



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

“Diseño y optimización de mezclas de concreto autocompactable a partir de la incorporación de polietileno de alta densidad”

T E S I S

que para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA presenta:

**MARTIN FRANCISCO OCHOA MOTA**

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ MANUEL GUTIÉRREZ MORENO

CO-DIRECTOR DE TESIS:

DR. JULIO ALBERTO CALDERÓN RAMÍREZ

Mexicali, B. C. a 20 de noviembre de 2025

## Agradecimientos

### **A mi esposa...**

*Por todo el amor que me brinda. Por ser mi apoyo incondicional y apoyarme siempre en mis decisiones. Por impulsarme día a día a cumplir mis metas y no rendirme nunca.*

### **A mis padres y mi familia...**

*Por todo el amor, paciencia y enseñanzas que me brindaron, que hacen que al día de hoy sea un hombre de bien, con valores tradicionales y metas de superación en la vida.*

### **A mi hermano...**

*Por ser siempre mi ejemplo a seguir, por protegerme y apoyarme en todo momento.*

### **A mi Director de tesis...**

*Quien fue un apoyo moral fundamental desde la licenciatura y un gran maestro que con sus enseñanzas fundó bases firmes para mi desarrollo profesional. quien vió un potencial en mí que yo no lograba ver y nunca dejó de empujarme a seguir creciendo personal, académica y profesionalmente. A quien considero también un gran amigo y una persona importante en mi vida a quien tambien debo gran parte de mi éxito.*

### **A mi codirector de tesis...**

*Quien me guió siempre con la mejor disposición con sus conocimientos y experiencia para sacar adelante mi investigación.*

### **Al SACC de Ing. Civil...**

*Por aconsejarme, guiarme y apoyarme siempre a pesar de las adversidades.*

### **A DICOMSA...**

*Por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente dentro de su equipo de trabajo en dónde recibí gran apoyo técnico y experiencias invaluable. Por permitirme utilizar sus recursos e instalaciones para desarrollar mi investigación e impulsar mi crecimiento profesional.*

### **A mis amigos...**

*Por siempre darme su apoyo moral, por ser un ejemplo de superación y por acompañarme en este proceso de crecimiento.*

# Contenido

## Contenido

Resumen .....	4
Abstract.....	4
Objetivo general. ....	5
Objetivos específicos. ....	5
Planteamiento del problema y justificación.....	5
1. Antecedentes.....	6
Marco teórico .....	10
Ciclo de vida.....	11
Economía Circular. ....	11
Definiciones.....	12
Pensamiento sistémico.....	12
Afloramiento.....	12
Aire atrapado e aire incluidos .....	12
Concreto Hidráulico.....	13
Concreto Hidráulico de alto desempeño (CAD).....	13
Concreto autocompactable o autoconsolidable.....	13
Cemento Hidráulico.....	13
Cemento Portland.....	13
Cemento Portland Compuesto.....	13
Clinker Portland.....	14
Aditivos.....	14
Curado.....	14
Densidad del agregado saturado y superficialmente seco ( $D_{agSSS}$ ).....	14
Absorción.....	14
Hidratación.....	15
Puzolanas.....	15
Reología.....	15
Caliza.....	15
Diseño de mezclas de concreto en estado Saturado Superficialmente Seco (SSS).....	15
Diseño de mezclas.....	16

ACI 302.....	16
Durabilidad. ....	20
Matriz de Cemento Portland.....	22
Cinética de Hidratación del Cemento Portland convencional. ....	22
Densidad de empaquetamiento. ....	23
Expansión volumétrica por etringita. ....	23
Etringita primaria y tardía en el contexto de empaquetamiento .....	24
Fase experimental.....	25
Criterios de diseño y optimización. ....	25
2. Apartado metodológico. ....	27
Materiales.....	27
Pruebas para medición del desempeño.....	32
3. Resultados.....	34
Mezclas de control.....	34
Concretos autocompactables con agregados naturales y TMA de 20mm. ....	34
Temperatura .....	38
Viscosidad .....	39
Proporcionamiento de los agregados para TMA de 3/8. ....	41
Mezcla Testigo 1-3 [MT-1-3] .....	43
Desempeño en estado fresco de las mezclas de concreto elaboradas. ....	52
Desempeño en estado endurecido de las mezclas de concreto elaboradas .....	57
4. Conclusiones.....	64
5. Bibliografía.....	65
Anexos. ....	67

## Resumen

El presente estudio aborda el diseño y optimización de mezclas de concreto autocompactable (CAC) mediante la incorporación de polietileno de alta densidad (HDPE) como componente estructural. La investigación se fundamenta en un enfoque empírico, combinando pruebas de laboratorio con análisis de relaciones materiales para maximizar el desempeño mecánico mientras se optimiza la autofluencia del concreto. Se evalúa el comportamiento en estados fresco y endurecido del CAC, considerando variables críticas como viscosidad, capacidad de relleno y resistencia a la segregación. Los resultados permiten establecer una ecuación polinomial predictiva que vincula las proporciones de HDPE con la resistencia a compresión del concreto. Esta optimización facilita la reducción controlada de cemento Portland sin comprometer la resistencia y durabilidad del material. Los hallazgos contribuyen al desarrollo de formulaciones de concreto autocompactable competitivas, con menores demandas de recursos naturales y menores impactos ambientales, representando un avance significativo en la aplicación de materiales reciclados en ingeniería de concretos.

**Palabras clave:** *Concreto autocompactable, polietileno de alta densidad, materiales reciclados, optimización de mezclas, sostenibilidad.*

## Abstract

This research presents the design and optimization of self-compacting concrete (SCC) mixtures incorporating high-density polyethylene (HDPE) as a structural component. The study is based on an empirical approach combining laboratory testing with material-performance relationship analysis to maximize mechanical performance while optimizing self-compatibility of the concrete. The fresh and hardened-state behavior of SCC is evaluated, considering critical variables such as viscosity, filling capacity, and segregation resistance. Results enable the establishment of a predictive polynomial equation linking HDPE proportions with concrete compressive strength. This optimization facilitates controlled reduction of Portland cement without compromising the material's strength and durability. The findings contribute to the development of competitive self-compacting concrete formulations with reduced natural resource demands and lower environmental impacts, representing a significant advance in the application of recycled materials in concrete engineering.

**Keywords:** *Self-compacting concrete, high-density polyethylene, recycled materials, concrete mix optimization, mechanical performance.*

## Objetivo general.

Construir un modelo predictivo para concretos de alto desempeño con adiciones recicladas, a partir de un estudio empírico con pruebas de laboratorio y el análisis de las relaciones materiales-desempeño.

## Objetivos específicos.

1. Determinar las características de los materiales que integran el concreto de alto desempeño propuesto.
2. Examinar el comportamiento en estado fresco y endurecido del concreto de alto desempeño con adiciones recicladas propuesto.
3. Examinar las relaciones causales entre los materiales, las propiedades de estos, y desempeño del concreto propuesto, utilizando pensamiento sistémico.
4. Determinar la dosificación adecuada de cada uno de los ingredientes de las mezclas de concreto de alto desempeño, considerando resistencia objetivo y menor consumo de cemento Portland.
5. Contrastar diferencias entre el concreto tradicional y el concreto de alto desempeño con adiciones recicladas propuesto.
6. Plasmar en una ecuación las principales variables que representen con alto grado de confianza el comportamiento esperado del concreto de alto desempeño con adiciones recicladas propuesto.

## Planteamiento del problema y justificación

El concreto hidráulico es el material de construcción más utilizado en el mundo, dado que esto representa grandes volúmenes de materias primas asociadas, es un hecho que importan tanto su origen como la huella de carbono que producen. La mayor cantidad de emisiones del concreto se produce al fabricar cemento, de allí la importancia de reducir su uso al mínimo indispensable mediante la optimización de mezclas de concreto de alto desempeño que incorporen agregados reciclados como escombros de concreto y plásticos, para generar mayor impacto ambiental de este producto diseñado. Existen resultados de diversos autores sobre las ventajas y desventajas de concretos fabricados con ambas adiciones recicladas por separado, pero no en conjunto para producir un concreto mayormente competitivo en términos mecánicos y con mayor impacto ambiental asociado. Se utiliza diversa normativa vigente para evaluar las propiedades de materiales y concreto en estado fresco-endurecido, con el propósito de identificar relaciones relevantes que permitan determinar un modelo que represente concreto de alto desempeño con adiciones recicladas.

Las mezclas de concreto hidráulico tradicionales presentan áreas de oportunidad en relación con el consumo de cemento que requieren para su dosificación. Primeramente, el cemento es responsable de una elevada huella de carbono durante su producción. Por otro lado, el costo se incrementa

proporcionalmente en función al consumo de cemento utilizado. Si bien es necesario garantizar la seguridad estructural de los elementos de concreto, no debe hacerse a partir de un incremento de las cantidades de cemento utilizadas para su dosificación sin antes optimizar los recursos utilizados, justamente por su impacto en la economía del concreto y las emisiones contaminantes emitidas a la atmósfera.

La optimización de las mezclas de concreto ha sido una necesidad que hasta el momento se ha dado empíricamente a partir de uso de aditivos reductores de agua y reemplazo parcial de cemento Portland por otros materiales cementantes con menor huella de carbono.

En este sentido, es necesario determinar un diseño metodológico que permita con alto grado de confianza la optimización del cemento en mezclas de concreto ya sea con ingredientes tradicionales o alternativos si estos demuestran un adecuado desempeño. En relación con lo anterior, se propone el diseño y ensayo de un Concreto de Alto Desempeño (HPC) que sea superior o competitivo respecto al concreto tradicional en términos de resistencia, pero con mayor durabilidad, con menor huella de carbono y económico. Este HPC será preparado con una relación agua / cemento baja, uso de aditivos superfluidificantes combinados con reductores de agua, uso de humo de sílice como material cementante con menor huella de carbono, grava natural con reemplazo parcial de polietileno de alta densidad (HDPE) triturado. Este reemplazo en los agregados representa potencialmente menor vertido de residuos en rellenos sanitarios y un menor consumo de agregados vírgenes.

## 1. Antecedentes.

El concreto hidráulico comenzó a utilizarse para la construcción hace aproximadamente 2000 años. Erigiendo estructuras que aún están de pie en la actualidad, gracias a los desarrollos tecnológicos por parte de los Romanos, quienes calcinaban caliza y adicionaban puzolanas logrando una mezcla trabajable y duradera.

Desde los tiempos de las antiguas Grecia y Roma y hasta mediados del siglo XVIII se empleaba la cal como conglomerante para las construcciones el cual carece de propiedades hidráulicas. En una publicación del siglo I antes de Cristo, se describe una dosificación de un "cemento romano" que se obtenía mezclando dos partes de puzolana y una parte de cal apagada. Las puzolanas procedían de las cenizas volcánicas (tobas) que encontraban al pie del Vesubio en Pozzuoli, de donde proviene el término de puzolana. Con este "cemento romano" se construyeron obras importantes, entre las que destaca el Foro romano y el Panteón de Roma (año 27 antes de Cristo). (Sanjuan Barbudo & Chinchon Yepea, 2014), ver Ilustración 1.

Fue durante el siglo XVIII que empezó a despertar el interés de investigar y probar a los cementos como conglomerantes que pudieran tener mejores desempeños que los yesos y cales hidráulicas que se utilizaban por ser la única opción que se tenía hasta ese momento (Torres, 2012, citado por Soriano 2021).

No fue hasta 1824 en que Joseph Aspdin obtuvo la patente de lo que figuraba por primera vez el nombre de "Cemento Portland" por obtener un aglomerante tras haber calcinado una mezcla artificial de caliza y arcilla, este producto se correspondía con la cal romana en su composición y propiedades, pero resultando

muy superior debido a la mayor temperatura de calcinación que producía una sinterización parcial de la mezcla cruda. El ejemplo más significativo de la aplicación del cemento portland en los inicios de su producción industrial, es el Parlamento de Londres (ver Ilustración 2). (Sanjuan Barbudo & Chinchon Yepea, 2014).



Ilustración 1 Panteón de Agripa o Panteón de Roma. Construido entre los años 118 y 125. Fuente Wikipedia.



Ilustración . Parlamento de Londres. Foto: De DaniKauf - CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64126>

La primera propuesta de un modelo para predecir la resistencia a la compresión del concreto ocurrió en el año de 1892 bajo la autoría de Feret, postulando que la resistencia estaba en función del radio del cemento respecto a la fracción de la pasta y aire de la mezcla (Nithurshan & Elakneswaran, 2022). Mas tarde, en 1919 Duff Abrahams propuso el concepto de "relación agua/cemento" también conocido como "Ley de Abrahams" en donde la resistencia está en función del radio de la masa del agua respecto la masa del cemento (Wiken, 2024).

El concepto de "relación agua/cemento" o "radio agua/cemento" aun es utilizado en la actualidad como uno de los principales parámetros o características de una mezcla de concreto hidráulico, el cual desde su nacimiento a sido adoptado y adaptado, tomando en cuenta otras variables fisicoquímicas que resultaron ser sensibles para la resistencia resultante, tales como el volumen de gel de cemento (Karni, 1974), El contenido de aire (Popovics, 1985), el contenido de Silicato Tricálcico (C<sub>3</sub>S) también conocido como "Alita" y Silicato Dicálcico (C<sub>2</sub>S) también conocida como "Belita". (Popovics, 1998) y la influencia del tamaño máximo de agregado y la distribución granulométrica del esqueleto de la mezcla, introduciendo por primera vez el concepto de densidad de empaquetamiento (De Larrand 1999), Entre otros. También se encuentran diversos modelos estadísticos que surgieron a partir de la década de los 2000, los cuales toman en cuenta composición de la mezcla, pero no las propiedades del cemento ni agregados ni edad del concreto (Nipatsat and Tangtermsirikul, 2000); (Hwang et al., 2001); (Namyong et al., 2004); (Chidiac & moutassem, 2013).

Hoy en día, debido a la gran variedad de materiales a utilizar en el diseño de mezclas de concreto, se le puede dotar de características para cumplir con los parámetros requeridos tanto en estado fresco, como en estado endurecido. Dando pie al desarrollo e investigación de nuevas tecnologías del concreto y brindando la posibilidad de fabricar concretos convencionales o concretos especiales (NMX-C-155-ONNCCCE).

En resumen, en la década de 1970 hubo mejor entendimiento de las reacciones de hidratación y la estructura del gel, las contracciones, flujo plástico y porosidad de la matriz y se desarrollaron algunas adiciones como fibras de vidrio y sintéticas; En la década de 1980 Se incrementa el desarrollo de aditivos químicos que permitían obtener mayor fluidez en los concretos, lo que permitió desarrollar concretos autocompactables, relaciones a/c más bajas y resistencias más altas. De aquí nace el termino "**Concreto de Alto Desempeño (HPC)**". Por último, durante la década de 1990 aumento el desarrollo de aditivos químicos como superplastificantes, agentes de viscosidad, entre otros, así como el uso de materiales cementantes suplementarios como reemplazo del cemento lo cual dio pie al concepto de "**Concreto de Ultra Alto Desempeño (UHPC)**" por las nuevas prestaciones que era posible alcanzar (Hernandez Carrillo, 2016).

A continuación, se enlistan algunos materiales utilizados para la elaboración de HPC y UHPC, así como algunas de sus características.

Material	Contribución principal/propiedad deseada
Cemento portland	Material cementante/durabilidad
Cemento adicionado o mezclado	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Ceniza volante	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Escoria	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Humo de sílice	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Arcilla calcinada	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Metacaolinita	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Esquisto calcinado	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Superplastificante	Fluidez
Reductores de agua de alto rango	Reducción de la relación agua-cemento

Aditivos de control de hidratación	Control de fraguado
Retardadores	Control de fraguado
Aceleradores	Aceleración de fraguado
Inhibidores de corrosión	Control de la corrosión del acero
Reductores de agua	Reducción del contenido de cemento y de agua
Reductores de contracción	Reducción de la contracción
Inhibidores de RAS	Control de la reactividad álcali-sílice
Modificadores poliméricos / latex	Durabilidad
Agregado con granulometría optimizada	Mejoría de la trabajabilidad y reducción de la demanda de pasta

Tabla 1. Algunos materiales utilizados en la elaboración de concretos de alto desempeño. Fuente: Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skoki

A su vez, se enlistan propiedades del concreto en estado endurecido, los métodos de ensayo para cada uno y los parámetros o criterios dentro de la escala en que cada uno es evaluado.

Propiedad	Método de ensayo	Criterio que se debe especificar
Alta resistencia	ASTM 39 (AASHTO T 22), COVENIN 0338, IRAM 1546, NCh1037, NMX-C083-1997-ONNCCE, NTC 673, NTE 1573, NTP 339,034, UNIT-NM 101	700 a 1400 kg/cm <sup>2</sup> o 70 a 140 Mpa en el periodo de 28 a 91 días
Alta resistencia a compresión inicial	ASTM 39 (AASHTO T 22), COVENIN 0338, IRAM 1546, NCh1037, NMX-C083-1997-ONNCCE, NTC 673, NTE 1573, NTP 339,034, UNIT-NM 101	210 a 280 kg/cm <sup>2</sup> o 20 a 28 Mpa en 3 a 12 horas o 1 a 3 días
Alta resistencia a flexión inicial	ASTM C 78 (AASHTO T 97), COVENIN 0345, IRAM 1547, NCh1038, NMX-C-191, NTC 2871, NTP 339,078, UNIT-NM 55	20 a 40 kg/cm <sup>3</sup> o 2 a 4 Mpa en 3 a 12 horas o 1 a 3 días
Alta resistencia a abrasión	ASTM C 944	0 a 1 mm de profundidad de desgaste
Baja permeabilidad	ASTM C 1202 (AASHTO T 277)	500 a 2000 Coulombs
Penetración de cloruros	AASHTO T 259 & T260	Menos de 0.07% CL en 6 meses
Alta resistividad	ASTM G 59	
Baja absorción	ASTM C 642 y NMX-C-263	2% a 5%
Bajo coeficiente de difusión	La ASTM está desarrollando un método Wood, Wilson y Leek (1989)	1000x10 <sup>-13</sup> m/s
Resistencia al ataque químico	Exposición del concreto a una solución saturada en ambiente húmedo /seco	Ningún deterioro después de 1 año
Ataque de sulfatos	ASTM C 1012, IRAM 1635, NMX-C-418, NTC 3330, NTP 334,094	Expansión máxima de 0.10% en 6 meses de exposición moderada a sulfatos o

		expansión máxima de 0.5% en 6 meses de exposición severa a sulfatos
Alto módulo de elasticidad	ASTM C 469, COVENIN 1468, NMX-C-128-1997-ONNCCCE, NTC 4025, UNIT 42	Más de 400,000 kg/cm <sup>2</sup> o 40 Gpa (5.0 millones de lb/pulg <sup>2</sup> )
Alta resistencia a congelación-deshielo	ASTM C666, procedimiento A, COVENIN 1601, NCh2185, NMX-C-205	Factor de durabilidad de 95 a 100 en 300 a 1000 ciclos (también se puede especificar la máxima pérdida de masa o expansión)
Alta resistencia a sales de deshielo	ASTM C 672	Clasificación de 0 a 1 o pérdida de masa de 0 a 0.5 kg/m <sup>3</sup> después de 50 a 300 ciclos
Baja contracción	ASTM C 157, COVENIN 0346, IRAM 1597, NCh221, NMX-C-173, NTC 3938	Menos de 400 millonésimos (Aiiicn 1998)
Baja fluencia	ASTM C 512	Menor que el concreto normal

Tabla 2. Algunas propiedades del concreto de alto desempeño en estado endurecido. Fuente: Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association.

## Marco teórico

El concreto hidráulico ha apoyado el desarrollo económico a través de una industrialización extensiva y una urbanización revolucionaria (Wang et al., 2020). El concreto es el material de construcción más utilizado en todo el mundo debido a su excelente rendimiento estructural, durabilidad, economía y capacidad de adoptar cualquier forma mediante el cimbrado (Ojha y Gupta, 2020). Debido a las múltiples aplicaciones y alta demanda, el concreto consume más de 20 000 millones de toneladas de materias primas al año (Kisku et al., 2017). Sin embargo, hoy en día uno de los compromisos que implica usar este material considera reducir su huella de carbono, tanto desde la perspectiva de producción de agregados, la producción de cemento, e incorporación de residuos como agregados, dicho de otra manera, transitar hacia la producción de concreto sustentable (Wang et al., 2017).

Actualmente hay gran interés en estudiar la posibilidad de concretos sostenibles utilizando agregados reciclados en sustitución por agregado natural para su aplicación en estructuras (Martinez-Lage et al., 2020), pavimentos (Shi et al., 2019) y otras obras (Gutiérrez et al., 2015; Gutiérrez et al. 2020). Destaca el trabajo de Verian et al., 2018 quienes hacen una completa comparativa entre las características de concretos con agregados reciclados y naturales. Recientemente Soriano y Gutiérrez (2021) señalan lo relevante que son las características de los componentes reciclados (agregado HDPE y escombros) en tanto forma, tamaño, textura, dureza y porcentaje de reemplazo sobre la calidad, economía, y desempeño en estado fresco y endurecido.

La incorporación de residuos plásticos en las mezclas de concreto en torno al 2.5-7.5% de reemplazo es una alternativa que va relacionada con la sustentabilidad debido a que contribuye a la mitigación de residuos plásticos en los vertederos, además, se abre la posibilidad de reducir el uso de agregados naturales por incorporar estos residuos como un agregado plástico, lo que representa un producto con viabilidad económica y ecológica (TAMRIN & NURDIANA, 2021). El plástico ha sido un material que ha traído beneficios en la industria de la manufactura, pero una vez que es utilizado para su uso destinado, usualmente termina convirtiéndose en un desecho que afecta al medio ambiente, teniendo un periodo de descomposición entre los 500 y 1000 años (LeBlanc, 2015). Para el año 2016 se tenían cifras aproximadas de 24.14 millones de toneladas de generación de residuos plásticos, las cuales van en

aumento (Kaza, Yao, Bhada-Tata, & Van Woerden, 2018); (Napper & Thompson, 2020). Uno de los plásticos más producidos es el HDPE (Polietileno de Alta Densidad), encontrándose en tercer lugar de producción mundial con un 13%, ofreciendo un adecuado desempeño en el concreto (Silva et al., 2020). La literatura respalda este desempeño por su aplicación en elementos estructurales y no estructurales (Pesic et al., 2016; López et al., 2019). La incorporación de residuos de construcción y demolición, particularmente escombros de concreto en nuevas mezclas de este material es una práctica sustentable que apoya la recuperación de aproximadamente 500 mil toneladas anuales de rellenos sanitarios o vertederos (Hernández y Mendoza, 2006). Estas mezclas de concreto reciclado han demostrado tener resultados satisfactorios (Gutiérrez et al., 2020; Agrela et al., 2013; Behera et al., 2014) en elementos estructurales de edificación, canales, pavimentos y obras complementarias, y como agregado para la conformación de capas estabilizadoras y portantes de pavimentos, la mayoría de los autores coinciden en que la incorporación de escombros como agregado a las mezclas de concreto reciclado tiene dos grandes retos, el primero relacionado a la reducción de la resistencia y el segundo relacionado a la alta absorción derivado de las propiedades de origen y porosidad de los escombros. Si bien la gran mayoría de los autores coinciden en la reducción de la resistencia proporcionalmente al porcentaje de reemplazo de agregados naturales por reciclados, el punto medular es poder cuantificar que tanto para considerar esto en el diseño de mezclas y llevar a cabo los aumentos necesarios sobre la resistencia objetivo, a fin de garantizar los estándares de calidad y durabilidad requeridos en la vida útil del concreto.

