

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Desde el inicio de la industria de la construcción, los retos y desafíos técnicos con permanentes. Por esto, en la actualidad se hace necesario buscar la transformación de operaciones, entre ellas, encontrar una materia prima que haga de la construcción una industria amigable ambientalmente, generando el menor impacto ambiental posible. En esa línea, se ha encontrado que los agregados reciclados brindan una alternativa a la construcción de nuevas estructuras con la utilización de material de estructuras demolidas.

El agregado de concreto reciclado (ACR), no es otra cosa que la utilización como agregado de un concreto que ha sido previamente usado en otra obra que fue demolida y en la industria no serían más que escombros. Este material se utiliza como base o sub base para construir nuevas carreteras o para rehabilitar estructuras existentes, entre otras aplicaciones; además, para elaborar concreto reciclado, que se caracteriza básicamente por contar con agregados de concreto reciclado, el cual se mezcla con cemento, agregado natural, agua y aditivos para obtener un concreto de características físicas y mecánicas similares a las del concreto tradicional.

Anualmente en el mundo se producen un billón de toneladas de residuos de demolición, de las cuales 510 millones son producidos en Europa. En promedio solo el 8 % de estos residuos se reciclan, aunque en países como Alemania, Holanda y Reino Unido cerca del 20% de agregados reciclados se utilizan.

En Bolivia, existe una gran contaminación de residuos y escombros, a pesar de eso aún no se aprovecha este material. En el año 2022, en la ciudad de Tarija, la primera campaña piloto de la ciudad, mandada por la Ley 270 (municipal) retiraron 130 toneladas de escombros procedentes de quebradas.

Bajo las circunstancias antes mencionadas, se observa que actualmente el uso de agregados de concreto reciclado es una alternativa, por lo que en este trabajo se pretende realizar el reemplazo de grava por un agregado grueso de concreto reciclado en el diseño de una losa de pavimento rígido, hallando una correlación entre la resistencia a

compresión y la resistencia a flexión, ya que ambas son parámetros que se utilizan en el diseño de dicha losa.

## **1.2. Situación problemática**

La estrecha relación que existe entre resistencia a compresión y resistencia flexión, con la utilización de agregado grueso de concreto reciclado, traducándose en la optimización de los recursos; esto se puede lograr con una difusa investigación que nos permita establecer una correlación entre las resistencias, con menos incertidumbre, para ser utilizada en el diseño de pavimentos.

Se requiere establecer tanto la relación de la resistencia a la compresión como la resistencia flexión (módulo de rotura) que puede presentar el concreto hidráulico con la utilización de agregado grueso de concreto reciclado a través de ensayos en el laboratorio.

El no proceder con este trabajo, no se realizará alternativas para el mejoramiento estructural y funcional de pavimentos, específicamente para los de concreto hidráulico, con el fin de aprovechar al máximo los materiales y demás factores que participan en dicho proceso.

Realizando los estudios para las condiciones propuestas se puede llegar a establecer una correlación menos aproximada y más real, y que se puede traducir en la reducción de costos del proyecto de diseño y construcción de carreteras elaboradas a base de concreto hidráulico.

### **1.2.1. Problema**

¿De qué manera se puede establecer una correlación confiable entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión en pavimento rígido con el empleo de agregado grueso de concreto reciclado?

### **1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema**

El diseño estructural de pavimentos rígidos está condicionado por una serie de factores que determinan la capacidad que deberá tener el pavimento en cuanto a resistencia del hormigón (resistencia a compresión y la resistencia a flexión) y espesor de la losa. Tanto el diseño como las normas utilizan como parámetro control la resistencia a flexión que exige otras series de controles tanto en campo como en laboratorio, que, en muchos casos,

no se cuenta con ellos de manera inmediata, razón por la cual se necesita estudiar correlaciones que permitan utilizar la resistencia a compresión como parámetro de control de los pavimentos rígidos. Además, sabiendo que el esfuerzo que el concreto puede resistir depende de las características del mortero (mezcla de cemento, arena y agua), de los agregados gruesos con diferentes características (forma, textura, mineralogía, resistencia, etc.), pueden producir concretos de distintas resistencias; es aquí donde nace la necesidad de estudiar el agregado grueso reciclado a emplearse en la mezcla para pavimento rígido.

La investigación es factible ya que, en nuestro medio se pueden conseguir todos los materiales que se necesita, como ser: cemento, agua, agregado fino y el agregado grueso reciclado, siendo este lo más difícil su proceso de obtención, el cual debe tener la granulometría adecuada para su empleo en la mezcla.

### **1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema**

El tiempo que tendrá esta investigación es en tiempo futuro, ya que la correlación entre las resistencias que se obtendrá en el presente trabajo, con la implementación de agregado grueso de concreto reciclado prevalecerá en el tiempo ya que se tendrá conocimiento de la incidencia que tendrá este agregado frente a una mezcla de concreto.

La delimitación espacial está dada de la siguiente manera:

- Área de trabajo:

Cemento: El cemento utilizado en la elaboración de probetas en la presente investigación fue cemento portland con puzolana tipo IP-40.

Agregado fino: Material de banco de préstamo del departamento de Tarija, provincia Cercado, que está ubicado en San Mateo.

Agregado grueso: La muestra de material reciclado fue recogido de una cancha de fútbol, ubicada en el departamento de Tarija, provincia Méndez, barrio Central de San Lorenzo, de sobre la calle Julio Sucre Villafuerte.

- Base de operaciones:

Laboratorio de hormigón y resistencia de los materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

### **1.3. Justificación**

El concreto hidráulico es el resultado de la mezcla y combinación, en dosificación adecuada de cemento, agregados pétreos finos y gruesos seleccionados y agua, que se utiliza en la construcción de elementos estructural es o decorativos, pavimentos, pisos, tuberías, banquetas y guarniciones. La razón por la cual el concreto hidráulico es preferido en la construcción es porque presenta características significativas de durabilidad, trabajabilidad, impermeabilidad y resistencia. La propiedad más conocida del concreto hidráulico es la resistencia a la compresión, sin embargo, el módulo de ruptura toma un papel muy importante al momento de diseñar pavimentos u otras estructuras apoyadas sobre terrenos. El ensayo de resistencia a la flexión de vigas se utiliza como un ensayo de control en el campo, pero es una prueba que presenta diferentes dificultades en el momento de la evaluación, por este motivo se pretende hacer conexiones entre la resistencia de compresión y flexión y utilizar el ensayo de compresión para diseñar y calificar la calidad de un pavimento de concreto.

Con el constante crecimiento demográfico, el impacto ambiental producido por los residuos de demolición y construcción son un problema en el sector de la construcción. En efecto, tales residuos jamás se biodegradarán por ser materiales inorgánicos. Por tal motivo, sería conveniente darle utilidad a dicho material y de esta manera se reduciría significativamente la contaminación ambiental; así mismo, es primordial convertir al concreto en un material sostenible, usando agregados reciclados en reemplazo de agregados. Los agregados representan una gran parte del volumen total del concreto, siendo un componente fundamental para su producción y de gran repercusión en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. Es necesario mencionar que aproximadamente el 40 % de todos los recursos disponibles son utilizados por la industria de la construcción, siendo está, una de las mayores consumidoras de recursos naturales en cualquier economía, provocando la escasez de materias primas, y a su vez, devastando de forma desproporcionada el medio ambiente. Es importante disminuir los impactos ambientales ocasionados por la elaboración de concreto. El emplear agregado grueso

reciclado para sustituir el agregado natural, es una alternativa que puede hacer del concreto un material con una reducida presencia contaminante asociada a su producción.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Correlacionar la resistencia a compresión y la resistencia a flexión en capa de rodadura de pavimento rígido, mediante la elaboración de probetas con agregado grueso de concreto reciclado para su uso en diseño.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Determinar las características físicas y mecánicas de los agregados.
- Comparar resultados del agregado grueso de concreto reciclado con los de un agregado natural (patrón) de la misma zona.
- Establecer la dosificación de la mezcla con el uso de agregado grueso de concreto reciclado.
- Realizar ensayos de resistencia a compresión y resistencia a flexión.
- Obtener la relación matemática entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión del concreto, expresada en forma de una ecuación.
- Evaluar los resultados de las resistencias del concreto con el uso de agregado grueso reciclado.
- Estimar el costo por metro cubico del concreto con agregado grueso reciclado.

## **1.5. Hipótesis**

Si al correlacionar los resultados de la resistencia de compresión y la resistencia a flexión a partir del uso de agregado grueso de concreto reciclado, entonces se obtendrá una ecuación confiable para determinar el valor de la resistencia a flexión.

## **1.6. Operacionalización de las variables**

### **1.6.1. Variable independiente**

Se presenta las variables independientes para la investigación en términos del objeto de estudio. No existe dependencia de variables ya que se estiman de forma individual y con diferentes ensayos. Estas variables son:

Resistencia a compresión

Resistencia a flexión.

**Tabla 1.** Conceptualización y operacionalización de la variable

Variable independiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Resistencia a compresión	Capacidad para soportar una carga por unidad de área	Dosificación	kg - m <sup>3</sup> - l	Establecer la cantidad de cemento, arena, grava reciclada y agua
		Asentamiento	cm	Realizado con el ensayo del cono de Abrams
		Curado	h - días	Sumergido en agua
		Rotura	kg/cm <sup>2</sup>	Calculada con la carga máxima soportada por probeta entre el área de la sección
Resistencia a flexión	Capacidad de un material de soportar fuerzas aplicadas perpendicularmente a su eje longitudinal	Dosificación	kg - m <sup>3</sup> - l	Establecer la cantidad de cemento, arena, grava reciclada y agua
		Asentamiento	cm	Realizado con el ensayo del cono de Abrams
		Curado	h - días	Sumergido en agua
		Rotura	kg/cm <sup>2</sup>	Aplicación de carga a la viga

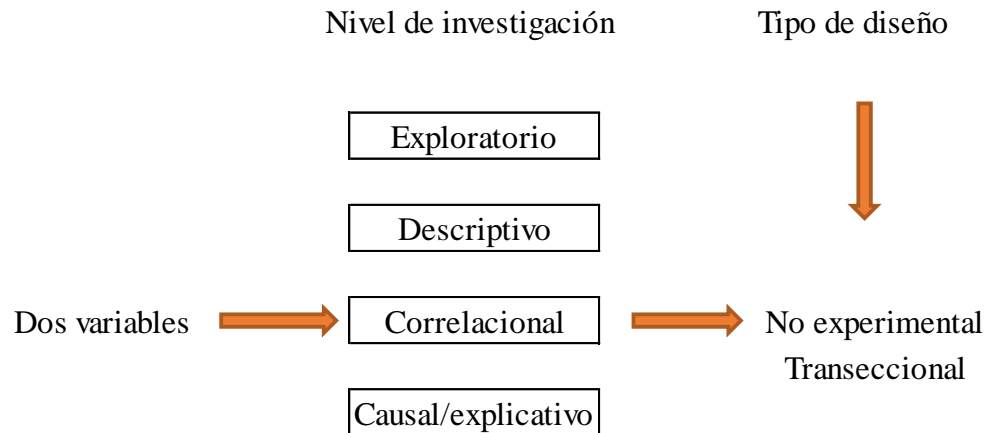
**Fuente:** Elaboración propia

### 1.7. Identificación del tipo de investigación

Este trabajo se trata de una investigación no experimental, ya que las variables, en este caso dos, no son manipuladas; asimismo corresponde a un diseño transeccional porque las variables ocurrirán en un momento único y se procederá a su medición; además es

correlacional debido a que se expresa la relación que existe entre las variables de la investigación en un determinado momento.

**Gráfico 1.** Nivel de investigación



**Fuente:** Elaboración propia

## **1.8. Unidades de estudio y decisión muestral**

### **1.8.1. Unidad de estudio**

El presente trabajo toma como unidad de estudio los ensayos de laboratorio para pavimentos rígidos.

### **1.8.2. Población**

La población para la investigación son todos los ensayos de laboratorio de hormigón para capa de rodadura de pavimentos rígidos.

### **1.8.3. Muestra**

La muestra se considera los ensayos necesarios para determinar la resistencia a compresión y la resistencia a flexión, con el uso de agregado grueso de concreto reciclado.

Para obtener el tamaño de la muestra, se realiza de acuerdo a lo seleccionado en la unidad de muestra, asignando de manera directa el nivel de confianza del 95% considerando una población infinita, sin embargo, mediante la metodología estratificada se puede asignar números lógicos para hacer el correspondiente ajuste.



$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i * \sigma^2}{N * \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i * \sigma^2}{N}}$$

Se adoptará una varianza de ( $\sigma^2 = 0,15$ ) debido a que el tiempo asignado para la realización de trabajos no es muy amplio.

El error correspondiente está en ( $e = 5\%$ )

NC = 95%  $\rightarrow Z = 1,96$

**Tabla 2.** Ajuste de número de ensayos

Etapas	Ensayos	Ni	$\sigma^2$	Ni* $\sigma^2$	Fi	ni	ni
Caracterización	Granulometría agregado grueso	4	0,2	0,6	0,0301	2,5	3
	Granulometría agregado fino	4	0,2	0,6	0,0301	2,5	3
	Peso unitario compactado del agregado grueso	4	0,2	0,6	0,0301	2,5	3
	Peso unitario suelto del agregado grueso	4	0,2	0,6	0,0301	2,5	3
	Peso unitario compactado del agregado fino	4	0,2	0,6	0,0301	2,5	3
	Peso unitario suelto del agregado fino	4	0,2	0,6	0,0301	2,5	3
	Peso específico y porcentaje de absorción del agregado grueso	4	0,2	0,6	0,0301	2,5	3
	Peso específico y porcentaje de absorción del agregado fino	4	0,2	0,6	0,0301	2,5	3
	Finura del cemento	4	0,2	0,6	0,0301	2,5	3
	Peso específico del cemento	4	0,2	0,6	0,0301	2,5	3
	Desgaste del agregado grueso	1	0,2	0,15	0,0075	0,6	1
	Pruebas definitivas	Resistencia a compresión	46	0,2	6,9	0,3459	29,2
Resistencia a flexión		46	0,2	6,9	0,3459	29,2	30
N =		<b>133</b>		19,95			<b>91</b>
	n =	<b>84</b>					

**Fuente:** Elaboración propia

En conclusión, el total de ensayos es de 91.

#### **1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo**

Se realizará un muestreo no probabilístico por conveniencia, ya que el total de las probetas que se realizarán, representará el 100% de la muestra la cual se analizará en su totalidad.

### **1.9. Métodos y técnicas empleadas**

#### **1.9.1. Métodos**

Para esta investigación, se utilizó el método de observación directa, la evaluación de los ensayos de caracterización del agregado grueso de concreto reciclado y de las propiedades de resistencia de probetas (cilíndricas y prismáticas) con dicho agregado.

#### **1.9.2. Técnicas**

La técnica esencial fue el uso de la bibliografía y la investigación en campo; siendo la guía el “Manual de especificaciones técnicas generales de la construcción” de 2011 de la ABC, más propiamente el punto 5.14 losa de hormigón; la caracterización de los agregados y los ensayos de resistencia a compresión ASTM C 39 y la resistencia a flexión ASTM C 78.

### **1.10. Procesamiento de la información**

Para el procesamiento de la información se realizó 30 probetas cilíndricas y 30 probetas prismáticas, utilizando agregado grueso de concreto reciclado y un cemento IP-40 en cada caso, según los ensayos de la ASTM C 39 y ASTM C 78, para ello se utilizaron los equipos de laboratorio y el programa Microsoft Excel, así pudiendo presentar los resultados en tablas, gráficos para ser interpretados y evaluados, con lo cual poder dar conclusiones y recomendaciones sobre la correlación que existe entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión usando agregado grueso reciclado.

### **1.11. Alcance de la investigación**

El desarrollo del presente trabajo se enmarca en determinar la correlación entre la resistencia a compresión y resistencia a flexión utilizando un agregado grueso de concreto reciclado en los pavimentos rígidos; este trabajo tiene una importante contribución innovadora que es el uso de un nuevo material como el agregado grueso reciclado, además de ser una forma de reducir la contaminación ambiental que produce la construcción, es

importante tener en cuenta que una de las principales funciones del agregado grueso en la producción de concreto, es aportar una mayor resistencia final a la mezcla.

Además, se realizó la recolección de todos los aspectos generales de los pavimentos rígidos y los parámetros que debe cumplir en una mezcla de concreto y los procedimientos normados de ensayo sobre los agregados, con base en las normas ASTM (Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales)

En cuanto a los agregados se realizó la caracterización de los mismos para obtener sus características físicas y realizar la dosificación para la mezcla así conocer sus propiedades mecánicas y de esa forma poder identificar sus ventajas y desventajas del mismo.

Con la finalidad de hacer la evaluación, se elaboró probetas cilíndricas y probetas prismáticas de una mezcla simple convencional, en la cual se empleó cemento Fancesa IP-40, agregado fino obtenido del banco de préstamo de San Mateo y el agregado grueso de concreto reciclado.

Este trabajo tiene por finalidad establecer la correlación entre las resistencias, la cual esta expresada en una ecuación, con la cual se podrá determinar el valor de la resistencia a flexión usando el valor de la resistencia a compresión.

**CAPÍTULO II**

**ASPECTOS GENERALES**

**DE PAVIMENTO RÍGIDO**

**CON AGREGADO**

**RECICLADO**

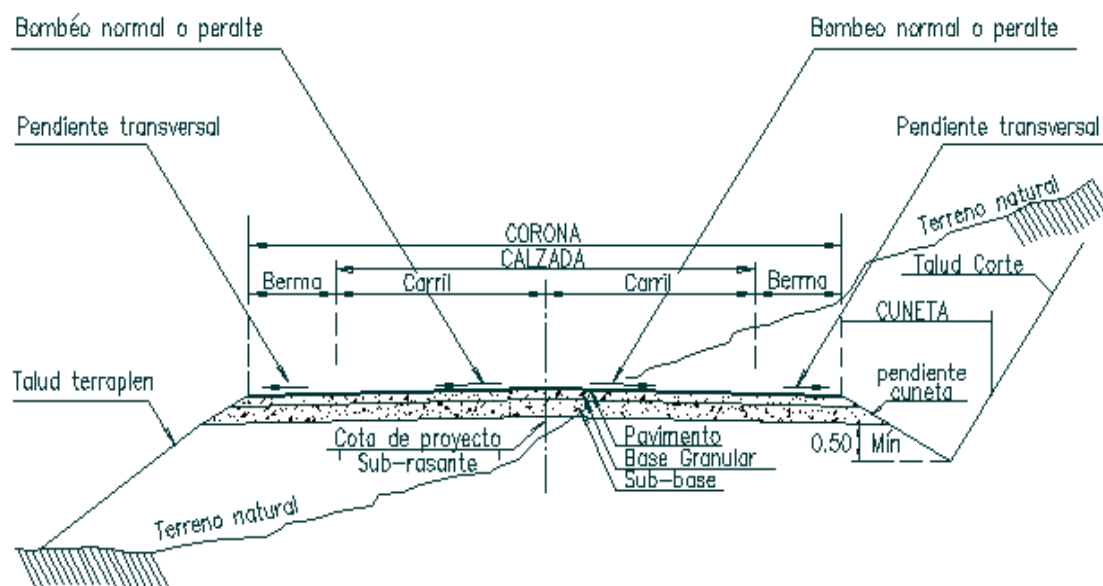
## CAPÍTULO II

### ASPECTOS GENERALES DE PAVIMENTO RÍGIDO CON AGREGADO RECICLADO

#### 2.1. Pavimento

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y constituyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento. (Montejo Fonseca, 1998).

**Figura 1.** Sección típica de un pavimento



**Fuente:** Ulate, J. (2015). Elementos componentes de una calzada. [Figura]. Recuperado de <https://jorgeulatea.blogspot.com>

Un pavimento debe cumplir adecuadamente sus funciones deben reunir los siguientes parámetros:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- Debe ser durable.
- Debe ser económico.
- El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influyen en el entorno, deber ser adecuadamente moderado.
- Deber poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramiento y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito.

Los pavimentos se clasifican en: pavimentos flexibles, semirrígido, rígidos y articulados.

## **2.2. Pavimento rígido**

Son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa, de material seleccionado, la cual se denomina subbase del pavimento rígido.

Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico, así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. Además, como el concreto es capaz de resistir, en ciertos grados, esfuerzos a la tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la subrasante. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento.

### 2.3. Tipos de pavimento de concreto

Los pavimentos de concreto se distinguen por su resistencia y bajo costo de mantenimiento, lo que disminuye su precio total y alarga su ciclo de vida. Aunque se recomiendan sobre todo para carreteras con un alto índice de tráfico, en realidad se pueden diseñar para cualquier tipo de camino e incluso, en pisos industriales.

**Figura 2.** Construcción de pavimento rígido



**Fuente:** CADECOCRUZ. (2018). Pavimento rígido. [Figura]. Recuperado de <https://cadecocruz.org.bo>

Los diversos tipos de pavimentos de concreto pueden ser clasificados, de la siguiente manera:

#### 2.3.1. Pavimentos de concreto simple

##### 2.3.1.1. Sin pasadores

Son pavimentos que no presentan refuerzo de acero ni elementos para transferencia de cargas, ésta se logra a través de la trabazón de los agregados entre las caras agrietadas debajo de las juntas aserradas o formadas. Para que esta transferencia sea efectiva, es necesario que se use un espaciamiento corto entre juntas. (Construneic, 2021).

Están constituidos por losas de dimensiones relativamente pequeñas, en general menores de 6 m de largo y 3,5 m de ancho. Los espesores varían de acuerdo al uso previsto.

Este tipo de pavimento es aplicable en caso de tráfico ligero y clima templado y generalmente se apoyan directamente sobre la subrasante.

#### **2.3.1.2. Con pasadores**

Los pasadores son pequeñas barras de acero liso, que se colocan en la sección transversal del pavimento, en las juntas de contracción. Su función estructural es transmitir las cargas de una losa a la losa contigua, mejorando así las condiciones de deformación en las juntas. De esta manera, se evitan los desplazamientos verticales diferenciales (escalonamientos).

Este tipo de pavimento es recomendable para tráfico diario que exceda los 500 ESALs (ejes simples equivalentes), con espesores de 15 cm o más.

#### **2.3.2. Pavimentos de concreto reforzado con juntas**

Los pavimentos reforzados con juntas contienen además del refuerzo, pasadores para la transferencia de carga en las juntas de contracción. Este refuerzo puede ser en forma de mallas de barras de acero o acero electrosoldado. El objetivo de la armadura es mantener las grietas que pueden llegar a formarse bien unidas, con el fin de permitir una buena transferencia de cargas y de esta manera conseguir que el pavimento se comporte como una unidad estructural.

#### **2.3.3. Pavimentos de concreto con refuerzo continuo**

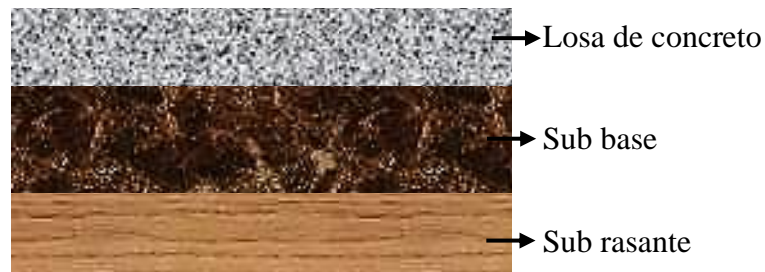
A diferencia de los pavimentos de concreto reforzado con juntas, éstos se construyen sin juntas de contracción, debido a que el refuerzo asume todas las deformaciones, específicamente las de temperatura. El refuerzo principal es el acero longitudinal, el cual se coloca a lo largo de toda la longitud del pavimento. El refuerzo transversal puede no ser requerido para este tipo de pavimentos.



## 2.4. Las capas que conforman el pavimento rígido

Las capas que conforman el pavimento rígido son: subrasante, subbase, y losa o superficie de rodadura como se muestra en la siguiente figura:

**Figura 3.** Capas de pavimento rígido



**Fuente:** Elaboración propia

### 2.4.1. Subrasante

Es la capa sobre la cual se soporta o cimenta la estructura del pavimento (terreno natural de cimentación o de explanación en una vía). Debe soportar en última instancia las cargas producidas por el tránsito, presentar un comportamiento adecuado ante la acción del medio ambiente y suministrar apoyo uniforme a la estructura del pavimento. De la calidad de esta capa depende, en gran parte, el espesor que tendrá un pavimento. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

La función de la subrasante es dar un apoyo razonablemente uniforme, sin cambios bruscos en el valor soporte, es decir, mucho más importante es que la subrasante brinde un apoyo estable a que tenga una alta capacidad de soporte. Por lo tanto, se debe tener mucho cuidado con la expansión de suelos.

Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño.

La subrasante en un pavimento debe satisfacer tres funciones principalmente: soportar un limitado número de vehículos durante la construcción, proveer una apropiada cimentación para compactar las capas de la estructura y proveer un adecuado soporte a las cargas impuestas por el tránsito durante su vida útil (presentar alta resistencia al ahuellamiento y debe tratar de no inducir fatiga en las capas ligadas del pavimento). Adicionalmente, debe

poseer propiedades físicas y químicas que no cambien demasiado en el tiempo. Algunas cualidades deseables en una subrasante son:

- Poseer alta resistencia mecánica.
- Permanencia de la resistencia durante la vida útil del pavimento.
- Alta densidad o grado de compacidad.
- Baja susceptibilidad a cambios volumétricos y al agua.
- Buena trabajabilidad durante la compactación.

Para un diseñador geométrico de vías la subrasante es una línea imaginaria, mientras que para un ingeniero de pavimentos es un material (suelo natural generalmente) que constituye tal vez la principal variable de diseño de pavimentos. En un diseño de pavimento es importante considerar su potencial expansivo y su capacidad portante (expresada a través de su resistencia al corte y/o rigidez bajo carga cíclica). Para dimensionar el pavimento, los diseñadores caracterizan la subrasante ya sea a través de la relación de soporte de California (CBR por sus siglas en inglés), del módulo de reacción de la subrasante (K) o del módulo resiliente (Mr). Dependiendo del tipo de estructura que se diseñe y/o del método empleado, el diseñador deberá utilizar alguno de los parámetros mecánicos mencionados. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

#### **2.4.1.1. CBR (Californian Bearing Ratio)**

Ensayo desarrollado por Stanton y Porter en 1929. En Colombia este ensayo se ejecuta siguiendo los lineamientos especificados por INVIAS (2013a, INV. E-148-13) y basado en AASHTO 193-72. En el ensayo se determina como parámetro mecánico el CBR, el cual es utilizado ampliamente en el diseño de pavimentos. Puede ser determinado in situ y en laboratorio.

En laboratorio, para caracterizar la subrasante, solo se puede determinar el CBR sobre muestras inalteradas, es decir, no es posible cuantificar de manera directa este parámetro mecánico sobre suelos friccionantes o gruesos (p.e., gravas, arenas). Se recomienda su determinación directamente en campo; sin embargo, es un ensayo que pocos laboratorios ejecutan in situ. Por lo anterior, lo que se hace comúnmente, de manera imprecisa, es

correlacionar el CBR con el índice de penetración (PDC) obtenido del ensayo de penetración en cono dinámico a través de ecuaciones.

Este ensayo debe realizarse sobre el suelo en estado saturado para simular su condición más crítica. Por este motivo los especímenes en el laboratorio se sumergen en agua durante cuatro días, con una carga aplicada sobre la superficie de dichos especímenes, la cual representa en teoría la masa de la estructura del pavimento que soporta la subrasante. El CBR mide de manera indirecta en el suelo una resistencia al corte (penetración) y/o una rigidez (esta última propiedad a través de la relación entre una carga y el desplazamiento). (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

**Figura 4.** Prensa CBR mecánica



**Fuente:** ORION. Prensa CBR mecánica anillo de carga. [Figura]. Recuperado de <https://www.orionrcp.com>

Para el diseño de pavimento, por unidad homogénea de suelo, se recomienda como mínimo la realización de cinco ensayos de CBR. La totalidad de los valores del CBR se ordenan de menor a mayor con el fin de determinar el porcentaje de valores iguales o

mayores de cada valor de CBR. Con estos datos se elabora un gráfico de porcentaje de valores iguales o mayores de cada valor de CBR vs. CBR. Con el gráfico se selecciona el valor del percentil de diseño de acuerdo con el número de ejes equivalentes de 8,2 toneladas que circulan en el carril y en el período de diseño (variable tránsito, N). Con base en este percentil se estima el CBR de diseño.

El suelo se puede clasificar de manera subjetiva de acuerdo con el CBR tal como se indica en la tabla:

**Tabla 3.** Clasificación del suelo de acuerdo con el CBR

CBR [%]	Clasificación general	Usos
0 – 3	Muy pobre	Subrasante
3 – 7	Pobre a regular	Subrasante
7 – 20	Regular	Afirmados y subbase
20 – 50	Bueno	Subbase y base
> 50	Excelente	Base

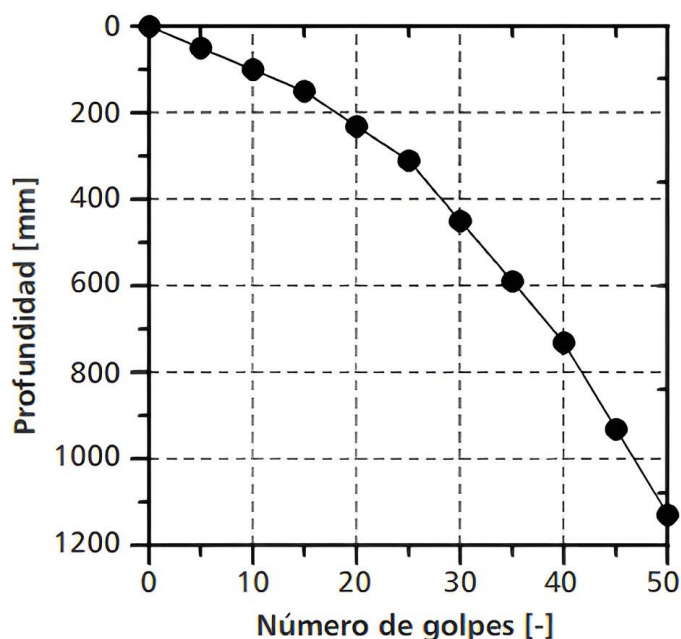
**Fuente:** INVIAS, 1998

#### **2.4.1.2. Penetrómetro dinámico de cono (PDC)**

Este ensayo se ejecuta en campo sobre suelos inalterados o de materiales compactados siguiendo los lineamientos especificados por INVIAS (2013a, INV. E-172-13, ASTM D 6951-09). Este ensayo constituye una herramienta económica y no destructiva para la auscultación y determinación in situ de la capacidad de soporte del suelo. Sin embargo, los autores no recomiendan su utilización para caracterizar subrasantes de pavimentos porque lo consideran un ensayo impreciso. Tal como se mencionó con anterioridad, los valores obtenidos por medio del PDC pueden ser correlacionados con el CBR. En el ensayo, una barra (16 mm de diámetro y 95 cm de largo) con extremo en forma de cono (20 mm de diámetro) penetra a través del suelo bajo la acción de una carga de 8 kg que cae libremente desde una altura constante (57,5 cm).

Este ensayo tiene como limitación principal la alta variabilidad al reportar sus resultados. Incluso laboratoristas diferentes, ejecutando el ensayo sobre el mismo suelo, pueden reportar variaciones del orden de 1,5 a 3 veces. Esto incide negativamente en el cálculo del CBR a través de las ecuaciones.

**Figura 5.** Ejemplo típico de un resultado de un ensayo PDC



**Fuente:** Ing. Hugo Alexander Rondón Quintana; Fredy Alberto Reyes Lizcano. (2015). Pavimentos: materiales, construcción y diseño (Vol. Primera edición). pg. 353

### 2.4.1.3. Prueba de placa

Este ensayo se ejecuta en campo sobre suelos inalterados o sobre materiales compactados siguiendo los lineamientos especificados por INVIAS (2013a, INV. E-168-13) o por AASHTO T-222-66 y ASTM-1196/64. En esta prueba se determina el parámetro K, llamado módulo de reacción de la subrasante, coeficiente de balasto o módulo de Westergaard. Es una prueba que cuantifica de manera indirecta la rigidez bajo carga monotónica de la subrasante. El K es utilizado principalmente para el diseño de pavimentos rígidos.

El ensayo consiste en aplicar sobre la subrasante una fuerza por medio de una placa rígida (de 30 cm de diámetro si el pavimento es para carretera o de 76 cm de diámetro si es para aeropista) y medir el desplazamiento que experimenta dicha placa sobre el suelo. Se efectúan diferentes incrementos de carga, se mide su correspondiente desplazamiento y se elabora la gráfica de presión vs. penetración. K se define como la relación esfuerzo-desplazamiento resultante de aplicar una carga unitaria necesaria para producir una

penetración de la placa en el terreno de 5 mm cuando es un pavimento para carretera y de 13 mm para aeropistas. Es un ensayo costoso, pocos laboratorios lo ejecutan y por tal motivo en la práctica el valor de  $K$  (MPa/m) es correlacionado con el de CBR a través de las ecuaciones. A diferencia del CBR, la penetración del suelo en el ensayo se ejecuta distribuyendo la carga sobre una placa de mayor área. Por lo anterior, este ensayo es usado por lo general en pavimentos rígidos en donde la carga, cuando se induce sobre la subrasante, se distribuye en un área más amplia en comparación a los pavimentos flexibles.

**Figura 6.** Ensayo de placa de carga



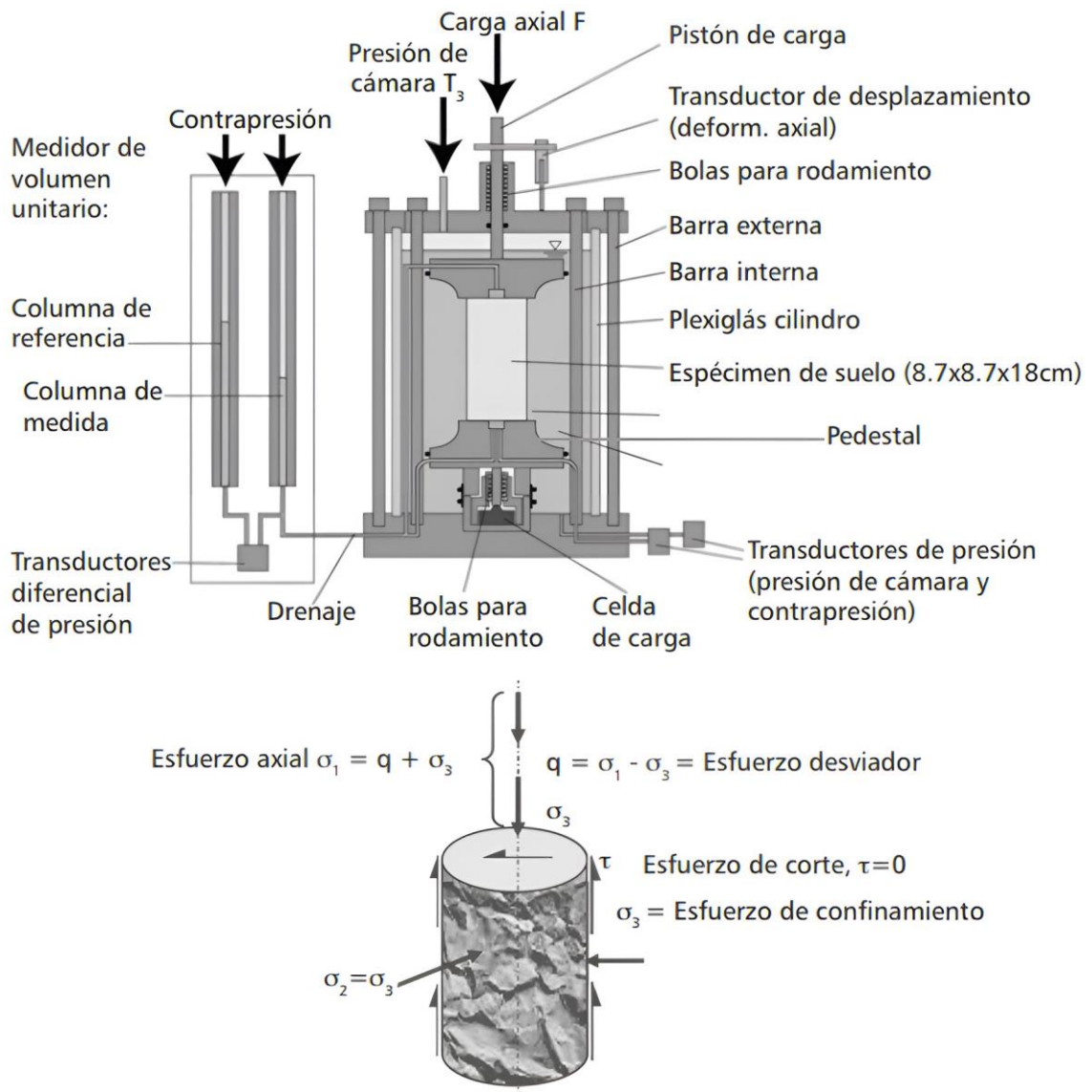
**Fuente:** Wikipedia. (2022). Ensayo de placa de carga. [Figura]. Recuperado de <https://es.wikipedia.org>

#### **2.4.1.4. Módulo resiliente**

Ensayo se ejecuta en laboratorio empleando triaxiales cíclicos sobre suelos inalterados o sobre materiales compactados, siguiendo los lineamientos especificados por INVIAS (2013a, INV. E-156-13, AASHTO T 307-99). El módulo resiliente indica qué tan rígido

es un material bajo carga cíclica del tipo resiliente y es un parámetro de gran importancia cuando el diseño de pavimentos se realiza por métodos racionales. A diferencia de la carga dinámica, la resiliente tiene un tiempo de reposo entre cada una de las cargas cíclicas aplicadas. Para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en un pavimento, al utilizar este parámetro el comportamiento de la subrasante se supone como si fuera un medio elástico lineal.

**Figura 7.** Equipo triaxial cíclico



**Fuente:** Ing. Hugo Alexander Rondón Quintana; Fredy Alberto Reyes Lizcano. (2015).

Pavimentos: materiales, construcción y diseño (Vol. Primera edición). pg. 355

Como en la práctica es de difícil determinación experimental el cálculo de esta variable en la subrasante, ya sea por falta de equipos o de la definición acertada de trayectorias de esfuerzo, lo que se hace tradicionalmente es correlacionarla con el valor del CBR a través de múltiples ecuaciones disponibles en la literatura de referencia. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

En campo, los ensayos de impacto son utilizados para estimar el  $M_r$  de suelos de subrasante. El equipo más utilizado es el FWD (Falling Weight Deflectometer). Para este ensayo se ejecuta siguiendo los lineamientos especificados por ASTM D 4694-09. En el ensayo se genera un pulso de carga haciendo caer una masa, la cual transmite una onda al pavimento o la subrasante por medio de un sistema de amortiguadores elásticos apoyados sobre una placa de carga. En el momento del impacto se mide el desplazamiento o deflexión  $d_r$  en cm que experimenta el pavimento o la subrasante con sensores ubicados en siete puntos localizados a una distancia  $r$  del eje de carga de 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 cm, medida entre el eje de carga del sistema y el sitio de ubicación de cada sensor.

La nueva metodología de diseño mecánico-empírica MEPDG (2004) (la cual reemplaza la guía AASHTO, 1993) menciona que el  $M_r$  debe ser obtenido de tres formas con base en tres niveles de diseño: en el laboratorio, correlacionándolo con otras propiedades del suelo y determinado a partir de valores típicos basados en la clasificación del suelo (Hossain, 2008, 2009).

#### **2.4.2. Subbase**

La capa de subbase es la porción de la estructura del pavimento rígido, que se encuentra entre la subrasante y la losa rígida. Consiste de una o más capas compactas de material granular o estabilizado; la función principal de la subbase es prevenir el bombeo de los suelos de granos finos. La subbase es obligatoria cuando la combinación de suelos, agua, y tráfico pueden generar el bombeo. Tales condiciones se presentan con frecuencia en el diseño de pavimentos para vías principales y de tránsito pesado.

Cumple una cuestión de economía ya que nos ahorra dinero al poder transformar un cierto espesor de la capa de base a un espesor equivalente de material de subbase (no siempre se emplea en el pavimento), impide que el agua de las terracerías ascienda por capilaridad y



evitar que el pavimento sea absorbido por la subrasante. Deberá transmitir en forma adecuada los esfuerzos a las terracerías. Algunas de las funciones que cumple, son:

- La función más importante es impedir la acción del bombeo en las juntas, grietas y extremos del pavimento. Se entiende por bombeo a la fluencia de materiales finos con agua fuera de la estructura del pavimento, debido a la infiltración de agua por las juntas de las losas. El agua que penetra a través de las juntas licua el suelo fino de la subrasante facilitando así su evacuación a la superficie bajo la presión ejercida por las cargas circulantes a través de las losas.
- Servir como capa de transición y suministrar un apoyo uniforme, estable y permanente del pavimento.
- Facilitar los trabajos de pavimento.
- Mejorar el drenaje y reducción por tanto al mínimo la acumulación de agua bajo el pavimento.
- Ayudar a controlar los cambios volumétricos de la subrasante y disminuir al mínimo la acción superficial de tales cambios volumétricos sobre el pavimento.

### **2.4.3. Losa**

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante, dado que no usan capa de base.

La losa es de concreto de cemento portland. El factor mínimo de cemento debe determinarse en base a ensayos de laboratorio y por experiencia previas de resistencia y durabilidad. Se deberá usar concreto con aire incorporado donde sea necesario proporcionar resistencia al deterioro superficial debido al hielo-deshielo, a las sales o para mejorar la trabajabilidad de la mezcla.

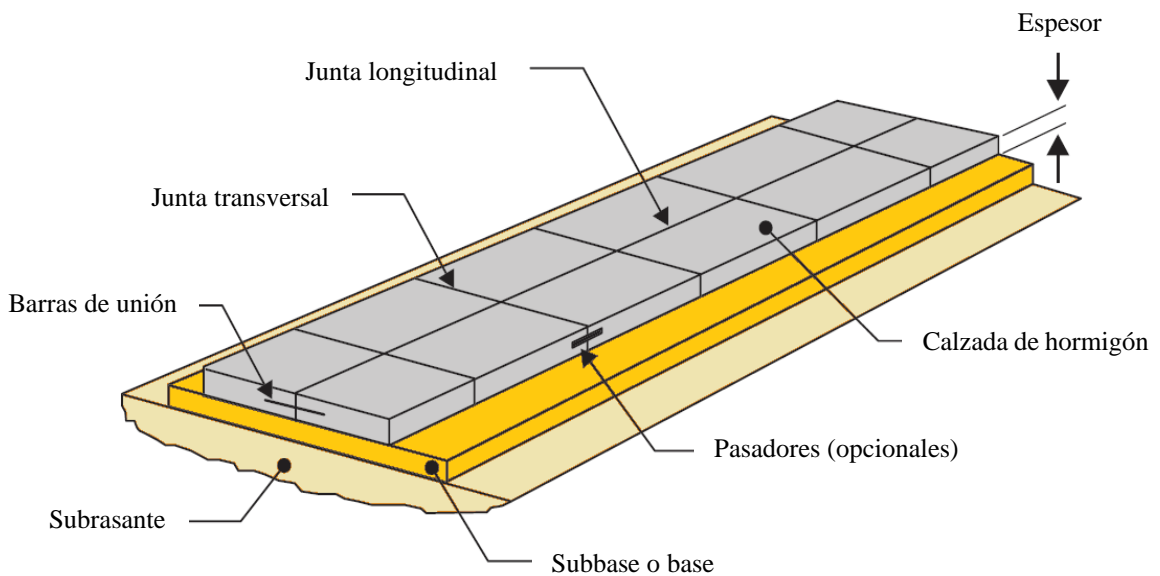
En este tipo de pavimentos la losa de concreto hidráulico cumple dos roles: uno funcional al proveer una superficie cómoda y segura para los usuarios y otro rol estructural al disipar la mayoría de los esfuerzos inducidos por el tránsito.

## 2.5. Juntas

La función de las juntas consiste en mantener las tensiones de la losa provocadas por la contracción y expansión del pavimento dentro de los valores admisibles del concreto; o disipar tensiones debidas a agrietamientos inducidos debajo de las mismas losas. Son muy importantes para garantizar la duración de la estructura, siendo una de las pautas para calificar la bondad de un pavimento. Por otro lado, deben ser rellenadas con materiales apropiados, utilizando técnicas constructivas específicas. En consecuencia, la conservación y oportuna reparación de las fallas en las juntas son decisivas para la vida útil de un pavimento.

De acuerdo a su ubicación respecto de la dirección principal o eje del pavimento, se denominan como longitudinales y transversales. Según la función que cumplen se les denomina de contracción, articulación, construcción expansión y aislamiento. Según la forma, se les denomina, rectas, machimbradas y acanaladas.

**Figura 8.** Estructura tipo de un pavimento rígido



**Fuente:** Yepes, V. (2023). Pavimentos de hormigón en masa con juntas para carreteras.

[Figura]. Recuperado de <https://victoryepes.blogs.upv.es>

### **2.5.1. Juntas de contracción**

Son también juntas de alabeo, es decir, controlan las grietas causadas por la retracción del fraguado del concreto y por el alabeo del pavimento. (Montejo Fonseca, 1998).

Se emplea para reducir la tensión causada por la curvatura y el alabeo de losas. Los pasadores se pueden usar en las juntas de contracción para la transferencia de cargas, bajo ciertas condiciones. Sin embargo, se espera que la transferencia de cargas se logre mediante la trabazón entre los agregados.

### **2.5.2. Juntas de construcción**

Las juntas de construcción separan construcciones contiguas colocadas en diferentes momentos, tales como la colocación al final del día o entre fajas de pavimentación. La transferencia de cargas se logra mediante el empleo de pasadores. Pueden ser transversales o longitudinales.

### **2.5.3. Juntas de expansión o aislación**

Se usan para aislar pavimentos que se interceptan con la finalidad de disminuir los esfuerzos de compresión en éstos, cuando se expanden por el aumento de temperatura. También se utilizan para aislar estructuras existentes.

## **2.6. Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos**

El método de diseño AASHTO, originalmente conocido como AASHO, fue desarrollado en los Estados Unidos en la década de los 60, basándose en un ensayo a escala real realizado durante 2 años en el estado de Illinois, con el fin de desarrollar tablas, gráficos y fórmulas que representen las relaciones deterioro-solicitación de las distintas secciones ensayadas.

A partir de la versión del año 1986, y su correspondiente versión mejorada de 1993, el método AASHTO comenzó a introducir conceptos mecanicistas para adecuar algunos parámetros a condiciones diferentes a las que imperaron en el lugar del ensayo original.

El método AASHTO, porque a diferencia de otros métodos, este método introduce el concepto de serviciabilidad en el diseño de pavimentos como una medida de su capacidad para brindar una superficie lisa y suave al usuario.

En algunos países europeos actualmente se aplican soluciones por medio de secciones normalizadas (de catálogo). Para ello se toma en cuenta el tipo de tránsito y las características de los suelos de apoyo, así como las propiedades de los materiales de construcción de las diferentes capas. (Salazar Rodriguez, 1997).

### 2.6.1. Factores de diseño

El diseño del pavimento rígido involucra el análisis de diversos factores: tráfico, drenaje, clima, características de los suelos, capacidad de transferencia de carga, nivel de serviciabilidad deseado, y el grado de confiabilidad al que se desea efectuar el diseño acorde con el grado de importancia de la carretera. Todos estos factores son necesarios para predecir un comportamiento confiable de la estructura del pavimento y evitar que el daño del pavimento alcance el nivel de colapso durante su vida en servicio.

La ecuación fundamental AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos es:

$$\log(W_{18}) = Z_R * S_0 + 7,35 * \log(D + 1) - 0,06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4,5 - 1,5}\right)}{1 + \frac{1,624 * 10^7}{(D + 1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 * Pt) * \log\left(\frac{MR * Cd * (D^{0,75} - 1,132)}{215,63 * J * \left(D^{0,75} - \frac{18,42}{\left(\frac{E_c}{K}\right)^{0,25}}\right)}\right)$$

Donde:

W18 = Número de cargas de 18 kips (80 kN) previstas.

ZR = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada, para una confiabilidad R.

S<sub>0</sub> = Desvío estándar de todas las variables.

D = Espesor de la losa del pavimento en pulg.

