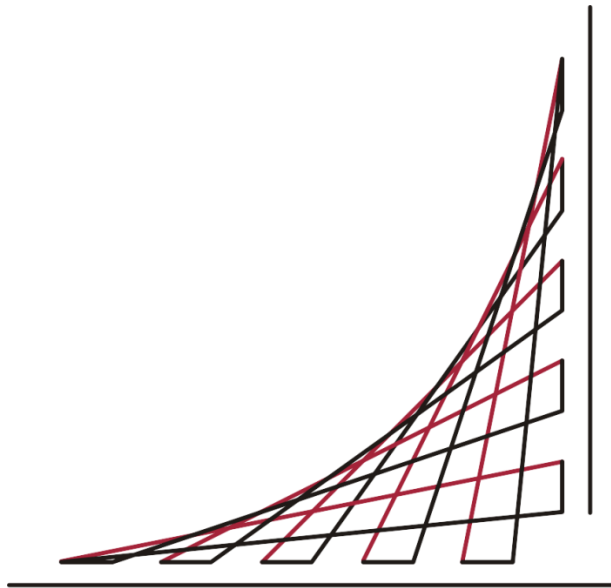


**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO
CON DESECHOS DE ICOPOR**



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO**

FRANCISCO JAVIER ZULUAGA MOLINA
INGENIERO CIVIL

TRABAJO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
ESPECIALISTA DE ESTRUCTURAS

PEDRO NEL QUIROGA
DIRECTOR

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERÍA
BOGOTÁ
2013

A Dios, por su guía y sabiduría
a mis padres, por su amor y apoyo
a mis hermanos, por su ejemplo y fraternidad
a mis amigos, por su constante amistad
a Claudia, por sus consejos e incondicionalidad

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

Los operarios del Laboratorio de Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, que con su experiencia, bondad y servicio hicieron posible el desarrollo satisfactorio de cada uno de los ensayos realizados.

El ingeniero Pedro Nel Quiroga, por su guía y confianza conmigo para desarrollar este trabajo de grado. Así mismo, a la ingeniera Nancy Torres, directora del Laboratorio de Estructuras de la Escuela, por sus correcciones, aprendizajes y aportes.

CONTENIDO

<u>1. INTRODUCCIÓN</u>	<u>8</u>
<u>2. OBJETIVOS</u>	<u>8</u>
<u>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</u>	<u>8</u>
<u>3. NORMAS Y ESTÁNDARES DE REFERENCIA</u>	<u>9</u>
<u>4. SISTEMA DE UNIDADES</u>	<u>9</u>
<u>5. ALCANCE</u>	<u>10</u>
<u>6. MARCO TEÓRICO</u>	<u>10</u>
<u>7. DISEÑO DE MEZCLA</u>	<u>13</u>
7.1 METODOLOGÍA Y DESARROLLO	13
7.2 MEZCLA DE PRUEBA	21
<u>8. DESARROLLO DE ENSAYOS</u>	<u>23</u>
8.1 OBTENCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y PROCESADO DEL ICOPOR DE DESECHO UTILIZADO	23
8.2 ELABORACIÓN DE PROBETAS Y VIGUETAS	25
<u>9. RESULTADOS ENSAYOS</u>	<u>28</u>
9.2 ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO	30
9.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	30
9.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD	40
9.2.3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	45
9.2.4 PERMEABILIDAD AL ION CLORURO	50
<u>10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	<u>56</u>
<u>11. REFERENCIAS</u>	<u>59</u>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Normatividad aplicable para cada ensayo de laboratorio	9
Tabla 2. Unidades utilizadas en el documento.....	10
Tabla 3. Recomendación asentamiento	14
Tabla 4. Recomendación tamaño máximo agregado	15
Tabla 5. Recomendación cantidad de agua de mezcla	16
Tabla 6. Recomendación relación Agua/Cemento.....	16
Tabla 7. Propiedades físicas de los agregados del Laboratorio de Estructuras	17
Tabla 8. Granulometría de los agregados del Laboratorio de Estructuras.....	18
Tabla 9. Humedad de los agregados	19
Tabla 10. Cálculos diseño de mezcla	20
Tabla 11. Cantidad de materiales mezcla de diseño	20
Tabla 12. Diseño mezcla de prueba – cantidad materiales.....	21
Tabla 13. Resultados ensayo compresión simple mezcla de prueba a los 3 días de vaciado	23
Tabla 14. Cantidades de materiales para elaboración de probetas.....	26
Tabla 15. Cantidades de materiales para elaboración de viguetas.....	26
Tabla 16. Determinación de humedad de los agregados en el día de la mezcla.....	26
Tabla 17. Valores de asentamiento para las distintas mezclas elaboradas.....	29
Tabla 18. Valores de masa unitaria para cada mezcla	29
Tabla 19. Factores de corrección para relaciones altura/diámetro menores a 1.75	31
Tabla 20. Resistencia a la compresión obtenida en laboratorio a los 7 días	32
Tabla 21. Resistencia a la compresión obtenida en laboratorio a los 14 días.....	34
Tabla 22. Resistencia a la compresión obtenida en laboratorio a los 28 días.....	37
Tabla 23. Cálculo módulo de elasticidad para las 3 muestras	43
Tabla 24. Factores que afectan el módulo de elasticidad de un concreto.....	44
Tabla 25. Cálculo rata de incremento para la carga aplicar durante ensayo de flexión del concreto.....	46
Tabla 26. Cálculo módulo de rotura, ensayo de flexión del concreto	49
Tabla 27. Resumen resultados ensayo de permeabilidad al ion cloruro	56
Tabla 28. Volumen de mezcla ensayos en estado fresco.....	62
Tabla 29. Volumen de mezcla ensayos en estado endurecido.....	62
Tabla 30. Cálculo diámetros, alturas y áreas para determinar módulo de elasticidad	63
Tabla 31. Cálculo deformaciones unitarias y esfuerzos promedios, módulo de elasticidad – probeta 0%	64
Tabla 32. Cálculo deformaciones unitarias y esfuerzos promedios, módulo de elasticidad – probeta 10%.....	65
Tabla 33. Cálculo deformaciones unitarias y esfuerzos promedios, módulo de elasticidad – probeta 20%.....	66

GLORASIO

ASENTAMIENTO: medida de la consistencia del concreto, que se refiere al grado de fluidez de la mezcla, indicando qué tan seco o fluido está¹.

COMPRESIÓN: esfuerzo que se induce a un cuerpo sólido deformable, reflejado en la reducción de su volumen y a un acortamiento del mismo en la dirección de la aplicación del esfuerzo.

GRANULOMETRÍA: medición y clasificación que se realiza de los granos que componen un material.

ICOPOR o EPS: material plástico espumado, derivado del poliestireno, obtenido a partir de compuestos de poliestireno en forma de “perlas” que contienen un agente expansor.

MASA UNITARIA: masa por unidad de volumen.

MÓDULO DE ELASTICIDAD: constante que establece la proporcionalidad entre esfuerzos y deformaciones unitarias².

MÓDULO DE ROTURA: resistencia máxima determinada en un ensayo de flexión, siendo ésta el esfuerzo máximo en la fibra inferior cuando se produce la falla³.

PERMEABILIDAD: capacidad que tiene un material de permitir flujo a través de él.

RECICLAJE: proceso que permite obtener, a partir de materiales ya utilizados o desechos, nuevos productos.

¹ ARGOS

² Jairo Uribe Escamilla

³ INSTRON

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de grado es evaluar el comportamiento del concreto elaborado con desechos de icopor. Se realizaron 3 mezclas de concreto con diferentes proporciones de reemplazo de agregado fino por icopor de desecho molido (0%, 10% y 20%) y con cada una se elaboraron cilindros y viguetas para realizar los siguientes ensayos de laboratorio: i) asentamiento, ii) masa unitaria en estado fresco, iii) resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días, iv) módulo de elasticidad a los 28 días, v) módulo de rotura a los 28 días y vi) penetración al ion cloruro a los 28 días. El diseño de mezcla correspondió a un concreto de resistencia a la compresión de 210 kg/cm², con una relación agua/cemento de 0.50. El icopor utilizado en esta investigación fue recuperado de almacenes y fruterías, siendo la mayoría empaques de alimentos y electrodomésticos. Utilizando un molino de carne se trituró el icopor, desmembrándolo en pedazos de diámetro promedio de 1 cm. Al momento de elaborar las mezclas con porcentaje de reemplazo con icopor se encontró el inconveniente de la volatilidad de éste cuando hay corrientes de aire; el autor recomienda pre-mezclar los materiales tradicionales de la mezcla (arena, grava y cemento) con parte del agua de mezcla, luego introducir el icopor y finalmente adicionar el agua faltante, siempre teniendo cuidado de no levantar el icopor. Las mezclas fabricadas en estado fresco evidenciaron buena manejabilidad, ni muy húmeda ni muy seca, asentamientos entre 7 y 9 cm, sin presentar segregación de materiales, aún con el reemplazo de 20% de agregado fino. Las masas unitarias, al aumentar el porcentaje de reemplazo disminuyeron; no obstante, no variaron significativamente entre sí. Las resistencias a la compresión y los módulos de elasticidad registradas para las 3 mezclas se encontraron en valores muy cercanos entre sí, concluyendo que para concretos elaborados incluso con 20% de reemplazo con icopor, presentan similar resistencia a la compresión y valor de módulo de elasticidad. En cuanto al módulo de rotura y de acuerdo a los resultados encontrados, con una diferencia aproximada del 2%, se concluye que concretos elaborados incluso con un reemplazo con icopor del 10%, la resistencia a la flexión es similar; para reemplazos del 20%, la diferencia se considera significativa. Finalmente y gracias al ensayo de penetración al ion cloruro, se concluye que a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo, así mismo aumenta la permeabilidad del concreto obtenido, evidenciándose en el nivel de oxidación registrado en las muestras al final del ensayo y la carga eléctrica acumulada que pasó por cada una; no obstante, las 3 muestras presentaron una calificación de permeabilidad alta al ion cloruro, influenciado en gran medida por la resistencia de diseño y relación agua/cemento utilizadas en esta investigación. Se concluye entonces, que el concreto elaborado con desechos de icopor como reemplazante de un porcentaje del agregado fino, tiene potencial para ser utilizado como material de construcción para elementos estructurales.

1. INTRODUCCIÓN

El reciclaje de materiales es una idea atractiva desde cualquier punto de vista. Por el lado ambiental, no solo permite dar nuevo uso a esos “desechos” que en un principio ya habrían brindado la función por la cual fueron manufacturados, sino también disminuir el volumen de vertidos en los rellenos sanitarios urbanos y sub-urbanos. Económicamente, abarata la elaboración de nuevos productos y la industria tendería a disminuir el abastecimiento de materias primas introduciendo estos “desechos” como parte de su producción. Por la parte social, se mejoraría la calidad de vida de las personas debido indirectamente al beneficio ambiental y económico descrito; menores vertimientos mejor calidad de aire, por ejemplo y menores costos de producción, mayor poder de adquisición. Es así, como cualquier proyecto que parta de la idea del reciclado es un beneficio de por sí y poder llegar a materializarla, la convertiría en algo que vale la pena estudiar.

El presente documento recopila el trabajo realizado para el proyecto de grado del autor para optar al título de Especialista de Estructuras, el cual consistió en evaluar el comportamiento del concreto elaborado con desechos de icopor.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento del concreto elaborado con desechos de icopor en diferentes proporciones y mediante ensayos de laboratorio, que permitan determinar su potencial uso como material estructural o arquitectónico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar bibliografía sobre trabajos de investigación relacionados con el uso de icopor reciclado como agregado para la elaboración de concreto.
- Definir el método de reciclado del icopor (obtención, procesado y mezcla).
- Desarrollar ensayos de laboratorio, para distintas proporciones de icopor reciclado, que permitan determinar: resistencia a la compresión de probetas estándar, módulo de elasticidad, penetración con cloruros y módulo de rotura.
- Elaborar un documento técnico que recopile el trabajo de investigación y presente los principales resultados obtenidos a través de su desarrollo.
- Redactar y publicar en la revista de la Escuela un artículo científico relacionado con el trabajo de grado.

