Los conceptos pueden ser representados en un boceto o un diagrama de flujo, un prototipo de prueba de concepto, un conjunto de cálculos, o notas textuales de una abstracción de lo que podría convertirse en un producto.

El punto clave es que el detalle suficiente debe ser desarrollado para modelar la representación del concepto de manera que la funcionalidad de la idea pueda ser garantizada. Cuando se generan conceptos, los requerimientos del cliente sirven como base para el desarrollo de un modelo funcional del producto. Los conceptos generados son evaluados al compararlos con los requisitos desarrollados durante la Definición del Producto, para después dar lugar a la toma de decisiones (Ullman, 2010).



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

### **e) Desarrollo del producto**

Los productos deben desarrollarse a partir de los conceptos y a través del desarrollo simultáneo de métodos de forma, materiales y de producción. La forma está restringida por las constantes geométricas y está definida por la configuración de los componentes conectados. Una lista de materiales es un índice para el producto. El desarrollo de la mayoría de los componentes y ensambles empieza en sus interfaces o conexiones, ya que la función de las partes y componentes ocurre en las interfaces entre los componentes. El desarrollo de productos es un bucle iterativo que requiere el desarrollo de nuevos conceptos, la descomposición del producto dentro de subconjuntos y componentes, el refinamiento del producto hacia una configuración final, y la aplicación de “parches” de características para ayudar a encontrar un buen diseño de producto.

### **f) Soporte del producto**

La responsabilidad del ingeniero de diseño no puede terminar con el lanzamiento a la producción. A menudo hay necesidad de continuar con el soporte de la fabricación y el montaje, el soporte a los proveedores, y la ayuda en la introducción del producto al cliente. Además, los ingenieros de diseño están a menudo involucrados en el proceso de ingeniería de cambio. Éste es el proceso en el que los cambios realizados en el producto, por el motivo que sea, son gestionados y documentados. En la Figura 2.4 se muestra este modelo (Ullman, 2010).

### **2.3.4 Modelo de diseño de Hong-Sen Yan**

Hong-Sen Yan ofrece un modelo de diseño basado en la experiencia, ya que considera que ésta es una habilidad y práctica derivada de la observación directa y participación en eventos que proporciona el conocimiento necesario para ser usado cuando un ingeniero se enfrenta a un proyecto de diseño. Además de la experiencia, todo ingeniero tiene a su

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

disposición técnicas creativas que actúan como un catalizador para la obtención de conceptos y soluciones.

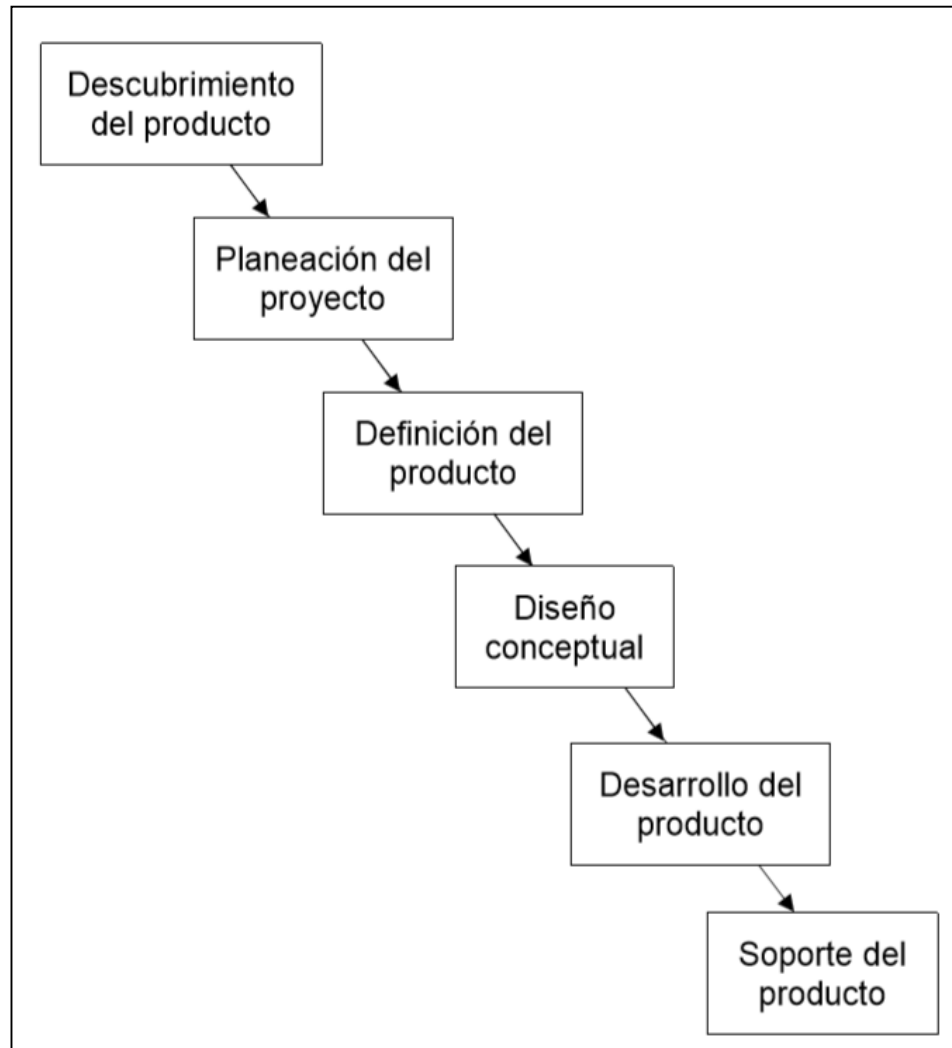


Figura 2.4. Esquema del modelo de diseño de Ullman (Ullman, 2010)

El autor considera que la creatividad, definida como la habilidad mental para ordenar, estructurar diseñar, organizar o componer de nuevas maneras un conjunto seleccionado de elementos, tiene un papel importante dentro de todo proceso de diseño, ya que permite abordar de diferentes maneras un problema para llegar a una solución que satisface las necesidades inmersas en el diseño por desarrollar.



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

El modelo de diseño de Hong-Sen Yan (Figura 2.5) consta de cuatro etapas, dando un mayor énfasis y dedicación a las dos primeras ya que en estas se define el problema y se buscan todas las posibles soluciones para seleccionar aquella que se debe desarrollar en las dos etapas finales del modelo. A continuación se describen, en la Figura 2.5, cada una de las etapas que conforman el modelo de diseño propuesto por Hong-Sen Yan.

### **a) Definición del problema**

La definición del problema es una etapa que depende de la motivación del ingeniero para adentrarse en un proyecto de diseño. Se necesita un fuerte deseo individual para generar la determinación de la idea. Las motivaciones difieren de un individuo a otro, pueden ser la curiosidad natural, los valores personales, la presión familiar, intereses profesionales, o fines laborales.

En esta etapa, se debe reunir la mayor cantidad de información posible sobre el problema. Esto puede lograrse mediante una búsqueda en la literatura para indagar en el tema y explorar todo el conocimiento involucrado con el proyecto por desarrollar, y posteriormente establecer los requerimientos, las especificaciones y las restricciones del diseño.

### **b) Diseño creativo**

Sobre la base de los conocimientos adquiridos a través de la etapa inicial del modelo de diseño, algunas soluciones para el problema pueden parecer posibles. Se debe explorar con gran detalle todas estas posibles soluciones siguiendo una serie de subetapas que pueden conducir a una respuesta satisfactoria.

- Evaluación de la información

El paso inicial dentro del diseño creativo es evaluar la información obtenida en la etapa de definición del problema. Esto puede implicar la clasificación de los datos disponibles o la





## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

reordenación de la información original en otras formas. Este paso permite entender a fondo la información disponible.

### - Técnicas creativas

Hay algunas técnicas creativas que se pueden aplicar para lograr una serie de posibles soluciones de diseño. Cada técnica proporciona un procedimiento lógico para iniciar y generar soluciones para los problemas de destino. A continuación se presentan las técnicas creativas que han demostrado ser de gran utilidad en la estimulación de la producción de ideas:

**Listado de atributos:** Un atributo es una característica estrechamente relacionada con algo en particular. El objetivo del listado de atributos es enfocar la mente en el problema básico y estimular el proceso de pensamiento para generar nuevos conceptos que podrían resolver de mejor manera el problema en cuestión. Los diseñadores pueden interpretar el mismo problema de manera diferente y pueden producir diferentes listados de atributos.

**Análisis gráfico morfológico:** Enfoque sistemático para analizar la estructura o la forma de una idea, objeto, aparato, producto, sistema o proceso. Se trata de la elaboración de una lista de los principales parámetros independientes asociados con el problema, junto con varias alternativas de diseño para cada parámetro.

**Lluvia de ideas:** Esta técnica tiene como objetivo estimular un grupo de personas para sugerir y producir rápidamente un gran número de ideas alternativas de respuestas incontroladas del equipo de diseño (Yan, 1991).

### - Generalización

Esta subetapa implica seleccionar un diseño de diseños existentes disponibles para ser tomado como el diseño original o de partida. Este diseño original se transforma entonces



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

en su cadena generalizada correspondiente en donde se consideran todos sus elementos y uniones. A través del proceso de generalización, los diseñadores son capaces de estudiar y comparar diferentes diseños de una manera muy básica. Los dispositivos mecánicos que a primera vista parecen ser diferentes pueden tener formas generalizadas idénticas.

### - Síntesis de número

El objetivo de la síntesis de número es sintetizar todas las posibles cadenas generalizadas que tienen el mismo número de elementos y uniones como la cadena generalizada de diseño original.

### - Especialización

Una vez realizada la síntesis de número, es posible asignar los requerimientos y las especificaciones de diseño a cada uno de los elementos y uniones. Las restricciones de diseño se definen basándose en aspectos ingenieriles y en decisiones de los diseñadores.

### - Particularización

Una vez que se obtiene un diseño especializado factible, se particulariza en su correspondiente dispositivo mecánico. Gráficamente, la particularización es el proceso inverso a la generalización, en donde se desarrolla a detalle cada elemento y unión que conforman el nuevo diseño (Yan, 1991).

### - Atlas de nuevos diseños

El diseño creativo puede llevar a la obtención de diversos diseños que solucionan el problema en cuestión. La última subetapa del diseño creativo es identificar todos los diseños generados que difieran de los existentes para crear un atlas de nuevos diseños, el cual podrá ser consultado si el diseño seleccionado en esta etapa cumple con los parámetros que se evalúan en las dos etapas finales del modelo.



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

### **c) Intimación de la idea**

Al hablar de intimación de la idea, se refiere a obligar la selección de una sola idea, lo cual implica todo un conjunto de procesos cognitivos basados en la información adquirida en las dos etapas anteriores. De tal forma, se presenta la iluminación. La iluminación tiene lugar cuando la idea creativa se produce en un momento ajeno al proceso de diseño, es la aparición repentina y espontánea de una respuesta a un problema. A pesar de que se obliga a elegir un sólo diseño, la iluminación puede tardar en presentarse y es imposible predecir cuándo ocurrirá, sin embargo su éxito depende de la minuciosidad del trabajo en los pasos anteriores.

### **d) Síntesis y verificación**

La etapa final del modelo de diseño de Hong-Sen Yan es la síntesis y la verificación. La síntesis es la composición o combinación de partes o elementos con el fin de formar un todo. El diseñador utiliza su conocimiento para vincular las diversas partes de la solución para formar una solución final. Una vez que las ideas se han sintetizado para llegar a una solución organizada al problema, el siguiente paso es verificar la solución.

Cuando se han generado muchas ideas, deben ser evaluados para reducir el número de alternativas a los pocos que ofrecen los mayores beneficios posibles. La selección requiere evidencia para probar si una idea es realmente válida y esto se puede encontrar a través del análisis, de la experimentación, o, a veces, de la opinión de expertos. En la Figura 2.5 se muestra el diagrama de este método (Yan, 1998).

### **2.3.5 Elección de un modelo de diseño**

Hasta esta parte del trabajo se ha realizado una descripción de cada una de las etapas relacionadas a cuatro modelos de diseño, entre los que destacan los modelos de Pahl y

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

Beit, Hong-Sen Yan , Ullman y Pugh. En estos modelos, las etapas pretenden delimitar las fronteras del diseño y guiar al diseñador para obtener mejores soluciones, pero en ocasiones estas fronteras resultan difusas ya que el diseño conceptual requiere de la definición del material o no queda claro bajo qué circunstancias y conocimientos se deben definir las especificaciones del producto.

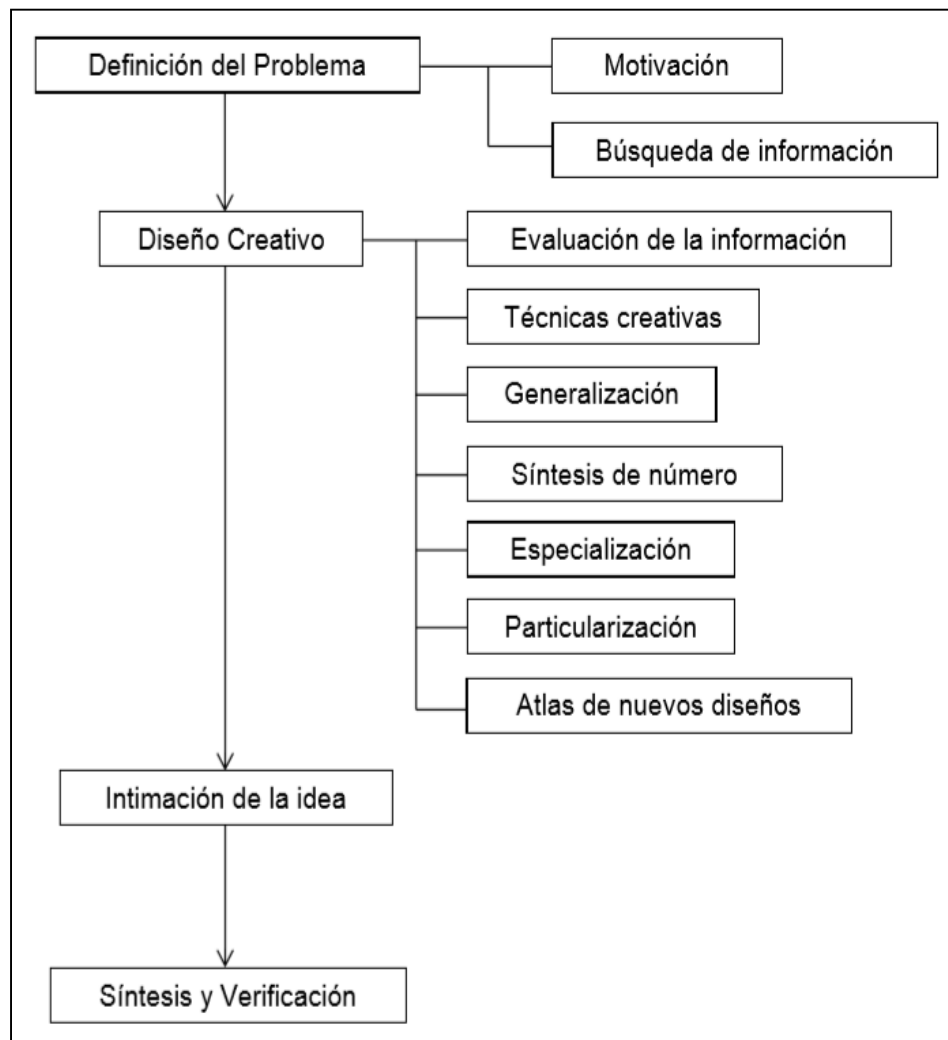


Figura 2.5 Diagrama del modelo de diseño de Hong-Sen Yan (Yan, 1995)

Los modelos citados se ejecutan bajo principios diferentes. Los modelos de Pugh y de Hong-Sen Yan proponen que las etapas se ejecuten de forma secuencial, mientras que los



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

---

modelos de Pahl y Beitz y de Ullman proponen que las etapas se ejecuten de forma secuencial pero realizando iteraciones entre ellas. Considerando la aproximación sistemática de cada modelo, las etapas del proceso de diseño se pueden relacionar entre sí de acuerdo a sus características (Tabla 2.3).