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño.

P<sub>t</sub> = Serviciabilidad final.

S<sub>c</sub> = Módulo de rotura del concreto en psi.

J = Coeficiente de transferencia de carga.

Cd = Coeficiente de drenaje.

EC = Módulo de elasticidad del concreto, en psi.

K = Módulo de reacción de la subrasante (coeficiente de balastro), en pci (psi/pulg).

## 2.6.2. Variables de diseño

### 2.6.2.1. Variables de tiempo

Se consideran dos variables: período de análisis y vida útil del pavimento. La vida útil se refiere al tiempo transcurrido entre la puesta en operación del camino y el momento en el que el pavimento requiera rehabilitarse, es decir, cuando éste alcanza un grado de serviciabilidad mínimo. El período de análisis se refiere al período de tiempo para el cual va a ser conducido el análisis, es decir, el tiempo que puede ser cubierto por cualquier estrategia de diseño. Para el caso en el que no se considere rehabilitaciones, el período de análisis es igual al período de vida útil; pero si se considera una planificación por etapas, es decir, una estructura de pavimento seguida por una o más operaciones de rehabilitación, el período de análisis comprende varios períodos de vida útil, el del pavimento y el de los distintos refuerzos.

Para efectos de diseño se considera el período de vida útil, mientras que el período de análisis se utiliza para la comparación de alternativas de diseño, es decir, para el análisis económico del proyecto.

**Tabla 4.** Períodos de análisis

Clasificación de la vía	Periodo de análisis (años)
Urbana de alto volumen de tráfico	30 – 50
Rural de alto volumen de tráfico	20 – 50
Pavimentada de bajo volumen de tráfico	15 – 25
No pavimentada de bajo volumen de tráfico	10 – 20

**Fuente:** Ing. Oscar V. Cordo. (2006). Manual de Diseño de Pavimentos en Base al Método AASHTO - 93 (Vol. Tercera edición). pg. 170

### 2.6.2.2. Tránsito

En el método AASHTO los pavimentos se proyectan para que éstos resistan determinado número de cargas durante su vida útil. El tránsito está compuesto por vehículos de diferente peso y número de ejes que producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, lo cual origina distintas fallas en éste. Para tener en cuenta esta diferencia, el tránsito se transforma a un número de cargas por eje simple equivalente de 18 kips (80 kN) o ESAL (Equivalent Single Axle Load), de tal manera que el efecto dañino de cualquier eje pueda ser representado por un número de cargas por eje simple.

### 2.6.2.3. Confiabilidad y desviación estándar

Tiene el mismo significado que para pavimentos flexibles, es decir que se refiere al grado de certidumbre de que un dado diseño puede llegar al fin de su período de análisis en buenas condiciones. En cuanto al desvío estándar de las variables,  $S_0$ , se recomienda para pavimentos rígidos un valor de 0,34 para el caso en que se considere la varianza del tránsito futuro y  $S_0 = 0,39$  para el caso en que ésta no esté considerada. En la siguiente tabla se muestra un resumen de valores de  $Z_R$  en función al valor de confiabilidad:

**Tabla 5.** Niveles de confiabilidad

Tipo de camino	Zona urbana	Zona rural
Rutas interestatales y autopistas	85 – 99,9	80 – 99,9
Arterias principales	80 – 99	75 – 99
Colectoras	80 – 95	75 – 95
Locales	50 – 80	50 – 80

**Fuente:** Ing. Oscar V. Cordo. (2006). Manual de Diseño de Pavimentos en Base al Método AASHTO - 93 (Vol. Tercera edición). pg. 196

**Tabla 6.** Relación de confiabilidad y el valor de  $Z_R$

Confiabilidad R, %	Desviación normal estándar $Z_R$
50	0,000
60	0,253
70	0,524
75	0,674
80	0,841
85	1,037
90	1,282
91	1,340
92	1,405
93	1,476
94	1,555
95	1,645
96	1,751
97	1,881
98	2,054
99	2,327
99,9	3,090
99,99	3,750

**Fuente:** Ing. Oscar V. Cordo. (2006). Manual de Diseño de Pavimentos en Base al Método AASHTO - 93 (Vol. Tercera edición). pg. 196

### **2.6.3. Criterios de comportamiento**

#### **2.6.3.1. Serviciabilidad**

La serviciabilidad se usa como una medida del comportamiento del pavimento, la misma que se relaciona con la seguridad y comodidad que puede brindar al usuario (comportamiento funcional), cuando éste circula por la vialidad. También se relaciona con las características físicas que puede presentar el pavimento como grietas, fallas, peladuras, etc., que podrían afectar la capacidad de soporte de la estructura (comportamiento estructural).

El concepto de serviciabilidad está basado en cinco aspectos fundamentales resumidos como sigue:

- Las carreteras están hechas para el confort y conveniencia del público usuario.
- El confort, o calidad de la transitabilidad, es materia de una respuesta subjetiva de la opinión del usuario.
- La serviciabilidad puede ser expresada por medio de la calificación hecha por los usuarios de la carretera y se denomina la calificación de la serviciabilidad.
- Existen características físicas de un pavimento que pueden ser medidas objetivamente y que pueden relacionarse a las evaluaciones subjetivas. Este procedimiento produce un índice de serviciabilidad objetivo.
- El comportamiento puede representarse por la historia de la serviciabilidad del pavimento.

Cuando el conductor circula por primera vez o en repetidas ocasiones sobre una vialidad, experimenta la sensación de seguridad o inseguridad dependiendo de lo que ve y del grado de dificultad para controlar el vehículo. El principal factor asociado a la seguridad y comodidad del usuario es la calidad de rodamiento que depende de la regularidad o rugosidad superficial. del pavimento. La valoración de este parámetro define el concepto de Índice de Serviciabilidad Presente (PSI, por sus siglas en ingles).

El PSI califica a la superficie del pavimento de acuerdo a una escala de valores de 0 a 5. Claro está, que, si el usuario observa agrietamientos o deterioros sobre la superficie del camino aún sin apreciar deformaciones, la clasificación decrece.

El diseño estructural basado en la serviciabilidad, considera necesario determinar el índice de serviciabilidad inicial ( $P_o$ ) y el índice de serviciabilidad final ( $P_t$ ), para la vida útil o de diseño del pavimento.

Los valores recomendados son los que se obtuvieron en el AASHO Road Test:

Serviciabilidad inicial:

$P_o = 4,5$  para pavimentos rígidos

$P_o = 4,2$  para pavimentos flexibles

Serviciabilidad final:

$P_t = 2,5$  o más para caminos muy importantes



$P_t = 2,0$  para caminos de menor tránsito

Es importante considerar además que estos valores significan un buen acabado de construcción, si el trabajo se va a realizar con herramientas manuales o equipos gastados es probable que el pavimento nuevo no alcance los niveles de serviciabilidad establecidos y por tanto dure menos. (Salazar Rodriguez, 1997).

La pérdida de serviciabilidad se define como la diferencia entre el índice de servicio inicial y terminal.

$$\Delta\text{PSI} = P_o - P_t$$

Los factores que influyen mayormente en la pérdida de serviciabilidad de un pavimento son: tráfico, medio ambiente y edad del pavimento. Los efectos que causan estos factores en el comportamiento del pavimento han sido considerados en este método. El factor edad (tiempo) no está claramente definido. Sin embargo, en la mayoría de los casos es un factor negativo neto que contribuye a la reducción de la serviciabilidad. El efecto del medio ambiente considera situaciones donde se encuentran arcillas expansivas o levantamientos por helada. Así, el cambio total en el PSI en cualquier momento puede ser obtenido sumando los efectos dañinos del tráfico, arcillas expansivas y/o levantamientos por helada.

#### **2.6.4. Propiedades de los materiales**

##### **2.6.4.1. Módulo de reacción de la subrasante (K)**

Este factor nos da idea de cuánto se asienta la subrasante cuando se le aplica un esfuerzo de compresión. Numéricamente, es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada sobre un área de carga, dividido por la deflexión en pulgadas para esa carga. Los valores de K son expresados como libras por pulgada cuadrada por pulgada (pci).

Puesto que la prueba de carga sobre placa, requiere tiempo y es costosa, el valor de K es estimado generalmente por correlación con otros ensayos simples, tal como la razón de soporte california (CBR) o las pruebas de valores R. El resultado es válido porque no se requiere la determinación exacta del valor K; las variaciones normales para un valor estimado no afectarán apreciablemente los requerimientos de espesores del pavimento.

#### **2.6.4.2. Módulo de rotura del concreto**

Es un parámetro muy importante como variable de entrada para el diseño de pavimentos rígidos, ya que va a controlar el agrietamiento por fatiga del pavimento, originado por las cargas repetitivas de camiones. Se le conoce también como resistencia a la tracción del concreto por flexión.

El módulo de rotura requerido por el procedimiento de diseño es el valor medio determinado después de 28 días utilizando el ensayo de carga en los tercios. De esta manera, se obtiene en el tercio medio una zona sometida a un momento flector constante igual a  $PL/3$  y la rotura se producirá en cualquier punto de este tercio medio con la única condición que exista allí una debilidad. Este ensayo es recomendable frente al ensayo de carga en el punto medio, en el cuál la rotura se producirá indefectiblemente en dicho punto (punto de aplicación de la carga) donde el momento flector es máximo.

Los ensayos con carga al tercio alcanzan un 80% del valor que dan los realizados en el punto medio.

Hay distintas correlaciones entre las resistencias del hormigón como las que se aprecian a continuación, sin embargo, su uso no es recomendable puesto que la resistencia a la flexión es susceptible a un sinnúmero de variables como ser el tipo de cemento, de agregados, la granulometría y dureza de los agregados, inclusive la limpieza del agregado grueso es muy importante, así como el uso de aditivos, por este motivo, es recomendable que siempre se desarrollen correlaciones en base a los datos reales de campo y no se deriven de otros proyectos. (Salazar Rodriguez, 1997).

#### **2.6.4.3. Módulo de elasticidad del concreto**

Es un parámetro que indica la rigidez y la capacidad de distribuir cargas que tiene una losa de pavimento. Es la relación entre la tensión y la deformación. Las deflexiones, curvaturas y tensiones están directamente relacionadas con el módulo de elasticidad del concreto. En los pavimentos de concreto armado continuo, el módulo de elasticidad junto con el coeficiente de expansión térmica y el de contracción del concreto, son los que rigen el estado de tensiones en la armadura.

## **2.6.5. Características estructurales**

### **2.6.5.1. Drenaje**

El proceso mediante el cual el agua de infiltración superficial o agua de filtración subterránea es removida de los suelos y rocas por medios naturales o artificiales, se llama drenaje. El drenaje es uno de los factores más importantes en el diseño de pavimentos.

El agua es el causante principal del deterioro de la estructura del pavimento, porque origina muchos efectos devastadores en él; siendo el peor, la pérdida de soporte del pavimento.

Para minimizar los efectos del agua sobre los pavimentos se debe:

- Prevenir el ingreso del agua al pavimento (drenaje superficial).
- Proveer de un drenaje para remover el agua rápidamente (drenaje subterráneo).
- Construir un pavimento suficientemente fuerte para resistir el efecto combinado de carga y agua.

Como es imposible impedir el ingreso del agua a la estructura del pavimento; es necesario la construcción de un sistema de subdrenaje que permita remover rápidamente esta agua. En la actualidad se están utilizando subbases altamente permeables y drenes laterales para evacuar rápidamente el agua.

Los materiales de drenaje incluyen: agregados, geotextiles y tuberías. Los agregados se usan como capas de drenaje y drenes franceses o como material de filtro para sus protecciones. Los geotextiles son usados para reemplazar agregados como filtros. Las tuberías pueden ser perforadas, ranuradas o de junta abierta, siendo colocadas dentro de los drenes franceses para recolectar agua.

Un buen drenaje aumenta la capacidad portante de la subrasante (el módulo resiliente aumenta cuando baja el contenido de humedad), mejorando la calidad del camino y permitiendo el uso de capas más delgadas. (Salazar Rodriguez, 1997).

**Tabla 7.** Coeficiente de drenaje para pavimentos rígidos

Calidad de drenaje	% de tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación			
	< 1 %	1 – 5 %	5 – 25 %	> 25 %
Excelente	1,25 – 1,20	1,20 – 1,15	1,15 – 1,10	1,10
Bueno	1,20 – 1,15	1,15 – 1,10	1,10 – 1,00	1,00
Regular	1,15 – 1,10	1,10 – 1,00	1,00 – 0,90	0,90
Pobre	1,10 – 1,00	1,00 – 0,90	0,90 – 0,80	0,80
Muy pobre	1,00 – 0,90	0,90 – 0,80	0,80 – 0,70	0,70

**Fuente:** Ing. Oscar V. Cordo. (2006). Manual de Diseño de Pavimentos en Base al Método AASHTO - 93 (Vol. Tercera edición). pg. 149

#### **2.6.5.2. Transferencia de carga**

Las cargas de tránsito deben ser transmitidas de una manera eficiente de una losa a la siguiente para minimizar las deflexiones en las juntas. Las deflexiones excesivas producen bombeo de la subbase y posteriormente rotura de la losa de concreto.

El mecanismo de transferencia de carga en la junta transversal entre losa y losa se lleva a efecto de las siguientes maneras:

- Junta con dispositivos de transferencia de carga (pasadores de varilla lisa de acero) con o sin malla de refuerzo por temperatura.
- Losa vaciada monolíticamente con refuerzo continuo, (acero de refuerzo de varilla corrugada armada en ambas direcciones) no se establece virtualmente la junta transversal, tomándose en cuenta para el cálculo del acero estructural la remota aparición de grietas transversales.
- Junta transversal provocada por aserrado cuya transferencia de carga se lleva a efecto a través de la trabazón entre los agregados.

Por otra parte, la capacidad de transferencia de cargas en el sentido transversal tiene una importante influencia desde el punto de vista del diseño, de manera que, en sentido transversal, el uso de bermas de hormigón atadas, o sobreanchos (losas con parte de la berma maciza incorporada), tiene un efecto positivo en la reducción de esfuerzos en las

losas. De acuerdo con estudios de deflexión elaborados por la American Concrete Pavement Association (ACPA), si se carga una losa sin barras pasa juntas en una esquina, se producirá una deflexión 5 veces mayor que si la carga se colocara en el centro de la losa. Esta misma deflexión sería 3 veces mayor si la esquina estuviera vinculada con la losa adyacente mediante barras pasa juntas. Este estudio muestra la importancia de utilizar sobrecanchos y barras pasa juntas para tráficos pesados puesto que puede reducirse notablemente los esfuerzos de tensión en bordes y esquinas o bien optimizar el diseño reduciendo los espesores de diseño. (Salazar Rodriguez, 1997).

Como se ha indicado, el desempeño de un pavimento mejora con la adición de barras pasa juntas y sobrecanchos, factores que se toman en cuenta en el diseño a través del “coeficiente de transferencia de carga (J)” que permite considerar el apoyo lateral provisto en las esquinas de la losa; los dispositivos de transferencia de cargas; interacción de agregados, y la presencia de bermas de hormigón vinculadas. Coeficientes de transferencia de carga más altos corresponden a menor soporte.

Como una guía general para el rango de coeficientes de carga, mayores coeficientes deben ser usados con valores bajos de K; altos coeficientes térmicos y mayores variaciones de temperatura. La siguiente tabla provee recomendaciones para la selección de coeficientes de transferencia de carga:

**Tabla 8.** Coeficientes de transferencia de cargas

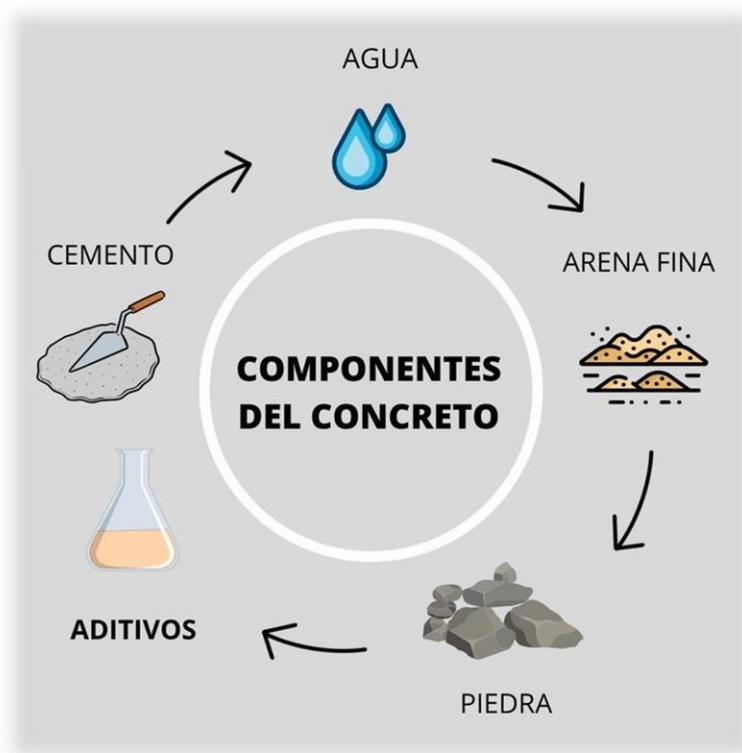
Tipo de pavimento	Berma de asfalto		Berma de Ho. vinculada	
	Disp. de transferencia		Disp. de transferencia	
	si	no	si	no
Junta sencilla y junta reforzada	3,2	3,8 – 4,4	2,5 – 3,1	3,6 – 4,2
Continuamente reforzada	2,9 – 3,2	N/D	N/D	N/D

**Fuente:** Ing. Oscar V. Cordo. (2006). Manual de Diseño de Pavimentos en Base al Método AASHTO - 93 (Vol. Tercera edición). pg. 199

## 2.7. Concreto

El concreto (hormigón) es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada, piedra machacada, pedrejón), creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua. Otros materiales cementantes (cementicios, cementosos) y adiciones minerales se pueden incluir en la pasta. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

**Figura 9.** Composición de un concreto



**Fuente:** Quispe, D. (2022). Especificaciones de los componentes de concreto. [Figura].

Recuperado de <https://es.slideshare.net>

Generalmente los agregados (áridos) se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos pueden ser arena natural o artificial (manufacturadas) con partículas de hasta 9,5 mm (3/8 pulg); agregados gruesos son las partículas retenidas en la malla 1,18 mm (tamiz no.16) y pueden llegar hasta 150 mm (6 pulg). El tamaño máximo del agregado

grueso comúnmente empleado es 19 mm o 25 mm (3/4 pulg o 1 pulg). Un agregado de tamaño intermedio, cerca de 9,5 mm (3/8 pulg) es, algunas veces, adicionado para mejorar la granulometría general del agregado.

La pasta se compone de materiales cementantes, agua y aire atrapado o aire incluido (intencionalmente incorporado). La pasta constituye aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del concreto. El volumen absoluto del cemento está normalmente entre 7% y 15% y el volumen del agua está entre 14% y 21%. El contenido de aire atrapado varía del 4% hasta 8% del volumen.

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es muy importante. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar deterioro del concreto. La granulometría continua de tamaños de partículas es deseable para el uso eficiente de la pasta. A lo largo de este texto, se asumirá que se usan agregados apropiados, a menos que se señale de otra manera.

### **2.7.1. Cemento**

En los primeros años del siglo diecinueve, el Británico Joseph Aspdin fue el primero en obtener una patente para fabricar un cemento a base del calentamiento de una mezcla de caliza finamente molida y arcilla, cuyo producto en polvo se endurecía al mezclarse con agua. Dicho producto fue nombrado “Cemento Portland” debido a su similitud con las rocas que se encuentran en la Isla de Portland. (Sanjuan Barbudo & Chinchón Yepes, 2014).

Lo anterior fue el inicio de la industria de los cementos hidráulicos, la que ha ido perfeccionando sus procesos de producción y mejorando la selección de los materiales necesarios para su fabricación, de tal manera que el producto cementante cumpla ciertas características químicas y físicas a partir de un cuidadoso control de calidad.

### **2.7.1.1. Cementos hidráulicos**

Son todos aquellos conglomerados que, amasados con el agua, fraguan y endurecen, tanto expuestos al aire como sumergido en agua, presentando un proceso de reacción química que se conoce como hidratación.

El cemento Portland, se fabrica a partir de materiales minerales calcáreos tales como la caliza y materiales arcillosos con alto contenido de alúmina y sílice.

Con frecuencia es necesario adicionar productos como el óxido de hierro para mejorar la composición química de las materias primas principales. La mezcla de materias primas ha de hacerse de tal forma que cada uno de los componentes químicos básicos, se encuentren en proporciones previamente fijadas. El clínker que se obtiene calcinando la mezcla cruda, deberá poseer una cantidad correcta de los minerales fundamentales, es decir; de silicato tricálcico (C3S), silicato dicálcico (C2S), aluminato tricálcico (C3A) y aluminoferrito tetracálcico (C4AF).

En términos prácticos, se concede que los silicatos de calcio son los componentes más deseables, porque al hidratarse son los responsables de la resistencia mecánica y otras propiedades del concreto. El aluminato tricálcico es el compuesto que se hidrata con mayor rapidez, por lo que propicia mayor velocidad en el fraguado y en el desarrollo del calor de hidratación en el concreto. El aluminoferrito tetracálcico es un compuesto relativamente inactivo, pues contribuye poco a la resistencia del concreto.

Otro aspecto importante relativo a la composición química del clínker, se refiere a los álcalis, óxidos de sodio y potasio, cuyo contenido suele limitarse para evitar reacciones dañinas con ciertos agregados en el concreto (esto ha dado motivo para el establecimiento de un requisito químico opcional, aplicable a todos los tipos de cemento Portland, que consiste en ajustar el contenido de álcalis totales, expresado como  $\text{Na}_2\text{O}$ , a un máximo de 0,60 % cuando se requiere emplear el cemento junto con agregados reactivos).

Al obtener el clínker, éste se enfría y se tritura hasta lograr un polvo fino, el cual es mezclado con yeso para tener como producto final el cemento Portland. En algunos casos, además del yeso, se suman otros materiales con características especiales como por ejemplo puzolanas, que son materiales eminentemente sílico-aluminosos, que carecen de



toda actividad hidráulica y propiedades cementantes por sí solos, conteniendo constituyentes que a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, se combinan con el hidróxido de calcio para formar compuestos permanentemente insolubles en agua y estables, los que se comportan como conglomerantes hidráulicos.

**Figura 10.** Cemento



**Fuente:** FANCESA. (2021). Productos. [Figura]. Recuperado de <https://www.fancesa.com>

### **2.7.1.2. Principales características físicas de los cementos**

A pesar de que el cemento representa solamente entre 6% y 15% en peso de la mezcla, sus propiedades influyen grandemente en el comportamiento del mismo en cuanto a trabajabilidad y resistencia.

Algunas de las propiedades físicas importantes de este material cementante son las presentadas a continuación:

### 2.7.1.2.1. Finura

Es una de las propiedades más importantes del cemento, ya que ella determina en gran medida la velocidad de hidratación, el desarrollo del calor de hidratación, la retracción y la adquisición de resistencia del cemento. Un cemento con grano fino se hidrata con mucha más facilidad. Este parámetro se determina mediante un método indirecto con el aparato de Blaine, que consiste en medir el tiempo necesario para atravesar una cantidad de aire en una muestra de densidad conocida. Se denomina superficie específica y se expresa en  $\text{cm}^2/\text{gr}$ . La norma técnica colombiana que rige este ensayo es la NTC 33. La cámara de permeabilidad se conecta al manómetro, verificando que haya una conexión hermética. El aire contenido en el brazo del manómetro que tiene las marcas se elimina lentamente hasta que el líquido alcance la marca más alta, luego se cierra la válvula herméticamente. (Silba, 2018).

**Figura 11.** Finura de cemento



**Fuente:** NAN ARQUITECTURA. (2023). Qué es el cemento Portland y para qué sirve. [Figura]. Recuperado de <https://nanarquitectura.com>

### 2.7.1.2.2. Hidratación

Es la reacción que se produce entre el agua y los componentes del cemento. Los factores determinantes en este proceso son el clínker, yeso, finura, temperatura y cantidad de agua.