De Brito et al., (2018) abordan la pregunta de si es posible predecir la resistencia del concreto en función de las características de sus agregados, dicha investigación motiva a la presente, buscando explicar las relaciones existentes entre agregados-pasta en la zona de transición interfacial (ITZ), así como entre características de materiales y resistencia del concreto, representándolos en una ecuación por ejemplo que describa una curva de comportamiento esperado para concretos de alto desempeño con adiciones recicladas, por la simple razón de que los HPC contribuyen a otros aspectos como trabajabilidad, durabilidad y reducción del consumo de cemento Portland, responsable de un elevado número de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera.

El control de calidad, la reducción de incertidumbre y la optimización en las mezclas de concreto, representa áreas de oportunidad que pueden abordarse desde la combinación ingeniosa de ingredientes.

#### Ciclo de vida.

El ciclo de vida del concreto hidráulico comienza con la explotación de recursos naturales minerales, de los cuales se procesan industrialmente para formar tanto los materiales cementantes como los agregados para la mezcla.

La vida útil del concreto dependerá de la calidad de los materiales y de las propiedades que se le dote al momento de su producción, es decir, la capacidad que se le brinde para durar en las condiciones de servicio a las que está expuesto (cargas de servicio, ataque por sustancias químicas, intemperismo, etc.), que va desde un par de años hasta cientos de años, como lo es el caso del Panteón de Roma.

#### Economía Circular.

En términos generales, la construcción no es una actividad amigable con el medio ambiente, ya que genera efectos sobre la tierra, agotamiento de recursos naturales, generación de residuos y diversas

formas de contaminación como son las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>. Cerca del 85% de estas emisiones provienen de la fabricación del cemento. (Yimmi Silva, et. Al. 2015).

En los últimos años, el concepto del uso de concreto viejo de pavimentos, edificios y otras estructuras como fuente de agregados se ha indicado en muchos proyectos, resultando en ahorro de material y energía (ECCO 1999). El procedimiento involucra: demoler y remover el concreto viejo, trituración en los trituradores primarios y secundarios, remoción del acero de refuerzo y otros artículos embebidos, graduado y lavado. (Kosmatka, 1992).

El concreto reciclado es simplemente el concreto viejo que se trituró para producir agregado. El agregado de concreto reciclado se usa principalmente en la reconstrucción de pavimentos. Se lo ha usado satisfactoriamente como un agregado en subbases granulares, subbases de concreto magro, suelo-cemento y en el concreto nuevo como la única fuente o como reemplazo parcial del agregado nuevo. (Kosmatka, 1992).

## Definiciones.

### Pensamiento sistémico.

El pensamiento sistémico es una disciplina que permite percibir la totalidad de un fenómeno mediante la identificación de interrelaciones y retroalimentaciones entre sus componentes (Senge, 2006; Sterman, 2000), siendo particularmente valioso en ingeniería de materiales donde las propiedades del concreto emergen de la interacción dinámica entre agua, cemento, agregados y aditivos; su aplicación en la investigación de concretos de alto desempeño facilita examinar cómo cada variable material interactúa para generar comportamientos complejos en estados fresco y endurecido, permitiendo desarrollar modelos predictivos robustos que capturan la complejidad inherente del sistema, reconociendo que resistencia mecánica, durabilidad, sostenibilidad y economía no son propiedades independientes sino manifestaciones de un todo integrado (Jackson, 2003).

### Afloramiento.

Los afloramientos rocosos, son "Estructuras formadas por intemperismo del material rocoso o por el efecto gravitacional o de erosión eólica del escaso suelo presente en laderas escarpadas que terminan por desnudar la roca. También se incluyen derrames volcánicos con flujo lento que fueron solidificados al exterior de la corteza terrestre. Los afloramientos rocosos no tienen pérdida significativa de material reciente de suelo y se encuentran, por lo general, en las partes más elevadas de los sistemas montañosos o en sitios hiper-áridos donde la actividad humana es menor". (Bolaños Gonzales & Paz Pellat, 2016).

### Aire atrapado e aire incluidos

El aire presente en el concreto puede clasificarse en dos categorías fundamentales que varían significativamente en origen, características y efectos.

Aire Atrapado (Entrapped Air): Es el aire no intencional ocluido durante los procesos de mezcla, transporte y colocación (American Concrete Institute, 2019). Se caracteriza por vacíos mayores a 1 mm, distribución irregular, representando típicamente 1-3% del volumen total, y se forma por la incapacidad de los equipos de consolidación para desalojar completamente el aire. Sus efectos son predominantemente negativos: reduce la resistencia a compresión, disminuye la durabilidad, aumenta la permeabilidad, y reduce la resistencia a ciclos de congelamiento-deshielo (Kosmatka, 2004).

Aire Incluido (Entrained Air): Es el aire incorporado intencionalmente mediante aditivos incorporadores de aire (surfactantes) (ACI 318, 2019). Se distingue por vacíos muy pequeños (0.05-0.2 mm), distribución uniforme en toda la masa, cantidad controlada de 3-8% según especificaciones, y burbujas esféricas regulares. A diferencia del aire atrapado, mejora significativamente la resistencia al congelamiento-deshielo, incrementa la trabajabilidad, reduce la segregación y sangrado, disminuye la permeabilidad, aunque reduce ligeramente la resistencia a compresión, compensado por la durabilidad mejorada (Kosmatka, 2004).

En síntesis, mientras que el aire atrapado es indeseable y debe minimizarse mediante vibración adecuada, el aire incluido es benéfico en ambientes severos y se especifica deliberadamente en concretos de alta durabilidad.

### Concreto Hidráulico.

Según el reglamento del American Concrete Institute 318-19 (ACI 318, 2019) el concreto es una mezcla de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos. Dicho de otra manera: “Es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada piedra machacada, pedrejón), creando una masa similar a una roca.” (Kosmatka, 2004).

### Concreto Hidráulico de alto desempeño (CAD).

El concreto de alto desempeño (CAD) supera las propiedades y la constructibilidad del concreto convencional. Para producir estos concretos especialmente diseñados, se usan materiales normales y especiales y pueden ser necesarias prácticas especiales de mezclado, colocación (colado) y curado. (Kosmatka, 2004).

### Concreto autocompactable o autoconsolidable.

Según la NMX-C-472-ONNCCE, es el concreto que puede fluir alrededor del refuerzo y consolidarse por su propio peso, sin acciones externas y sin exceder los límites de segregación y sangrado.

### Cemento Hidráulico.

Según la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004. Es un material inorgánico finamente pulverizado, que, al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava, asbesto u otros materiales, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, desarrolla su resistencia y conserva su estabilidad.

### Cemento Portland.

Según la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004. Es el cemento producido a base de la molienda de Clinker Portland y usualmente sulfato de calcio.

### Cemento Portland Compuesto.

Según la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004. Es el cemento que resulta de la integración de clínker Portland, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de la caliza, éste puede ser componente único.

### Clinker Portland.

Según la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004. Es el producto artificial obtenido por sinterización de los crudos correspondientes, es decir, por la calcinación y sinterización de estos a la temperatura y durante el tiempo necesario, y por enfriamiento adecuado, a fin de que dichos productos tengan la composición química y la constitución mineralógica requerida. Los crudos de clinker Portland son mezclas suficientemente finas, homogéneas y adecuadamente dosificadas a partir de materias primas que contienen cal (CaO), sílice (SiO<sub>2</sub>), alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y pequeñas cantidades de otros compuestos minoritarios, los cuales se clinkerizan.

Según la Norma Mexicana NMX-C-155-ONNCCE-2014. Son materiales diferentes del agua, de los agregados y del cemento, que se pueden emplear como componentes del concreto y se agregan antes o durante el mezclado, interactuando con el sistema hidratante – cementante- mediante la acción física, química o fisicoquímica, modificando una o más de las propiedades del concreto en sus etapas de: estado fresco, fraguando, endureciéndose y endurecido.

### Aditivos.

Según la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004. Es el producto artificial obtenido por sinterización de los crudos correspondientes, es decir, por la calcinación y sinterización de estos a la temperatura y durante el tiempo necesario, y por enfriamiento adecuado, a fin de que dichos productos tengan la composición química y la constitución mineralógica requerida. Los crudos de clinker Portland son mezclas suficientemente finas, homogéneas y adecuadamente dosificadas a partir de materias primas que contienen cal (CaO), sílice (SiO<sub>2</sub>), alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y pequeñas cantidades de otros compuestos minoritarios, los cuales se clinkerizan.

### Curado.

Según la Norma Mexicana NMX-C-155-ONNCCE-2014. Es el proceso mediante el cual se propicia un ambiente de humedad y temperatura adecuados por un periodo determinado, para favorecer la hidratación del cemento hidráulico y, en su caso, de los materiales cementantes en la mezcla.

### Densidad del agregado saturado y superficialmente seco ( $D_{agSSS}$ ).

También conocida como "Densidad relativa saturada y superficialmente seca" ( $D_{rSSS}$ ), es definida por la Norma Mexicana NMX-C-164-ONNCCE-2014 como "La relación de la densidad del agregado saturado y superficialmente seco a la masa del volumen del agua desalojada, considerando la masa de las partículas saturadas de agua y superficialmente secas y la masa de las partículas de agua que se incluyen en los poros que se encuentran dentro de las mismas".

### Absorción.

La Norma Mexicana NMX-C-164-ONNCCE-2014 la define como "El incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante un tiempo determinado a temperatura ambiente; este aumento de masa es debido al agua que se introduce en los poros del material y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas. Se expresa como por ciento de la masa seca (y es índice de la porosidad del material)".

### Hidratación.

El concepto de Hidratación es definido por la interacción entre una especie química y el agua que, al entrar en contacto, el uno con el otro, generan un producto llamado de hidrato ya que el agua entra a formar parte de la estructura molecular del producto de reacción. En el caso del cemento, este fenómeno es complejo por implicar reacciones químicas que superan la simple conversión de fases anhidras en hidratos correspondientes. (Hewlett, 2003).

### Puzolanas.

Según las define (FRAGOSO DORIA & VISBAL JACOME, 2021, pág. 22), "El término puzolana hace referencia a materiales con altos contenidos de sílice y alúmina, que carecen de propiedades hidráulicas, pero (en condición de finura) son reactivos con cal en presencia de agua y a temperatura ambiente, por lo que se utiliza para conformar productos estables con propiedades hidráulicas." También aclara que "Anteriormente el término se utilizaba exclusivamente para referirse a una toba volcánica existente en las proximidades de la ciudad de Nápoles, pero con el paso del tiempo se ha designado para definir los materiales que tienen las características mencionadas anteriormente, además de contar con aptitud para formar productos hidratados con propiedades conglomerantes."

"Los materiales puzolánicos pueden presentar distintas proporciones de sílice y alúmina, en estado vítreo, y en ocasiones, también se constituyen por minerales inactivos, como feldespato, cuarzo, magnetita, entre otros" (GOMEZ GONZALEZ, 2009).

### Reología.

Es el estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos.

### Caliza.

Son materiales de naturaleza inorgánica y origen mineral carbonatado, compuestos principalmente por carbonato de calcio y que se utiliza para mejorar las propiedades y el comportamiento del cemento.

Es uno de los principales productos del proceso de hidratación del cemento y su fórmula química es trisulfoaluminato de calcio ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ).

Según (GIRALDO M., 2006), los cristales de etringita son de formas alargadas, generalmente en hábitos fibrosos o en forma de varillas alargadas que se encuentran formando estructuras que asemejan un enrejillado que le da al cemento mayor cohesión.

### Diseño de mezclas de concreto en estado Saturado Superficialmente Seco (SSS).

El diseño de mezclas de concreto en condición de agregados saturados y superficialmente secos (SSS) consiste en ajustar las dosificaciones de los componentes considerando que los agregados se encuentran en su estado óptimo de humedad: con todos sus poros internos llenos de agua (saturados) pero sin agua libre en su superficie. En esta condición, el agua que aportan los agregados se considera como parte del agua de mezcla total, por lo que se debe restar de la cantidad de agua potable a agregar según el diseño inicial, evitando así excesos de agua que afecten negativamente la resistencia y durabilidad del concreto. Este procedimiento es crítico porque la relación agua-cemento es uno de los factores más influyentes en las propiedades del concreto endurecido, y utilizar agregados en condición SSS garantiza una relación agua-cemento precisa y reproducible, siendo el estado de referencia estándar en métodos de diseño como el del Comité 211 del ACI (American Concrete Institute, 2019).

## Diseño de mezclas

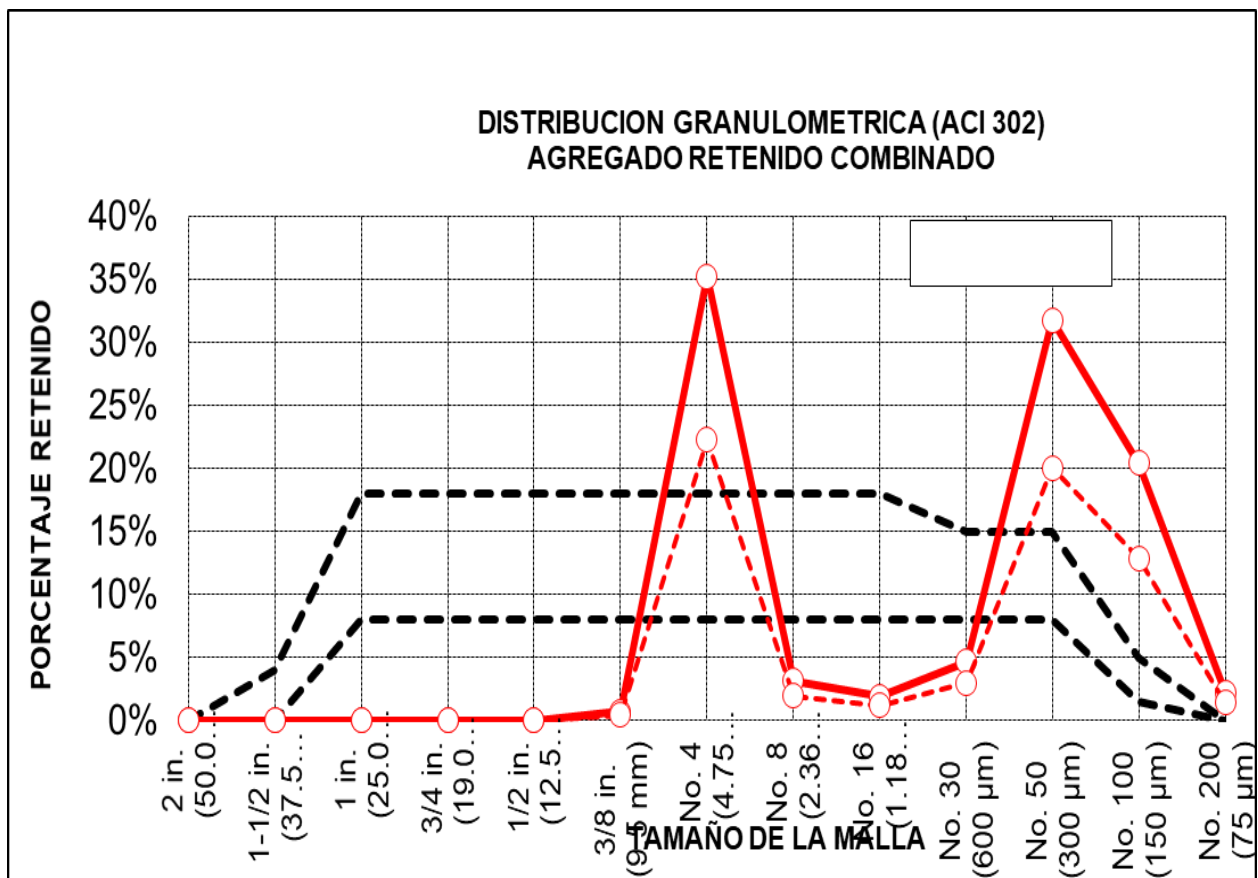
### ACI 302

**Factor de grosor.** El ACI 302 lo define como el porcentaje de agregado combinado que es más grande que la malla de 3/8" (9.5 mm), dividido por el porcentaje de agregado combinado que es más grande que la malla No. 8 (2.35 mm), expresado como un porcentaje.

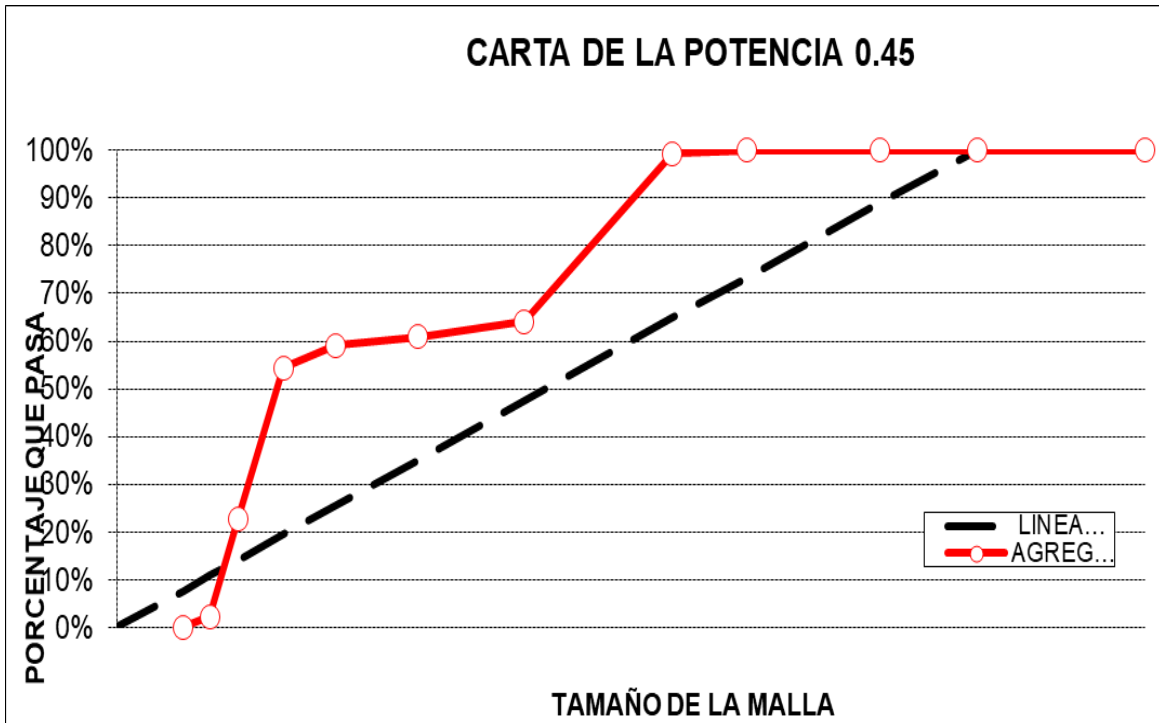
**Factor de trabajabilidad.** El ACI 302 lo define como el porcentaje de agregado combinado que pasa por la malla No. 8 (2.35 mm).

Indicador de optimización de la mezcla (MOI). El ACI 302 lo define como la intersección del valor del factor de grosor y el factor de trabajabilidad en la carta de factores de grosor.

**Agregados combinados.** Este método permite analizar los cambios en la distribución granulométrica de la mezcla. Se observan porcentajes individuales de los agregados y en conjunto con el resto de los materiales. A partir de esta información, se construye un gráfico que además contiene límites superior e inferior proporcionado por el ACI 302, enfocados a la optimización de diseños de mezcla para pisos.



Carta de la potencia 0.45



DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS AGREGADOS				
TAMAÑO DE LA MALLA	PORCENTAJE RETENIDO			
	INDIVIDUAL			COMBINADO
	3/8" (10 MM)	HDPE 3/8" (10 mm)	ARENA	
2 in. (50.0 mm)	0.00%	-----	-----	0.00%
1-1/2 in. (37.5 mm)	0.00%	-----	-----	0.00%
1 in. (25.0 mm)	0.00%	0.00%	-----	0.00%
3/4 in. (19.0 mm)	0.00%	0.00%	-----	0.00%
1/2 in. (12.5 mm)	0.00%	0.00%	-----	0.00%
3/8 in. (9.5 mm)	2.00%	0.80%	0.00%	0.70%
No. 4 (4.75 mm)	94.60%	80.50%	1.80%	35.20%
No. 8 (2.36 mm)	3.20%	16.40%	2.10%	3.10%
No. 16	0.10%	1.90%	2.90%	1.90%

(1.18 mm)				
No. 30 (600 µm)	0.00%	0.40%	7.40%	4.70%
No. 50 (300 µm)	0.10%	0.10%	50.10%	31.70%
No. 100 (150 µm)	-----	-----	32.20%	20.40%
No. 200 (75 µm)	-----	-----	3.50%	2.20%
TOTALES	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

VALORES PARA GRAFICAR EN LA CARTA DE LA POTENCIA 0.45				
TAMAÑO DE LA MALLA	EJE X	EJE Y	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	RETENIDO ACUMULADO MENOS 100%
1-1/2 in. (37.5 mm)	15.55	100.00%	0.00%	100.00%
1 in. (25.0 mm)	13.01	100.00%	0.00%	100.00%
3/4 in. (19.0 mm)	11.55	89.00%	0.00%	100.00%
1/2 in. (12.5 mm)	9.53	73.30%	0.00%	100.00%
3/8 in. (9.5 mm)	8.4	65.00%	0.69%	99.31%
No. 4 (4.75 mm)	6.16	47.50%	35.90%	64.10%
No. 8 (2.36 mm)	4.55	35.10%	39.03%	60.97%
No. 16 (1.18 mm)	3.31	25.50%	40.96%	59.04%
No. 30 (600 µm)	2.52	19.40%	45.66%	54.34%
No. 50 (300 µm)	1.83	14.00%	77.40%	22.60%
No. 100 (150 µm)	1.41	11.00%	97.79%	2.21%
No. 200 (75 µm)	1	7.70%	100.00%	0.00%
0	0	0.00%	100.00%	0.00%

Carta de factor de grosor.