Al observar esta analogía de etapas, resulta más evidente en dónde los autores concentran el esfuerzo y dedicación hacia el proceso de diseño. Ullman desglosa en tres etapas todo aquello que Pahl y Hong-Sen Yan definen en una sola etapa. Por otra parte estos dos autores dividen en dos etapas lo que Ullman y Pugh definen como diseño conceptual.

El método de Pugh está más enfocado a la productividad y optimizar costos, dada la orientación primaria del producto, esta metodología se descarta, ya que no entra dentro de los planes inmediatos, el comercializar el producto. A pesar de contar con bases sólidas y ser una metodología detallada, el método de Pahl y Beitz no considera una retroalimentación cuando ya se tiene un producto terminado.

El método de Ullman si considera una retroalimentación dejando la posibilidad de tomar cada modelo final y volver aplicar la metodología para un rediseño posterior y así ir mejorando cada vez más el producto en base a las necesidades del mercado o tendencias (Arconada y col., 2015).

Por otra parte, el modelo de Hong-Sen Yan permite un diseño mucho más creativo, meramente enfocado a este rubro, por tal motivo este proyecto se identifica con este modelo. Además, por la naturaleza del diseño de la mezcla, (es decir que se diseña de un modo hasta cierto punto empírico), Hong-Sen ofrece un modelo de diseño basado en la experiencia, ya que considera que ésta es una habilidad y práctica derivada de la observación directa. Por lo tanto, el método de diseño que se utilizará será basado en el



## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

método de Ullman, pero tomando ciertos rasgos de Hong-Sen Yan, como por ejemplo la lluvia de ideas

Tabla 2.3. Analogía de etapas de los modelos de diseño (elaboración a partir de Arconada y col., 2015)

Pahl y Beitz	Hong-Sen Yan	Ullman	Pugh
Planeación y clarificación de la tarea	Definición del problema	Descubrimiento del producto	Necesidades del mercado
		Planeación del proyecto	Especificación del desarrollo del producto
		Definición del producto	
Diseño conceptual	Diseño creativo	Diseño conceptual	Diseño conceptual
Diseño de realización	Intimación de la idea		
Diseño de detalle	Síntesis y verificación	Desarrollo del producto	Diseño de detalle
			Fabricación
		Soporte del producto	
			Ventas

## CAPÍTULO 3. Materiales y métodos

---

### 3.1 Caso de estudio de la delegación Tlalpan

El río Magdalena nace a 3600 m en la Sierra de las Cruces recorriendo a lo largo de sus 28.2 Km las Delegaciones Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Álvaro obregón y Coyoacán. Su principal afluente, el río Eslava, funge como límite entre las delegaciones Tlalpan y Magdalena Contreras y juntos, son un importante proveedor de servicios ecosistémicos para la Ciudad de México. Debido al crecimiento de la urbe y los asentamiento irregulares en la zona a partir de 1985, el entorno asociado a la cuenca mencionada se ha visto mermado de forma considerable, llegando a tal extremo que en la zona media y baja del río Eslava el agua corriente es nula, y el único líquido remanente en su cauce son pequeñas charcas estancadas de aguas negras generadas por las descargas de las casas construidas a sus orillas. En la Figura 3.1 se puede observar el gran deterioro del río Magdalena.



Figura 3.1 Fotografía del río Magdalena en la delegación Tlalpan

## CAPÍTULO 3. Materiales y métodos

---

La razón principal del deterioro del afluente es el arrojo clandestino de basura y cascajo impidiendo que el agua siga su curso natural y contaminando el agua y el suelo. Ante ésta situación y en el marco del programa de recolección de cascajo de casa habitación de la Delegación Tlalpan, el día Sábado 6 de Febrero del 2016 con la asistencia de profesores de la UNAM y funcionarios de la Delegación, se acompañó a una cuadrilla de trabajadores que actuaban sobre la zona urbana asentada de manera irregular en el lecho del río Eslava, recogiendo principalmente cascajo, llantas y basura de desmonte encontrado tanto en las calles, como en el cauce seco. Cabe mencionar que el desecho clandestino de llantas en la delegación es mayúsculo. En la Figura 3.2 se puede observar la gran cantidad de llantas que se recogen de los tiraderos clandestinos.



Figura 3.2. Fotografía tomada de un camión de la delegación Tlalpan cargado de llantas de desechos

Los trabajos de recolección constaron de 20 puntos distribuidos en colonias aledañas. Los residuos de la construcción, se concentraron en dichas zonas en donde un camión de volteo (de 4 a 7 toneladas) los vertió a su vez a una góndola (32 toneladas) que los depositó en su destino final en un relleno sanitario adecuado para dicha actividad. En la



## CAPÍTULO 3. Materiales y métodos

Figura 3.3 se puede observar la recolección de los desechos de construcción. Durante el recorrido, se observó que los desechos presentes en mayor medida fueron:

- Tierra
- Arena
- Concreto
- Azulejo
- Muebles de baño
- Tabique
- Lámina de asbesto
- Teja
- Llanta
- Block
- Varilla
- Madera



Figura 3.3 Recaudación de desechos de construcción por parte de la delegación Tlalpan

Por la naturaleza de los asentamientos humanos en el área, hay una gran cantidad de calles de terracería o con un serio deterioro ya que no se pavimentan desde hace años y en algunos casos los trabajos se realizan de manera parcial. En la Figura 3.4 se puede observar un caso típico del mal estado de las calles y construcciones, también en esta Figura se puede observar nuevamente que el río Magdalena está completamente seco y con muchos desechos. Con la finalidad de dar una solución a la problemática tanto del cascajo y llantas como de la pavimentación, se propone la reutilización de dichos residuos integrándose como materia prima en la fabricación de adoquines y así colocarlos en las calles, aumentando la calidad de vida de la gente que habita esa zona.

## CAPÍTULO 3. Materiales y métodos

---



Figura 3.4 Deterioro del río Magdalena y tiraderos clandestinos de desechos en la delegación Tlalpan

### 3.2 Metodología

Ante la gran problemática que representa el cascajo y llanta como desechos sólidos, es de suma importancia encontrar un destino final a dichos residuos, ya que hasta el momento no se tiene ningún uso masivo para este tipo de productos. Por lo anterior, se propone en términos generales escombrar las barrancas de cascajo y llantas para utilizarlos directamente como materia prima en la fabricación de adoquines, mismos que se utilizarán para pavimentar las colonias de la Delegación. Esta idea solo se podrá llevar a cabo a largo plazo, pues la maquinaria para moler los desechos es excesivamente cara, por ello se consideró a la iniciativa privada como proveedor de materia prima, específicamente a Concretos Reciclados S.A. de C.V. la cual es una empresa 100% mexicana dedicada al reciclaje de los residuos de la construcción, fundada en el año 2004 y cuya misión es promover la cultura del reciclaje y crear nuevos estándares en el reciclado de los desechos y materiales pétreos producto de la construcción.



## CAPÍTULO 3. Materiales y métodos

---

Con esta propuesta, se fomenta el reciclaje y se ayuda a que tanto Concretos Reciclados como su competencia crezcan y por ende que los generadores de cascajo se motiven a llevarlo a los centros de reciclaje y por ende se evite la proliferación de tiraderos clandestinos. Para fortalecer dicha propuesta, el escenario ideal es la firma de un convenio entre la iniciativa privada y el gobierno para recoger el cascajo tirado en las demarcaciones y llevarlo a reciclar, sin embargo esto solo se logrará cuando la demanda de material reciclado sea tal que beneficie económicamente a ambas partes. Por ello, la importancia de fomentar este tipo de prácticas es muy grande, generando un círculo que una vez tomada inercia se mantendrá por sí mismo.

Los métodos para cumplir el objetivo en el proyecto son: para el diseño de la mezcla y de la herramienta para fabricar adoquines, se tomó como referencia el modelo de diseño descrito por Ullman (2010), la metodología de diseño de este autor se expone en la Figura 2.4, y algunos conceptos mencionados por Yan (1998). En la Figura 3.5 se describe la planeación para el desarrollo de la mezcla y en la Figura 3.6 para la herramienta. Posteriormente, en la Figura 3.7 se muestra la combinación de estos dos diseños, para obtener la mezcla idónea para fabricar adoquines. Para determinar la mezcla ideal con materiales reciclados se realizaron pruebas de compresión (Figura 3.8). Las pruebas se llevaron a cabo con una máquina universal de pruebas mecánicas, marca INSTRON, modelo 4206, equipo electromecánico que permite la realización de ensayos estáticos convencionales de compresión, tracción y flexión con software propio de gestión de ensayo y adquisición de datos. El uso de este equipo fue bajo el consentimiento y asesoría del Ing. Jorge Romero Hernández, quien manipuló el equipo en el laboratorio de pruebas mecánicas de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM). Las pruebas se realizaron bajo los estándares de la norma ASTM C-39 (1993) con una velocidad de 1.3 mm/min.

## CAPÍTULO 3. Materiales y métodos

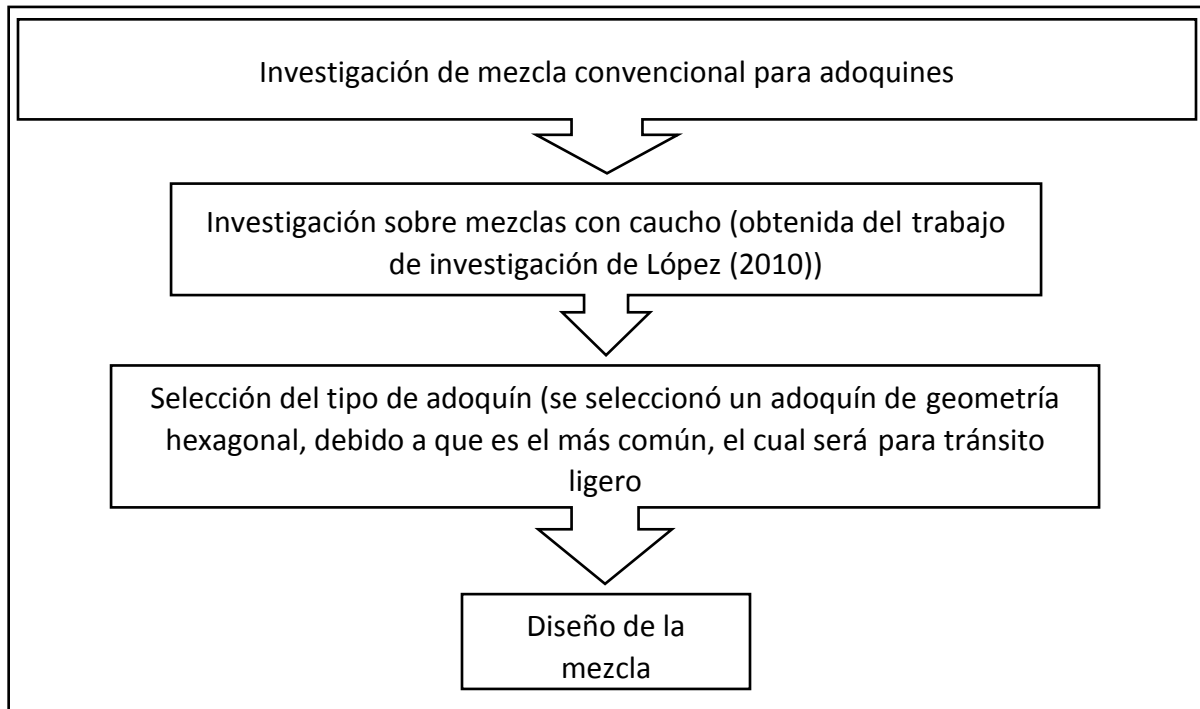


Figura 3.5 Mapa de planeación para el desarrollo de la mezcla

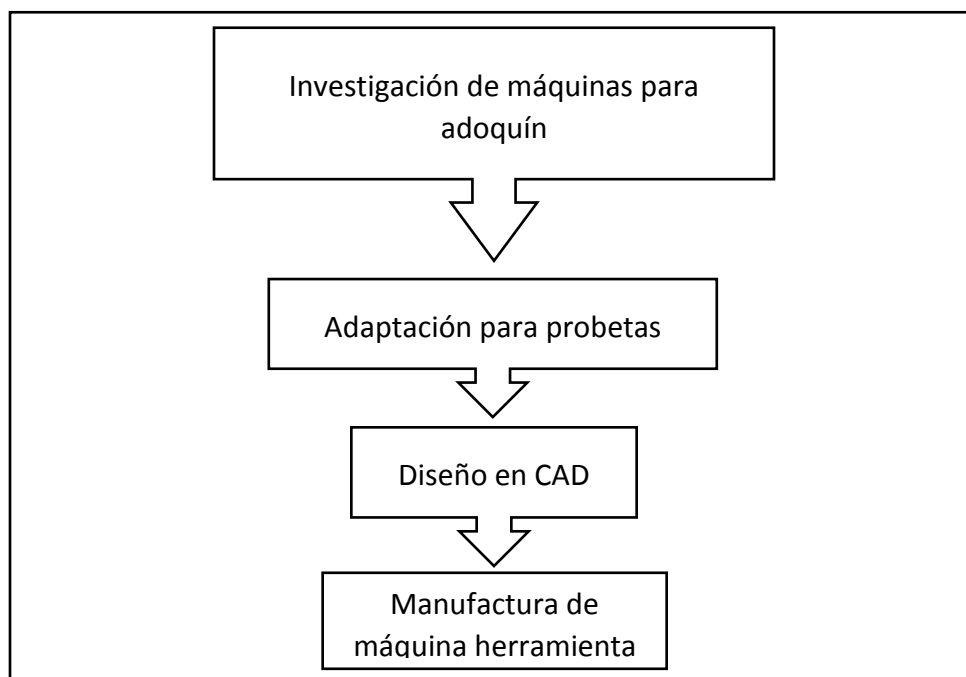


Figura 3.6 Mapa de planeación para el desarrollo de la herramienta

## CAPÍTULO 3. Materiales y métodos

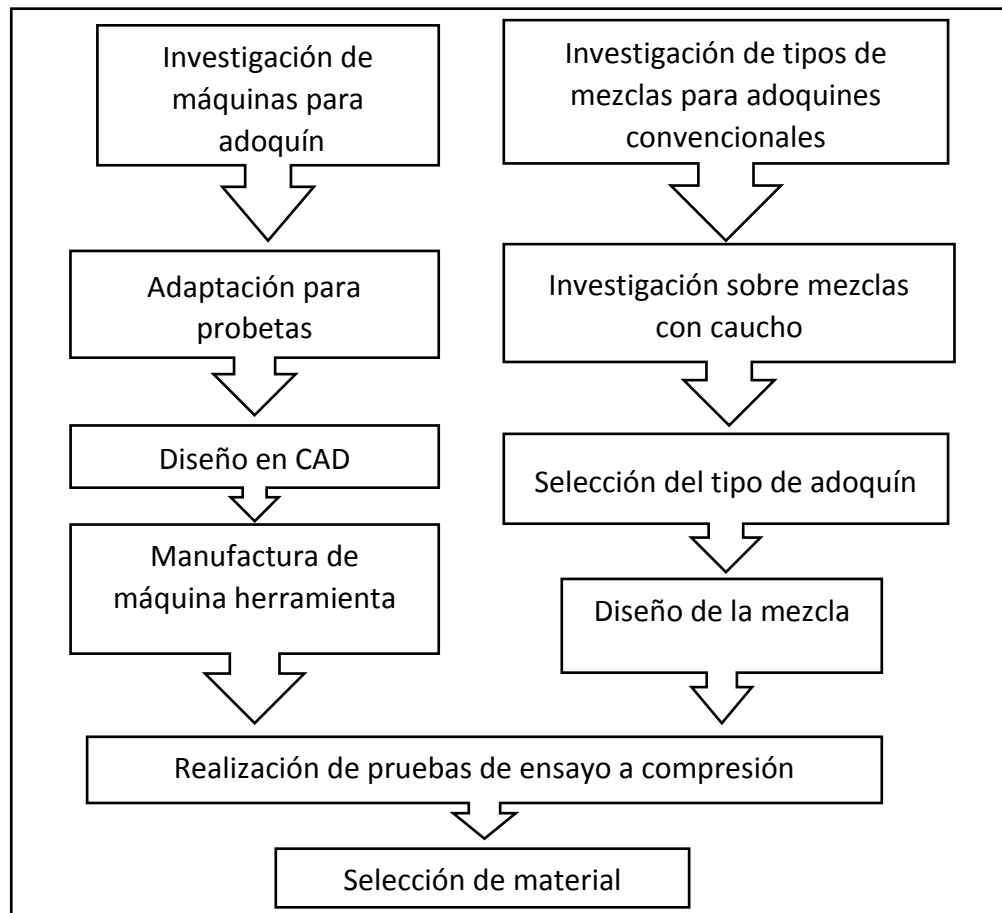


Figura 3.7 Mapa de planeación para el desarrollo del adoquín



Figura 3.8 Ensayo de compresión para una de las probetas

## CAPÍTULO 3. Materiales y métodos

En la Figura 3.9, se muestra un diagrama, en el cual se resume la metodología para llegar al objetivo esencial de esta tesis.