**Figura 12.** Hidratación del cemento



**Fuente:** Itacamba Cemento. (2018). Hidratación del cemento: La importancia del tiempo de reacción. [Figura]. Recuperado de <https://www.itacamba.com>

### 2.7.1.2.3. Tiempo de fraguado

Se refiere al cambio que sufre la pasta de cemento del estado fluido al estado rígido. Dicho valor es un índice del rango en el cual la reacción de hidratación está ocurriendo y se desarrolla la resistencia. Los productos formados por la hidratación constituyen un gel formando inicialmente una pasta más o menos fluida o plástica. El fraguado se produce en dos fases:

- **Fraguado inicial:** Se da cuando la masa empieza a perder plasticidad, aun cuando incluso se nota cierta consolidación.
- **Fraguado final:** Cuando por sí solo y sin que se someta la pasta a presiones o cargas, esta conserva su forma.

**Figura 13.** Fraguado del cemento



**Fuente:** Pérez, F. (2023). Qué son los fraguados en construcción. [Figura]. Recuperado de <https://cementostorices.com>

#### **2.7.1.2.4. Resistencia mecánica**

La resistencia del mortero o el concreto endurecido, esta con relación a las características del cemento usado. Dicha propiedad se determina a través de la resistencia a la compresión en cubos de mortero preparados, usando una arena de graduación estandarizada.

Clasificación de los cementos en función del desarrollo de su resistencia: Alta resistencia inicial: en 72 horas alcanzan valores superiores a 4000 psi.

#### **2.7.1.2.5. Endurecimiento**

- Endurecimiento rápido: son los que, teniendo una resistencia considerable a 28 días, a la edad de 3 días han desarrollado al menos un 60% de su resistencia.
- Endurecimiento lento: hasta los 7 días su crecimiento es lento, luego incrementa rápidamente, pero de manera especial de los 28 a 90 días.



**Figura 14.** Endurecimiento del cemento



**Fuente:** BECOSAN. (2021). Hormigón endurecido. [Figura]. Recuperado de <https://www.becosan.com>

### **2.7.1.3. Cementantes del concreto hidráulico**

Los cementantes que se utilizan para la fabricación del concreto son hidráulicos, es decir, fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, aun estando inmersos en ella, característica que los distingue de los cementantes aéreos que solamente fraguan y endurecen en contacto con el aire. (Sanjuan Barbudo & Chinchón Yepes, 2014).

Los principales cementantes hidráulicos son las cales y cementos hidráulicos, algunas escorias y ciertos materiales con propiedades puzolánicas. De acuerdo con el grado de poder cementante y los requerimientos específicos de las aplicaciones, estos cementantes pueden utilizarse en forma individual o combinados entre sí. Al referirse específicamente al concreto convencional, como se emplea en la construcción, resultan excluidas las cales hidráulicas, por lo cual, sólo procede considerar los cementos, las escorias, los materiales puzolánicos y sus respectivas combinaciones. Por otra parte, bajo la denominación genérica de cementos hidráulicos, existen diversas clases de cemento con diferente composición y propiedades, entre los cuales tenemos los siguientes:

- **Cementos Pórtland:** Son cementos que se obtienen por molienda conjunta de clínker y de la cantidad adecuada del regulador de fraguado.

- Cementos Portland con adiciones hidráulicamente activas: Son los cementos que se obtienen por molienda conjunta de clínker de cemento Portland y regulador del fraguado, en proporción igual o superior al 80% en peso, y escoria siderúrgica, puzolana o ambas en proporción igual o menor al 20% en peso.
- Cementos puzolánicos: Son los cementos que se obtienen por la molienda conjunta de clínker de cemento Portland y regulador del fraguado, en proporción inferior al 80% en peso y puzolana en proporción superior al 20% en peso.
- Cementos aluminosos: Son los cementos que se obtienen por la molienda de un clínker muy rico en aluminio.
- Cementos de mampostería: Son los cementos que se obtienen por la molienda de clínker de cemento Portland y regulador del fraguado con o sin adiciones hidráulicamente activas en proporción igual o superior al 60% en peso; y materiales plastificantes, tales como caliza o cal hidratada y otros materiales que mejoren una o más propiedades tales como la trabajabilidad, la retención de agua y el contenido de aire del mortero.
- Cementos blancos: Son cementos que, perteneciendo a los tipos de Portland o compuestos, presentan como propiedad adicional la de la blancura, determinada por la medida de su reflectancia luminosa direccional que no será menor del 70% del valor que corresponde al óxido magnésico en polvo, calidad reactiva para análisis. Su característica principal radica, en la ausencia del óxido férrico y otros minerales minoritarios con poder colorante.

### **2.7.2. Materiales pétreos utilizados en pavimentos de concreto hidráulico**

En las mezclas de concreto hidráulico convencional, los agregados suelen representar entre 60 y 75 % aproximadamente del volumen absoluto de todos los componentes; de allí, la notable influencia que las características de los agregados ejercen en las del concreto. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

**Figura 15.** Materiales pétreos



**Fuente:** Ramírez, M. (2019). Cuáles son los materiales pétreos y para qué sirven.

[Figura]. Recuperado de <https://press.com.mx>

Una característica importante del concreto es su peso unitario, porque es índice de propiedades que a su vez influyen decisivamente en el empleo que se le da. Como es evidente, dicha característica del concreto depende principalmente del peso específico de los agregados que lo integran.

Procede hacer notar, que tanto los concretos ligeros como el concreto pesado, requieren de agregados especiales y tienen usos específicos que resultan fuera del campo de aplicación que se considera convencional, en el que casi todo el concreto que se utiliza es de peso normal. La litología se clasifica como sigue:

- Rocas volcánicas: Por la composición química y mineralógica comprende rocas efusivas, riolíticas y dacíticas en mayor proporción, andesíticas y basálticas, así como también materiales piroclásticos, en una mayor escala.
- Rocas sedimentarias de origen orgánico: Formadas generalmente por pequeños depósitos de diatómitas y lignitos.

- Rocas de carácter intrusivo: Clasificadas petrográficamente como granitos, granodioritas, monzonitas y dioritas.

Las rocas ígneas están compuestas por silicatos en forma cristalina y son debidas a las masas pastosas provenientes del interior de la tierra; no se presentan nunca en estratos, son macizas y generalmente atraviesan rocas.

Las rocas sedimentarias proceden de rocas eruptivas transformadas o disueltas, se aglomeran de nuevo en su propio lecho o fueron acarreadas a otras partes donde quedaron en forma suelta o coherente.

Las rocas metamórficas generalmente se presentan estratificadas, provienen de rocas eruptivas y sedimentarias que han sufrido transformaciones posteriores, por reacciones superficiales o por la acción de elevadas temperaturas y presión.

La clasificación petrográfica ayuda a determinar las propiedades de un agregado, pero no ofrece ninguna base para predecir la actuación del concreto, pues no hay minerales universalmente deseables. Por otra parte, los agregados se clasifican como ligeros, de peso normal y pesado.

Agregado de peso ligero como los esquistos, lutitas, arcillas expandidas, pizarras, escorias esponjosas, piedra pómez volcánica entre otras; son utilizadas para producir concretos ligeros con peso volumétrico de 1,44 a 1,92 ton/m<sup>3</sup>.

Los agregados más comúnmente empleados como arena, grava, piedra triturada y escorias de altos hornos, producen concreto de peso normal de 2,16 a 2,56 ton/m<sup>3</sup>.

Materiales como la magnetita, barita, limonita, hierro, partículas de acero que son usadas para escudos de concreto contra radiación, producen concretos pesados con un peso volumétrico de 6,4 ton/m<sup>3</sup>.

En particular, el agregado de peso normal es el que se utiliza generalmente por ser práctico, dada la facilidad con que se obtienen estos agregados, y por qué se pueden alcanzar resistencias satisfactorias sin un tratamiento especial.

De acuerdo a su tamaño, los agregados se clasifican en finos y gruesos. Los primeros comúnmente consisten en arena natural; la ASTM, los define como el material que pasa



la malla N°4 (4,76 mm) y se retiene en la malla N°200 (0,074 mm), las partículas entre 0,074 y 0,002 mm se clasifican como limos, y los más pequeños se denominan arcillas. Los agregados gruesos, son una combinación de gravas naturales o rocas trituradas y de acuerdo a la ASTM son el material que se retiene en la malla N°4 (4,76 mm).

Los agregados deben cumplir con ciertas características antes de ser utilizados, sus partículas deben ser durables, limpias, resistentes y libres de productos químicos, recubrimiento de arcilla y de otros materiales finos que puedan afectar la adherencia con la pasta, las partículas desmenuzables o que tiendan a resquebrajarse deben evitarse.

Las principales características a observar en los agregados para concreto son las siguientes:

- Gravedad específica
- Porosidad y absorción del agregado
- Forma y textura de las partículas
- Granulometría
- Módulo de finura
- Sanidad del agregado
- Impurezas orgánicas humedad
- Resistencia a la abrasión

#### **2.7.2.1. Influencia de los agregados pétreos en las propiedades del concreto fresco**

La absorción es quizás la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben agua directamente en la mezcladora, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla. Si dos tipos de agregados tienen absorción similar, otros factores secundarios serán de importancia en la consistencia de la mezcla, tales como forma, tamaño y graduación; ya que mientras mayor superficie del agregado sea necesario cubrir con pasta, se tendrá menos fluidez. Una buena consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción y un coeficiente bueno de forma, en donde las partículas son aproximadamente redondas.

Por otro lado, si el contenido de cemento se incrementa, se afecta la consistencia del concreto; este incremento permite agregar más agua a la mezcla para una mantener la

relación agua/cemento. Por lo tanto, en algunas ocasiones puede ser necesario aumentar el contenido de cemento en la mezcla, buscando mejores consistencias para mezclas de concreto de resistencias no muy altas. (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003).

La forma de los agregados tiene incidencia sobre la trabajabilidad del concreto fresco. Las formas básicas de éstos se pueden simplificar en 4 tipos, que son: equidimensional o esférica, prismática, tabular o elíptica, e irregular. De todas éstas, la que mayor problema puede ocasionar para la trabajabilidad es aquella de tipo tabular que además está alargada (conocidas como piezas planas y alargadas); estas piezas pueden provocar disminución en la trabajabilidad ya que muy fácilmente pueden orientarse de manera preferencial en un solo plano, de manera que el agua y el espacio poroso pueden acumularse debajo de ellas. Además, gravas con esta forma ocasionan mayores requerimientos de arena, y eso hace necesario un incremento en el volumen de agua para la mezcla ( Uribe, 1991).

Los agregados se pueden calificar por su forma, en base a su grado de redondez y esfericidad, obteniéndose una medida relativa de carácter comparativo y descriptivo. La manera como esta característica puede influir en el concreto fresco es variable, logrando producir, por ejemplo, a mayor grado de redondeamiento menor relación de vacíos; pero por otra parte un menor valor de este parámetro reduce la capacidad de compactación (Neville, 1999).

Por otro lado, la granulometría y el tamaño máximo del agregado (TMA) para las gravas, afectan las porciones relativas de los agregados, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, la economía y la durabilidad del concreto. Cuando los agregados son muy gruesos, pueden producir mezclas rígidas; mientras que aquellos agregados que no poseen una gran deficiencia o exceso de algún tamaño y tienen una curva granulométrica suave, producirán resultados más satisfactorios en las propiedades del concreto fresco.

En el agregado fino hay dos elementos que deben ser considerados, por un lado, el módulo de finura (MF), y por el otro la continuidad en los tamaños, ya que algunas arenas pueden tener módulos de finuras aceptables (entre 2,2 y 3,1) y carecer de alguna clase granulométrica. Si consideramos únicamente el módulo de finura, pueden obtenerse dos condiciones desfavorables: una de ellas existe cuando el módulo de finura es mayor a 3,1

(arena gruesa), en donde puede ocurrir que las mezclas sean poco trabajables, faltando cohesión entre sus componentes y requiriendo mayores consumos de cemento para mejorar su trabajabilidad; la otra condición es cuando el módulo de finura es menor a 2,2 (arena fina), en este caso puede ocurrir que los concretos sean pastosos y que haya mayores consumos de cemento y agua para una resistencia determinada, y también una mayor probabilidad que ocurran agrietamientos de tipo contracción por secado ( Uribe, 1991).

Por último, en el agregado grueso un contenido excesivo de materiales finos puede provocar problemas similares en el concreto a los que suele causar una arena con un módulo de finura menor a 2,2. Por medio de la prueba de pérdida por lavado se puede determinar este contenido, cuyo resultado se expresa como un porcentaje de la muestra.

#### **2.7.2.2. Influencia de los agregados pétreos en las propiedades del concreto endurecido**

Frecuentemente la variación de la resistencia del concreto puede explicarse con el cambio de la relación  $a/c$ , no obstante, existe evidencia en la literatura que éste no siempre es el caso. Además, por consideraciones teóricas, independientemente de la relación  $a/c$ , las características de las partículas del agregado tales como el tamaño, la forma, la textura de la superficie y el tipo de mineral, influyen en las características de la zona de transición, y, por lo tanto, afectan la resistencia del concreto (Mehta & Monteiro, 1998).

En cuanto a la interrelación mecánica entre la matriz y el agregado grueso, la textura superficial de éste es principalmente responsable de la adherencia. La roca triturada produce una adherencia superior comparado con la grava de canto rodado; aunque en la adherencia también tiene influencia la relación  $a/c$  que afecta tanto física como químicamente la zona de interface. En un trabajo de investigación se encontró que concretos fabricados con agregados triturados resistieron más que los de canto rodado; el esfuerzo de compresión a los 28 días para los concretos hechos con agregados gruesos de grava redonda estuvo entre el 10 y 20 por ciento más bajos que los concretos preparados con agregados triturados. Lo anterior puede ser atribuido tanto a la superficie lisa de los agregados de canto rodado, como a su posible menor resistencia, en relación a los agregados triturados, que fueron de basalto y caliza.

Se ha observado que concretos con bajos contenidos de agregados resisten altos esfuerzos a la edad de un día, excepto los hechos con grava triturada. En contraparte, los concretos con altos contenidos de agregados presentan bajas resistencias de compresión a edades tempranas, fallando probablemente por la concentración de esfuerzos alrededor de los agregados, ya que en éstos sus propiedades físicas no varían con el tiempo, mientras que la resistencia y el módulo de elasticidad de la pasta de cemento están todavía por debajo de su valor final.

Por otro lado, la capacidad de absorción de un material incide directamente sobre el grado de alteración que este mismo puede sufrir; la cantidad de espacios vacíos como los poros y fisuras, y la permeabilidad, son factores que influyen sobre la durabilidad de cualquier estructura de concreto. Un ejemplo típico de esto son los concretos que se encuentran en sitios donde el proceso de congelamiento y deshielo es común, ya que el agua puede expandirse hasta un 9% al congelarse. Este cambio volumétrico puede alterar fuertemente la estructura interna del concreto. (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003).

Una propiedad de los agregados que resulta ser de vital importancia es la densidad, ya que si se emplea un material con una buena densidad ( $\geq 2,25$ ) el concreto resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendrá una influencia directa sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión del mismo. El volumen que ocupa un agregado según su peso es un indicador de las características del mismo en cuanto a ligereza, porosidad y permeabilidad, propiedades que pueden afectar al concreto en un mayor requerimiento de cemento para una resistencia específica y con esto una influencia directa sobre la economía de la mezcla.

Por otro lado, es conocido que a mayor porosidad mayor fuerza de adhesión, de manera que los agregados gruesos con una mayor densidad y resistencia al desgaste presentan una menor porosidad, y como consecuencia menor adherencia y cantidad de finos que pasan por la malla N°200.

La presencia de un porcentaje importante de materia orgánica en los agregados puede provocar problemas en la fabricación de concreto, ya que trae consigo efectos como inhibir la adecuada hidratación del cemento y por lo tanto causar un retraso en el endurecimiento del mismo. Los agregados contaminados pueden ser causa de reducción

de la resistencia a la compresión del concreto; y, además, pueden contener sustancias nocivas que afecten químicamente al material de diversas formas ( Uribe, 1991).

Aunque de manera simplista pudiera pensarse que el agregado grueso actúa principalmente como un relleno para reducir el contenido de la pasta de cemento y moderar el esfuerzo en la matriz, sus contribuciones parecen ser más que eso. Un porcentaje máximo en volumen de agregados, sobre todo gruesos, tiene un efecto positivo tanto en su resistencia, como en sus características de flujo plástico, contracción por secado y permeabilidad, hecho que se presenta debido a que la pasta de cemento endurecido constituye el elemento más débil en lo que se refiere a las propiedades.

La demanda de agua de los agregados determina el contenido de cemento y pasta para una determinada resistencia del concreto. Debido a que la pasta es la principal fuente de acortamiento y alargamiento en el concreto, agregados con bajas demandas de agua producirían concretos menos propensos a la deformación (acortamiento y alargamiento). Por esto, los agregados que mejor se acomodan en una mezcla producen concretos con menor inestabilidad volumétrica.

### **2.7.3. Agua para concreto**

En relación con su empleo en el concreto, el agua tiene dos diferentes aplicaciones: como ingrediente en la elaboración de mezclas y como medio de curado de las estructuras recién construidas. (Calo, Souza, & Marcolini, 2015).

Aunque en estas aplicaciones, las características del agua tienen efectos de diferente importancia sobre el concreto, es usual que se recomiende emplear agua de una sola calidad en ambos casos. Así normalmente, en las especificaciones para concreto se hace referencia en primer término a los requisitos que debe cumplir el agua para elaborar el concreto, porque sus efectos son más importantes, y después se indica que el agua que se utiliza para curarlo debe ser del mismo origen, o similar, para evitar que se subestime esta segunda aplicación y se emplee agua de curado con características inadecuadas.

**Figura 16.** Agua para concreto



**Fuente:** Neves, A. (2021). Mezclar agua: ¡transforme su concreto ahora! [Figura].

Recuperado de <https://www.blok.com.br>

En determinados casos se requiere, con objeto de disminuir la temperatura del concreto al ser elaborado, que una parte del agua de mezclado, se administre en forma de hielo molido. En tales casos, el agua que se utilice para fabricar el hielo debe satisfacer las mismas especificaciones de calidad que el agua de mezclado.

Como componentes del concreto convencional, el agua suele representar entre 10 y 25 por ciento del volumen del concreto recién mezclado, dependiendo del tamaño máximo del agregado que se utilice y del revenimiento que se requiera. Esto le concede una influencia importante a la calidad del agua de mezclado en el comportamiento y las propiedades del concreto, pues cualquier sustancia dañina que contenga, aún en proporciones reducidas, puede tener efectos adversos significativos en el concreto.

Los requisitos de calidad del agua de mezclado para concreto no tienen ninguna relación obligada con el aspecto bacteriológico (como es el caso de las aguas potables), sino que básicamente se refieren a sus características físico – químicas y a sus efectos sobre el comportamiento y las propiedades del concreto. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Cuando la obra se localiza en las inmediaciones de un centro de población, es pertinente distinguir entre el agua para uso doméstico y para uso industrial. La primera por lo general, reúne condiciones físico – químicas de potabilidad, salvo eventuales fallas en el aspecto bacteriológico, que pueden hacerla impropia para el consumo humano, pero no afectan al concreto.

El agua para uso industrial por lo común no es potable, no sólo bacteriológicamente, sino también en el aspecto físico – químico, pues frecuentemente proviene del tratamiento de aguas negras o es agua reciclada de procesos industriales, por lo cual puede contener sustancias dañinas al concreto. Por tal motivo, siempre es necesario verificar la calidad del agua de uso industrial, a menos que tenga antecedentes de uso con buen éxito en la fabricación de concreto.

En sitios alejados de los centros de población, podemos encontrar los pozos, manantiales, corrientes superficiales (arroyos y ríos), almacenamientos naturales (lagos y lagunas) y almacenamientos creados artificialmente (vasos de presas). Salvo que existan antecedentes de uso del agua en la fabricación de concreto con buenos resultados, debe verificarse invariablemente su calidad antes de emplearla.

En cuanto al agua de mar, su principal inconveniente al ser juzgada como agua de mezclado para concreto, consiste en su elevado contenido de cloruros (más de 20.000 ppm) que la convierten en un medio altamente corrosivo para el acero de refuerzo, y esto la hace inaceptable para su empleo en el concreto reforzado. Refiriéndose a las características físicas – químicas del agua para concreto, no parece haber consenso general en cuanto a las limitaciones que debe imponerse, sin embargo, en lo que sí parece haber acuerdo, es que no debe tolerarse la presencia de sustancias que son francamente dañinas como: grasas, aceites, azúcares y ácidos, por ejemplo. La presencia de alguna de estas sustancias, que por lo demás no es común, debe tomarse como un síntoma de contaminación que requiere eliminarse antes de considerar la posibilidad de emplear el agua.

En diversas especificaciones y práctica recomendadas, al establecer la calidad necesaria para el agua de mezclado, se pone más énfasis en la valuación de los efectos que produce en el concreto, que en la cuantificación de las sustancias indeseables e impurezas que

contiene. Esto aparentemente se justifica, porque tales reglamentaciones están dirigidas principalmente a construcciones urbanas, industriales o similares, cuyo concreto se produce en localidades donde normalmente se dispone de suministro de agua para uso industrial o doméstico. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Los efectos indeseables que el agua de mezclado de calidad inadecuada pueda producir en el concreto a corto plazo, normalmente se relacionan con el tiempo de fraguado y las resistencias iniciales, los de mediano plazo con las resistencias posteriores (28 o más días) y los de largo plazo pueden consistir en el ataque de sulfatos, la reacción álcali – agregado y la corrosión del acero de refuerzo.

## **2.8. Agregados reciclados**

Existen diferentes métodos y sistemas para la remoción del hormigón, incluyendo desde grandes equipos, en general autopropulsados, utilizados para las principales tareas de demolición hasta diferentes tipos de herramientas de mano (neumática, hidráulica, eléctrica, a combustible) empleadas para trabajos menores. Cualquiera de estos métodos tiene por finalidad reducir el tamaño de los bloques de hormigón de manera de lograr un tamaño acorde con el medio de transporte disponible y/o con la abertura de boca y tipo de trituradora que se empleará para la obtención de los agregados reciclados. ( Zega, Sosa, & Di Maio, 2018).

Las plantas de producción de agregados reciclados son similares a las de producción de agregados primarios, y pueden operar mediante sistemas abiertos o cerrados. Estos sistemas están compuestos por un conjunto de trituradoras y tamices dispuestos en serie, permitiendo ejercer un mayor control sobre las características del material producido como así también la separación del mismo en distintas fracciones. El nivel de complejidad de la planta lo define el grado de contaminación que presente el residuo y la aplicación final que tendrá el nuevo material obtenido.



**Figura 17.** Reciclado de escombros de concreto



**Fuente:** Álvarez, A. (2015). Concretos reciclados, una nueva cultura. [Figura].

Recuperado de <https://www.alcaldesdemexico.com>

El proceso de reciclaje de hormigones consiste básicamente en las operaciones de preclasificación del residuo, trituración y clasificación final del material, tendiendo de esta forma a la obtención de productos similares a los agregados naturales que se comercializan. De este modo es posible obtener agregados grueso y fino reciclados (AGR y AFR).

Los agregados reciclados obtenidos de la trituración de hormigones presentan a simple vista características diferentes a las de los agregados naturales. Mientras que en los agregados naturales dichas características dependen en primera instancia de las características de la roca madre, en los agregados reciclados dependerán de las características de la roca, pero también del mortero del hormigón original, siendo importante las cantidades relativas en que se presentan cada uno de ellos.

Estas características del agregado reciclado hacen que sea un material heterogéneo, constituido por dos fases: mortero y roca, las que poseen propiedades diferentes, siendo la porosidad del mortero la más importante, ya que modifica otras propiedades como la

densidad, absorción de agua, resistencia, dureza, durabilidad, etc. ( Zega, Sosa, & Di Maio, 2018).

El mortero presente en las partículas de los agregados reciclados produce en los mismos una textura superficial más rugosa y porosa que la del agregado natural. Esta característica distintiva hace que el empleo de agregados reciclados en la elaboración de hormigones produzca modificaciones en las propiedades de las mezclas, como por ejemplo que absorban parte del agua de mezclado en aquellos casos en que se los utilice en estado seco, hecho que está en función directa con el porcentaje en que se los emplee.

Por tal motivo, para obtener una determinada trabajabilidad prefijada del hormigón existen distintas alternativas a considerar:

- Cuantificar la cantidad de agua adicional que se debe agregar al hormigón durante el mezclado mediante ensayos previos.
- Utilizar el agregado reciclado en estado saturado.
- Utilizar un aditivo superfluidificante.