3. NORMAS Y ESTÁNDARES DE REFERENCIA

La normatividad aplicable a cada ensayo de laboratorio se presenta a continuación:

ESTADO FRESCO		
	INV E-401-07	Toma de muestras de concreto fresco
Asentamiento	INV E-404-07	Asentamiento del concreto (slump)
Masa unitaria	INV E-405-07	Masa unitaria del concreto
ESTADO ENDURECIDO		
	INV E-402-07	Elaboración y curado en el laboratorio de muestras de concreto para ensayos de compresión y flexión
Resistencia a la compresión	INV E-410-07	Resistencia a la compresión de cilindros de concreto
Módulo elástico	NTC 4025	Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión
Resistencia a la flexión	INV E-414-07	Resistencia a la flexión del concreto - método de la viga simple cargada en los tercios de la luz
Penetración con cloruros	ASTM C1202-05	Ensayo rápido de permeabilidad del cloruro

Nota: "INV" norma del Instituto Nacional de Vías de Colombia, "NTC" Norma Técnica Colombiana – ICONTEC y "ASTM" American Section of the International Association for Testing Materials de Estados Unidos

Tabla 1. Normatividad aplicable para cada ensayo de laboratorio

Así mismo, se toma como estándar el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, elaborado por la Comisión Asesora Permanente para el régimen de construcciones sismo resistencias (Ley 400 de 1997) y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, vigente al momento de elaborar este documento.

4. SISTEMA DE UNIDADES

En este documento se utilizarán las siguientes unidades de medición:

ÍTEM	UNIDAD(ES)	SÍMBOLO
Longitud	Centímetro	cm
	Milímetro	mm
	Pulgada	plg
Área	Centímetro cuadrado	cm ²
	Milímetro cuadrado	mm ²
Fuerza	Kilogramo	kg
	Newton	N
	Kilo Newton	kN

ÍTEM	UNIDAD(ES)	SÍMBOLO
Masa	Kilogramo	kg
Esfuerzo	Mega Pascal Kilo Pascal	MPa kPa
Temperatura	Grado centígrado	°C
Voltaje	Voltio	V
Corriente	Amperio Micro Amperio	A mA
Carga eléctrica	Culombio	C

Tabla 2. Unidades utilizadas en el documento

5. ALCANCE

El presente proyecto de grado busca encontrar solo resultados preliminares, dado el corto tiempo que se cuenta para su desarrollo. Se elaboraron 18 probetas y 6 viguetas para desarrollar los siguientes ensayos: i) estado fresco (asentamiento y masa unitaria) y ii) estado endurecido (resistencia a la compresión, módulo elástico, penetración con cloruros y resistencia a la flexión). Se realizarán reemplazos de arena por icopor de desecho.

En paralelo con los estudios científicos y matemáticos, se hace necesario complementarlos con análisis de carácter humano, dado que cualquier producto y/o desarrollo nuevo que se introduzca en la sociedad tendrá un impacto en la comunidad. Como lo menciona Carlos Bedoya, en su tesis de Magíster en Hábitat “... *no basta con sacar al medio un excelente material ecológico en el buen sentido de este término, sino que, además, hay que comprender que las comunidades para las cuales los profesionales diseñan estos materiales poseen organizaciones sociales y preceptos culturales que inciden en la forma de ver las cosas.*” (Bedoya, 2003). Este análisis se deja para una segunda investigación, dado que el alcance del presente proyecto no lo incluye; sin embargo, a continuación se enumeran algunos ítems que como mínimo el autor cree que deben ser abarcados:

- La resistencia al cambio de hábitos por parte de constructores y usuarios finales.
- La inclinación de las autoridades municipales por mantener las políticas actuales para la disposición de desechos y extracción de materiales para la construcción.
- La idea que el concreto con adición de “desechos” crea una estigmatización social.
- La no existencia de una crisis de agotamiento de material de canteras.

6. MARCO TEÓRICO

El poliestireno expandido (EPS) es un material plástico espumado, derivado del poliestireno, obtenido a partir de compuestos de poliestireno en forma de “perlas” que contienen un agente

expansor, generalmente el pentano; esta mezcla se calienta plastificándose y, conservado en moldes, tomen la forma de este último⁴. En nuestro país se le conoce con el nombre de “icopor”, dado el nombre de su fabricante, Industria Colombiana de Porosos; así mismo se le conoce con la sigla EPS y por el número 6 como código para su proceso de selección. El EPS es utilizado en la construcción como protección térmica de elementos, aislante acústico, en soluciones modulares, elementos de encofrado y aligeramiento, llenado de espacios huecos, como bloques y placas para fundación de calzadas, aislamiento de espacios congelados, en naves para almacenes y depósitos, entre otros. Así mismo, se utiliza como material de embalaje, en el revestimiento interior del techo de automóviles, placas para decoración y elementos de conformación⁵.

Entre sus bondades se pueden nombrar⁶:

- Higiene. No constituye sustrato nutritivo para microorganismos (inerte, no tóxico y estable).
- Bajo peso unitario (ligero, disminuyendo costos de manipulación y transporte).
- Resistente a la humedad.
- Capacidad de absorción de los impactos.
- Estable mecánicamente a corto y largo plazo. El EPS tiene un rango de resistencia a la compresión entre 3.5 y 4.5 MPa⁷
- Poco inflamable (después de los 450 °C, el EPS produce llama)
- Buen aislante térmico (su uso, por ejemplo en edificaciones, puede hacer reducir la energía utilizada para climatización interior hasta en un 40%, colaborando con la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero).
- Contiene un alto poder calorífico (aproximadamente 18.700 BTU⁸/kg) y no contiene gases del grupo de los clorofluorocarbonos (no contribuye a la formación de gas metano), lo que permite incinerarlo de manera segura en plantas de recuperación de energía.
- Es reutilizable en su totalidad.

Así mismo, las desventajas que rodean al EPS son:

- Para obtenerlo se usan recursos naturales no renovables (derivados del petróleo).
- No es biodegradable (un vaso de “icopor” en un relleno sanitario toma miles de años en degradarse⁹).
- La incineración sin control genera graves problemas de contaminación y salud.

⁴ es.wikipedia.org/wiki/Poliestireno_expandido

⁵ www.icoformas.com

⁶ es.wikipedia.org/wiki/Poliestireno_expandido.

⁷ Para EPS de densidad de 20 kg/m³

⁸ BTU: British Thermal Unit. 1 BTU = 252 calorías = 1.055,056 J

⁹ www.soyecolombiano.com

En Colombia y de acuerdo con Acoplásticos, se registra un consumo aproximado de 84.000 toneladas por año de plástico, del cual únicamente se recicla el 24%, según Enka de Colombia. De los residuos generados por la población Colombiana, cerca del 14% son plásticos. En Bogotá, cerca de 16.500 toneladas de plástico por mes son destinados al relleno sanitario Doña Juana¹⁰.

El reciclado de EPS se realiza desde hace muchos años. El principal método para hacerlo consiste en desintegrar mecánicamente el material para posteriormente mezclarlo con material nuevo y poder obtener algún producto nuevo, generalmente bloques de EPS. Otra tecnología utilizada es la densificación mecánica, la cual aplica energía mecánica y térmica para convertir el EPS en partículas compactas. El plástico mezclado con comida, por ejemplo los empaques de bebidas o comidas (como cajas de pescado), se suele reunir y destinar a una planta de recuperación energética. No obstante, en Colombia el reciclaje de icopor a nivel residencial es incipiente; en Bogotá, se ha venido impulsando el reciclaje de distintos materiales desde los hogares pero dentro de estos no se ha incluido al icopor.

El manejo adecuado de los desechos de EPS debe contemplar: i) reciclaje, referido con el re- uso de productos de plástico desechados, ii) reutilización (trituración y mezcla para elaboración de nuevos productos) y iii) recuperación energética. Así mismo, optimizar el diseño de envases y empaques permitiría disminuir el volumen de EPS que sale al mercado. En Colombia, la Fundación Verde Natura dispone de un método operativo y de tecnología de punta, aprobada por la Comunidad Económica Europea, para el procesamiento y reciclaje de icopor. Las etapas de este reciclaje son: recibo y acopio del material desechado, clasificación y embolsado, molienda y trituración, transformación mecánica y térmica, empaque y comercialización del nuevo producto. Entre sus programas se cuenta el “Programa Reciclaje Constructoras y Contratistas”, el cual se enfoca en capturar y manejar los residuos de poliestireno producto de la construcción, tales como casetones, paneles y láminas¹¹.

En la construcción, como se mencionó anteriormente, el EPS tiene diversas aplicaciones tanto en las edificaciones y construcciones verticales como en obras lineales, mediante el mejoramiento de suelos con adición de EPS triturado. De esta forma, se han podido obtener construcciones de menores presupuestos, buenas calidades y con cualidades innovadoras, como ofrecer aislamiento térmico y acústico al igual que cargas muertas menores. Sin embargo, el autor no conoce trabajos relacionados con la elaboración de concretos con adición de EPS triturado en reemplazo de parte del agregado pétreo.

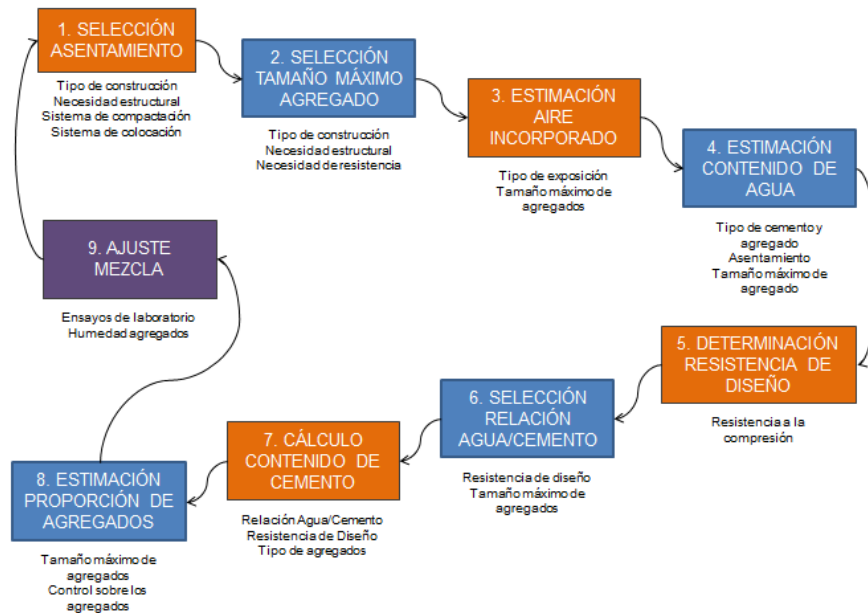
¹⁰ www.cempre.org.co

¹¹ Fundación Verde Natura

7. DISEÑO DE MEZCLA

7.1 Metodología y desarrollo

El diseño de la mezcla se realizó teniendo en cuenta el siguiente diagrama de flujo:



Esquema 1. Diagrama de flujo diseño de mezcla

Fuente: adaptado de trabajo del ingeniero Germán Andrés Rey, PROPISOS

A continuación se presenta cada uno de estos pasos, en base a las recomendaciones realizadas por el ingeniero Germán Andrés Rey de la empresa PROPISOS, en su exposición sobre diseño de mezclas de concreto, las cuales se tuvieron en cuenta para el diseño de la mezcla del presente estudio:

a. Asentamiento: para definir este parámetro, se deben tener en cuenta algunas consideraciones previas, como son: i) el tamaño de la sección que se va a construir, ii) la cantidad y espaciamiento del acero de refuerzo, iii) las condiciones de colocación del concreto (sistemas de vaciado, bandas transportadoras, tremie, entre otras) y iv) el sistema de compactación. La siguiente tabla recomienda valores de asentamiento en función de la consistencia a obtener, el tipo de construcción, así como el sistema de colocación y de compactación.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR

RECOMENDACIÓN				
CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO mm	TIPO DE CONSTRUCCIÓN	SISTEMA DE COLOCACIÓN	SISTEMA DE COMPACTACIÓN
Muy seca	< 20	Prefabricados de alta resistencia Revestimiento de pantallas de cimentación	Vibradores de formaleta Concreto lanzado	Secciones sujetas a vibración extrema
Seca	20 - 35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi - seca	35 - 50	Pavimentos Fundaciones en concreto simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	50 - 100	Pavimentos compactados a mano Losas Muros Vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	100 - 150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	> 150	Elementos muy esbeltos Pilotes fundidos in - situ	Tubo embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración

Tabla 3. Recomendación asentamiento

Fuente: adaptado del trabajo del ingeniero Germán Andrés Rey, PROPISOS

Dado que se desea ensayar el concreto con desecho de icopor en primera instancia como material para conformar elementos estructurales (losas, muros y vigas), utilizando un sistema de colocación manual, se toma como asentamiento un valor que produzca una mezcla de consistencia media. La tabla recomienda un rango entre 50 mm y 100 mm; sin embargo, se toma como asentamiento para este diseño un rango menor, entre 50 mm y 60 mm.

b. Tamaño máximo de agregados: en relación con este parámetro, se tienen las siguientes consideraciones: i) si se aumenta el tamaño de agregados, los contenidos de agua y cemento disminuyen, ii) el tamaño máximo del agregado deberá ser lo más económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura y iii) las características geométricas y condiciones de refuerzo de la estructura son las que limitan el tamaño máximo del agregado. El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 presenta las siguientes recomendaciones sobre el tamaño máximo de agregados: i) la quinta parte de la separación entre los lados de la cimbra, ii) las tres cuartas partes del espacio libre mínimo entre varillas de acero o entre el acero y la formaleta y iii) la tercera parte del espesor, en el caso de las losas. Generalmente y en nuestro ambiente, el tamaño máximo del agregado oscila entre 3/8”

y 3". La siguiente tabla presenta la recomendación del tamaño máximo del agregado en función del tipo de estructura a construir y sus dimensiones.

TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADOS				
DIMENSIÓN MÍNIMA cm	TAMAÑO MÁXIMO plg			
	Muros reforzados Vigas Columnas	Muros sin refuerzo	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o con poco refuerzo
6 - 15	1/2 - 3/4	3/4	3/4 - 1	3/4 - 1 1/2
19 - 29	3/4 - 1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2 - 3
30 - 74	1 1/2 - 3	3	1 1/2 - 3	3
> 75	1 1/2 - 3	6	1 1/2 - 3	3 - 6

Tabla 4. Recomendación tamaño máximo agregado

Fuente: adaptado del trabajo del ingeniero Germán Andrés Rey, PROPISOS

Por la misma razón expuesta para la selección del asentamiento y conociendo el tamaño de las muestras a elaborar, se toma como tamaño máximo de agregado $\frac{3}{4}$ ".

c. Contenido de aire: el contenido de aire en la mezcla es función del tamaño máximo de agregados y el nivel de exposición durante la elaboración del concreto (atrapado naturalmente, exposición ligera, moderada y severa). Como recomendación, si no se desea incorporar aire intencionalmente, no se debe tener en cuenta este contenido dentro del diseño de la mezcla.

d. Agua de mezclado: el agua hidrata las partículas de cemento y produce la fluidez necesaria en la mezcla de concreto. La cantidad de agua depende del requerimiento para la mezcla, del cemento y de los agregados.

CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLA (EN kg/m ³ G/M ³ DE CONCRETO)							
ASENTAMIENTO mm	TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADOS plg						
	3/8	1/2	3/4	1	1 1/2	2	3
0	223	201	186	171	158	141	132
25	231	208	194	178	164	147	138
50	236	214	199	183	170	151	144
75	241	218	203	188	175	156	148
100	244	221	207	192	179	159	151
125	247	225	210	196	183	162	159
150	251	230	214	200	187	166	163
175	256	235	218	205	192	173	169

CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLA (EN kg/m ³ G/M ³ DE CONCRETO)							
ASENTAMIENTO mm	TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADOS plg						
	3/8	1/2	3/4	1	1 1/2	2	3
200	260	240	224	210	197	179	174

Tabla 5. Recomendación cantidad de agua de mezcla
Fuente: adaptado del trabajo del ingeniero Germán Andrés Rey, PROPISOS

e. Resistencia de diseño: se utilizará una resistencia de diseño de 210 kg/cm².

f. Relación Agua/Cemento: la resistencia del concreto depende del cemento, los agregados y la interface de adherencia cemento - agregado. Diferentes agregados y cementos, ofrecen resistencias distintas en función de la relación agua/cemento

RELACIÓN AGUA/CEMENTO (EN PESO)			
RESISTENCIA ESPECIFICADA f _c kg/cm ²	LÍMITE SUPERIOR	LÍNEA MEDIA	LÍMITE INFERIOR
140		0.65	0.58
175		0.59	0.52
210	0.65	0.54	0.49
245	0.61	0.50	0.46
280	0.55	0.44	0.41
315	0.51	0.41	0.39
350	0.46	0.37	0.36

Tabla 6. Recomendación relación Agua/Cemento
Fuente: adaptado del trabajo del ingeniero Germán Andrés Rey, PROPISOS

Para el diseño de esta mezcla se utilizará una relación Agua/Cemento igual a 0.50, concordante con la resistencia de diseño (zona sombreada de la tabla).

g. Contenido de cemento: el contenido de cemento se calcula con la siguiente expresión:

$$C = \frac{A}{A/C}$$

Nota: "A" contenido de agua de mezclado y "A/C" relación agua/cemento

Ecuación 1. Contenido de cemento, mezcla de diseño

Fuente: elaboración propia del autor en base a cálculos para diseño de mezcla

Se utilizó cemento ARGOS para la elaboración de todas las mezclas.

h. Proporción de agregados: la proporción es basada en el tamaño máximo y la gradación de los agregados. Existen diferentes categorías de agregados en función del control que se tiene sobre ellos: i) agregados controlados (su calidad está garantizada en todos los aspectos), ii) agregados conocidos pero no controlados (proviene de una zona de explotación donde generalmente se extraen) y iii) agregados nuevos (se desconocen propiedades y características. La segunda categoría es la más frecuente en nuestro medio.

Con las siguientes expresiones se determina el volumen absoluto y peso de agregados:

$$V_r = 1000 - (V_c + V_A + Aire)$$

Nota: "V_c" volumen absoluto de cemento, "V_A" volumen absoluto de agua y "AIRE" volumen absoluto de aire

Ecuación 2. Volumen absoluto de agregados

Fuente: elaboración propia del autor en base a cálculos para diseño de mezcla

$$P_r = V_r G_a$$

Nota: "G_a" peso específico aparente de agregados

Ecuación 3. Peso seco de agregados

Fuente: elaboración propia del autor en base a cálculos para diseño de mezcla

Las mezclas se elaboraron utilizando los agregados facilitados por el Laboratorio de Estructuras, los cuales, al momento de realizarlas, presentaban las siguientes características:

AGREGADO	DENSIDAD SECA kg/m ³	DENSIDAD APARENTE kg/m ³	ABSORCIÓN %
Arena	2558	2528	1.2
Grava	2442	2334	4.6

Tabla 7. Propiedades físicas de los agregados del Laboratorio de Estructuras

Fuente: Laboratorio de Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingenieros Julio Garavito

TAMIZ	ARENA	GRAVA
	PORCENTAJE QUE PASA %	
3/4"	100	100
1/2"	99	96
3/8"	98	74
1/4"	96	37
No. 4	94	17
No. 8	82	11
No. 10	80	10
No. 16	74	9
No. 30	48	9

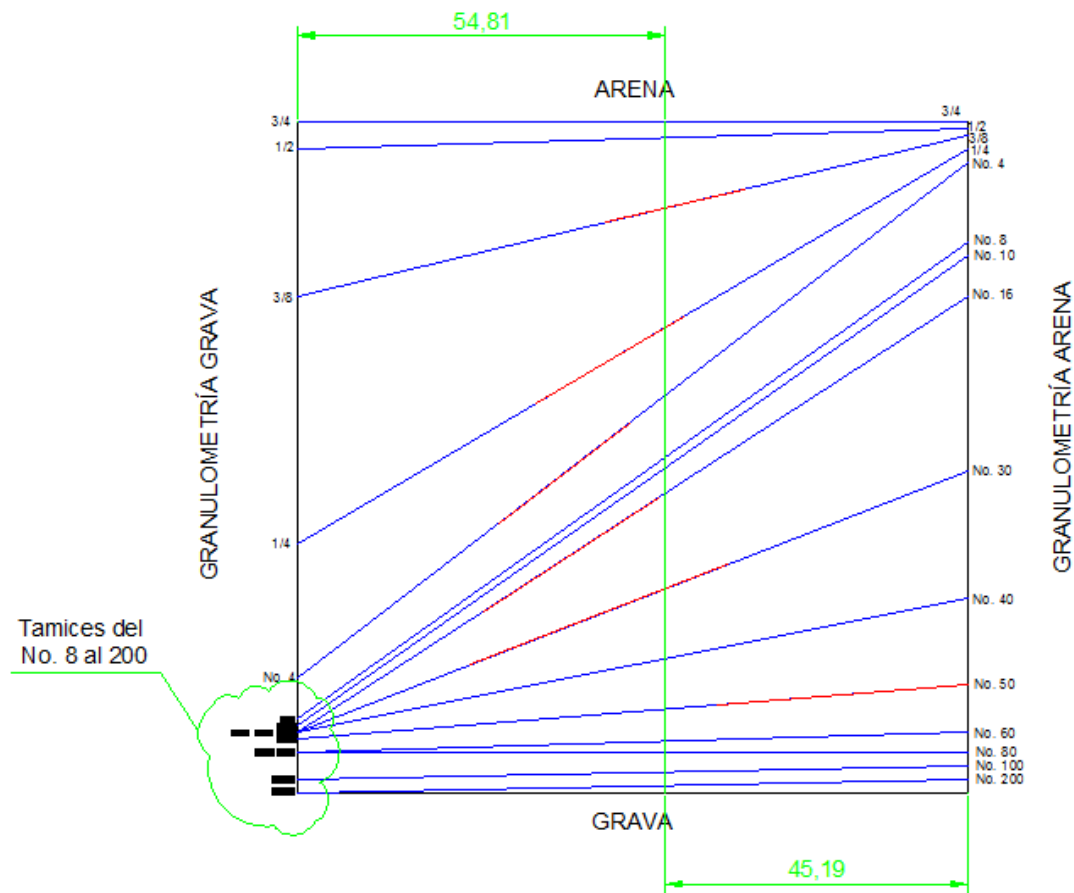
TAMIZ	ARENA	GRAVA
	PORCENTAJE QUE PASA %	
No. 40	29	9
No. 50	16	8
No. 60	9	6
No. 80	6	6
No. 100	4	2
No. 200	2	0

Tabla 8. Granulometría de los agregados del Laboratorio de Estructuras
Fuente: Laboratorio de Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingenieros Julio Garavito

Dado que la granulometría de los agregados no cumple con las especificaciones estándares para la elaboración de mezclas de concreto (cada tamiz exige un porcentaje de material que pasa), es necesario realizar una optimización de las mismas, para determinar la proporción adecuada de cada agregado dentro de la mezcla. Para esto se utilizó el método gráfico, resumido a continuación:

- a. Dibujar una cuadrícula. Dividir ambos ejes 10 espacios iguales. Numerar cada división de diez en diez hasta cien.
- b. El eje horizontal inferior numerarlo de derecha a izquierda (acá se leerá el porcentaje óptimo de arena).
- c. El eje horizontal superior numerarlo de izquierda a derecha (acá se leerá el porcentaje óptimo de grava).
- d. Los ejes verticales numerarlos de abajo hacia arriba. En el eje izquierdo se anotará la granulometría de la grava mientras que en el derecho la de la arena.
- e. Anotar las granulometrías de cada agregado como se indicó en el literal "d".
- f. Unir con líneas los valores del porcentaje que pasa para cada agregado por tamiz.
- g. Sobre cada línea del literal "f" acotar los porcentajes estándar de arena y grava, de acuerdo a las especificaciones.
- h. Trazar una vertical que divida las líneas trazadas en dos iguales.
- i. Leer el porcentaje óptimo de arena y grava.