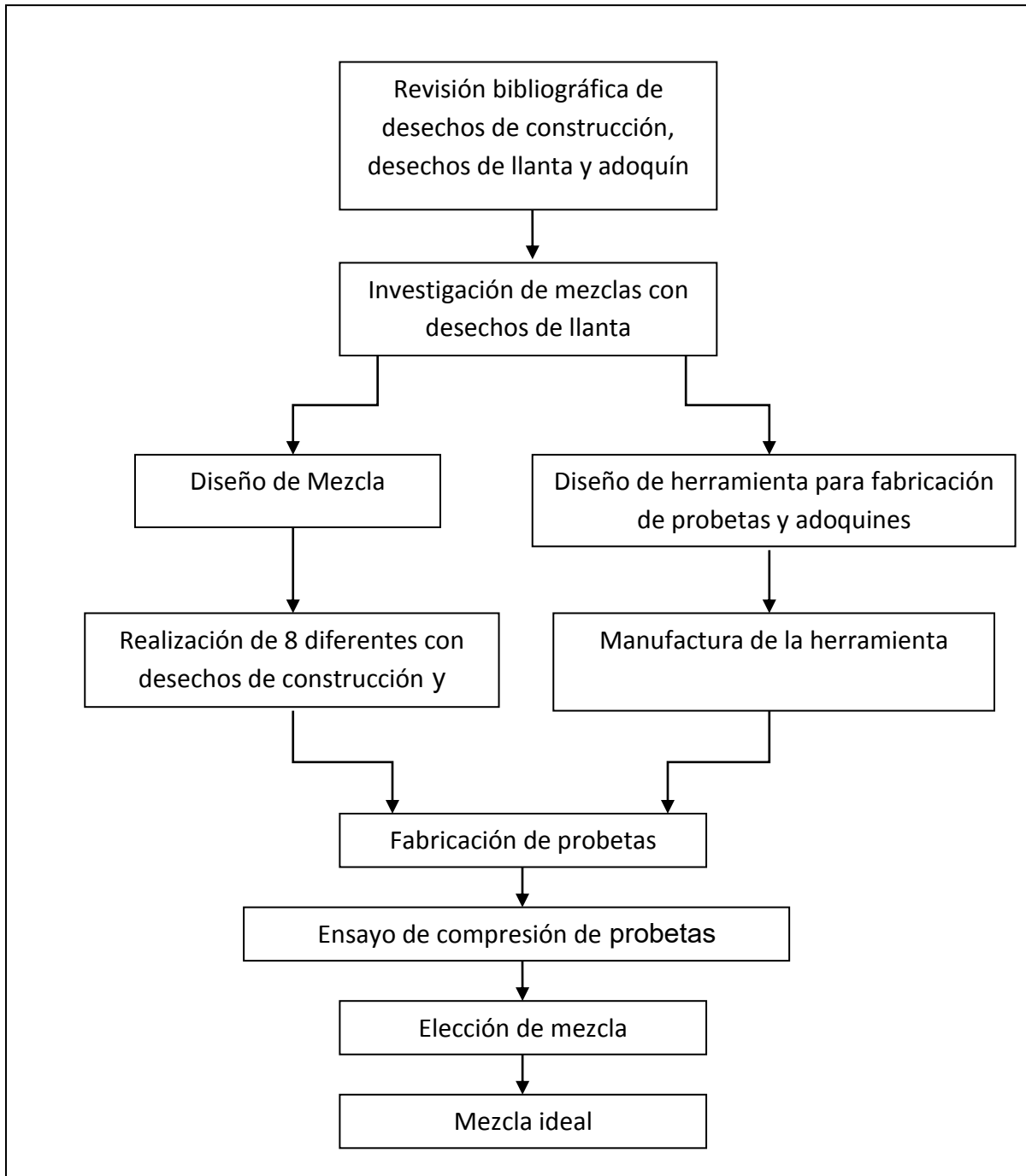


Figura 3.9 Diagrama de bloques de la metodología del proyecto



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

### 4.1 Mezcla de las materias primas

#### 4.1.1 Descubrimiento de las materias primas

De acuerdo con el autor Ullman: “Antes de que el diseño original o rediseño de un producto pueda comenzar, se debe establecer la necesidad”, en este proyecto, la necesidad a trabajar es la solución al problema de desechos de construcción (cascajo) y llanta. Para llevar a cabo la propuesta hecha y dar solución al problema de llanta y cascajo (realizar adoquines con dichos residuos) fue necesario diseñar tanto la mezcla para adoquines, como también una herramienta para construir estos adoquines. Con el desarrollo de este nuevo producto, se contribuye a la preservación del medio ambiente utilizando un producto de construcción versátil y a un precio competitivo. Además se fomenta la cultura de reciclaje en el país y de este modo lograr una mejor calidad de vida de los habitantes. Para la realización del adoquín es necesario desarrollar de manera paralela dos subproductos:

- 1) Una máquina herramienta para fabricar adoquines y probetas
- 2) La mezcla

Ya que ambos son indispensables para el producto terminado, la metodología descrita por Ullman (2010), se aplicó por separado tanto a la mezcla como a la herramienta, para desarrollarlos de manera conjunta y obtener un mejor resultado, siempre pensando en las características que requiere el adoquín terminado. Como resultado de estos dos diseños, se obtendrá un producto con las características únicas que atienden a la problemática a solucionar. En cuanto a la herramienta, se diseñó para producir adoquines y probetas. Estas probetas fueron utilizadas para ensayarlas a compresión, de este modo se obtuvieron diversos valores de resistencia a la compresión de cada una de las mezclas propuestas para los adoquines.





## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

### 4.1.2 Diseño conceptual para la mezcla

Antes de definir los conceptos se tuvo una lluvia de ideas en donde se definen los aspectos importantes sobre los cuales surgen los conceptos que posteriormente serán evaluados. Esta actividad se realizó tanto para la herramienta como para la mezcla. Para la mezcla se generó la siguiente lluvia de ideas:

- Usar la mayor cantidad razonable de llanta
- Usar la menor cantidad posible de cemento virgen
- Tener mezclas con agregado fino y otras con grueso
- Agregar grava de media pulgada como agregado grueso
- Sustituir la arena por polvo de material reciclado
- Utilizar dos tipos de desechos de construcción (cascajo de solo concreto y cascajo proveniente de diversos materiales)
- Cambiar porcentajes de cada material

Para obtener distintas mezclas, se tomó como base la mezcla proporcionada de una empresa maquiladora de adoquín, dicha mezcla se muestra en la Tabla 4.1, y con base a datos consultados en diferentes tesis, las cuales fueron mencionadas anteriormente. Se variaron las proporciones de la llanta para identificar el comportamiento de esta, ya que es desconocida. Se le dará una gran importancia a los porcentajes de llanta y de cascajo, ya que son los materiales a reciclar.

En primera instancia se deben nombrar los materiales de una mezcla convencional para la fabricación de adoquines:

- Agregado grueso: Es el material cuyas partículas quedan retenidas en el tamiz #4
- Agregado fino: Es el material que pasa a partir del tamiz #4 hasta el tamiz #100
- Agua : Agua necesaria de acuerdo a la cantidad de cemento





## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

- Cemento: Es cemento portland

Tabla 4.1 Mezcla proporcionada por empresa maquiladora de adoquines

Material	Peso %
Agregado grueso	40.5
Agregado fino	28.0
Cemento	19.0
Agua	12.5
Peso total	100

En base a la mezcla proporcionada por la empresa maquiladora de adoquín, se propuso una mezcla anexando materiales de desechos de construcción y desechos de llanta. Con respecto a los desechos de construcción, este desecho se sustituyó por el agregado grueso que se ocupa para una mezcla convencional de adoquines, por lo tanto se propuso triturar el cascajo para que cumpla con el mallado antes mencionado correspondiente al agregado grueso. El agregado fino que se propuso utilizar para sustituir la arena en la mezcla se obtuvo del mismo cascajo al pasarlo por la malla para el agregado fino.

Con respecto al desecho de llanta, se propuso sustituir un porcentaje del agregado fino por un porcentaje de llanta, por lo tanto se debe tamizar la llanta triturada para cumplir con el tamiz correspondiente al agregado fino. Cabe mencionar que para el caso de desechos de construcción, es importante quitar de estos desechos el yeso, ya que este material no se puede reciclar para este trabajo, ya que provoca una gran disminución en las propiedades del material que se propone. Por otra parte, a la llanta también se le quitó un material, el cual puede ser acero, aluminio o magnesio que contiene la llanta, es decir, buscando utilizar el caucho. El agua y el cemento para las mezclas propuestas, son los



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

mismos que la mezcla convencional. Los conceptos de las mezclas que se propusieron se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Conceptos (mezclas) propuestos para las mezclas de adoquines

Concepto	Agregado grueso de cascajo %	Agregado fino de cascajo %	Agregado fino de llanta %	Agua %	Concreto %
Mezcla 1	45	25	0	12	18
Mezcla 2	45	23	2	12	18
Mezcla 3	45	20	5	12	18
Mezcla 4	45	15	10	12	18

Estas mezclas propuestas fueron hechas con base a la empresa dedicada a la fabricación de adoquines. Para el caso del reciclaje de la llanta, se tomó como referencia la investigación que realizó López (2010), donde usó polvo de llanta como agregado fino en una mezcla de concreto para elaboración de adoquines. En dicha investigación, el autor expone diferentes mezclas con diferentes proporciones de llanta, y se observa claramente que una proporción de 10 % de llanta en adelante, del porcentaje total en peso de la mezcla para la construcción de adoquines, es inadecuado. Las propiedades del material no son favorables, como se puede ver en la Tabla 4.3 para algunas mezclas con llanta y materiales vírgenes, estas mezclas tuvieron un tiempo de secado de 28 días. Es por eso que se tomaron las proporciones antes mencionadas.

### 4.1.3 Desarrollo de las mezclas

Los materiales que se utilizaron para las mezclas para las probetas son los siguientes:

- Llanta molida
- Cascajo blanco (únicamente concreto reciclado)



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

- Cascajo rojo (mezcla de concreto, ladrillo, mampostería, tabique, etc., a excepción de yeso, metales y materia orgánica como madera)
- Agua
- Cemento Portland virgen

Como se puede observar en la Tabla 4.3, se utilizaron para la mezcla dos tipos de cascajo; cascajo blanco y cascajo rojo, los cuales fueron facilitados por el Sr. Rafael Flores Ramos, quien trabaja como sobrestante en la empresa mexicana Concretos Reciclados. El motivo de utilizar estos dos tipos de cascajo es para conocer cómo varían las propiedades de la mezcla al usar uno u otro. De no haber alguna diferencia significativa, se podrá dar prioridad al uso de cascajo rojo y así reciclar una gama más amplia de materiales.

Tabla 4.3 Porcentajes de algunas mezclas utilizadas en el trabajo de investigación de López (López, 2010)

Mezcla	Resistencia a la compresión aproximado kg/cm <sup>2</sup>
Mezcla con 25% de llanta	17
Mezcla con 35% de llanta	9
Mezcla con 40% de llanta	8

El agregado grueso y fino se obtuvo ya molido como una donación por parte de la empresa Concretos Reciclados, este material viene con una granulometría variada, por lo que se tamizó para separar y clasificar el agregado en fino y grueso. El primero se obtuvo únicamente del material que pasó por el mallado #100, el segundo se obtuvo del material que pasaba por la malla #4 pero ya no pasaba por la #100.

La llanta molida pasó por el tamiz #100 obteniendo polvo de llanta con la misma granulometría del agregado fino. Una parte del total del porcentaje de agregado fino fue



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

sustituido por este polvo de llanta, estos porcentajes fueron: 2%, 5% y 10%. Para poder realizar mezclas que aseguren un buen producto, se optó por tomar como referencia la mezcla utilizada en una empresa dedicada a la fabricación de adoquines, ya que de este modo, se pueden utilizar porcentajes que están ya establecidos y se aplican en la industria. Además es un punto de referencia importante para verificar la viabilidad del producto.

Los porcentajes proporcionados por la empresa fueron dados de manera empírica, ya que ellos trabajan con mediciones de paladas y botes. Los materiales que ocupan en la fábrica, son medidos de manera intuitiva buscando tener una buena consistencia de la mezcla final, por ejemplo, el porcentaje de agua puede variar de acuerdo a la humedad del clima. Después de haber medido los materiales en paladas y botes, se obtuvieron los porcentajes en peso de cada uno de los ingredientes mencionados anteriormente. Posteriormente para obtener mezclas con las propiedades deseadas a partir de cementos y agregados disponibles se utiliza un método de dosificación. Este método es el llamado método de la mezcla tentativa, por lo cual se realizaron varias mezclas tentativas con diferentes cantidades de agregados para obtener la consistencia requerida con una cantidad mínima de cemento, hasta obtener las proporciones mostradas en la Tabla 4.3.

Los componentes de una mezcla se dosifican de manera que el concreto resultante tenga una resistencia adecuada, una manejabilidad adecuada para su vaciado y un bajo costo. Éste último factor obliga a la utilización mínima en la cantidad de cemento que asegure las propiedades adecuadas. Mientras mejor sea la graduación de los agregados, es decir, mientras menor sea el volumen de vacíos, menor será la pasta de cemento necesaria para llenar estos vacíos.

La relación agua–cemento es el factor principal que controla la resistencia del concreto. Para una relación agua–cemento dada se selecciona la mínima cantidad de cemento que asegure la manejabilidad deseada. La Figura 4.1 muestra la influencia decisiva de la



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

relación agua–cemento en la resistencia a la compresión del concreto. Para saber si la mezcla propuesta con anterioridad tiene una buena relación agua-cemento, se tomará como referencia la Figura 4.1 (López, 2010).