## **2.8.1. Propiedades de los agregados reciclados**

### **2.8.1.1. Forma y textura superficial**

La presencia del mortero que queda adherido a los agregados del concreto original provoca que la textura de los agregados de concreto reciclado sea más rugosa y porosa que la de los agregados naturales como consecuencia del proceso de trituración. No obstante, el coeficiente de forma del agregado de concreto reciclado es similar al que puede presentar el agregado natural. (Laverde Laverde & Torres Castellanos, 2017).

Los estudios que han empleado el método del índice de partículas planas y alargadas ASTM D 4791 para determinar la forma del agregado grueso han encontrado sin embargo diferencias entre el agregado natural y el agregado de concreto reciclado, siendo menor el valor del índice en el caso del agregado de concreto reciclado. Esto puede deberse a que el mortero que queda adherido en las caras planas que presentan las partículas tienden a aumentar el espesor de las partículas con forma plana y alargada, disminuyendo así el porcentaje de estas; otros estudios han empleado la microscopía óptica para evaluar la

forma del agregado, observando que las partículas del agregado de concreto reciclado presentan una forma más redondeada.

Sin embargo, otros estudios que han valorado la forma del agregado a través del índice de angulosidad, concluyen que las partículas del agregado de concreto reciclado son más angulosas. Esta disparidad en resultados y conclusiones de diferentes estudios puede deberse a la influencia de la calidad del concreto de origen sobre la forma, ya que los agregados es concreto reciclado tienden a ser más redondeados cuanto mayor es la relación agua/cemento del concreto original y por lo tanto menor la resistencia del mortero. Generalmente son las fracciones de menor tamaño del agregado grueso las que presentan una forma más desfavorable tanto utilizando como referencia el coeficiente de forma como el índice de partículas planas y alargadas.

**Figura 18.** Forma y textura de agregado grueso de concreto reciclado



**Fuente:** Suarez, R. (2016). Agregados. [Figura]. Recuperado de <https://tecnologia-concreto.blogspot.com>

### **2.8.1.2. Granulometría**

La granulometría de los agregados de concreto reciclado varía según el proceso de trituración que se realice, pudiéndose seleccionar mediante pequeños ajustes en la apertura de las trituradoras.

El porcentaje de agregado grueso que se obtiene puede variar entre 70% y 90% del agregado total producido. Este porcentaje depende además del tamaño máximo del agregado grueso de concreto reciclado producido y de la composición del concreto original.

La fracción gruesa posee una curva granulométrica adecuada, que se puede englobar dentro de los límites granulométricos que recomiendan algunas normas internacionales para el empleo de agregado grueso en concreto estructural.

En general, las granulometrías de los agregados de concreto reciclado se sitúan dentro de los límites que fijan las diferentes recomendaciones tanto para agregado natural como para agregado de concreto reciclado. (Sánchez de Juan, 2004).

El módulo granulométrico del agregado de concreto reciclado, para un mismo tamaño máximo del agregado, presenta pequeñas variaciones dependiendo principalmente del sistema de trituración empleado y en menor medida de la calidad del concreto original. En principio, el agregado de concreto reciclado genera finos durante su manipulación debido a la aparición de pequeñas partículas de mortero que se desprenden, la presencia de estas partículas en la superficie del agregado puede originar problemas de adherencia entre éste y la pasta de cemento, además de provocar un aumento de la cantidad de agua de amasado necesaria.

Por otra parte, después de obtener la fracción gruesa en el agregado de concreto reciclado, éste sigue presentando pequeños porcentajes de arena (partículas menores de 4mm) debido a la disgregación que sufre el agregado al manipularse.

### **2.8.1.3. Densidad y absorción**

La densidad como la relación entre la masa en el aire y el volumen del material. Se caracterizan tres tipos de densidades: la densidad nominal, que incluye los poros no saturables, la densidad aparente saturada y superficialmente seca, que incluye la masa de

agua dentro de los poros saturables y la densidad aparente, que incluye los poros saturables y no saturables. Generalmente la densidad aparente es la propiedad que se utiliza en los diseños de mezcla, por lo que tiene gran importancia. Se ha encontrado que la densidad aparente de los agregados gruesos reciclados, provenientes de la trituración de residuos de concreto, es inferior a la de los agregados gruesos naturales. Esto se debe a que la pasta de cemento adherida en los granos reciclados genera una mayor porosidad del agregado, por lo que disminuye su densidad y aumenta su absorción. ( Arriaga Tafhurt, 2013).

La absorción es una de las propiedades físicas del agregado de concreto reciclado que presenta una mayor diferencia con respecto al agregado natural, debido a la elevada absorción de la pasta que queda adherida a él. Los principales aspectos que influyen tanto en la densidad como en la absorción del agregado de concreto reciclado son: el tamaño de las partículas, la calidad del concreto original y las técnicas de procesado. (Bojacá Castañeda, 2013).

#### **2.8.1.4. Desgaste en máquina de los ángeles**

El desgaste en la máquina de los ángeles es un ensayo que permite identificar el porcentaje de abrasión o degradación porcentual del agregado grueso al ser impactado o al tener constante fricción con su entorno. Este ensayo se realiza para determinar las características de los agregados gruesos, que serán utilizados en superficies que generan excesiva fricción o impactos, tales como placas o vías.

Este desgaste porcentual depende de las características de la roca madre, ya que cuando los concretos están sometidos a una fricción continua, requieren de agregados gruesos de alta dureza para no perder las características de resistencia de diseño.

Los métodos que se usan para este ensayo consisten en generar, por medio de un tambor, impactos en las partículas del agregado, con el fin de que este pierda masa; esta pérdida se representa en forma de porcentaje comparando la masa inicial con la masa final del agregado.

En consecuencia, el ensayo aplicado a concretos con agregados reciclados tiene valores de pérdidas de peso y marcas de ahuellamiento difíciles de establecer, debido a que no

poseen un comportamiento estandarizado o definido, es decir, que su sensibilidad es muy grande, lo que le permite tener valores con gran dispersión ( Arriaga Tafhurt, 2013).

**Figura 19.** Máquina de abrasión de los ángeles



**Fuente:** Montoya, I. (2019). Máquina de abrasión de los ángeles. [Figura]. Recuperado de <https://cris.ulima.edu.pe>

## **2.9. Resistencia del concreto**

La resistencia mecánica del concreto es la propiedad que hace posible que este soporte la carga que va a ir encima de él. Gracias a esta cualidad, este no se deforma permanentemente ni se agrieta.

La calidad de los materiales influye en la resistencia mecánica del concreto, pero no es el único factor que se debe tener en cuenta. También podemos hablar de otros como:

- La cantidad del cemento, así, por ejemplo, a mayor cantidad de cemento mayor resistencia mecánica, mientras que, a menor cantidad, también menor resistencia.
- La relación entre el agua y el cemento es otro factor para tener en cuenta. Como maestros constructores debemos saber que la resistencia del concreto es inversamente proporcional a la relación agua cemento, es decir si el valor del

contenido de agua en la mezcla, dividido entre el contenido de cemento en la mezcla aumenta, la resistencia del concreto disminuirá.

- La forma y textura de los agregados también influyen en la resistencia del concreto. Ya que los que tienen forma angulosa y superficie rugosa favorecen la adherencia y aumentan la resistencia del concreto. Por el contrario, lo que sucederá con los agregados redondeados y lisos es que no habrá una buena adherencia del cemento, lo que ocasionará que disminuya la resistencia.

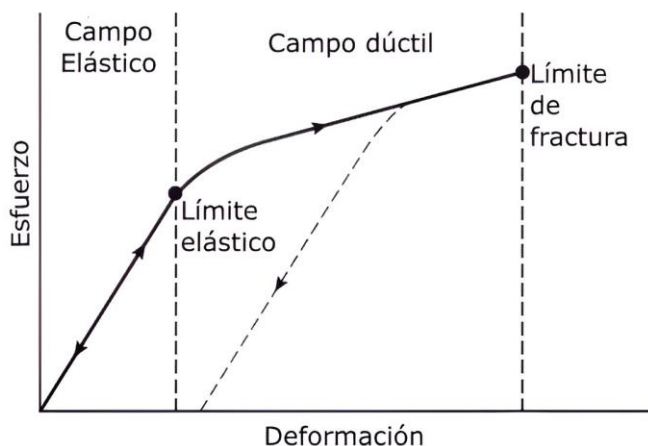
### 2.9.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto es la base para calcular el dimensionamiento y el refuerzo de los diferentes elementos de una obra en concreto. Es la característica mecánica principal del concreto sometido a esfuerzos de cargas axiales de compresión antes de llegar a la falla. (Sanchez de Guzman, 2001).

#### 2.9.1.1. Módulo de elasticidad ( $E_c$ )

Cuando un espécimen de concreto endurecido se somete por primera vez a una carga de compresión axial, que se incrementa progresivamente a velocidad uniforme hasta un valor inferior al de ruptura y después se retira a la misma velocidad, ocurre una deformación. (McCorman & Brown, 2017).

**Figura 20.** Relación entre esfuerzo y deformación



**Fuente:** Maldonado, Y. (2023). Esfuerzo y deformación. [Figura]. Recuperado de <https://geologiaweb.com>



Si durante el proceso de carga y descarga completo en el espécimen, se miden las deformaciones parciales ( $\delta$ ) a diferentes niveles del esfuerzo aplicados ( $\zeta$ ) se pueden obtener pares de datos (esfuerzo y deformación) que, al ser representadas en un sistema de ejes ortogonales, con las deformaciones como abscisas y los esfuerzos longitudinales como ordenadas, cual identifica la manera cómo evolucionan las deformaciones longitudinales del espécimen en el curso de este proceso de carga y descarga.

Se observa, que el concreto no se comporta como un material elástico, pues además de que conserva una deformación permanente ( $\Delta IP$ ), la línea que representa la relación entre esfuerzos y deformaciones sólo exhibe un reducido tramo inicial de proporcionalidad, al comenzar la aplicación de la carga, y después se manifiesta como una curva debido a que las deformaciones aumentan progresivamente en mayor proporción que los esfuerzos. Para explicar el comportamiento del concreto endurecido en este aspecto, es frecuente considerarlo como un material consistente de dos fases, es decir, un conjunto de partículas duras y resistentes (los agregados) dispersos en una matriz relativamente más débil (la pasta de cemento hidratada), y que la respuesta del conjunto (el concreto) a la aplicación de esfuerzos deriva de lo que ocurre en la región del contacto entre ambas fases. En apoyo de esta consideración, se indican las formas que ordinariamente presentan las gráficas esfuerzo deformación unitaria, determinadas individualmente para agregados de buena calidad, la pasta de cemento hidratado y el concreto que los contiene.

Lo que con frecuencia se admite que ocurre en el concreto, es que existan micro fisuras y otras discontinuidades en la zona de contacto pasta – agregado desde antes que el concreto reciba su primera carga, lo que se traduce en una adhesión imperfecta entre ambos componentes y en la posibilidad de que se produzcan concentraciones de esfuerzo en esa zona.

### **2.9.2. Resistencia a la flexión o módulo de rotura**

Es un parámetro muy importante como variable de entrada para el diseño de pavimentos rígidos. Es la medida del esfuerzo que se produce en la línea de influencia de tensión que se desarrolla al someter una viga a la flexión, o en las placas de concreto hidráulico de los pavimentos rígidos al paso de las cargas vehiculares. (Sanchez de Guzman, 2001).



### **2.9.2.1. Módulo de ruptura (resistencia de tensión por flexión)**

En estructuras que trabajan predominantemente a flexión, como es el caso de los pavimentos de concreto hidráulico, el diseño estructural se realiza con base en la resistencia del concreto a tensión o flexión.

Existen dos ensayos, para determinar la resistencia de concreto a tensión por flexión. En ambos ensayos se utiliza el mismo tipo de espécimen prismático, que se prueba a flexión como viga libremente apoyada, pero con la diferencia del modo como se le aplica la carga: en un caso, la flexión se produce con una carga concentrada en el centro del claro, y en el otro con dos cargas concentradas iguales, aplicadas en los tercios del claro. Ambos modos de ensayo, se encuentran normalizados conforme a los métodos de prueba ASTM C 293 y ASTM C 78 respectivamente; sin embargo, en la práctica se prefiere el segundo (con cargas iguales en los tercios del claro) porque en esta condición de carga, todo el tercio central del espécimen queda sometido al momento máximo de flexión y al correspondiente esfuerzo máximo de tensión, creando un estado constante de esfuerzo, que da oportunidad para que la falla ocurra dentro de este tramo central.

La resistencia a tensión del concreto determinada por flexión, suele manifestar valores más elevados que por los obtenidos por tensión directa e indirecta, debido a la distribución no uniforme de esfuerzos en la sección de falla, que restringe la propagación de las grietas y las simplificaciones teóricas que se hacen para el cálculo del esfuerzo máximo, a los cuales se suma en este caso, cierto efecto de trabazón entre la pasta de cemento y el agregado grueso, particularmente, cuando este se ha constituido por fragmentos producto de la trituración de una roca de buena calidad. Por todo ello, frecuentemente se dice que en esta forma de ensayo se sobrestima la resistencia a tensión del concreto; no obstante, por considerar la representatividad de las condiciones operativas del concreto en las estructuras que trabajan a flexión, como es el caso de los pavimentos rígidos, se le considera la forma apropiada para definir y verificar la resistencia de diseño de estas estructuras.

## **2.10. Normativa internacional de concretos con agregados reciclados**

El reciclaje de concreto además de crear estructuras integrales, ayuda en la conservación del medio ambiente. Las naciones que desechan las mayores cantidades de concreto son Estados Unidos, Japón y algunos países de Europa.

Debe mencionarse que nuestro país no cuenta con alguna legislación que permita la utilización de agregados reciclados provenientes de trituración de concretos de desecho, y más aún que tengan alguna recomendación o código que especifique las condiciones que el mismo debe cumplir cuando se emplea como reemplazo de los agregados naturales en la elaboración de nuevos concretos.

### Colombia

- Guía para la elaboración del plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD) en obra (2015).
- Actualización de las especificaciones técnicas generales IDU ET - 2011, a partir de los resultados y análisis de los ensayos de campo y laboratorio (2018).

### Brasil

- ABNT NBR 15116 Agregados reciclados de residuos sólidos de la construcción civil - utilización en pavimentos y preparación de concretos sin función estructural – requisitos (2004).

### Perú

- NTP 400.053 Manejo de residuos de la actividad de la construcción, reciclaje de concreto de demolición (2014).

### México

- PROY-NMX-C-582-ONNCCE-2021 Industria de la construcción-agregados reciclados para concreto hidráulico-especificaciones y métodos de ensayo (2021).

### Estados Unidos

- ACI 555R-01 Remoción y Reutilización de Concreto Endurecido (2002).
- ACI E1-16 Agregados para concreto (2016).

## España

- Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) (2011).
- EHE-08 Anejo 15 Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados (2008).
- EHE-08 Anejo 18 Hormigones de uso no estructural (2008).

## Portugal

- E 474 – 2009 Guía para la utilización de materiales reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición en terraplenes y capas de lecho de infraestructuras de transporte.

## Alemania

- DIN 4226-102:2017-08 Agregados reciclados para hormigón según DIN EN 12620 - Parte 102: Ensayos de tipo y control de producción en fábrica (2017).

## Holanda

- BRL 2506-1 Guía de evaluación para reciclar granulados (2017).

## Bélgica

- COPRO PTV 406 Requisitos técnicos para granulados reciclados (2018).

## Australia

- IPWEA (NSW) Especificación para el suministro de material reciclado para pavimentos, movimientos de tierras y drenaje (2010).
- CSIRO Desarrollo de especificaciones de guías para agregados reciclados en construcciones de concreto (2002).
- CSIRO HB-155 Guía de hormigón reciclado y materiales de albañilería (2002)

## China

- GB/T 25177 Árido grueso reciclado para hormigón (2011).
- GB/T 25176 Árido fino reciclado para hormigón y mortero (2011).

## Japón

- JIS A 5021 Agregado reciclado para hormigón clase H (2018).
- JIS A 5022 Hormigón reciclado utilizando áridos reciclados clase M (2012).
- JIS A 5023 Hormigón reciclado utilizando áridos reciclados clase L (2012).

**CAPÍTULO III**

**DISEÑO**

**METODOLÓGICO Y**

**RELEVAMIENTO DE LA**

**INFORMACIÓN**

## CAPÍTULO III

### DISEÑO METODOLÓGICO Y RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

#### 3.1. Muestras

##### 3.1.1. Agregado fino

La muestra de agregado fino utilizada en este trabajo fue extraída de un banco de préstamo.

Para caracterizar dicha muestra, se sometió a los ensayos de propiedades físicas (ASTM C 33), que comprende: granulometría, peso específico, peso unitario y porcentaje de absorción.

##### 3.1.2. Agregado grueso de concreto reciclado

El agregado grueso utilizado en este trabajo, se trató de un agregado grueso de concreto reciclado.

Dicho agregado se sometió a los diferentes ensayos para conocer sus características, donde se realizaron los ensayos de propiedades físicas (ASTM C 33) y mecánicas (ASTM C 131).

Los ensayos que comprenden la determinación de las propiedades físicas que se realizaron fueron: granulometría, peso específico, peso unitario y porcentaje de absorción.

Para las propiedades mecánicas, se llevó a cabo el ensayo de abrasión en la máquina de Los Ángeles. La muestra debe estar limpia para su aplicación, se considera limpios si están libres de materia orgánica limos o arcillas.

##### 3.1.2.1. Proceso de obtención del agregado grueso de concreto reciclado

Para poder obtener este agregado, se llevó a cabo un proceso que consistió en:

Primero se localizó la obra civil en demolición, que se trató de una cancha de futsal que ya había cumplido su vida útil, esta cancha estaba hecha de una losa de concreto la cual fue desmontada con maquinaria del Gobierno Autónomo Municipal de San Lorenzo.

**Figura 21.** Escombros de concreto



**Fuente:** Elaboración propia

Los escombros fueron depositados en un área donde había material orgánico (plantas), por lo cual se tuvo que seleccionar el material.

**Figura 22.** Selección de escombros



**Fuente:** Elaboración propia

Se trasladó los escombros a un área más adecuada para realizar la trituración de manera manual con la ayuda de un combo.

**Figura 23.** Transporte del material



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 24.** Material triturado



**Fuente:** Elaboración propia



El proceso de trituración generó que el material se desintegre en polvo y fracciones de diferentes tamaños, en consecuencia, se hizo pasar el material por unas mallas.

**Figura 25.** Cernido del material triturado



**Fuente:** Elaboración propia

### **3.1.3. Cemento**

La muestra de cemento empleada fue un cemento portland con puzolana tipo IP-40 de marca Fancesa, en su presentación de 50 kg.

Los ensayos ejecutados a esta muestra fueron: finura del cemento (ASTM C 430) y el peso específico del cemento (ASTM C 188).

## **3.2. Localización de los agregados extraídos**

### **3.2.1. Agregado fino**

El agregado fino fue extraído del banco de préstamo Áridos Garzón, ubicado en la comunidad de San Mateo de la provincia de Cercado.

El banco de préstamo del agregado fino, se encuentra a orillas del río Guadalquivir a la altura de la comunidad de San Mateo, donde se conecta con el río Sella. Al encontrarse en ese lugar, el árido presenta gran humedad.

Coordenadas geográficas:

- Latitud: 21°28'14.33"S
- Longitud: 64°45'0.98"O

**Figura 26.** Imagen satelital de la ubicación banco de préstamo Áridos Garzón



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 27.** Banco de préstamo Áridos Garzón



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.2.2. Agregado grueso de concreto reciclado

El agregado grueso de concreto reciclado, fue extraído de losa de una cancha de fútbol, ubicado en la comunidad de San Lorenzo de la provincia Méndez.

El material extraído de la losa, al ser un hormigón antiguo, más de 15 años, su calidad es baja, ya que presenta porosidad y poca homogeneidad.

Para lograr obtener los tamaños adecuados de agregado grueso, se realizó la trituración de los escombros de forma manual con la ayuda de combos y posteriormente una selección más detallada con mallas.

Coordenadas geográficas:

- Latitud: 21°25'7.50"S
- Longitud: 64°44'59.38"O

**Figura 28.** Imagen satelital de ubicación de extracción de escombros



**Fuente:** Elaboración propia

## 3.3 Caracterización de los materiales

### 3.3.1. Granulometría de los agregados ASTM C 136

#### 3.3.1.1. Ensayo

Antes de comenzar con este ensayo, se tomó la muestra representativa.



Toda la muestra se introdujo, con la ayuda de una cuchara en una serie de tamices o mallas dependiendo del tipo de agregado. En el caso del agregado grueso se pasa por los siguientes tamices en orden descendente tapa, 2 1/2 ", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4 y base.

Con cuidado se agito de forma manual, la serie de tamices alrededor de 15 minutos, verificando que ya no pase más partículas.

Se procedió a pesar el material retenido en cada tamiz, vaciando el material en un recipiente colocado una la balanza y tarado a cero (para despreciar el peso de dicho recipiente) con la ayuda de una brocha se limpió el tamiz para asegurarse que no quede material en este.

Lo mismo se realizó con el agregado fino (con una muestra de 500 gramos) pero se pasó por la siguiente serie de tamices tapa, 3/8 ", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100 y su base.