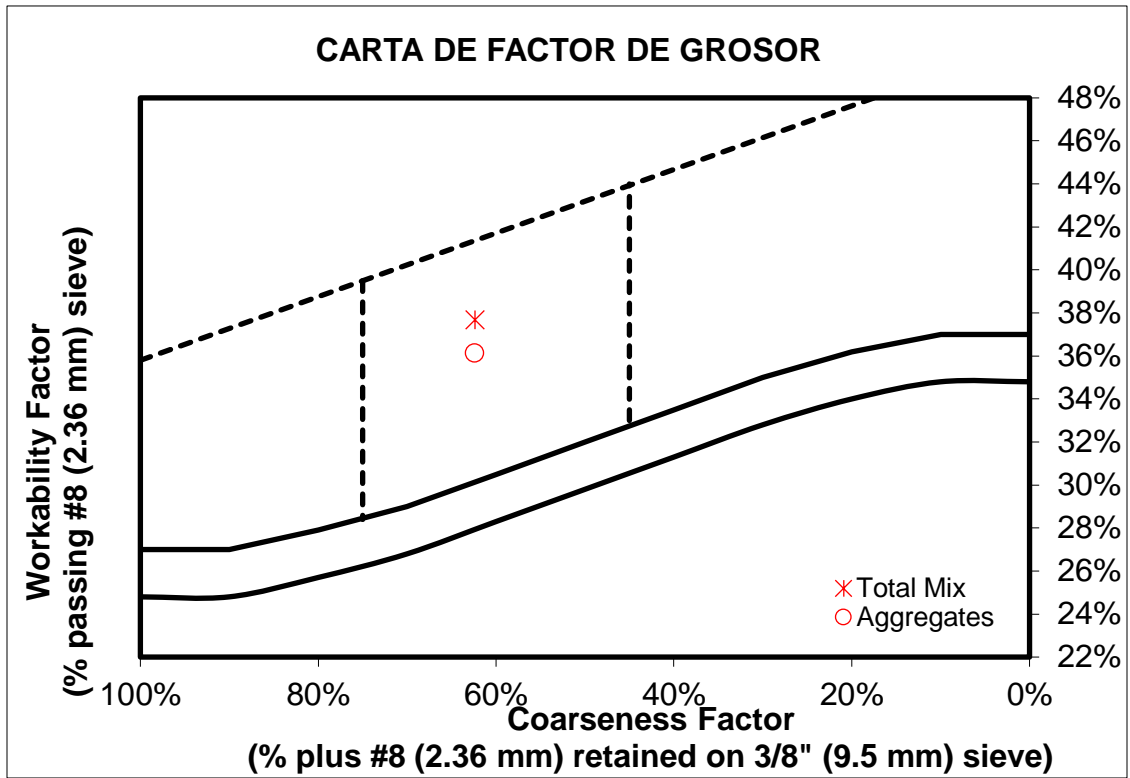


Ilustración 3. Prueba de extensibilidad en concreto Autocompactable (consistencia fluida viscosa). Prueba de revenimiento (Cono de Abrahams) en concreto convencional (consistencia plástica a semi fluida) Fuente: Elaboración propia.



## Durabilidad.

En este apartado se revisan nociones básicas sobre el tema de la durabilidad en el concreto, siendo un término poco conocido en la práctica y que es de vital relevancia a la hora de definir los parámetros de diseño. A diferencia de un diseño de mezcla especificado por resistencia, uno bajo el criterio de durabilidad, estará dotado de una serie de características necesarias para perdurar bajo las condiciones a las que este sujeto el elemento en su etapa de servicio, para lo cual, la resistencia pasa a segundo término. Es importante aclarar la diferencia entre un criterio de resistencia y uno por durabilidad, ya que es común en la práctica la solicitud por parte de proyectistas de concretos en donde especifican ambos y cuya relación depende de diversos factores, siendo unos de los más influyentes, la zona geográfica y las características de las materias primas disponibles. Esto debido a que la base de esta especificación es la relación agua/cemento (a/c), la cual es sugerida por la normativa aplicable (NMX-C-155-ONNCCE-VIGENTE) en función del grado de severidad al que el elemento estará expuesto, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de exposición a acciones de deterioro del concreto. Fuente NMX-C-155-ONNCCE-2014, Tabla 9.

Clasificación	Condiciones de exposición	
1	Ambiente seco	
	Interior de edificaciones habitables	
	Componentes interiores que no se encuentran expuestos en forma directa al viento ni a suelos o agua	
	Regiones con humedad relativa mayor al 60% por un lapso no mayor a tres meses al año	
2a	Ambiente húmedo sin congelamiento:	
	Interior de las edificaciones con humedad relativa mayor al 60% por más de tres meses al año	
	Elementos exteriores expuestos al viento, pero no al congelamiento	
	Elementos en suelos no reactivos o no agresivos, y/o en agua sin posibilidad de congelamiento	
2b	Ambiente húmedo con congelamiento	
	Elementos exteriores expuestos al viento y al congelamiento	
	Elementos en suelos no reactivos o no agresivos, y/o en agua con posibilidad de congelamiento	
3	Ambiente húmedo con congelamiento y agentes descongelantes	
	Elementos exteriores expuestos al viento, con posibilidad de congelamiento y/o exposición a agentes descongelantes	
	Elementos en suelos no reactivos o no agresivos y/o en agua con posibilidad de congelamiento y agentes químicos descongelantes	
4a	Ambiente Marino Totalmente Sumergido	
	Estructuras totalmente sumergidas sin exposición parcial o total al aire	
4b	Ambiente Marino Grado Moderado	
	Área rica en sales o costera, sin contacto con el agua. Estructura con influencia del aire marino en grado moderado, colocadas entre 3 km y 300 m de la línea de costa	

4c	Ambiente Marino Grado Severo	
	Área rica en sales o costera, sin contacto con el agua. Estructuras con influencia del aire marino en grado severo, colocadas entre la línea de costa y 300 metros	
	Ambiente Marino Zona de Salpicadura	
	Área rica en sales en contacto con agua. Estructuras en contacto con aire y agua marina, ciclos de humedecimiento y secado.	
5a	Ambiente de agresividad química ligera (por gases, líquidos o sólidos)	
	En contacto con agua	
	pH	6.5 - 5.5
	CO2 agresivo (en mg/l como CO2)	15-30
	Amonio (en mg/l como NH4+)	15-30
	Magnesio (en mg/l como Mg2+)	100-300
	Sulfato (en mg/l como SO4 2+)	200-600
	En contacto con suelo	
	Grado de acidez según Baumann – Gully	mayor a 20
	Sulfatos (en mg de SO4 2-/ kg de suelo secado al aire)	2000 - 6000
5b	Ambiente de agresividad química moderada (por gases, líquidas o sólidos):	
	En contacto con agua	
	pH	5.5 -4.5
	Co2, agresivo (en mg Co2/l)	31-60
	Amonio (en Mg NH4 + /l)	31-60
	Magnesio (en mg/l como Mg2+/l)	301-1500
	Sulfato (en mg/l como SO4 2+)	601-3000
	En contacto con suelo	
	Sulfatos (en mg de SO4 2-/ kg de suelo secado al aire)	6000-12000
5c	Ambiente de agresividad química alta (por gases, líquidos o sólidos):	
	En contacto con agua	
	pH	4.5-4
	CO2 agresivo (en mg/l como CO2)	61-100
	Amonio (en mg NH4/l)	61-100
	Magnesio (en mg Mg2+/l)	1501-3000
	Sulfato (en mg/l como SO4 2+)	3001-6000
	En contacto con suelo	
	Sulfatos (en mg de SO4 2-/ kg de suelo secado al aire)	>12000
5d	Ambiente de agresividad química muy alta (por gases, líquidos o sólidos)	
	pH	<4
	CO2 agresivo (en mg/l como CO2/l)	>100
	Amonio (en mg NH4/l)	>100
	Magnesio (en mg Mg2+/l)	>3000

### Matriz de Cemento Portland.

Definido el Clinker como un componente del Cemento Portland, se prosigue a observar su composición donde se encuentran varias fases, clasificándolo como un material polifásico. Este material presenta alto contenido de  $C_3S$  (alita),  $C_2S$  (belita),  $C_3A$  (aluminato) y  $C_4AF$  (ferrita) característicos para cada productor ya que los yacimientos de donde se extrae la materia prima siempre serán diferentes entre ellos. (Dávila, 2016)

C	CaO
S	SiO <sub>2</sub>
A	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
F	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
H	H <sub>2</sub> O
M	MgO
N	Na <sub>2</sub> O
S	SO <sub>3</sub>
C	CO <sub>2</sub>
N	Na <sub>2</sub> O
K	K <sub>2</sub> O

Tabla 4. Abreviaciones utilizadas en la teoría de la química del cemento. Fuente: Dávila, Formación tardía de etringita en fibrocemento, 2016.

C3S	3CaO SiO	Silicato tricálcico
C2S	2CaO SiO	Silicato dicálcico
C3A	3CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminato tricálcico
C4AF	4CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ferroaluminato tetracálcico
CH	Ca(OH) <sub>2</sub>	Portlandita (hidróxido de calcio)
C-S-H	xCaO SiO <sub>2</sub> yH <sub>2</sub> O	Silicato de calcio hidratado

Tabla 5. Formulas abreviadas de los compuestos del cemento. Fuente: Dávila, Formación tardía de etringita en fibrocemento, 2016.

La fase que más afecta la cinética de hidratación en los primeros días es el  $C_3S$ , cuando la adición de sulfato de calcio es la apropiada. En un caso contrario, cuando no hay adición de sulfato o dicha adición es insuficiente, las fases aluminatos pasan a gobernar la cinética de reacción durante las primeras etapas causando un fraguado acelerado. Este comportamiento acelerado es indeseable, en materiales de matriz cementicia, cuando se requiere un periodo de trabajabilidad que permita su colocación. Por esta razón se añade una fuente de sulfato al cemento para controlar la reacción de las fases del clínquer (Quennoz; Scrivener, 2013, citado por Dávila, 2016).

### Cinética de Hidratación del Cemento Portland convencional.

“El Cemento, al entrar en contacto con el agua, inicia la solubilización de todas sus fases y los iones formados contribuyen a la alcalinidad y actividad iónica de la suspensión acuosa. La hidratación inicia y continua de manera controlada por diversos fenómenos que actúan en momentos diferentes a lo largo de su evolución: la difusión de las fases del cemento en solución, la nucleación de los primeros productos hidratados, la difusión de los reactivos a los núcleos de reacción y el crecimiento de los productos que

puede ser limitado por el espacio disponible entre las partículas en suspensión acuosa. Las reacciones son simultáneas, pero cada una con una cinética propia y energía correspondiente liberada. El acompañamiento de la evolución de esas reacciones y, principalmente de la evolución del calor liberado en las primeras 72 horas, es de importancia fundamental en tecnología de materiales cementicios (Cincotto, 2011) “. (Davila, 2016, págs. 9,10).

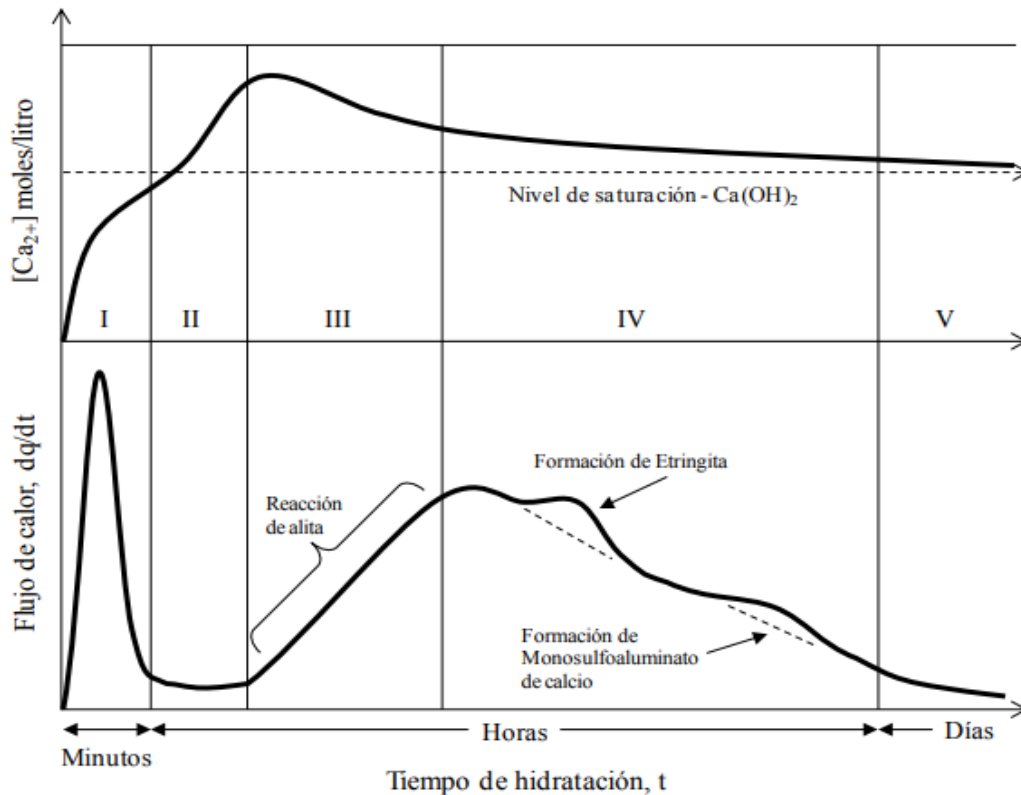


Ilustración 4. Perfil típico de calor durante las reacciones de Hidratación de un Cemento Portland común; I - Periodo de disolución; II - Periodo de inducción o nucleación; III - Periodo de aceleración; IV - Periodo de desaceleración; V - Periodo de difusión. (adaptado de Quarcioni, 2008). Fuente: Dávila, Formación tardía de etringita en fibrocemento, 2016.

### Densidad de empaquetamiento.

En mezclas densamente empaquetadas, la reducción de vacíos capilares genera una pasta más homogénea y resistente, pero también limita el volumen libre para el crecimiento de productos cristalinos posteriores, como la etringita de formación tardía. Cuando la microestructura es muy compacta desde edades tempranas (por diseño de la curva granulométrica, baja relación a/c y uso de fillers reactivos o inertes), cualquier incremento volumétrico asociado a nuevos productos de hidratación tiende a traducirse directamente en tensiones internas, en lugar de disiparse por relleno de poros.

### Expansión volumétrica por etringita.

La formación tardía de etringita se asocia a concretos que han sido expuestos a temperaturas elevadas ( $\approx 65-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  o más) durante el curado, lo que descompone o inhibe la etringita temprana; al enfriarse y en presencia de humedad, los sulfatos remanentes vuelven a reaccionar con las fases aluminato para formar

etringita dentro de una matriz ya endurecida. En esas condiciones, los cristales de etringita crecen en poros y microgrietas, generan presiones de cristalización y provocan expansiones suficientemente grandes como para exceder la resistencia a tensión de la pasta, dando lugar a fisuración interna, pérdida de rigidez y, finalmente, falla del elemento.

“La etringita es un producto hidratado del cemento cuya formación tardía puede darse dentro de un sistema endurecido a partir de la hidratación de los aluminatos del clínker y en presencia de sulfatos propios de la gipsita, la cual es utilizada como controlador del fraguado prematuro. Cuando el curado de la pasta, desde las primeras edades, es realizado en temperaturas superiores a los 70 grados centígrados, la formación de la etringita en el estado plástico no es posible desde el punto de vista termodinámico, sin embargo, después del fraguado y cuando el sistema se ha enfriado debajo de los 70 grados centígrados, la formación de etringita se torna posible siempre que exista agua disponible, esto sucede en los poros y genera tensiones internas”. (Davila & Vanderley, 2013, pág. 232). La temperatura en la Hidratación y el Curado se debe principalmente a la energía liberada durante el proceso, ya que se trata de una reacción exotérmica (Hernandez Carrillo, 2016). También existe la producción de elementos prefabricados de concreto en los que inducen el calor para lograr resistencias más altas en menor tiempo (Davila, 2016).



*Ilustración 5. Falla por expansión interna en elemento de concreto hidráulico. Fuente: Instituto Mexicano del Transporte.*

### Etringita primaria y tardía en el contexto de empaquetamiento

La etringita primaria se forma en las primeras etapas de hidratación del C3A en presencia de sulfatos (principalmente del yeso/gipsita añadida al clínker), cuando la pasta aún está plástica y puede deformarse sin acumular esfuerzos significativos, contribuyendo al control del fraguado y al desarrollo inicial de la microestructura. En cambio, la etringita tardía se desarrolla en un sistema ya rígido, donde la combinación de elevada densidad de empaquetamiento, liberación gradual de sulfatos internos y disponibilidad de agua hace que el mismo producto cristalino que inicialmente fue benigno se convierta en un agente expansivo capaz de inducir un mecanismo patológico de tipo “ataque interno por sulfatos”.

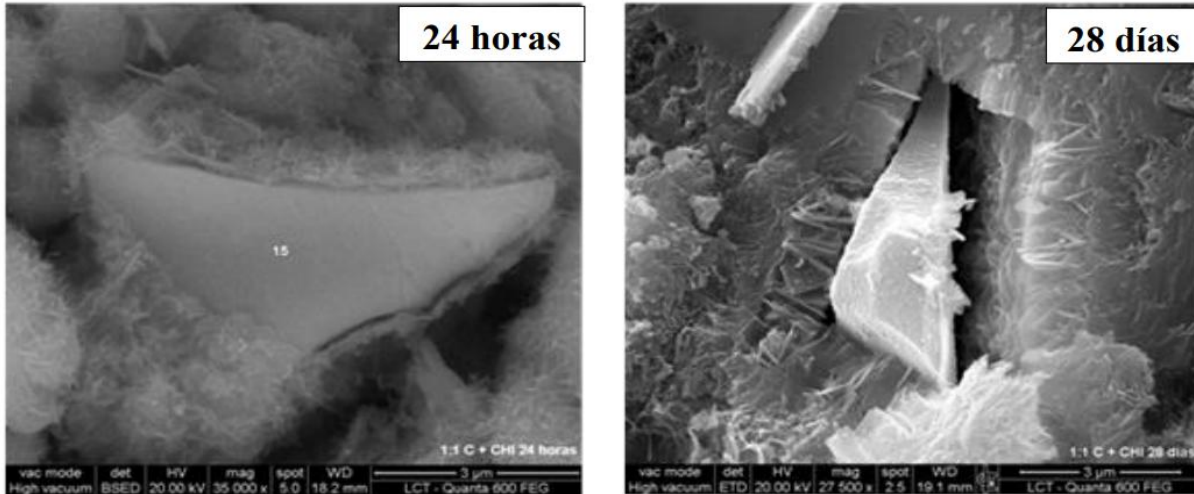


Ilustración 6. Imagen de electrones secundarios de la fractura de un mortero cemento-cal-calclita, ilustrando el efecto de nucleación del filer calcario en la precipitación de C-S-H a diferentes edades. (Cincotto, 2011).

## Fase experimental.

### Criterios de diseño y optimización.

Se propone la utilización del plástico HDPE como reemplazo parcial del agregado grueso, tomando en cuenta las características individuales de cada material en la etapa de diseño para lograr optimizar las mezclas de concreto, haciendo énfasis en el rendimiento volumétrico de las mezclas [NMX-C-162-ONNCCE]

A modo de referencia, se citan dos casos de éxito dentro de las diversas investigaciones sobre utilización de HDPE como reemplazo parcial en mezclas de concreto hidráulico, realizadas a la fecha y cuyas aportaciones inspiraron algunos criterios de esta tesis;

TAMRIN & NURDIANA (2021) proponen la incorporación del plástico HDPE en el concreto como una adición y se dosifica en función del material cementante (masaHDPE/masaCEMENTO)\*100.

Análisis de volumen de diseños propuestos por Tamrin y Juli Nurdiana (2021)							
Material	Unidad	Diseño de mezcla (para 21 litros) sin adición de HDPE	Diseño de mezcla con 20% de adición de HDPE	Densidad (Kg/L)	Volumen aportado por la adición del HDPE (lt)	Volumen final (lt)	Rendimiento real por metro cubico
Cemento	kg	4.03	4.03	-	-	21.84	1039.89
Agua	lt	3.82	3.82	-	-		
Agregado Fino	kg	20.54	20.54	-	-		
Agregado Grueso	kg	21.41	21.41	-	-		
plástico HDPE	kg	0	0.81	0.967	0.84		

Tabla 6. Antecedentes de investigación 1

Soriano Ruelas 2021 propone incorporar el plástico como un porcentaje de reemplazo del agregado fino.

Análisis de volumen de diseños propuestos por Soriano Ruelas (2022)								
Material	Unidad	Diseño de mezcla (75 litros) sin reemplazo de HDPE	Diseño de mezcla (75 litros) con 30% de reemplazo de HDPE	Densidad (Kg/L)	Volumen de arena recortado por la adición de plástico (lt)	Volumen aportado por la Adición del HDPE (lt)	Volumen final (lt)	Rendimiento real por metro cubico
Cemento	kg	27.75	27.75	-	-	-	83.64	1115.18
Agua	lt	14.76	14.76	-	-	-		
Arena	kg	44.23	30.96	2.61	5.08	-		
Grava 1	kg	70.4	70.4	-	-	-		
Grava 2	kg	23.15	23.15	-	-	-		
Plástico HDPE	kg	0	13.27	0.967	-	13.72		
Aditivo 1	ml	152.6	152.6	-	-	-		
Aditivo 2	ml	27.8	27.8	-	-	-		

Tabla 7. Antecedentes de investigación 2

Si bien ambos obtuvieron resultados similares y satisfactorios, también presentan un área de oportunidad en la optimización de los diseños. En esta investigación se utiliza como criterio de diseño el reemplazo del volumen en lugar de la masa, mediante el análisis de la fracción volumétrica de cada ingrediente que constituye la mezcla, tomando en cuenta el contraste de densidades entre el material reemplazable (agregado grueso natural) y el material de reemplazo (HDPE). De este modo, garantizamos la optimización del volumen de la mezcla, sin que éste se vea afectado a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo. Al ajustar el rendimiento de la mezcla, aseguramos una producción de 1000 l/m<sup>3</sup> de concreto, tomando en cuenta que un aumento en la cantidad de plástico significa una disminución en el volumen del agregado grueso.