A continuación se presenta la gráfica elaborada para los agregados que se manejan.



Gráfica 1. Optimización de la granulometría de los agregados
Fuente: elaboración propia del autor

De acuerdo con la anterior gráfica, el porcentaje óptimo de arena es 54% y de grava 46%.

i. Humedad de los agregados: se tiene la siguiente clasificación:

HUMEDAD DE LOS AGREGADOS
a. Seca al horno: toda la humedad del agregado es removida por secado en horno a 105 °C de temperatura, hasta obtener peso constante
b. Seco al aire: toda la humedad removida de la superficie, pero los poros internos parcialmente saturados
c. Saturado y superficialmente seco: todos los poros llenos de agua, pero sin película de humedad sobre la superficie de las partículas
d. Húmedo: todos los poros completamente llenos de agua y adicionalmente con una película de humedad sobre la superficie de las partículas

Tabla 9. Humedad de los agregados
Fuente: adaptado del trabajo del ingeniero Germán Andrés Rey, PROPISOS

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR

Al realizar las mezclas se tomó la humedad de los agregados.

En base a lo anterior, el resumen del diseño queda así:

$f'c$ [MPa]:	resistencia especificada =	21.00
A [mm]:	asentamiento =	50.00
$T_{\text{agregado-max}}$ [plg]:	tamaño máximo agregados =	3/4
$T_{\text{agregado-nom}}$ [plg]:	tamaño máximo nominal agregados =	1/2
C_{aire} [%]:	contenido de aire naturalmente incorporado =	2.00
A [kg/M^3]:	contenido de agua (por m^3 de concreto) =	200.00
A/C [-]:	relación agua / cemento =	0.50
C [kg/M^3]:	contenido de cemento =	400.00
V_{agua} [m^3/m^3]	volumen de agua =	0.20
V_{aire} [m^3/m^3]	volumen de aire =	0.00
V_{cemento} [m^3/m^3]	volumen de cemento =	0.13
$V_{\text{agregados}}$ [m^3/m^3]	volumen de agregados =	0.67
$\%_{\text{arena-opt}}$	porcentaje de arena óptima =	54%
$\%_{\text{grava-opt}}$	porcentaje de grava óptima =	46%
$G_{\text{agregados}}$ [kg/m^3]:	peso aparente promedio agregados =	2434.90
$P_{\text{agregados}}$ [kg/M^3]:	peso agregados =	1619.99
P_{grava} [kg/m^3]:	peso grava =	745.19
P_{arena} [kg/m^3]:	peso arena =	874.79

Notas: como peso específico del cemento se tomó el indicado por ARGOS, para el cemento gris de uso estructural ($2.97 \text{ g}/\text{cm}^3$).

Tabla 10. Cálculos diseño de mezcla

Las cantidades de materiales se presentan a continuación:

CANTIDAD DE MATERIALES (POR PESO Y POR (1.0 m^3) DE CONCRETO)		
ÍTEM	PESO kg	PORCENTAJE %
Agua	200.	0.09
Aire	0.00	0.00
Cemento	400.	0.18
Grava	745.	0.34
Arena	874.	0.39
TOTAL	2219.	1.00

Tabla 11. Cantidad de materiales mezcla de diseño

Por desperdicio y otros factores que influyen en el momento de la elaboración de las mezclas (humedad natural del ambiente, humedad agregados, humedad equipos) se tuvo en cuenta en la cantidad de materiales 10% adicional.

7.2 Mezcla de prueba

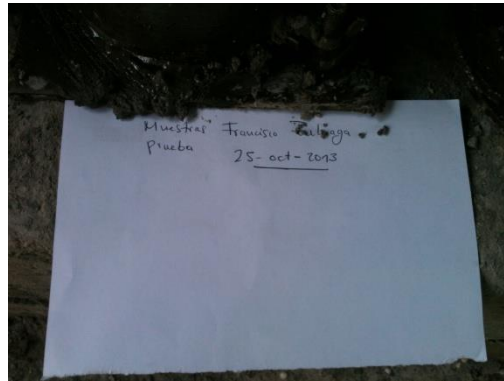
Se elaboró una mezcla de prueba para verificar que cumpla con la resistencia esperada. Se midió la resistencia a la compresión a los 3 días de fraguado, obteniendo los siguientes resultados:

d [cm]:	diámetro probeta:	10
h [cm]:	altura probeta:	20
V [cm ³]:	volumen probeta:	1571
V [m ³]:	volumen probeta:	0.002
N:	número de probetas:	9
Vt [m ³]:	volumen total probetas:	0.014
Vt [m ³]:	volumen total probetas con desperdicio:	0.017
A [kg]:	peso de agua:	3.4
C [kg]:	peso de cemento:	6.80
G [kg]:	peso de grava:	12.67
S [kg]:	peso de arena:	14.87

Tabla 12. Diseño mezcla de prueba – cantidad materiales



Fotografía 1. Elaboración probetas con mezcla de prueba



Fotografía 2. Fecha de elaboración probetas con mezcla de prueba

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCREO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR



Fotografía 3. Probetas con mezcla de prueba a los 3 días de vaciado



Fotografía 4. Ensayo de compresión simple probetas con mezcla de prueba a los 3 días de vaciado



Fotografía 5. Probeta con mezcla de prueba fallada a compresión a los 3 días de vaciado



Fotografía 6. Probeta con mezcla de prueba fallada a compresión a los 3 días de vaciado

PROBETA	DIÁMETRO cm				ALTURA cm				RELACIÓN FC ALTURA/ DIÁMETRO	FC
	D ₁	D ₂	D ₃	D _{PROM}	H ₁	H ₂	H ₃	H _{PROM}		
1	10.1	10.0	10.0	10.0	20.0	20.1	20.2	20.1	2.00	1.00
2	10.2	10.1	10.1	10.1	20.0	20.0	20.0	20.0	1.97	1.00

PROBETA	CARGA kg	RESISTENCIA kg/cm ²	f'c ensayo/ f'c diseño
1	10100	127.75	58.46%
2	9500	117.80	

Tabla 13. Resultados ensayo compresión simple mezcla de prueba a los 3 días de vaciado

Como se observa, las probetas ensayadas a los 3 días de vaciado a compresión, presentaron un 50% de la resistencia de diseño y por tanto, se concluye que la mezcla diseñada sirve para ser utilizada en los ensayos a practicar.

8. DESARROLLO DE ENSAYOS

8.1 Obtención, caracterización y procesado del icopor de desecho utilizado

El icopor utilizado en este trabajo de grado fue recuperado por el autor de empaques de alimentos sobrantes en supermercados locales, restaurantes y de los encontrados en la calle abandonados (empaques de electrodomésticos y frutas).

El icopor tiene una densidad aproximada de 1.00 g/cm³, muy baja resistencia al corte (con las manos se puede trozar) y en estado molido es de difícil manipulación en especial por su bajo peso y su susceptibilidad de ser levantado por cualquier corriente de viento.

Para el procesado del mismo se siguió la siguiente metodología de trabajo¹²:

¹² Las fotografías fueron tomadas en su totalidad por el autor



Fotografía 7. Muestra de icopor desechado y recuperado para este trabajo



Fotografía 8. Trozos de icopor cortados con cuchillo.



Fotografía 9. Molino de carne utilizado en la molienda de icopor

1. El icopor se taja en pedazos pequeños con ayuda de un cuchillo o con la mano, dependiendo el espesor del mismo.

2. Los trozos de icopor obtenidos del paso anterior se introducen en el molino para su molienda. Se utilizó un molino de carne,



Fotografía 10. Molienda del icopor



Fotografía 11. Icopor molido obtenido luego de procesado

3. El icopor obtenido se almacena en bolsas o tarros plásticos. Se debe tener cuidado en el manejo del icopor molido, dado que por su bajo peso es muy fácil que cualquier corriente de aire lo levante. El diámetro aproximado de una partícula molida es de 1 cm.

8.2 Elaboración de probetas y viguetas

Para la elaboración de las mezclas de concreto el autor tuvo la colaboración de los operarios del Laboratorio de Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, así como los materiales para las mezclas (cemento, agregados, agua, probetas, viguetas, baldes, balanzas, equipo para asentamiento y compactación de las mezclas). La elaboración y curado de las probetas y viguetas de concreto fue realizado de acuerdo a la norma INV E-402-07 "Elaboración y curado en el laboratorio de muestras de concreto para ensayos de compresión y flexión". El curado se desarrolló en la piscina de curado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

El día de la mezcla fue el 31 de octubre de 2013. Se calculó el contenido de humedad de los agregados para hacer la corrección de la mezcla por este parámetro. Las mezclas elaboradas se basaron en las siguientes cantidades:

V_C [cm ³]:	6,280	<i>Volumen 2 probetas</i>
$V_{C+10\%}$ [cm ³]:	6,908	
No. Probetas:	18	

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR

REEMPLAZO ÍTEM	MOLIDO		
	0% PESO g	10% A PESO g	20% A PESO g
Cemento	16,769	16,769	16,769
Agua	8,749	8,749	8,749
Grava	32,080	32,080	32,080
Arena	37,913	34,121	30,331
Icopor	0	12	25

Tabla 14. Cantidades de materiales para elaboración de probetas

V_C [cm³]: 7,000 *Volumen 2 viguetas*
 $V_{C+10\%}$ [cm³]: 7,700
 No. viguetas: 6

REEMPLAZO ÍTEM	MOLIDO		
	0% PESO g	10% PESO g	20% PESO g
Cemento	6,231	6,231	6,231
Agua	3,251	3,251	3,251
Grava	11,920	11,920	11,920
Arena	14,087	12,678	11,269
Icopor	0	4.6	9.2

Tabla 15. Cantidades de materiales para elaboración de viguetas

ÍTEM	$W_{\text{recipiente}}$ g	$W_{\text{material humedo}} + W_{\text{recipiente}}$ g	$W_{\text{material seco}} + W_{\text{recipiente}}$ g	Contenido de Humedad %
Arena	114	1,267	1,230	3.3%
Grava	107	1,283	1,257	2.3%

Tabla 16. Determinación de humedad de los agregados en el día de la mezcla

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR



Fotografía 12. Grava utilizada en las mezclas, acopiada en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito



Fotografía 13. Muestra de la arena utilizada en las mezclas, acopiada en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito



Fotografía 14. Determinación del contenido de humedad de los agregados



Fotografía 15. Determinación del contenido de humedad de los agregados



Fotografía 16. Elaboración de las mezclas



Fotografía 17. Equipo para toma de probetas

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR



Fotografía 18. Toma de pesos para determinar cantidad de icopor a mezclar



Fotografía 19. Mezcla de icopor molido con el resto de materiales



Fotografía 20. Elaboración de probetas



Fotografía 21. Viguetas terminadas



Fotografía 22. Probetas terminadas

9. RESULTADOS ENSAYOS

9.1 Ensayos en estado fresco

En estado fresco se tomó el asentamiento y la masa unitaria de cada mezcla. Los valores obtenidos se presentan a continuación:

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR

MEZCLA	ASENTAMIENTO cm
0%	9.00
10%	7.00
20%	9.00

Tabla 17. Valores de asentamiento para las distintas mezclas elaboradas



Fotografía 23. Toma del asentamiento de la mezcla



Fotografía 24. Toma del asentamiento de cada mezcla. Este valor varió entre 7 y 9 cm.

h_{molde} [cm] 19.0
 d_{molde} [cm] 24.5
 V_{molde} [cm³] 8,957.3

MEZCLA	PESO g	MASA g	PESO UNITARIO g/cm ³	PESO UNITARIO kg/m ³	MASA UNITARIA g/cm ³	MASA UNITARIA kg/m ³
0%	18,869	1,923	2.1	2106.6	0.2	214.7
10%	17,185	1,752	1.9	1918.6	0.2	195.6
20%	16,389	1,671	1.8	1829.7	0.2	186.5

$$P \quad M = P/9.81 \quad PU = P/V_{\text{molde}} \quad MU = M/V_{\text{molde}}$$

Tabla 18. Valores de masa unitaria para cada mezcla

Como se observa en las dos tablas anteriores, los valores de asentamiento se encuentran dentro del rango de 5 y 10 cm escogido en el diseño de mezcla y por lo tanto son valores aceptables. La manejabilidad de cada mezcla era buena, ni muy húmeda ni muy seca, sin evidenciarse segregación de materiales. En cuanto a las masas unitarias encontradas, se concluye, como era de esperarse, que al aumentar el porcentaje de reemplazo con icopor por arena dentro de la mezcla, el concreto obtenido presentaría un menor peso. Sin embargo y de acuerdo a la Nota 7 de la norma INV E-410-07, los concretos acá elaborados son de peso normal.

