

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUCCIÓN**

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

Los pavimentos nacen a raíz de la necesidad de tener una superficie que brinde comodidad y sea segura para la circulación de vehículos y peatones. Estos deben ser capaces de soportar solicitaciones de tráfico y ambientales a lo largo de su vida útil.

Una de las alternativas para solucionar esta necesidad son los pavimentos articulados, o adoquinados, los cuales existen desde la época del Imperio Romano, pero su desarrollo e investigación no se intensificó hasta la década de 1970, brindando excelentes resultados para su uso en estacionamientos, calles urbanas, paseos peatonales y otras similares donde se requería altas resistencias.

Algunos beneficios de los pavimentos articulados frente a otras opciones es que son de fácil y rápida colocación, su mantenimiento es simple y económico, al ser articulados no se producen baches ni se presentan fisuras, brindan alta resistencia para el uso peatonal o vehicular, además de tener mejor resistencia ante la acción de los agentes abrasivos, se pueden renovar de manera parcial, y se pueden reutilizar en su totalidad.

El pavimento articulado está conformado por una capa de rodadura de adoquines, sobre una cama de arena de 40 mm a 50 mm confinada lateralmente por cordones de hormigón simple, el espesor de los adoquines varía entre los 50 mm hasta los 100 mm dependiendo de las solicitaciones de carga, su resistencia a compresión oscila entre los  $210 \text{ kg/cm}^2$  y  $450 \text{ kg/cm}^2$ .

Al ser sometidos a carga vehicular, los adoquines transmiten parte de la carga longitudinalmente gracias al efecto de cuña que se genera con las piezas vecinas, la cual aumenta mientras la carga se incrementa.

Bajo la circunstancia antes mencionada, se observa que uno de los materiales usados para brindar resistencia ante esfuerzos laterales son las geoceldas, las cuales tienen

amplia aplicabilidad en estabilización de suelos dando soporte e incrementando la resistencia ante dichas solicitaciones.

Ante los notables beneficios que brindan ambos materiales se realizaron estudios del desempeño siendo aplicados en conjunto para el diseño de pavimentos, obteniendo como resultado capas de rodadura con mayores resistencias ante altas solicitaciones de carga. La metodología usada es de verter la mezcla de hormigón hidráulico sobre las geoceldas ya instaladas, fabricando así el pavimento in situ.

**Figura 1 Pavimento construido con geoceldas como refuerzo.**



Fuente: (Presto Geosystems, 2018)

La diferencia de resistencias a compresión en los bloques de hormigón, puede ser determinado a partir del ensayo de compresión simple con una prensa hidráulica. Para esto es necesario realizar la correspondiente caracterización a los agregados, como ser granulometría, densidad, peso específico y contenido de humedad, de igual manera con el cemento, aunque en este último basta con la finura y el peso específico.

Con estos valores ya obtenidos, se debe dosificar la mezcla de hormigón, una vez vertido en los moldes se debe esperar al menos 7 días para su posterior ensayo a compresión.

Estos resultados servirán de base para futuras investigaciones y desarrollo de metodologías de diseño con esta tecnología adaptada a este medio.

Algunos ejemplos de aplicación se los tiene en Sud África y en Estados Unidos, donde se construyeron pavimentos articulados empleando geoceldas como sistema de confinamiento para reforzar la estructura.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

La resistencia de un pavimento es una de las características principales para el correcto funcionamiento de un paquete estructural en una vía de comunicación.

El pavimento articulado mostró ser una gran alternativa como capa de rodadura soportando altas cargas, su uso es muy amplio en áreas urbanas, como ser calles, estacionamientos y parqueos. Todo esto agregado a su mayor tiempo de vida en comparación con otras alternativas, por lo que resulta muy conveniente para su uso en lugares donde se vaya a tener alto tráfico, o esté sometido a grandes cargas.

El estudio de los pavimentos articulados y su aplicación es muy limitado en esta región, teniendo estos muchos beneficios, se cuenta con una normativa nacional para los pavimentos articulados, la cual está detallada en el "Manual de Especificaciones Técnicas Generales de Construcción" brindado por la Administradora Boliviana de Caminos.

Las propiedades mecánicas de los bloques para pavimento articulado están normalmente dadas de fábrica, siendo muchas veces estos valores poco flexibles considerando diseños con altas cargas. Para eliminar esta limitante se plantea mejorar su resistencia empleando la técnica de construcción del pavimento articulado reforzado con geoceldas.

Las geoceldas son comúnmente utilizadas para estabilización de suelos, brindando soporte contra esfuerzos laterales a los que es sometido el suelo, aunque el campo de

aplicación para estas se demostró que es muy amplio en otros países, desarrollándose así una nueva alternativa en pavimentos mediante la inserción de geoceldas en la capa de rodadura.

### **1.2.1 Aporte académico.**

Verificar el incremento en la resistencia del hormigón sin hacer uso de las geoceldas y cuando se emplea ésta en la construcción del pavimento, se convierte directamente en un aporte académico importante para la comunidad, ya que se comprobaría la influencia de incluir las geoceldas en el pavimento, haciendo uso de materiales de la zona, además de profundizar más esta alternativa de pavimentación.

El análisis de la relación de beneficio desde el punto de vista de la resistencia a compresión, brinda un panorama más amplio a la hora de elegir un método de pavimentación.

Dar inicio a la investigación de nuevas alternativas en pavimentos, en especial a métodos que incluyen el uso de geoceldas como refuerzo a la capa de rodadura.

### **1.2.2 Aplicación técnica – práctica.**

Este pavimento está conformado por bloques construidos sobre una matriz de geoceldas llenas de hormigón. Lo cual brinda un adecuado nivel de transferencia de carga entre bloques, dada la geometría de la pared de la geocelda y la mínima separación entre bloques, permite un excelente desempeño frente a cargas de tránsito altas, lentas y puntuales. El pequeño espesor de las fisuras inducidas por la geometría de la geocelda impide el ingreso de agua desde la superficie hacia las capas inferiores de la estructura del pavimento. Asimismo, se obtiene una alta resistencia a cargas de punzonamiento debido al desempeño del hormigón frente a cargas de compresión y su comportamiento articulado, que admite deformaciones puntuales de la estructura sin que esta se agriete. La ventaja de su uso para lugares donde se tengan niveles de tráfico altos, es de poseer menor espesor en comparación a una losa de hormigón armado de un pavimento rígido, y una mayor transferencia de cargas e impermeabilidad comparado con un pavimento articulado de losetas sobre una cama de arena.

## **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.3.1 Situación problemática.**

Un problema frecuente que se observa en la región son las fallas en las capas de rodadura en vías donde se tienen altas cargas de tráfico, presentando diversas patologías como ser fisuras o agrietamientos, estos producidos muchas veces por la excesiva carga aplicada sobre la estructura.

Siendo el propósito principal de un pavimento brindar una superficie por la cual se pueda circular de manera cómoda y segura, se observa la necesidad de realizar diseños más eficientes que puedan cumplir con las exigencias y se aproveche las propiedades que brinda cada material para soportar las diversas cargas que se le aplican. Por lo que se identifica como una opción al pavimento articulado.

En este medio no se ha estudiado de manera significativa el comportamiento de los pavimentos articulados en sus diferentes tipos, limitándose a los enlosetados o adoquinados. A pesar que estos tipos tienen excelentes propiedades de resistencia, existen otras opciones de pavimentado muy útiles y prácticas además de tener notables ventajas como ser el pavimento articulado con el uso de geoceldas.

Entre los beneficios del uso se tiene, mayor resistencia a compresión, lo cual deriva en mayor capacidad para soportar las cargas de tráfico, de igual forma al estar contruidos sobre las geoceldas, las uniones entre bloques son rellenas completamente por el material geosintético, brindando así una superficie con alto grado de impermeabilidad, esto beneficia de manera significativa al pavimento, ya que una de las principales causas de falla es la presencia de agua en las capas inferiores del paquete estructural.

Las metodologías y procedimiento para realizar este tipo de obra son escasas en el país, al ser una tecnología relativamente nueva, para llenar este vacío de conocimiento aplicado a este medio es necesario realizar los ensayos correspondientes a manera de generar resultados correspondientes a la aplicación de este método con materiales de la región.

### **1.3.2 Problema.**

¿En qué proporción se incrementa la resistencia a compresión de un bloque de hormigón al emplearse geocelda en su construcción?

## **1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1 Objetivo general.**

Analizar el incremento o reducción en la resistencia a compresión de bloques de hormigón empleando geoceldas para su aplicación en pavimentos articulados, mediante ensayos de compresión, con el fin de determinar en qué medida influye el uso de geoceldas.

### **1.4.2 Objetivos específicos.**

- Caracterizar los agregados y el cemento.
- Realizar la dosificación del hormigón para resistencias 210 kg/cm<sup>2</sup>, 220 kg/cm<sup>2</sup>, 230 kg/cm<sup>2</sup>, 240 kg/cm<sup>2</sup>, 250 kg/cm<sup>2</sup>.
- Evaluar la resistencia a compresión de las probetas con geocelda y sin ésta.
- Analizar la diferencia en las resistencias según los datos obtenidos.
- Evaluar la factibilidad del uso de geoceldas desde el punto de vista económico.

## **1.5 ALCANCE DEL ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN.**

El presente proyecto se realizará en instalaciones del laboratorio de hormigón y resistencia de materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

La extracción de los agregados se realizará en primera instancia de la procesadora de áridos San Blas, el cual estará sujeto a los resultados obtenidos en laboratorio, en caso de no cumplir con las especificaciones de desgaste de Los Ángeles menor a 40% y equivalente de arena mayor a 75%, se extraerá de otro banco y realizará su respectiva evaluación.

El cemento a emplearse será El Puente – Tipo IP-30, ya que las cualidades de este tipo satisfacen las necesidades del proyecto, como ser alcanzar resistencia máxima de 250 kg/cm<sup>2</sup>, además del factor económico que es conveniente en comparación de utilizar otro tipo de cemento con propiedades superiores.

Las geoceldas a usar serán las de marca Bidim con abertura de 22 cm, y peralte de 75 mm, siendo estas las de tamaño mediano con resistencia a tracción de 16 kN/m, estas dimensiones son la que se aproximan más a las establecidas por Geosystems en su apartado “Pavimentos reforzados con geoceldas”, la marca se seleccionó por comparación en precio con el producto de similares especificaciones de la marca Maccaferri.

Las resistencias de diseño para mezclas a usarse serán de 210 kg/cm<sup>2</sup>, 220 kg/cm<sup>2</sup>, 230 kg/cm<sup>2</sup>, 240 kg/cm<sup>2</sup> y 250 kg/cm<sup>2</sup>, este rango debido a que el proyecto está pensado para aplicarse en lugares con tráfico liviano y mediano, donde en promedio la resistencia a compresión no supera los 240 kg/cm<sup>2</sup>.

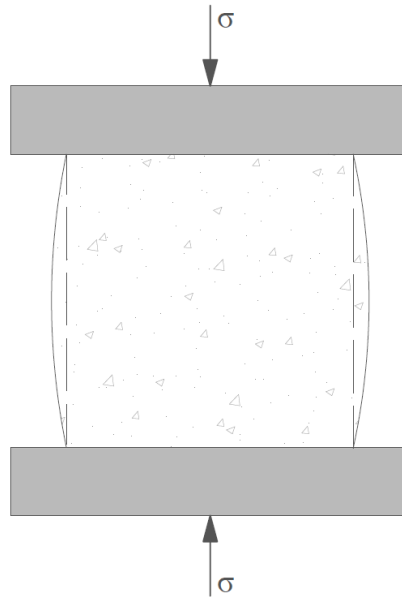
La comparación de costos para determinar si es factible el uso de geoceldas como refuerzo, se realizará diseñando probetas con resistencia de diseño de 210 kg/cm<sup>2</sup> y dimensiones 22 cm por 22 cm, siendo estas de igual tamaño a las probetas con geocelda, luego al variar la altura del adoquín se determinará que altura o espesor es necesario para que un adoquín sin geocelda iguale la resistencia a compresión de uno con geocelda, este valor será usado para calcular su precio unitario, con este valor de referencia, se realizará un análisis de precio unitario a los bloques de hormigón con geocelda, de esta manera determinar la diferencia en costos y determinar su factibilidad.

## **1.6 HIPÓTESIS.**

Al usar geoceldas en la construcción de bloques de hormigón para uso en pavimento articulado, se presentará un incremento en la resistencia a compresión de los mismos, en comparación a bloques de hormigón de mismas dimensiones e igual dosificación contruidos sin geoceldas.



**Figura 2 Deformación de un bloque de hormigón.**



Fuente: (Administradora Boliviana de Carreteras, 2007)

## **1.7 CONCEPTUALIZACIÓN DE VARIABLES**

### **1.7.1 Variable dependiente.**

La variable dependiente para este proyecto de investigación será el aumento en la resistencia del hormigón a compresión para pavimentos articulados, la cual estará en función al uso de las geoceldas.

### **1.7.2 Variable independiente.**

El uso de la geocelda como material de refuerzo en la construcción de los bloques de hormigón para pavimentos articulados.

### **1.7.3 Operacionalización de variables.**

En las tablas 1 y 2 se detalla la operacionalización de las variables tanto dependiente como independiente.

**Tabla 1 Operacionalización de variable dependiente.**

Variable dependiente	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor o acción
Aumento en la resistencia del hormigón a compresión para pavimentos articulados	Es la capacidad de soportar carga por unidad de área.	Con geoceldas.	Resistencia del hormigón a compresión.	210 kg/cm <sup>2</sup>
				220 kg/cm <sup>2</sup>
				230 kg/cm <sup>2</sup>
				240 kg/cm <sup>2</sup>
				250 kg/cm <sup>2</sup>
		Sin geoceldas.	Resistencia del hormigón a compresión.	210 kg/cm <sup>2</sup>
				220 kg/cm <sup>2</sup>
				230 kg/cm <sup>2</sup>
				240 kg/cm <sup>2</sup>
				250 kg/cm <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2 Operacionalización de variable independiente.**

Variable independiente	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor o acción
Incremento en la resistencia a compresión del hormigón con geocelda.	Una mejora en la resistencia es el incremento en la capacidad de soportar cargas vehiculares por parte del hormigón con las geoceldas antes de llegar al punto de fractura del hormigón.	Geocelda.	Material conformado	Polietileno alta densidad.
			Tamaño de celda	220*220 mm
			Peralte	75 mm
			Peso del panel	19.5 kg
			Resistencia a tracción	16 kN/m

Fuente: Elaboración propia.

## **1.8 UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL**

### **1.8.1 Unidad.**

El presente proyecto toma como unidad de estudio los pavimentos.

### **1.8.2 Población.**

La población para el proyecto son los pavimentos articulados con y sin geoceldas construidos in situ.

### **1.8.3 Muestra.**

Se tiene como muestra los bloques de hormigón con y sin geoceldas, que forman parte de los pavimentos articulados construidos in situ.

### **1.8.4 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 METODOLOGÍA PARA EL PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN**

Para el análisis e interpretación de los datos y resultados cabe apoyarse en la estadística descriptiva, esta rama de las matemáticas recolecta, presenta y caracteriza un conjunto de datos, para este caso la resistencia a compresión de los bloques de hormigón, con el fin de describir apropiadamente las diversas características de este conjunto. Primero se debe clasificar la variable, la cual es una variable cuantitativa.

Se tomará como ejemplo los datos obtenidos del ensayo de resistencia a probetas cilíndricas.

**Tabla 3 Resistencia a compresión de probetas cilíndricas**

Probeta cilíndrica		1	2	3	4
Edad	(Días)	14.00	14.00	14.00	14.00
Peso	(g)	12970.00	12895.00	12905.00	12930.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.36	2.34	2.39	2.35
Diámetro	(mm)	152.00	152.00	151.00	152.00
Alto	(mm)	303.00	304.00	302.00	303.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	150.30	158.30	151.50	136.60

Fuente: Elaboración propia.

### 1.9.1 Parámetros de la estadística descriptiva.

- **Medidas de centralización.**

Indicarán el valor promedio de los datos, o en torno a qué valor se distribuyen éstos.

- **Media aritmética.**

La media aritmética es el valor obtenido al sumar todos los datos y dividir el resultado entre el número total de datos. Se denota la media con el símbolo  $\bar{x}$  y la calculamos de la siguiente manera.

#### Fórmula 1 Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

Donde:

$\bar{x}$  = Valor de la media aritmética.

$x_i$  = Valores de las muestras obtenidas.

$N$  = Número de muestras.

- **Ejemplo de cálculo.**

Media entre probetas 1 y 2

Resistencias: 150.3 kg/cm<sup>2</sup> y 158.3 kg/cm<sup>2</sup>

$$\bar{x} = \frac{150.3 + 158.3}{2} = 154.3 \text{ kg/cm}^2$$

La media para esos dos valores es de 154.3 kg/cm<sup>2</sup>

De igual manera se hace para las probetas 3 y 4.

$$\bar{x} = \frac{151.5 + 136.6}{2} = 144.05 \text{ kg/cm}^2$$

La media para el conjunto sería de cualquiera de las siguientes formas:

$$\bar{x} = \frac{154.3 + 144.05}{2} = 149.175 \text{ kg/cm}^2$$

$$\bar{x} = \frac{150.3 + 158.3 + 151.5 + 136.6}{4} = 149.175 \text{ kg/cm}^2$$

- **Medidas de dispersión.**

Para analizar la representatividad de las medidas de centralización se definen las llamadas medidas de dispersión.

Estas indicarán la variabilidad de los datos en torno a su valor promedio, es decir si se encuentran muy o poco esparcidos en torno a su centro. Se pueden definir entonces, diversas medidas de desviación o dispersión, siendo éstas fundamentales para la descripción estadística de la muestra.

- **Desviación estándar.**

Esta medida indica que tan dispersos se encuentran en promedio, los datos con respecto a la media aritmética.

### **Fórmula 2 Desviación estándar**

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

Donde:

$\sigma$  = Desviación estándar.

$x_i$  = Observación número i de la variable x.

$\bar{x}$  = Media aritmética de la variable x.

$N$  = Número de observaciones.

- **Ejemplo de cálculo.**

Datos de resistencias: 150.3 kg/cm<sup>2</sup>, 158.3 kg/cm<sup>2</sup>, 151.5 kg/cm<sup>2</sup>, 136.6 kg/cm<sup>2</sup>

Media aritmética: 149.175 kg/cm<sup>2</sup>

$$\sigma = \sqrt{\frac{(150.3 - 149.175)^2 + (158.3 - 149.175)^2 + (151.5 - 149.175)^2 + (136.6 - 149.175)^2}{4}}$$

$$\sigma = 7.875 \text{ kg/cm}^2$$

- **Varianza.**

Es la media de los cuadrados de las desviaciones o separaciones de cada una de las observaciones, respecto a la media aritmética. En definitiva, la varianza no es más que la desviación estándar al cuadrado.

### Fórmula 3 Varianza

$$\sigma^2 = \frac{\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2}{N}$$

Donde:

$\sigma$  = Desviación estándar.

$x_i$  = Observación número i de la variable x.

$\bar{x}$  = Media aritmética de la variable x.

$N$  = Número de observaciones.

- **Ejemplo de cálculo.**

Datos de resistencias: 150.3 kg/cm<sup>2</sup>, 158.3 kg/cm<sup>2</sup>, 151.5 kg/cm<sup>2</sup>, 136.6 kg/cm<sup>2</sup>

Media aritmética: 149.175 kg/cm<sup>2</sup>

$$\sigma^2 = \frac{(150.3 - 149.175)^2 + (158.3 - 149.175)^2 + (151.5 - 149.175)^2 + (136.6 - 149.175)^2}{4}$$

$$\sigma^2 = 62.017$$

- **Coefficiente de variación.**

Mide la representatividad de la media. Valores extremos del mismo nos llevarán a concluir que la media no es representativa, es decir, existirán valores entre las observaciones que se separan significativamente de las demás. Está dado por el cociente entre la desviación estándar y la media aritmética.