## 2. Apartado metodológico.

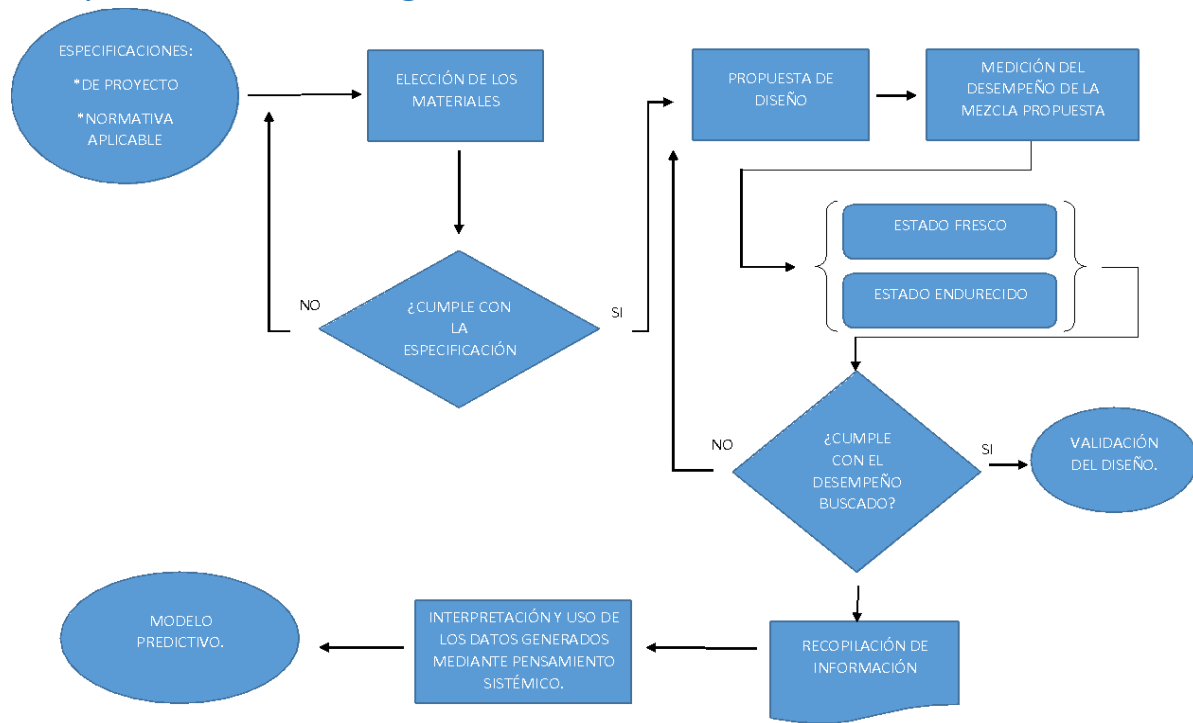


Ilustración 7. Metodología propuesta.

### Materiales.

Basado en la primera etapa de la metodología presentada anteriormente, el inicio del proceso de diseño de mezclas es guiado por las especificaciones sobre los materiales de la normativa aplicable y los requisitos específicos de cada proyecto y/o de quien solicita el suministro de concreto hidráulico.

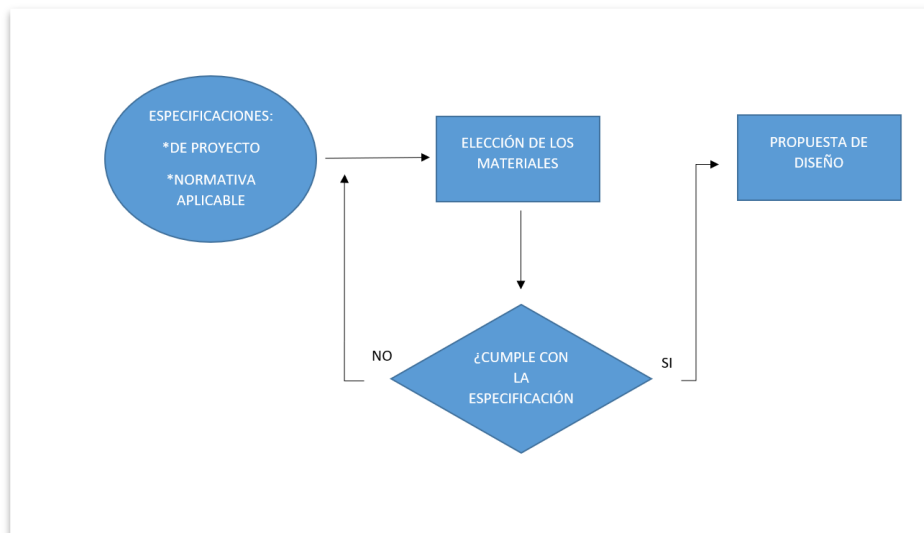


Ilustración 8. Etapa 1 de la metodología propuesta.

Para este proyecto se tomarán en cuenta los siguientes materiales:

### Cemento

En esta investigación, se utiliza cemento portland compuesto clase resistente 40 con resistencia a los sulfatos **CPC40 RS** de **HOLCIM** que cumple con las especificaciones de la NMX-C-414-ONNCCE.

Especificaciones Físicas	Método de Prueba	Especificación NMX-C-414-ONNCCE vigente		Resultado	Unidades
		Mínimo	Máximo		
Resistencia a la compresión 3 días	NMX-C-061-ONNCCE vigente	-	-	28.6	N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a la compresión 28 días*	NMX-C-061-ONNCCE vigente	40.0	-	42.6	N/mm <sup>2</sup>
Fraguado Inicial	NMX-C-059-ONNCCE vigente	45.0	-	154	minutos
Fraguado Final	NMX-C-059-ONNCCE vigente	-	600	356	minutos
Resistencia a los Sulfatos (1 año)**	NMX-C-418-ONNCCE vigente	-	0.10	0.08	%
Estabilidad de volumen en autoclave	NMX-C-062-ONNCCE vigente	-0.20	0.80	0.019	%
Expansión en barras sumergidas a 14 días	NMX-C-185-ONNCCE vigente	-	0.020	0.001	%

Especificaciones Químicas	Método de Prueba	Especificación NMX-C-414-ONNCCE vigente		Resultado	Unidades
		Mínimo	Máximo		
Trióxido de Azufre (SO <sub>3</sub> )***	NMX-C-131-ONNCCE vigente	-	4.00	3.6	%

Ilustración 9. Informe de calidad del CPC40 RS. Documento completo en anexos.

### Agua

El agua para utilizar proviene de un canal de riego y cumple con la norma mexicana NMX-C-122-ONNCCE. Agregar tabla comparativa de resultados de lab vs nmx 122.

### Agregados pétreos.

Conforme a la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE se consideran las siguientes características físicas de los agregados para el proceso de diseño de mezclas; **granulometría, densidad, humedad, absorción y módulo de finura**. Fueron elegidos 4 bancos de material; TCG y TRITUVISA para agregado grueso y Los CUCOS y TRITECNO para agregado fino, con arena natural y arena lavada respectivamente.

### TCG y TRITECNO

Ambos bancos se encuentran ubicados en la misma zona minera a una distancia de un kilómetro aproximadamente entre ellos. Extrayendo y procesando materiales de los depósitos aluviales de un área mineralizada denominada *Estrella de Belén II-Maria Socorro* de la sierra El Mayor, afloramiento de la Sierra Cucapah, ubicada en la porción norte de Baja California, en donde "Las rocas más antiguas corresponden a rocas afectadas por metamorfismo regional en facies de esquistos verdes- anfibolita, consisten en esquistos, mármol, metaarenisca, metalutita, y en menor proporción, cuarcita, migmatita y gneis agrupadas en un complejo metamórfico." (Servicio Geológico Mexicano, 2016).

El producto al final del proceso industrial es grava semitriturada en distintas graduaciones y arena lavada, entre otros.



Ilustración 10. Mármore blanco, Esquito verde, Metaarenisca.



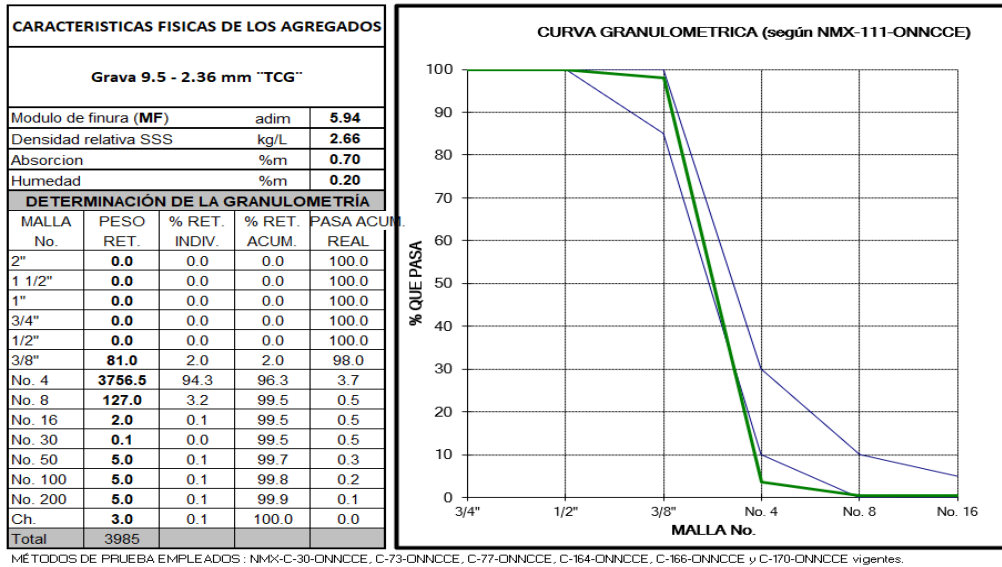
Ilustración 11. [Cuarcita](#), [Gneis](#), [Migmatita](#).

El banco de agregados TRITUVISA se encuentra a unos siete kilómetros al norte de TCG y TRITECNO, En el extremo sur de la colonia La Puerta. Al igual que los anteriores, se extraen materiales de los aluviones de la Sierra Cucapah. En esta zona también hay depósitos de grava y arena, pero a diferencia de los depósitos de TCG y TRITECNO en donde predominan las rocas metamórficas, se observan en mayor proporción rocas plutónicas clasificadas en los grupos granito - granodiorita al estar en la zona aluvial de una beta de esta intrusión ígnea.



Ilustración 12. [Granodiorita](#) y [Tonalita](#).

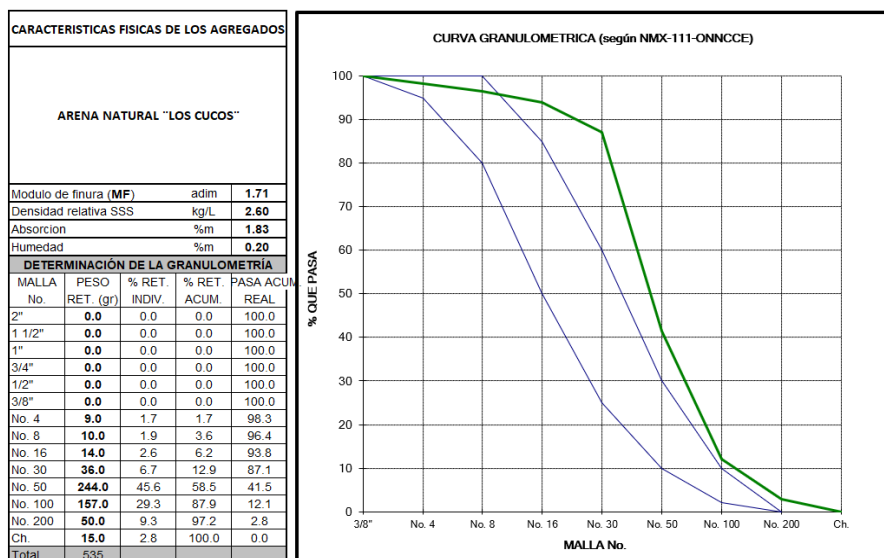
Para esta investigación, se utilizó grava del tamaño nominal 9.5-2.36 mm de TCG. De los materiales de TRITECNO se adquirió grava 19.5-4.75 mm y arena lavada. Dichos rangos o tamaños nominales se encuentran en la Tablas 1 y 2; "Límites de granulometría para agregado fino" y "Límites granulométricos del agregado grueso, en masa, en porcentaje que pasa" respectivamente, contenidas en la NMX-C-111-ONNCE-2018.



## Grava TRITUVISA

### Los CUCOS

Este banco se encuentra en la parte centro norte del estado de baja california a dos kilómetros de la frontera con California, EE. UU., sobre una unidad de conglomerado polimictico con niveles de arenisca se extrae grava y arena. Estos depósitos de arena eólica están constituidos en un 86% de SiO<sub>2</sub> (cuarzo) en promedio (INEGI, 1997), tal como se aprecia en la vista al microscopio.



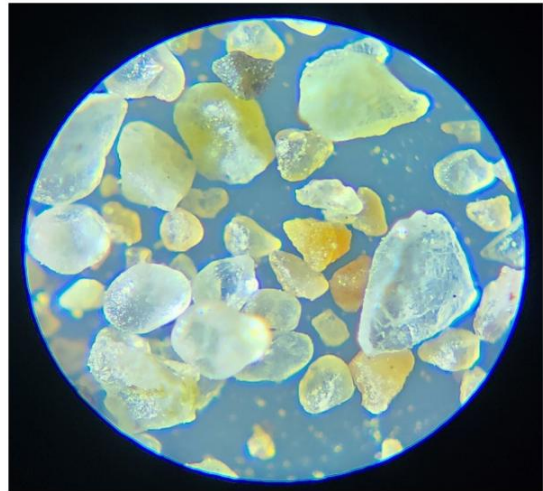


Ilustración 13. Arena natural CUCOS visto con microscopio óptico, magnificación 180x. Fuente: Elaboración propia  
 Ilustración 14. Ubicación de bancos de agregados pétreos, en el marcador 1 se encuentran TCG y Trituvis. En el 2, trituvisa y en el 3, Los Cucos. Bloque diagramático 3D [https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geofisica/3\\_111-12\\_BD.pdf](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geofisica/3_111-12_BD.pdf)

## Pruebas para medición del desempeño.

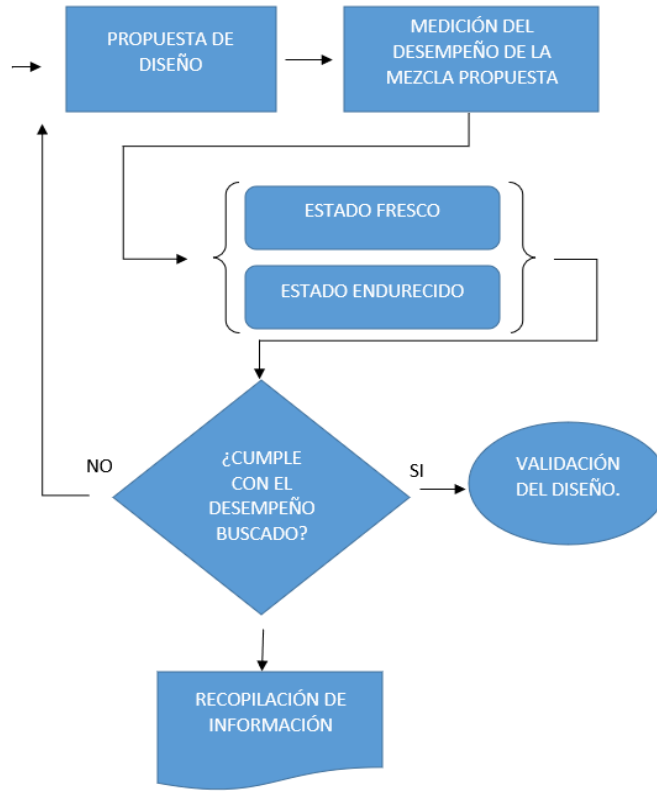


Ilustración 15. Etapa 2 de la metodología propuesta

Una vez elegidos los materiales que cumplen con los requerimientos, se procede a experimentar con mezclas a nivel laboratorio, siguiendo la metodología de la etapa 2 en donde se evalúan los diseños propuestos y se realizan ajustes en múltiples iteraciones de ser necesario, hasta obtener una mezcla optimizada.

El desempeño por evaluar fue medido a través de pruebas tanto en estado fresco, como en estado endurecido y son las que a continuación se enlistan.

### **Extensibilidad o flujo de revenimiento.**

La extensibilidad es la medida del diámetro que el concreto autocompactable puede desplazarse por acción de su propio peso, utilizando el cono de Abrahams invertido, siguiendo el método de ensayo establecido en la NMX-C-472-ONNCCE. Este es el valor de referencia para la consistencia o fluidez que presenta el concreto.

### **Temperatura.**

Las temperaturas son medidas según lo especifica la norma mexicana NMX-C-435-ONNCCE.

### **Viscosidad.**

La medida relativa de la velocidad de flujo se relaciona con la viscosidad de la mezcla por lo que en esta investigación se realiza una prueba similar a la T50 descrita en la NMX-C-472-ONNCCE, con la diferencia de que el tiempo se inicia desde que se levanta el cono hasta que este se vacía por completo, independientemente del diámetro obtenido.

**VSI (índice de estabilidad visual)**

El VSI está descrito en la NMX-C-472-ONNCCE y se refiere a una prueba visual de la masa de concreto en estado fresco para determinar su estabilidad, una vez que se ha realizado la prueba de flujo o extensibilidad. En la práctica, esta prueba se utiliza usualmente en el control de calidad de estos concretos. Esta prueba es de naturaleza cualitativa y considera los siguientes criterios:

Valor de VSI	Criterio
0 = Altamente estable	No hay evidencia de segregación o sangrado
1 = Estable	No hay evidencia de segregación y se observa un ligero sangrado como un brillo en la masa de concreto.
2 = Inestable	Se presenta un ligero halo de mortero menor o igual a 10mm y apilamiento de agregado en la masa de concreto.
3 = Altamente inestable	Hay clara evidencia de segregación y un gran halo de mortero mayor a 10 mm y un gran apilamiento de agregado en el centro de la masa de concreto.

*Tabla 7. Clasificación de valores para VSI*

**Masa unitaria del concreto fresco.**

La NMX-C-162-ONNCCE la define como la cantidad de materia contenida en un metro cubico de concreto fresco.

**Rendimiento.**

La NMX-C-162-ONNCCE lo define como el volumen de concreto fresco producido por una cantidad de ingredientes, obtenido del cociente del valor de la masa total de los mismos entre el valor de la masa unitaria del concreto fresco.

Este valor es de gran importancia ya que nos permite monitorear el volumen real que estamos produciendo con la cantidad de materiales establecida, incluyendo el aire atrapado o incluido intencionalmente.

Se tomará como referencia la NMX-C-155-ONNCCE para definir las tolerancias de volumen producido por amasada, en donde es aceptable una variación de +- 2% del volumen especificado. Esto significa que existe una tolerancia de 20 litros de volumen por cada 1000 litros producidos.

**Análisis por ACI 302**

### 3. Resultados.

#### Mezclas de control.

Se realizaron 15 mezclas de control con el objetivo de conocer el desempeño que puede lograrse utilizando las materias primas disponibles en el municipio de Mexicali, B.C., considerando agregados pétreos naturales que actualmente se utilizan para la construcción de infraestructura local.

#### Concretos autocompactables con agregados naturales y TMA de 20mm.

##### Consideraciones de diseño.

Se tomó como punto de partida un diseño propuesto empíricamente para realizar las mezclas con distintos materiales naturales propuestos y realizando ajustes en la dosificación con base en los desempeños obtenidos en cada iteración.

Las dosificaciones para estas mezclas se ajustaron según las características de cada material, poniendo especial atención en el contenido de humedad (**%H**) de la arena lavada, ya que debido a la naturaleza del proceso de remoción de finos y a las altas demandas del producto, usualmente es entregada por los proveedores con altos contenidos de humedad (**%H**) rebasando el porcentaje de absorción varias veces. Esto significa que hay agua suficiente para saturar los poros de las partículas del agregado fino (porcentaje de absorción **%Abs**) y otra porción para permanecer libre sobre la superficie de las partículas de arena, que más tarde va a aportar agua adicional a la mezcla y tiene el potencial para afectar a la **Ra/c**. Esto a su vez provoca que la masa medida del agregado al momento de realizar la mezcla no sea real, entonces se debe incrementar la masa a dosificar compensando aquella fracción que el agua ocupa. Una vez determinada la corrección de la dosificación de la arena, se determina la cantidad de agua libre total, misma que debe compensarse disminuyendo su peso al volumen de agua de mezclado a dosificar. Al final de estos ajustes se puede corroborar un cálculo correcto al mantener la misma **R a/c** de diseño y un rendimiento de 1000 L/m<sup>3</sup>.

Dado que el %H puede variar considerablemente entre cada lote, nace la necesidad de mantener un parámetro fijo en cuanto a la cantidad de **agua de diseño** y se adopta el concepto de "**Diseño SSS**" el cual es un modelo "ideal" en donde los agregados pétreos se suponen saturados superficialmente secos (**Ag<sub>SSS</sub>**), lo cual no ocurre en la realidad, siendo que podemos encontrarlos saturados con agua libre superficial (**%H > %Abs**) o parcialmente saturados (**%H < %Abs**) pero nunca totalmente secos, ni perfectamente saturados al 100% pero con superficie seca (**Ag<sub>SSS</sub>**).

Para fijar los demás parámetros de diseño, se fracciona el volumen en sus componentes, representando la cantidad de cemento total por m<sup>3</sup>, la cantidad de agua para los **Ag<sub>SSS</sub>**, los vacíos generados por el aire atrapado en % del volumen de la mezcla. Estos valores fijan una fracción constante del volumen considerados como la "pasta" y por último, la proporción de agregados fino y grueso, cuya suma representa el 100% de los agregados que representan el esqueleto de la mezcla, aportando volumen para completar los 1000 litros del diseño.