Al momento de la mezcla, los concretos elaborados con reemplazo con icopor presentaron un grado mayor de dificultad en el manejo que el concreto tradicional sin ninguna sustitución de materiales, debido a la alta volatilidad del icopor; se recomienda realizar el siguiente procedimiento de mezcla cuando se utilice como parte del agregado desecho de icopor:

- a. *Mezcla agregados tradicionales*: corresponde a la mezcla de arena y grava.
- b. *Añadir cemento*: a la mezcla anterior añadir el cemento, procurando evitar la emisión de partículas finas de cemento al ambiente que reduzcan la cantidad mezclada de este material.
- c. *Añadir parte del agua total de mezcla*: a la pasta formada en los pasos “a” y “b” añadir parte del agua, que la humedezca y le ofrezca algo de manejabilidad.
- d. *Añadir desecho de icopor*: añadir la totalidad del icopor molido, procurando que se haga lo más cerca de la pasta formada en el paso “c”, evitando el vuelo de parte de este material. Al mismo tiempo, dar botes a la mezcla para lograr que la pasta se mezcle con el icopor que se añade.
- e. *Verter el agua faltante de mezcla*: añadir el agua restante calculada para la mezcla.
- f. *Mezclar homogéneamente*: dar botes continuos a la mezcla, logrando que la mezcla sea homogénea en color, forma y manejabilidad.

9.2 Ensayos en estado endurecido

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos de laboratorio realizados.

9.2.1 Resistencia a la compresión

La evaluación de la resistencia a la compresión se realizó a tres edades de curado; a saber, 7, 14 y 28 días. Se utilizó la máquina de ensayo del Laboratorio de Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, en colaboración de los operarios del mismo. Este ensayo está normalizado por la INV E-410-07 “*Resistencia a la compresión de cilindros de concreto*”.

- A. *Equipo utilizado*. El equipo utilizado para determinar el módulo de elasticidad fue el siguiente:
 - a. *Máquina de prueba*: cumple con la norma INV E-410-07 “*Resistencia a la compresión de cilindros de concreto*”, la cual aplica carga a velocidad constante.
- B. *Metodología de ensayo*. A continuación se describe el procedimiento realizado durante el ensayo:

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR

- a. *Elaboración y curado de las probetas de concreto*: esto fue realizado de acuerdo a la norma INV E-402-07 “*Elaboración y curado en el laboratorio de muestras de concreto para ensayos de compresión y flexión*”. El curado fue de 28 días en la piscina de curado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- b. *Toma de geometría muestras*: corresponde a la medida de diámetros y alturas de cada probeta.
- c. *Refrendación de muestras*: cada probeta a ensayar se refrendó con azufre.
- d. *Ensayo de compresión*: se coloca la probeta a ensayar en el centro de la plancha de la máquina de prueba y se aplica carga creciente a velocidad constante, hasta llevarla a la falla.
- e. *Lectura carga máxima*: del dial de la máquina se lee la carga máxima resistida por cada muestra. Se tuvo en cuenta lo establecido en el numeral 6.2 de la norma INV E-410-07, en cuanto a la corrección de la resistencia por la relación altura/diámetro.

$$R_{obtenida} = FC \times \frac{Carga}{Área_{promedio}}$$

Nota: “FC” factor de corrección por la relación altura/diámetro (numeral 6.2 norma INV E-410-07). Se aplica solo cuando dicha relación es menor o igual a 1.75

Ecuación 4. Resistencia máxima a la compresión corregida
Fuente: norma INV E-410-07

Altura/Diámetro	1.75	1.50	1.25	1.00
Factor de Corrección	0.98	0.96	0.93	0.87

Tabla 19. Factores de corrección para relaciones altura/diámetro menores a 1.75
Fuente: tomado del numeral 6.2 de la norma INV E-410-07

Los resultados encontrados en laboratorio y cálculos de forma posterior se presentan en la Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22 del presente documento.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR

PROBETA	DIÁMETRO cm				ALTURA cm				RELACIÓN ALTURA/ DIÁMETRO	FC	CARGA kg	RESISTENCIA kg/cm ²		f'c _{ensayo} / f'c _{diseño}
	D ₁	D ₂	D ₃	D _{PROM}	H ₁	H ₂	H ₃	H _{PROM}						
0% - 1	12.0	10.0	11.0	11.0	20.0	18.0	19.0	19.0	1.73	0.98	11,600	119.6	122.4	58.3%
0% - 2	11.0	12.0	10.0	11.0	21.0	20.0	21.0	20.7	1.88	1.00	11,900	125.2		
10% A - 1	10.0	12.0	11.0	11.0	20.0	20.0	19.0	19.7	1.79	1.00	11,300	118.9	109.0	51.9%
10% A - 2	13.0	12.0	12.0	12.3	20.0	20.0	19.0	19.7	1.59	0.97	12,200	99.1		
20% A - 1	12.0	13.0	12.0	12.3	20.0	20.0	20.0	20.0	1.62	0.97	14,000	113.7	104.9	49.9%
20% A - 2	12.0	12.0	12.0	12.0	19.0	20.0	18.0	19.0	1.58	0.97	11,200	96.1		

Tabla 20. Resistencia a la compresión obtenida en laboratorio a los 7 días

Como se aprecia en los datos de la anterior tabla, todas las mezclas de concreto en promedio alcanzaron el 50% de la resistencia requerida a compresión.



Fotografía 25. Probetas para ensayo a compresión a 7 días



Fotografía 26. Ensayo a compresión probetas a 7 días

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR



Fotografía 27. Probeta fallada a compresión axial a 7 días



Fotografía 28. Probeta fallada a compresión axial a 7 días



Fotografía 29. Momento de falla a compresión probeta a 7 días



Fotografía 30. Probeta fallada a compresión axial a 7 días

PROBETA	DIÁMETRO cm				ALTURA cm				RELACIÓN ALTURA/ DIÁMETRO	FC	CARGA kg	RESISTENCIA kg/cm ²		f'c _{ensayo} / f'c _{diseño}
	D ₁	D ₂	D ₃	D _{PROM}	H ₁	H ₂	H ₃	H _{PROM}						
0% - 1	10.2	10.3	10.1	10.2	20.0	20.2	20.3	20.2	1.98	1.00	17,200	210.5	206.4	98.30%
0% - 2	10.0	10.1	10.0	10.0	19.8	19.7	20.0	19.8	1.98	1.00	16,000	202.4		

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR

PROBETA	DIÁMETRO cm				ALTURA cm				RELACIÓN ALTURA/ DIÁMETRO	FC	CARGA kg	RESISTENCIA kg/cm ²		f'c ensayo/ f'c diseño
10% A - 1	10.3	10.2	10.1	10.2	20.1	20.1	20.0	20.1	1.97	1.00	17,200	210.5	208.9	99.48%
10% A - 2	10.1	10.0	10.1	10.1	20.4	20.3	20.2	20.3	2.02	1.00	16,500	207.3		
20% A - 1	10.0	10.1	10.1	10.1	20.0	20.0	20.2	20.1	1.99	1.00	15,300	192.2	209.7	99.86%
20% A - 2	10.0	10.1	10.2	10.1	20.3	20.3	20.4	20.3	2.01	1.00	18,200	227.2		

Tabla 21. Resistencia a la compresión obtenida en laboratorio a los 14 días

De acuerdo a los resultados obtenidos a los 14 días y presentados en la tabla anterior, todas las mezclas de concreto elaborados en promedio alcanzaron aproximadamente el 100% de la resistencia a compresión requerida.



Fotografía 31. Probetas para ensayar a compresión a los 14 días de curado



Fotografía 32. Ensayo a compresión de probetas a los 14 días de curado

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR



Fotografía 33. Probetas para ensayar a compresión a los 14 días de curado



Fotografía 34. Probeta mezcla 20% de reemplazo ensayada a compresión a los 14 días de curado



Fotografía 35. Probeta mezcla 20% de reemplazo ensayada a compresión a los



Fotografía 36. Probeta mezcla 10% de reemplazo ensayada a compresión a los

14 días de curado



Fotografía 37. Probeta mezcla 10% de reemplazo ensayada a compresión a los 14 días de curado

14 días de curado



Fotografía 38. Probeta mezcla 0% de reemplazo ensayada a compresión a los 14 días de curado



Fotografía 39. Probeta mezcla 0% de reemplazo ensayada a compresión a los 14 días de curado



Fotografía 40. Equipo para ensayo a compresión de probetas

PROBETA	DIÁMETRO cm				ALTURA cm				RELACIÓN ALTURA/ DIÁMETRO	FC	CARGA kg	RESISTENCIA kg/cm ²		f'c ensayo/ f'c diseño
	D ₁	D ₂	D ₃	D _{PROM}	H ₁	H ₂	H ₃	H _{PROM}						
0% - 1	10,3	10,3	10,4	10,3	20,1	20,2	20,1	20,1	1,95	1,00	20.900	249,2	249,2	118,67%
10% A - 1	10,0	10,0	10,1	10,0	20,0	20,1	20,0	20,0	2,00	1,00	19.600	247,9	247,9	118,05%
20% A - 1	10,0	10,0	10,1	10,0	19,8	19,9	19,8	19,8	1,98	1,00	18.700	236,5	236,5	112,63%

Tabla 22. Resistencia a la compresión obtenida en laboratorio a los 28 días

Como era de esperarse por los resultados encontrados en el ensayo a los 14 días, a los 28 días la resistencia a la compresión superó la resistencia requerida.



Fotografía 41. Probetas para ensayo a compresión a 28 días



Fotografía 42. Probeta durante ensayo a compresión a 28 días. En este ensayo también se tomaron deformaciones para calcular el módulo de elasticidad



Fotografía 43. Probeta 10% de porcentaje de reemplazo fallada a 28 días a compresión



Fotografía 44. Probeta 20% de porcentaje de reemplazo fallada a 28 días a compresión



Fotografía 45. Probeta 0% de porcentaje de reemplazo fallada a 28 días a compresión

Los resultados encontrados evidencian que las 3 mezclas de concreto elaboradas (0%, 10% y 20% de reemplazo con icopor) superaron a los 28 días la resistencia requerida a compresión (210 kg/m²); como se presentó en la Tabla 21, a los 14 días la resistencia a la compresión de las probetas era aproximadamente igual al 100% de la resistencia requerida. Por tanto y en base a estos resultados, se puede concluir que concretos elaborados con reemplazos con icopor de incluso 20% presentan similar resistencia a la compresión que un concreto sin ningún reemplazo.

9.2.2 Módulo de elasticidad

Durante el ensayo a compresión de las probetas a los 28 días de curado, se tomaron deformaciones para poder calcular el módulo de elasticidad de cada muestra. Se siguió lo prescrito en la NTC 4025 “*Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión*”.