#### Fórmula 4 Coeficiente de variación

$$CV = \frac{\sigma_x}{|\bar{x}|}$$

Donde:

$CV$  = Coeficiente de variación.

$\sigma_x$  = Desviación estándar de la variable X.

$\bar{x}$  = Media aritmética de la variable X.

- **Ejemplo de cálculo.**

Desviación estándar  $\sigma = 7.875$  kg/cm<sup>2</sup>

Media aritmética  $\bar{x} = 149.175$  kg/cm<sup>2</sup>

$$CV = \frac{7.875}{149.175} = 0.053$$

De este procesamiento de datos se puede armar la tabla final con los valores ya analizados de acuerdo a cada resistencia como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 4 Resistencia a compresión de probetas cilíndricas con datos procesados.**

Probeta cilíndrica		1	2	3	4
Edad	(Días)	14.00	14.00	14.00	14.00
Peso	(g)	12970.00	12895.00	12905.00	12930.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.36	2.34	2.39	2.35
Diámetro	(mm)	152.00	152.00	151.00	152.00
Alto	(mm)	303.00	304.00	302.00	303.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	150.30	158.30	151.50	136.60
Resistencia promedio	(kg/cm <sup>2</sup> )	154.30		144.05	
Resistencia promedio	(kg/cm <sup>2</sup> )	149.18			
Desviación estándar	(kg/cm <sup>2</sup> )	7.88			
Varianza	-	62.02			
Coefficiente de variación	-	0.05			

Fuente: Elaboración propia.



**CAPÍTULO 2**

**ASPECTOS GENERALES DE LOS  
PAVIMENTOS ARTICULADOS Y LAS  
GEOCELDAS**

## **CAPÍTULO 2**

### **ASPECTOS GENERALES DE LOS PAVIMENTOS ARTICULADOS Y LAS GEOCELAS**

#### **2.1 PAVIMENTO ARTICULADO**

Los pavimentos articulados son estructuras que están conformados por adoquines o piezas talladas acomodadas una a lado de otra a fin de formar una superficie uniforme y resistente. Bajo este concepto podemos remontar el origen de los pavimentos articulados a 3.000 años antes de Cristo en Creta, Babilonia, el antiguo Egipto y Grecia. En Creta, consistían en rocas amorfas con una cara plana, la que se exponía al tráfico. Los romanos elaboraron un pavimento más complejo para su red vial imperial, que incluía tratamiento de la subrasante, sistema de drenaje y una forma apta para que las ruedas de los carros siguieran una huella determinada.

Posteriormente, en la época medieval, los adoquines eran más elaborados, buscando un tamaño estándar de aproximadamente 75 mm x 200 x 225 mm, los cuales eran usados principalmente en las calles de las ciudades. El pavimento incluía una base de material granular o de limo-cemento de 300 mm de espesor.

Existen evidencias en Australia del uso de adoquines de madera, en el siglo XIX, uso que perduró hasta aproximadamente 1950. El uso de adoquines declinó sustantivamente con la invención y masificación de pavimentos asfálticos y de hormigón a principios de 1900, relegándolo a aplicaciones específicas orientadas al paisajismo, diseño urbano y en menor medida a la infraestructura vial. En el siglo XX, los bloques de cemento modernos – los adoquines – fueron introducidos principalmente en Holanda y recién en la década del 70 en el Reino Unido. En Estados Unidos, su uso como material de pavimentación data de la década del 70.

Actualmente, el adoquín es ampliamente usado en Japón, India, Holanda, Sudáfrica, Australia, Gran Bretaña y Estados Unidos, países que cuentan con abundante investigación y desarrollo, así como una profusa normativa al respecto.<sup>1</sup>

El pavimento articulado es un sistema para pisos muy efectivo, seguro y moderno. Posee importantes ventajas que se demuestran con soluciones técnicas y decorativas para todo tipo de tránsito pedestre y vehicular. El pavimento articulado soporta grandes cargas conservando la armonía en el entorno por la posibilidad de emplear diferentes formas y colores.

Tanto para nuevas y modernas urbanizaciones como para reciclar todo tipo de viviendas y calles, ya sea para un ingreso, espacios verdes o grandes superficies de servicios y en plantas industriales, los adoquines de hormigón para pavimento intertrabado son fabricados con tecnología de avanzada y rigurosos controles de calidad, para satisfacer el gusto y la exigencia que usted necesita.

La calidad y nobleza del adoquín lo sitúan como el producto para piso de menor costo por su larga vida útil y su bajo mantenimiento. Además, el pavimento intertrabado posee un exclusivo sistema de construcción totalmente en seco, lo que permiten liberar el tránsito inmediatamente, ya sea al colocarlos la primera vez como en futuras reparaciones subterráneas reutilizando las mismas piezas, logrando el mismo acabado estético original.

El adoquín es la combinación perfecta entre solidez y belleza. Elija un modelo o la combinación entre ellos. Escoja uno o varios colores, quizá el tradicional gris. Cualquiera sea su decisión, su obra se destacará más con adoquines de hormigón.<sup>2</sup>

### **2.1.1 Tipos de pavimentos articulados.**

Dentro de las familias de pavimentos articulados se pueden distinguir 3 tipos: Pavimentos de adoquines propiamente tales, pavimentos permeables de adoquines porosos y pavimentos peatonales de adoquines.

---

<sup>1</sup> (Fenollar, 2019)

<sup>2</sup> (Superblock, 2021)

Los pavimentos de adoquines de hormigón se utilizan principalmente para espacios vehiculares, como por ejemplo estacionamientos, calles y pasajes, así como para áreas de circulación y estacionamientos de aeródromos, aeropuertos, patios industriales y explanadas portuarias. En todos estos casos es importante siempre proporcionar las pendientes suficientes para evitar la acumulación y/o infiltración de agua.

Por otro lado, los pavimentos permeables de adoquines de hormigón (porosos) permiten la filtración de agua, utilizándose principalmente en estacionamientos.

Finalmente, los pavimentos peatonales con adoquines de hormigón se utilizan para fines ornamentales, principalmente en viviendas y espacios públicos con el fin de lograr un diseño urbano compatible con la escena arquitectónica. Todos estos tipos de soluciones poseen consideraciones específicas de diseño. Los pavimentos para tráfico vehicular, maquinaria industrial o aeronaves, deben en primer lugar otorgar una condición estructural suficiente en concordancia con las cargas y tránsito a las que están sometidos.<sup>3</sup>

### **2.1.2 Ventajas de los pavimentos articulados.**

Los pavimentos articulados, al igual que cualquier otro tipo de pavimento, poseen ventajas y desventajas, las cuales determinan en buenas cuentas cuándo es adecuado o no optar por una solución de este tipo. En tal sentido, más que hablar de ventajas y desventajas, es preciso discutir cuándo esta solución es adecuada dado el problema que se quiere resolver. Por lo tanto, resulta conveniente que los atributos de los pavimentos de adoquines son:

- **Diversidad.**

La gran variedad de formas, colores y texturas con que pueden fabricarse los adoquines y la diversidad de configuraciones posibles de usar, entregan al proyectista elementos que adecuadamente conjugados dan por resultado pavimentos atractivos. Asimismo, utilizando diversos colores y texturas es posible incluir en la superficie dibujos o diseños, señalizaciones o demarcar áreas para usos específicos, con la posibilidad de

---

<sup>3</sup> (Bahamondes, Echaveguren, & Vargas, 2013)

cambiarlos fácilmente en caso de ser necesario. De este modo, los adoquines proporcionan una gran variedad de posibilidades para el diseño arquitectónico y paisajístico de los espacios públicos.

- **Durabilidad.**

Las características de los adoquines, resistencia a la compresión, absorción, resistencia al congelamiento y resistencia a la abrasión, le otorgan una alta durabilidad ante ambientes agresivos, la cual puede sobrepasar la vida de diseño del pavimento.

- **Rapidez de puesta en operación.**

Independiente del método constructivo, manual o mecánico, los pavimentos de adoquines pueden utilizarse inmediatamente después de contruidos, lo cual les otorga una ventaja importante respecto de otros tipos de pavimentos, especialmente en aquellos lugares en donde no es posible contar con otras tecnologías de pavimentación.

- **Mantenimiento.**

Puesto que los elementos se pueden reponer fácilmente, cualquier defecto inducido por aspectos funcionales o estructurales puede corregirse logrando restituir en su totalidad la condición superficial, igualando la del pavimento adyacente al área reparada. Por tanto, se logra una razonable homogeneidad del pavimento. Debido a esto, en áreas urbanas facilita notablemente la reparación y/o reposición de infraestructuras de servicios que se encuentren soterradas.

- **Condición de operación.**

Debido a la regularidad superficial del pavimento producto de las juntas entre adoquines y las juntas de confinamiento, este tipo de solución es adecuada para velocidades de circulación de alrededor de los 50 km/h o menos. Por tanto, no son adecuados para vías con velocidades de operación elevadas. Por otro lado, son eficientes elementos reductores de velocidad en pasos peatonales, intersecciones y calles locales, contribuyendo de esta manera a la seguridad vial.

- **Reutilización.**

Los adoquines, en tanto se encuentren sanos (no fracturados o degradados y cumplan con las características de diseño del proyecto), pueden reutilizarse para pavimentar, lo cual es beneficioso en términos ambientales dado que se reduce la cantidad de material de desecho si se desea utilizar otro tipo de pavimento, reponer o mantener áreas pavimentadas con adoquines.

### **2.1.3 Limitaciones de los pavimentos articulados.**

- **Rendimiento de ejecución del pavimento.**

Aunque se han desarrollado algunos equipos para la colocación mecanizada de adoquines, ésta se realiza básicamente de forma manual. Hay que tener en cuenta que, según la combinación de colores que se disponga en planta, puede no ser posible el uso de estos equipos en la colocación de las piezas.

- **Velocidad de circulación limitada.**

Por propia constitución, en concreto por regularidad superficial, este pavimento no permite velocidades de circulación elevadas, siendo, sin embargo, perfectamente adecuado al nivel de velocidad usual en las ciudades (hasta 60 km/h).

**Figura 3 Superficie de rodadura.**



Fuente: (Olivera, 2019)

### 2.1.4 Aplicaciones de los pavimentos de articulados.

**Tabla 5 Aplicaciones de los pavimentos articulados según nivel de solicitud de tránsito.**

Nivel de solicitud de tránsito	Grupo de aplicación	Tipo de aplicación
Baja	Espacios públicos	Veredas
		Plazas
		Ciclo vías
	Residencias	Entradas de vehículos
		Senderos
		Espacios recreacionales
		Pavimentos interiores
		Condominios
		Estacionamientos esporádicos
Media	Proyectos comerciales	Estacionamientos masivos
		Paraderos de taxi
		Terminales de buses
		Estaciones de servicio
		Centros comerciales
		Veredas en parques
	Caminos y calles	Cruces peatonales
		Calles y pasajes
		Intersecciones
		Plazas de peaje
	Alta	Áreas industriales
Aeropuertos		
Zonas militares		
Patios de contenedores		
Rellenos sanitarios		

Fuente: (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013)

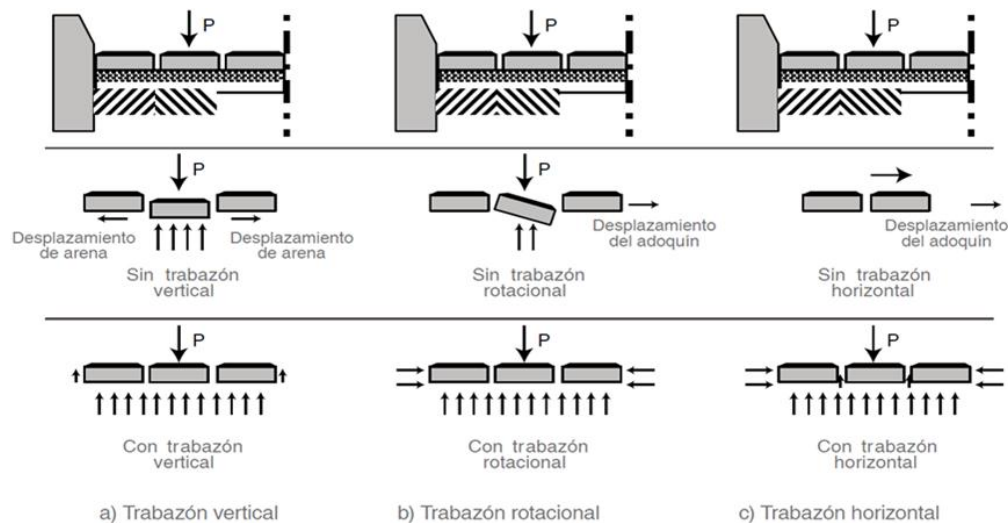
### 2.1.5 Comportamiento estructural de los pavimentos articulados.<sup>4</sup>

Los pavimentos de adoquines en general poseen 3 a 4 capas de material: los adoquines mismos, cuyo espesor varía entre 60 mm y 100 mm, una cama de arena de espesor nominal de 25 mm, una base con espesores mínimos entre 100 mm y 150 mm y eventualmente una subbase con espesores mínimos que varían entre 100 mm y 150 mm.

- **La trabazón mecánica.**

Se define como la inhabilidad de los adoquines de moverse aisladamente de sus vecinos y es en esencia un mecanismo de disipación de tensiones. Es la principal característica que define el comportamiento de los pavimentos de adoquines. El efecto de transferencia de carga entre adoquines permite que estos actúen de forma solidaria, más que como piezas rígidas aisladas, lo cual acerca a este tipo de pavimento hacia un comportamiento flexible. La trabazón mecánica en los adoquines determina en buena parte la capacidad resistente del pavimento, su durabilidad y serviciabilidad. Depende principalmente de la forma del adoquín, del aparejo utilizado, de la dirección de las fuerzas aplicadas y del espaciamiento entre las juntas. La trabazón de los adoquines se puede clasificar, en trabazón vertical, rotacional y horizontal, como lo muestra la Figura 4.

**Figura 4 Trabazón vertical, horizontal y rotacional de un pavimento de adoquín.**



Fuente: (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013)

<sup>4</sup> (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013)



La trabazón vertical (Figura 4a) es importante, para la transferencia de carga hacia los adoquines adyacentes a través de las juntas. Se logra a través del diseño adecuado del espesor de junta y a la compactación adecuada del material de relleno de las juntas. Esto permite que una parte importante de la trabazón vertical se deba a la fricción.

La trabazón rotacional (Figura 4b) es necesaria para controlar deformaciones y desprendimiento o rotura de adoquines. Está relacionada con el espesor del pavimento, el espacio entre juntas y las restricciones de borde. Particularmente, las restricciones de borde limitan el “efecto de arco”, que corresponde al levantamiento de dos adoquines contiguos por rotación de los adyacentes.

La trabazón horizontal (Figura 4c), es necesaria para soportar las fuerzas de corte producidas en maniobras de frenado, giro y aceleración. La resultante de estas fuerzas es el desplazamiento de los adoquines, el cual se puede limitar utilizando formas irregulares y aparejos que minimicen estos desplazamientos.

Los principales efectos de la trabazón son pequeños desplazamientos individuales de los bloques, que en la mayoría de los casos son imperceptibles y sólo son detectables mediante perfilometría. Una trabazón mecánica adecuada, permite controlar las deformaciones permanentes, el desprendimiento y fractura de los adoquines, así como el lavado del material más fino de la cama de arena.

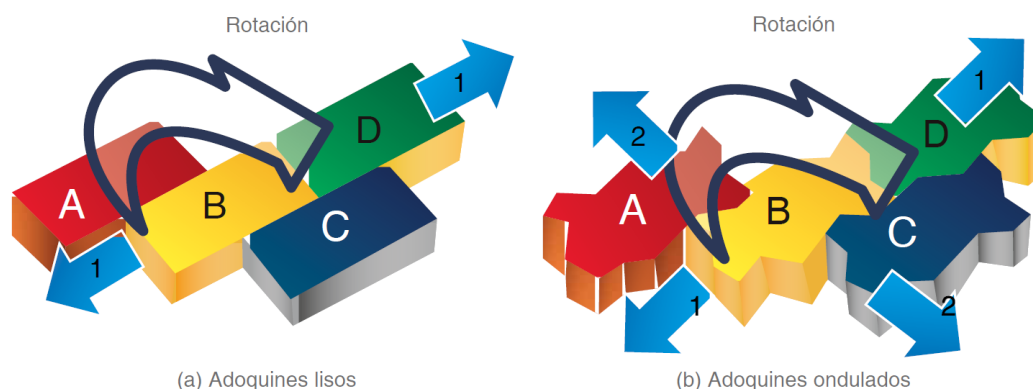
Por lo anterior, es conveniente revisar los factores que determinan la trabazón mecánica.

- **Efecto conjunto de la forma y aparejo del adoquín.**

Considérese dos tipos de adoquines: adoquines lisos y adoquines ondulados, y dos tipos de aparejos: aparejo lineal (linear layout) y aparejo “espina de pescado” (herringbone layout).

La Figura 5 muestra el efecto de la rotación del adoquín “B” sobre los adoquines adyacentes “A”, “C” y “D” para el caso del aparejo lineal y adoquines lisos y ondulados.

**Figura 5 Efecto de la rotación de adoquines lisos y ondulados en aparejos lineales.**



Fuente: (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013)

Al someter a rotación al adoquín liso “B” (Figura 5a) este es libre de girar en torno a los adoquines “A” y “C”, perdiendo trabazón lateral y empujando al adoquín “D”. En este caso, se produce un efecto de cuña en la dirección 1, la cual es la única que permite lograr trabazón entre los adoquines “B” y “D” por contacto directo.

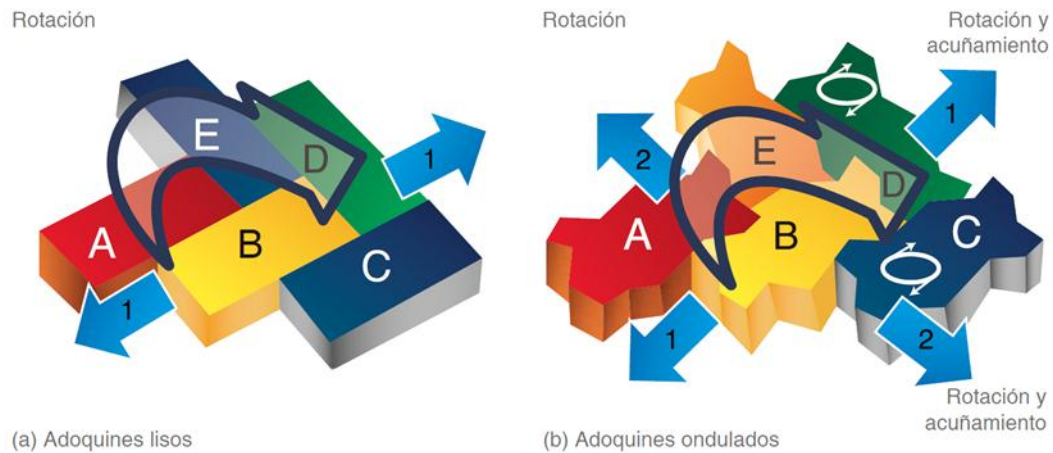
En el caso del adoquín ondulado (Figura 5b), la misma ondulación genera trabazón del adoquín “B” con respecto a los adoquines “A” y “C”, impidiendo la rotación libre. Esto lleva a que el efecto de acuñaamiento por empuje se produzca en las direcciones 1 y 2, aumentando la trabazón en dos sentidos y por consiguiente, aumentando la rigidez del conjunto de bloques.