### Volumen de la pasta.

El primer paso es determinar el volumen total que la pasta representara de los 1000 litros que se pretende diseñar y para ello es necesario conocer la cantidad de agua (**Va**), cemento y aire atrapado tal como se describe en la ecuación 1.

$$\text{Ecuación 1. Volumen de la pasta } (V_p) = V_c + V_a + V_{\text{vacios}}.$$

Para una **R a/c** = 0.44 con 198 litros de agua y un consumo de cemento de 455 kg, se determina la fracción de volumen de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 2. Volumen del cemento en litros } (V_c) = \frac{\text{cemento en kg}}{[\text{Densidad del cemento en kg/l}]}$$

Dada la densidad del cemento igual a 3 kg/l, sustituyendo en la ecuación 2, el volumen resultante es de 152 litros. El volumen de aire atrapado, que, según los antecedentes de estos materiales, es del 1% en promedio, es equivalente a 10 litros de vacío.

Sustituyendo en la Ecuación 1;

$$\text{. Volumen de la pasta } (V_p) = (152 \text{ l}) + (198 \text{ l}) + (10 \text{ l}) = 360 \text{ litros.}$$

### Volumen de los agregados.

Los agregados son el esqueleto o macroestructura de bondadosas propiedades mecánicas que serán recubiertos por la pasta, formando una unión o superficie de contacto denominada "Zona de transición interfacial" (ITZ Por sus siglas en ingles) y ligando cada una de las partículas dentro de la mezcla. El volumen de agregados estará condicionado al volumen faltante para producir 1000 litros de mezcla una vez determinado el volumen de la pasta cementicia.

Esta macroestructura, entre mejor optimizada se encuentre, brindara un mejor desempeño desde el estado fresco, hasta el estado endurecido. Dicho esto, se busca tener una buena cantidad de solidos gruesos, acompañados de una cantidad suficiente de mortero para mantener la mezcla en suspensión

Grava 19.5 – 9.5 mm Trituvisa. Grava 19.5 – 9.5 mm Tritecno.

MEZCL A	CEMENTO (KG/M3)	AGUA SSS (L/M3)	ADITIVO 1 MBS Z90 (ML/KGCTE)	ADITIVO 2 PLASTIMENT N (ML/KGCTE)	ADITIVO 3 VISCOFLOW 7000 (ML/KGCTE)	GRAVA 3/4" TRITUVISA (KG/M3)	GRAVA 3/4" TRITECNO (KG/M3)	ARENA LAVADA TRITECNO (KG/M3)
M1	455	218	-	1.88	1.87	697	-	1015
M2	455	218	-	1.64	2.02	697	-	1015
M3	455	219	-	1.64	2.02	-	690	1015
M4	455	219	-	1.91	2.17	-	690	1015
M5	455	219	-	1.91	2.02	-	690	1015

M6	455	219	-	2.18	2.12	-	690	1015
M7	455	219	-	2.18	2.12	-	690	1015
M8	455	218	-	2.18	1.92	697	-	1015
M9	455	218	-	2.18	2.07	697	-	1015
M10	455	218	-	1.64	2.53	-	690	1015
M11	455	219	-	0.81	2.78	-	690	1015
M12	455	219	1.61	0.82	2.27	-	689	1014
M13	455	218	1.34	0.82	1.77	-	688	1013
M14	455	218	1.34	0.82	1.52	-	688	1013
M15	455	218	1.5	1.09	1.41	-	688	1013

Tabla 8. Dosificación en mezclas experimentales

### Desempeño en estado fresco.

Las 15 mezclas fueron monitoreadas durante 5 horas, en donde se realizó una medición inicial denominado como tiempo cero, seguido de otra lectura a los 30 minutos transcurridos, una tercera lectura a una hora transcurrida y después una lectura por hora, hasta completar 5 horas de tiempo de vida de la mezcla. Las variables por evaluar en cada medición son:

### Extensibilidad

Como se observa en los resultados de la fluidez en sus distintos intervalos de tiempo, se presenta un comportamiento variable que aumenta con respecto al tiempo, alcanzando un pico entre la primera media hora y la hora transcurrida a partir del cual comienza a disminuir gradualmente hasta la pérdida total de trabajabilidad de la mezcla. Es importante mencionar que este comportamiento no ocurre en los concretos convencionales, los cuales comienzan a perder trabajabilidad desde su punto de inicio, sin presentar picos con respecto al tiempo.

### Forma de la curva de extensibilidad

Se observa que el incremento inicial de fluidez es moderado (del orden de 50–100 mm según la mezcla) y que, en el pico, la mayoría de las mezclas se sitúan en un rango estrecho alrededor de 600–680 mm, lo que indica un efecto homogéneo de los aditivos sobre el conjunto de dosificaciones. A partir de la segunda hora, las curvas se agrupan nuevamente y la extensibilidad disminuye gradualmente hasta valores cercanos a 450–520 mm, lo que refleja una pérdida progresiva de trabajabilidad, pero sin cambios bruscos ni signos de bloqueo repentino.

### Comparación entre mezclas

Aunque existen ligeras diferencias entre curvas, ninguna mezcla se desvía de manera extrema respecto al comportamiento promedio, lo que sugiere que las variaciones en la dosificación de los aditivos (Tabla 8) ajustan más el nivel absoluto de fluidez que la forma general de la evolución en el tiempo. En conjunto, la

figura respalda la interpretación de que el concreto autocompactable estudiado presenta una “ventana óptima” de trabajabilidad durante la primera hora, adecuada para colocación, seguido de una fase de estructuración gradual coherente con el desarrollo de hidratación descrito en el texto.

Los resultados de extensibilidad y VSI pueden complementarse señalando que el comportamiento en el tiempo está fuertemente influenciado por la dosificación y combinación de aditivos superplastificantes y modificadores de viscosidad indicados en la Tabla 8, más que por cambios en el agua o el contenido de cemento, que permanecen prácticamente constantes entre mezclas. En concretos autocompactables, este tipo de aditivos puede generar un “licuado retardado” de la mezcla, donde la fluidez aumenta inicialmente y luego disminuye conforme avanza la hidratación y se agota la acción dispersante del superplastificante, patrón coherente con el pico de extensibilidad observado entre 30 y 60 minutos seguido de la pérdida gradual de trabajabilidad.

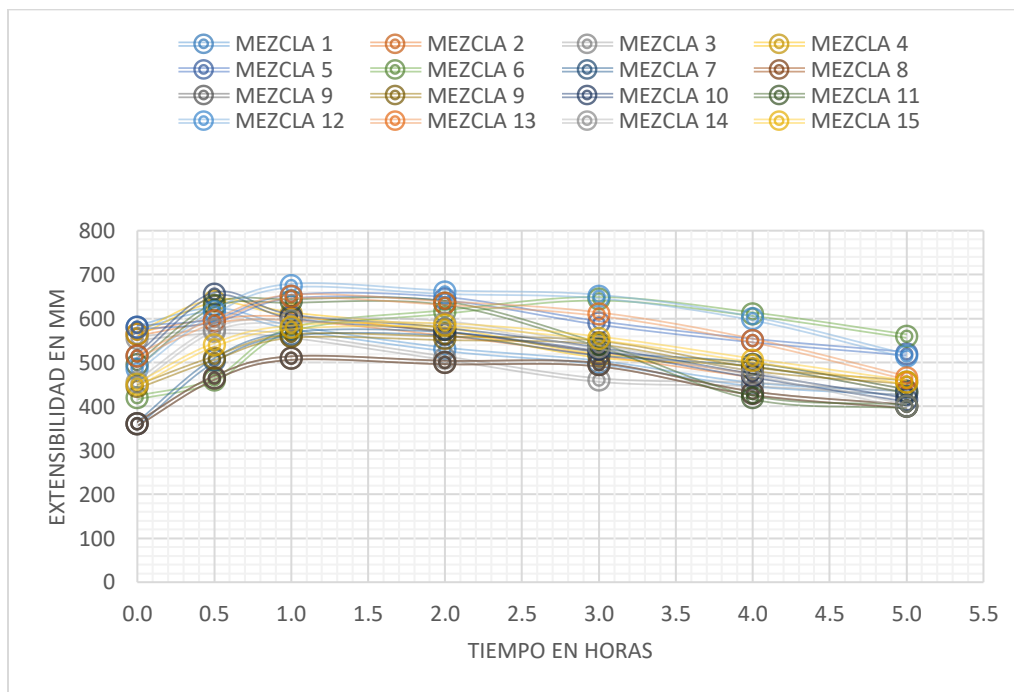


Ilustración 16. Desempeño de extensibilidad para las diferentes mezclas de concreto realizadas.

Además, la presencia del aditivo viscoso (Viscoflow 7000) en distintas dosificaciones explica que, aun con altos niveles de fluidez en el pico, el índice VSI se mantenga en valores de alta estabilidad (VSI = 0) en las mezclas optimizadas, ya que estos modificadores incrementan la cohesión de la pasta y reducen la segregación sin sacrificar la capacidad de flujo. Este comportamiento contrasta con el de un concreto convencional con aditivos plastificantes de menor desempeño, en el que la trabajabilidad suele decrecer casi desde el tiempo cero, sin presentar el incremento inicial asociado a la acción progresiva de los superplastificantes de base policarboxilato empleados en muchas formulaciones de concreto autocompactable. En estos resultados también se observa un pico en la fluidez desarrollada durante la primera hora del seguimiento. En concordancia con el periodo I de disolución y su característico pico de temperatura.

## Temperatura

Los valores obtenidos sugieren un patrón que se observa en las diferentes mezclas las cuales iniciaron con distintos valores iniciales, correspondiéndose principalmente con la temperatura ambiente al momento de los experimentos, seguido de un primer pico en la primera hora, como lo sugiere Dávila, 2016. Debido a la etapa I de la hidratación del cemento, en donde ocurre la disolución del cemento anhidro y una gran cantidad de calor es liberada.

MEZCLA	INTERVALOS DE TIEMPO EN HORAS						
	0	0.5	1	2	3	4	5
M1	29	30	31	31	31	31	31
M2	22	23	24	24	25	25	25
M3	25	25	25	25	26	26	26
M4	28	28	28	29	29	29	30
M5	29	29	29	29	29	30	30
M6	25	25	25	26	26	27	28
M7	25	26	26	27	28	28	29
M8	26	26	28	28	29	29	30
M9	28	28	29	29	30	30	30
M10	28	29	30	30	31	32	32
M11	25	25	25	25	26	26	26
M12	25	25	26	26	26	26	26
M13	21	22	22	23	23	23	23
M14	25	25	25	25	25	26	26
M15	22	22	23	24	25	26	27

Tabla 9. Seguimiento de temperaturas (°C) durante 5 horas

Las mezclas presentan un aumento moderado de temperatura a lo largo de las 5 horas de monitoreo, con incrementos típicos de 3–5 °C respecto al valor inicial, lo que es consistente con el calor liberado por la hidratación temprana del cemento en condiciones de laboratorio sin curado acelerado.

### Evolución general de temperatura

La mayoría de las mezclas inician entre 22 y 29 °C y alcanzan temperaturas finales cercanas a 26–32 °C, describiendo curvas suaves y sin picos abruptos, lo que sugiere una hidratación controlada sin reacciones exotérmicas excesivas. Las pendientes son más pronunciadas en las primeras 2–3 horas y tienden a estabilizarse hacia el final del periodo, en concordancia con el periodo inicial de disolución e hidratación rápida seguido de una fase de reacción más lenta.

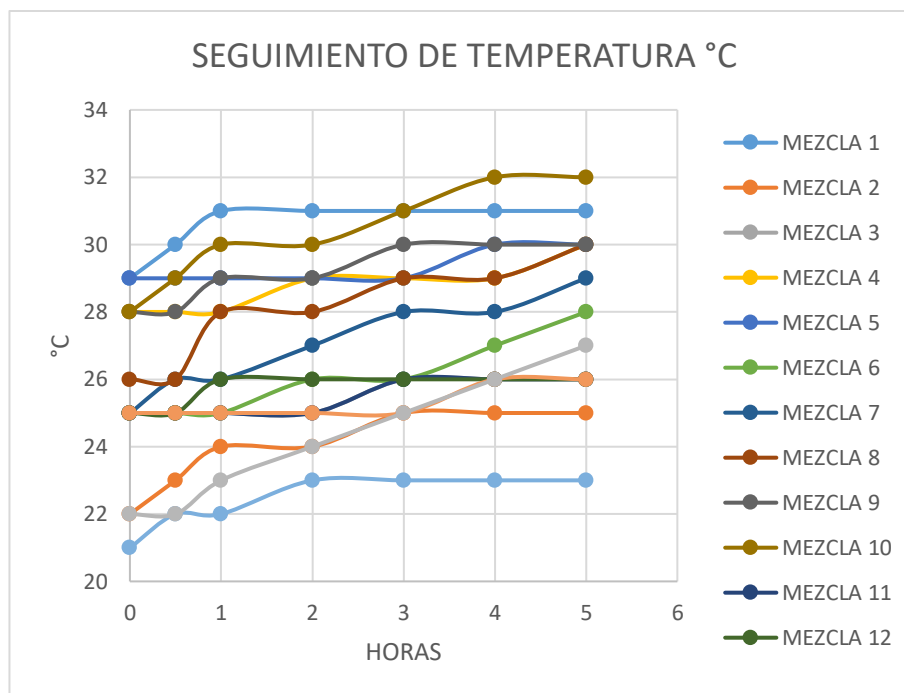


Ilustración 17. Desempeño de temperatura para las diferentes mezclas de concreto realizadas.

### Diferencias entre mezclas

Algunas mezclas (por ejemplo, M1, M4, M8, M9 y M10) parten de temperaturas iniciales más altas y alcanzan los valores máximos del conjunto ( $\approx 30\text{--}32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), mientras que M2, M3, M13 y M15 muestran los menores niveles térmicos durante todo el seguimiento. Estas diferencias, aunque relativamente pequeñas, pueden relacionarse con variaciones en dosificación de aditivos y en la demanda de agua efectiva, lo que influye en la cinética de hidratación y en la velocidad de liberación de calor, pero sin generar gradientes térmicos que pongan en riesgo la estabilidad del concreto autocompactable evaluado.

### Viscosidad

Los resultados de viscosidad muestran que las mezclas se agrupan en dos niveles: un grupo de baja viscosidad inicial ( $\approx 2.3\text{--}3.5\text{ s}$ ) y otro de alta viscosidad inicial ( $\approx 4\text{--}6\text{ s}$ ), lo que refleja el efecto de la dosificación del modificador de viscosidad y de los superplastificantes sobre la cohesión de la pasta.

### Evolución temporal de la viscosidad

En la mayoría de las mezclas se observa una ligera reducción de la viscosidad durante la primera hora y, posteriormente, una tendencia a mantener valores casi constantes o a incrementarse suavemente hacia el final de las 5 horas. Este comportamiento es coherente con una fase inicial de dispersión y “licuado” inducida por los aditivos, seguida de una etapa de estructuración gradual asociada al avance de la hidratación y al aumento de la temperatura interna.

### Relación con trabajabilidad y estabilidad

Las mezclas con viscosidades más bajas (por ejemplo, M1–M6) se mantienen en un rango compatible con concretos autocompactables, aportando buena fluidez sin evidencias de pérdida brusca de cohesión. Las

mezclas con viscosidades más altas (M8–M11, M14–M15) muestran valores iniciales elevados, pero relativamente estables en el tiempo, lo que sugiere una matriz más robusta frente a la segregación, en concordancia con los resultados de extensibilidad y VSI que indican alta estabilidad visual para la mayoría de las dosificaciones optimizadas.

MEZCLA	INTERVALOS DE TIEMPO EN HORAS						
	0	0.5	1	2	3	4	5
M1	2.8	2.56	2.71	2.86	2.56	2.82	3.12
M2	3.12	2.89	2.71	2.68	3.06	3.26	3.89
M3	2.32	2.69	2.85	2.73	3.1	3.42	3.9
M4	2.87	2.53	2.57	2.62	2.67	2.76	2.85
M5	2.63	2.56	2.38	2.78	2.81	2.67	2.78
M6	4	3.61	2.91	2.57	2.48	2.81	3.01
M7	3.81	4.03	2.96	2.87	2.81	3.76	3.83
M8	5.86	5.15	4.22	4.69	4.12	4.03	4.16
M9	4.71	3.97	4.21	3.81	3.85	3.56	3.61
M10	4.7	4.83	4.73	4.91	4.98	5.01	4.99
M11	6.1	5.76	5.43	5.23	5.51	5.81	5.89
M12	4.76	3.5	3.7	3.62	3.56	3.72	3.8
M13	3.87	3.13	2.91	3.61	2.92	2.86	2.99
M14	4.56	5.15	3.78	4.03	3.89	3.99	4.76
M15	4.79	4.07	3.19	4.06	3.32	3.66	5.25

Tabla 10. Seguimiento de la viscosidad (segundos) durante 5 horas

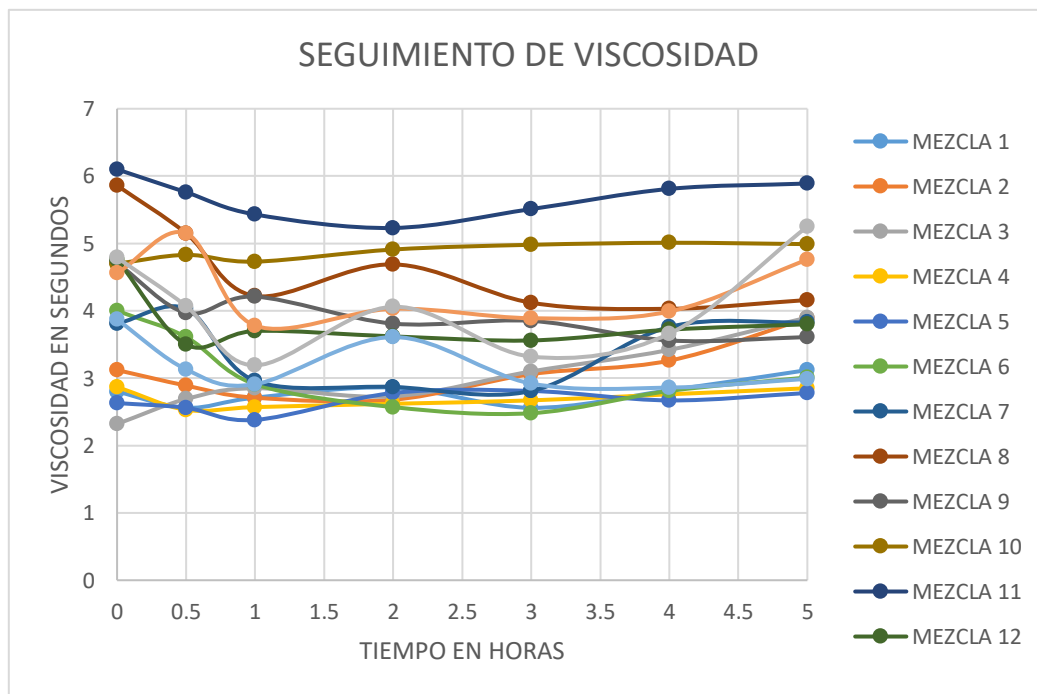


Ilustración 18. Desempeño de la viscosidad para las diferentes mezclas de concreto realizadas

### Proporcionamiento de los agregados para TMAde 3/8.

Se realizaron varias iteraciones a partir de una proporción de grava y arena hasta encontrar un desempeño óptimo. Esto ayudo a acotar una zona optima dentro de la carta de factor de trabajabilidad del ACI 302. Estas pruebas se realizaron con base en las dosificaciones de las mezclas de control, con un cambio en el TMA, conservando relaciones a/c y sinergia de aditivos, obteniendo comportamientos similares a los observados en las mezclas de control. Es en estas mezclas en donde se realiza la sustitución del agregado grueso por HDPE reciclado.

Tabla 11. Dosificación para las diferentes mezclas de 3/8" con testigo y reemplazos

MEZCLA	CEMENTO (KG/M <sup>3</sup> )	AGUASSS (L/M <sup>3</sup> )	RELACION A/C	AD1. PLASTIMENT N (ML/KG CTE)	AD2. VISCOFLOW 7000 (ML/KG CTE)	AD3. MBS Z90 (ML/KG CTE)	ARENA (KG/M <sup>3</sup> )	GRAVA (KG/M <sup>3</sup> )	HDPE (KG/M <sup>3</sup> )	% DE REEMPLAZO	FACTOR DE TRABAJABILIDAD
MT-1	425	195	0.46	1.5	5	0	429	1311	0	0	25
MT-2	425	195	0.46	1.5	4.5	0	600	1137	0	0	35
MT-3	425	195	0.46	1.5	4	0	851	868	0	0	50
MT-4	445	195	0.44	1.5	3.2	2.5	1001	710	0	0	59
MT-5	445	195	0.44	1.5	3	2.5	1001	710	0	0	59
MT-6	445	195	0.44	1.5	3	2.5	1001	710	0	0	59
MR 5-1	445	195	0.44	1.5	3	2.5	1001	674	12.92	5	59
MR 5-2	445	195	0.44	1.5	3	2.5	1001	674	12.92	5	59
MR 5-3	445	195	0.44	1.5	3	2.5	1001	674	12.92	5	59
MR 10-1	445	195	0.44	1.5	3	2.5	1001	638	25.84	10	59
MR 10-2	445	195	0.44	1.5	3	2.5	1001	638	25.84	10	59
MR 10-3	445	195	0.44	1.5	3	2.5	1001	638	25.84	10	59

MR 20-1	445	19 5	0.44	1.5	3	2.5	100 1	568	51.67	20	59
MR 20-2	445	19 5	0.44	1.5	3	2.5	100 1	568	51.67	20	59
MR 20-3	445	19 5	0.44	1.5	3	2.5	100 1	568	51.67	20	59
MR 30-1	445	19 5	0.44	1.5	3	2.5	100 1	497	77.51	30	59
MR 30-2	445	19 5	0.44	1.5	3	2.5	100 1	497	77.51	30	59
MR 30-3	445	19 5	0.44	1.5	3	2.5	100 1	497	77.51	30	59

La Tabla 11 muestra que, al pasar de las mezclas de control (MT-1 a MT-6) a las mezclas con reemplazo de agregado grueso por HDPE (MR5, MR10, MR20 y MR30), se mantiene prácticamente constante la relación a/c, el contenido de cemento y la sinergia de aditivos, mientras se ajustan las proporciones de grava y arena para conservar un mismo factor de trabajabilidad objetivo.

#### **Ajuste granular y contenido de HDPE**

Las mezclas MT-1 a MT-3 utilizan grava 3/8" de dos procedencias con diferentes proporciones arena-grava hasta encontrar un desempeño óptimo de trabajabilidad, mientras que MT-4 a MT-6 ya utilizan una relación arena-grava estabilizada cercana a 1000 kg/m<sup>3</sup> de agregado total. Sobre esta base, las series MR5, MR10, MR20 y MR30 sustituyen gradualmente la grava por HDPE ( $\approx 13, 26, 52$  y  $78$  kg/m<sup>3</sup>, respectivamente), manteniendo constante la fracción de arena y el contenido de aditivos, lo que permite atribuir los cambios en masa unitaria, extensibilidad y estabilidad principalmente al efecto del polímero reciclado.