- B. Equipo utilizado. El equipo utilizado para determinar el módulo de elasticidad fue el siguiente:
- a. *Máquina de prueba*: cumple con la norma INV E-410-07 “*Resistencia a la compresión de cilindros de concreto*”, la cual aplica carga a velocidad constante.
 - b. *1 deformímetro*: permite tomar deformaciones longitudinales en las probetas cargadas, con una exactitud de 0.01 mm
 - c. *2 anillos*: rígidos y metálicos. Cada anillo tiene 2 barras separadoras que permiten centrarlos con respecto a la probeta y mantenerla fija durante el ensayo, así como tornillos para poder centrar cada muestra y evitar deslizamientos durante la carga.
- C. Metodología de ensayo. A continuación se describe el procedimiento realizado durante el ensayo:
- a. *Elaboración y curado de las probetas de concreto*: esto fue realizado de acuerdo a la norma INV E-402-07 “*Elaboración y curado en el laboratorio de muestras de concreto para ensayos de compresión y flexión*”. El curado fue de 28 días en la piscina de curado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
 - b. *Refrendación de muestras*: cada probeta a ensayar se refrendó con azufre.
 - c. *Instalación deformímetro y anillos*: se realizó cuidando que la muestra quedara fija y no pudiera deslizarse durante el ensayo. Se tomaron las siguientes medidas: i) distancia de la probeta al deformímetro ($d_{\text{deformímetro}}$), ii) distancia de la probeta a la barra fija (d_{barra}), iii) alturas entre anillos¹³ (h_1 y h_2). Ver Esquema 2.
 - d. *Prueba de carga y lectura deformaciones*: la probeta se colocó en la máquina de prueba de forma centrada. La carga fue aplicada de la siguiente manera: i) carga inicial equivalente al 10% de la carga máxima esperada, ii) carga creciente a velocidad constante hasta el 50% y iii) carga creciente a mayor velocidad que la del paso “ii” hasta la falla de la probeta. La deformación de la probeta se tomó cada 1000 kg.
- D. Cálculos. El ensayo a compresión se llevó hasta la falla (f_c) y de acuerdo a la filosofía de esfuerzos admisibles, el límite de proporcionalidad para el concreto corresponde a

¹³ La altura se midió entre bordes superiores de cada anillo

un nivel de esfuerzos de aproximadamente el 45% del esfuerzo máximo a compresión. Para determinar el módulo de elasticidad (E) de cada muestra, se utilizó el siguiente procedimiento de cálculo:

- a. *Gráfica esfuerzo promedio contra deformación unitaria.* Se realizó para cada muestra.
- b. *Esfuerzo promedio (σ_1) correspondiente a una deformación unitaria igual a $5E-05$ (ε_1).* Con ayuda del software "EXCEL" se obtuvo una curva de tendencia para la gráfica de cada muestra junto con la ecuación que la representa, con la cual se determinó este esfuerzo promedio.
- c. *Deformación unitaria (ε_2) correspondiente a un esfuerzo promedio igual al 45% del esfuerzo máximo (σ_2).* Con las ecuaciones encontradas en el paso "b" se obtuvo esta deformación unitaria.
- d. *Cálculo módulo de elasticidad.* Se utilizó la siguiente ecuación, en base a la pendiente de la secante entre dos puntos de la curva por debajo del límite de proporcionalidad:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Ecuación 5. Módulo de elasticidad

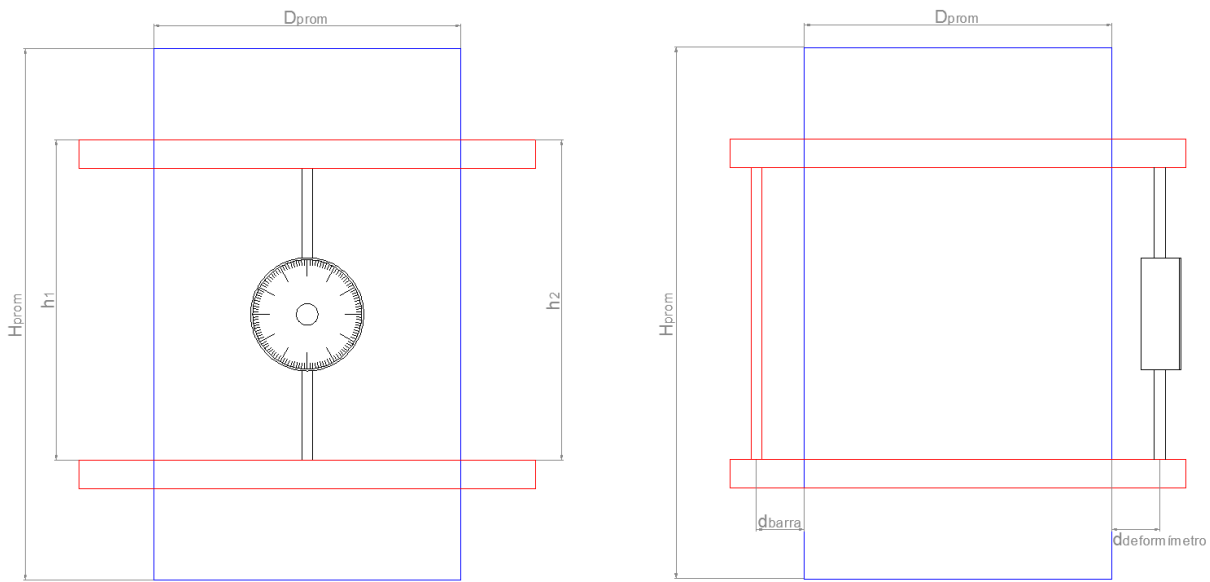
Fuente: NTC 4025

- e. *Cálculo factor K.* Con el objeto de expresar el módulo de elasticidad en función de la raíz cuadrada del esfuerzo máximo a compresión f'_c , se calcula este factor. Así mismo, permite comparar los resultados obtenidos en este trabajo con lo pre-escrito en la NSR-10, Título C, numeral C.8.5 "Módulo de elasticidad".

$$K = \frac{E}{\sqrt{f'_c}}$$

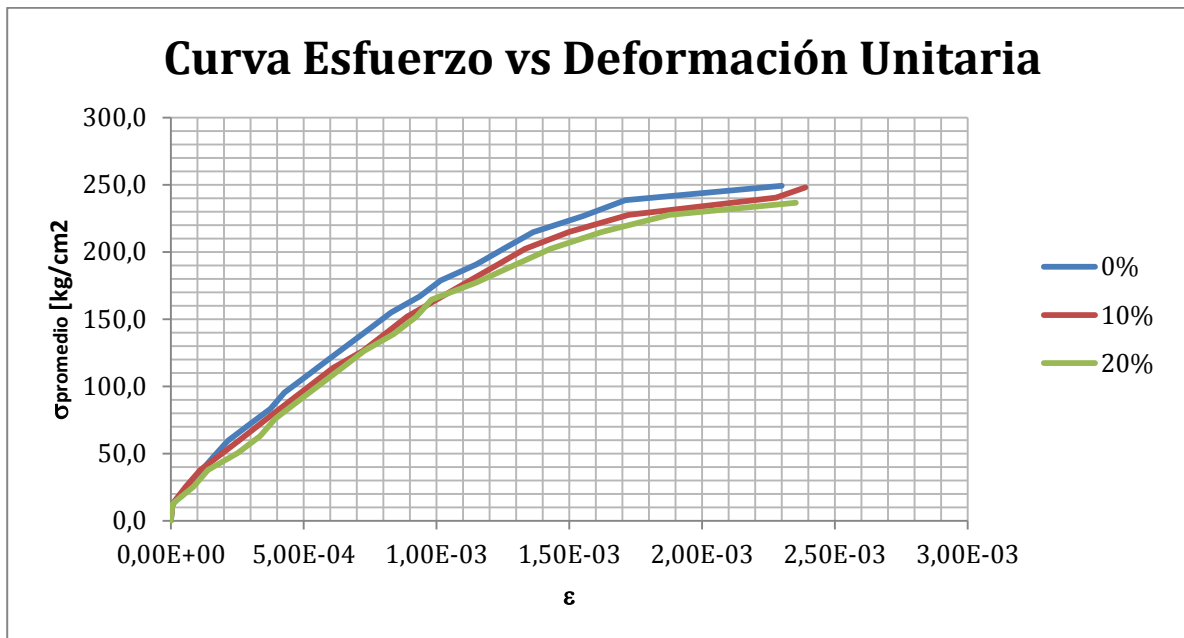
Ecuación 6. Factor K, módulo de elasticidad

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR



Nota: azul indica probeta, rojo anillos y negro deformímetro.
Esquema 2. Ilustración distancias medidas aparato de medición
Fuente: elaboración propia del autor

En el anexo se encuentran las tablas de resultados. De acuerdo a éstos, la muestra al 0% de reemplazo presentó el mayor nivel de esfuerzo alcanzado en la prueba ($249,2 \text{ kg/cm}^2$), mientras que la muestra al 20% de reemplazo registro el menor valor ($236,5 \text{ kg/cm}^2$). Así mismo, la mayor deformación unitaria correspondió a la muestra al 20% ($2,35 \text{ E-03}$) y la menor a la muestra al 0% de reemplazo de icopor ($2,30 \text{ E-03}$). Valores intermedio presentó la muestra al 10% de reemplazo. No obstante, los valores tanto de esfuerzo como de deformación unitaria se encuentran cercanos entre probetas. La Gráfica 2 presenta las curvas esfuerzo promedio contra deformación unitaria para probeta de acuerdo a los resultados del laboratorio realizado.



Gráfica 2. Curva esfuerzo promedio vs deformación unitaria probetas, ensayo módulo de elasticidad

Finalmente, la Tabla 23 muestra el cálculo del módulo de elasticidad para cada muestra.

PROBETA	ε	σpromedio kg/cm ²	E kg/cm ²	K
0%	5,00E-05	21,5	184.000	12.680
	5,43E-04	112,1		
10%	5,00E-05	20,2	170.000	11.744
	5,87E-04	111,6		
20%	5,00E-05	15,8	171.000	11.790
	5,81E-04	106,4		

Tabla 23. Cálculo módulo de elasticidad para las 3 muestras

Como se observa la probeta a 0% de reemplazo muestra el mayor valor de módulo de elasticidad (184.000 kg/cm²). Aunque la probeta a 10% de reemplazo de icopor registró el menor valor de módulo de elasticidad (170.000 kg/cm²), su valor es aproximadamente igual al presentado para la probeta a 20% (171.000 kg/cm²), con solo una diferencia de 0,5%; por tanto y en base a estos resultados, se concluye que el módulo de elasticidad no varía de forma apreciable entre concretos elaborados al 0% o al 20% de reemplazo de icopor. El valor de K citado por el reglamento NSR-10 en el literal C.8.5 "Módulo de elasticidad", es de 14.863 (f_c y E en kg/cm²). Como se observa, los valores obtenidos son inferiores al establecido por la norma para utilizar en el análisis y diseño estructural; para la muestra patrón (probeta al 0%) la diferencia aproximada es de 15%. El valor de K contenido por el reglamento NSR-98 correspondía a 12.500 (f_c y E en kg/cm²), el cual es similar al obtenido para la muestra

patrón; para las otras 2 probetas el valor de K registrado es inferior al pre-escrito en la NSR-98, con una diferencia aproximada del 6%.

Los factores que afectan el módulo de elasticidad de un concreto se presentan en la Tabla 24 (Serrano y Pérez, 2010).

ESTADO FRESCO		ESTADO ENDURECIDO
CEMENTO	AGREGADOS	LABORATORIO
1. Módulo de elasticidad del cemento.	1. Módulo de elasticidad de los agregados.	1. Aplicación de la carga.
2. Porosidad de la mezcla.	2. Porosidad.	2. Contenido de humedad de los especímenes.
3. Condiciones del cemento	3. Fracción volumétrica de los agregados	3. Cálculos.

Tabla 24. Factores que afectan el módulo de elasticidad de un concreto

Fuente: adaptado de María Fernanda Serrano y Diego Darío Pérez, Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto

Como se aprecia en la anterior tabla, varios son los factores que pueden afectar el módulo de elasticidad del concreto, donde en algunos existe control por parte del fabricante (cementeras y canteras) y otras en el personal del laboratorio (ensayo y cálculos).