Al comparar ambos tipos de adoquines para el aparejo espina de pescado (Figuras 6a y 6b) se llega a resultados similares. En el caso de adoquines lisos (Figura 6a), se puede apreciar que la rotación del adoquín “B” también ocurre libremente respecto de los adoquines “A”, “C” y “E”, produciendo acuñaamiento del adoquín “D” y eventualmente rotación en torno a su eje vertical.

En el caso de los adoquines ondulados (Figura 6b), el adoquín “B” está impedido de girar libremente respecto de los adoquines “A”, “C”, y “E”, produciendo acuñaamiento en ambas direcciones (1 y 2). Por otro lado, el empuje producido por el adoquín “B”, induce una rotación en torno al eje horizontal de los adoquines “C” y “D”, magnificando

el efecto de acuñamiento. Por tanto, la trabazón se hace más eficiente en este último caso aumentando aún más la rigidez del conjunto de adoquines.

**Figura 6 Efecto de la rotación de adoquines lisos y ondulados en aparejos espina de pescado.**



Fuente: (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013)

- **Efecto del ancho de junta.**

El efecto de trabazón antes descrito, se relaciona estrechamente con el comportamiento de las juntas. Esto se debe a que una proporción de la trabazón es otorgada por la fricción entre los adoquines y la arena que se agrega a las juntas, en tanto cuenten con un ancho propicio para que el fenómeno ocurra.

Como se mencionó anteriormente, los mecanismos principales de contacto entre adoquines se producen por rotación y desplazamiento. Por un lado la rotación permite inducir el efecto de acuñamiento, lo cual comprime la arena intersticial y eventualmente permite el contacto directo entre adoquines. Por otro lado, el desplazamiento vertical (lipping) permite generar trabazón por fricción, y el desplazamiento horizontal por compresión de la arena intersticial. En ambos casos, la eficiencia de la trabazón está condicionada por el grado y número de ciclos de compactación de la cama de arena y de la arena de las juntas.

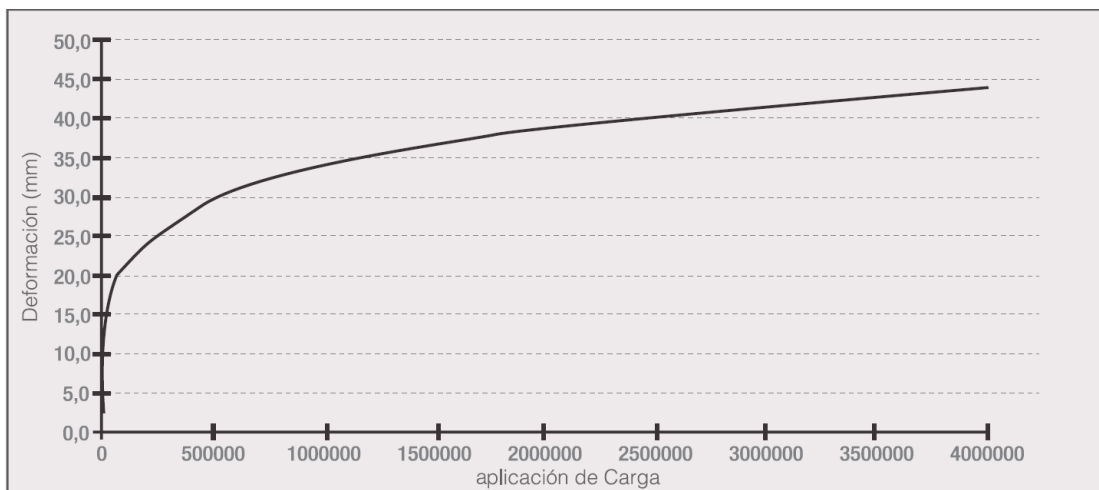
- **El comportamiento a la fatiga.**

La principal variable que describe el comportamiento a la fatiga de los pavimentos de adoquines es la deformación permanente. La mayoría de los estudios del efecto de las variables de diseño, utilizan como criterio de comparación las deformaciones permanentes. Conceptualmente, las deformaciones permanentes se acumulan en el tiempo en la medida que el pavimento recibe aplicaciones de carga, hasta llegar a un máximo y estabilizarse, de acuerdo por ejemplo al modelo de la Figura 6.

El proceso de acumulación de deformaciones está relacionado estrechamente con la compactación durante la construcción. La compactación proporciona una densificación inicial, a la cual posteriormente se le suma la deformación debido a las cargas de tráfico.

En esta segunda fase, los efectos combinados de carga y clima determinan el proceso de progresión de las deformaciones. Las deformaciones permanentes dependen de la aplicación de cargas repetitivas, del peso bruto total por eje, de la tensión transmitida a la base y de la tensión en la dirección principal, la cual es a su vez función de las propiedades mecánicas de los componentes del pavimento de adoquín. Indirectamente, la condición climática está presente a través del efecto de la humedad sobre los parámetros mecánicos de la base, subbase y/o suelo de fundación.

**Figura 7 Progresión de las deformaciones permanentes en pavimentos de adoquines.**



Fuente: (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013)

## **2.2 GEOSINTÉTICOS – GEOCELDAS**

Geosintético es un producto en el que, por lo menos, uno de sus componentes es a base de polímero sintético o natural, y se presenta en forma de filtro, manto, lámina o estructura tridimensional. Usada en contacto con el suelo o con otros materiales dentro del campo de la geotecnia o de la ingeniería civil.

Existen varios campos de aplicación de los geosintéticos en el mundo de la construcción y la edificación como son: obras viales, obras hidráulicas. Sistemas de control de erosión, aplicaciones medioambientales, entre otras. La fabricación de los geosintéticos comprende procedimientos principal mente de extrusión, tecnología textil y/o ambas tecnologías: textil y plástica.

Los geosintéticos se derivan de fibras artificiales, compuestos básicamente de polímeros como polipropileno, poliéster, poliamida y polietileno, siendo los dos primeros los de mayor utilización en la actualidad.

Los tipos de geosintéticos más comunes utilizados en el campo de la ingeniería son los geotextiles, las geomallas, las geomembranas, las georedes, geocompuestos y sistemas de confinamiento celular (geoceldas) derivados de la unión de las características y cualidades de cada uno de los anteriores.

### **2.2.1 Sistema de confinamiento con geoceldas.<sup>5</sup>**

Es un sistema de geoceldas compuestas por cintas laminares de Polietileno de Alta Densidad, conectadas entre sí a través de soldaduras puntuales en todo lo ancho, dándole un aspecto de colmena de abeja.

Al ser traccionadas las cintas interconectadas forman las paredes de una estructura tridimensional flexible de confinamiento celular en la cual pueden ser colocados diversos tipos de material de relleno, con función predominante de refuerzo y control de erosión. Es resistente a altas temperaturas, a la intemperie y a la acción del agua, que

---

<sup>5</sup> (Geosistemas PAVCO, 2012)

puede afectar al concreto hidráulico, al acero y a las soluciones convencionales de madera.

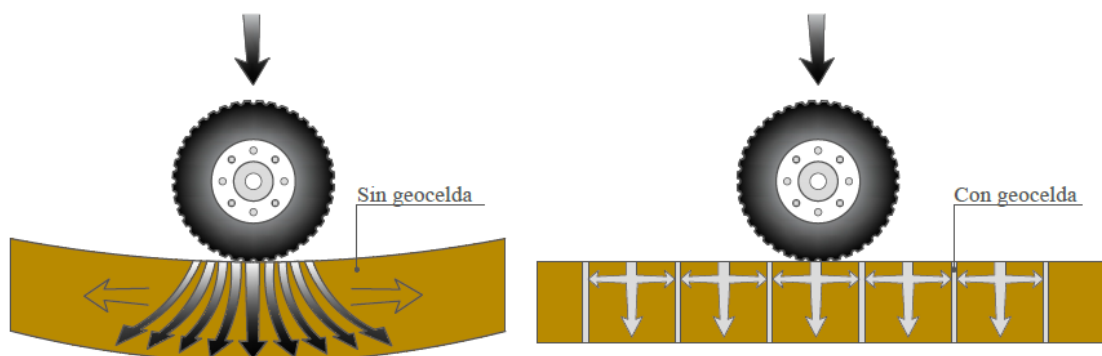
La durabilidad y estabilidad dimensional son factores críticos para mantener el desempeño desde el punto de vista de ingeniería a largo plazo de la estructura de pavimento. Las geoceldas como material de construcción están específicamente diseñadas para mantener la estabilidad dimensional, geometría y desempeño ingenieril a largo plazo.

### 2.2.2 Funciones y aplicaciones de las geoceldas.<sup>6</sup>

Sus principales campos de aplicación son en: Estabilización de subrasante, refuerzo de estructuras de pavimento, aplicaciones en estructuras de contención y en control de erosión.

En la estabilización de subrasantes, permite generar plataformas de trabajo, las cuales tradicionalmente se han conseguido con "rajon", que ahora puede ser conseguido de forma más eficiente y con un menor costo empleando geoceldas. La estabilización de la subrasante se logra gracias a la redistribución lateral de los esfuerzos y al "efecto viga" logrando transmitir una menor carga neta y directa al suelo de fundación.

**Figura 8 Refuerzo de capa granular con geoceldas.**



Fuente: (Aquanea, 2020)

<sup>6</sup> (Geosistemas PAVCO, 2012)

En el refuerzo de estructuras de pavimento, principalmente la geocelda se emplea en el refuerzo de las capas granulares, ya que gracias al confinamiento de los mismos materiales se incrementan los módulos elásticos permitiendo el rediseño de las estructuras con menores espesores granulares y de concreto asfáltico.

En las estructuras de contención, cuando se utilizan geoceldas se pueden diseñar y construir muros mecánicamente estabilizados más esbeltos y con alturas mayores a los que se realizan con los geosintéticos tradicionales (geotextiles, geomallas. entre otros). Sin embargo, también se puede utilizar como complemento o fachada para muros en suelo reforzado con geotextil y/o geomalla.

El uso de confinamiento celular es ideal en aplicaciones de control de erosión en taludes, canales y márgenes de ríos. Por su configuración permite obtener revestimientos vegetados, en material granular, en grava y/o en concreto. Las características del material de llenado dependerán de las condiciones de agresividad hidráulica o erosiva del sitio de instalación. En el caso que el acabado sea en concreto, la geocelda permite un llenado más eficiente sin necesidad de uso de formaletas ni acero de refuerzo. Ésta trabaja conjuntamente con las geomembranas para crear sistemas totalmente impermeables y resistentes por ejemplo en canales, reservorios, rellenos sanitarios, lagunas, entre otros.<sup>7</sup>

### **2.2.3 Pavimento articulado de hormigón con geoceldas.**

Se trata de una particular alternativa formada por bloques generados a partir de una matriz de geoceldas rellenas de concreto. Estos pavimentos están especialmente diseñados para ser utilizados en aquellas zonas que presentan cargas lentas, puntuales y más altas como las generadas en áreas de almacenamiento de puertos marítimos, zonas industriales, acopios y aeropuertos.

Las geoceldas pueden ser consideradas como un gran encofrado formado por una matriz de celdas plásticas que se transforman en un elemento de sacrificio, pues quedan embebidas permanentemente en el pavimento. La matriz de celdas posee una

---

<sup>7</sup> (Geosistemas PAVCO, 2012)

configuración tipo “panel de abeja” cuyo objetivo es inducir micro fisuras en el hormigón para generar bloques de igual dimensión que quedan conectados entre sí a través de un elemento de traspaso de carga tipo burbuja que se forma en cada una de las paredes de la celda. Estos elementos permitirían que el pavimento articulado posea un alto nivel de disipación de las cargas de tránsito.

La malla de geoceldas es sumamente liviana ( $< 40 \text{ kg} / 200 \text{ m}^2$ ), se extiende en sitio de forma manual y se ancla a la base granular mediante un sistema de aparejos que se tensan para mantener la forma de la celda y evitar que colapse durante el proceso constructivo.

El hormigón debe tener una consistencia adecuada para que fluya sobre las paredes del encofrado. Asimismo, la mezcla debe ser capaz de “moverse” por si sola en la matriz de geoceldas pues una excesiva manipulación del hormigón puede causar el colapso de las celdas.<sup>8</sup>

## **2.3 MARCO NORMATIVO**

A continuación, se presenta en detalle las normativas en las cuales se basarán los ensayos a llevarse a cabo en laboratorio.

### **2.3.1 Ensayos de caracterización de agregados.**

### **2.3.2 Método para el cuarteo de muestras (ASTM C 702)<sup>9</sup>**

Los diferentes tipos y tamaños de áridos requieren que la muestra sea representativa para los varios ensayos a los que será sometida. Por lo que el material obtenido debe ser siempre mayor que la cantidad de la muestra requerida para el ensayo.

En esta normativa se describen dos procedimientos, uno manual y otro mecánico, para la reducción de muestras de suelos y áridos en general. Los mejores resultados se obtienen usando un cuarteador metálico de un tamaño adecuado.

---

<sup>8</sup> (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2016)

<sup>9</sup> (American Society for Testing and Materials, 2003)



- **Procedimiento manual.**

Distribuya una palada llena del material tan uniformemente como sea posible sobre una lona u otra superficie lisa, plana y ancha. Una lona de 150 x 150 cm. será suficiente. Cuando la cantidad del material es pequeña, se puede usar una plana de albañil.

Continúe colocando material en capas, una sobre la otra, hasta que se haya distribuido todo el material formando un montón plano y ancho, cuyo espesor y distribución de los tamaños de áridos sea razonablemente uniforme. No permita la conicidad de áridos. Divida el montón en cuatro partes iguales, con una pala de borde recto o una plancha de metal.

Cuando emplee una lona, el cuarteo puede hacerse convenientemente insertando un palo delgado o varilla por debajo de la lona y levantándola para así dividir la muestra en partes iguales, primero en dos mitades iguales y luego en cuartas partes. Remueva dos cuartas partes opuestas y colóquelas a un lado, cuidando de retirar todo el material fino limpiando los espacios despejados con una brocha o escoba.

Repita el procedimiento indicado desde el inicio con la porción restante de áridos, hasta que obtenga una muestra de ensayo del tamaño deseado. Si lo desea, puede guardar la porción que colocó a un lado para luego hacer un posible ensaye de comprobación.

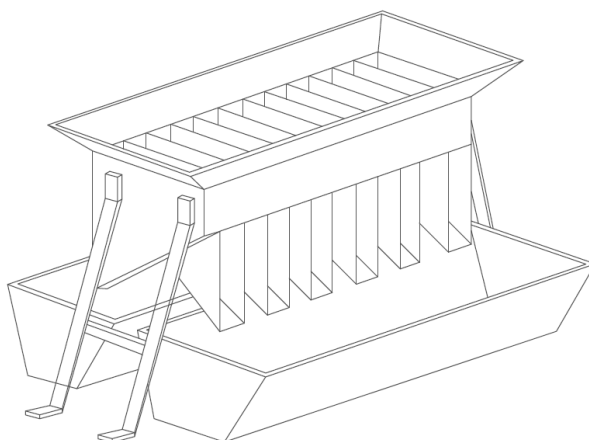
- **Procedimiento mecánico:**

Coloque la muestra en uno de los recipientes del cuarteador. Vacíe la muestra en el cuarteador. Separe el material correspondiente a uno de los recipientes.

Repita el procedimiento con el material del recipiente restante hasta obtener el tamaño de muestra requerido.

En la siguiente figura se ilustra un cuarteador mecánico.

**Figura 9 Cuarteador mecánico.**



Fuente: (Administradora Boliviana de Carreteras, 2007)

### **2.3.3 Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM C 136)<sup>10</sup>**

Seleccione un juego de tamices de acuerdo con la especificación correspondiente al material por ensayar. Dispóngalos según aberturas decrecientes, montados sobre el depósito receptor y provisto de su tapa. Todos estos elementos deben estar limpios y secos.

Determine la masa de la muestra de ensayo en estado seco, registre aproximando a 1 g para áridos finos y a 10 g para áridos gruesos; vacíela sobre el tamiz superior y cubra con la tapa. Agite el conjunto de tamices por un período suficiente para que pase el máximo posible por los tamices.

Retire el primer tamiz, provisto de depósito y tapa, sosténgalo de un costado con una mano, manteniéndolo ligeramente inclinado, golpee firmemente el costado libre hacia arriba con la palma de la otra mano a un ritmo de 150 golpes/min. Gire el tamiz cada 25 golpes en 1/6 de vuelta.

Al completar cada ciclo de 150 golpes, pese separadamente el material retenido sobre el tamiz y el material que pasa, recogido en el depósito, traslade el material que pasa en cada ciclo al tamiz siguiente.

---

<sup>10</sup> (American Society for Testing and Materials, 2003)

Repita el ciclo en el mismo tamiz con el material retenido hasta que se recoja en el depósito una masa inferior al 1% de la masa retenida, con lo cual dé por terminado el tamizado de esa fracción.

Retire el tamiz siguiente provisto de depósito y tapa para efectuar con dicho tamiz los ciclos necesarios, y así sucesivamente hasta completar todos los tamices.

Determine la masa final del material retenido en cada tamiz y del material que pasa por el tamiz de menor abertura, recogido en el depósito. Registre con la aproximación que sea mayor entre 1 g y 0,1% de la pesada.

**Tabla 6 Tamaño de la muestra de ensayo del árido fino.**

Tamiz	% Retenido	Masa mínima de la muestra (g)
4,75 mm	≤ 5 %	500
2,36 mm	≤ 5 %	100

Fuente: (Administradora Boliviana de Carreteras, 2007)

**Tabla 7 Tamaño de la muestra de ensayo del árido grueso.**

Tamaño máximo de agregado (mm)	Masa mínima de la muestra (kg)
75.0	32
63.0	25
50.0	20
37.5	16
25.0	10
19.0	8
12.5	5
9.5	4

Fuente: (Administradora Boliviana de Carreteras, 2007)

**Tabla 8 Especificaciones de graduación para el agregado fino.**

Tamiz	% que pasa
3/8"	100
Nº 4	95 - 100
Nº 8	80 - 100
Nº 16	50 - 85
Nº 30	25 - 60
Nº 50	5 - 30
Nº 100	0 - 10
Nº 200	0 - 3

Fuente: (American Society for Testing and Materials, 2003)

**Tabla 9 Especificaciones de graduación para el agregado grueso.**

Tamiz	% que pasa
2"	100
1 1/2"	90 - 100
1"	20 - 55
3/4"	0 - 15
1/2"	-
3/8"	0 - 5
Nº 4	-
Nº 8	-

Fuente: (American Society for Testing and Materials, 2003)

#### **2.3.4 Contenido total de agua de los áridos por secado (ASTM C 566)<sup>11</sup>**

La humedad superficial es igual a la diferencia entre el contenido total de agua y la absorción, con todos los valores basados, en el peso seco. Para lo cual seguimos el siguiente procedimiento.

Pesar la muestra con precisión del 0,1%, evitando pérdidas de humedad, por posibles demoras. Luego secar enteramente la muestra en el recipiente, utilizando el horno, cuidando mucho que no se pierdan partículas de áridos, un calentamiento demasiado rápido, puede ocasionar la explosión de algunas partículas, con la pérdida consecuente.

---

<sup>11</sup> (American Society for Testing and Materials, 1997)

Pesar la muestra seca con precisión del 0,1% después de que se ha enfriado suficientemente, para no dañar la balanza.

Con estos datos se procede a realizar los cálculos.

- **Cálculos.**

Se determina el contenido de humedad usando la siguiente fórmula.