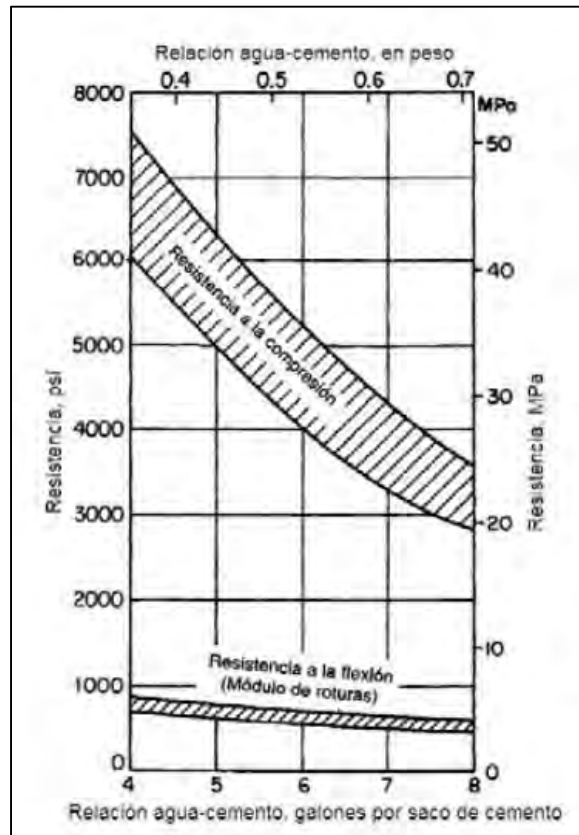


Figura 4.1 Efecto de la relación agua–cemento en la resistencia a la compresión y a la tensión por flexión a los 28 días (López, 2010)

La relación agua-cemento que se obtiene con los datos de la Tabla 4.4 es de 0.67. Esta relación está dentro del rango mencionado anteriormente, y aunque se puede observar que la relación agua-cemento es muy alta, esto se considera válido, ya que en esta gráfica solo se considera el agua y el cemento, pero en nuestra mezcla además de estos ingredientes, se tienen los agregados finos y gruesos, los cuales absorben cierta porción de agua.



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 4.4 Porcentajes de mezcla para adoquines

Material	Peso %
Agregado grueso	42.4
Agregado fino	26.35
Cemento	18.66
Agua	12.59
Peso total	100

Para cada una de las mezclas se utilizaron los dos tipos de cascajo (blanco y rojo) por separado, obteniendo un total de 8 mezclas diferentes. De cada una se elaboraron 5 probetas que posteriormente se ensayaron pasados 28 días de fraguado, esto para conocer las propiedades de cada una de ellas. Los porcentajes en peso de las mezclas a realizar se pueden observar en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Relación de mezclas de cascajo blanco y rojo, variando el porcentaje de desechos de llanta

Mezcla	Llanta %	Agregado grueso %	Agregado fino %	Cemento %	Agua %
Cascajo blanco (B)	0	42.4	26.35	18.66	12.59
Cascajo blanco (B-2)	2	42.4	24.35	18.66	12.59
Cascajo blanco (B-5)	5	42.4	21.35	18.66	12.59
Cascajo blanco (B-10)	10	42.4	11.35	18.66	12.59
Cascajo rojo (R)	0	42.4	26.35	18.66	12.59
Cascajo rojo (R-2)	2	42.4	24.35	18.66	12.59
Cascajo rojo (R-5)	5	42.4	21.35	18.66	12.59
Cascajo rojo (R-10)	10	42.4	11.35	18.66	12.59



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

### 4.2 Procesado del adoquín

De acuerdo con Ullman (2010), el objetivo de esta actividad fue la generación de un conjunto de tareas que deben llevarse a cabo, las cuales deben seguir una secuencia. De tal manera, que la planificación de las actividades generales para la mezcla y la herramienta se simplificaron en un mapa, tanto para la mezcla como para la herramienta, y una combinación de ambos para el producto final (adoquín), mostrados en el inciso 3.2. Debido a la naturaleza del producto final y la necesidad de desarrollar tanto la herramienta como la mezcla, se decidió trabajarlos y aplicar la metodología de diseño de manera individual, ya que juntos al final entregarán el producto deseado (adoquín).

#### 4.2.1 Herramienta

Se analizaron diversos tipos de herramientas y máquinas para la fabricación de adoquines utilizadas tanto en la industria, como de manera casera, para conocer los principios básicos de estas y así diseñar una herramienta que cumpla con las especificaciones que se necesitarán y así proponer los materiales que se utilizaran. Estas máquinas se mencionaron anteriormente en el inciso 1.4.

Para la elaboración de esta herramienta para hacer adoquines y probetas se utilizarán los principios básicos que son: el compactado de material utilizando únicamente la fuerza de un operador, y vibraciones mecánicas para acomodar de una manera más homogénea la mezcla.

Para el desarrollo de la herramienta se generó la siguiente lluvia de ideas:

- Proponer materiales reciclados
- Adaptar la máquina tanto para adoquines como para probetas



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

- Hacer molde de madera
- Hacer molde de aluminio
- Hacer molde de placa acero
- Proponer diferentes geometrías para el molde del adoquín
- Adaptar la máquina para que la vibración sea manual o con ayuda de un motor.
- Hacer el sistema de compactación utilizando una palanca
- Versatilidad en el transporte

Tras tomar en cuenta las consideraciones antes propuestas, se desarrollaron varios conceptos para dar solución al problema de la manera más práctica y sencilla posible, en general, fue una secuela de mejoras para hacer más eficiente el trabajo.

### a) Concepto 1 para el procesado del adoquín

Consistió en un molde para producir adoquines, el cual tuvo una vibración manual la cual puede ser con un martillo, golpeando el molde directamente. En este prototipo solo se buscó el diseño del molde para los adoquines. Las medidas del molde se basaron en un adoquín convencional de forma hexagonal, ya que son los más comúnmente utilizados y una medida de 12 cm por lado y una altura de 8 cm. El material que se propone para este molde es lámina galvanizada de calibre 18, debido a que es fácil de doblar para obtener una geometría deseada, y por otra parte es un material resistente para las requisiciones de la máquina.

Se propone que el molde cuente con unas pestañas dobladas a 45 grados aproximadamente para facilitar el vaciado de la mezcla dentro del molde. También se propone anexar dos perfiles cuadrados, que servirán como soportes, a los costados en la parte inferior del molde, esto es para evitar que este se desplace al momento de la vibración. El concepto 1 se diseñó en CAD como se puede ver en la Figura 4.2



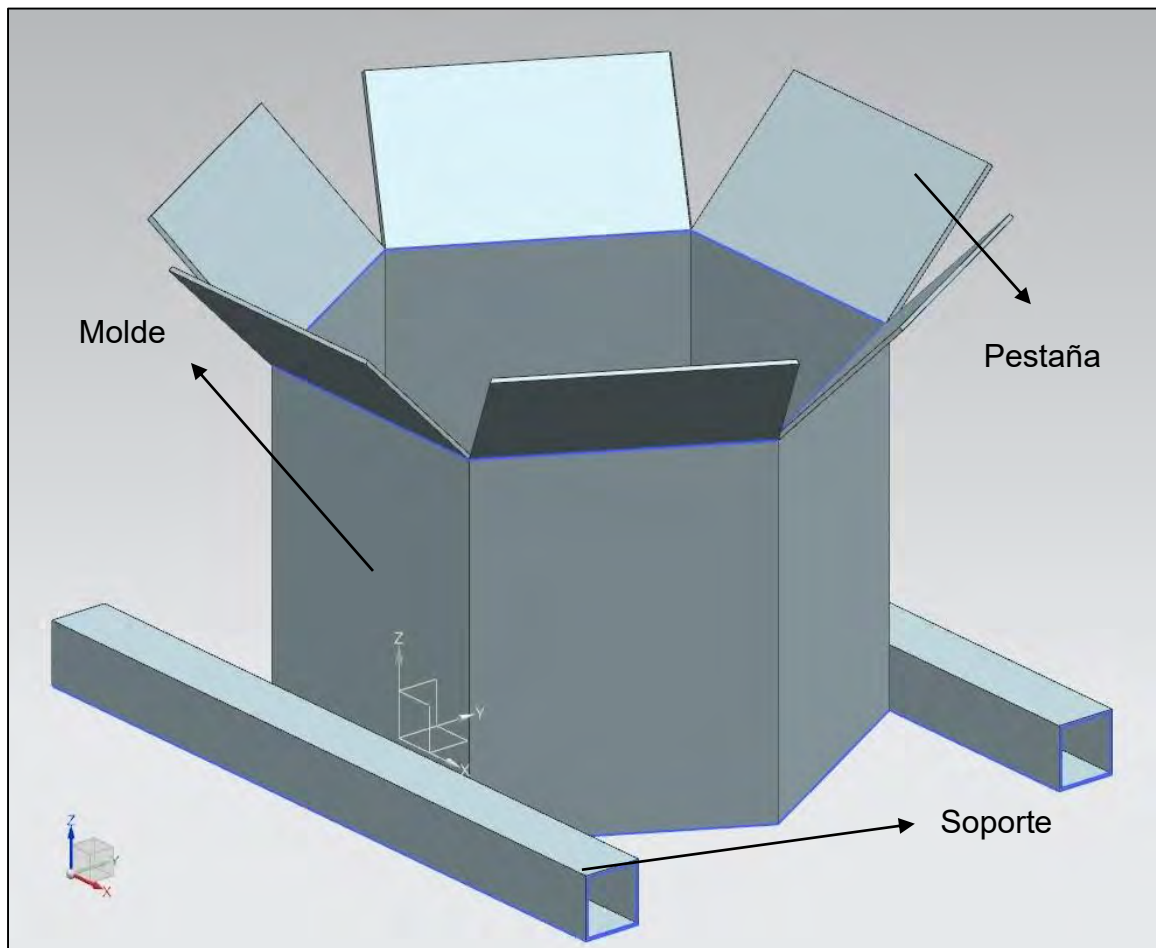


Figura 4.2 Concepto 1 para el procesamiento del adoquín

b) Concepto 2 para el procesamiento del adoquín

Para este concepto, se implementaron unos postes a los costados del molde, y de este modo tener una mejor facilidad de sostener el molde al momento de la compactación y de la vibración, y también ayudará para la implementación de unos topes, los cuales ayudaran para obtener la altura deseada en el adoquín.



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

En este concepto la compactación fue con una placa de lámina galvanizada con la geometría del adoquín mencionada en el concepto 1, la cual fue soldada a cuatro perfiles cuadrados y con una adaptación en la parte superior para un mejor agarre.

Se pusieron dichos postes como se muestra en la Figura 4.3, de tal manera que los adoquines que se fabriquen cumplan con la altura convencional de 8 cm, adicionalmente se podrá modificar a una altura de 6 cm, ya que esta es otra medida muy común dentro del mercado de adoquines.

Otra consideración fue la modificación de las pestañas, pues 2 se colocaron de manera vertical para implementar los postes mencionados anteriormente a los lados del molde y las otras 4 se les respetó el ángulo, pero se hicieron ciertos cortes para permitir el paso de los perfiles cuadrados que sirven de agarraderas (Figura 4.3).

El funcionamiento de la herramienta consistió primeramente en vaciar la mezcla dentro del molde mientras se ejerce la vibración de manera manual, posteriormente se realizó una compresión manual durante 14 segundos mientras se siguió la vibración de la máquina (este tiempo es el que se utiliza convencionalmente para su fabricación).

Después de los 14 segundos se detuvo la vibración, posteriormente se levantó la máquina con ayuda de los postes soldados al molde, de tal manera que se alzó la pieza completa que está de color negro la cual se puede visualizar en la Figura 4.3. Asimismo la placa que sirve para comprimir se mantiene en la misma posición de tal forma, que el adoquín quede en el suelo.

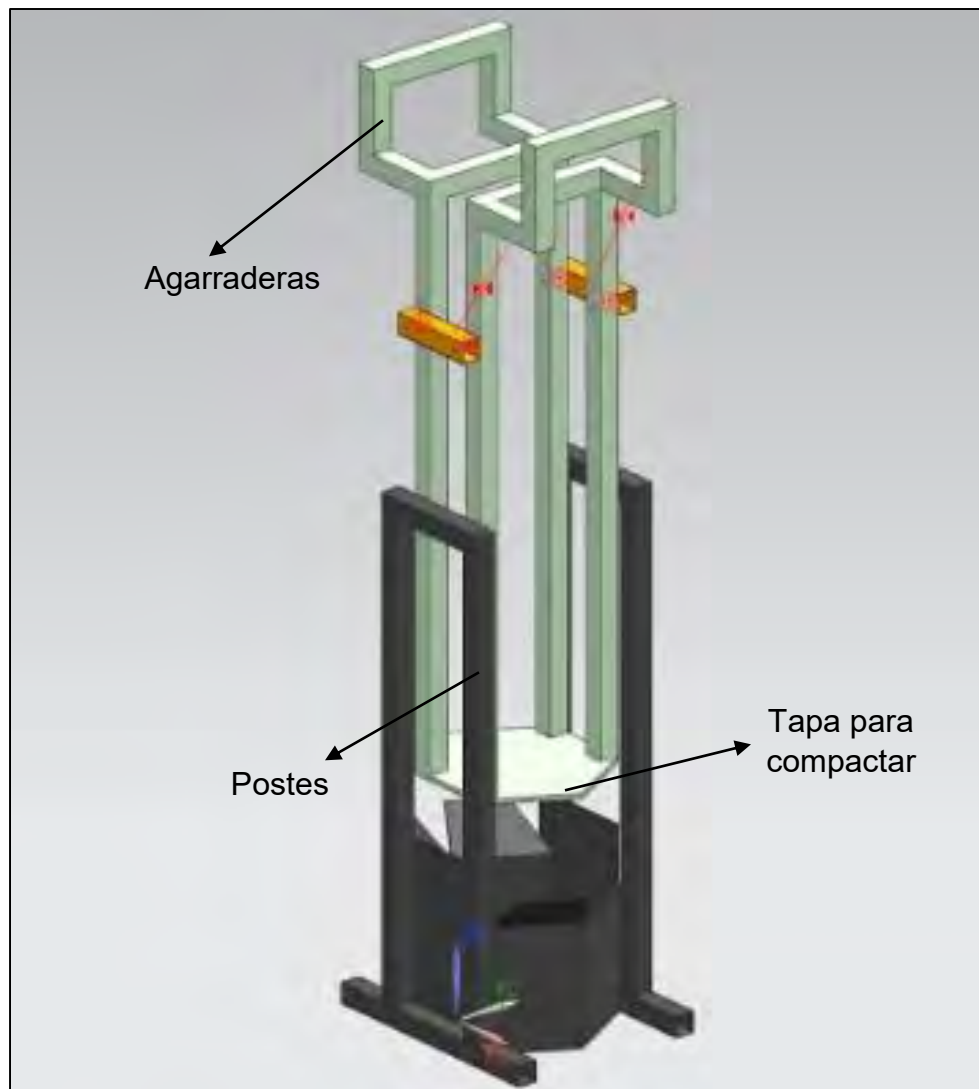


Figura 4.3 Concepto 2 para el procesado del adoquín

### c) Concepto 3 para el procesado del adoquín

En este punto, el cambio principal con respecto al anterior, fue la vibración, que ahora en vez de ser mecánica, se hizo mediante la acción de un motor eléctrico colocado en uno de los extremos de los perfiles cuadrados que se encuentran en la parte inferior de la herramienta. Además, como se observa en la Figura 4.4, se le agregaron un par de cilindros, los cuales se utilizaron para fabricar probetas que fueron ensayadas. Cada uno



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

de estos cilindros contó con una tapa circular, que fue fabricada con el mismo material que el molde (lámina galvanizada), estas tapas serán soldadas a un perfil cuadrado, de tal forma que sea utilizado para comprimir la mezcla mientras se produce la vibración con ayuda del motor. Tomando en cuenta que para ensayar las probetas de los materiales propuestos, se necesitan unas medidas que son las requeridas por la máquina que se utilizó para los ensayos de compresión, las cuales son:

$$h = 2D \quad (4-1)$$

Donde:

h= altura de la probeta

D= diámetro de la probeta

Con base a estas medidas normalizadas, las dimensiones de las probetas que se proponen son de 2 pulgadas de altura por 1 pulgada de diámetro. Así mismo se realizaron barrenos en el perfil cuadrado que va soldado a las tapas de los cilindros, esto para insertar unos topes con un tornillo, y controlar la altura de las probetas a 4 pulgadas. Por otro lado, la parte de las agarraderas superiores, las cuales se diseñaron anteriormente con un ángulo a 90 grados podrían fallar al aplicar la fuerza para la compresión de los adoquines. Por lo tanto, se propone variar el ángulo de las agarraderas, permitiendo ahorrar material y una mejor distribución de las fuerzas aplicadas, minimizando el efecto de palanca que se pudiera presentar.