Fotografía 46. Probeta ensayada a compresión y toma de deformaciones a 28 días de fundida



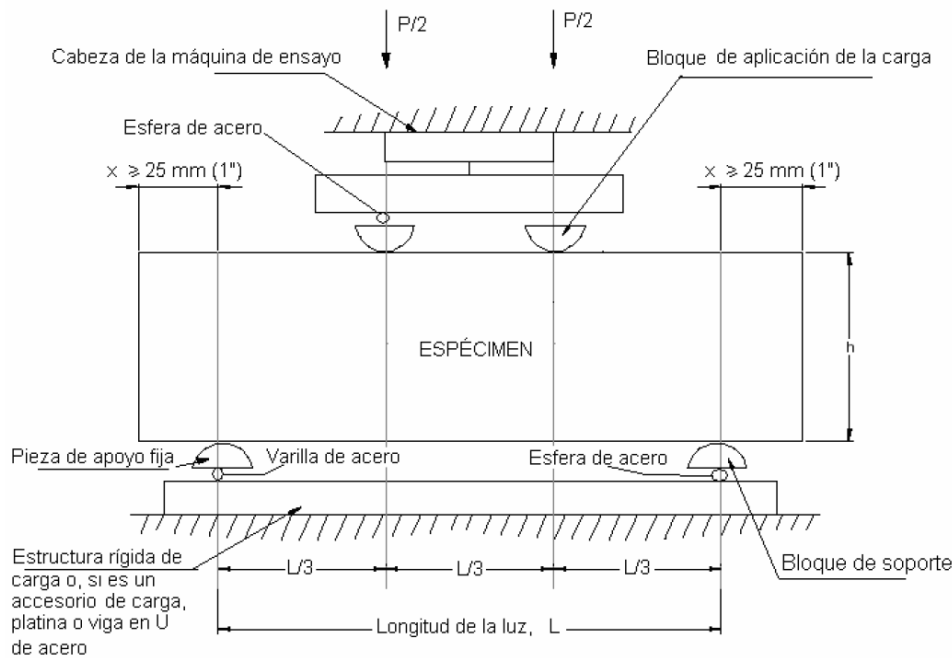
Fotografía 47. Probeta ensayada a compresión y toma de deformaciones a 28 días de fundida

9.2.3 Resistencia a la flexión

Este ensayo fue realizado de acuerdo a la norma INV E-414-07 “Resistencia a la flexión del concreto - método de la viga simple cargada en los tercios de la luz”. Las vigas fueron ensayadas luego de 28 días de curado.

- A. Equipo utilizado. El equipo utilizado fue el siguiente:
- a. *Máquina de ensayo*: cumple con la norma INV E-414-07 mencionada.
 - b. *Flexómetro*. Se utilizó para ubicar los apoyos y puntos de aplicación de la carga en cada vigueta.
- B. Metodología de ensayo. A continuación se describe el procedimiento realizado durante el ensayo:
- a. *Elaboración y curado de las viguetas de concreto*: esto fue realizado de acuerdo a la norma INV E-402-07 “Elaboración y curado en el laboratorio de muestras de concreto para ensayos de compresión y flexión”. El curado fue de 28 días en la piscina de curado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
 - b. *Ubicación apoyos y puntos de aplicación de carga*: se tomó una luz aproximadamente igual a tres veces la altura promedio de cada vigueta y se revisó que la distancia medida entre extremos y apoyo no fuese inferior a 25 mm, como lo recomienda la norma INV mencionada. Los puntos de aplicación de la carga correspondieron a los tercios medios de la luz.
 - c. *Montaje*: corresponde a la instalación de la vigueta en la máquina de ensayo. Ver Esquema 3.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR



Esquema 3. Equipo adecuado para el ensayo de flexión del concreto
Fuente: norma INV E-414-07

- d. *Aplicación carga:* de forma creciente y a velocidad constante, se aplica carga a la vigueta hasta que ésta falle. Siguiendo lo establecido en la norma INV E-414-07, la carga se aplicó a una rata (*r*) de incremento constante correspondiente a un esfuerzo de la fibra extrema (*S*) de 1,0 MPa/min. El cálculo de “*r*” se hizo de acuerdo al numeral 4.2 de la norma mencionada

$$r = \frac{S b d^2}{L}$$

Nota: “*b*” ancho promedio de la muestra, “*d*” altura promedio de la muestra y “*L*” longitud de la luz de la muestra.

Ecuación 7. Rata de incremento para la carga a aplicar durante ensayo de flexión del concreto
Fuente: norma INV E-414-07

S MPa/min	b mm	d mm	L mm	r N/min	r kg/min
1,0	150	150	450	7.500	750

Tabla 25. Cálculo rata de incremento para la carga aplicar durante ensayo de flexión del concreto

- e. *Ubicación plano de falla y lectura carga máxima:* se localiza el plano de la falla y de la máquina de ensayo se lee la carga máxima.
f. *Cálculo módulo de rotura:* esto se realizó de acuerdo a los numerales 6.1, 6.2 y 6.3 de la norma INV E-414-07.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR



Fotografía 48. Equipo para ensayo de viguetas a flexión indirecta



Fotografía 49. Medidor de la carga aplicada, equipo de ensayo a flexión indirecta



Fotografía 50. Vigueta de 20% de reemplazo ensayada a flexión indirecta a 28 días de fundida



Fotografía 51. Vigueta de 20% (primera muestra) de reemplazo fallada a flexión indirecta a 28 días de fundida



Fotografía 52. Vigueta de 20% (primera muestra) de reemplazo fallada a flexión indirecta a 28 días de fundida



Nota: se observa que la línea de falla ocurrió en el tercio medio de la vigueta

Fotografía 53. Detalle línea de falla vigueta de 20% de reemplazo fallada a flexión indirecta a 28 días

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR



Fotografía 54. Vigueta de 10% de reemplazo fallada a flexión indirecta a 28 días de fundida



Nota: se observa que la línea de falla ocurrió en el tercio medio de la vigueta

Fotografía 55. Detalle línea de falla vigueta de 10% de reemplazo fallada a flexión indirecta a 28 días



Fotografía 56. Vigueta de 0% de reemplazo fallada a flexión indirecta a 28 días de fundida



Nota: se observa que la línea de falla ocurrió en el tercio medio de la vigueta

Fotografía 57. Detalle línea de falla vigueta de 0% de reemplazo fallada a flexión indirecta a 28 días



Fotografía 58. Vigueta de 20% (segunda muestra) de reemplazo fallada a flexión indirecta a 28 días de fundida



Nota: se observa el icopor de desecho mezclado
Fotografía 59. Detalle vigueta de 10% de reemplazo fallada a flexión indirecta a 28

Dado que todos los planos de falla se ubicaron en el tercio medio de las viguetas, se utilizó la siguiente expresión para calcular el módulo de rotura, pre-escrita en el numeral 6.1 de la norma INV E-414-07:

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Nota: "P" carga máxima del ensayo, "L" longitud libre entre apoyos, "b" ancho promedio de la muestra y "d" altura promedio de la muestra

Ecuación 8. Módulo de rotura para fallas en el tercio medio de la vigueta, ensayo de flexión del concreto

Fuente: norma INV E-414-07

En la Tabla 26 se presentan los resultados del ensayo de laboratorio realizado y el cálculo del módulo de rotura para cada muestra.

PROBETA	ANCHO mm				ALTURA mm				LONGITUD mm	UBICACIÓN PLANO DE FALLA	P _{MAX} kg	P _{MAX} N	R KPa	R _{PROMEDIO} KPa
	B ₁	B ₂	B ₃	B _{PROM}	D ₁	D ₂	D ₃	D _{PROM}						
0% - 1	150	150	151	150	154	154	150	153	450	Tercio medio	3.107	31.070	3.990	4.031
0% - 2	151	150	152	151	150	152	151	151	450	Tercio medio	3.115	31.150	4.071	
10% - 1	156	152	150	153	156	158	152	155	450	Tercio medio	2.970	29.700	3.628	3.732
10% - 2	152	150	149	150	157	152	149	153	450	Tercio medio	2.987	29.870	3.836	
20% - 1	155	152	152	153	150	150	152	151	450	Tercio medio	3.277	32.770	4.246	3.931
20% - 2	150	150	152	151	152	150	154	152	450	Tercio medio	2.797	27.970	3.616	

Tabla 26. Cálculo módulo de rotura, ensayo de flexión del concreto

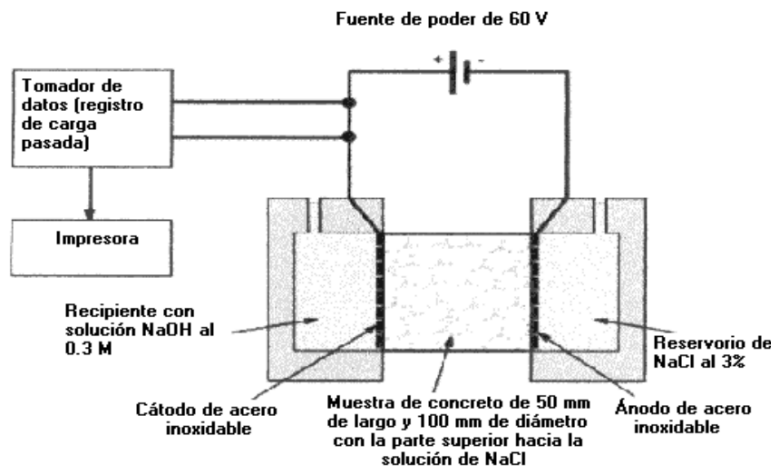
Como se aprecia en los resultados encontrados, las muestras a 10% y 20% registraron menor módulo de rotura que la muestra patrón (0% de reemplazo) como era de esperarse; no obstante, estos valores tan solo difieren en un 7% y 2%, en comparación con la muestra de 10% y 20% de reemplazo respectivamente; una diferencia del 2% se asume despreciable. Por tanto y en base a estos resultados, se concluye que el módulo de rotura del concreto elaborado con un 10% de reemplazo de icopor es similar al concreto patrón.

9.2.4 Permeabilidad al ion cloruro

El ensayo realizado está normalizado por la ASTM 1202 y la AASHTO T277. En términos generales, consiste en calificar la habilidad del concreto para resistir la penetración de cloruros mediante la aplicación de flujo eléctrico. El ensayo fue realizado luego de 28 días de curado.

A. Equipo y materiales utilizados¹⁴. El equipo y materiales utilizados fueron los siguientes:

- a. *Computador y programa*: para controlar y monitorear el ensayo se utilizó un computador con el programa "PROVEE IT". Al final del laboratorio entrega un reporte de los resultados.
- b. *Equipo de ensayo*: aplica flujo eléctrico a las muestras, mide temperatura y corriente durante el desarrollo del ensayo.
- c. *Celdas*: encierran las muestras y las soluciones de cloruro de sodio (NaCl) y de hidróxido de sodio (NaOH).
- d. *Soluciones químicas*: se utilizó NaCl al 3% y NaOH al 0.3 molar, las cuales se colocan en las celdas junto con las muestras
- e. *Cortadora de concreto*: utilizada para obtener, a partir de las probetas de concreto, rodajas de 5,0 cm de espesor.
- f. *Equipo de vacío*: utilizado para sellar las muestras antes del ensayo.
- g. *Epóxico*: con el objeto de impermeabilizar las muestras, se aplicó SIKADUR-32 mediante sus dos componentes A y B, en proporciones 2:1.
- h. *Agua destilada*: utilizada para reservar las muestras durante 24 horas.
- i. *Brocha*: utilizada para aplicar el epóxico.