**Fórmula 5 Contenido de humedad**

$$wp = \frac{100(W - D)}{D}$$

Donde:

**wp**= Humedad de la muestra (%)

**W**= Peso original de la muestra (g)

**D**= Peso de la muestra seca (g)

**Tabla 10 Tamaño de muestras de áridos con peso normal.**

Tamaño máximo nominal del agregado		Peso mínimo de la muestra
Normal (mm)	Alternativo (pulgadas)	(kg)
4.75	No.4	0.5
9.50	3/8	1.5
12.50	1/2	2
19.00	3/4	3
25.00	1	4
37.50	1½	6
50.00	2	8
63.00	2½	10
75.00	3	13
90.00	3½	16
100.00	4	25
150.00	6	50

Fuente: (Administradora Boliviana de Carreteras, 2007)

### 2.3.5 Método para determinar el peso unitario de los agregados (ASTM C 29)<sup>12</sup>

- **Determinación del peso unitario compactado.**

Este procedimiento se aplica a áridos gruesos de tamaño nominal igual o menor que 50mm (2").

Se debe llenar la medida en tres capas de espesores aproximadamente iguales, teniendo la última capa un exceso de áridos por sobre el borde de la medida. Empareje cada capa y compacte mediante 25 golpes de pisón uniformemente repartidos.

Apisone la capa inferior en todo su espesor evitando dañar el fondo de la medida, de igual manera las capas superiores haciendo penetrar el pisón en la capa inmediatamente inferior.

Elimine el exceso de áridos empleando la varilla pisón como regla de enrase, sin presionar, determine y registre la masa de áridos compactado que llena la medida, aproximando al 0,1 %.

- **Determinación del peso unitario suelto.**

Primero se debe llenar la medida con una pala, descargándola desde una altura de aproximadamente 5 cm sobre el borde superior de la medida, desplazar la pala alrededor del borde, distribuyendo uniformemente el vaciado.

Eliminar el exceso de pétreo empleando la varilla pisón como regla de enrase, sin presionar, determinar y registre la masa de áridos suelto que llena la medida aproximando al 0,1%.

- **Cálculos:**

**Peso unitario compactado:**

Se lo puede determinar con la siguiente expresión.

---

<sup>12</sup> (American Society for Testing and Materials, 2001)

### Fórmula 6 Peso unitario compactado

$$\rho_{ac} = \frac{mc}{V}$$

Donde:

$\rho_{ac}$ = Peso unitario compactado (kg/m<sup>3</sup>)

**mc**= Masa de áridos compactada (kg)

**V**= Capacidad volumétrica de la medida (m<sup>3</sup>)

**Peso unitario suelto:**

### Fórmula 7 Peso unitario suelto

$$\rho_{as} = \frac{ms}{V}$$

Donde:

$\rho_{as}$ = Peso unitario compactado (kg/m<sup>3</sup>)

**ms**= Masa de áridos compactada (kg)

**V**= Capacidad volumétrica de la medida (m<sup>3</sup>)

**Tabla 11 Dimensiones de las medidas cilíndricas.**

Tamaño máximo nominal de áridos (mm)	Capacidad volumétrica		Diámetro interior (mm)	Altura interior (mm)	Espesor mínimo del metal	
	m <sup>3</sup>	l			Base (mm)	Pared (mm)
16	0.003	3	155 ± 2	160 ± 2	5	2.5
25	0.010	10	205 ± 2	305 ± 2	5	2.5
50	0.015	15	255 ± 2	295 ± 2	5	3.0
100	0.030	30	355 ± 2	305 ± 2	5	3.0

Fuente: (Administradora Boliviana de Carreteras, 2007)

### 2.3.6 Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM C 127)<sup>13</sup>

Es aplicable a los áridos gruesos que se emplean en el análisis de suelos, elaboración de hormigones, el procedimiento respectivo es descrito a continuación.

<sup>13</sup> (American Society for Testing and Materials, 2001)

Primero se debe preparar la muestra, para lo cual primero lave la muestra hasta remover el polvo superficial o cualquier materia extraña adherida a las partículas. Luego sumerja la muestra en agua a temperatura ambiente por un período de  $24 \pm 4$  h.

- **Pesada al aire ambiente del pétreo saturado superficialmente seco.**

Retire la muestra del agua y seque superficialmente las partículas, haciéndolas rodar sobre un paño absorbente húmedo hasta que desaparezca la película visible de agua adherida. Seque individualmente las partículas mayores manteniendo el áridos, ya secado superficialmente, cubierto por un paño húmedo hasta el momento de pesar. Efectúe toda la operación en el menor tiempo posible.

Determine inmediatamente la masa de áridos saturado superficialmente seco, por pesada al aire ambiente, aproximando a 1 g. Registre su valor como  $M_{SSS}$ .

- **Pesada sumergida.**

Coloque la muestra inmediatamente en el canastillo porta muestra y sumerja el canastillo en agua a  $20 \pm 3^\circ$  C, por un período de al menos 3 min.

Determine la masa sumergida, aproximando a 1 g. Registre su valor como  $M_{SUM}$ .

- **Pesada al aire ambiente de áridos seco.**

Retire la muestra del canastillo y vacíela completamente del recipiente, cuidando de no dejar partículas atrapadas. Luego seque la muestra hasta masa constante en horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ$  C.

Enfríe la muestra hasta temperatura ambiente, en lo posible dentro de un recipiente protegido, para evitar la absorción de humedad del aire.

Determine la masa de la muestra seca, por pesada al aire ambiente, aproximando a 1 g y registre su valor como  $M_S$ .



- **Cálculos:**

La densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de un árido grueso se determinan como el promedio aritmético de dos ensayos sobre muestras gemelas.

**Densidad real saturada superficialmente seca.**

**Fórmula 8 Densidad real saturada superficialmente seca**

$$\rho_{RT} = \frac{M_{SSS}}{M_{SSS} - M_{SUM}} * 1000$$

**Densidad real seca.**

**Fórmula 9 Densidad real seca**

$$\rho_{RS} = \frac{M_S}{M_{SSS} - M_{SUM}} * 1000$$

**Densidad neta.**

**Fórmula 10 Densidad neta**

$$\rho_N = \frac{M_S}{M_S - M_{SUM}} * 1000$$

**Absorción de agua.**

**Fórmula 11 Absorción de agua**

$$\alpha = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} * 100$$

Donde:

$M_{SSS}$ = Masa de áridos saturado superficialmente seco (g)

$M_{SUM}$ = Masa de árido sumergido (g)

$M_S$ = Masa de árido seco (g)

$\rho_{RT}$ = Densidad real saturada superficialmente seca ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_{RS}$ = Densidad real seca ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_N$ = Densidad neta ( $\text{kg/m}^3$ )

$\alpha$ = Porcentaje de absorción de agua (%)

**Tabla 12 Cantidad mínima de muestra según tamaño máximo nominal del árido.**

Tamaño máximo nominal (mm)	Cantidad mínima de muestra (g)
12.5	2000
19.0	3000
25.0	4000
37.5	5000
50.0	8000

Fuente: (Administradora Boliviana de Carreteras, 2007)

### **2.3.7 Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM C 128)<sup>14</sup>**

Para cada ensaye se usará una cantidad de áridos fino superior a 50 g e inferior a 500 g. Primero se debe preparar la muestra para lo cual cubra el árido en su totalidad con el mínimo de agua a temperatura ambiente, necesaria para asegurar su saturación en un período de  $24 \pm 4$  h.

Elimine paulatinamente el exceso de agua, evitando la pérdida de finos. Revuelva la muestra frecuentemente para asegurar un secado uniforme, hasta llevarla a su condición suelta.

Coloque el molde cónico sujeto firmemente contra una superficie lisa, plana y no absorbente, con su diámetro mayor hacia abajo, llénelo con el árido en condición suelta en una capa y enrase. Compacte suavemente con 25 golpes de pisón uniformemente distribuidos sobre la superficie.

En cada golpe deje caer el pisón libremente desde una altura de 5 mm sobre la superficie del árido, dicha altura debe conservarse, ajustándola a la nueva elevación de la muestra después de cada golpe.

Remueva cuidadosamente todo material sobrante en la superficie y levante el molde verticalmente. Si hay humedad libre la muestra conservará la forma del cono. En este caso elimine el exceso de humedad, repitiendo el procedimiento.

---

<sup>14</sup> (American Society for Testing and Materials, 2001)

Inmediatamente que el árido alcance la condición de saturado superficialmente seco, obtenga el tamaño de muestra de ensaye requerido, pese y registre su masa. Coloque la muestra en el matraz y cúbrala con agua a una temperatura de  $20 \pm 3^\circ \text{C}$ , hasta alcanzar aproximadamente  $2/3$  del volumen del matraz, luego agite el matraz a fin de eliminar burbujas de aire golpeándolo ligeramente contra la palma de la mano. En caso de áridos muy finos, se debe utilizar una bomba de vacío.

Deje reposar durante 1 h manteniendo una temperatura de  $20 \pm 3^\circ \text{C}$  luego llene con agua a  $20 \pm 3^\circ \text{C}$  hasta la marca de calibración, agite y deje reposar un instante.

Mida y registre la masa total del matraz con la muestra de ensaye y el agua (g).

Saque la muestra del matraz, evitando pérdidas de material, y séquela hasta masa constante en horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ .

Deje enfriar la muestra a temperatura ambiente, luego determine y registre la masa de la muestra de ensaye en condición seca (ms).

Finalmente llene el matraz solamente con agua a una temperatura de  $20 \pm 3^\circ \text{C}$  hasta la marca de calibración. Mida y registre la masa del matraz con agua (Ma).

- **Cálculos.**

La densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de un árido fino se determinan como el promedio aritmético de dos ensayos sobre muestras gemelas.

**Densidad real saturada superficialmente seca.**

**Fórmula 12 Densidad real saturada superficialmente seca**

$$\rho_{RT} = \frac{M_{SSS}}{M_a + M_{SSS} - M_m} * 1000$$

**Densidad real seca.**

**Fórmula 13 Densidad real seca**

$$\rho_{RS} = \frac{M_{SSS}}{M_a + M_{SSS} - M_m} * 1000$$

## Densidad neta.

### Fórmula 14 Densidad neta

$$\rho_N = \frac{M_S}{M_a + M_S - M_m} * 1000$$

## Absorción de agua.

### Fórmula 15 Absorción de agua

$$\alpha = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} * 1000$$

Donde:

$M_{SSS}$ = Masa de áridos saturado superficialmente seco (g)

$M_S$ = Masa de árido seco (g)

$M_a$ = Masa del matraz con agua hasta la marca de calibración (g)

$M_m$ = Masa del matraz con la muestra más agua hasta la marca de calibración (g)

$\rho_{RT}$ = Densidad real saturada superficialmente seca ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_{RS}$ = Densidad real seca ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_N$ = Densidad neta ( $\text{kg/m}^3$ )

$\alpha$ = Porcentaje de absorción de agua (%)

### 2.3.8 Método para determinar el desgaste mediante la Máquina Los Ángeles (ASTM C 131)<sup>15</sup>

Tamice la muestra obtenida, empleando la serie de tamices de aberturas nominales siguientes: 75 mm, 63 mm, 50 mm, 37.5 mm, 25.0 mm, 19 mm, 12.5 mm, 9,5 mm, 6.3 mm, 4.75 mm y 2.36 mm.

Deje el material separado en las fracciones resultantes de este tamizado.

Elija de la tabla 13 el grado de ensayo que mejor represente la granulometría de la muestra.

---

<sup>15</sup> (American Society for Testing and Materials, 2001)

**Tabla 13 Grados de ensayo definidos por sus rangos de tamaño, en mm.**

Tamaño de partículas	1	2	3	4	5	6	7
	(75-37,5)	(50-2,36)	(37,5-19)	(37,5-9,5)	(19-9,5)	(9,5-4,75)	(4,75-2,36)
(mm)	Tamaño de las fracciones (g)						
75 - 63	2500 ± 50						
63 - 50	2500 ± 50						
50 - 37,5	5000 ± 50	5000 ± 25					
37,5 - 25,0		5000 ± 50	5000 ± 25	1250 ± 10			
25,0 - 19			5000 ± 25	1250 ± 10			
19 - 12,5				1250 ± 10	1250 ± 10		
12,5 - 9,5				1250 ± 10	1250 ± 10		
9,5 - 6,3						1250 ± 10	
6,3 - 4,75						1250 ± 10	
4,75 - 2,36							5000 ± 10
Masa inicial de muestra (Mi)	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10
Número de esferas	12			12	11	8	6
Número de masa (g)	5000 ± 25			5000 ± 25	4584 ± 25	3330 ± 25	2500 ± 15
Número de revoluciones	1000			500			

Fuente: (Administradora Boliviana de Carreteras, 2007)

Para ello, sume los porcentajes parciales retenidos en los tamices correspondientes a cada uno de los grados y elija para el ensaye el que entregue una mayor suma.

Pese los tamaños de las fracciones correspondientes al grado elegido, luego registre la masa del total de material por ensayar como masa inicial de la muestra (mi), aproximando a 1 g.

Coloque la masa inicial de material en la máquina de Los Ángeles y ensaye de acuerdo con el grado elegido (número y masa de esferas, y número de revoluciones), una vez completado el número de revoluciones correspondiente, saque el material de la máquina evitando pérdidas y contaminaciones.

Separe la carga abrasiva y efectúe un primer tamizado en un tamiz de 2,36 mm o superior, a fin de evitar dañar el tamiz de corte (1,7 mm).

Tamice manualmente el material bajo 2,36 mm por tamiz de 1,7 mm (N° 12).

Reúna todo el material retenido en ambos tamices, lávelo, séquelo hasta masa constante en horno a  $110 \pm 5$  °C y deje enfriar a temperatura ambiente.

Pese y registre la masa del material retenido como masa final de la muestra (mf), aproximando a 1 g.

- **Cálculos.**

Calcule el desgaste de áridos de acuerdo con la siguiente expresión:

**Fórmula 16 Pérdida por desgaste en la Máquina Los Ángeles**

$$P = \frac{(mi - mf)}{mi} * 100$$

Donde:

P= Pérdida de masa de la muestra (%)

mi= Masa inicial de la muestra (g)

mf= Masa final de la muestra (g)

### **2.3.9 Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D2419)<sup>16</sup>**

El equivalente de arena es la relación de la altura de arena a la altura de arcilla por 100. A continuación, se describe el procedimiento.

Sifonee la solución de ensaye en la probeta hasta que alcance un nivel de  $100 \pm 5$  mm

---

<sup>16</sup> (American Society for Testing and Materials, 2002)

Llene una medida con la muestra asiente el material golpeando el fondo de la medida contra la mesa de trabajo a lo menos 4 veces, enrase y vierta en la probeta.

Golpee firmemente el fondo de la probeta contra la palma de la mano hasta desalojar las burbujas de aire.

Deje la probeta en reposo por un período de 10 min. Luego coloque el tapón y suelte la arena del fondo inclinando y sacudiendo el tubo.

Agite la probeta y su contenido mediante uno de los siguientes procedimientos:

- **Agitación manual:**

Sujete la probeta en posición horizontal y agite vigorosamente en un movimiento lineal horizontal con un desplazamiento de  $230 \pm 25$  mm. Agite 90 ciclos en aproximadamente 30 s.

- **Agitación mecánica:**

Fije la probeta en el agitador mecánico y agite durante un período de  $45 \pm 1$  s.

Coloque la probeta sobre la mesa de trabajo, destápela y lave sus paredes interiores mediante el irrigador, luego introduzca el irrigador hasta el fondo de la probeta con un movimiento lento de penetración y torsión para remover todo el material.

Retire el irrigador en forma similar, regulando el flujo de la solución de modo de ajustar el nivel final a 380 mm.

Deje sedimentar por un periodo de  $20 \text{ min} \pm 15 \text{ s}$ , al final del período de sedimentación lea y registre el nivel superior de la arcilla (Nt) aproximando al milímetro.

Introduzca el pisón en la probeta y hágalo descender suavemente hasta que quede apoyado en la arena.

Registre el nivel superior de la arena (Na) aproximando al milímetro.

- **Cálculos.**

Calcule el equivalente de arena de acuerdo con la fórmula siguiente, aproximando al 1%.

**Fórmula 17 Equivalente de arena**

$$EA = \left( \frac{N_a}{N_t} \right) * 100$$

Donde:

EA= Equivalente de arena (%)

Na= Nivel superior de arena (mm)

Nt= Nivel superior de arcilla (mm)

**2.3.10 Ensayos de caracterización del cemento.**

**2.3.11 Peso específico del cemento hidráulico (ASTM C 188)<sup>17</sup>**

La densidad del cemento hidráulico se define como la masa de una unidad de volumen de los sólidos. El procedimiento se describe a continuación.

Debe llenarse el frasco con gasolina hasta un punto situado entre las marcas 0 y 1 ml. Se debe secar el interior del frasco por encima del nivel líquido, si es necesario, después de verterlo. Debe anotarse la primera lectura después de sumergir el frasco en el baño de agua. Entonces, se debe agregar cemento Portland, aproximadamente 64 g, en pequeñas cantidades, a la misma temperatura que el líquido, procurando evitar salpicaduras y observando que el cemento no se adhiera a las paredes del frasco por encima del líquido. Puede usarse un vibrador para acelerar la adición del cemento dentro del frasco y evitar que éste se tranque en el cuello. Después de agregar todo el cemento, debe colocarse el tapón en el frasco y hacerse girar en posición inclinada o en círculo horizontal poco a poco, hasta que no asciendan burbujas a la superficie del líquido, para sacarle el aire. Si se ha añadido una cantidad apropiada de cemento, el nivel del líquido debe estar en su posición final en cualquier punto en la serie superior de graduaciones. Debe hacerse la lectura final una vez que el frasco se haya sumergido en el baño de agua.

---

<sup>17</sup> (American Society for Testing and Materials, 2003)



Debe sumergirse el frasco en un baño de agua a temperatura ambiente durante un tiempo suficiente, antes de hacer cualquiera de las lecturas, para evitar variaciones mayores de 0,2°C en la temperatura del líquido dentro del frasco. Todas las lecturas se deben comprobar hasta obtener un valor constante para asegurarse de que los contenidos del frasco han alcanzado la temperatura del baño de agua.

- **Cálculos.**

#### **Fórmula 18 Peso específico del cemento**

$$\text{Peso específico} = \frac{\text{Peso de cemento (g)}}{\text{Volumen desplazado (ml)}}$$

#### **2.3.12 Finura del cemento hidráulico mediante tamices N°100 y N°200 (ASTM C 184)<sup>18</sup>**

La finura es una propiedad muy importante del cemento y por ello tiene que someterse a un control cuidadoso. El procedimiento a seguir es el siguiente:

Pesar 50 g de cemento para determinar su finura, luego agitar la muestra, utilizando tamices de malla N°100 y N°200 con base y tapa en el vibrador mecánico, cuando no se dispone de vibrador mecánico, se agita manualmente con golpes de vez en cuando. El tiempo de agitado dependerá de la cantidad de finos en la muestra, por lo general no debe ser menor a 15 minutos.

Se quita la tapa y se separa la malla N°100 vaciando la fracción de cemento que podría ser retenida en ella. A las partículas que han quedado atrapadas entre los hilos de la malla no hay que forzarlas a pasar a través de ella, inviertase el tamiz y con ayuda de un cepillo o brocha de alambre despréndase y agréguese a las antes separadas. Se pesa cuidadosamente la fracción de la muestra obtenida en el tamiz, se guarda esta fracción de muestra hasta el final de la prueba, para poder repetir las pesadas en caso de error.

---

<sup>18</sup> (American Society for Testing and Materials, 1994)

Se hacen las pesadas de las fracciones retenidas en cada malla y el recipiente del fondo, procediendo en la forma antes indicada. Todos los pesos retenidos se anotan en la hoja de registro para el cálculo.