El funcionamiento de esta herramienta es igual al prototipo 2, lo que cambia en este prototipo con el anterior es la vibración, ya que para este prototipo la vibración será por medio del motor eléctrico. Una función extra es con los cilindros, ya que para la fabricación de las probetas se lleva a cabo el mismo procedimiento que para los adoquines, es decir: primero se accionó el motor eléctrico para generar la vibración en la

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

herramienta y enseguida se vació la mezcla a los cilindros, posteriormente se realizó la compactación con ayuda de las tapas circulares mientras la herramienta sigue vibrando. La presión ejercida sobre los adoquines en la industria es únicamente con el peso del operador, solo en algunas empresas se utilizan prensas hidráulicas para la compactación, esta compactación dura en promedio 14 segundos. Por esta razón se optó por una compactación manual. Después de 14 segundos se apagó la herramienta y se alzó manteniendo las tapas a la altura establecida, de tal manera que las probetas quedaron en el suelo.

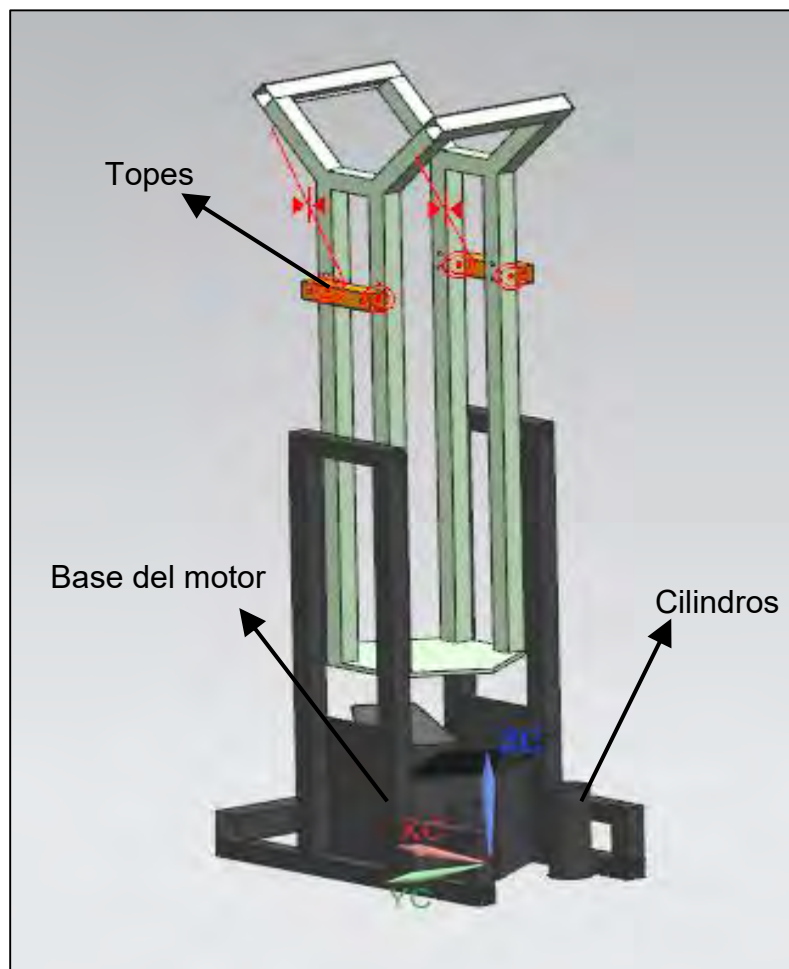


Figura 4.4 Concepto 3 para el procesado del adoquín



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

### 4.2.2 Desarrollo de herramienta

Se fabricó una herramienta para la elaboración de adoquines y de probetas, el concepto a seguir fué el Concepto 3. Para esta herramienta se utilizaron los siguientes materiales:

- Lámina galvanizada calibre 16
- Perfiles cuadrados de acero galvanizado de 1 pulgada
- Dos cilindros de acero galvanizado de 2 pulgadas de diámetro
- Un motor eléctrico de corriente alterna y 1/30 Hp

Los perfiles cuadrados que se implementaron para la estructura de la herramienta son reciclados. Se hizo vibrar toda la máquina con ayuda de un motor eléctrico, que a su vez hará mover una masa excéntrica. La presión ejercida sobre los adoquines y probetas a fabricar, será la ejercida por el cuerpo del operador de la máquina. El esfuerzo ejercido se calcula a continuación con la expresión 4-2

$$P = \frac{F}{A} \quad (4-2)$$

Para los cálculos se tomó en cuenta el peso de una persona promedio (75 kg), el valor promedio de la gravedad a nivel del mar y el área transversal de la probeta.

$$F = mg = 735.75 \text{ N} \quad (4-3)$$

$$r_{probeta} = 2.54 \text{ m}^2 \quad (4-4)$$

$$A_{transversal \text{ de la probeta}} = 2.54^2 \times \pi = 0.002026 \text{ m}^2 \quad (4-5)$$

$$A_{adoquín} = \frac{3 \times \sqrt{3} \times l^2}{2} = \frac{3 \times \sqrt{3} \times 0.12^2}{2} = 0.037 \text{ m}^2 \quad (4-6)$$

$$P_{probeta} = \frac{735.75 \text{ N}}{0.0002026 \text{ m}^2} = 363153.998 \text{ Pa} = 363.153 \text{ kPa} \quad (4-7)$$



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

$$P_{\text{adoquín}} = \frac{735.75N}{0.037m^2} = 19885.135 Pa = 19.885 kPa \quad (4-8)$$

### 4.2.3 Manufactura de la máquina

En este apartado se describirá la construcción de la máquina para fabricar adoquines y probetas. Cabe mencionar que el diseño a manufacturar es el concepto 3. Primero se cortó la lámina galvanizada formando una tira con un largo igual al perímetro del adoquín y con un ancho de 20 cm, el cual será la altura del adoquín (8 cm) más un extra de 12 cm, para que cuando se doble la lámina tenga la forma del molde mostrado en la Figura 4.5. El material extra es para las pestañas, las cuales ayudarán facilitar el vaciado del material y para tener un sobrante de 5 cm al momento de vaciar el material.



Figura 4.5 Corte de lámina galvanizada

Posteriormente se dobló la tira de lámina galvanizada cada 12 cm, 5 veces a un ángulo de 60° para cerrar el hexágono (como se observa en la Figura 4.6). Para realizar estos



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

dobles fue necesario realizar un pequeño surco en cada vértice para facilitar los dobleces.

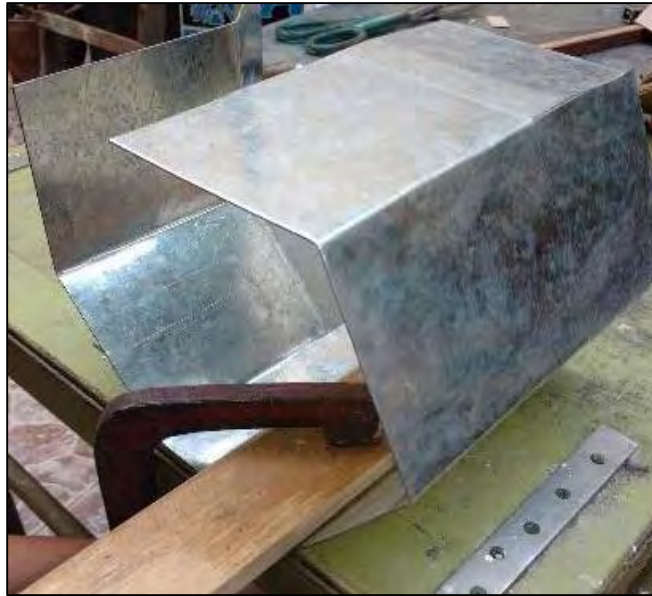


Figura 4.6 Doblado de lámina galvanizada

Con respecto a las pestañas, se hizo un corte de 7 cm en cada lado del hexágono y un doble a 45° como se observa en la Figura 4.7



Figura 4.7 Doblado de pestañas





## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

Una vez hechos los dobleces y las pestañas, se unió el hexágono soldando los vértices separados. Después se realizaron unas muescas en cuatro vértices, esto es para que más adelante se puedan unir los perfiles cuadrados, como se muestra en la Figura 4.8. Posteriormente, a las pestañas que se encuentran entre las muescas, se regresó el doblez a su forma original, para que más adelante se pueda unir la estructura del molde en esos lados del hexágono.

Se cortaron dos porciones de lámina con forma hexagonal de medida 1 mm menor por cada lado del molde (Figura 4.9), que fueron soldadas una sobre otra para formar una placa y utilizarla para comprimir el material de la mezcla que se vierta dentro del molde. A las placas se les esmerilaron las esquinas para quitar las rebabas que se formaron durante el proceso de corte.



Figura 4.8 Molde terminado

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---



Figura 4.9 Placas hexagonales

Se cortaron dos tubos de acero galvanizado de 2 pulgadas de diámetro con una longitud de 15 cm que se utilizaron para fabricar las probetas, estos cilindros se muestran en la parte izquierda superior de la Figura 4.13. Se adquirió un motor de corriente alterna que se utilizó para vibrar la máquina herramienta y acomodar el material de una manera más homogénea. El motor, como las piezas trabajadas hasta este punto se observan en la Figura 4.10.

Para la construcción de la tapa del molde para compactar, se cortó el perfil de 1 pulgada, de tal manera, que se obtuvieron dos perfiles con una longitud de 70 cm. Posteriormente se cortaron 4 perfiles con una longitud de 9 cm. Los dos perfiles más largos fueron soldados a uno de los perfiles de 9 cm, posteriormente, donde se unieron estos perfiles, se soldaron los tres perfiles restantes a 45° para las agarraderas (Figura 4.11).

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

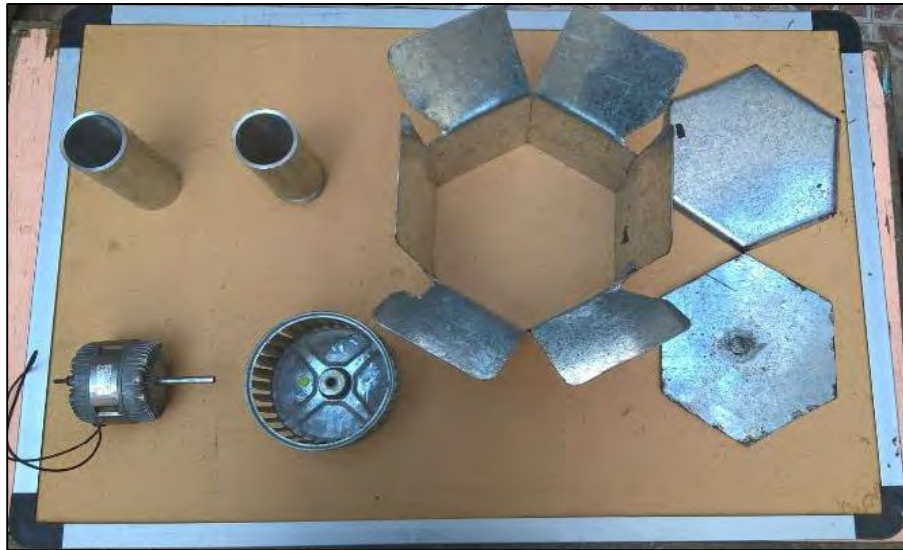


Figura 4.10 Cilindros, motor, molde y placas para tapa del molde



Figura 4.11 Estructura para la tapa del molde

También se realizaron las estructuras que van a los costados del molde, las medidas de los perfiles fueron: 2 perfiles con una altura de 60 cm, 1 perfil de 50cm y 1 perfil de 10cm, los cuales fueron soldados (Figura 4.12). Se construyeron dos estructuras de cada una de las mencionadas anteriormente, las cuales se muestran en la Figura 4.13.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



Figura 4.12 Estructura para el molde



Figura 4.13 Estructuras para la tapa y para el molde

Se tomaron las estructuras del molde y se soldaron al mismo (Figura 4.14). Como se puede observar, las estructuras se soldaron en los lados del molde donde las pestañas no fueron dobladas a 45°. En esos mismos lados del molde, se realizaron las muescas antes mencionadas, las cuales fueron hechas para facilitar la unión con el molde y las estructuras. Para la construcción de la tapa del molde se soldaron las dos placas hexagonales, como ya se mencionó anteriormente. Después se soldaron las estructuras de la tapa del molde a las placas hexagonales, tal como se puede observar en la Figura 4.15.





Figura 4.14 Unión de estructura y molde



Figura 4.15 Tapa del molde

Con respecto a los cilindros para fabricar las probetas, primero se realizó una estructura cuadrada montada en uno de los lados de la parte inferior de la estructura del molde

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

(Figura 4.16), donde cada perfil mide 11 cm de largo. Esta estructura cuadrada fue hecha para unir los cilindros con ayuda de una omega, dicha omega fue soldada en la parte inferior del cilindro, posteriormente se unió junto con el cilindro a la estructura cuadrada como se muestra en la Figura 4.16.

La compresión de la mezcla en los adoquines se llevará a cabo con ayuda de una tapa para el cilindro. La tapa del cilindro tendrá un diámetro menor al del cilindro, y de este modo se asegura que dicha tapa atraviese el cilindro. Se soldó un perfil de 10 cm de largo a la tapa (Figura 4.17). Para asegurar una altura de 4 pulgadas en las probetas a fabricar, se realizó un barrenado que servirá como tope con ayuda de un tornillo.



Figura 4.16 Unión del cilindro a la estructura del molde



Figura 4.17 Cilindro y tapa para fabricación de probetas

Este procedimiento se practicó de manera paralela en la otra estructura del molde (Figura 4.18). Por último, se montó el motor en la parte opuesta de los cilindros para la fabricación de probetas, como se muestra en la Figura 4.19.



Figura 4.18 Cilindros y tapas para fabricación de probetas



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



Figura 4.19 Motor montado a la herramienta

Finalmente, se le dio un recubrimiento de pintura para evitar la formación de óxido, como se observa en la Figura 4.20.