**Figura 29.** Juego de tamices para la granulometría del agregado grueso



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 30.** Juego de tamices para granulometría del agregado fino



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.1.2. Resultados

#### 3.3.1.2.1. Agregado fino

**Tabla 9.** Granulometría de la muestra N°1 del agregado fino

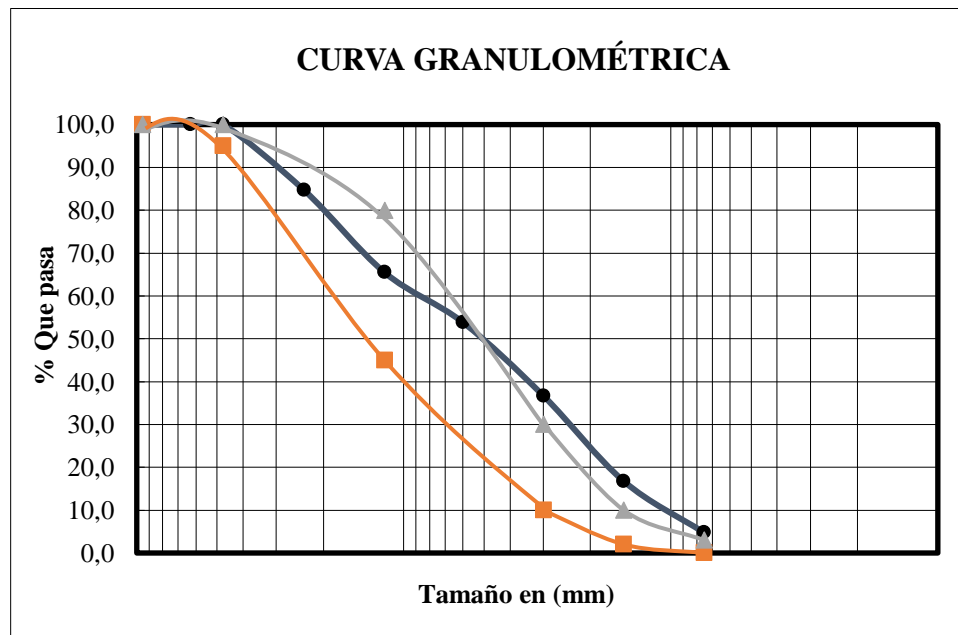
Peso total (gr) = 500

Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Retenido acumulado		% Que pasa del total	% Que pasa (AASHTO T-27)	
			(gr)	(%)			
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1/4	6,30	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
N°4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
N°8	2,36	70,10	70,10	14,02	86,00	-	-
N°16	1,18	98,70	168,80	33,76	66,20	45	80
N°30	0,60	60,20	229,00	45,80	54,20	-	-
N°50	0,30	92,20	321,20	64,24	35,80	10	30
N°100	0,15	95,70	416,90	83,38	16,60	2	10
N°200	0,08	53,60	470,50	94,10	5,90	0	3
Base		28,70	499,20	99,84	0,20	-	-

MF = 3,35

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 2.** Curva granulométrica de la muestra N°1 del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 10.** Granulometría de la muestra N°2 del agregado fino

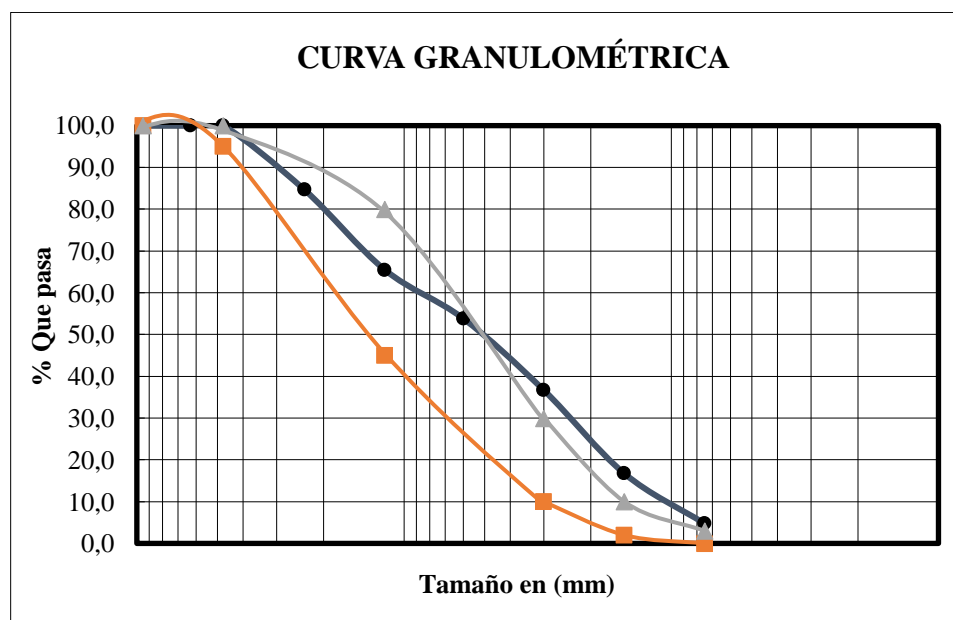
Peso total (gr) = 500

Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Retenido acumulado		% Que pasa del total	% Que pasa (AASHTO T-27)	
			(gr)	(%)			
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1/4	6,30	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
N°4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
N°8	2,36	70,60	70,60	14,12	85,90	-	-
N°16	1,18	94,60	165,20	33,04	67,00	45	80
N°30	0,60	65,90	231,10	46,22	53,80	-	-
N°50	0,30	80,60	311,70	62,34	37,70	10	30
N°100	0,15	96,80	408,50	81,70	18,30	2	10
N°200	0,08	65,50	474,00	94,80	5,20	0	3
Base		25,10	499,10	99,82	0,20	-	-

MF = 3,32

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.** Curva granulométrica de la muestra N°2 del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 11.** Granulometría de la muestra N°3 del agregado fino

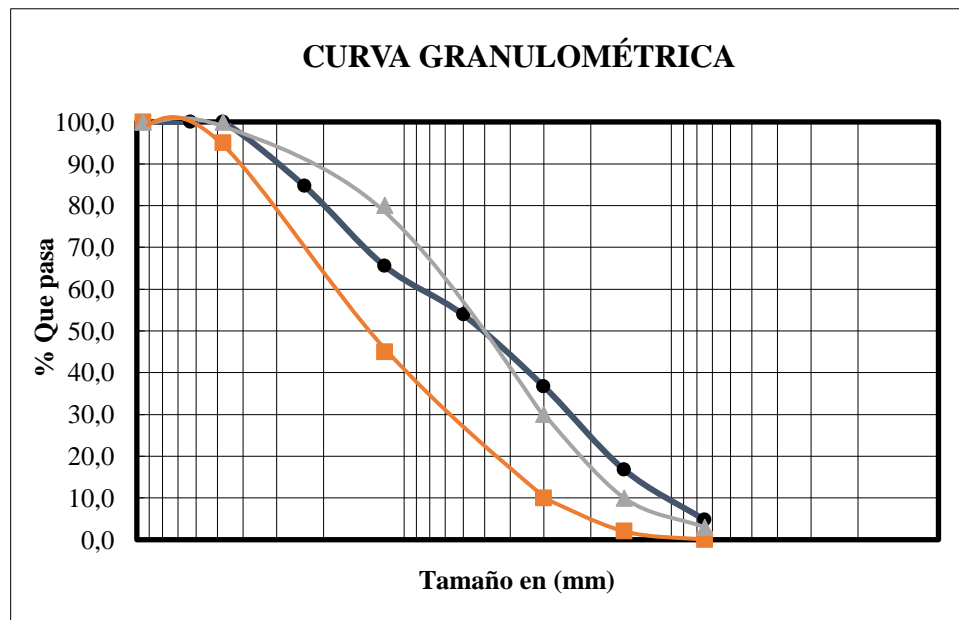
Peso total (gr) = 500

Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Retenido acumulado		% Que pasa del total	% Que pasa (AASHTO T-27)	
			(gr)	(%)			
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1/4	6,30	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
N°4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
N°8	2,36	76,70	76,70	15,34	84,70	-	-
N°16	1,18	95,90	172,60	34,52	65,50	45	80
N°30	0,60	58,30	230,90	46,18	53,80	-	-
N°50	0,30	85,60	316,50	63,30	36,70	10	30
N°100	0,15	99,70	416,20	83,24	16,80	2	10
N°200	0,08	60,10	476,30	95,26	4,70	0	3
Base		22,60	498,90	99,78	0,20	-	-

MF = 3,38

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 4.** Curva granulométrica de la muestra N°3 del agregado fino



Fuente: Elaboración propia



### 3.3.1.2.2. Agregado grueso

**Tabla 12.** Granulometría de la muestra N°1 del agregado grueso

Peso total (gr) = 15000

Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Retenido acumulado		% Que pasa del total	% Que pasa (ABC)	
			(gr)	(%)			
2 1/2"	63,00	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
2	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
1	25,40	2443,70	2443,70	16,29	83,70	-	-
3/4	19,05	9126,00	11569,70	77,13	22,90	35	100
1/2	12,50	3033,20	14602,90	97,35	2,60	25	80
3/8	9,50	258,90	14861,80	99,08	0,90	-	-
1/4	6,30	93,70	14955,50	99,70	0,30	10	30,00
N°4	4,75	41,70	14997,20	99,98	0,00	0	5
Base		1,50	14998,70	99,99	0,00	-	-

Suma = 30006,46

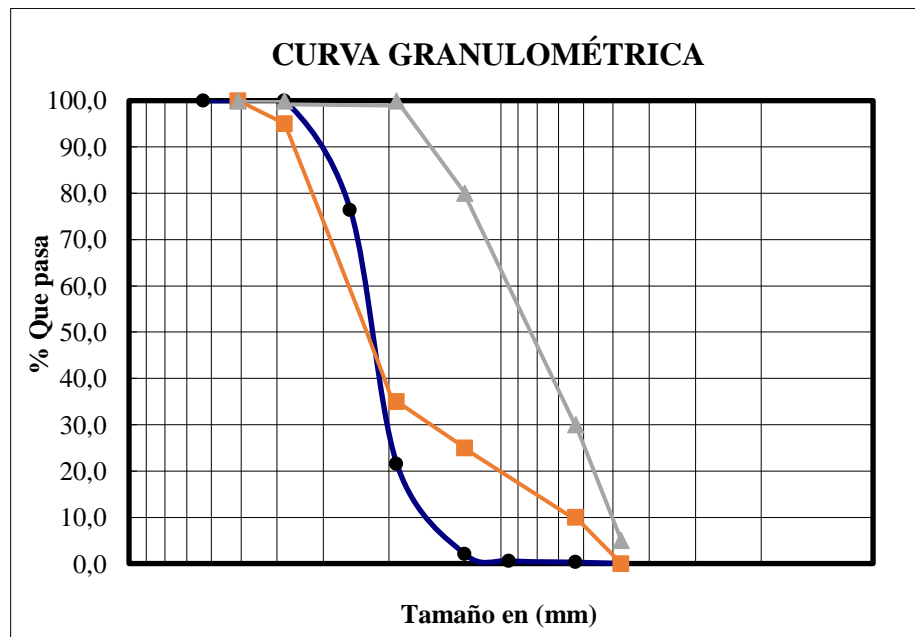
Pérdida = 15006,46

MF = 7,76

TMN = 1 1/2 "

**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 5.** Curva granulométrica de la muestra N°1 del agregado grueso



**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 13.** Granulometría de la muestra N°2 del agregado grueso

Peso total (gr) = 15000

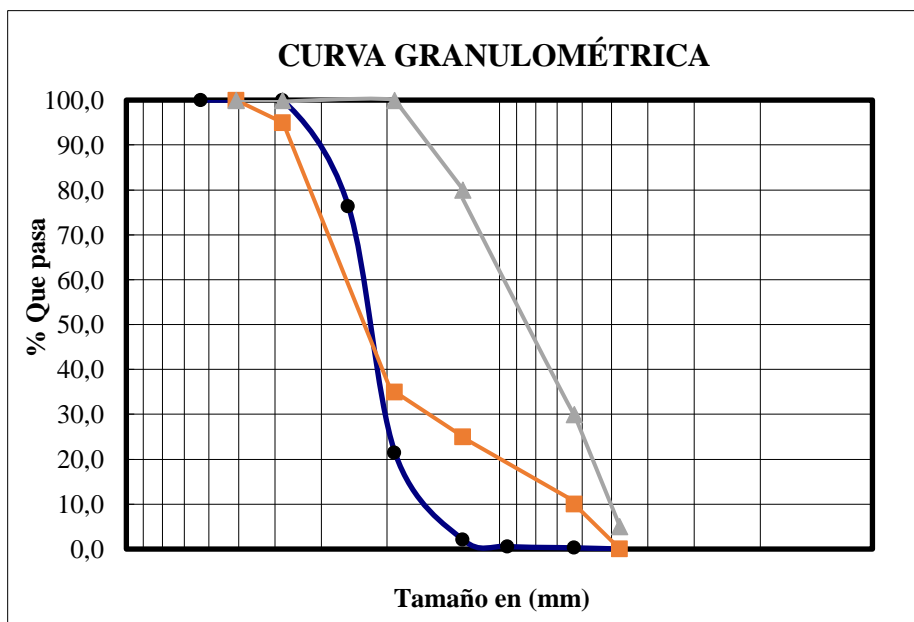
Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Retenido acumulado		% Que pasa del total	% Que pasa (ABC)	
			(gr)	(%)			
2 1/2"	63,00	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
2	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
1	25,40	3544,90	3544,90	23,63	76,40	-	-
3/4	19,05	8232,70	11777,60	78,52	21,50	35	100
1/2	12,50	2918,50	14696,10	97,97	2,00	25	80
3/8	9,50	215,30	14911,40	99,41	0,60	-	-
1/4	6,30	47,40	14958,80	99,73	0,30	10	30,00
N°4	4,75	39,30	14998,10	99,99	0,00	0	5
Base		1,10	14999,20	99,99	0,00	-	-

Suma =	30006,98
Pérdida =	15006,98
MF =	7,78

TMN = 1 1/2 "

**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 6.** Curva granulométrica de la muestra N°2 del agregado grueso



**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 14.** Granulometría de la muestra N°3 del agregado grueso

Peso total (gr) = 15000

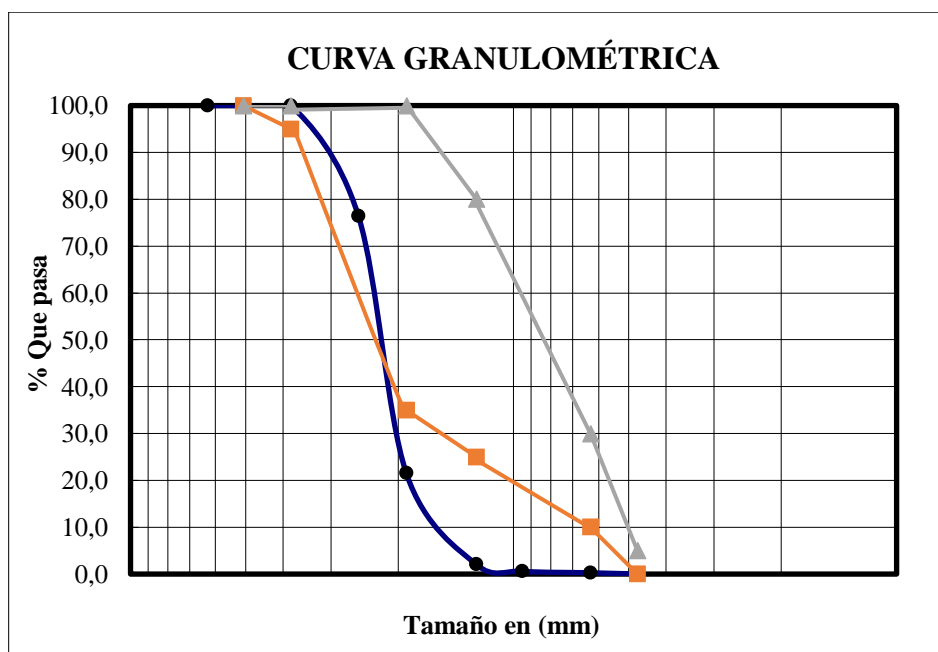
Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Retenido acumulado		% Que pasa del total	% Que pasa (ABC)	
			(gr)	(%)			
2 1/2"	63,00	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
2	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
1	25,40	2875,40	2875,40	19,17	80,80	-	-
3/4	19,05	7944,20	10819,60	72,13	27,90	35	100
1/2	12,50	3719,50	14539,10	96,93	3,10	25	80
3/8	9,50	318,70	14857,80	99,05	0,90	-	-
1/4	6,30	85,10	14942,90	99,62	0,40	10	30,00
N°4	4,75	55,20	14998,10	99,99	0,00	0	5
Base		1,20	14999,30	100,00	0,00	-	-

Suma =	30007,01	
Pérdida =	15007,01	TMN = 1 1/2 "
MF =	7,71	

**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 7.** Curva granulométrica de la muestra N°3 del agregado grueso



**Fuente:** Elaboración propia

### **3.3.2. Peso específico y absorción del agregado fino ASTM C 128**

#### **3.3.2.1. Ensayo**

##### **Preparación de la muestra**

Se pone en saturación la muestra, colocando la arena en un recipiente y cubriendo totalmente la muestra con agua, y se deja en reposo durante 24 horas.

##### **Verificación de la muestra en estado “saturado con superficie seca”**

Al terminar el reposo de 24 horas se eliminó la mayor parte de agua que cubrió la muestra.

Se procedió a secar el material utilizando con la ayuda de una secadora, siendo una fuente de aire tibio. Se removió la muestra con frecuencia para garantizar que el secado sea uniforme, hasta que los granos del agregado fino no se adhieran marcadamente entre sí.

Cuando se vio que el material llegó a la condición descrita en el anterior punto, introdujo cuidadosamente en forma suelta a un molde cónico, hasta llenar el cono. Se golpeó la superficie del material suavemente (tal forma que el molde cónico no se mueva con la acción) 25 veces con el pisón, dejado caer libremente.

A continuación, se levantó el molde verticalmente. Si existía humedad libre en el material, el cono de agregado fino mantenía su forma, por lo cual se debía combinar toda la muestra de nuevo y seguir secando uniformemente revolviendo de manera constante. Se repitió esta operación hasta que el cono se derrumbó al quitar el molde. En ese momento se considera que el agregado está en estado de “saturación con superficie seca”.

##### **Determinación de pesos**

Se insertó de inmediato por medio de embudo y una cuchara la muestra en el matraz previamente tarado, posteriormente se incluyó agua hasta llenar aproximadamente 2/3 del volumen del matraz. Agitando y golpeando cuidadosamente contra la palma de la mano el matraz para eliminar las burbujas de aire que se encuentre dentro.

Dejando reposar durante 1 hora, manteniendo la temperatura inicial, se llenó de agua hasta la marca de calibración del matraz, agitando cuidadosamente y dejando reposar un momento. Entonces procede a pesar en una balanza el matraz con la muestra y agua.

Después se vació toda la muestra con el agua a un recipiente para introducirla posteriormente sin pérdidas de material.

Cuando la muestra estuvo totalmente seca, después de 24 horas, se registró el peso.

**Figura 31.** Matraz con la muestra y agua hasta la marca de calibración



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.2.2. Resultados

**Tabla 15.** Peso específico y absorción del agregado fino

N°	Peso muestra (gr)	Peso matraz + agua (gr)	Peso matraz + agua + muestra (gr)	Peso muestra seca (gr)	Peso específico a granel " $\rho_{RS}$ " (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico s.s.s " $\rho_{RT}$ " (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente " $\rho_N$ " (gr/cm <sup>3</sup> )	Abs. (%)
10	500,00	535,00	1035,00	493,00	2,57	2,60	2,66	1,42
11	500,00	529,80	1029,80	493,00	2,57	2,61	2,67	1,42
12	500,00	495,60	995,60	493,00	2,58	2,61	2,67	1,42
Promedio					2,57	2,61	2,67	1,42

**Fuente:** Elaboración propia

### **3.3.3. Peso específico y absorción del agregado grueso ASTM C 127**

#### **3.3.3.1. Ensayo**

Una vez pesado el material a utilizar, se procedió a lavar totalmente la muestra para remover el polvo u otras impurezas superficiales adheridas y se dejó reposar en agua durante 24 horas (totalmente saturada).

Luego del proceso de saturación por 24 horas en el agua se sacó la muestra del agua, y se colocó sobre un paño grande absorbente, para que se seque.

Se colocó la muestra en un recipiente metálico con peso aproximado de 5 kg. Esta operación fue rápida para evitar de que el agregado se seque más allá de su superficie, por efecto de evaporación.

Colocando un recipiente metálico en la balanza y tarando a cero, posteriormente se vació la muestra y se determinó su peso.

Por otra parte, se calibró la balanza hidrostática, para desprejar el peso un cesto metálico. Posteriormente se sacó dicho cesto cilíndrico de tela metálica y se introdujo cuidadosamente la muestra. Se colocó y se sumergió delicadamente el cesto en la balanza calibrada anteriormente para de esta manera obtener el peso de la muestra sumergida.

Y finalmente se colocó la muestra en un recipiente y se metió al horno a una temperatura  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas. Cuando la muestra ha sido secada, se procedió a pesarla

**Figura 32.** Agregado grueso sumergido en cesto metálico



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.3.2. Resultados

**Tabla 16.** Peso específico y absorción del agregado grueso

N°	Peso muestra seca "A" (gr)	Peso muestra saturada sup. seca "B" (gr)	Peso muestra sat. dentro del agua "C" (gr)	Peso específico a granel " $\rho_{RS}$ " (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico s.s.s " $\rho_{RT}$ " (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente " $\rho_N$ " (gr/cm <sup>3</sup> )	Abs. (%)
10	4635,00	5000,00	2856,00	2,16	2,33	2,61	7,88
11	4635,00	5000,00	2854,50	2,16	2,33	2,60	7,88
12	4625,00	5000,00	2855,00	2,16	2,33	2,61	8,11
Promedio				2,16	2,33	2,61	7,95

**Fuente:** Elaboración propia

### **3.3.4. Peso unitario ASTM C 29**

#### **3.3.4.1. Ensayo**

Este ensayo se realizó para ambos agregados, el procedimiento es igual, solo hay diferencia en el molde que se utiliza.

#### **Calibración del recipiente**

Se tomó medidas de dicho recipiente, tanto el diámetro como la altura, para poder determinar su volumen mediante una fórmula.

#### **Peso unitario suelto**

Se colocó el material en un recipiente, para luego colocar en el molde cilíndrico. Con la ayuda de una cuchara se comenzó a agregar el material en forma helicoidal a una altura aproximadamente de 5 cm de la superficie del recipiente, hasta que esté totalmente lleno. Posteriormente, con la varilla de acero se procedió a quitar, con mucho cuidado, el exceso de material para que quede a nivel del recipiente, para luego a pesar el recipiente cilíndrico con el material.

#### **Peso unitario compactado**

Se colocó el material en un recipiente, para que sea más fácil su traslado al molde cilíndrico.

Con la ayuda de una cuchara se insertó el material al molde cilíndrico hasta 1/3 de su capacidad. Seguidamente con una varilla de acero, se golpeó 25 veces en forma helicoidal, asegurándose que la varilla no llegue a chocar con el fondo del molde.

Luego se siguió agregando el material hasta los 2/3 de su capacidad, se compactó con la varilla los 25 golpes.

Con la última capa, se agregó el material hasta llenar el recipiente incluso un poco más, compactando del mismo modo con 25 golpes. Posteriormente con la varilla de acero se procedió a quitar con mucho cuidado el exceso del agregado para que quede a nivel del recipiente.

Para finalizar pesando el recipiente cilíndrico con el agregado compactado.



**Figura 33.** Peso unitario suelto del agregado grueso



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 34.** Peso unitario compactado del agregado fino



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.4.2. Resultados

#### 3.3.4.2.1. Agregado fino

**Tabla 17.** Peso unitario suelto del agregado fino

N°	Peso del molde (gr)	Calibración			Peso molde + muestra suelta (gr)	Peso de la muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )
		Diámetro del molde (cm)	Altura del molde (cm)	Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )			
7	2605,00	15,20	16,50	2994,06	7150,00	4545,00	1,52
8	2605,00	15,20	16,50	2994,06	7190,00	4585,00	1,53
9	2605,00	15,20	16,50	2994,06	7160,00	4555,00	1,52
Promedio							1,52

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 18.** Peso unitario compactado del agregado fino

N°	Peso del molde (gr)	Calibración			Peso molde + muestra compactada (gr)	Peso de la muestra compactada (gr)	Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> )
		Diámetro del molde (cm)	Altura del molde (cm)	Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )			
4	2605,00	15,20	16,50	2994,06	7750,00	5145,00	1,72
5	2605,00	15,20	16,50	2994,06	7620,00	5015,00	1,68
6	2605,00	15,20	16,50	2994,06	7720,00	5115,00	1,71
Promedio							1,70

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.4.2.2. Agregado grueso

**Tabla 19.** Peso unitario suelto del agregado grueso

N°	Peso del molde (gr)	Calibración			Peso molde + muestra suelta (gr)	Peso de la muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )
		Diámetro del molde (cm)	Altura del molde (cm)	Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )			
7	5740,00	21,30	28	9977,16	17340,00	11600,00	1,16
8	5740,00	21,30	28	9977,16	17160,00	11420,00	1,14
9	5840,00	21,30	28	9977,16	17590,00	11750,00	1,18
Promedio							1,16

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 20.** Peso unitario compactado del agregado grueso

N°	Peso del molde (gr)	Calibración			Peso molde + muestra compactada (gr)	Peso de la muestra compactada (gr)	Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> )
		Diámetro del molde (cm)	Altura del molde (cm)	Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )			
4	5840,00	21,30	28	9977,16	18835,00	12995,00	1,30
5	5840,00	21,30	28	9977,16	19020,00	13180,00	1,32
6	5840,00	21,30	28	9977,16	18975,00	13135,00	1,32
Promedio							1,31

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.5. Desgaste del agregado grueso con la máquina de los Ángeles ASTM C 131

#### 3.3.5.1. Ensayo

El objetivo de esta prueba es medir la degradación del agregado cuando se somete a una serie de combinaciones de acciones como abrasión o trituración impactos y desintegración en un cilindro giratorio de acero que contiene un número especificado de esferas de acero. Para esta prueba se seleccionó el material en diferentes tamaños y proporciones con la ayuda de tamices, siguiendo las especificaciones.

Se introdujo el material en el cilindro giratorio donde se sometió al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado a 500 revoluciones.

El material que se sacó de la maquina se lava en el tamiz N°12 y posteriormente se hizo secar en el horno el retenido en dicho tamiz. Pasadas las 24 horas de secado, se pesó el material para de esa forma conocer el desgaste que se obtuvo en el ensayo.

**Figura 35.** Máquina de desgaste de los ángeles



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.5.2. Resultados

**Tabla 21.** Desgaste del agregado grueso con la máquina de los ángeles

Muestra	Gradación	Peso inicial	Peso final	% De desgaste	Especificación ABC
10	A	5000,00	3342,20	33,16 %	40 % máx.

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.6. Finura del cemento ASTM C 430

#### 3.3.6.1. Ensayo

Se pesó una muestra de 50 gr de cemento, y se los coloco en la serie de tamices de N°40 y N°200, incluyendo su tapa y base.

Se procedió al tamizado de forma manual con movimientos lentos de muñeca, sosteniendo el tamiz con ambas manos y dando pequeños golpes. Este proceso fue alrededor de 15 minutos.