- **Cálculos:**

#### **Fórmula 19 Módulo de finura del cemento**

$$F = \frac{Pr}{50} * 100$$

Donde:

F= Módulo de finura del cemento

Pr= Peso retenido en el tamiz (g)

#### **2.3.13 Ensayos de control del hormigón.**

#### **2.3.14 Método para determinar la docilidad mediante el cono de Abrams (ASTM C-143)<sup>19</sup>**

Antes de iniciar el ensaye verifique que tanto el molde como sus accesorios se encuentren limpios y húmedos sólo con agua.

Coloque el molde sobre la plancha de apoyo horizontal, las operaciones de llenado del molde, seguida de su retiro, levantándolo, deben efectuarse en un tiempo no superior a 3 min.

El operador debe pararse sobre las pisaderas, afirmando el molde firmemente contra la plancha de apoyo, de manera de evitar cualquier movimiento durante el llenado. Llene con el hormigón por ensayar mediante tres capas de aproximadamente igual volumen; la primera deberá alcanzar una altura aproximada de 7 cm y la segunda una altura aproximada de 16 cm, ambas medidas desde la base. Apisone cada capa con 25 golpes de la varilla pisón, distribuidos uniformemente en toda la sección. Apisone la capa inferior en toda su profundidad, cuidando de no golpear la plancha de apoyo. Dé, aproximadamente, la mitad de los golpes alrededor del perímetro con la varilla pisón

---

<sup>19</sup> (American Society for Testing and Materials, 2010)

ligeramente inclinada; luego siga dando golpes con la varilla vertical, acercándose al centro en forma de espiral. Apisone las capas media y superior en todo su espesor, de modo tal que la varilla pisón penetre apenas en la capa subyacente. Durante el apisonado de la última capa, mantenga permanentemente un exceso de hormigón por sobre el borde superior del molde, sin sobrepasar el número de golpes estipulados.

Terminada la compactación de la capa superior, enrase la superficie con un movimiento de aserrado y rotación de la varilla pisón, apoyándola en el borde superior del molde. Retire del área adyacente al molde todo el hormigón que se hubiere derramado.

Inmediatamente después de terminado el llenado del molde, levántelo evitando cualquier perturbación o golpe, tanto al cono como a la base, a fin de no alterar la medida. Para levantar, cargue las asas con las manos, dejando libres las pisaderas. Levante verticalmente el molde en forma suave, sin originar desplazamientos laterales ni movimientos de torsión; esta operación no debe tardar más de 5 a 10 s.

Una vez levantado el molde, colóquelo en posición invertida a un costado del hormigón moldeado, inmediatamente mida la disminución de altura que ha experimentado la cara superior del hormigón respecto del borde superior del molde colocado a su costado, con aproximación de 0,5 cm. Con una huincha o regla graduada en mm, mida, aproximadamente, en el eje original de moldeo de la mezcla, con la visión del operador en dirección perpendicular a la huincha o regla de medición.

Si el hormigón moldeado se inclina decididamente hacia un lado o sufre desprendimientos parciales de su masa, repita el ensaye utilizando otra porción de hormigón de la misma muestra. En caso que por segunda vez se presenten algunos de los fenómenos descritos, informe que el hormigón no es apto para el ensaye del asentamiento, por carecer de la plasticidad y cohesión necesarias.

### **2.3.15 Preparación y curado de especímenes de ensayo de hormigón (ASTM C 31)<sup>20</sup>**

El hormigón se debe mezclar de preferencia por medios mecánicos o, en su defecto, por medios manuales. El volumen de la amasada por preparar será superior en un 20% o

---

<sup>20</sup> (American Society for Testing and Materials, 2008)

más, al volumen necesario para efectuar los ensayos del hormigón fresco y/o confeccionar probetas.

- **Vaciado del concreto.**

Se deben moldear las muestras lo más cerca posible del lugar donde se van a guardar para su fraguado en las siguientes 24 horas. Los moldes se llevarán al depósito inmediatamente después de su elaboración. Colóquense los moldes sobre una superficie rígida y libre de vibraciones, evitando inclinaciones y movimientos bruscos. Transpórtense evitando sacudidas, golpes, inclinaciones o raspaduras de la superficie.

El concreto se debe colocar en los moldes utilizando un badilejo o herramienta similar. Se debe seleccionar el concreto de tal manera que la muestra sea representativa de la mezcla; además, se debe mezclar continuamente la mezcla del concreto durante el llenado del molde con el objeto de prevenir la segregación.

En la colocación de la capa final se debe intentar colocar una capa de concreto que complete exactamente el relleno del molde.

Si el concreto tiene un asentamiento mayor de 75 mm (3") debe usarse el método de apisonado. Si el asentamiento es de 25 a 75 mm (1 a 3") debe usarse el método de apisonado o el de vibración, prefiriéndose el método usado en la ejecución de la obra. Si el asentamiento es inferior a 25 mm (1") debe usarse el método de vibración. No se debe usar vibración interna para cilindros con diámetro inferior a 100 mm y para prismas de 100 mm de profundidad o menos. Los concretos con contenido de agua tal que no pueden ser compactados por los ensayos aquí descritos no estarán contemplados por la presente norma.

Apisonado por varillado. Se coloca el concreto en el molde con el número de capas requeridas aproximadamente del mismo volumen.

Se apisona cada capa con la parte redonda de la varilla, utilizando el número de golpes y el tamaño de la varilla especificado en la tabla 14. La capa inicial se apisona introduciendo la varilla hasta el fondo del molde.

La distribución de golpes para cada capa debe ser uniforme sobre toda la sección transversal del molde.

**Tabla 14 Diámetro de varilla y número de golpes por capa.**

Cilindros		
Diámetro del cilindro en mm	Diámetro de varilla en mm	Número de golpes por capa
50 a 150	10	25
150	16	25
200	16	50
250	16	75
Vigas y prismas		
Área de la superficie superior de la muestra en cm <sup>2</sup>	Diámetro de varilla en mm	Número de golpes por capa
160	10	25
165 a 310	10	1 por cada 7 cm <sup>2</sup> de área
320 o más	16	1 por cada 14 cm <sup>2</sup> de área

Fuente: (Administradora Boliviana de Carreteras, 2007)

- **Curado.**

Cubrimiento después del acabado. Para evitar la evaporación de agua del concreto sin endurecer, los testigos deben ser cubiertos inmediatamente después del acabado, preferiblemente con una platina no reactiva con el concreto, o con una lámina de plástico dura e impermeable. Se permite el uso de lona húmeda para el cubrimiento de la muestra, pero se evitará el contacto directo de la muestra con la lona, la cual debe permanecer húmeda durante las 24 horas contadas a partir del acabado de la muestra.

Las muestras deben ser removidas de sus moldes en un tiempo no menor de 20 horas ni mayor de 48 horas después de su elaboración cuando no se empleen aditivos; en caso contrario, se podrán emplear tiempos diferentes.

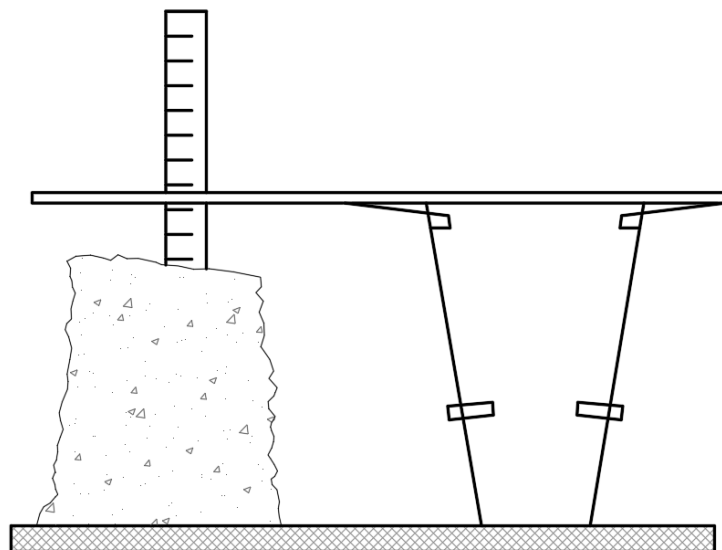
Se deben mantener las muestras en condiciones de humedad con temperatura de  $23.0 \pm 2.0$  °C desde el momento del moldeo hasta el momento de ensayo. El almacenamiento

durante las primeras 48 horas de curado debe hacerse en un medio libre de vibraciones. La condición de humedad debe lograrse por inmersión de la muestra sin el molde en agua. Se permite lograr la condición de humedad por el almacenamiento en un cuarto húmedo.

No deben exponerse los especímenes a condiciones de goteo o de corrientes de agua.

Debe evitarse que se sequen las paredes de la muestra luego del periodo de curado.

**Figura 10 Medida de asentamiento.**



Fuente: (Administradora Boliviana de Carreteras, 2007)

### **2.3.16 Método de ensayo a la compresión de probetas cúbicas y cilíndricas (ASTM C 39 AASHTO T 22)<sup>21</sup>**

- **Medición de Probetas Cúbicas.**

Coloque el cubo con la cara de llenado en un plano vertical frente al operador.

Mida los anchos de las cuatro caras laterales del cubo ( $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ), aproximadamente en el eje horizontal de cada cara.

---

<sup>21</sup> (American Society for Testing and Materials, 2010)

Mida las alturas de las cuatro caras laterales ( $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  y  $h_4$ ) aproximadamente en el eje vertical de cada cara. Exprese estas medidas en mm con aproximación a 1 mm.

Determine la masa de la probeta con una aproximación igual o inferior a 50 g. En el caso de probetas por refrentar, mida y pese antes del refrentado.

- **Medición de Probetas Cilíndricas.**

Mida dos diámetros perpendiculares entre sí ( $d_1$  y  $d_2$ ), aproximadamente en la mitad de la altura de la probeta.

Mida la altura de la probeta en dos generatrices opuestas ( $h_1$  y  $h_2$ ) antes de refrentar, exprese estas medidas en mm con aproximación a 1 mm.

Determine la masa de la probeta antes de refrentar con una aproximación igual o inferior a 50 g.

- **Procedimiento de ensayo.**

Limpie la superficie de las placas y de las caras de ensaye de la probeta. Coloque la probeta sobre la placa inferior alineando su eje central con el centro de esta placa.

Aplique la carga en forma continua y sin choques, a una velocidad uniforme, que permita cumplir las siguientes condiciones:

Alcanzar una franca rotura de la probeta en un tiempo igual o superior a 100 s.

No superar la velocidad de  $0,35 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ .

Cuando se conoce aproximadamente la carga de rotura, será permisible aplicar la primera mitad de la carga a una velocidad mayor que la especificada anteriormente

Una vez fijada la velocidad, especialmente en la segunda mitad de la carga, no haga modificaciones de ella hasta el término del ensaye.

Registre la carga máxima  $P$ , expresada en  $N$ .

- Cálculos.

**Fórmula 20 Sección en probetas cúbicas**

$$S = \frac{(a_1 + a_2)}{2} * \frac{(b_1 + b_2)}{2}$$

**Fórmula 21 Sección en probetas cilíndricas**

$$S = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2$$

**Fórmula 22 Resistencia a la compresión**

$$f = \frac{P}{S}$$

Donde:

$a_1, a_2, b_1, b_2$  = Caras laterales del cubo (mm)

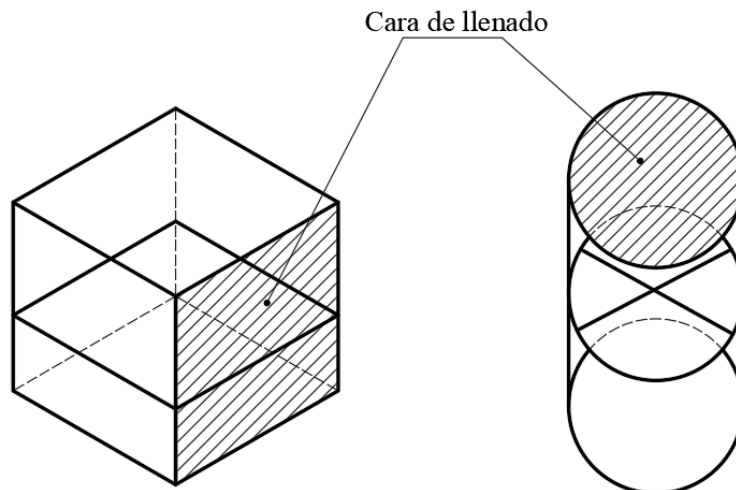
$d_1, d_2$  = Diámetros perpendiculares entre sí (mm)

$S$  = Sección de probeta (mm<sup>2</sup>)

$f$  = Tensión de rotura (MPa)

$P$  = Carga máxima aplicada por la máquina de ensayo (N)

**Figura 11 Determinación de las dimensiones de probetas.**



Fuente: (Administradora Boliviana de Carreteras, 2007)



## **2.4 DISEÑO DE MEZCLAS**

El diseño de mezclas estará dado por la metodología A.C.I. (American Concrete Institute) El proceso para diseñar mezclas está dado por dos factores principales.

Selección de los materiales que lo conforman de forma óptima. (Cemento, agregados, agua y aditivos).

Determinación de las proporciones de cada material para obtener un hormigón con resistencia, trabajabilidad y durabilidad deseada.

Las proporciones de los materiales se darán luego de una caracterización adecuada, de igual manera se debe considerar criterios como el asentamiento o el ambiente en el que se realiza la preparación de la mezcla.

El procedimiento para la dosificación está determinado por los siguientes pasos:

### **2.4.1 Resistencia de diseño.**

La resistencia a compresión especificada ( $f'_c$ ) a los 28 días, es la resistencia que el promedio de cualquier conjunto de tres ensayos consecutivos de resistencia de especímenes de concreto debe lograr o superar.

La resistencia de diseño de una mezcla de concreto hidráulico debe ser igual a la resistencia especificada más una tolerancia que lleva en consideración las variaciones de los materiales, de los métodos de mezclado, del transporte y colocación del concreto y variaciones en la producción, curado y ensayo de probetas cilíndricas de concreto. La resistencia de diseño, que es mayor que  $f'_c$ , se llama  $f'_{cr}$ , y se le conoce como la resistencia promedio requerida en obra de una mezcla de concreto hidráulico.

### **2.4.2 Cálculo de la resistencia requerida por el método de desviación.**

Cuando se tiene datos de ensayos anteriores donde se analizó la resistencia a probetas fabricados con materiales similares a los que se va a emplear en el proyecto, realizados durante los últimos 12 meses con intervalos no menores a 60 días, con una resistencia de más de  $70 \text{ kg/cm}^2$  (7 MPa) de la resistencia especificada, la resistencia requerida se

puede calcular con base en la desviación estándar, dependiendo del número de datos históricos que se tenga se puede calcular por las siguientes fórmulas:

- Datos de un solo grupo de por lo menos 15 ensayos de compresión consecutivos.

**Fórmula 23 Desviación estándar para un grupo de 15 ensayos o más.**

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{(n - 1)}}$$

Donde:

S = Desviación estándar.

n = Número de resultados de ensayos considerados.

$\bar{X}$  = Promedio de los "n" resultados de ensayos considerados.

Xi = Resultados de ensayos individuales.

- Datos de dos grupos de ensayos de resistencia a la compresión consecutivos que sumados sean por lo menos 30. Ninguno de los dos grupos debe tener menos de 10 resultados.

**Fórmula 24 Desviación estándar para grupos combinados.**

$$S = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{(n_1 + n_2 - 2)}}$$

Donde:

S: Desviación estándar para los dos grupos combinados.

s<sub>1</sub>,s<sub>2</sub>: Desviaciones estándar para los grupos 1 y 2, calculados de acuerdo con la ecuación 23.

n<sub>1</sub>,n<sub>2</sub>: Número de resultados de ensayos de los grupos 1 y 2 respectivamente.

**2.4.3 Cálculo de la resistencia requerida por el método de desviación.**

Cuando no existen datos anteriores de ensayos con materiales similares, el cual es el caso más frecuente, se debe proseguir con el siguiente método, para lo cual se empieza fijando la resistencia de diseño de mezcla f<sup>cr</sup>, de acuerdo a la siguiente tabla.

**Tabla 15 Resistencia promedio requerida.**

Resistencia a compresión especificada ( $f'c$ )	Resistencia promedio requerida ( $f'cr$ )
$f'c < 210 \text{ kg/cm}^2$	$f'cr = f'c + 70 \text{ kg/cm}^2$
$210 \text{ kg/cm}^2 \leq f'c \leq 350 \text{ kg/cm}^2$	$f'cr = f'c + 85 \text{ kg/cm}^2$
$f'c \geq 350 \text{ kg/cm}^2$	$f'cr = 1.1f'c + 50 \text{ kg/cm}^2$

Fuente: (American Concrete Institute, 2002)

#### 2.4.4 Elección de asentamiento.

Los valores del asentamiento mostrados en la siguiente tabla son aplicables cuando se usa vibración para consolidar el hormigón. En caso de usar un método diferente, los valores máximos se pueden incrementar en 2.5 mm.

**Tabla 16 Asentamientos recomendados para diferentes tipos de estructuras.**

Tipo de estructura	Asentamiento (cm)	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas reforzadas	7.5	2.5
Zapatas, campanas y muros de subestructura	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificios	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	5	2.5

Fuente: (American Concrete Institute, 2002)

#### **2.4.5 Selección del tamaño máximo del agregado.**

Los tamaños más grandes de agregados bien graduados tienen menos vacíos que los tamaños más pequeños. Por esto, los concretos con agregados de tamaño mayores requieren menos mortero por volumen unitario de concreto.

Por regla general, el tamaño máximo de agregado debe ser el mayor disponible económicamente y guardar relación con las dimensiones de la estructura. En ningún caso el tamaño máximo debe exceder de ninguna de las siguientes condiciones:

- $1/5$  de la menor dimensión entre los costados de las cimbras.
- $1/3$  del espesor de las losas.
- $3/4$  del espaciamiento mínimo libre entre varillas o alambres individuales de refuerzo, paquetes de varillas, cables o ductos de pretensado.

#### **2.4.6 Estimación de la cantidad de agua y contenido de aire.**

La cantidad de agua por volumen unitario de hormigón requerida para producir determinado asentamiento, depende del tamaño máximo, de la forma de la partícula, la granulometría de los agregados y de la cantidad de aire incluido, no le afecta significativamente el contenido de cemento.

La tabla 17 facilita valores aproximados del agua de mezclado requerida para concretos hechos con varios tamaños máximos de agregados, con y sin aire incluido.

Dependiendo de la forma y textura del agregado, los requerimientos de agua de mezclado pueden estar algunas veces por encima o por debajo de los valores tabulados, pero estos son suficientemente aproximados para la primera estimación.

La diferencia en la demanda de agua no se refleja necesariamente en la resistencia ya que pueden estar involucrados otros factores de compensación.

**Tabla 17 Contenido de aire y agua de mezcla para diferentes asentamientos y tamaños nominales máximos de agregados.**

Asentamiento (cm)	Agua, kg/m <sup>3</sup> según tamaño nominal máximo (mm)							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Hormigón sin aire incluido								
2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire atrapado en el hormigón (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Hormigón con aire incluido								
2.5 a 5.0	108	175	165	160	145	140	135	120
7.5 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
15 a 17.5	215	205	190	185	170	165	165	-
Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo con el nivel de exposición								
Exposición ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

Fuente: (American Concrete Institute, 2002)

#### **2.4.7 Selección de relación agua/cemento.**

La relación A/C requerida se determina no sólo por los requisitos de resistencia, sino también por otros factores como la durabilidad y las propiedades del acabado.