Figura 4.20 Herramienta terminada para la fabricación de adoquines





## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.3 Producto terminado

Para el caso de México la norma vigente y con la cual sirvió como referencia durante la realización de este proyecto es la NMX-C-314-ONNCCE-2014, algunas características del adoquín con base en esta norma, se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Algunas especificaciones tomadas de la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014 (NMX-C-314-ONNCCE, 2014)

Característica	Especificaciones
Espesor	Para tránsito ligero y peatonal con un espesor de 6 mm, y para tránsito medio un espesor de 8 mm
Cemento	El cemento empleado para la fabricación de adoquines, debe cumplir con las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE
Agregados	Los agregados finos y gruesos empleados para la fabricación de adoquines deberán cumplir con los requisitos establecidos y la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE
Agua	El agua utilizada en la fabricación de adoquines debe cumplir con los requisitos establecidos en la norma mexicana NMX-C-112-ONNCCE.
Geometría	Se debe cumplir con el espesor mostrado anteriormente y el área expuesta no debe tener un área mayor a 650 cm <sup>2</sup>
Resistencia a la compresión	Desde 24.5 MPa hasta 29.4 MPa para tránsito peatonal, desde 35.3 MPa hasta 39.2 MPa para tránsito ligero, desde 39.7 MPa hasta 44.1 MPa para tránsito medio

#### 4.3.1 Desarrollo del producto

Según Ullman los productos deben desarrollarse a partir de los conceptos y una lista simultánea de materiales tomando en cuenta el refinamiento del producto hacia una



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

configuración final, y la aplicación de “parches” de características para ayudar a encontrar un buen diseño de producto.

### 4.3.2 Pruebas al producto terminado

Con ayuda de la herramienta para construcción de adoquines realizada, se fabricaron 3 probetas para cada una de las mezclas mostradas en la Tabla 4.7. Posteriormente, a dichas probetas se les aplicó un ensayo de compresión. Cabe mencionar que se eliminó el resultado más alto y el más bajo de los ensayos de compresión, esto para acotar el margen de error, obteniendo al final 3 resultados por mezcla. Para la primera mezcla realizada con cascajo blanco (B) se obtuvieron los resultados de ensayo de compresión así como la desviación estándar, para este caso fue de 0.94 (Tabla 4.7).

Para esta mezcla, a pesar de que la tercera probeta aumento ligeramente en su valor de resistencia respecto a las otras 2, se puede observar que el comportamiento (Figura 4.21) de las 3 fue muy similar, por lo que el resultado puede ser considerado como confiable. Las variaciones en los valores de carga soportados, son variaciones estadísticas inherentes a la variación de cada mezcla.

Tabla 4.7 Resultados de ensayo de compresión de la mezcla B

No. de probeta	Mezcla	Carga máxima Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo máximo MPa
1	B	71.38	7.01 ± 0.94
2	B	77.68	7.62 ± 0.94
3	B	90.40	8.86 ± 0.94



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

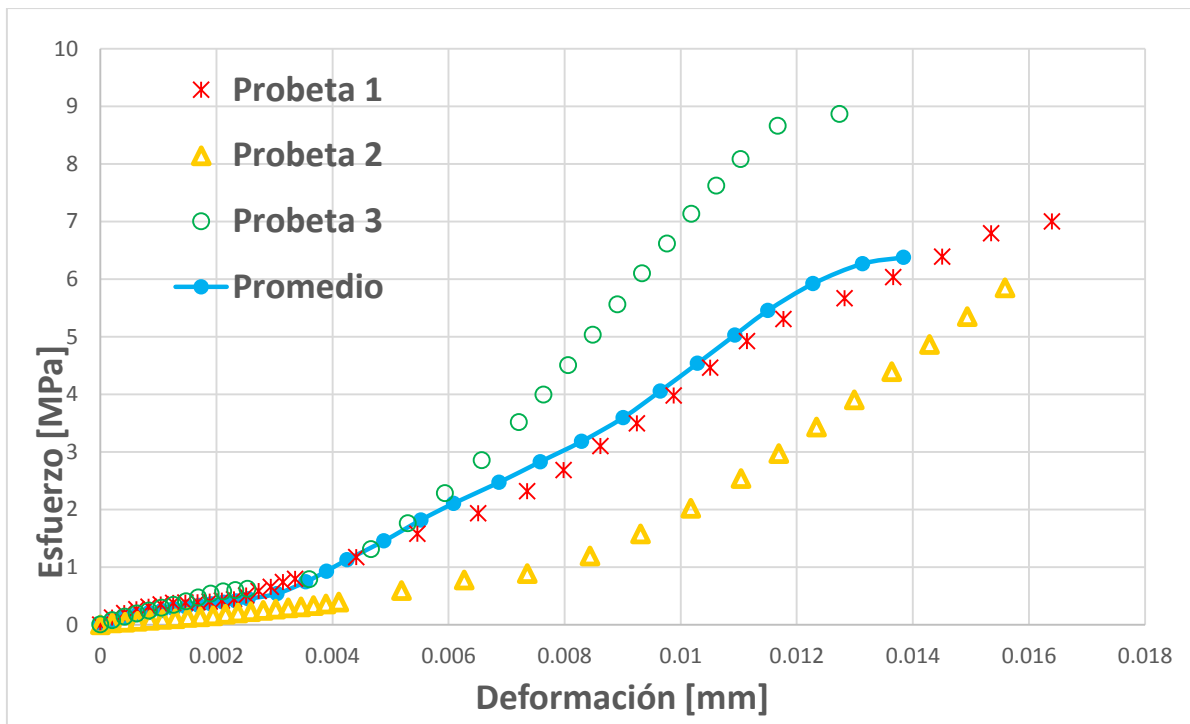


Figura 4.21 Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla B

Para la segunda mezcla realizada con cascajo blanco y 2% de llanta (B-2) se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.8, así como la desviación estándar, para este caso fue de 2.65. Para esta mezcla, la tercera probeta aumentó considerablemente en su valor de resistencia respecto a las otras 2, se puede observar que el comportamiento (Figura 4.22) de las 3 fue muy similar.

Tabla 4.8 Resultados de ensayo de compresión de la mezcla B-2

No. de probeta	Mezcla	Carga máxima [Kg/cm <sup>2</sup> ]	Esfuerzo máximo [MPa]
1	B-2	21.80	2.14 ± 2.65
2	B-2	15.54	1.52 ± 2.65
3	B-2	65.07	6.38 ± 2.65



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

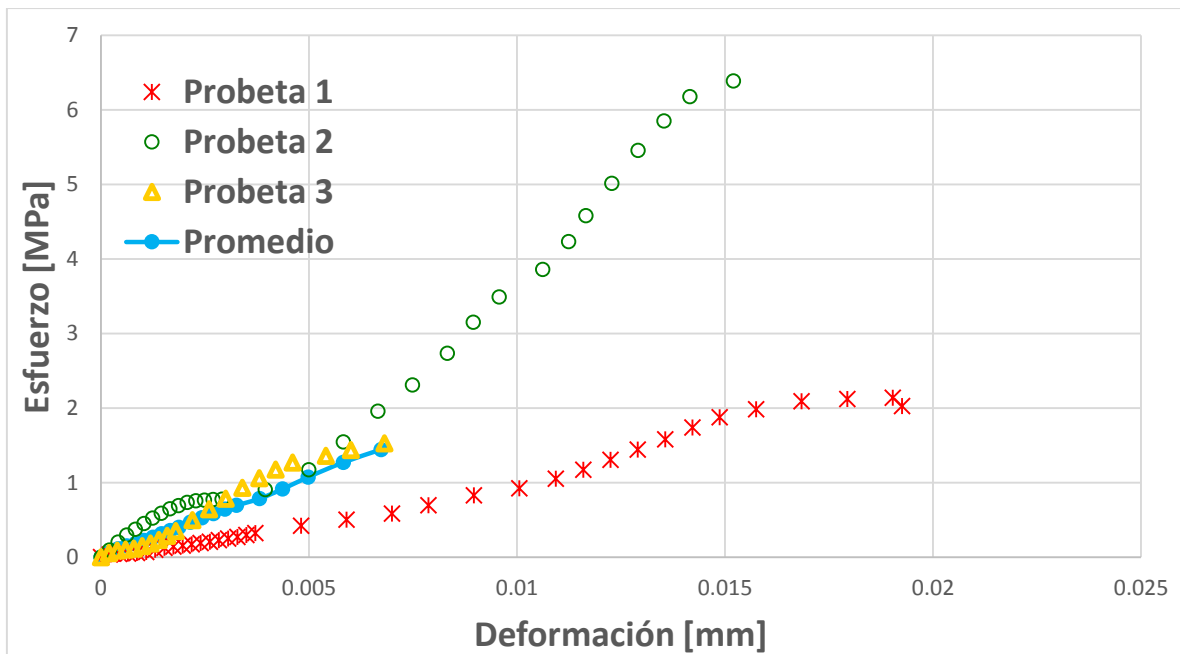


Figura 4.22 Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla B-2

Para la tercera mezcla realizada con cascajo blanco y 5% de llanta (B-5), se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.9, así como la desviación estándar, para este caso fue de 1.21. Para esta mezcla, la segunda probeta aumentó en su valor de resistencia respecto a las otras 2, se puede observar que el comportamiento (Figura 4.23) de las 3 fue muy similar, el resultado puede ser considerado como confiable.

Tabla 4.9 Resultados de ensayo de compresión de la mezcla B-5

No. de probeta	Mezcla	Carga máxima Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo máximo MPa
1	B-5	28.69	2.81 ± 1.21
2	B-5	49.31	4.84 ± 1.21
3	B-5	27.49	2.70 ± 1.21



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

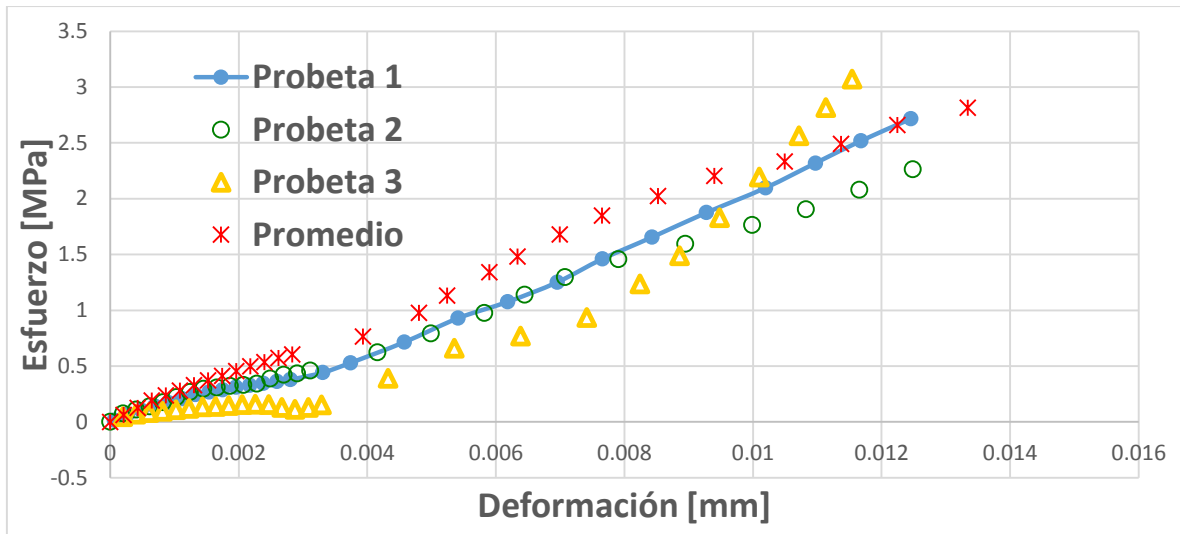


Figura 4.23 Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla B-5

Para la cuarta mezcla realizada con cascajo Blanco y 10% de llanta (B-10), se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.10, así como la desviación estándar, para este caso fue de 0.62. Para esta mezcla, los resultados de las resistencias a la compresión fueron similares, se puede observar tuvieron un comportamiento parecido (Figura 4.24) en las 3 probetas, por lo que el resultado puede ser considerado como confiable. Sin embargo, se observa una disminución importante en todos los valores, lo cual se asocia directamente con el incremento de llanta. También se observa que conforme la cantidad de llanta aumenta, la mezcla se hace menos resistente, sin embargo su comportamiento se vuelve menos lineal y más elástico.

Tabla 4.10 Resultados de ensayo de compresión de la mezcla B-10

No. de probeta	Mezcla	Carga máxima [Kg/cm <sup>2</sup> ]	Esfuerzo máximo [MPa]
1	B-10	10.13	0.99 ± 0.62
2	B-10	11.67	1.14 ± 0.62
3	B-10	21.70	2.13 ± 0.62



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

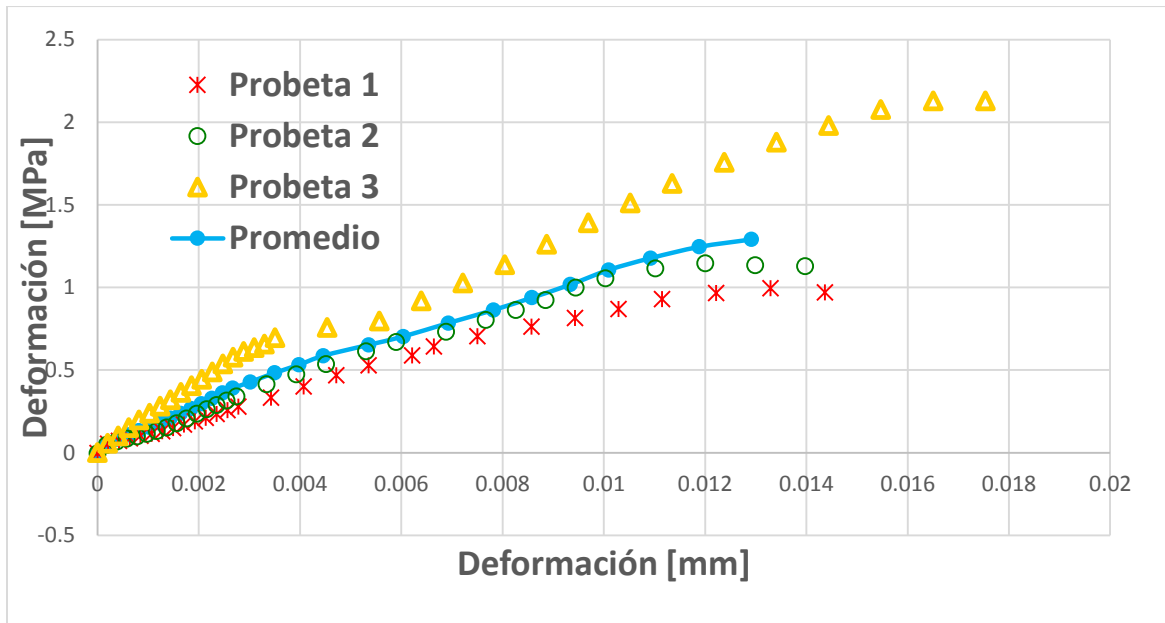


Figura 4.24 Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla B-10

Para la quinta mezcla realizada con cascajo rojo y 0% de llanta (R), se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.11, así como la desviación estándar, para este caso fue de 0.55. Para esta mezcla, los resultados de los ensayos de compresión de las probetas son muy similares, se puede observar que el comportamiento (Figura 4.25) de las 3 fue muy parecido, por lo que el resultado puede ser considerado como confiable. Por tratarse de un material menos controlado en su composición, se observa una disminución de la resistencia a la compresión con respecto a las probetas en las que se utilizó cascajo blanco

Tabla 4.11 Resultados de ensayo de compresión de la mezcla R

No. de probeta	Mezcla	Carga máxima Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo máximo MPa
1	R	35.31	3.46 ± 0.55
2	R	38.88	3.81 ± 0.55
3	R	46.15	4.53 ± 0.55