#### **Factor de trabajabilidad**

El factor de trabajabilidad se mantiene alrededor de 59% para todas las mezclas con HDPE, incluidos los niveles más altos de reemplazo, lo que indica que el ajuste en proporciones de agregado y la dosificación de aditivos lograron conservar un desempeño fresco compatible con concreto autocompactable pese a la reducción de densidad del agregado grueso. Esto respalda la idea de que el diseño granulométrico y la dosificación química pueden compensar la inclusión de un agregado ligero reciclado sin sacrificar la capacidad de flujo y llenado de las mezclas.

### Mezcla Testigo 1-3 [MT-1-3]

Se propusieron 3 mezclas con diferentes factores de trabajabilidad, 25%,35% y 50% respectivamente, con la finalidad de encontrar una dosificación que permita una mezcla estable y satisfactoria, es decir, cuyo VSI sea igual a cero. Esto ayudo a acotar un límite inferior en el eje del factor de trabajabilidad, ubicándose por encima de las zonas delimitadas por el ACI 302, cuyas regiones buscan optimizar losas o pavimentos.

Al observar una buena estabilidad en las mezclas control con un consumo de cemento de 455 kg/m<sup>3</sup> y relación a/c de 0.43, se propuso ajustar la cantidad a 425 kg/m<sup>3</sup> para una relación a/c de 0.46. Esto último provoco un mayor brillo acuoso en la superficie de la pasta respecto a la relación a/c de 0.43.



Ilustración 19. Izquierda: Extendido de MT-2. Con poco flujo y acumulación de agregado grueso. VSI = 3. Derecha: Extendido de MT-1. Con poco o nulo flujo y acumulación del agregado grueso VSI = 3.

Las siguientes tablas muestran la dosificación para las primeras tres mezclas, que tuvieron un comportamiento adverso al esperado, como se muestra en la Ilustración, este fenómeno de segregación no debe ocurrir en las mezclas de concreto, porque se espera que el concreto mantenga su cohesividad y homogeneidad para que en cualquier punto pueda mostrar las mismas propiedades como la resistencia.

Tabla 12. Detalle de dosificación y ajustes para las mezclas testigo 1, 2 y 3.

MEZCLA TESTIGO [MT-1]									
CARACTERISTICA DE LOS MATERIALES	HDPE	AD. 1	AD. 2	AD.3	GRAVA 3	TOTAL GRAVA	ARENA	CEMENTO	AIRE ATRAPADO
% DE PARTICIPACION	0	1.5	5	0	100	75	25	-	0.5
DENSIDAD (KG/LT)	0.967	-			2.66	2.66	2.6	3	0
DISEÑO (SSS) PARA 1000 LITROS			CANTIDADES CORREGIDAS [KG]						
MATERIAL	KG/M3	LT/M3	KG	[KG]	%	[KG]			
CEMENTO	425	141.67	6.38	-	-	-		6.38	
ARENA	428.6	164.58	6.43	0.01	1.83	0.12		6.32	

GRAVA 1	0	0	0	0	0.91	0	0
GRAVA 2	0	0	0	0	0	0	0
GRAVA 3	1311.42	493.75	19.67	0.04	0.7	0.14	19.57
HDPE	0	0	0				0
VACIOS	0	5	0				SIN AD. CON AD.
AGUA	195	195	2.93	0.05	-	0.26	3.13 3.08
ADITIVO 1	0.77	0.64	0.011				
ADITIVO 2	2.55	2.125	0.038				
ADITIVO 3	0	0	0				
TOTALES	2360.02	1000	35.4	0.1		0.51	35.4 35.4

MEZCLA TESTIGO [MT-2]											
CARACTERISTICA DE LOS MATERIALES	HDPE	AD. 1	AD. 2	AD. 3	GRAVA 1	GRAVA 2	GRAVA 3	TOTAL GRAVA	ARENA	CEMENTO	AIRE ATRAPADO
% DE PARTICIPACION	0	1.5	4.5	0	0	0	100	65	35	-	0.5
DENSIDAD (KG/LT)	0.967	-			-	-	2.66	2.66	2.6	3	0
DISEÑO (SSS) PARA 1000 LITROS			CANTIDADES PARA:				CORRECCIÓN POR HUMEDAD				
			15 LT		HUMEDAD		ABSORCIÓN		CANTIDADES CORREGIDAS [KG]		
MATERIAL	KG/M3	LT/M3	KG	LT	%	[KG]	%	[KG]			
CEMENTO	425	141.67	6.38	2.13	-	-	-	-	6.38		
ARENA	600.04	230.42	9	3.46	0.2	0.02	1.83	0.16	8.85		
GRAVA 1	0	0	0	0	0.13	0	0.91	0	0		
GRAVA 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
GRAVA 3	1136.56	427.92	17.05	6.42	0.2	0.03	0.7	0.12	16.96		
HDPE	0	0	0	0					0		
VACIOS	0	5	0	0.08						SIN AD.	CON AD.
AGUA	195	195	2.93	2.93	-	0.05	-	0.29	3.16	3.11	
ADITIVO 1	0.77	0.64	0.011	0.01							
ADITIVO 2	2.3	1.9125	0.034	0.029							
ADITIVO 3	0	0	0	0							
TOTALES	2356.61	1000	35.35	15		0.1		0.57	35.35	35.35	

MEZCLA TESTIGO [MT-3]											
CARACTERÍSTICA DE LOS MATERIALES	HDPE	AD. 1	AD. 2	AD. 3	GRAVA 1	GRAVA 2	GRAVA	TOTAL GRAVA	ARENA	CEMENTO	AIRE ATRAPADO
% DE PARTICIPACIÓN	0	1.5	4	0	0	0	100	50	50	-	0.5
DENSIDAD (KG/LT)	0.967	-			-	-	2.66	2.66	2.6	3	0
DISEÑO (SSS) PARA 1000 LITROS			CANTIDADES PARA:		CORRECCIÓN POR HUMEDAD						
			15 LT		HUMEDAD		ABSORCIÓN		CANTIDADES CORREGIDAS [KG]		
MATERIAL	KG/M3	LT/M3	KG	LT	%	[KG]	%	[KG]			
CEMENTO	425	141.67	6.38	2.13	-	-	-	-	6.38		
ARENA	857.2	329.17	12.86	4.94	0.2	0.03	1.83	0.24	12.65		
GRAVA	874.28	329.17	13.11	4.94	0.2	0.03	0.7	0.09	13.05		
HDPE	0	0	0	0					0		
VACIOS	0	5	0	0.08					SIN AD.	CON AD.	
AGUA	195	195	2.93	2.93	-	0.05	-	0.33	3.2	3.16	
ADITIVO 1	0.77	0.64	0.011	0.01							
ADITIVO 2	2.04	1.7	0.031	0.026							
ADITIVO 3	0	0	0	0							
TOTALES	2351.49	1000	35.27	15		0.1		0.66	35.27	35.27	

En las mezclas testigo 1–3 se observa que los cambios en agua, proporción arena–grava y uso de aditivos modifican de forma importante la trabajabilidad y la estabilidad, a pesar de que el contenido de cemento se mantiene constante.

### Efecto del ajuste agua–agregados

MT-1 parte de una relación a/c de 0.46 con 75% de grava y 25% de arena, mostrando una mezcla con poca fluidez y fuerte apilamiento de agregado grueso, tal como se aprecia en las imágenes de extendido con VSI = 3. En MT-2 y MT-3 se incrementa progresivamente la fracción de arena y se reduce la de grava (hasta 50% arena y 50% grava en MT-3), lo que incrementa la pasta disponible y mejora la cohesión, aunque aún se observan problemas de estabilidad y falta de flujo suficiente para cumplir los criterios de concreto autocompactable.

### Rol del agua y de los aditivos (con y sin ad)

En las tres mezclas la cantidad de agua de mezcla se mantiene en 195 L/m<sup>3</sup>, pero la corrección por humedad y absorción de los agregados modifica el agua efectiva, generando ligeras variaciones en la relación a/c real entre MT-1, MT-2 y MT-3. El uso de superplastificante y modificador de viscosidad se mantiene en un rango bajo (1.5% y 5% respecto al cemento) y se comparan escenarios “con aditivo” y “sin

aditivo”, evidenciando que sin aditivos el asentamiento se reduce y la mezcla se vuelve más rígida, mientras que con aditivos se logra una pequeña ganancia de flujo, aunque todavía insuficiente para obtener un comportamiento autocompactable estable.

### Implicaciones para el diseño posterior

En conjunto, estos resultados justifican el ajuste posterior de los diseños (Tabla 11 y mezclas MT-4 en adelante), donde se reduce la relación a/c a 0.44, se incrementa la fracción de arena y se optimiza la dosificación de aditivos para lograr un equilibrio entre fluidez y estabilidad visual. Las mezclas testigo 1–3 funcionan, así como etapa exploratoria que evidencia que, con el contenido inicial de agua y la granulometría más gruesa, el concreto tiende a segregar y a presentar baja capacidad de autocompactación, marcando el punto de partida para la optimización posterior.

Después de las observaciones realizadas en las primeras tres iteraciones, se ajusta el consumo de cemento a 445 kg/m<sup>3</sup> para bajar la relación a/c a 0.44, buscando mejorar la estabilidad de la pasta y se ajusta el factor de trabajabilidad al 59% para reemplazar el exceso de agregado grueso, por más agregado fino para poder lograr una mezcla homogénea y con suspensión total del agregado grueso.

Tabla 13. Detalle de dosificación y ajustes para la mezcla testigo 4 [MT-4]

CARACTERÍSTICA DE LOS MATERIALES	HDPE	AD. 1	AD. 2	AD. 3	GRAVA 1	GRAVA 2	GRAVA 3	TOTAL GRAVA	ARENA	CEMENTO	AIRE ATRAPADO
% DE PARTICIPACION	0	1.5	3.2	2.5	0	0	100	41	59	-	0.5
DENSIDAD (KG/LT)	0.967	-			-	-	2.66	2.66	2.6	3	0
DISEÑO (SSS) PARA 1000 LITROS		CANTIDADES PARA:				CORRECCIÓN POR HUMEDAD					
		15 LT		HUMEDAD		ABSORCIÓN		CANTIDADES CORREGIDAS [KG]			
MATERIAL	KG/M3	LT/M <sup>3</sup>	KG	LT	%	[KG]	%	[KG]			
CEMENTO	445	148.33	6.68	2.23	-	-	-	-	6.68		
ARENA	1001.26	384.48	15.02	5.77	0.2	0.03	1.83	0.28	14.77		
GRAVA 1	0	0	0	0	0.13	0	0.91	0	0		
GRAVA 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
GRAVA 3	709.65	267.18	10.64	4.01	0.2	0.02	0.7	0.08	10.59		
HDPE	0	0	0	0					0		
VACIOS	0	5	0	0.08					SIN AD.	CON AD.	
AGUA	195	195	2.93	2.93	-	0.05	-	0.35	3.22	3.17	
ADITIVO 1	0.8	0.67	0.012	0.01							
ADITIVO 2	1.71	1.424	0.026	0.021							
ADITIVO 3	1.23	1.1125	0.019	0.017							
TOTALES	2350.91	1000	35.26	15		0.1		0.7	35.26	35.26	

Tras un resultado satisfactorio en la iteración MT-4, se define como factor de trabajabilidad óptimo (WFO) un 59% y se reproduce 2 veces más (MT-5 y MT-6) para validar su repetibilidad y recolectar más información sobre esta propuesta de diseño. Fue necesario hacer un ajuste de -0.2 cc al aditivo 2, debido a la extensibilidad de 77 cm de la MT-4.



Ilustración 20. Extensibilidad de la MT-4. VSI = 0, Extensibilidad 77cm

La tabla de la mezcla MT-4 muestra que, tras los ajustes realizados a partir de las mezclas testigo 1–3, se incrementó el contenido de cemento a 445 kg/m<sup>3</sup> y se redujo la relación a/c a 0.44, al mismo tiempo que se elevó significativamente la fracción de arena (≈59%) y se disminuyó la de grava 3/8" (≈41%), manteniendo la ausencia de HDPE en esta etapa. Estos cambios, junto con un ligero aumento en la dosis total de aditivos (superplastificante y modificador de viscosidad), permitieron acercar el factor de trabajabilidad al valor objetivo del 59% y mejorar la cohesión de la mezcla.

En términos de extensibilidad, la fotografía asociada a MT-4 evidencia un extendido cercano a 77 cm con VSI = 0, lo que indica una mezcla con flujo típico de concreto autocompactable y sin signos visibles de segregación o sangrado. Este comportamiento contrasta con las mezclas testigo iniciales MT-1 a MT-3, en las que el menor contenido de pasta y la mayor proporción de grava generaban poca fluidez y acumulación de agregado grueso; por ello, MT-4 se define como mezcla base óptima y se replica en MT-5 y MT-6 para verificar su repetibilidad antes de introducir el reemplazo por HDPE.

CARACTERÍSTICA DE LOS MATERIALES	HDPE	AD. 1	AD. 2	AD. 3	GRAVA A 1	GRAVA A 2	GRAVA A 3	TOTAL GRAVA	ARENA	CEMENTO	AIRE ATRAPADO
% DE PARTICIPACION	0	1.5	3	2.5	0	0	100	41	59	-	0.5
DENSIDAD (KG/LT)	0.967	-			-	-	2.66	2.66	2.6	3	0

DISEÑO (SSS) PARA 1000 LITROS			CANTIDADES PARA:		CORRECCIÓN POR HUMEDAD					
			15 LT		HUMEDAD		ABSORCIÓN		CANTIDADES CORREGIDAS [KG]	
MATERIAL	KG/M <sup>3</sup>	LT/M <sup>3</sup>	KG	LT	%	[KG]	%	[KG]		
CEMENTO	445	148.3	6.68	2.23	-	-	-	-	6.68	
ARENA	1001.26	384.5	15.02	5.77	0.2	0.03	1.83	0.28	14.77	
GRAVA 1	0	0	0	0	0.13	0	0.91	0	0	
GRAVA 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
GRAVA 3	709.65	267.2	10.64	4.01	0.2	0.02	0.7	0.08	10.59	
HDPE	0	0	0	0					0	
VACIOS	0	5	0	0.08					SIN AD.	CON AD.
AGUA	195	195	2.93	2.93	-	0.05	-	0.35	3.22	3.17
ADITIVO 1	0.8	0.67	0.012	0.01						
ADITIVO 2	1.6	1.335	0.024	0.02						
ADITIVO 3	1.23	1.1125	0.019	0.017						
<b>TOTALES</b>	<b>2350.2</b>	<b>1000</b>	<b>35.26</b>	<b>15</b>		<b>0.1</b>		<b>0.7</b>	<b>35.26</b>	<b>35.26</b>

Tabla 14. Detalle de dosificación y ajustes para la mezcla testigo 5 y 6 [MT-5 y MT-6]

La Tabla 14 confirma que las mezclas testigo MT-5 y MT-6 mantienen el mismo diseño base optimizado de MT-4 (445 kg/m<sup>3</sup> de cemento, relación a/c de 0.44 y proporción 59% arena – 41% grava), pero introducen ligeros ajustes en la dosificación de aditivos para validar la repetibilidad del factor de trabajabilidad óptimo y el rango de extensibilidad alcanzado.

En particular, se conserva la ausencia de HDPE y solo se modifica la cantidad de superplastificante y modificador de viscosidad (AD-2 y AD-3), manteniendo constantes el volumen total de pasta y el contenido de agua efectiva, lo que permite evaluar la sensibilidad del concreto a pequeñas variaciones en la dosificación química sin alterar la estructura granulométrica. El hecho de que MT-5 y MT-6 reproduzcan extensibilidades cercanas a 70–77 cm con VSI = 0 respalda que el diseño base es robusto y sirve como referencia directa para las series con reemplazos de 5%, 10%, 20% y 30% de HDPE, donde ya se analiza el efecto del polímero sobre masa unitaria, estabilidad y desempeño reológico.

A partir del desempeño mostrado en las mezclas testigo, se hicieron los ajustes considerando los porcentajes de reemplazo propuestos, mismo que detallan la dosificación para estas mezclas, es decir los porcentajes de reemplazo de agregado por 5%, 10%, 20% y 30% de HDPE.

Las tablas de dosificación con reemplazos de HDPE del 5% al 30% (Tabla 15), muestran que el diseño mantiene constante la “base” de la mezcla (445 kg/m<sup>3</sup> de cemento, relación a/c de 0.44 y proporción 59% arena – 41% agregado grueso total), variando únicamente la fracción de grava 3/8" sustituida por HDPE.

#### **Evolución del contenido de HDPE y de la grava**

En MR5 el HDPE representa alrededor de 13 kg/m<sup>3</sup>, sustituyendo una pequeña parte de la grava 3/8", mientras que el resto del agregado grueso sigue siendo mineral. En MR10, MR20 y MR30 el contenido de

HDPE aumenta gradualmente hasta aproximadamente 26, 52 y 78 kg/m<sup>3</sup>, acompañándose de una reducción proporcional en la masa de grava 3/8" (de ≈675 a ≈497 kg/m<sup>3</sup>), lo que reduce la densidad global del esqueleto granular manteniendo el mismo volumen total de agregado grueso.

### Conservación de la pasta y de los aditivos

El volumen de agua, así como las dosis de superplastificante y modificador de viscosidad, se conservan prácticamente idénticos entre MR5, MR10, MR20 y MR30, lo que significa que la cantidad y calidad de pasta disponible para recubrir el agregado no cambian. Esto permite atribuir los cambios observados en masa unitaria fresca, extensibilidad y estabilidad visual principalmente al efecto del reemplazo progresivo por HDPE, aislando la variable “agregado plástico” sin introducir variaciones adicionales de a/c ni de aditivos en el análisis reológico y de desempeño mecánico

Tabla 15. Detalle de dosificación real para las mezclas con reemplazo de 5%, 10%, 20% y 30% de HDPE.

MEZCLA REEMPLAZO 5% [MR5]											
CARACTERÍSTICA DE LOS MATERIALES	HDPE	AD. 1	AD. 2	AD. 3	GRAVA 1	GRAVA 2	GRAVA 3	TOTAL GRAVA	ARENA	CEMENTO	AIRE ATRAPADO
% DE PARTICIPACION	5	1.5	3	2.5	0	0	100	41	59	-	0.5
DENSIDAD (KG/LT)	0.967	-			-	-	2.66	2.66	2.6	3	0
DISEÑO (SSS) PARA 1000 LITROS			CANTIDADES PARA: 15 LT		CORRECCIÓN POR HUMEDAD						
MATERIAL	KG/M <sup>3</sup>	LT/M <sup>3</sup>	KG	LT	HUMEDAD		ABSORCIÓN		CANTIDADES CORREGIDAS [KG]		
CEMENTO	445	148.33	6.68	2.23	-	-	-	-	6.68		
ARENA	1001.26	384.48	15.02	5.77	0.2	0.03	1.83	0.28	14.77		
GRAVA 1	0	0	0	0	0.13	0	0.91	0	0		
GRAVA 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
GRAVA 3	674.17	253.82	10.11	3.81	0.2	0.02	0.7	0.07	10.06		
HDPE	12.92	13.36	0.19	0.2					0.19		
VACIOS	0	5	0	0.08					SIN AD.	CON AD.	
AGUA	195	195	2.93	2.93	-	0.05	-	0.35	3.22	3.17	
ADITIVO 1	0.8	0.67	0.012	0.01							
ADITIVO 2	1.6	1.335	0.024	0.02							
ADITIVO 3	1.23	1.1125	0.019	0.017							
<b>TOTALES</b>	2328.34	1000	34.93	15		0.1		0.69	34.93	34.93	

MEZCLA REEMPLAZO 10% [MR10]											
CARACTERISTICA DE LOS MATERIALES	HDPE	AD. 1	AD. 2	AD. 3	GRAVA 1	GRAVA 2	GRAVA 3	TOTAL GRAVA	ARENA	CEMENTO	AIRE ATRAPADO
% DE PARTICIPACION	10	1.5	3	2.5	0	0	100	41	59	-	0.5
DENSIDAD (KG/LT)	0.967	-			-	-	2.66	2.66	2.6	3	0
DISEÑO (SSS) PARA 1000 LITROS			CANTIDADES PARA: 15 LT		CORRECCIÓN POR HUMEDAD						
MATERIAL	KG/M3	LT/M3	KG	LT	HUMEDAD		ABSORCIÓN		CANTIDADES CORREGIDAS [KG]		
CEMENTO	445	148.33	6.68	2.23	-	-	-	-	6.68		
ARENA	1001.26	384.48	15.02	5.77	0.2	0.03	1.83	0.28	14.77		
GRAVA 1	0	0	0	0	0.13	0	0.91	0	0		
GRAVA 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
GRAVA 3	638.69	240.47	9.58	3.61	0.2	0.02	0.7	0.07	9.53		
HDPE	25.84	26.72	0.39	0.4					0.39		
VACIOS	0	5	0	0.08					SIN AD.	CON AD.	
AGUA	195	195	2.93	2.93	-	0.05	-	0.34	3.22	3.16	
ADITIVO 1	0.8	0.67	0.012	0.01							
ADITIVO 2	1.6	1.335	0.024	0.02							
ADITIVO 3	1.23	1.1125	0.019	0.017							
TOTALES	2305.78	1000	34.59	15		0.1		0.69	34.59	34.59	
MEZCLA REEMPLAZO 20% [MR20]											
CARACTERISTICA DE LOS MATERIALES	HDPE	AD. 1	AD. 2	AD. 3	GRAVA 1	GRAVA 2	GRAVA 3	TOTAL GRAVA	ARENA	CEMENTO	AIRE ATRAPADO
% DE PARTICIPACION	20	1.5	3	2.5	0	0	100	41	59	-	0.5
DENSIDAD (KG/LT)	0.967	-			-	-	2.66	2.66	2.6	3	0
DISEÑO (SSS) PARA 1000 LITROS			CANTIDADES PARA: 15 LT		CORRECCIÓN POR HUMEDAD						
MATERIAL	KG/M3	LT/M3	KG	LT	HUMEDAD		ABSORCIÓN		CANTIDADES CORREGIDAS [KG]		
CEMENTO	445	148.33	6.68	2.23	-	-	-	-	6.68		