Puesto que diferentes agregados y cementos producen, generalmente, distintas resistencias empleando la misma relación A/C, es muy deseable establecer una relación entre la resistencia y la relación A/C para los materiales que de hecho van a emplearse. En ausencia de estos datos, valores aproximados y relativamente conservadores pueden

tomarse de la tabla 18. Con materiales comunes, las relaciones A/C tabuladas deben producir las resistencias indicadas, con base en pruebas a los 28 días de especímenes curados bajo condiciones estándar de laboratorio. La resistencia promedio seleccionada debe por supuesto exceder de la resistencia especificada por un margen suficiente para mantener dentro de los límites especificados las pruebas con bajos valores.

**Tabla 18 Relación Agua/Cemento en función de la resistencia.**

Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación agua/cemento (A/C)	
	Hormigón sin aire incluido	Hormigón con aire incluido
420	0.41	-
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Fuente: (American Concrete Institute, 2002)

#### **2.4.8 Cálculo del contenido de cemento.**

La cantidad de cemento por volumen unitario de concreto se rige por las determinaciones expuestas en los puntos anteriores de este procedimiento (cálculo del contenido de agua y selección de la relación A/C). El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado dividido entre la relación A/C.

#### **2.4.9 Estimación del contenido de agregado grueso.**

Los agregados de esencialmente el mismo tamaño máximo nominal y granulometría producen concretos de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplea un volumen dado de agregado grueso por volumen unitario de concreto, con base en el peso unitario seco compactado. En la Tabla 19 aparecen valores apropiados para estos volúmenes de agregado. Puede observarse que, para igual trabajabilidad, el volumen de agregado

grueso en volumen unitario de concreto depende únicamente de su tamaño máximo y del módulo de finura del agregado fino.

Las diferencias en la cantidad de mortero requerido para la trabajabilidad con diferentes agregados, debidas a diferencias en la forma y granulometría de las partículas, quedan compensadas automáticamente por las diferencias en el contenido de vacíos, obtenidas cuando se determina el peso unitario compactado en seco.

**Tabla 19 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.**

Tamaño máximo nominal de agregado. pulg. (mm)	Volumen de agregado grueso, por volumen unitario de hormigon para distintos módulos de finura de arena.			
	2.4	2.6	2.8	3.0
3/8 (10.00)	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2 (12.50)	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4 (20.00)	0.66	0.64	0.62	0.60
1 (25.00)	0.71	0.69	0.67	0.65
1.5 (40.00)	0.75	0.73	0.71	0.69
2 (50.00)	0.78	0.76	0.74	0.72
3 (70.00)	0.82	0.80	0.78	0.76
6 (150.00)	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: (American Concrete Institute, 2002)

#### **2.4.10 Estimación del contenido de agregado fino.**

El agregado fino, cuya cantidad se determina por diferencia. Puede emplearse cualquiera de los dos procedimientos siguientes:

- **Método de Peso del concreto por unidad de volumen**

Si el peso del concreto por volumen unitario se supone o puede estimarse por experiencia, el peso requerido del agregado fino es, simplemente, la diferencia entre el peso del concreto fresco y el peso total de los demás componentes. A menudo se conoce con bastante precisión el peso unitario del concreto, por experiencia previa con los materiales.

- **Método de volumen absoluto ocupado por los ingredientes del concreto**

Un procedimiento más exacto para calcular la cantidad requerida de agregados finos, implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes. En este caso, el volumen total desplazado por los componentes conocidos (agua, aire, cemento y agregado grueso) se resta del volumen unitario de concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen ocupado por cualquier componente en el concreto es igual a su peso dividido entre la densidad de este material (siendo ésta el producto de la gravedad específica del agua por el peso específico del material).

#### **2.4.11 Ajustes por humedad de los agregados.**

Las cantidades de agregado que realmente deben pesarse para el concreto, deben considerar la humedad del agregado. Los agregados están generalmente húmedos y sus pesos secos deben incrementarse con el porcentaje de agua que contienen ya sea absorbida o libre en la superficie. Por lo tanto el agua de mezclado será corregida dependiendo de los valores de humedad y absorción que tengan los agregados, así:

- Si Absorción (%) > humedad (%), el agregado absorberá agua del agua de mezclado obtenido de la Tabla 18, por lo tanto hay necesidad de agregar una cantidad de agua equivalente a la diferencia entre la absorción y la humedad de los agregados a fin de evitar que este consumo adicional de agua se refleje en mezclas poco manejables.
- Si Absorción (%) < humedad (%), el agregado aportará agua al agua de mezclado por lo tanto, hay necesidad de disminuir el agua de mezclado en una



cantidad equivalente a la diferencia entre la humedad y la absorción a fin de evitar que la mezcla a elaborar sobrepase el revenimiento previsto.

- Si Absorción (%) = Humedad (%), no se debe realizar ningún ajuste ya que los valores de la tabla 8 son calculados bajo esta condición.

#### **2.4.12 Ajustes a la mezcla de prueba.**

Las proporciones calculadas de la mezcla deben verificarse mediante mezclas de prueba, preparadas y probadas o por medio de mezclas reales en el campo. Sólo debe usarse el agua suficiente para producir el revenimiento requerido, independientemente de la cantidad supuesta al dosificar los componentes de la prueba. También debe tenerse cuidado de lograr la trabajabilidad apropiada, ausencia de segregación, así como las propiedades de acabado. Deben efectuarse los ajustes necesarios en las proporciones de las mezclas subsecuentes, de acuerdo con los siguientes procedimientos:

- Si el asentamiento de la mezcla de prueba no es el correcto, increméntese o redúzcase el nuevo contenido estimado de agua a 2 kg por metro cúbico de concreto para cada centímetro de incremento o reducción del asentamiento.
- Si no se obtiene el contenido de aire deseado (para concreto con aire incluido), debe estimarse de nuevo el contenido requerido de aditivo para lograr el contenido apropiado de aire y reducirse o incrementarse el contenido de agua de mezclado que se indica en el (a), en 3 kg por cada 1% en que debe reducirse o incrementarse el contenido de aire respecto al de la mezcla de prueba previa.
- El peso unitario de concreto fresco estimado nuevamente para el ajuste de las proporciones de la mezcla de prueba, es igual al peso unitario en  $\text{kg/m}^3$  medido en la mezcla de prueba, reducido o incrementado por el porcentaje de incremento o reducción del contenido de aire de la mezcla ajustada respecto a la primera mezcla de prueba.
- Deben calcularse nuevos pesos de mezcla, comenzando con la relación de agua/cemento.

### **2.3 ANÁLISIS DEL APOORTE TEÓRICO**

Con la teoría reunida se puede afirmar que el empleo de geoceldas para pavimentos aumentará significativamente las características de resistencia a compresión, es de vital importancia un control intenso en los procedimientos de laboratorio, para la caracterización de los materiales, ya que un error en estos puede resultar en resultados erróneos, la confección del hormigón al estar normada por la metodología A.C.I. 211, se estará realizando los ensayos correspondientes a los normados por la A.S.T.M.

Se debe realizar un análisis a los resultados obtenidos, para verificar la precisión de los mismos según recomiendan las normas, de esta manera garantizar resultados precisos a la hora de realizar el diseño de mezclas.

De igual manera el proceso de elaboración de probetas y el curado es importante, ya que un mal manejo en las muestras o en el proceso de curado puede afectar de manera significativa los resultados, se debe tener especial cuidado en el armado de las probetas con geoceldas, se deberá garantizar que ésta quede lo más tensa posible.

**CAPÍTULO 3**

**CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

**Y DISEÑO DE LA MEZCLA**

## CAPÍTULO 3

### CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y DISEÑO DE LA MEZCLA

#### 3.1 EXTRACCIÓN DE AGREGADOS

Los agregados serán extraídos de forma no probabilística de la "Seleccionadora de Áridos San Blas" ubicada en la zona San Blas, en la ciudad de Tarija. Las muestras luego serán guardadas en bolsas de polietileno bajo techo evitando en lo máximo la absorción de humedad.

##### 3.1.1 Coordenadas de extracción.

Latitud: 21°33'34.71"S

Longitud: 64°43'2.47"O

Proyección U.T.M. de la zona de extracción.

20 K 322171.77 m E 7614933.70 m S

**Figura 12** Vista satelital de "Seleccionadora de Áridos San Blas"



Fuente: Google earth.

**Figura 13 Seleccionadora de Áridos San Blas**



Fuente: Elaboración propia.

### **3.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN**

**Tabla 20 Resumen de caracterización de agregados obtenido en laboratorio.**

Agregados		Fino	Grueso
Peso unitario suelto	(kg/m <sup>3</sup> )	1624.52	1572.42
Peso unitario compactado	(kg/m <sup>3</sup> )	1695.84	1684.18
Peso específico	(kg/m <sup>3</sup> )	2399.89	2565.34
Módulo de fineza	-	2.60	7.16
TMN	(mm)	4.75	25.00
Absorción	(%)	3.01	1.81
Contenido de humedad	(%)	1.99	1.48

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 21 Resumen de caracterización del cemento obtenido en laboratorio.**

Cemento El Puente		
Tipo de cemento	-	IP-30
Peso específico	(kg/m <sup>3</sup> )	2773.33
Módulo de finura	(%)	98.27

Fuente: Elaboración propia

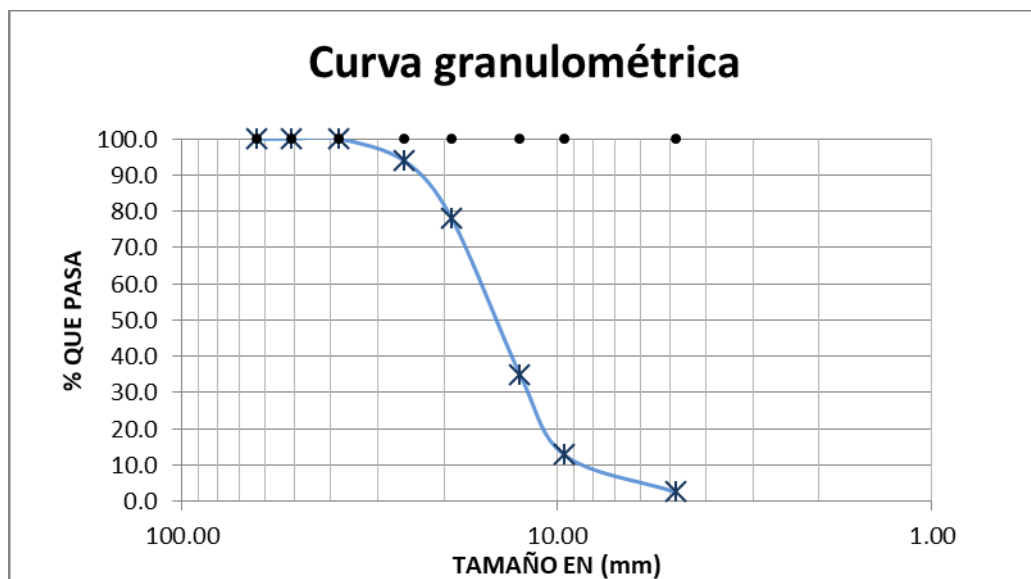
### 3.3 CONTROL Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Luego de realizado el análisis se determinó que el agregado extraído de San Blas se encuentra dentro de los rangos y es apto para el uso en el presente proyecto, por lo que se decide usar los agregados de dicho lugar.

#### 3.3.1 Análisis granulométrico.

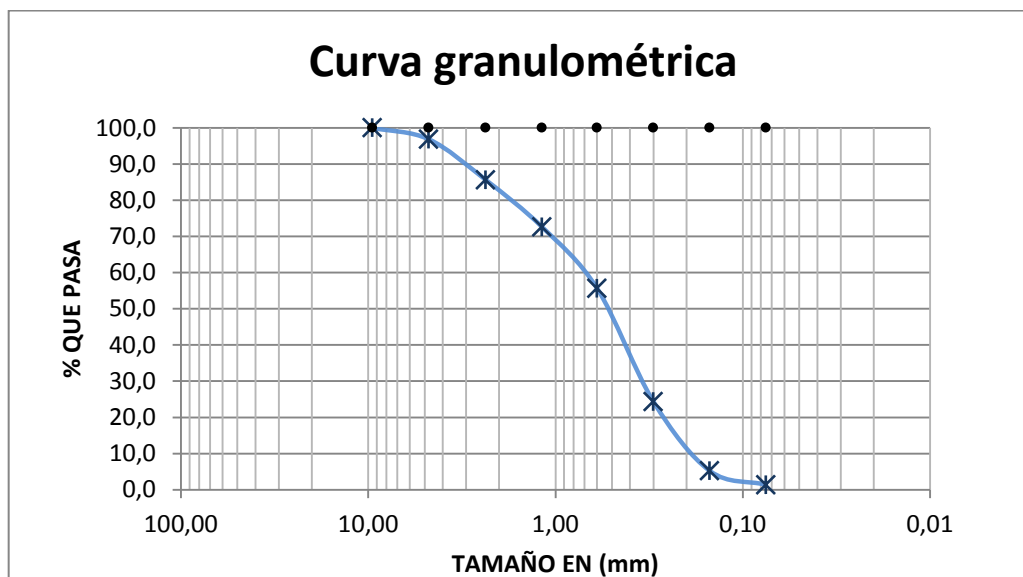
Para la validación de resultados la diferencia entre la sumatoria de los pesos retenidos y el peso inicial no debe ser mayor al 0.3%

**Figura 14 Curva granulométrica agregado grueso.**



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15 Curva granulométrica agregado fino.



Fuente: Elaboración propia.

En el análisis granulométrico se obtuvo resultados aceptables, ya que la curva granulométrica se encuentra dentro de los límites especificados en la norma A.S.T.M. C33.

El módulo de finura del agregado fino determinado a partir de la granulometría de igual manera se encuentra dentro de los límites establecidos, que son entre 2.3 y 3.1.

**Tabla 22 Diferencia de pesos en agregado fino.**

Peso inicial de ensayo	(g)	1000.00
Peso final acumulado	(g)	996.32
Diferencia de pesos	(%)	0.37

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 23 Diferencia de pesos en agregado grueso.**

Peso inicial de ensayo	(g)	10146.00
Peso final acumulado	(g)	10117.22
Diferencia de pesos	(%)	0.28

Fuente: Elaboración propia.

La diferencia entre el peso final acumulado y el inicial es menor al 0.3%, por lo que de igual manera se concluye que los resultados obtenidos son aceptables y se encuentran dentro de lo establecido.

### 3.3.2 Contenido de humedad.

El manual de la Administradora Boliviana de Carreteras señala que para verificar la validez de este ensayo se considera que cualquier tamaño de muestra que supere las cantidades mínimas de la Tabla 10, es admitido.

**Tabla 24 Peso de agregado fino y grueso húmedo.**

Muestra		1	2	3
Peso agregado fino + Cápsula	(g)	612.3	675.4	648.2
Peso agregado grueso + Cápsula	(g)	4356.8	4178.4	4295.3

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 25 Contenido de humedad obtenido en laboratorio.**

Contenido de humedad agregado fino	(%)	2.00
Contenido de humedad agregado grueso	(%)	1.50

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3 Peso unitario.

Luego de realizar un promedio aritmético de dos pares de pruebas gemelas para la determinación del peso unitario se verificó que tiene una diferencia de 8 kg/m<sup>3</sup> en el agregado grueso y 7.7 kg/m<sup>3</sup> en el agregado fino, cumpliendo así con el límite de ser menor a 30 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 26 Resultado de peso unitario de agregado grueso obtenido en laboratorio.**

Muestra		1	2	3	4	Diferencia
Peso unitario compactado	kg/m <sup>3</sup>	1680.8	1689.8	1684.3	1681.9	9.0
Peso unitario suelto	kg/m <sup>3</sup>	1575.2	1575.7	1567.1	1571.7	8.5

Fuente: Elaboración propia.



**Tabla 27 Resultado de peso unitario de agregado fino obtenido en laboratorio.**

Muestra		1	2	3	4	Diferencia
Peso unitario compactado	kg/m <sup>3</sup>	1692.1	1692.3	1699.2	1699.8	7.7
Peso unitario suelto	kg/m <sup>3</sup>	1625.1	1622.9	1623.8	1626.3	3.5

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.4 Densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

Para los valores de densidad y absorción en el agregado grueso se tiene una variación de 17.76 kg/m<sup>3</sup> siendo la máxima permitida de 30 kg/m<sup>3</sup>. Y 0.19% en el porcentaje de absorción, siendo el límite 0.3%, por lo que se puede afirmar que estos resultados son confiables y están dentro de los límites.

**Tabla 28 Densidad y absorción del agregado grueso.**

Muestra			1	2	Diferencia
Densidad real árido saturado superficialmente seco	ρ <sub>rt</sub>	kg/m <sup>3</sup>	2607.64	2616.08	8.44
Densidad real árido seco	ρ <sub>rs</sub>	kg/m <sup>3</sup>	2563.63	2567.05	3.42
Densidad neta	ρ <sub>n</sub>	kg/m <sup>3</sup>	2681.64	2699.40	17.76
Absorción de agua	α	%	1.72	1.91	0.19

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.5 Densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos.

A continuación se resume los resultados obtenidos en laboratorio.

**Tabla 29 Densidad y absorción del agregado fino.**

Muestra			1	2	Diferencia
Densidad real árido saturado superficialmente seco	ρ <sub>rt</sub>	(kg/m <sup>3</sup> )	2478.31	2466.09	12.22
Densidad real árido seco	ρ <sub>rs</sub>	(kg/m <sup>3</sup> )	2405.20	2394.57	10.63
Densidad neta	ρ <sub>n</sub>	(kg/m <sup>3</sup> )	2594.92	2579.02	15.90
Absorción de agua	α	%	3.04	2.99	0.05

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del agregado fino, los resultados tienen una variación máxima de 15.9 kg/m<sup>3</sup> siendo la máxima permitida de 30 kg/m<sup>3</sup>. Y 0.05% en el porcentaje de absorción, siendo el límite 0.3%, por lo que se puede afirmar que estos resultados son aceptables.

### 3.3.6 Equivalente arena.

Los resultados obtenidos para tres ensayos de la misma muestra bajo las mismas condiciones dieron como diferencia menos de 4 puntos, por lo que estos resultados son considerados válidos.

**Tabla 30 Equivalente de arena.**

Probeta			1	2	3	Diferencia
Equivalente de arena	EA	(%)	98.08	98.10	98.97	0.89

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.7 Peso específico cemento.

Los ensayos muestran una diferencia de 0.64 g/ml siendo éste mayor al establecido por la norma, pero se lo tiene por aceptable ya que se considera que en el laboratorio no se usó un matraz Le Chatelier. El ensayo de peso específico del cemento presenta una ligera variación a los valores dados por el fabricante en el certificado de calidad para el cemento "El Puente Tipo IP-30" siendo éste 3.01 g/cm<sup>3</sup> y el valor promedio obtenido en laboratorio, 2.77 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabla 31 Peso específico del cemento.**

Muestra		1	2	3	Diferencia
Peso específico	(kg/m <sup>3</sup> )	2560	3200	2560	640

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.8 Desgaste en la Máquina de Los Ángeles

El desgaste del agregado mediante la "Máquina de Los Ángeles" fue de 27.6% estando solo un poco por debajo del límite establecido del 40%, por lo que es considerado uno de los valores más al límite.

**Tabla 32 Desgaste de los Ángeles.**

Masa inicial de la muestra	(g)	5004.00
Masa final de la muestra	(g)	3623.00
Pérdida de masa de la muestra	(%)	27.60

Fuente: Elaboración propia.

### **3.4 RESULTADOS DE DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS**

A continuación se describen los resultados obtenidos del procesamiento de datos y cálculos de las proporciones agregados, agua y cemento, mediante la metodología A.C.I. En todos los casos se adoptó un asentamiento de 3 pulgadas.