Se limpió el tamiz con una brocha o cepillo en el fondo de este, para evitar que las aberturas del tamiz se obstruyeran con el paso del material fino.

Finalmente se quitó la tapa y se separó la malla N°40 vaciando la fracción de cemento que podría ser retenida, en una hoja de papel blanco y limpio.

Pesar las fracciones retenidas en cada malla y el recipiente del fondo y se registraron los datos en la planilla de ensayo correspondiente.

**Figura 36.** Muestra de 50 gr de cemento



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.6.2. Resultados

**Tabla 22.** Finura del cemento

N°	Peso del cemento Portland (gr)	Peso retenido tamiz N°40 (gr)	Peso retenido tamiz N°200 (gr)	Peso en base (gr)	Finura del cemento Portland (%)
1	50,00	0,19	2,52	46,96	5,04
2	50,00	0,00	2,56	47,10	5,12
3	50,00	0,12	2,49	47,10	4,98
				Promedio	5,05

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.7. Peso específico del cemento hidráulico ASTM C 188

#### 3.3.7.1. Ensayo

Primeramente, se pesó 64 gramos de cemento portland.

Se introdujo gasolina con la ayuda de un embudo en el vaso de precipitado. Secó el interior del vaso por encima del nivel del líquido introducido.

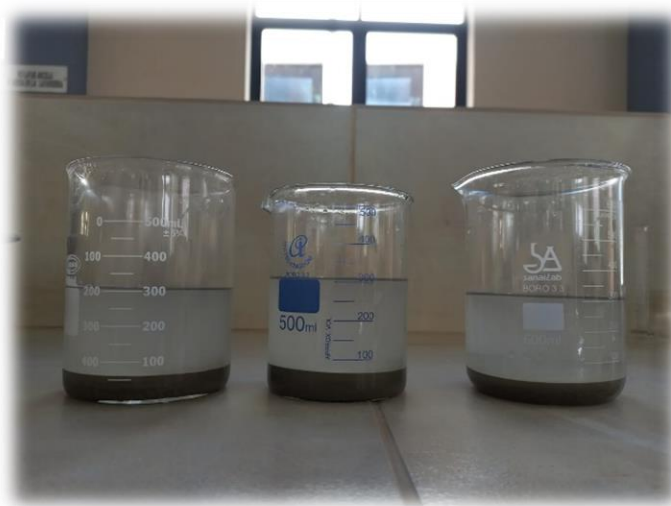
Previamente se dejó calentando agua en un recipiente hasta que alcance una temperatura ambiente.

Una vez alcanzó la temperatura deseada, se colocó el vaso en baño maría en el agua con la temperatura deseada, con el fin de estabilizar la temperatura del líquido. Usando un embudo se introdujo la muestra de cemento portland en el vaso teniendo el máximo de cuidado en no perder o dejara caer parte de la muestra fuera del vaso.

Se hizo girar en una posición inclinada poco a poco, con el fin de llenar los vacíos y sacar el aire que podría contener la muestra. Nuevamente se colocó el vaso en el baño maría donde para estabilizar nuevamente su temperatura, que no debe variar más de 0,2 °C de la temperatura inicial.

Finalmente se registró la lectura del volumen final del vaso.

**Figura 37.** Vaso de precipitado introducida la muestra de cemento



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.7.2. Resultados

**Tabla 23.** Peso específico del cemento

N°	Peso del Cemento Portland (gr)	Volumen inicial del líquido (ml)	Volumen final del líquido (ml)	Volumen total desplazado (ml)	Peso específico del cemento (gr/cm <sup>3</sup> )
4	64,00	300,00	320,50	20,50	3,12
5	64,00	300,00	320,60	20,60	3,11
6	64,00	300,00	320,60	20,60	3,11
Promedio					3,11

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.4. Dosificación

La dosificación implica establecer las proporciones apropiadas de los materiales que componen el concreto, a fin de obtener la resistencia y durabilidad requeridas.

El diseño de mezcla se calculó mediante el Método ACI 211, el cual está de forma detallada en el anexo 3.

Los valores del diseño de la mezcla que se partió por una resistencia de diseño específica a la compresión  $F_{ck}'=280 \text{ kg/cm}^2$  para obtener una resistencia mínima a flexión de  $45 \text{ kg/cm}^2$  con un cemento IP 40 y un asentamiento de 3 cm, con una relación de agua/cemento de 0,41.

Siguiendo todo el procedimiento dio la siguiente dosificación:

Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Agua
1	2,74	2,50	0,41

### 3.5. Resistencia a la compresión ASTM C 192, ASTM C 39 y la resistencia a la tracción por flexión ASTM C 192 y ASTM C 78

#### 3.5.1. Elaboración de probetas cilíndricas y prismáticas

El llenado de las probetas tanto cilíndricas como prismáticas, se realizó en 3 capas, se colocó hormigón hasta cubrir la tercera parte de la altura del molde cada vez. Una vez



colocada cada capa, se la compacta con 25 golpes de la varilla, distribuidos uniformemente sobre la superficie.

En la primera capa, los golpes deben atravesarla íntegramente pero no golpear el fondo del molde. La compactación de la segunda y la tercera capa se realiza atravesando cada una de ellas y penetrando solamente la parte superior de la capa siguiente. La finalidad de compactar el hormigón dentro de los moldes es la de eliminar los huecos que pueden quedar dentro de la masa por diferencias en las formas y tamaños de los componentes que, al disminuir la sección de la probeta, le hacen perder resistencia.

Finalmente, se enrasó la probeta al nivel del borde superior del molde, mediante una cuchara de albañil, retirando el sobrante de hormigón y trabajando la superficie hasta conseguir una cara perfectamente plana y lisa.

**Figura 38.** Elaboración de la mezcla de concreto



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 39.** Molde lleno de mezcla



**Fuente:** Elaboración propia

Durante las primeras 24 h las probetas deben quedar en el laboratorio, evitando movimientos, golpes, vibraciones. Una vez que las probetas estén endurecidas deben sumergirse en agua y quedar completamente cubiertas hasta la fecha del ensayo.

Para el ensayo de resistencia de compresión (ASTM C 39), se realizó por medio de una prensa hidráulica que comprime la probeta hasta provocarle la rotura a la misma, obteniendo de esta manera el valor último de carga (llamado carga de rotura) para ese tipo de concreto fabricado. El tiempo ideal que transcurre entre la preparación de las probetas y la edad de ensayo son 28 días.

**Figura 40.** Probeta sometida a la fuerza de compresión



**Fuente:** Elaboración propia

El ensayo de resistencia de flexión (ASTM C 78) se realizó por medio de una prensa hidráulica que somete a la viga a una fuerza de flexotracción hasta provocarle la rotura completamente, partiéndola a la mitad, obteniendo de esta manera el valor último de carga (llamado carga de rotura) para ese tipo de hormigón fabricado. El tiempo ideal que transcurre entre la preparación de las probetas y la edad de ensayo son 28 días.

**Figura 41.** Viga sometida a la fuerza de flexotracción



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.5.2. Resultados

**Tabla 24.** Resistencia a compresión

Nº	F. de vaciado	F. de rotura	Edad (días)	Lectura (kN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
1	8/5/2023	16/5/2023	8	462,60	47185,20	260,03	350,04
2	8/5/2023	16/5/2023	8	422,20	43064,40	237,32	319,47
3	8/5/2023	16/5/2023	8	369,50	37686,41	207,69	279,58
4	8/5/2023	16/5/2023	8	489,80	49959,60	275,32	370,63
5	8/5/2023	16/5/2023	8	478,40	48800,27	268,93	362,03
6	8/5/2023	16/5/2023	8	468,60	47797,20	263,41	354,58
7	8/5/2023	16/5/2023	8	466,30	47562,60	262,11	352,84
8	8/5/2023	16/5/2023	8	504,00	51408,00	283,30	381,37
9	9/5/2023	17/5/2023	8	383,20	39086,40	215,40	289,96
10	9/5/2023	17/5/2023	8	407,90	41605,80	229,29	308,65
11	9/5/2023	17/5/2023	8	441,20	44998,16	247,98	333,82
12	9/5/2023	17/5/2023	8	479,00	48855,68	269,24	362,44
13	9/5/2023	18/5/2023	9	386,50	39423,00	217,26	284,44
14	9/5/2023	18/5/2023	9	433,40	44206,80	243,62	318,96
15	9/5/2023	18/5/2023	9	493,00	50286,00	277,12	362,82
16	9/5/2023	18/5/2023	9	510,60	52081,20	287,01	375,78
17	10/5/2023	19/5/2023	9	421,60	43003,20	236,99	310,28
18	10/5/2023	19/5/2023	9	436,80	44553,60	245,53	321,46
19	10/5/2023	19/5/2023	9	492,10	50194,20	276,62	362,16
20	10/5/2023	19/5/2023	9	489,30	49908,60	275,04	360,10
21	11/5/2023	19/5/2023	8	481,20	49082,40	270,49	364,12
22	11/5/2023	19/5/2023	8	529,50	54009,00	297,64	400,67
23	11/5/2023	19/5/2023	8	435,30	44400,60	244,69	329,39
24	11/5/2023	19/5/2023	8	525,50	53601,00	295,39	397,64
25	15/5/2023	25/5/2023	10	394,20	40210,24	221,59	282,89
26	15/5/2023	25/5/2023	10	487,00	49670,38	273,73	349,44
27	15/5/2023	25/5/2023	10	395,10	40300,20	222,09	283,52
28	15/5/2023	25/5/2023	10	498,20	50818,19	280,05	357,52
29	15/5/2023	25/5/2023	10	465,00	47430,31	261,38	333,68
30	15/5/2023	25/5/2023	10	452,30	46134,60	254,24	324,57

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 25.** Resistencia a flexión

Nº	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad (días)	Carga "F" (kN)	Carga "F" (kg)	Flextr. (fct, f) (kg/cm <sup>2</sup> )	Res. flextr. (fct) 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
1	8/5/2023	17/5/2023	9	28,40	2896,80	38,11	49,90
2	8/5/2023	17/5/2023	9	23,40	2386,80	30,19	39,53
3	8/5/2023	17/5/2023	9	32,60	3325,20	43,18	56,53
4	8/5/2023	17/5/2023	9	24,50	2499,00	31,20	40,86
5	9/5/2023	18/5/2023	9	28,30	2886,60	36,04	47,19
6	9/5/2023	18/5/2023	9	26,60	2713,20	33,45	43,79
7	10/5/2023	19/5/2023	9	25,10	2560,20	34,14	44,69
8	10/5/2023	19/5/2023	9	26,90	2743,80	35,63	46,65
9	10/5/2023	19/5/2023	9	28,60	2917,20	36,43	47,69
10	10/5/2023	19/5/2023	9	29,10	2968,20	37,55	49,16
11	10/5/2023	19/5/2023	9	30,20	3080,40	38,97	51,02
12	10/5/2023	19/5/2023	9	29,80	3039,60	37,96	49,69
13	11/5/2023	19/5/2023	8	27,20	2774,40	35,10	47,24
14	11/5/2023	19/5/2023	8	25,40	2590,80	32,77	44,12
15	11/5/2023	19/5/2023	8	28,80	2937,60	37,16	50,02
16	11/5/2023	19/5/2023	8	29,70	3029,40	38,32	51,59
17	15/5/2023	25/5/2023	10	27,90	2845,80	35,54	45,36
18	15/5/2023	25/5/2023	10	28,90	2947,80	36,81	46,99
19	15/5/2023	25/5/2023	10	26,20	2672,40	33,81	43,16
20	15/5/2023	25/5/2023	10	26,20	2672,40	32,94	42,06
21	17/5/2023	26/5/2023	9	28,80	2937,60	37,16	48,65
22	17/5/2023	26/5/2023	9	27,50	2805,00	35,95	47,06
23	18/5/2023	26/5/2023	8	31,00	3162,00	38,48	51,81
24	18/5/2023	26/5/2023	8	28,50	2907,00	36,30	47,53
25	18/5/2023	26/5/2023	8	27,40	2794,80	34,90	45,69
26	18/5/2023	26/5/2023	8	26,80	2733,60	34,58	45,27
27	22/5/2023	30/5/2023	8	27,30	2784,60	34,33	44,94
28	22/5/2023	30/5/2023	8	28,20	2876,40	34,57	45,26
29	22/5/2023	30/5/2023	8	25,60	2611,20	32,61	42,69
30	22/5/2023	30/5/2023	8	27,90	2845,80	35,54	46,53

**Fuente:** Elaboración propia

**CAPÍTULO IV**

**ANÁLISIS DE**

**RESULTADOS**

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realizó el análisis y la evaluación de los resultados que se obtuvo de los ensayos realizados en el laboratorio.

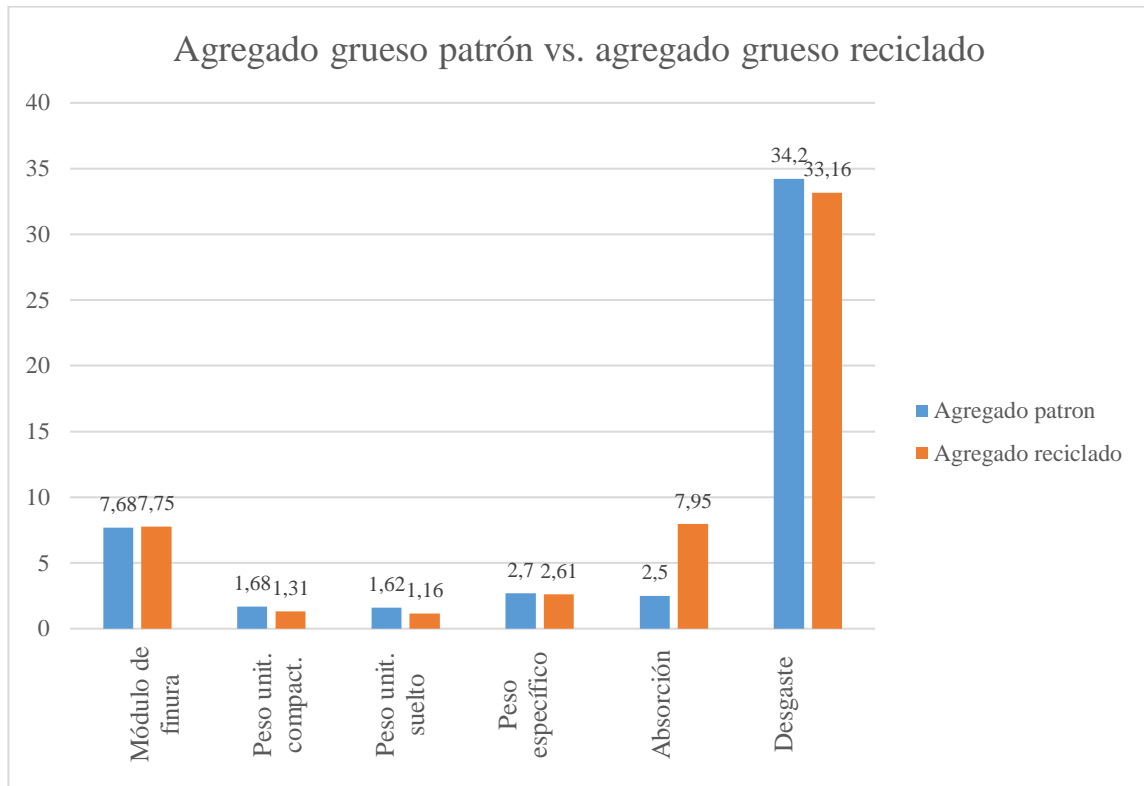
#### 4.1. Comparación de la caracterización del agregado grueso de concreto reciclado con un agregado grueso patrón

**Tabla 26.** Comparación de características entre un agregado patrón y el agregado grueso reciclado

Ensayo	Patrón	Reciclado	Unidad	% diferencia
Módulo de finura	7,68	7,75	-	0,91
Peso unitario compactado	1,68	1,31	gr/cm <sup>3</sup>	-21,71
Peso unitario suelto	1,62	1,16	gr/cm <sup>3</sup>	-28,27
Peso específico	2,70	2,61	gr/cm <sup>3</sup>	-3,44
Porcentaje de absorción	2,50	7,95	%	218,12
Desgaste de los ángeles	34,20	33,16	%	-3,04

**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 8.** Agregado grueso patrón vs. agregado grueso reciclado



**Fuente:** Elaboración propia

Se realizó la comparación de los valores de las características entre un agregado grueso patrón y un agregado grueso de concreto reciclado. Los valores patrón fueron obtenidos de la base de datos del laboratorio de hormigón, dichos valores son de un agregado grueso del río Guadalquivir a la altura del municipio de San Lorenzo.

Como se puede observar tanto en la tabla como en la gráfica, los valores son similares, excepto en los valores del peso unitario que tuvieron un descenso de más del 20% con respecto al patrón y en el porcentaje de absorción, ya que del agregado reciclado es un 200 % mayor al patrón, esto se puede deber a que contiene gran cantidad de poros visibles y por la presencia de cemento que genera una mayor absorción.



#### 4.2. Evaluación de los resultados de la resistencia a compresión

**Tabla 27.** Resistencia a compresión

Nº	Resistencia compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
1	279,58
2	282,89
3	283,52
4	284,44
5	289,96
6	308,65
7	310,28
8	318,96
9	319,47
10	321,46
11	324,57
12	329,39
13	333,68
14	333,82
15	349,44
16	350,04
17	352,84
18	354,58
19	357,52
20	360,10
21	362,03
22	362,16
23	362,44
24	362,82
25	364,12
26	370,63
27	375,78
28	381,37
29	397,64
30	400,67

**Fuente:** Elaboración propia

Realizado el ensayo de compresión, el equipo nos da el valor de carga que se necesitó para hacer fallar la probeta, dividiendo este valor con el área donde fue sometida la carga, nos da el resultado de la resistencia a compresión.

La rotura de probetas se realizó antes de los 28 días, por lo que se proyectó el valor aplicando una fórmula en donde se introduce un factor de tiempo, el cual se extrajo de la siguiente tabla:

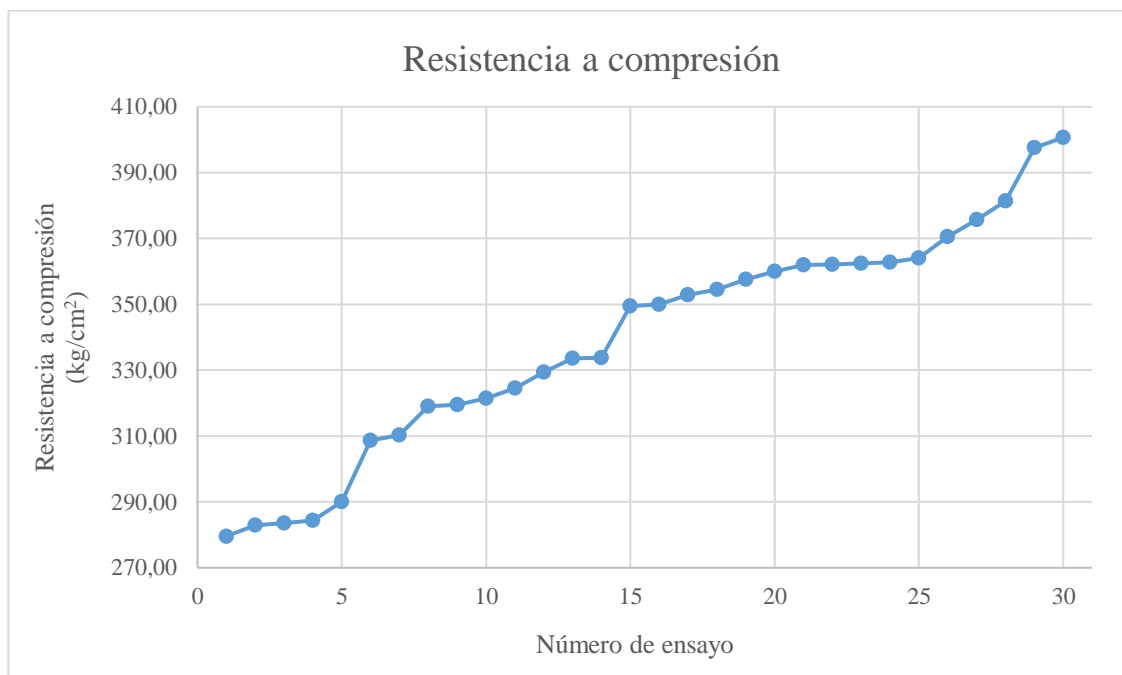
**Tabla 28.** Factor de tiempo menor a 28 días

T Días	$F = \frac{1.35 \times T + 10}{T + 20}$	T Días	$F = \frac{1.35 \times T + 10}{T + 20}$
0	0,500	14	0,850
1	0,540	15	0,864
2	0,577	16	0,878
3	0,611	17	0,890
4	0,642	18	0,903
5	0,670	19	0,914
6	0,696	20	0,925
7	0,720	21	0,935
8	0,743	22	0,945
9	0,764	23	0,955
10	0,783	24	0,964
11	0,802	25	0,972
12	0,819	26	0,980
13	0,835	27	0,988

**Fuente:** SNC

Los resultados de la resistencia a compresión varían y para poder observar de mejor manera, se ordenó de menor a mayor. El menor valor es de 279,58 kg/cm<sup>2</sup>, el cual es menor al valor de resistencia a compresión de diseño, esto se puede atribuir al uso de agregado grueso de concreto reciclado.

**Gráfico 9.** Resistencia a compresión



**Fuente:** Elaboración propia

En el gráfico 9 se puede visualizar la distribución de forma ascendente de los valores de la resistencia a compresión.

#### 4.3. Evaluación de los resultados de la resistencia a flexión

**Tabla 29.** Resistencia a flexión

Nº	Resistencia flexión (kg/cm <sup>2</sup> )
1	39,53
2	40,86
3	42,06
4	42,69
5	43,16
6	43,79
7	44,12
8	44,69
9	44,94
10	45,26

11	45,27
12	45,36
13	45,69
14	46,53
15	46,65
16	46,99
17	47,06
18	47,19
19	47,24
20	47,53
21	47,69
22	48,65
23	49,16
24	49,69
25	49,90
26	50,02
27	51,02
28	51,59
29	51,81
30	56,53

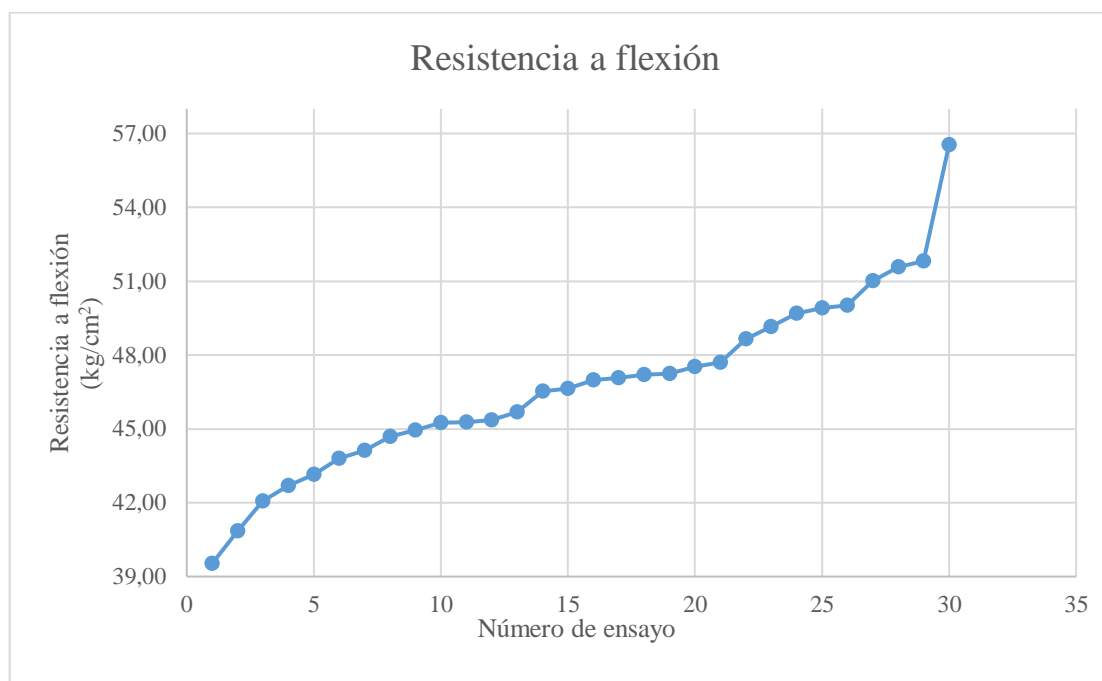
**Fuente:** Elaboración propia

Al realizar el ensayo de flexión, la probeta prismática es sometida a una carga que la flexotraciona hasta el punto de rotura. El valor de la resistencia a flexión se obtiene a partir de multiplicar el valor de carga por tres y dividido entre el área al cuadrado.