<b>ARENA</b>	1001.26	384.48	15.02	5.77	0.2	0.03	1.83	0.28	14.77		
<b>GRAVA 1</b>	0	0	0	0	0.13	0	0.91	0	0		
<b>GRAVA 2</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>GRAVA 3</b>	567.72	213.75	8.52	3.21	0.2	0.02	0.7	0.06	8.47		
<b>HDPE</b>	51.67	53.44	0.78	0.8					0.78		
<b>VACIOS</b>	0	5	0	0.08					SIN AD.	CON AD.	
<b>AGUA</b>	195	195	2.93	2.93	-	0.05	-	0.34	3.21	3.16	
<b>ADITIVO 1</b>	0.8	0.67	0.012	0.01							
<b>ADITIVO 2</b>	1.6	1.335	0.024	0.02							
<b>ADITIVO 3</b>	1.23	1.1125	0.019	0.017							
<b>TOTALES</b>	2260.65	1000	33.91	15		0.09		0.67	33.91	33.91	
<b>MEZCLA REEMPLAZO 30% [MR30]</b>											
<b>CARACTERISTICA DE LOS MATERIALES</b>	<b>HDPE</b>	<b>AD. 1</b>	<b>AD. 2</b>	<b>AD. 3</b>	<b>GRAVA 1</b>	<b>GRAVA 2</b>	<b>GRAVA 3</b>	<b>TOTAL GRAVA</b>	<b>ARENA</b>	<b>CEMENTO</b>	<b>AIRE ATRAPADO</b>
<b>% DE PARTICIPACION</b>	30	1.5	3	2.5	0	0	100	41	59	-	0.5
<b>DENSIDAD (KG/LT)</b>	0.967	-			-	-	2.66	2.66	2.6	3	0
<b>DISEÑO (SSS) PARA 1000 LITROS</b>			<b>CANTIDADES PARA: 15 LT</b>				<b>CORRECCIÓN POR HUMEDAD</b>				
<b>MATERIAL</b>	<b>KG/M3</b>	<b>LT/M3</b>	<b>KG</b>	<b>LT</b>	<b>HUMEDAD</b>		<b>ABSORCIÓN</b>		<b>CANTIDADES CORREGIDAS [KG]</b>		
					<b>%</b>	<b>[KG]</b>	<b>%</b>	<b>[KG]</b>			
<b>CEMENTO</b>	445	148.33	6.68	2.23	-	-	-	-	6.68		
<b>ARENA</b>	1001.26	384.48	15.02	5.77	0.2	0.03	1.83	0.28	14.77		
<b>GRAVA 1</b>	0	0	0	0	0.13	0	0.91	0	0		
<b>GRAVA 2</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>GRAVA 3</b>	496.76	187.03	7.45	2.81	0.2	0.01	0.7	0.05	7.41		
<b>HDPE</b>	77.51	80.16	1.16	1.2					1.16		
<b>VACIOS</b>	0	5	0	0.08					SIN AD.	CON AD.	
<b>AGUA</b>	195	195	2.93	2.93	-	0.05	-	0.33	3.21	3.15	
<b>ADITIVO 1</b>	0.8	0.67	0.012	0.01							
<b>ADITIVO 2</b>	1.6	1.335	0.024	0.02							
<b>ADITIVO 3</b>	1.23	1.1125	0.019	0.017							
<b>TOTALES</b>	2215.52	1000	33.23	15		0.09		0.66	33.23	33.23	



Ilustración 21. Dosificación de HDPE para un reemplazo del 30% y Materiales naturales y reemplazo del 30% en revolvedora

Tras un apartado de diseño de mezclas, a continuación, se muestran los resultados en estado fresco y endurecido para las diferentes mezclas. Posteriormente, se discute que significan estos resultados y cual es la influencia de los porcentajes de reemplazo en las diferentes pruebas.

### Desempeño en estado fresco de las mezclas de concreto elaboradas.

Las mezclas fueron monitoreadas durante una hora para la prueba de extensibilidad que se presenta en la Tabla 16. **Comportamiento de extensibilidad:** La extensibilidad inicial varía aproximadamente entre 50 y 70 cm, y después de 1 hora aumenta ligeramente en la mayoría de las mezclas, lo que indica una mezcla que mantiene o incluso mejora su fluidez con el tiempo sin perder estabilidad. Las mezclas con mayor reemplazo (series MR5, MR10, MR20 y MR30) se mantienen en el rango de extensibilidades típicas de un concreto autocompactable, sin caídas bruscas ni bloqueos aparentes. **Estabilidad visual (VSI):** Las mezclas MT-1, MT-2 y MT-3 presentan valores de VSI entre 1 y 3, mostrando desde ligero sangrado hasta clara evidencia de segregación y apilamiento de agregado, por lo que no cumplen con la condición de alta estabilidad. En contraste, todas las mezclas optimizadas (MT-4 en adelante) obtienen VSI = 0, lo que confirma que el diseño con HDPE y ajustes de dosificación permite lograr concretos autocompactables con buena relación entre fluidez y resistencia a la segregación.

Tabla 16. Resultados de prueba de extensibilidad

MEZCLA	EXTENSIBILIDAD (CM)		INDICE DE ESTABILIDAD VISUAL (VSI)			
	T=0	T = 1HR	0	1	2	3

MT-1	53	40		X		X
MT-2	55	43		X		X
MT-3	56	43		X		X
MT-4	70	77	X			
MT-5	61	69	X			
MT-6	60	67	X			
MR5-1	50	57	X			
MR5-2	60	66	X			
MR5-3	62	69	X			
MR10-1	66	72	X			
MR10-2	64	70	X			
MR10-3	60	69	X			
MR20-1	57	67	X			
MR20-2	63	72	X			
MR20-3	62	70	X			
MR30-1	58	66	X			
MR30-2	62	70	X			
MR30-3	63	71	X			



Ilustración 22. Extensibilidad de MR30.

Las mezclas testigo MT-1 a 3 no tuvieron un desempeño satisfactorio, pero permitieron poder hacer ajustes para las mezclas subsecuentes, incluyendo las de los porcentajes de reemplazo, en este sentido, no aparecen en las filas de los resultados de las pruebas, porque presentaron segregación y no tenía caso hacer pruebas en esta fresco y endurecido si no cumplían con lo básico que es la cohesión del concreto.

La Tabla 17 y 18 muestran resultados para las mezclas relacionados con masa volumétrica y en la Tabla 18 rendimiento del concreto por reemplazo.

Tabla 17. Resultados de determinación de la masa unitaria del concreto fresco

MEZCLA	% REEMPLAZO	PESO CONCRETO + RECIPIENTE	TARA RECIPIENTE	FACTOR DEL RECIPIENTE (1/M3)	MASA UNITARIA (KG/M3)	MASA UNITARIA PROPEDIO POR REEMPLAZO (KG/M3)
MT-4	0	20.05	3.54	141.89	2342.6039	2344.97
MT-5		20.09	3.54	141.89	2348.2795	
MT-6		20.06	3.54	141.89	2344.0228	
MR5-1	5	19.89	3.54	141.89	2319.9015	2319.9
MR5-2		19.92	3.54	141.89	2324.1582	
MR5-3		19.86	3.54	141.89	2315.6448	
MR10-1	10	19.74	3.54	141.89	2298.618	2299.09
MR10-2		19.77	3.54	141.89	2302.8747	
MR10-3		19.72	3.54	141.89	2295.7802	
MR20-1	20	19.49	3.54	141.89	2263.1455	2257
MR20-2		19.43	3.54	141.89	2254.6321	
MR20-3		19.42	3.54	141.89	2253.2132	
MR30-1	30	18.93	3.54	141.89	2183.6871	2194.09
MR30-2		19.06	3.54	141.89	2202.1328	
MR30-3		19.02	3.54	141.89	2196.4572	

Se observa una disminución de la masa unitaria. Para el 0% de reemplazo, la masa unitaria promedio se ubica en aproximadamente 2345 kg/m<sup>3</sup>. Con 5%, 10% y 20% de reemplazo los valores promedios bajan de forma gradual hasta alrededor de 2257 kg/m<sup>3</sup>, y con 30% se alcanza el valor mínimo cercano a 2194 kg/m<sup>3</sup>. Tendencia general observada. La variación entre réplicas de una misma dosificación es pequeña, lo que sugiere buena repetibilidad en el procedimiento de medición de masa unitaria. En conjunto, los datos muestran una relación inversa clara entre el contenido de HDPE y la masa unitaria del concreto fresco, alineada con el menor peso específico del material plástico frente al agregado mineral convencional

En relación al rendimiento, cambios en masa unitaria para el 0% de reemplazo (mezclas MT-4, MT-5 y MT-6) la masa unitaria promedio se sitúa alrededor de 2345 kg/m<sup>3</sup>. Conforme se incrementa el reemplazo a 5%, 10%, 20% y 30%, las masas unitarias promedio bajan progresivamente hasta valores cercanos a 2194 kg/m<sup>3</sup> en el 30% de HDPE, evidenciando el efecto de un material más ligero en la mezcla. Comportamiento del rendimiento real. El rendimiento real parte de unos 1002.5 L/m<sup>3</sup> en la mezcla sin reemplazo y se mantiene muy cercano a 1000 L/m<sup>3</sup> para los niveles intermedios, con variaciones menores. En el 30% de reemplazo se observa un ligero incremento del rendimiento hasta aproximadamente 1010 L/m<sup>3</sup>, lo que sugiere un uso algo más eficiente del volumen de concreto colocado por unidad de masa producida.

MEZCLA	% REEMPLAZO	PESO CONCRETO + RECIPIENTE	TARA RECIPIENTE	FACTOR DEL RECIPIENTE (1/M3)	MASA UNITARIA (KG/M3)	PESO VOLUMETRICO TEORICO (KG/M3)	MASA UNITARIA PROMEDIO POR REEMPLAZO (KG/M3)	RENDIMIENTO REAL (LITROS/M3)
MT-4	0	20.05	3.54	141.89	2342.6039	2350.91	2344.97	1002.53
MT-5		20.09	3.54	141.89	2348.2795			
MT-6		20.06	3.54	141.89	2344.0228			
MR5-1	5	19.89	3.54	141.89	2319.9015	2328.34	2319.9	1003.64
MR5-2		19.92	3.54	141.89	2324.1582			
MR5-3		19.86	3.54	141.89	2315.6448			
MR10-1	10	19.74	3.54	141.89	2298.618	2305.78	2299.09	1002.91
MR10-2		19.77	3.54	141.89	2302.8747			
MR10-3		19.72	3.54	141.89	2295.7802			
MR20-1	20	19.49	3.54	141.89	2263.1455	2260.65	2257	1001.62
MR20-2		19.43	3.54	141.89	2254.6321			
MR20-3		19.42	3.54	141.89	2253.2132			
MR30-1	30	18.93	3.54	141.89	2183.6871	2215.52	2194.09	1009.77
MR30-2		19.06	3.54	141.89	2202.1328			
MR30-3		19.02	3.54	141.89	2196.4572			

Tabla 17. Análisis de rendimientos por mezcla y sus reemplazos



Ilustración 23 Peso del concreto y del recipiente. MT-4 y Peso del concreto y del recipiente de la MR30-1

Según las limitaciones de esta investigación, ¿Es posible asumir que el comportamiento de la fluidez se atribuya a la etapa 1 de la hidratación del cemento? En donde: La magnitud de este pico es atribuida a la concentración de defectos en la superficie de las partículas sólidas del sistema, separación de unidades iónicas a partir de dicha superficie, neutralización de las cargas eléctricas superficiales, solubilización del silicato, disolución de los álcalis e hidratación del sulfato de calcio hemi-hidratado (Dávila, Formación tardía de etringita en fibrocemento, 2016.)

Autor	Porcentaje optimo	Kg usados por m <sup>3</sup> en 5%	Volumen (litros) de plástico usado por m <sup>3</sup>	Tipo de concreto
Soriano Ruelas 2022	5	2.21	2.36	MR
Calcina Paredes 2019	5	12	12.83	Convencional
Esta investigación	5	12.92	13.89	Autocompactable
Esta investigación	30	77.51	82.89	Autocompactable

Tabla 18. Tabla comparativa de HDPE utilizado por otros autores.

Es fundamental controlar la fluidez final del concreto autocompactable cuando incorpora plástico (por ejemplo, HDPE) porque la densidad mucho menor del plástico respecto a la pasta y a los agregados minerales incrementa su tendencia a flotar y provocar segregación en estado fresco. Si la mezcla queda “demasiado fluida” (slump flow elevado con baja viscosidad plástica), la matriz no desarrolla suficiente estabilidad estática ni cohesión para mantener inmersas y uniformemente distribuidas las partículas plásticas, dando lugar a acumulaciones superficiales, nidos de agregado y variaciones locales de relación pasta/agregado que afectan resistencia y durabilidad. En contraste, una fluidez final cuidadosamente ajustada (mediante la relación agua-polvo, el volumen de pasta, el contenido de superplastificante y, en su caso, modificadores de viscosidad) permite aprovechar la alta capacidad de flujo del concreto autocompactable sin perder resistencia a la segregación, de modo que el plástico permanezca confinado dentro del esqueleto granular y se obtenga una estructura homogénea en términos de densidad, propiedades mecánicas y desempeño a largo plazo.

La variabilidad en los Módulos de Finura (MF) de la arena tiene implicaciones directas sobre la trabajabilidad, la demanda de agua y la resistencia del concreto, por lo que debe ser vigilada y controlada en la práctica. Arenas más gruesas (MF alto) tienden a requerir mayor contenido de agua o aditivo para alcanzar la misma fluidez, mientras que arenas más finas (MF bajo) incrementan la superficie específica, modifican la viscosidad de la pasta y pueden favorecer retracciones y fisuración si no se reajusta el diseño de mezcla. Diversos estudios y normas apuntan a que existe una “ventana óptima” de MF (típicamente 2.3–3.1, con desempeño favorable alrededor de 2.5–3.0) y recomiendan que el MF de la arena utilizada en producción no se desvíe más de 0.2 respecto al valor de diseño, ajustando la proporción fino/grueso y, si es necesario, la dosificación de agua y superplastificante cuando se detecten cambios significativos en la granulometría

## Desempeño en estado endurecido de las mezclas de concreto elaboradas

Para cada mezcla se elaboró un par de cilindros para desmoldarse a las 24 horas y medir su resistencia. Al tratarse de mezclas de concreto de alto desempeño, es posible alcanzar el 100% de la resistencia esperada a los 28 días en 24 horas, la Ilustración 24 es un ejemplo de especímenes cilíndricos probados. La Tabla 19 presenta los resultados para cada mezcla, en tanto que la Ilustración 25 presenta un gráfico de cómo se comporta la resistencia en función de cada porcentaje de reemplazo de HDPE en el concreto.



*Ilustración 24. Pares de cilindros de 15x30cm de distintos reemplazos para medir resistencia a la compresión. Izquierda: Cilindro de MR30 después del ensaye a compresión, Derecha: 2 Cilindro de MT-4 después del ensaye de compresión.*

MEZCLA	%REEMPLAZO	CILINDRO 1	CILINDRO 2	PROMEDIO	PROMEDIO POR REEMPLAZO	% DE REDUCCION POR REEMPLAZO
MT-1	0	-	-	-	-	-
MT-2	0	-	-	-		
MT-3	0	-	-	-		
MT-4	0	220	222	221	221.2	0
MT-5		219	221	220		
MT-6		226	219	222.5		
MR5-1	5	244	236	240	226.3	-2.3
MR5-2		218	223	220.5		
MR5-3		220	217	218.5		
MR10-1	10	210	213	211.5	211.8	4.2
MR10-2		215	212	213.5		
MR10-3		208	213	210.5		
MR20-1	20	175	179	177	175.7	20.6
MR20-2		172	177	174.5		
MR20-3		170	181	175.5		
MR30-1	30	133	122	127.5	128.8	41.7
MR30-2		126	136	131		
MR30-3		132	124	128		

Tabla 19. Resultados en resistencia a la compresión de las mezclas generadas.

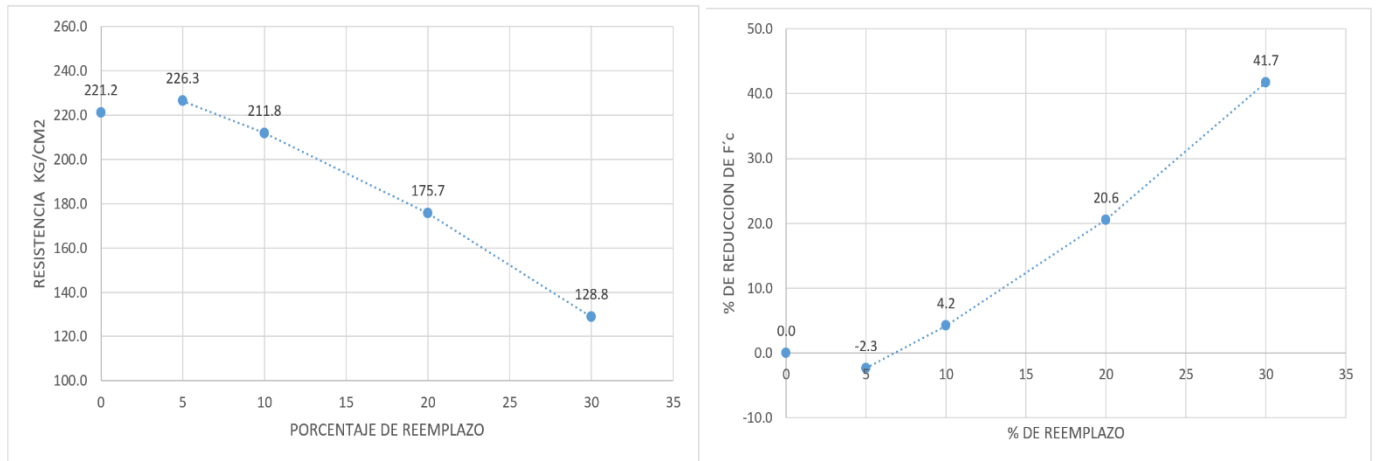
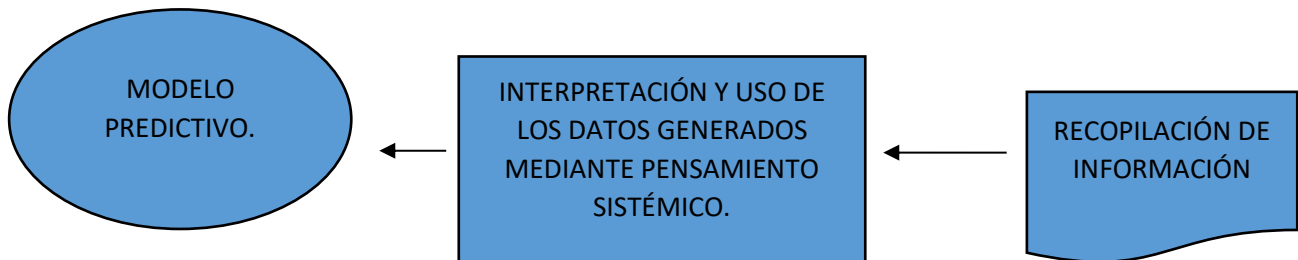


Ilustración 25. Resistencia a la compresión del concreto en función del % de reemplazo de HDPE y disminución de resistencia



Los datos expuestos en la página anterior muestran que la resistencia a compresión a 24 horas disminuye de forma clara que conforme aumenta el porcentaje de reemplazo de agregado grueso por HDPE, pasando de valores del orden de 221–226 kg/cm<sup>2</sup> para el 0–5% de reemplazo a aproximadamente 129 kg/cm<sup>2</sup> para el 30%.

### **Tendencia resistencia–porcentaje de reemplazo**

La mezcla de referencia sin HDPE (MT-4 a MT-6) presenta una resistencia promedio cercana a 221 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que el reemplazo del 5% incluso genera un ligero incremento hasta unos 226 kg/cm<sup>2</sup>, lo que sugiere un posible efecto de refinamiento de la microestructura o variación experimental dentro del rango de dispersión. A partir del 10% de reemplazo la resistencia se reduce de manera más marcada, alcanzando alrededor de 212 kg/cm<sup>2</sup> (≈4% de reducción), para descender después a unos 176 kg/cm<sup>2</sup> con 20% de HDPE (≈21% de reducción) y finalmente a 129 kg/cm<sup>2</sup> con 30% (≈42% de reducción respecto al concreto sin reemplazo).

### **Implicaciones para el diseño**

El comportamiento indica que niveles bajos de HDPE (hasta 5%) son compatibles con el desarrollo temprano de resistencia del concreto autocompactable, mientras que porcentajes iguales o superiores al 20% comprometen significativamente la capacidad portante inicial. Esto refuerza la conveniencia de limitar el reemplazo por HDPE a niveles moderados si se busca mantener resistencias tempranas comparables a las del concreto de referencia, o bien considerar estrategias complementarias (mayor contenido de cemento, adiciones minerales activas, curados más intensivos) cuando se requieran porcentajes de sustitución más elevados.

Los resultados expuestos en el análisis anterior demuestran la existencia de relaciones cuantificables y reproducibles entre el porcentaje de reemplazo de agregado grueso por HDPE y la resistencia a compresión del concreto autocompactable. Esta vinculación directa entre variables de entrada (composición de materiales) y de salida (propiedades mecánicas) constituye la base fundamental para la construcción de un modelo predictivo.

Al identificar patrones consistentes en el comportamiento de la resistencia—tales como la reducción progresiva de 4% a 42% conforme el reemplazo aumenta de 10% a 30%—se generan puntos de datos suficientemente caracterizados para entrenamiento de ecuaciones de comportamiento o correlaciones matemáticas. Este análisis sistemático de las relaciones materiales-desempeño, producto del estudio empírico con pruebas de laboratorio, permite validar y calibrar un modelo predictivo que pueda estimar con confiabilidad el desempeño de mezclas de concreto de alto desempeño con adiciones recicladas, cumpliendo así con el objetivo central de la investigación de generar una herramienta de predicción aplicable al diseño optimizado de mezclas.

A continuación, se reflexiona de manera sistémica de los resultados obtenidos, buscando encontrar hallazgos entre diferentes propiedades de agregados y concreto hidráulico. Basándose en los criterios de clasificación del ACI 302, es posible generar gráficos que delimiten zonas de desempeño en función de los siguientes parámetros:

- Factor de grosor de reemplazo de HDPE (relación entre el diámetro nominal del HDPE incorporado y la resistencia resultante)
- Índice de estabilidad visual (VSI - Visual Stability Index) del concreto autocompactable durante la autocompactación
- Factor de trabajabilidad en el tiempo (FT) que refleja la viscosidad y fluidez a diferentes edades
- Capacidad de llenado y paso (Fill capacity y Pass ability) según estándares japoneses de autocompactabilidad

Mediante la ilustración 26 es posible identificar como tendencias clave que a medida que el HDPE aumenta, la resistencia a compresión disminuye de forma no lineal. Además, el grosor también influye negativamente: valores más altos de grosor tienden a coincidir con menor resistencia, finalmente es posible identificar que la zona de mayor resistencia se concentra en bajos porcentajes de HDPE y grosor reducido.