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

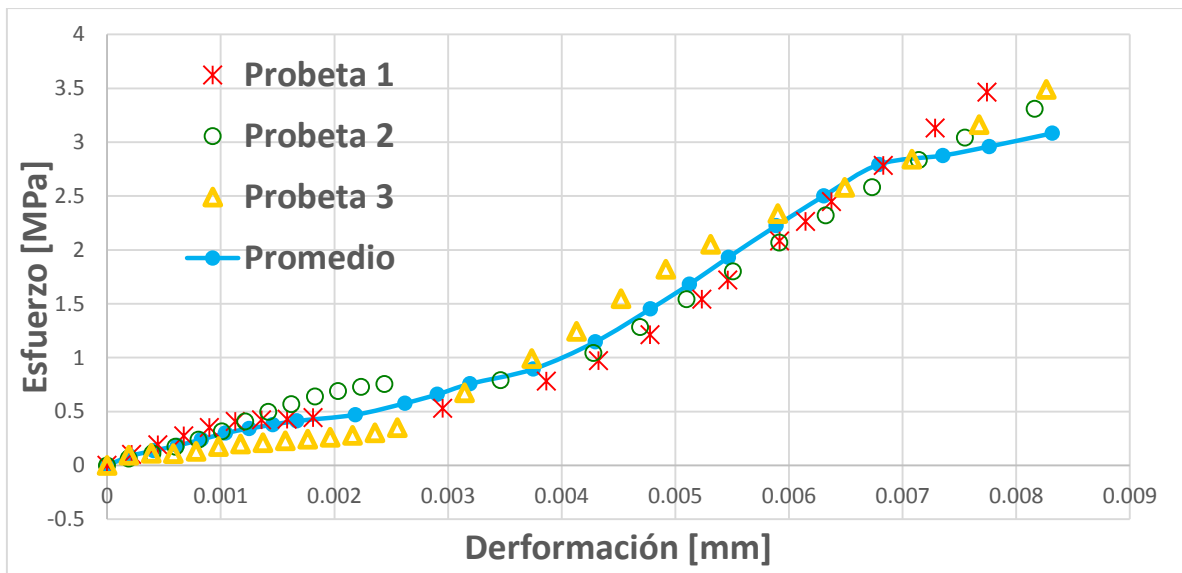


Figura 4.25 Gráficas de esfuerzo-deformación de la mezcla R

Para la sexta mezcla realizada con cascajo rojo y 2% de llanta (R-2), se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.12, así como la desviación estándar, para este caso fue de 0.45. Para esta mezcla, los resultados de los ensayos de compresión también fueron muy similares, se puede observar que el comportamiento (Figura 4.26) de las 3 fue parecido, por lo que el resultado puede ser considerado como confiable. Se observa una disminución de la resistencia al integrar llanta en la mezcla.

Tabla 4.12 Resultados de ensayo de compresión de la mezcla R-2

No. de probeta	Mezcla	Carga máxima Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo máximo MPa
1	R-2	22.87	2.24 ± 0.45
2	R-2	22.73	2.23 ± 0.45
3	R-2	14.79	1.45 ± 0.45



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

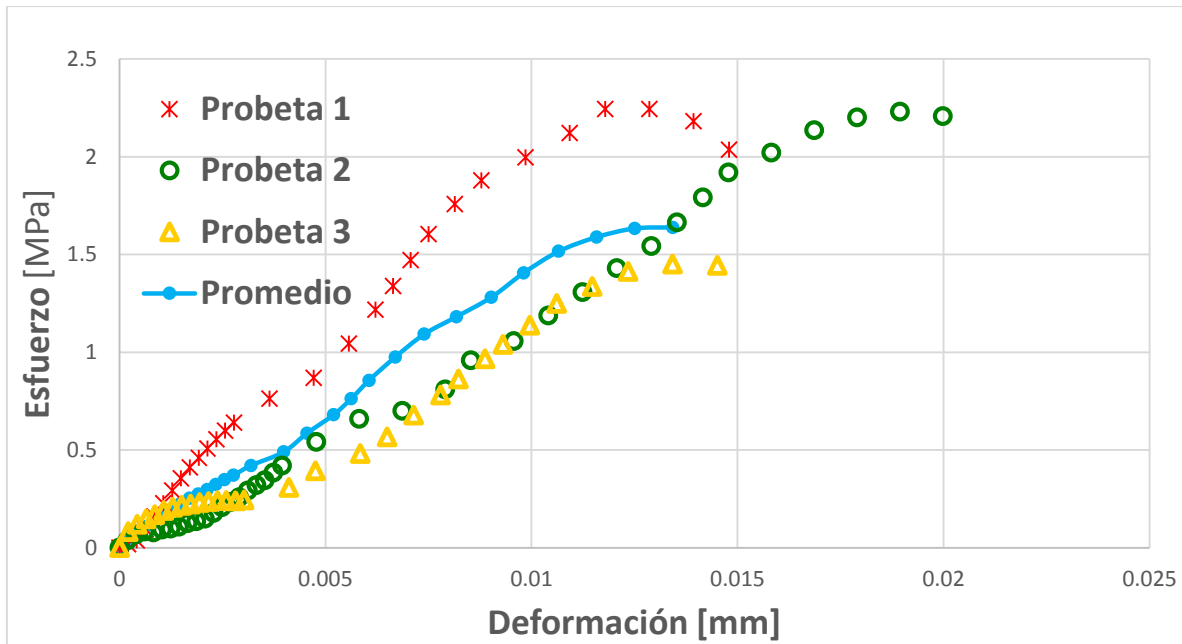


Figura 4.26 Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla R-2

Para la séptima mezcla realizada con cascajo rojo y 5% de llanta (R-5), se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.13, así como la desviación estándar, para este caso fue de 0.67. Para esta mezcla, a pesar de que la primera probeta se aumentó en su valor de resistencia respecto a las otras 2, se puede observar que el comportamiento (Figura 4.27) de las 3 fue muy similar, por lo que el resultado puede ser considerado como confiable.

Tabla 4.13 Resultados de ensayo de compresión de la mezcla R-5

No. de probeta	Mezcla	Carga máxima Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo máximo MPa
1	R-5	50.41	4.94 ± 0.67
2	R-5	39.10	3.84 ± 0.67
3	R-5	38.11	3.74 ± 0.67





## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

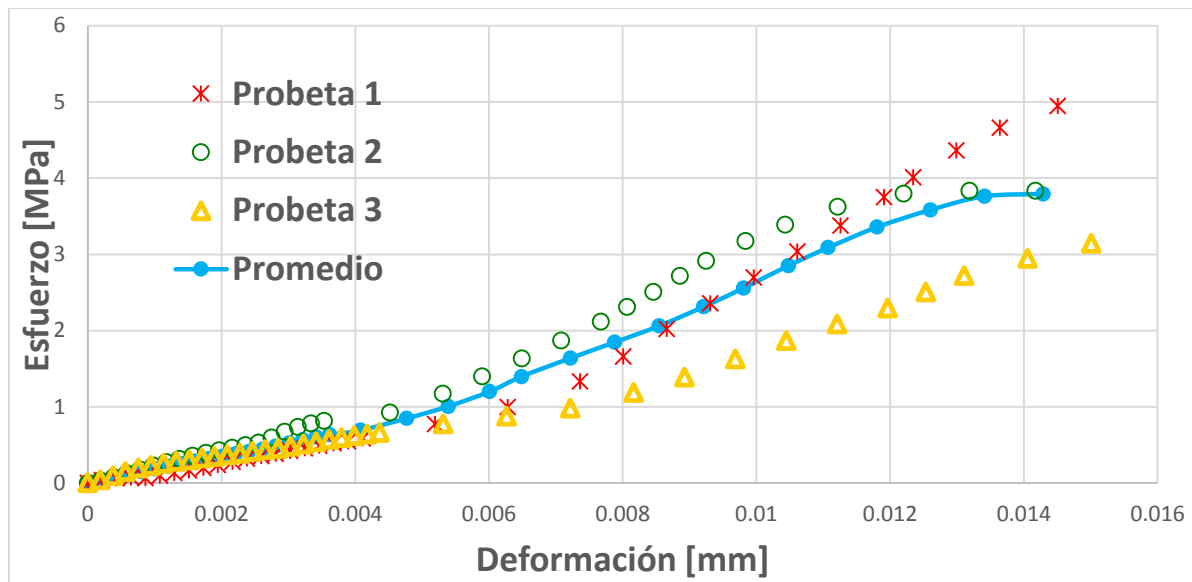


Figura 4.27 Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla R-5

Para la octava mezcla realizada con cascajo rojo y 10% de llanta (R-10) se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.14, así como la desviación estándar, para este caso fue de 0.48. Para esta mezcla, a pesar de que la segunda probeta aumentó en su valor de resistencia respecto a las otras 2, se puede observar que el comportamiento (Figura 4.28) de las 3 fue muy similar, por lo que el resultado puede ser considerado como confiable.

Tabla 4.14 Resultados de ensayo de compresión de la mezcla R-10

No. de probeta	Mezcla	Carga máxima Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo máximo MPa
1	R-10	18.09	1.77 ± 0.48
2	R-10	26.93	2.64 ± 0.48
3	R-10	18.94	1.86 ± 0.48



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

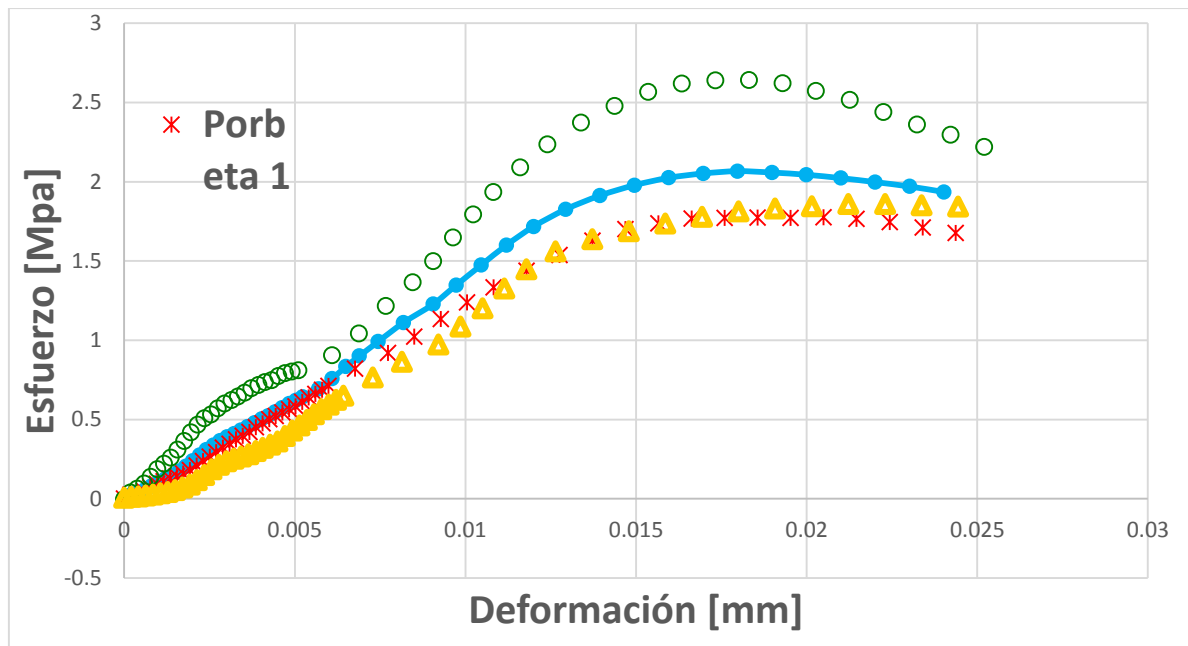


Figura 4.28 Gráfica de esfuerzo-deformación de la mezcla R-10

Para las mezclas con cascajo rojo se observa que conforme la cantidad de llanta aumenta, la mezcla se hace menos resistente, sin embargo se puede notar que los resultados son muy irregulares entre los porcentajes de mezclas.

En la Figura 4.29 y 4.30 se muestra el comportamiento de todas las probetas ensayadas a compresión, para cascajo blanco y para cascajo rojo respectivamente. En la Tabla 4.15, se exponen todas las mezclas con sus resultados de ensayo a la compresión las desviaciones estándar. La desviación estándar sirve como un margen de error.

Una vez que se ensayaron las probetas y obtenidos los resultados, se procedió a hacer un adoquín (Figura 4.32) con la mezcla B-2, ya que es la que integra ambos desechos y tiene una mejor resistencia en comparación con las demás mezclas propuestas con llanta.



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 4.15 Resultados de ensayo de compresión de todas las probetas

No. de probeta	Mezcla	Llanta %	Agregado grueso %	Agregado fino %	Cemento %	Agua %	Carga máxima Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo máximo MPa
1	B	0	42.4	26.35	18.66	12.59	<b>71.38</b>	<b>7.01 ± 0.94</b>
2	B	0	42.4	26.35	18.66	12.59	<b>77.68</b>	<b>7.62 ± 0.94</b>
3	B	0	42.4	26.35	18.66	12.59	<b>90.40</b>	<b>8.86 ± 0.94</b>
1	B-2	2	42.4	24.35	18.66	12.59	<b>21.80</b>	<b>2.14 ± 2.65</b>
2	B-2	2	42.4	24.35	18.66	12.59	<b>15.54</b>	<b>1.52 ± 2.65</b>
3	B-2	2	42.4	24.35	18.66	12.59	<b>65.07</b>	<b>6.38 ± 2.65</b>
1	B-5	5	42.4	21.35	18.66	12.59	<b>28.69</b>	<b>2.81 ± 1.21</b>
2	B-5	5	42.4	21.35	18.66	12.59	<b>49.31</b>	<b>4.84 ± 1.21</b>
3	B-5	5	42.4	21.35	18.66	12.59	<b>27.49</b>	<b>2.70 ± 1.21</b>
1	B-10	10	42.4	11.35	18.66	12.59	<b>10.13</b>	<b>0.99 ± 0.62</b>
2	B-10	10	42.4	11.35	18.66	12.59	<b>11.67</b>	<b>1.14 ± 0.62</b>
3	B-10	10	42.4	11.35	18.66	12.59	<b>21.70</b>	<b>2.13 ± 0.62</b>
1	R	0	42.4	26.35	18.66	12.59	<b>35.31</b>	<b>3.46 ± 0.55</b>
2	R	0	42.4	26.35	18.66	12.59	<b>38.88</b>	<b>3.81 ± 0.55</b>
3	R	0	42.4	26.35	18.66	12.59	<b>46.15</b>	<b>4.53 ± 0.55</b>
1	R-2	2	42.4	24.35	18.66	12.59	<b>22.87</b>	<b>2.24 ± 0.45</b>
2	R-2	2	42.4	24.35	18.66	12.59	<b>22.73</b>	<b>2.23 ± 0.45</b>
3	R-2	2	42.4	24.35	18.66	12.59	<b>14.79</b>	<b>1.45 ± 0.45</b>
1	R-5	5	42.4	21.35	18.66	12.59	<b>50.41</b>	<b>4.94 ± 0.67</b>
2	R-5	5	42.4	21.35	18.66	12.59	<b>39.10</b>	<b>3.84 ± 0.67</b>
3	R-5	5	42.4	21.35	18.66	12.59	<b>38.11</b>	<b>3.74 ± 0.67</b>
1	R-10	10	42.4	11.35	18.66	12.59	<b>18.09</b>	<b>1.77 ± 0.48</b>
2	R-10	10	42.4	11.35	18.66	12.59	<b>26.93</b>	<b>2.64 ± 0.48</b>
3	R-10	10	42.4	11.35	18.66	12.59	<b>18.94</b>	<b>1.86 ± 0.48</b>