**Tabla 33 Dosificación para resistencia 210 kg/cm<sup>2</sup>.**

	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Agua (l)
Peso (kg)	345.63	524.70	1179.27	202.34
Proporciones	1.00	1.52	3.41	29.27

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 34 Dosificación para resistencia 220 kg/cm<sup>2</sup>.**

	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Agua (l)
Peso (kg)	354.52	516.86	1179.27	202.26
Proporciones	1.00	1.46	3.33	28.53

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 35 Dosificación para resistencia 230 kg/cm<sup>2</sup>.**

	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Agua (l)
Peso (kg)	363.88	508.60	1179.27	202.17
Proporciones	1.00	1.40	3.24	27.78

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 36 Dosificación para resistencia 240 kg/cm<sup>2</sup>.**

	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Agua (l)
Peso (kg)	373.74	499.89	1179.27	202.08
Proporciones	1.00	1.34	3.16	27.04

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 37 Dosificación para resistencia 250 kg/cm<sup>2</sup>.**

	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Agua (l)
Peso (kg)	384.16	490.70	1179.27	201.99
Proporciones	1.00	1.28	3.07	26.29

Fuente: Elaboración propia.

**CAPÍTULO IV**

**PROCESAMIENTO, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN  
DE RESULTADOS**

## CAPÍTULO IV

### PROCESAMIENTO, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 DATOS OBTENIDOS DE ENSAYOS A COMPRESIÓN EN LABORATORIO.

En las tablas a continuación se muestran los valores procesados de los resultados obtenidos en laboratorio, a partir de los cuales se procedió a hacer el análisis y comparación entre las resistencias, para determinar si existe influencia en construir los bloques con geoceldas o no.

##### 4.1.1 Resistencia a compresión en bloques de hormigón $f'c$ 210 $kg/cm^2$ .

**Tabla 38 Resistencia en probetas cilíndricas.**

Probeta cilíndrica		1	2
Edad	(Días)	28.00	28.00
Peso	(g)	12930.00	13250.00
Peso unitario	( $g/cm^3$ )	2.41	2.46
Diámetro	(mm)	150.00	150.00
Alto	(mm)	303.00	305.00
Resistencia	( $kg/cm^2$ )	152.30	160.10

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 39 Resistencia en probetas cúbicas sin geocelda.**

Probeta cúbica sin geocelda		1	2	3	4
Edad	(Días)	28.00	28.00	28.00	28.00
Peso	(g)	8605.00	8545.00	8485.00	8475.00
Peso unitario	( $g/cm^3$ )	2.35	2.33	2.33	2.33
Ancho	(mm)	224.00	221.00	222.00	222.00
Largo	(mm)	218.00	218.00	216.00	218.00
Alto	(mm)	75.00	76.00	76.00	75.00
Resistencia	( $kg/cm^2$ )	5.60	5.80	6.30	6.30

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 40 Resistencia en probetas cúbicas con geocelda.**

Probeta cúbica con geocelda		1	2	3	4
Edad	(Días)	28.00	28.00	28.00	28.00
Peso	(g)	8360.00	8360.00	8260.00	8555.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.35	2.37	2.33	2.37
Ancho	(mm)	219.00	218.00	220.00	222.00
Largo	(mm)	217.00	216.00	218.00	217.00
Alto	(mm)	75.00	75.00	74.00	75.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	100.90	5.60	6.40	7.60

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2 Resistencia a compresión en bloques de hormigón f'c 220 kg/cm<sup>2</sup>.

**Tabla 41 Resistencia en probetas cilíndricas.**

Probeta cilíndrica		1	2
Edad	(Días)	28.00	28.00
Peso	(g)	12740.00	12925.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.35	2.41
Diámetro	(mm)	151.00	150.00
Alto	(mm)	303.00	303.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	162.30	200.60

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 42 Resistencia en probetas cúbicas sin geocelda.**

Probeta cúbica sin geocelda		1	2	3	4
Edad	(Días)	28.00	28.00	28.00	28.00
Peso	(g)	8260.00	8230.00	8520.00	8560.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.25	2.35	2.35	2.32
Ancho	(mm)	222.00	216.00	222.00	223.00
Largo	(mm)	218.00	213.00	218.00	218.00
Alto	(mm)	76.00	76.00	75.00	76.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	8.80	8.00	12.10	23.40

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 43 Resistencia en probetas cúbicas con geocelda.**

Probeta cúbica con geocelda		1	2	3	4
Edad	(Días)	28.00	28.00	28.00	28.00
Peso	(g)	8300.00	8420.00	8360.00	8305.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.36	2.37	2.33	2.33
Ancho	(mm)	220.00	218.00	219.00	218.00
Largo	(mm)	213.00	214.00	216.00	215.00
Alto	(mm)	75.00	76.00	76.00	76.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	9.70	10.40	10.80	13.00

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.3 Resistencia a compresión en bloques de hormigón f'c 230 kg/cm<sup>2</sup>

**Tabla 44 Resistencia en probetas cilíndricas.**

Probeta cilíndrica		1	2
Edad	(Días)	28.00	28.00
Peso	(g)	12820.00	13065.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.39	2.42
Diámetro	(mm)	150.00	150.00
Alto	(mm)	304.00	305.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	185.60	181.40

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 45 Resistencia en probetas cúbicas sin geocelda.**

Probeta cúbica sin geocelda		1	2	3	4
Edad	(Días)	28.00	28.00	28.00	28.00
Peso	(g)	8190.00	8360.00	8420.00	8350.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.28	2.32	2.33	2.32
Ancho	(mm)	220.00	221.00	221.00	220.00
Largo	(mm)	215.00	217.00	218.00	218.00
Alto	(mm)	76.00	75.00	75.00	75.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	8.90	9.60	12.10	13.80

Fuente: Elaboración propia.



**Tabla 46 Resistencia en probetas cúbicas con geocelda.**

Probeta cúbica con geocelda		1	2	3	4
Edad	(Días)	28.00	30.00	28.00	28.00
Peso	(g)	8520.00	8285.00	8350.00	8230.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.40	2.41	2.36	2.35
Ancho	(mm)	220.00	218.00	219.00	216.00
Largo	(mm)	218.00	213.00	215.00	213.00
Alto	(mm)	74.00	74.00	75.00	76.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	6.10	9.40	9.90	15.40

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.4 Resistencia a compresión en bloques de hormigón f'c 240 kg/cm<sup>2</sup>

**Tabla 47 Resistencia en probetas cilíndricas.**

Probeta cilíndrica		1	2
Edad	(Días)	28.00	28.00
Peso	(g)	12995.00	13105.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.43	2.44
Diámetro	(mm)	150.00	150.00
Alto	(mm)	303.00	304.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	185.60	186.40

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 48 Resistencia en probetas cúbicas sin geocelda.**

Probeta cúbica sin geocelda		1	2	3	4
Edad	(Días)	28.00	28.00	28.00	28.00
Peso	(g)	8240.00	8350.00	8150.00	8135.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.29	2.34	2.24	2.28
Ancho	(mm)	219.00	219.00	220.00	220.00
Largo	(mm)	216.00	217.00	218.00	216.00
Alto	(mm)	76.00	75.00	76.00	75.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	10.40	12.10	14.50	15.60

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 49 Resistencia en probetas cúbicas con geocelda.**

Probeta cúbica con geocelda		1	2	3	4
Edad	(Días)	28.00	28.00	28.00	28.00
Peso	(g)	8080.00	8125.00	8230.00	8130.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.27	2.29	2.30	2.30
Ancho	(mm)	218.00	219.00	218.00	218.00
Largo	(mm)	215.00	213.00	216.00	216.00
Alto	(mm)	76.00	76.00	76.00	75.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	7.50	19.00	22.70	8.50

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.5 Resistencia a compresión en bloques de hormigón f'c 250 kg/cm<sup>2</sup>

**Tabla 50 Resistencia en probetas cilíndricas.**

Probeta cilíndrica		1	2
Edad	(Días)	28.00	28.00
Peso	(g)	12720.00	12800.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.34	2.33
Diámetro	(mm)	151.00	152.00
Alto	(mm)	303.00	303.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	197.50	184.30

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 51 Resistencia en probetas cúbicas sin geocelda.**

Probeta cúbica sin geocelda		1	2	3	4
Edad	(Días)	28.00	28.00	28.00	28.00
Peso	(g)	7825.00	8010.00	8230.00	8205.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.27	2.29	2.35	2.28
Ancho	(mm)	216.00	218.00	216.00	220.00
Largo	(mm)	213.00	214.00	213.00	218.00
Alto	(mm)	75.00	75.00	76.00	75.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	43.80	48.70	54.30	15.60

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 52 Resistencia en probetas cúbicas con geocelda.**

Probeta cúbica con geocelda		1	2	3	4
Edad	(Días)	28.00	28.00	28.00	28.00
Peso	(g)	8230.00	8560.00	8260.00	8350.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.31	2.32	2.27	2.30
Ancho	(mm)	218.00	222.00	220.00	222.00
Largo	(mm)	215.00	219.00	218.00	218.00
Alto	(mm)	76.00	76.00	76.00	75.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	8.00	6.10	74.10	82.30

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.6 Resistencia a compresión en bloques de hormigón con altura de 10 cm y $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ .

**Tabla 53 Resistencia en probetas cúbicas sin geocelda y altura 10 cm.**

Probeta cúbica sin geocelda de 10 cm		1	2	3	4
Edad	(Días)	28.00	28.00	28.00	28.00
Peso	(g)	10870.00	10725.00	10810.00	10750.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.33	2.33	2.32	2.34
Ancho	(mm)	218.00	218.00	218.00	218.00
Largo	(mm)	218.00	218.00	218.00	217.00
Alto	(mm)	98.00	97.00	98.00	97.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	7.22	10.30	14.90	38.60

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.7 Resultados procesados de ensayos a compresión

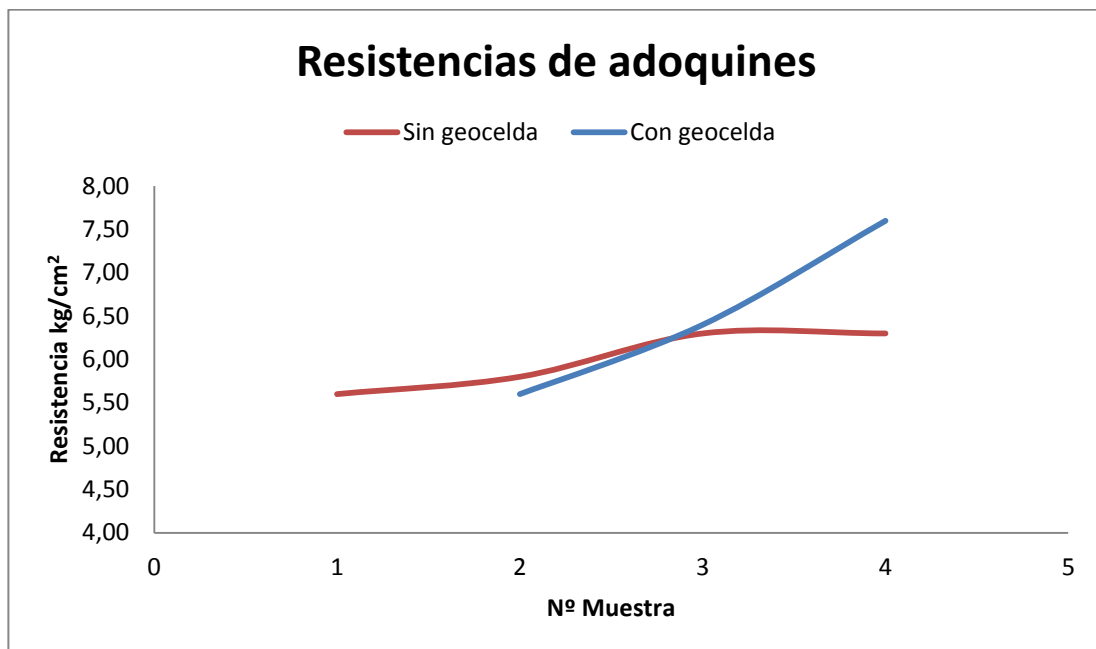
Los resultados presentados a continuación están detallados en los anexos, a continuación se presentan los valores de resistencia promedio en  $\text{kg/cm}^2$ , procesados mediante la metodología del capítulo 1. Los valores muy dispersos fueron depurados de acuerdo a los límites de la media  $\pm$  desviación estándar. De igual manera se muestran las gráficas resultantes de los ensayos.

**Tabla 54 Resumen de resistencias a compresión.**

$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Con geocelda (kg/cm <sup>2</sup> )	Sin geocelda (kg/cm <sup>2</sup> )	Incremento (%)
210	6.53	6.00	8.16
220	10.98	9.63	12.22
230	11.57	11.10	4.03
240	20.85	13.15	36.93
250	78.20	48.93	37.43

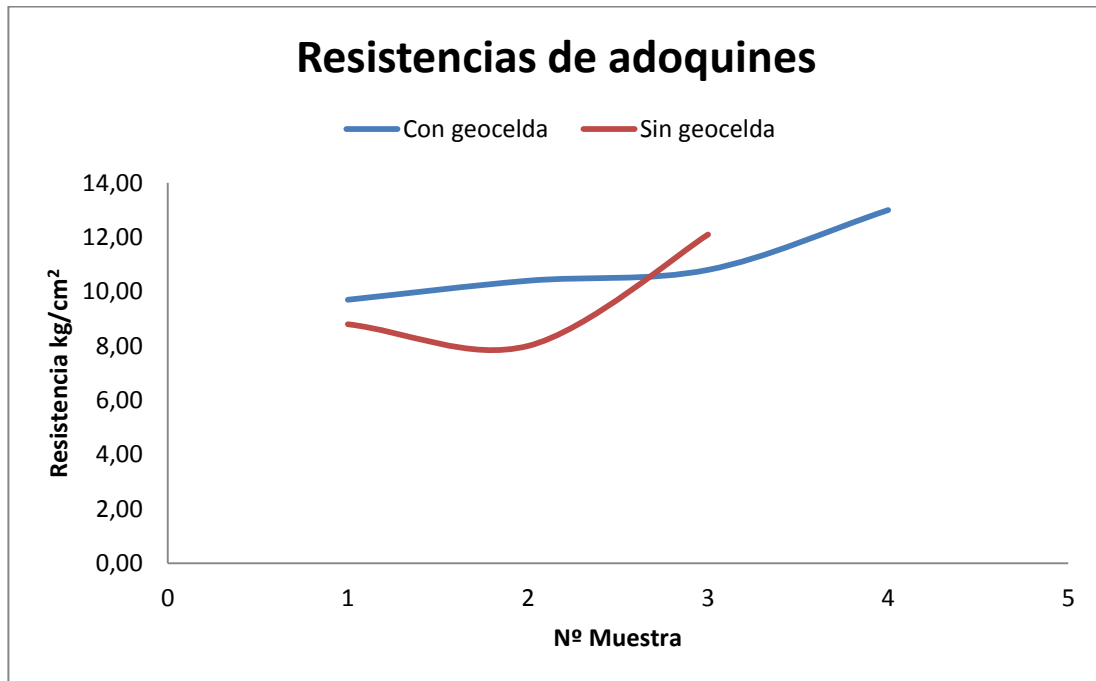
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 16 Resistencia a compresión para  $f'c = 210$  kg/cm<sup>2</sup>.**



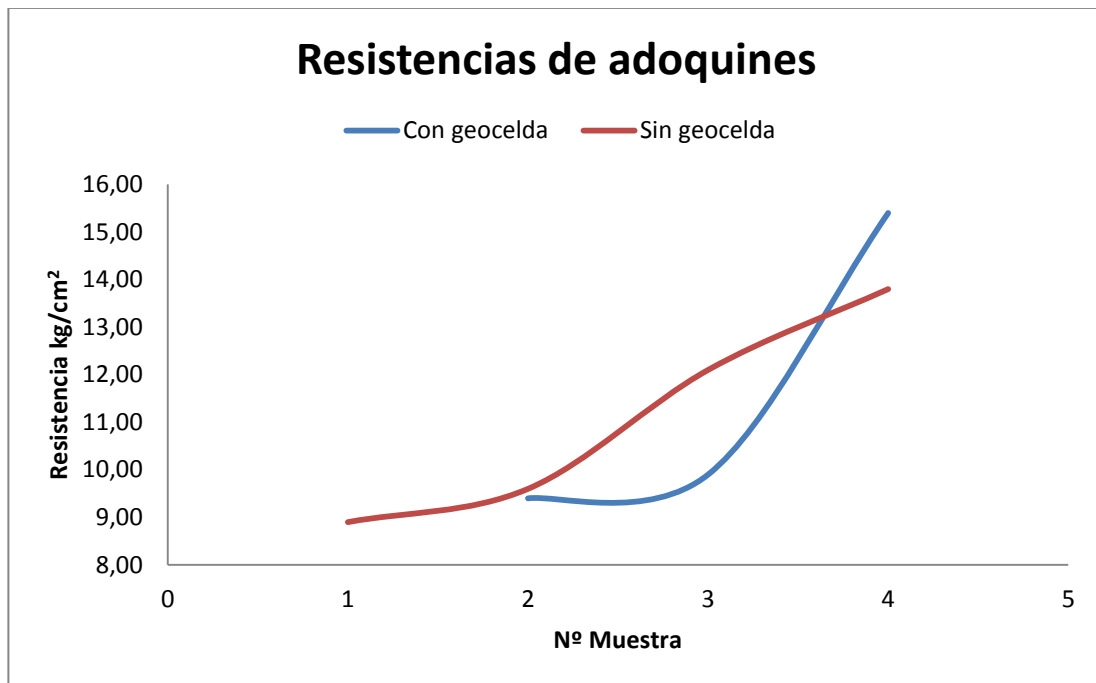
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 17 Resistencia a compresión para  $f'c = 220 \text{ kg/cm}^2$ .**



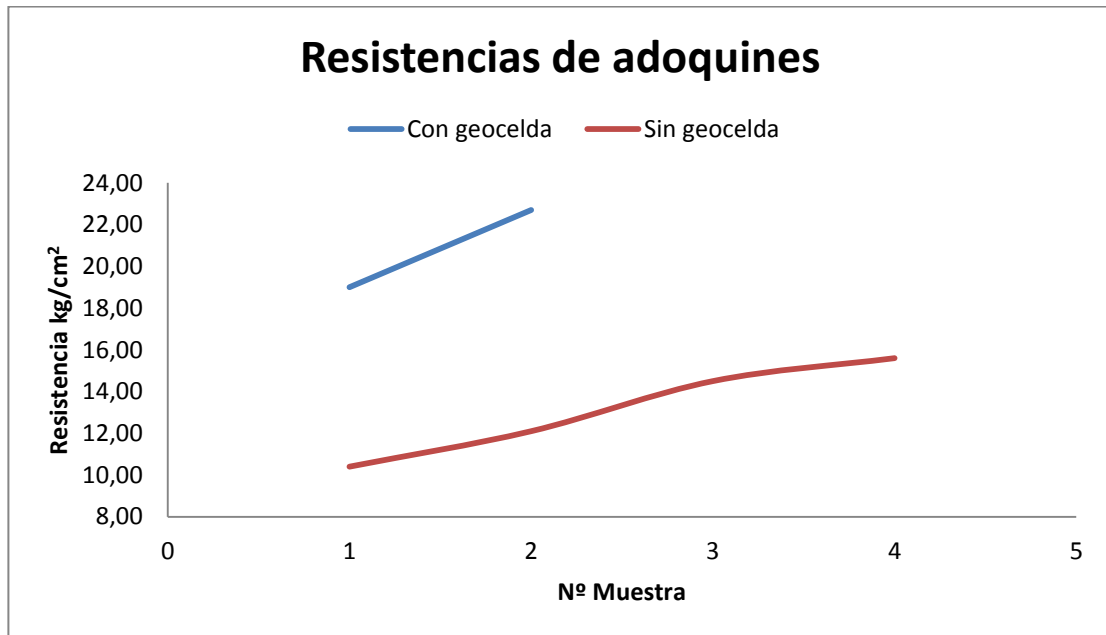
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 18 Resistencia a compresión para  $f'c = 230 \text{ kg/cm}^2$ .**