% Reemplazo HDPE vs Factor Grosor vs Resistencia a Compresión

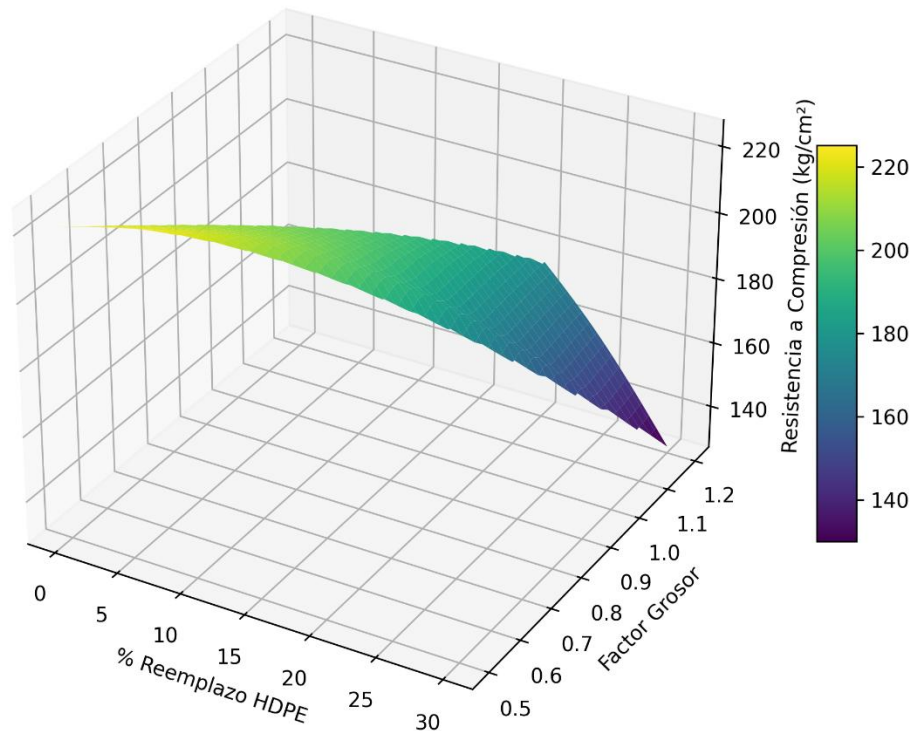


Ilustración 26. Relación entre % de reemplazo de HDPE, factor de grosor y resistencia a la compresión.

Derivado de lo anterior, se identifican cuatro zonas de desempeño a partir los porcentajes de reemplazo de plástico HDPE en las mezclas de concreto:

- 1) Zona de transición inicial (0-5% de reemplazo): El rango exhibe una variabilidad experimental significativa, con valores oscilantes entre -2.3% y +4.2% de reducción. Este comportamiento sugiere que a porcentajes muy bajos de HDPE, el material aún contribuye marginalmente a la matriz cementicia sin penalización notable, o incluso puede ejercer un leve efecto de refinamiento en la microestructura. Los resultados en este rango están dentro del error experimental típico de pruebas de compresión (+/-3-5%), lo que justifica considerar esta zona como óptima para aplicaciones donde se requiera máximo desempeño.
- 2) Zona de penalización progresiva (10-20% de reemplazo): En este rango se aprecia un aumento acelerado de la reducción de resistencia, con valores entre 4.2% a 20.6%. La pendiente de la curva se incrementa significativamente, reflejando que el reemplazo de agregados convencionales por partículas de HDPE comienza a impactar de forma sustancial la capacidad portante. A 10% de reemplazo, la reducción es aún moderada (~4%), pero a 20% alcanza aproximadamente el 20.6%. Este comportamiento es coherente con la mecánica del concreto: mayor proporción de HDPE implica mayor cantidad de partículas de bajo módulo de elasticidad en la matriz, reduciendo el soporte físico de cargas concentradas.
- 3) Zona de severa penalización (25-30% de reemplazo): La curva exhibe su mayor pendiente en este segmento, con una reducción que alcanza 41.7% a 30% de reemplazo. Este comportamiento indica un comportamiento cuasi-lineal en este rango, donde cada punto porcentual adicional de HDPE implica una pérdida de resistencia aproximadamente constante (alrededor de 1.2% de reducción adicional por cada 1% de HDPE añadido).
- 4) Zona de desempeño restringido (>25% HDPE): Baja resistencia (<70% referencia). Solo para aplicaciones decorativas, no estructurales.

La ilustración 27 permite ver cómo la autocompactabilidad se mantiene o se reduce con el incremento de HDPE. Es especialmente útil para aplicaciones con geometrías complejas como elementos prefabricados. Puede orientar a ingenieros en la selección apropiada del porcentaje de reemplazo de HDPE, equilibrando los objetivos de sostenibilidad ambiental (mayor reemplazo = más residuos valorizados) con los requisitos de desempeño estructural.

Se observa que ambas líneas del gráfico disminuyen conforme aumenta el porcentaje de HDPE. Se observa que hasta un 10–15% la autocompactabilidad se mantiene en niveles “Muy Buena” o “Buena”, pero a partir de 20% empieza a caer rápidamente hacia “Aceptable” y luego “Limitada/Pobre”.

- 0–10% HDPE: Excelente desempeño, con valores cercanos al 100%.
- 15–20% HDPE: Zona de transición, aún útil, pero con reducción notable.
- 25–30% HDPE: El material pierde gran parte de su capacidad de llenado y paso, lo que limita su uso.

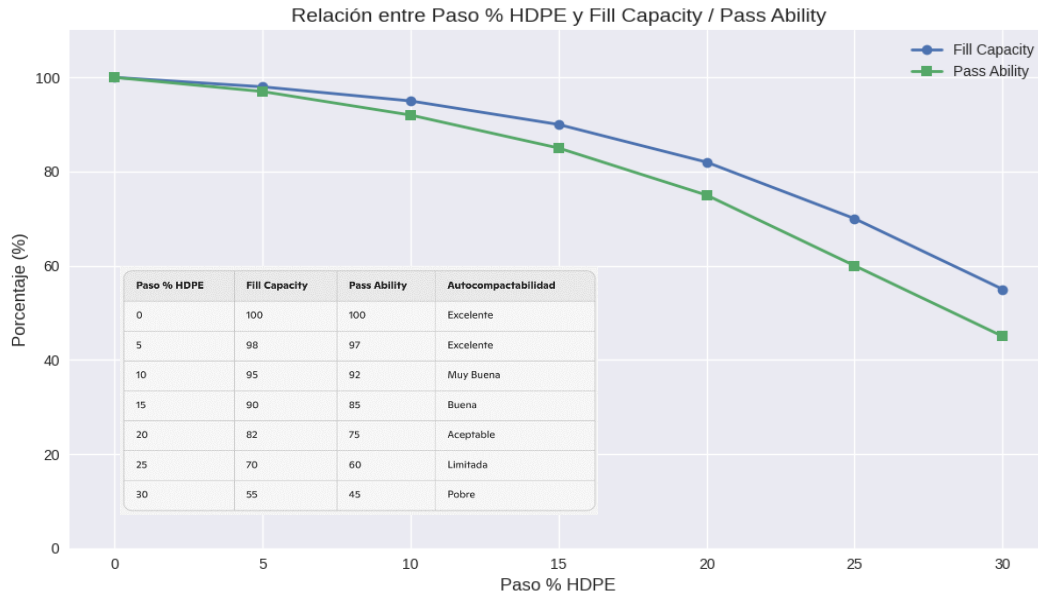


Ilustración 27. relación entre Paso % HDPE y las variables Fill Capacity y Pass Ability.

Por otro lado, utilizando la siguiente tabla se generó un mapa de calor (ver Ilustración 28) donde se relaciona *trabajabilidad – grosor agregado*. Se puede identificar que EXCELENTE solo aparece en la combinación de Trabajabilidad 0.8 y Grosor 0.5. Conforme aumenta el grosor, la clasificación baja rápidamente hacia Aceptable → Limitado → Restringido. Por otro lado, a partir de la Trabajabilidad 0.4, prácticamente todas las combinaciones están en niveles bajos (Limitado o Restringido).

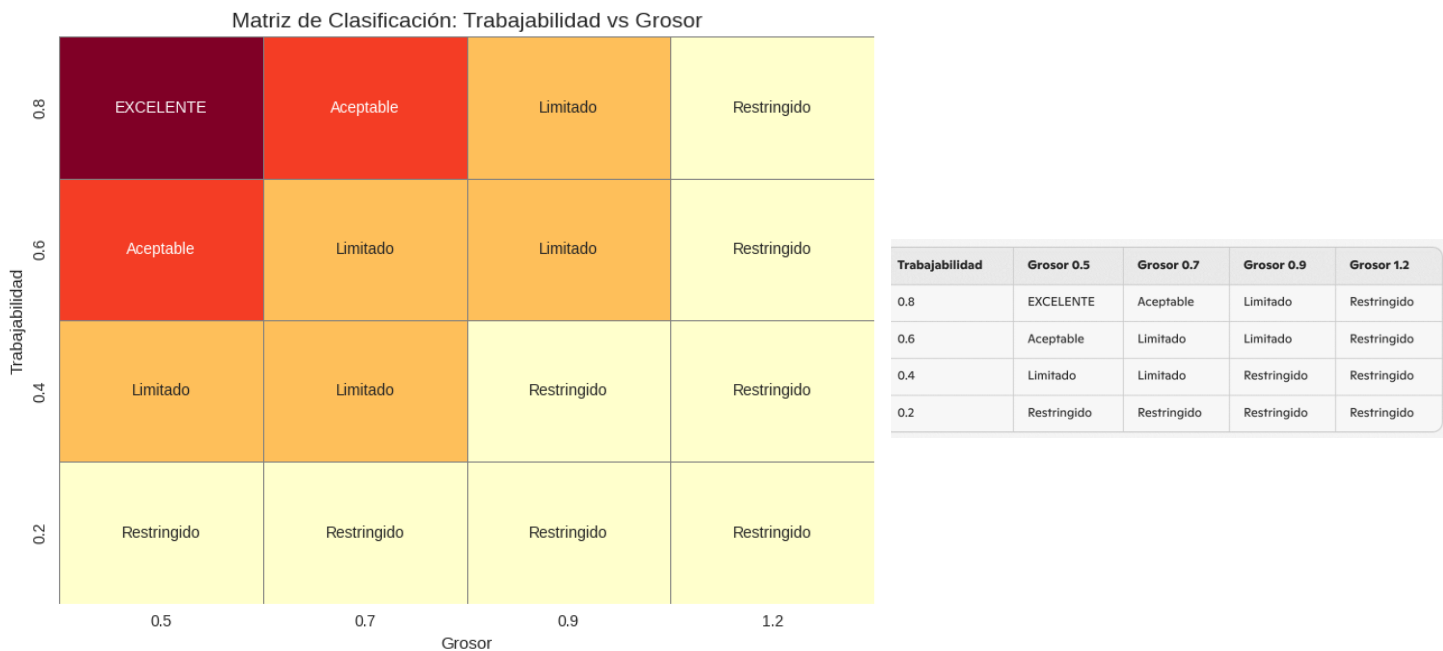


Ilustración 28. relación entre Paso % HDPE y las variables Fill Capacity y Pass Ability.

Se requiere trabajar a detalle el mapeo de zonas de desempeño vs. parámetros de autocompactabilidad. La integración de los parámetros de autocompactabilidad con las zonas de resistencia permite crear herramientas de diseño predictivo. Un ejemplo sería relacionar en un solo gráfico o tabla programada las variables de *Superficie de respuesta (3D): % Reemplazo HDPE vs. VSI vs. Resistencia a compresión*. Este gráfico mostraría cómo la reducción de resistencia escala con el aumento del porcentaje de HDPE, correlacionándolo con la estabilidad visual. Las zonas se colorearían según las categorías propuestas (excelente, aceptable, limitado, restringido). Esto permite aproximarse a la generación de un modelo predictivo, que aunque el de resistencia a la compresión es el más atractivo y útil para diseñadores estructurales, cualquier que permita conocer anticipadamente el desempeño del concreto tanto en estado fresco como endurecido es pertinente, más aún cuando se trata de diseño de mezclas con materiales reciclados o con ingredientes como materiales cementicios suplementarios que pueden optimizar el uso del cemento para disminuir el número de emisiones a la atmósfera de CO<sub>2</sub>.

No obstante, es fundamental reconocer las limitaciones inherentes a este estudio que deben considerarse en la interpretación de los resultados. El experimento fue realizado bajo condiciones controladas de laboratorio con mezclas específicas de concreto autocompactable, lo que implica que el comportamiento de estas composiciones en condiciones de campo puede diferir significativamente. Las variables ambientales tales como temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad de fraguado y las condiciones de curado en obra—particularmente relevantes en climas desérticos como los de Baja California—no fueron completamente simuladas. Asimismo, la durabilidad a largo plazo de estos concretos con adiciones de HDPE, especialmente respecto a procesos de degradación química, atacabilidad por sulfatos y resistencia a ciclos de congelación-descongelación, requiere investigación adicional con estudios de envejecimiento acelerado y exposición prolongada.

Desde la perspectiva de las implicaciones técnico-mecánicas, los resultados de este estudio revelan que la incorporación de residuos de HDPE en concreto autocompactable genera un trade-off determinante entre la capacidad de compactación automática (ventaja inherente de este tipo de concretos) y la resistencia a compresión temprana. Si bien el HDPE mejora potencialmente la fluidez y autocompactabilidad debido a su bajo peso específico y superficie relativamente suave, su contribución al soporte estructural es mínima respecto a los agregados convencionales que reemplaza. La reducción progresiva del 4% al 42% observada entre 10% y 30% de sustitución implica que el material actúa predominantemente como un 'relleno' más que como un elemento resistente. Para aplicaciones donde la resistencia temprana es crítica—como en elementos prefabricados, módulos de corredera o estructuras con desencofrado acelerado—los resultados sugieren limitar el reemplazo a porcentajes inferiores al 5-10%, o bien adoptar estrategias de compensación estructural tales como aumento del contenido de cemento, incorporación de adiciones puzolánicas, o curados con vapor controlado que aceleren la hidratación y desarrollo de fase gel-C-S-H. La caracterización microestructural de estos concretos, mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y porosimetría de intrusión de mercurio, sería fundamental para entender los mecanismos físicos subyacentes a esta pérdida de resistencia.

Desde la perspectiva ambiental, este trabajo cobra relevancia significativa en el contexto de la gestión de residuos plásticos y la economía circular. Los residuos de HDPE constituyen una fracción importante de los residuos sólidos urbanos e industriales en México, donde la recolección selectiva y valoración de plásticos post-consumo aún presenta deficiencias significativas. La incorporación de estos residuos en concreto autocompactable representa una ruta de valoración que extiende la vida útil del residuo dentro de la cadena de construcción, evitando su disposición en rellenos sanitarios donde persistiría décadas. No obstante, los resultados demuestran que para lograr una sustitución de agregado grueso significativa (20-

30%), debe aceptarse una penalización de resistencia temprana que puede no resultar económica en todas las aplicaciones. El verdadero potencial ambiental de esta estrategia radica en implementarla selectivamente en aplicaciones no críticas estructuralmente tales como elementos decorativos, paneles de partición, elementos de cierre, o sistemas de revestimiento exterior, donde la resistencia a compresión de 129-150 kg/cm<sup>2</sup> aun es funcional. Desde una perspectiva de huella de carbono, aunque la sustitución de agregados reduce la extracción de recursos naturales y el transporte de agregados convencionales, deben cuantificarse adecuadamente los costos energéticos del procesamiento del HDPE (molido, clasificación, lavado) contra los beneficios de revaloración. Futuras investigaciones deben integrar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) completo que compare las emisiones asociadas, incluyendo la etapa de fin de vida del concreto modificado, para determinar la verdadera ventaja ambiental neta de estas formulaciones.

#### 4. Conclusiones.

Los resultados de esta investigación demuestran que es posible diseñar mezclas de concreto autocompactable (CAC) incorporando polietileno de alta densidad (HDPE) como componente estructural, logrando un balance favorable entre propiedades en estado fresco y endurecido. El estudio empírico realizado permitió desarrollar una ecuación polinomial predictiva que vincula las proporciones de HDPE con la resistencia a compresión del concreto, lo que facilita la optimización de diseños de mezcla sin necesidad de pruebas exhaustivas.

Desde la perspectiva técnica, se confirmó que la incorporación de HDPE mejora significativamente la autocompactabilidad del concreto, siendo especialmente valioso en estructuras que requieren autofluencia alta. Sin embargo, existe un trade-off inherente entre esta propiedad y la resistencia a compresión temporal, lo que exige aplicar estrategias de compensación en elementos donde ambas propiedades son críticas. La aplicación de aditivos puzolánicos y sistemas de curado controlado se perfilan como alternativas viables para mitigar esta limitación.

Desde la óptica de sostenibilidad ambiental, este trabajo representa una oportunidad significativa para la economía circular en México. La revalorización de residuos de HDPE no solo reduce la presión sobre vertederos, sino que abre nuevas aplicaciones en la industria de la construcción. Las investigaciones futuras deben incluir análisis completo de Ciclo de Vida (ACV) para cuantificar los beneficios ambientales reales, considerando todas las etapas desde la producción hasta la disposición final del concreto modificado, asegurando que esta innovación derive en una ventaja ambiental neta comprobada.

## 5. Bibliografía.

- ACI Committee. (2002). Building code requirements for structural concrete(ACI 318-02) and commentary (ACI 318R-02). American Concrete Institute.
- Agrela F, Alaejos P, De Juan M (2013) Properties of concrete with recycled aggregates. En Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste. Woodhead. Sawston, RU. Pp. 304-329. <http://dx.doi.org/10.1533/9780857096906.2.304>.
- American Concrete Institute. (2019). *Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318-19)*. ACI.
- Ángeles, G., Martín-Sedeño, M. C., León-Reina, L., Cuberos, A. J., Álvarez-Pinazo, G., Aranda, M. A., ... & Gateshki, M. (2011). Hidratación de cementos de sulfoaluminato de calcio. Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN• Nº, 942, 11.
- Behera M, Bhat tacharyya S, Minocha A, Deoliya R, Maiti S (2014) Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. Constr. Build. Mats. 68: 501-516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>.
- CFE C0000-15
- Davila, F. J. (2016). Formación tardía de etringita en fibrocemento (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- De Brito, J., Kurda, R., & Raposeiro da Silva, P. (2018). Can we truly predict the compressive strength of concrete without knowing the properties of aggregates?. Applied Sciences, 8(7), 1095.
- Fragoso Doria, J. A., & Visbal Jacome, J. E. (2021). El uso de la puzolana de origen natural en concreto hidráulico.
- Giraldo, M. A., & Tobón, J. I. (2006). Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. Dyna, 73(148), 69-81.
- Gutiérrez Moreno, J. M., Mungaray Moctezuma, A., & Hallack-Alegría, M. (2015). Reuse of hydraulic concrete waste as a new material in construction procedures: A sustainable alternative in Northwest Mexico. Revista de La ptimizingn, 14(2), 51–57. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2015000200007>
- Gutiérrez-Moreno, M., Sánchez-Atondo, A., Mungaray-Moctezuma, A., Salazar- Briones, C. (2020). Prospectiva de sustentabilidad para los recursos hídricos en el noroeste de México: Uso del concreto reciclado para el abastecimiento de agua con fines agrícolas. Interciencia, 45(8), 370–377. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33964324008>.
- Hernández C., O, & Mendoza E., C. J. (2006). Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico. Ingeniería, Investigación y Tecnología, 7(1), 57-70. <https://www.springer.com/gp/book/9781447145394>.
- Jackson, M. C. (2003). Systems thinking: Creative holism for managers. Wiley.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Publications.
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S., & Dutta, S. C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. Construction and building materials, 131, 721-740.
- Kosmatka, S. H. (2004). *Design and control of concrete mixtures* (13th ed.). Portland Cement Association.

- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (1992). Diseño y control de mezclas de concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- LeBlanc, R. (2017). How long does it take garbage to decompose? The Balance.
- Lopez, N., Collado, E., Diacos, L. A., & Morente, H. D. (2019). Evaluation of Pervious Concrete Utilizing Recycled HDPE as Partial Replacement of Coarse Aggregate with Acrylic as Additive. In MATEC Web of Conferences (Vol. 258, p. 01018). EDP Sciences.
- Martínez-Lage, I., Vázquez-Burgo, P., & Velay-Lizancos, M. (2020). Sustainability evaluation of concretes with mixed recycled aggregate based on holistic approach: Technical, economic and environmental analysis. *Waste Management*, 104, 9-19.
- Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2020). Plastic debris in the marine environment: History and future challenges. *Global Challenges*, 4(6), 1900081.
- Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017 Industria de la Construcción – Cementantes Hidráulicos – Especificaciones y Métodos de Ensayo.
- Ojha, A., & Gupta, L. (2020). Comparative study on mechanical properties of conventional and geo-polymer concrete with recycled coarse aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1403-1406.
- Pešić, N., Živanović, S., Garcia, R., & Papastergiou, P. (2016). Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres. *Construction and building materials*, 115, 362-370.
- Senge, P. M. (2006). *The fifth discipline: The art & practice of the learning organization* (Rev. ed.). Doubleday.
- Shi, X., Mukhopadhyay, A., Zollinger, D., & Grasley, Z. (2019). Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. *Journal of cleaner production*, 225, 414-425.
- Silva, A. L. P., Prata, J. C., Walker, T. R., Campos, D., Duarte, A. C., Soares, A. M., & Rocha-Santos, T. (2020). Rethinking and optimizing plastic waste management under COVID-19 pandemic: Policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment. *Science of the Total Environment*, 742, 140565.
- Soriano Ruelas, M.E. y Gutiérrez-Moreno, J.M. (2021). Diferencias en el desempeño del concreto sustentable a partir de la incorporación de agregados reciclados. *Revista Aristas: Investigación básica y aplicada*, 8(16). Indizado en: Latindex. ISSN: 2007-9478.
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill.

## Anexos.

- **ÍNDICE DE TABLAS**
- **ÍNDICE DE ILUSTRACIONES**
- **INFORME DE CALIDAD CEMENTO.**
- **REPORTES DE LABORATORIO ADICIONALES**