De igual manera la rotura de las vigas se realizó antes de los 28 días, por lo que también se recurrió al uso de la tabla 28, para poder proyectar la resistencia,

Los resultados de la resistencia a flexión, se ordenaron de menor a mayor y se puede notar que los primero ocho valores no cumplen con el valor de resistencia mínima a flexión de  $45 \text{ kg/cm}^2$  que nos exige la norma, esto es debido al empleo de agregado grueso de concreto reciclado.

**Gráfico 10.** Resistencia a flexión



**Fuente:** Elaboración propia

En el gráfico 10 se puede observar de mejor manera la distribución de los valores de la resistencia a flexión.

#### 4.4. Estadística descriptiva

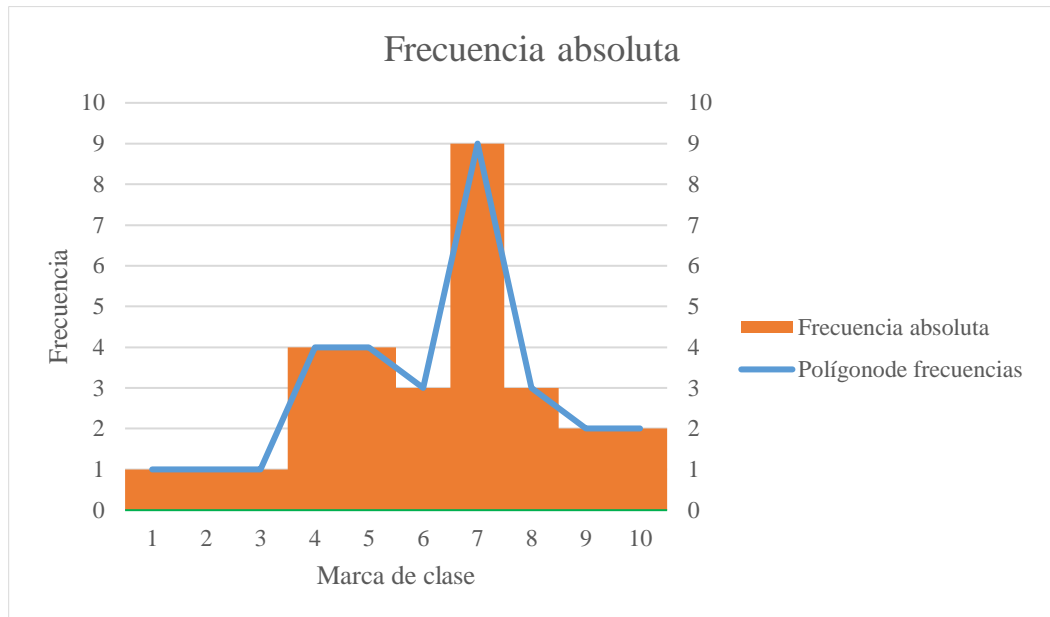
##### 4.4.1. Cálculo de curva de frecuencias, relativa y acumulada

**Tabla 30.** Frecuencia de la resistencia a compresión

n	L. sup.	L. inf.	Marca de clase	Frecuencia simple		Frecuencia acumulada	
				fi	fi (%)	Fi	Fi (%)
1	279,58	291,69	285,60	1	3,30	1	3,30
2	291,69	303,80	297,70	1	3,30	2	6,70
3	303,80	315,90	309,90	1	3,30	3	10,00
4	315,90	328,01	322,00	4	13,30	7	23,30
5	328,01	340,12	334,10	4	13,30	11	36,70
6	340,12	352,23	346,20	3	10,00	14	46,70
7	352,23	364,34	358,30	9	30,00	23	76,70
8	364,34	376,45	370,40	3	10,00	26	86,70
9	376,45	388,56	382,50	2	6,70	28	93,30
10	388,56	400,67	394,60	2	6,70	30	100
				30	100		

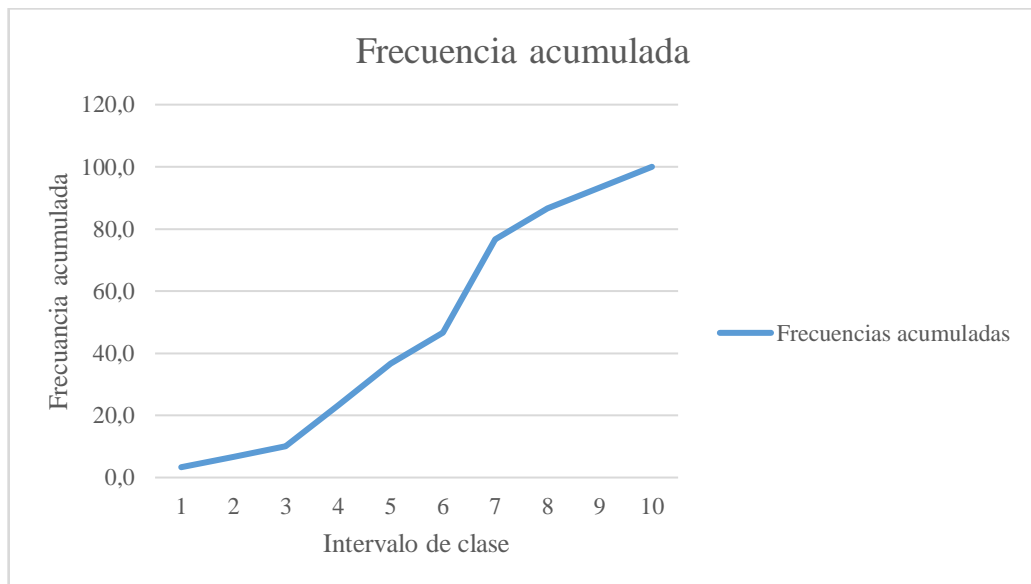
**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 11.** Frecuencia absoluta de resistencia a compresión



**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 12.** Frecuencia acumulada de resistencia a compresión



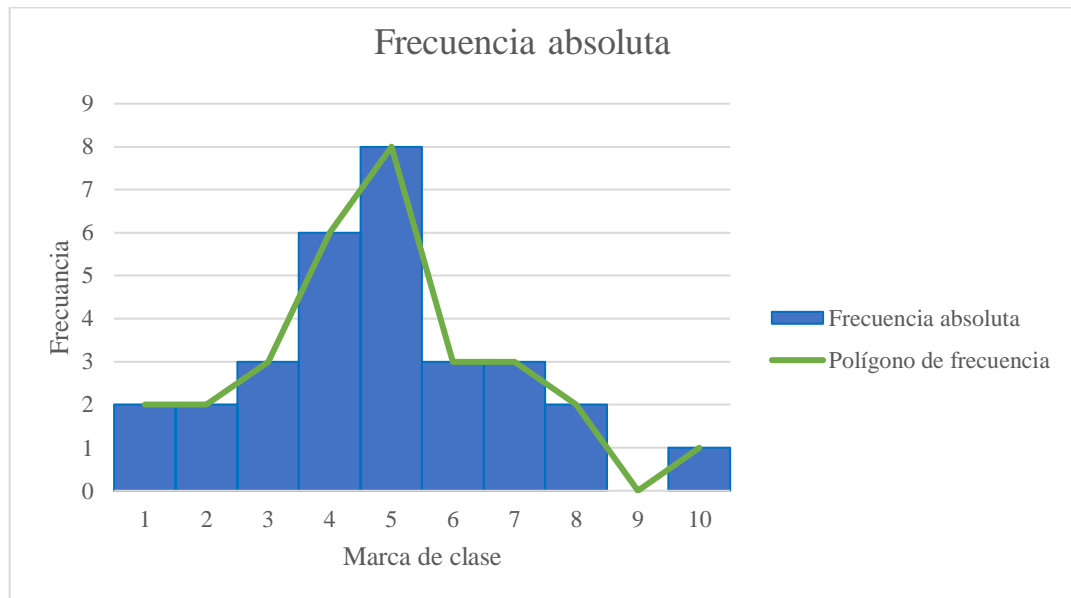
**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 31.** Frecuencia de la resistencia a flexión

n	L. sup.	L. inf.	Marca de clase	Frecuencia simple		Frecuencia acumulada	
				fi	fi (%)	Fi	Fi (%)
1	39,53	41,23	40,40	2	6,70	2	6,70
2	41,23	42,93	42,10	2	6,70	4	13,30
3	42,93	44,63	43,80	3	10,00	7	23,30
4	44,63	46,33	45,50	6	20,00	13	43,30
5	46,33	48,03	47,20	8	26,70	21	70,00
6	48,03	49,73	48,90	3	10,00	24	80,00
7	49,73	51,43	50,60	3	10,00	27	90,00
8	51,43	53,13	52,30	2	6,70	29	96,70
9	53,13	54,83	54,00	0	0,00	29	96,70
10	54,83	56,53	55,70	1	3,30	30	100
				30	100		

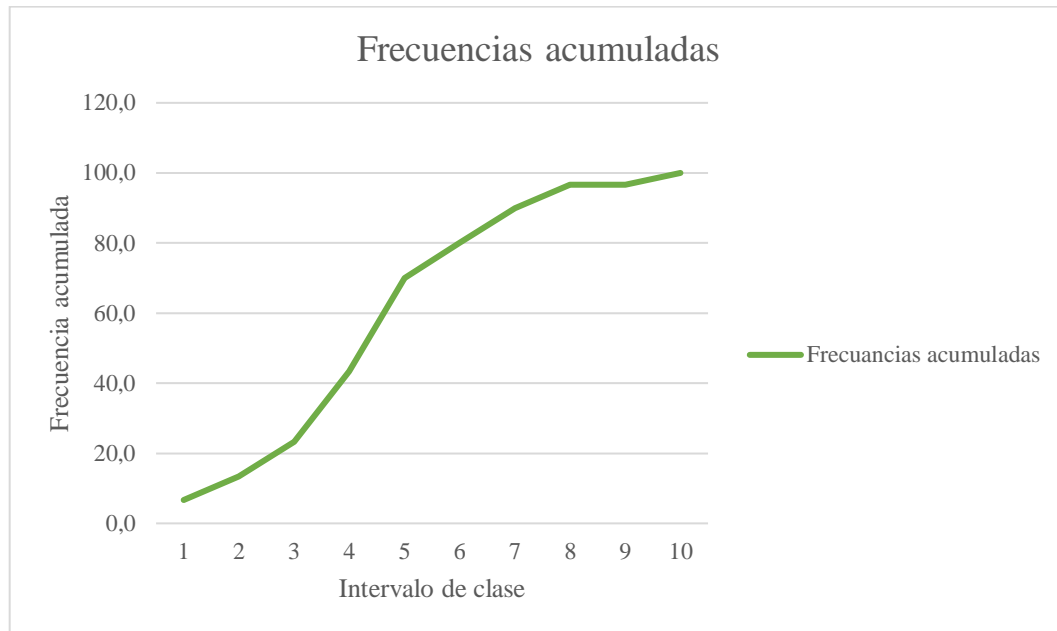
**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 13.** Frecuencia absoluta de resistencia a flexión



**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 14.** Frecuencia acumulada de resistencia a flexión



**Fuente:** Elaboración propia

La frecuencia absoluta, es una medida estadística que nos da información acerca de la cantidad de veces que se repite un suceso al realizar un número determinado de experimentos aleatorios. Un histograma de frecuencia absoluta es un tipo de histograma en el cual se representan las frecuencias absolutas del conjunto de datos, cada barra de un histograma de frecuencias absolutas tiene una anchura proporcional a la amplitud del intervalo y una altura proporcional a la frecuencia absoluta del intervalo. En los gráficos 11 y 13 se puede observar las veces que se repiten las marcas de clases delimitadas por los valores de las resistencias de compresión y flexión, respectivamente.

En polígono de frecuencias acumuladas es un tipo de gráfico que representa las frecuencias acumuladas de un conjunto de datos mediante puntos y se unen con líneas. Es decir, un polígono de frecuencias acumuladas es la representación gráfica de las frecuencias acumuladas de los datos de las resistencias a compresión y flexión como se puede observar en los gráficos 12 y 14.



#### 4.4.2 Cálculos de medidas de tendencia central y medidas de dispersión

**Tabla 32.** Medidas de tendencia de resistencia a compresión

Descripción	Valor
Media	349,31
Error típico	5,06
Mediana	353,71
Moda	-
Desviación estándar	27,71
Varianza de la muestra	768,02
Curtosis	0,06
Coefficiente de asimetría	-0,37
Rango	121,09
Mínimo	279,58
Máximo	400,67
Suma	10479,26
Cuenta	30,00

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 33.** Medidas de tendencia de resistencia a flexión

Descripción	Valor
Media	46,76
Error típico	0,65
Mediana	46,82
Moda	-
Desviación estándar	3,58
Varianza de la muestra	12,85
Curtosis	0,78
Coefficiente de asimetría	0,40
Rango	17,00
Mínimo	39,53
Máximo	56,53
Suma	1402,66
Cuenta	30,00

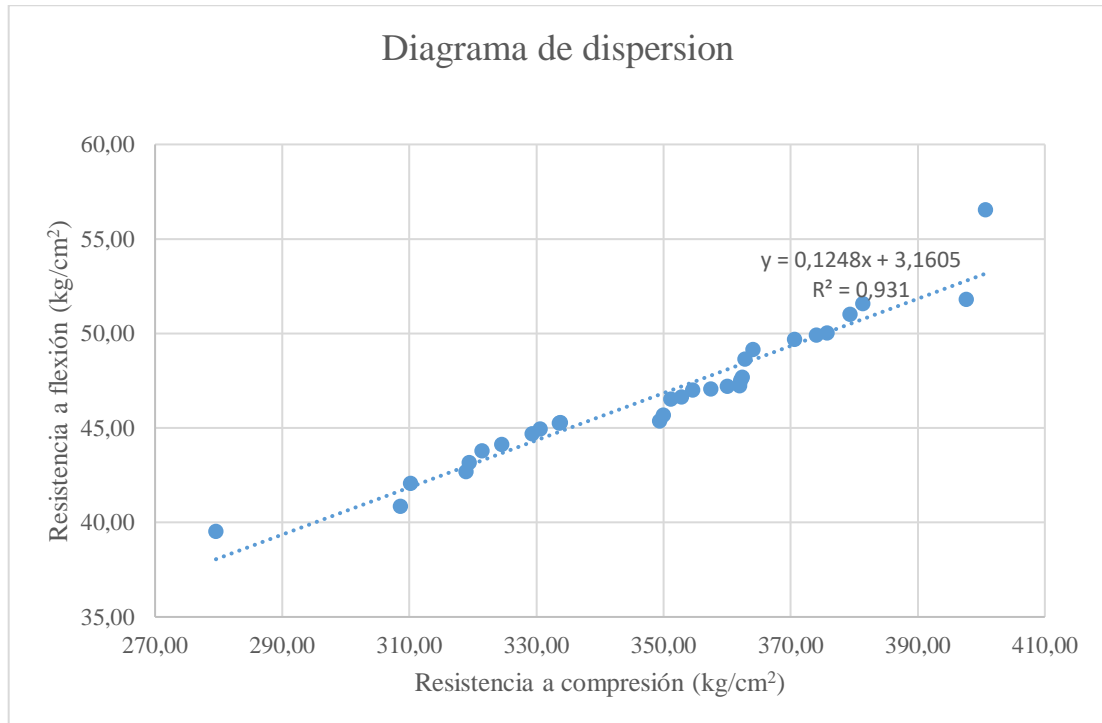
**Fuente:** Elaboración propia

Las tablas 32 y 33 muestra un resumen de la información de datos de la resistencia a compresión y flexión.

#### 4.5. Análisis de correlación

##### 4.5.1. Diagrama de dispersión

**Gráfico 15.** Diagrama de dispersión de la resistencia a compresión y la resistencia a flexión



**Fuente:** Elaboración propia

El diagrama de dispersión es un gráfico que utiliza las coordenadas cartesianas para mostrar los valores de dos variables para un conjunto de datos. El diagrama permite analizar si existe algún tipo de relación entre dos variables. En gráfico 15 se presenta el diagrama de dispersión de la resistencia a compresión (x) y la resistencia a flexión (y). Además, este diagrama generó la ecuación de correlación entre las variables

##### 4.5.2. Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación de Pearson es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables continuas.

El coeficiente de correlación puede tomar un rango de valores de +1 a -1. Un valor de 0 indica que no hay asociación entre las dos variables. Un valor mayor que 0 indica una asociación positiva. Es decir, a medida que aumenta el valor de una variable, también lo hace el valor de la otra. Un valor menor que 0 indica una asociación negativa; es decir, a medida que aumenta el valor de una variable, el valor de la otra disminuye. En este caso dio un valor positivo cercano a 1, lo que quiere decir que existe una gran correlación entre las variables.

$$r = \frac{\text{cov}(x, y)}{S_x * S_y}$$

$$r = 0,9648$$

#### 4.6. Estadística inferencial

##### 4.6.1. Prueba de hipótesis

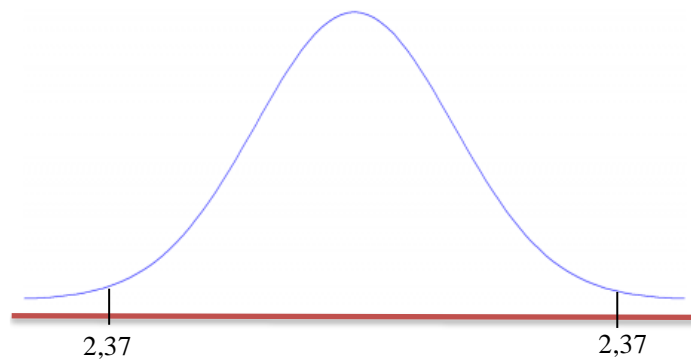
Hipótesis nula	$H_0$	$\rho = 0$	No existe correlación lineal
Hipótesis alternativa	$H_1$	$\rho \neq 0$	Existe correlación lineal
Estadístico de prueba	t	5,020	
Valor crítico	n	30	
Grado libertad	gl	28	
Nivel significancia	$\alpha$	0,05	
	t (n-2; $\alpha/2$ )	2,37	

Se debe rechazar la hipótesis nula porque  $t >$  valor crítico.

Existe evidencia de que el coef. de correlación es diferente de 0.

La prueba de hipótesis es positiva, lo que quiere decir que existe correlación lineal entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión.

**Gráfico 16.** Prueba de hipótesis



**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.6.2 Intervalos de confianza

**Tabla 34.** Intervalo de confianza (CI) de resistencia a compresión

Media	x1	349,31
Nivel significancia	z	0,95
Desviación	s1	27,71
Tamaño muestra	n	30
Límite superior	354,12	(kg/cm <sup>2</sup> )
Límite inferior	344,50	(kg/cm <sup>2</sup> )

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 35.** Intervalo de confianza (CI) de resistencia a flexión

Media	x2	46,76
Nivel significancia	z	0,95
Desviación	s2	3,58
Tamaño muestra	n	30
Límite superior	47,38	(kg/cm <sup>2</sup> )
Límite inferior	46,13	(kg/cm <sup>2</sup> )

**Fuente:** Elaboración propia

Los intervalos de confianza describen la variabilidad entre la medida obtenida del estudio y la medida real de la población (el valor real). Corresponde a un rango de valores, cuya distribución es normal y en el cual se encuentra, con alta probabilidad, el valor real de una determinada variable.

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Se determinó una correlación positiva entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión usando agregado grueso de concreto reciclado, por lo que es viable el uso de este material para la elaboración de capas de rodadura de pavimentos rígidos.

Se definió las propiedades físicas del agregado fino que nos sirvió para realizar la dosificación de la mezcla; las propiedades físicas y mecánicas del agregado grueso de concreto reciclado siguiendo el mismo procedimiento que el de un agregado grueso normal establecido por la ASTM, ya que no existe ninguna norma boliviana específica para este tipo de material.

Sabiendo que se usó un nuevo material (agregado grueso de concreto reciclado), se comparó los resultados de su caracterización con los resultados de un agregado grueso patrón (el cual fue de la misma zona de origen del agregado reciclado), obteniendo esa información de la base de datos del Laboratorio de hormigón y resistencia de los materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Al realizar la comparación, se observó similitud entre los valores, a excepción de: peso unitario suelto y compactado, los cuales fueron menores con más del 20% con respecto al patrón, y el porcentaje de absorción, siendo que el agregado patrón presentó un porcentaje de 2,50 % y el agregado reciclado presentó un porcentaje de 7,95%, siendo que este último posee incremento de más del 200% con relación al patrón. Esta diferencia de valores de debe a la gran porosidad que presenta el agregado grueso reciclado, ya que el volumen de espacios vacíos resta peso e incrementa el volumen de agua que puede adquirir.

Con los valores de la caracterización de los materiales, se pudo establecer la dosificación para la mezcla de concreto, en la cual se observó que la dosificación de la arena es de 2,74 y del agregado grueso es 2,50. La dosificación del agregado grueso es menor que la del agregado fino, esto se dio por que el peso unitario del agregado grueso es menor al de un agregado estándar.

Con todos los datos necesarios de la caracterización de los materiales, posteriormente calculando la dosificación del hormigón, se elaboró las probetas cilíndricas y las probetas prismáticas y en su proceso se cumplió con el asentamiento estimado de 3 cm, además de controlar el adecuado curado.

Se determinó las resistencias de compresión, teniendo como valor mínimo 279,58 kg/cm<sup>2</sup> dicho valor no cumplió con el valor de la resistencia a compresión de diseño con la que se estableció la dosificación y un valor máximo de 400,67 kg/cm<sup>2</sup>. También se obtuvo las resistencias a flexión, teniendo un valor mínimo de 39,53 kg/cm<sup>2</sup> valor que no cumple con el valor mínimo de resistencia a flexión que es de 45 kg/cm<sup>2</sup> y un valor máximo de 56,53 kg/cm<sup>2</sup>.

De acuerdo a los resultados obtenidos de los ensayos realizados como mínimo, son suficientes para afirmar la relación que existe entre la resistencia de compresión con la resistencia a flexión, habiendo comprobado estadísticamente, se considera como válida la correlación determinada entre estas dos variables. Así mismo se obtuvo la ecuación de dicha relación que es  $y = 0,1248x + 3,1605$  siendo “y” la resistencia a flexión y “x” la resistencia a compresión.

## **5.2. Recomendaciones**

El uso de agregado grueso de concreto reciclado posee grandes beneficios ambientales porque se puede reducir en gran medida la contaminación, pudiendo convertir el reciclaje de concreto en parte de un desarrollo sostenible, además de que sería beneficioso para nuestros ríos. También puede ser usado en lugares donde no se cuente con agregados naturales o que su transporte sea emaciado lejos y costoso.

Asegurarse que los materiales y equipos usados en la elaboración de la mezcla estén totalmente limpios, ya que a veces quedan residuos de mezclas anteriores las cuales pueden tener características diferentes y esto puede alterar resultados.

Es necesario tener en cuenta las condiciones de humedad en los agregados con la cual se elabora el diseño de mezclas, ya que esto influye en las cantidades de cada material que conforman la unidad volumétrica de diseño.



En cuanto los especímenes del hormigón, desde el momento en que son compactados, hay que manejarlos con cuidado, evitando moverlos demasiado.

Una vez que las probetas se encuentren en la etapa de curado, tener en cuenta que en todo momento deben estar completamente sumergidas, ya que en ocasiones el agua se infiltra y/o se evapora.

Las correlaciones son muy útiles en casos donde, para poder determinar una de sus variables tiene mayores exigencias, costos, etc.

Se puede emplear la correlación encontrada principalmente para cálculos relacionados con el diseño de pavimentos y de manera secundaria en otras aplicaciones de la tecnología del concreto, debido a las características de los materiales utilizados.

Para una posterior investigación, se pone en consideración, utilizar escombros de diferentes procedencias para el agregado grueso de concreto reciclado, incluso trabajar con agregado fino reciclado.