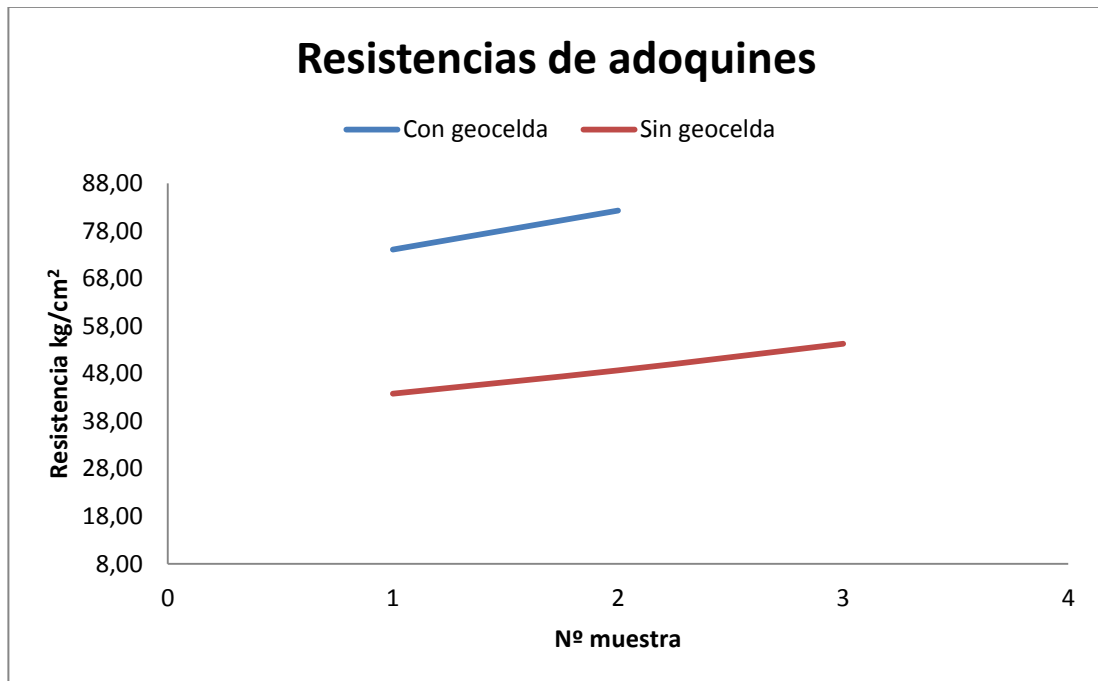
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 19 Resistencia a compresión para  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 20 Resistencia a compresión para  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ .**



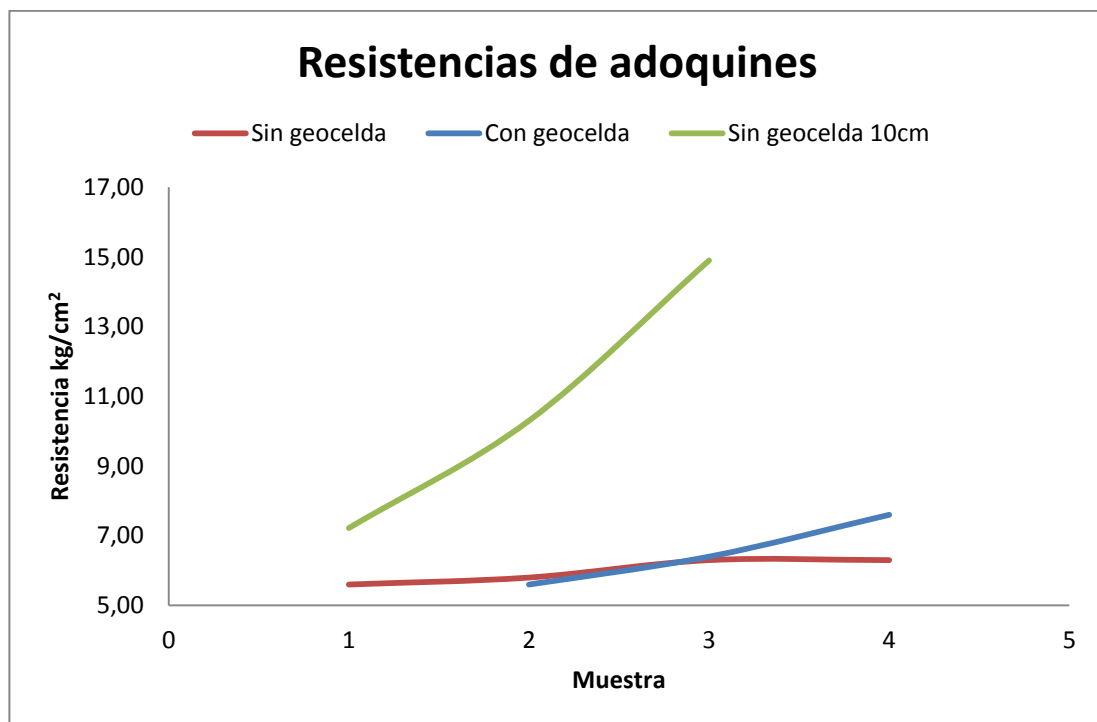
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 55 Resistencia a compresión para adoquines con 10 cm de espesor.**

Probeta cúbica sin geocelda		1	2	3	4
Edad	(Días)	28.00	28.00	28.00	28.00
Peso	(g)	10870.00	10725.00	10810.00	10750.00
Peso unitario	(g/cm <sup>3</sup> )	2.33	2.33	2.32	2.34
Ancho	(mm)	218.00	218.00	218.00	218.00
Largo	(mm)	218.00	218.00	218.00	217.00
Alto	(mm)	98.00	97.00	98.00	97.00
Resistencia	(kg/cm <sup>2</sup> )	7.22	10.30	14.90	38.60
Resistencia corregida	(kg/cm <sup>2</sup> )	7.22	10.30	14.90	
Media aritmética	(kg/cm <sup>2</sup> )	10.81			
Desviación estándar	(kg/cm <sup>2</sup> )	3.16			
Varianza	-	9.96			
Coefficiente de variación	-	0.29			

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 21 Resistencia adoquín 7.5 cm con/sin geocelda y adoquín 10 cm sin geocelda.**



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.8 Evaluación de beneficio – costo.

Para evaluar la relación beneficio – costo, se realizó una comparación entre las resistencias de los bloques con geocelda de lado 22 cm, y espesor de 7.5 cm. Y otros bloques de lado 22 cm y altura 10 cm, ambos dosificados para un  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .

La resistencia promedio para un bloque de hormigón de 7.5 cm con geocelda es de  $6.53 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que la resistencia para un bloque de igual dimensiones sin refuerzo solo dio como resultado  $6.00 \text{ kg/cm}^2$ , por lo que se aumentó el espesor a 10 cm, el cual resistió en promedio  $10.81 \text{ kg/cm}^2$ .

**Tabla 56 Comparación de resistencias con variación de altura en los bloques.**

Probeta cúbica sin geocelda de 10 cm		1	2	3	4
Resistencia	( $\text{kg/cm}^2$ )	7.22	10.30	14.90	38.60
Resistencia corregida	( $\text{kg/cm}^2$ )	7.22	10.30	14.90	
Media aritmética	( $\text{kg/cm}^2$ )	10.81			
Probeta cúbica con geocelda de 7.5 cm		1	2	3	4
Resistencia	( $\text{kg/cm}^2$ )	100.90	5.60	6.40	7.60
Resistencia corregida	( $\text{kg/cm}^2$ )		5.60	6.40	7.60
Media aritmética	( $\text{kg/cm}^2$ )	6.53			

Fuente: Elaboración propia.

Con estos valores se realizó una iteración para obtener una altura a la cual la resistencia sin geocelda sea igual al de una que si tiene el refuerzo, dando como resultado una altura de 7.79 cm de espesor. Por razones constructivas se toma 8 cm de espesor.

Este valor fue comparado para determinar su precio unitario, de donde se obtuvo los siguientes resultados. Se toma como valor patrón el precio unitario correspondiente a  $\text{m}^2$  de bloques de hormigón, de 22 cm de lado, 8 cm de peralte, y dosificación  $210 \text{ kg/cm}^2$ .

A continuación se detalla los precios unitarios para los bloques de 7.5 cm y 8 cm.



**Tabla 57 Precio unitario bloques de hormigón con geocelda altura 7.5 cm.**

	Descripción	Unidad	Cantidad	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
1	<b>Materiales</b>				
	Arena	m <sup>3</sup>	0.02	150.00	2.40
	Grava	m <sup>3</sup>	0.03	130.00	4.42
	Cemento Portland IP-30	kg	25.92	0.95	24.63
	Geoceldas 7.5 cm.	m <sup>2</sup>	1.00	35.00	35.00
	Total materiales				66.45
2	<b>Mano de obra</b>				
	Albañil	h	2.00	18.75	37.50
	Ayudante	h	2.00	13.75	27.50
	Subtotal mano de obra				65.00
	Cargas sociales	%	55.00		35.75
	IVA	%	14.94		15.05
	Total mano de obra				115.80
3	<b>Equipo y maquinaria</b>				
	Mezcladora	h	1.00	25.00	25.00
	Herramientas menores	%	5.00		5.79
	Total equipo y maquinaria				30.79
4	<b>Gastos generales y administrativos</b>				
	Gastos generales	%	10.00		21.30
	Total gastos generales y administrativos				21.30
5	<b>Utilidad</b>				
	Utilidad	%	5.00		11.72
	Total utilidad				11.72
6	<b>Impuestos</b>				
	Impuestos a las transacciones	%	3.09		7.60
	Total impuestos				7.60
	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>				<b>253.66</b>

Son: Doscientos cincuenta y tres con 66/100 Bolivianos

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 58 Precio unitario bloques de hormigón sin geocelda altura 8 cm.**

	Descripción	Unidad	Cantidad	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
1	<b>Materiales</b>				
	Arena	m <sup>3</sup>	0.02	150.00	3.15
	Grava	m <sup>3</sup>	0.04	130.00	5.77
	Cemento Portland IP-30	kg	33.87	0.95	32.18
	Total materiales				41.10
2	<b>Mano de obra</b>				
	Albañil	h	1.50	18.75	28.13
	Ayudante	h	2.00	13.75	27.50
	Subtotal mano de obra				55.63
	Cargas sociales	%	55.00		30.59
	IVA	%	14.94		12.88
	Total mano de obra				99.10
3	<b>Equipo y maquinaria</b>				
	Mezcladora	h	1.00	25.00	25.00
	Herramientas menores	%	5.00		4.95
	Total equipo y maquinaria				29.95
4	<b>Gastos generales y administrativos</b>				
	Gastos generales	%	10.00		17.02
	Total gastos generales y administrativos				17.02
5	<b>Utilidad</b>				
	Utilidad	%	5.00		9.36
	Total utilidad				9.36
6	<b>Impuestos</b>				
	Impuestos a las transacciones	%	3.09		6.07
	Total impuestos				6.07
	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>				<b>202.60</b>

Son: Doscientos dos con 60/100 Bolivianos

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.9 Análisis de resultados de resistencia.

El incremento en los adoquines con geoceldas es evidente, varios resultados fueron depurados ya que excedían los límites establecidos.

Los resultados de resistencia para los adoquines de 10 cm solo se realizaron con dosificaciones para una resistencia esperada de  $210 \text{ kg/cm}^2$ , es por esta razón que solo se realiza el análisis de costos sólo con los adoquines de igual resistencia de diseño.

**Tabla 59 Resistencia a compresión obtenidas en laboratorio.**

f'c = 220 kg/cm <sup>2</sup>					
Resistencia sin geocelda	(kg/cm <sup>2</sup> )	8.80	8.00	12.10	
Resistencia con geocelda	(kg/cm <sup>2</sup> )	9.70	10.40	10.80	13.00
f'c = 230 kg/cm <sup>2</sup>					
Resistencia sin geocelda	(kg/cm <sup>2</sup> )	8.90	9.60	12.10	13.80
Resistencia con geocelda	(kg/cm <sup>2</sup> )		9.40	9.90	15.40
f'c = 240 kg/cm <sup>2</sup>					
Resistencia sin geocelda	(kg/cm <sup>2</sup> )	10.40	12.10	14.50	15.60
Resistencia con geocelda	(kg/cm <sup>2</sup> )			19.00	22.70
f'c = 250 Kg/cm <sup>2</sup>					
Resistencia sin geocelda	(kg/cm <sup>2</sup> )	43.80	48.70	54.30	
Resistencia con geocelda	(kg/cm <sup>2</sup> )			74.10	82.30
f'c = 210 kg/cm <sup>2</sup> altura 10 cm					
Resistencia sin geocelda	(kg/cm <sup>2</sup> )	7.22	10.30	14.90	
f'c = 210 kg/cm <sup>2</sup>					
Resistencia sin geocelda	(kg/cm <sup>2</sup> )	5.60	5.80	6.30	6.30
Resistencia con geocelda	(kg/cm <sup>2</sup> )		5.60	6.40	7.60

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 60 Resistencia a compresión de bloques de hormigón con altura de 7.5 cm vs 10 cm.**

Resistencia a compresión en probetas cúbicas		
Sin geocelda altura 10 cm	(kg/cm <sup>2</sup> )	10.81
Con geocelda altura 7.5cm	(kg/cm <sup>2</sup> )	6.53

Fuente: Elaboración propia.

El incremento en promedio de resistencia para  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  es de 8.16%, para  $f'c=220 \text{ kg/cm}^2$  un incremento de 12.22%, para  $f'c=230 \text{ kg/cm}^2$  un incremento de 4.03%, para  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$  un incremento de 36.93%, y para  $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$  un incremento de 37.43% de esta manera se observa que a medida que se incrementa la dosificación de la mezcla la diferencias de resistencias se hacen más notables. Mientras que el promedio de todas las dosificaciones es de 19.76%.

De acuerdo a los precios unitarios, la diferencia de costo representa un 20.13% entre un adoquín de 7.5 cm con geocelda y uno de 8 cm sin geocelda, comparando este valor con el 8.16% de incremento en la resistencia, se observa que existe una estrecha relación entre los el costo y el incremento de resistencia. Los cuales están mostrados en la siguiente tabla.

**Tabla 61 Relación costo – resistencia.**

Descripción	Espesor (cm)	Precio unitario por $\text{m}^2$ . (Bs)
Adoquín con geocelda	7.50	253.66
Adoquín sin geocelda	8.00	202.60
Diferencia de costos	(%)	20.13
Adoquín con geocelda	( $\text{kg/cm}^2$ )	6.53
Adoquín sin geocelda	( $\text{kg/cm}^2$ )	6.00
Diferencia de resistencia	(%)	8.16

Fuente: Elaboración propia.

Estos valores son basados en ensayos a compresión de probetas realizadas para una resistencia de  $210 \text{ kg/cm}^2$ .

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

Se demuestra mediante el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos a compresión, que el uso de geoceldas en la construcción de los bloques de hormigón influye de manera directa en la resistencia, incrementando la misma en proporciones de 8.16% para una resistencia de diseño de  $210 \text{ kg/cm}^2$ , de igual manera se observa un incremento para dosificaciones mayores, por lo que se concluye que la hipótesis planteada en el proyecto es correcta.

En cuanto a la relación de beneficio – costo, tomando en cuenta únicamente la resistencia a compresión como beneficio, esta relación es directa, teniendo un incremento de 20.13% en el costo versus un 8.16% de incremento en resistencia, se concluye que no es aplicable, considerando sus desventajas como ser la dificultad de conseguir en la región, la falta de mano de obra capacitada, la falta de experiencias previas en el país, y al ser una relación directa el costo con la resistencia, es conveniente aumentar el espesor del bloque de hormigón, por lo que se concluye que el costo es mayor al beneficio, siendo más factible el uso de adoquines tradicionales sin refuerzo.

Los beneficios de usar geoceldas son diversos, los cuales no se consideraron en el presente proyecto, por lo que el punto de beneficio - costo está abierto a futuras investigaciones específicas a las propiedades que no se estudiaron en este proyecto.

Para los ensayos de compresión con el uso de la prensa hidráulica fue necesario el uso de una plancha de metal con las dimensiones necesarias para distribuir el esfuerzo en toda el área del bloque de hormigón, además del uso de una lámina de goma con espesor de tres milímetros, la cual ayudó a disminuir las variaciones producidas por pequeñas imperfecciones en las caras del hormigón.

Algunos valores obtenidos en laboratorio fueron depurados ya que eran muy alejados de la media, tal como se muestra en la tabla 59, con estos valores ya corregidos se realizó el

procesamiento estadístico para determinar un valor promedio correspondiente a cada resistencia de diseño mostrado en la tabla 54.

La variación en resistencias está representada en términos de porcentaje, comparando muestras de hormigón con la misma resistencia de diseño y dimensiones lo más similares posibles, solo variando el uso de la geocelda en la elaboración de los bloques.

Al realizar el análisis de los resultados de todos los ensayos con sus diferentes resistencias de diseño, se puede observar el incremento en la resistencia mediante la curva de resistencia, con lo cual se puede concluir que en términos de compresión simple, analizando individualmente los bloques, el uso de geoceldas como refuerzo representa un aumento en la resistencia a compresión. Estos resultados fueron procesados estadísticamente, luego de depurar valores dispersos y calculando los promedios de resistencia con los datos que cumplen con el coeficiente de variación menor a 0.3, garantizando así la representatividad de los resultados al conjunto en estudio.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Los beneficios del uso de geoceldas en pavimentos es bastante amplia, para futuras investigaciones se propone aumentar el tiempo de fraguado de las muestras, y crear curvas con datos a largo plazo, de esta manera analizar el comportamiento a lo largo del tiempo.

Se debe ampliar el estudio a las diferentes propiedades de construir los bloques con geoceldas, con lo cual se pueda tener un panorama más amplio en cuanto al análisis de beneficio – costo.

Se debe considerar los ensayos comparativos con bloques de hormigón que tengan dimensiones similares en las caras que entran en contacto con la prensa hidráulica, para así poder realizar una comparación directa de resistencias sin ser éstas afectadas por un factor de corrección por esbeltez de la muestra.

Desarrollar ensayos a flexo-tracción con adoquines vaciados consecutivamente, de igual manera con refuerzo de geocelda, estos ensayos determinarán el comportamiento en

conjunto de un sistema articulado, donde se podrá verificar la transmisión de carga, así como también el esfuerzo resultante a flexión y tracción.

Emplear agregados y cemento de la misma procedencia, para garantizar resultados correlativos a los obtenidos en la presente investigación, una vez más aclarar que los agregados fueron obtenidos de la seleccionadora de áridos "San Blas" ubicada en el barrio San Blas, en la ciudad de Tarija.

De igual manera, usar de diferentes agregados para ampliar la base de datos, con lo cual a futuro poder sentar una base, para generar una metodología orientada al uso de esta metodología en la región, es necesario aplicar estas nuevas tecnologías en construcción, las cuales brindarían mejoras significativas en bien del progreso del país.

El estudio de esta metodología para pavimentación puede ser muy provechoso para la comunidad, ya que es un problema frecuente el mal estado de diversas vías en la ciudad, esta tecnología podría brindar una solución a este problema, por lo que insto a que se prosiga con los ensayos referidos al uso de geoceldas en pavimentos.