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

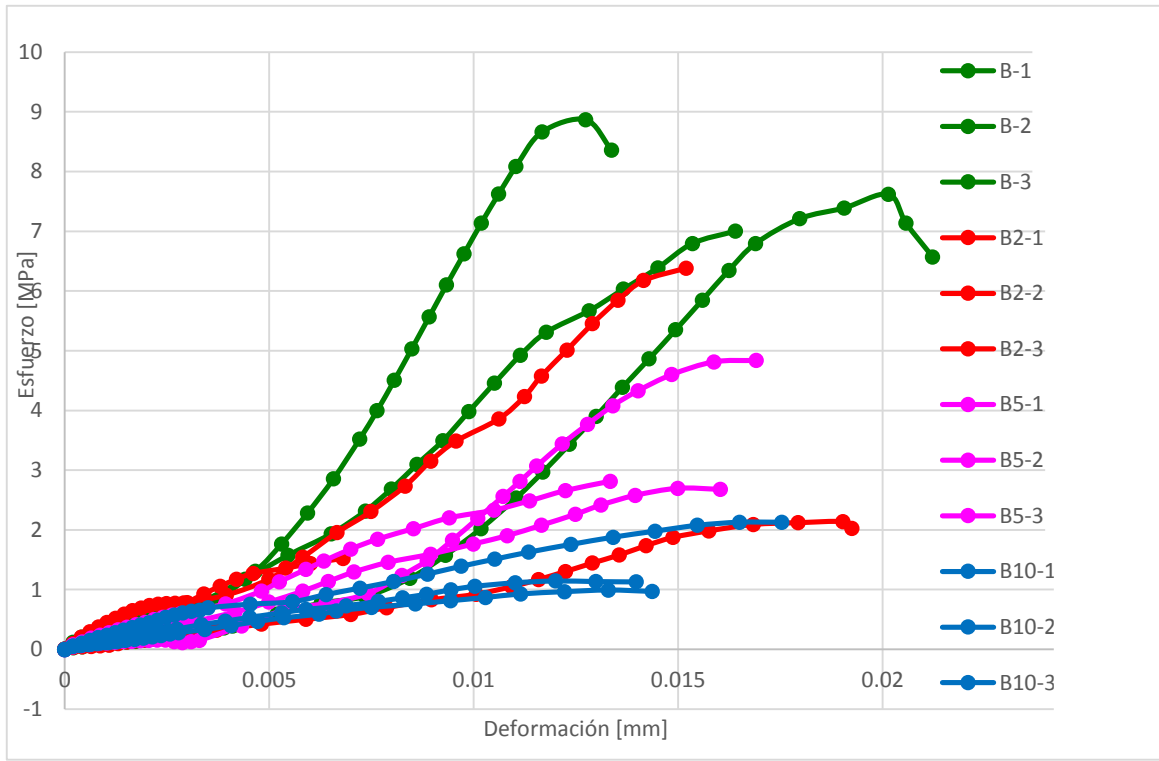


Figura 4.29 Gráfica de esfuerzo-deformación de todas las probetas con cascajo blanco

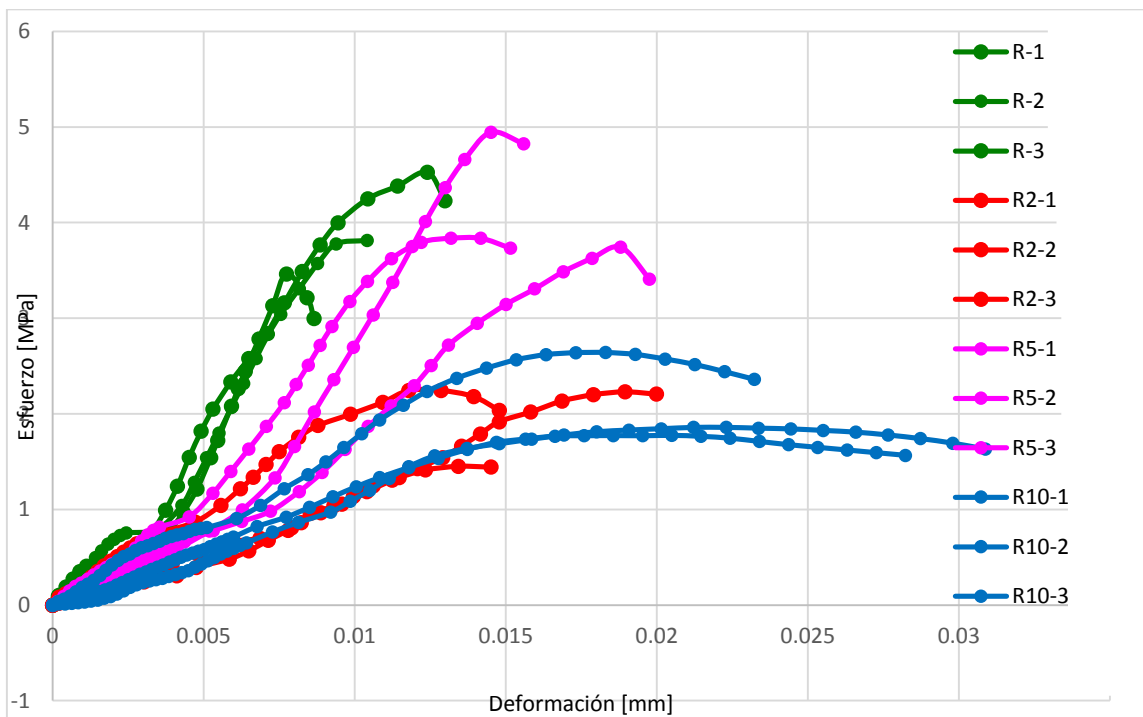


Figura 4.30 Gráfica de esfuerzo-deformación de todas las probetas con cascajo rojo



Figura 4.31 Probeta ensayada a compresión

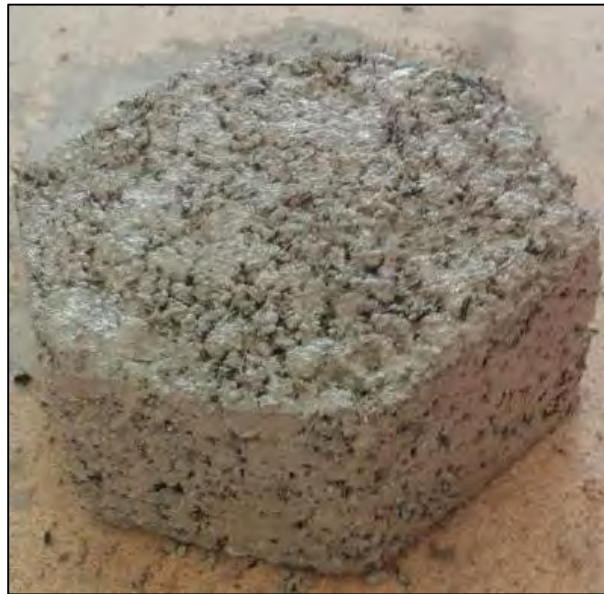


Figura 4.32 Adoquín hecho con mezcla B-2



## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

---

El descubrimiento de las mezclas propuestas, sin duda alguna, abren un gran panorama para contribuir a la fabricación de nuevos materiales de construcción, hechos de materiales reciclados.

Los adoquines, realizados con ayuda de la herramienta para fabricación de adoquines, podrían emplearse en parques, áreas recreativas, etc., como un material de decoración y en donde la demanda de uso sea exclusivamente peatonal, y aunque no se cumple con la resistencia a la compresión de la norma NMX-C-314. El ensayo a la compresión realizado sobre las diferentes mezclas propuestas, deja al descubierto dos factores importantes:

- Conforme se aumenta la cantidad de llanta utilizada en la mezcla la resistencia disminuye, esto se cree que es a la poca compatibilidad de la mezcla de cemento con la llanta, además de que ésta, por su naturaleza, es más flexible y afecta al comportamiento del material compuesto. Sin embargo, con respecto al cascajo rojo en sus resultados en los ensayos de compresión son muy irregulares con respecto al cascajo blanco, ya que la mezcla R-5 resultó ser más resistente que la mezcla R-2 y ligeramente más resistente que la mezcla R, esto es debido a que el cascajo rojo contiene distintos materiales.
- Independientemente del tipo de mezcla utilizada, los resultados dejaron a la vista que ninguna de las mezclas propuestas alcanzó los valores mínimos requeridos por la norma NMX-C-314.

Con respecto a las gráficas de los especímenes ensayados a compresión, a pesar de ser materiales compuestos, en todos los casos se observó un comportamiento similar entre ellos. En general en las gráficas se observó un comportamiento lineal, con una zona plástica pequeña y fallando abruptamente, aunque ésta última se hizo más evidente conforme el porcentaje de llanta en la mezcla aumentó, lo que indica una mayor ductilidad.



## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

---

Por otro lado para mejorar las propiedades del material, se propone estandarizar el proceso de fabricación de las probetas, para así obtener resultados más confiables y fidedignos. Si se realiza de esa manera y con algún aditivo compatible a la mezcla, se espera que los resultados alcancen, en alguna de las mezclas cuando menos, el valor mínimo requerido por la norma.

Por las propias características de la llanta y del cemento, las uniones entre ambos son muy débiles, lo que se refleja en una disminución de la resistencia, para ello se propone estudiar el comportamiento de la mezcla con ciertos aditivos para integrar de mejor forma y hacer más resistentes las fuerzas de cohesión existentes. Existen estudios en los que se propone el uso de azufre para dar mejores resultados en este aspecto, sin embargo los efectos contaminantes a mediano y largo plazo derivados de la inserción de este elemento en la fórmula, no están del todo claros, por lo que de momento se descarta su uso, pues la esencia del proyecto es contribuir a mejorar las condiciones ambientales actuales.

Otro punto a considerar fue el tipo de cascajo que se utilizó, pues si bien en general los resultados favorecieron a las probetas realizadas con cascajo tipo blanco por sobre el tipo rojo, las diferencias no fueron muy grandes, por lo que se propone rediseñar la mezcla final basados en el cascajo rojo, pues de ese modo se logra abarcar una mayor variedad de desechos potencialmente reciclables, y utilizar el cascajo “blanco” solamente cuando los requerimientos sean mayores. La diferencia en la resistencia obtenida dependiendo el tipo de cascajo, es debida a la propia composición de los tipos de cascajo, ya que en el “rojo” se encuentran diversos materiales más porosos y por ende menos resistentes.

Para el diseño de la máquina para fabricación de adoquines y probetas, y el diseño de la mezcla, se seleccionó la metodología de diseño de Ullman, debido a que se adaptó más a las necesidades del proyecto.



## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

---

Se demostró que es posible fabricar adoquines de cascajo y llanta, utilizando la máquina que se manufacturó

La situación actual de México en materia de contaminación de suelos por desechos de la construcción es muy desfavorable, un caso claro es en la Delegación Tlalpan en donde el problema es creciente. El fomentar el uso de materiales de construcción realizado con base en desechos sin duda deberá estar presente dentro de los programas gubernamentales

Con los resultados obtenidos, rediseñando la mezcla con un mínimo de llanta y atendiendo a las recomendaciones hechas respecto al proceso de fabricación, se espera que los adoquines cumplan con los valores mínimos de carga, por lo que se propone, basados en los resultados, un uso en vías peatonales como parques y caminos con un tránsito peatonal.





## REFERENCIAS

---

Aldana, J. y Serpell, A. 2012. Temas y tendencias sobre residuos de construcción y demolición: un meta análisis. *Revista de la Construcción*. Vol. 11, No. 2.

Arconada, R. y Zambrano, E. 2015. Diseño y fabricación de prototipo de un distractor craneal para el tratamiento de malformaciones debidas a la craneosinostosis. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

ASTM C-39, 1993. Standard Method of Test. Compressive Strenght of Cylindrical Concrete Specimens. Estados Unidos.

Cabezas, M. 2014. Elaboración de un manual de procesos constructivos del adoquinado. Tesis de tecnóloga en administración de proyectos de construcción. Escuela de formación de tecnólogos, Escuela politécnica nacional. Quito, Ecuador.

CORBLOCK, 2016. Pavimentos de adoquines intertrabados de hormigón. Publicación de CORBLOCK. Córdoba, Argentina.

Corzo, A. y Cuatín, M. 2011. Diseño de una máquina semiautomática para la fabricación de adoquines y bloques. Tesis de licenciatura de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Cross, N. 1984. Developments in design methodology. 1st ed. Wiley. Nueva York, Estados Unidos.

Cross, N. 2000. Engineering Design Methods: Strategies for product design. 3rd ed. Wiley. Nueva York, Estados Unidos.



## REFERENCIAS

---

Hernández, S. 2014. Llantas usadas un gran problema de contaminación. Revista Home:Tech la industria del entretenimiento. Ciudad de México, México.

Isan, A. 2015. Los neumáticos, grandes contaminantes. Publicación de Ecología Verde. Barcelona, España.

Jones, J.C. 1992. Design Methods. 2nd ed. Wiley. Nueva York, Estados Unidos.

López, S. 2010. Uso de polvo de llanta como agregado fino en una mezcla de concreto para la elaboración de adoquines. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Martel, G. 2008. Caracterización de residuos de la construcción y demolición de edificaciones para su aprovechamiento. Tesis de Maestría de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado de Ingeniería. Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

Montes, R. 2011. Solo hay 2 tiraderos de cascajo. Periódico El universal. Ciudad de México. México.

Morán, J., Vladez, A. y Aguado, P. 2010. Estado actual de la gestión de residuos de construcción y demolición: limitaciones. *Informes de la Construcción*. 63(521):89-95.

MTCE, 2004. Manual Técnico para la correcta colocación de los euroadoquines. Publicado por la Asociación para la Investigación y Desarrollo del Adoquín de Hormigón. Madrid, España.

NORMA Mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2013. Organismos Nacionales de Normalización (ONN). Ciudad de México, México.



## REFERENCIAS

---

NORMA Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2004. Organismos Nacionales de Normalización (ONN). Ciudad de México, México.

NORMA Mexicana NMX-C-122-ONNCCE-2004. Organismos Nacionales de Normalización (ONN). Ciudad de México, México.

NORMA Mexicana NMX-C-255-ONNCCE-2013. Organismos Nacionales de Normalización (ONN). Ciudad de México, México.

NORMA Mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014. Organismos Nacionales de Normalización (ONN). Ciudad de México, México.

NORMA Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2010. Organismos Nacionales de Normalización (ONN). Ciudad de México, México.

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. y Grote, K. 2007. Engineering Design: A systematic approach. 3rd ed. Springer. Berlín, Alemania.

PCR, 1997. Pavimentos intertrabados de adoquines de hormigón. Publicación del Departamento de Promoción y Servicios Técnicos. Comodoro Rivadavia, Argentina.

Pugh, S. 1991. Total design: integrated methods for successful product engineering. Addison-Wesley. Estados Unidos.

SICA. 2011. Estudio de análisis, evaluación y definición de estrategias de solución de la corriente de residuos generada por las actividades de construcción en México. Informe final de la empresa Sistemas de Ingeniería y Control Ambiental S.A de C.V. Biblioteca de la Secretaria de Medio Ambiente Recursos Naturales (SEMARNAT). Ciudad de México, México.



## REFERENCIAS

---

Texta, I. 2016. Piden crear infraestructura para el tiradero de casajo. Publicación en el periódico El Sol de México. Ciudad de México, México.

TIN. 2013. Reciclaje de llantas: cómo convertir un problema ambiental en productos con valor agregado. Publicación revista "Tu interfaz de negocios". Informática Cosmos. 3(13): 8-9. Ciudad de México. México.

Ullman, D.G. 2010. The Mechanical Design Process. 4th ed. McGraw Hill. Estados Unidos.

Vargas, L., 2016. Adiós al adoquín en la capital; Municipio lo sustituye por concreto hidráulico. Publicación periódico El Heraldo San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.

Yan, H. 1998. Creative Design of Mechanical Devices. Editorial Springer. Berlín, Alemania