Esquema 4. Ensayo de permeabilidad al ion cloruro

Fuente: Lizarazo Marriaga, Juan Manuel. *Ensayos típicos en la determinación de la durabilidad del concreto*

¹⁴ Todos los equipos y materiales fueron suministrados por el Laboratorio de Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

B. *Metodología de ensayo.* A continuación se describe el procedimiento realizado durante el ensayo:

- a. *Elaboración y curado de las viguetas de concreto:* esto fue realizado de acuerdo a la norma INV E-402-07 “*Elaboración y curado en el laboratorio de muestras de concreto para ensayos de compresión y flexión*”. El curado fue de 28 días en la piscina de curado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- b. *Corte probetas:* utilizando una cortadora de concreto y previendo todas las pautas de seguridad, se cortaron las probetas para obtener rodajas de 5,0 cm de espesor.
- c. *Aplicación de capas de epóxico:* mediante dos capas de epóxico, separadas 20 minutos entre una y otra, se impermeabilizaron las muestras. Las capas se aplicaron en las caras de 5,0 cm de espesor. Se dejaron secar 24 horas hasta lograr que el epóxico no fuera pegajoso.
- d. *Reservorio en agua destilada:* en un recipiente con agua destilada se sumergieron y reservaron por 24 horas las muestras.
- e. *Reservorio en vacío:* en el equipo de vacío se dejaron las muestras por 4 horas. Al inicio de la última hora se introdujo agua destilada hasta cubrir las muestras.
- f. *Encapsulado:* las muestras fueron colocadas en las celdas para el ensayo. Se dispusieron con cauchos en ambas caras y con vaselina se sellaron, para garantizar que las celdas quedaran impermeables. Al final se obtiene celda por muestra.
- g. *Control celdas:* mediante llenado de las celdas con agua se verifica que las mismas hayan quedado totalmente impermeables.
- h. *Elaboración soluciones:* correspondió a la fabricación de las soluciones de NaCl y NaOH a las proporciones mencionadas en párrafos anteriores. Estas soluciones fueron vertidas en las celdas
- i. *Conexión equipo de ensayo:* la conexión de cada celda se realizó con cuidado y garantizando que el flujo eléctrico se realizará correctamente, evitando algún corto o daño del equipo y del ensayo a realizar.
- j. *Ingreso parámetros programa de computador:* los parámetros ingresados fueron: i) diámetro muestras, ii) voltaje a aplicar (60V), iii) temperatura máxima muestras (90 °C) y iv) corriente máxima (500 A) y v) duración ensayo (6 horas).
- k. *Ejecución ensayo y control del mismo:* el ensayo duró 6 horas, durante el cual se realizó control de las muestras por hora.
- l. *Impresión reporte de resultados:* el programa de computación genera un reporte con las estadísticas del ensayo, de forma tabular y gráfica.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR



Fotografía 60. Probetas de concreto para ensayo de permeabilidad al ion cloruro



Fotografía 61. Equipo para cortar las probetas en muestras de 5,0 cm de espesor



Fotografía 62. Proceso de corte de las probetas en muestras de 5,0 cm de espesor



Fotografía 63. Muestra cortada del espesor necesario para ensayo de permeabilidad al ion cloruro



Fotografía 64. Detalle muestra cortada para ensayo de permeabilidad al ion cloruro



Nota: se observa el icopor molido dentro de la mezcla
Fotografía 65. Detalle muestra cortada para ensayo de

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR



Nota: se utilizó SIKADUR – 32, componentes A (izquierda) y B (derecha)

Fotografía 66. Epóxico utilizado para sellar las muestras previo al ensayo de permeabilidad al ion cloruro

permeabilidad al ion cloruro



Nota: se dejaron secar por 24 horas

Fotografía 67. Muestras con capa de epóxico para ensayo de permeabilidad al ion cloruro

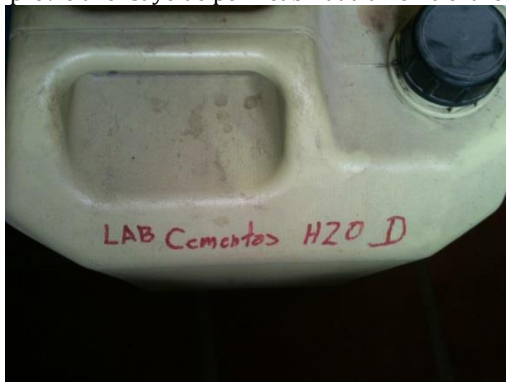


Nota: se dejaron 24 horas dentro del agua destilada

Fotografía 68. Muestras sumergidas en agua destilada previo al ensayo de permeabilidad al ion cloruro



Fotografía 69. Muestras sumergidas en agua destilada previo al ensayo de permeabilidad al ion cloruro



Fotografía 70. Agua destilada utilizada en la preparación de las muestras para el ensayo de permeabilidad al ion cloruro



Nota: las muestras se dejaron en vacío durante 4 horas

Fotografía 71. Muestras en equipo de vacío

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR



Nota: las muestras se dejaron en vacío con agua destilada durante 1 hora

Fotografía 72. Muestras en equipo de vacío con agua destilada



Nota: el ensayo tuvo una duración total de 6 horas

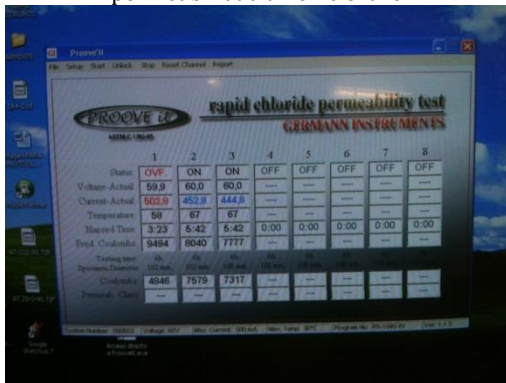
Fotografía 73. Equipo para ensayo de permeabilidad al ion cloruro



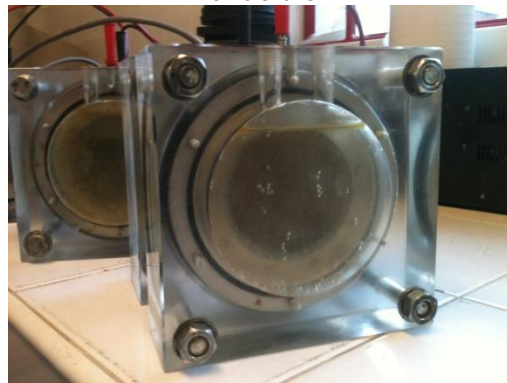
Fotografía 74. Muestras durante ensayo de permeabilidad al ion cloruro



Fotografía 75. Equipo para ensayo de permeabilidad al ion cloruro



Fotografía 76. Pantalla que muestra avance del ensayo de permeabilidad al ion cloruro. Programa "PROOVE IT".



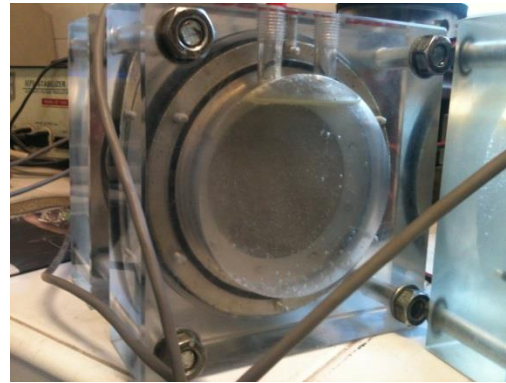
Fotografía 77. Muestra de concreto al 0% durante ensayo de permeabilidad al ion cloruro

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR



Nota: se observa el color de la solución (amarillenta) en contraste con la evidencia en la muestra al 20%

Fotografía 78. Muestra de concreto al 10% durante ensayo de permeabilidad al ion cloruro



Fotografía 79. Muestra de concreto al 20% durante ensayo de permeabilidad al ion cloruro



Nota: ubicación muestras: al 20% (superior izquierda), al 10% (superior derecha) y 0% (abajo)

Fotografía 80. Cara expuesta al ambiente de las muestras luego de ensayo de permeabilidad al ion cloruro



Nota: ubicación muestras: al 20% (superior izquierda), al 10% (superior derecha) y 0% (abajo)

Fotografía 81. Cara interna de las muestras luego de ensayo de permeabilidad al ion cloruro

En el anexo A se presentan los reportes impresos por el programa de computador luego del ensayo realizado. A continuación la Nota: * corresponde a la carga acumulada en el momento que se detuvo el ensayo (03:20)

Tabla 27 presenta el resumen de los resultados encontrados en el ensayo de laboratorio.

MUESTRA	0%	10%	20%	Observación
Diámetro [mm]	102	100	102	
Voltaje [V±0.1V]	60	60	60	Máximo 60V
Corriente [mA]	450,9	443,6	491,6	Máximo 500 mA
Temperatura [°C]	68	67	57	Máximo 90 °C
Tiempo total [hh:mm]	06:00	06:00	03:20	06:00
Carga estimada [C]	8040	7777	9494	Carga eléctrica predicha por el programa
Carga real [C]	6975	7021	4124*	Carga eléctrica real

MUESTRA	0%	10%	20%	Observación
Clase de permeabilidad	Alta	Alta	Alta	Calificación de la permeabilidad de la muestra

Nota: * corresponde a la carga acumulada en el momento que se detuvo el ensayo (03:20)

Tabla 27. Resumen resultados ensayo de permeabilidad al ion cloruro

Como se aprecia en la anterior tabla, la muestra al 20% solo completó 3 horas y 20 minutos de ensayo debido a que en este momento pasaron más de 500 mA por la celda (aproximadamente 502,8 mA) lo cual detuvo el ensayo para esta muestra; sin embargo, se toma la carga estimada por el programa como patrón de comparación¹⁵. Las 3 muestras registraron una calificación de permeabilidad alta al ion cloruro, no obstante, la muestra patrón acumuló un total de carga eléctrica de 6975 C, inferior a lo evidenciado para la muestra al 10% (7021 C) y lo predicho para la respectiva al 20% (9494 C); las diferencias variaron entre 1% (en comparación con muestra al 10%¹⁶) y 18% (en comparación con muestra al 20%¹⁷). En las fotografías anteriores, se aprecia el nivel de oxidación presente en cada muestra; la muestra al 10% de reemplazo de icopor evidenció mayor mancha de oxidación lo cual permite inferir que su permeabilidad al cloruro fue mayor que la muestra patrón, cuya mancha de oxidación fue menor.

El concreto de resistencia elaborado en este proyecto no es apto para condiciones moderadas o severas de exposición a ambientes agresivos (congelamientos, deshielo, sulfatos y susceptibles a corrosión) en ninguna de sus 3 variantes analizadas (0%, 10% y 20% de reemplazo de icopor), dado que evidenciaron una alta permeabilidad a los cloruros. Aún lo anterior, la diferencia entre resultados entre muestra patrón y muestra al 10% no es significativa y la permeabilidad al ion cloruro se podría clasificar similar; no se puede concluir lo mismo con la muestra al 20%, dado que la diferencia es apreciable. Por tanto, por criterio de durabilidad y en base a estos ensayos iniciales, el concreto elaborado con reemplazos de 10% es similar a la muestra patrón.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de desarrollado este trabajo, se tienen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. El reciclaje de materiales permite disminuir el volumen de vertidos en los rellenos sanitarios urbanos y sub-urbanos, abarata la elaboración de nuevos productos y la industria tendería a disminuir el abastecimiento de materias primas introduciendo estos “desechos” como parte de su producción, mejora la calidad de vida de las personas debido indirectamente al beneficio ambiental y económico generado;

¹⁵ El programa utilizado para el ensayo estima cada 5 minutos la carga esperada, en base a la corriente, votaje y duración de la prueba.

¹⁶ Entre cargas reales de muestras al 0% y al 10%

¹⁷ Entre cargas predichas de muestras al 0% y al 20%

menores vertimientos mejor calidad de aire, por ejemplo y menores costos de producción, mayor poder de adquisición. Cualquier proyecto que parta de la idea de reciclar es un beneficio de por sí y de poder llegar a materializarla, la convertiría en algo que vale la pena estudiar.

2. En la construcción el icopor tiene diversas aplicaciones tanto en las edificaciones y construcciones verticales como en obras lineales (vías). De esta forma, se han podido obtener construcciones de menores presupuestos, buenas calidades y con cualidades innovadoras, como ofrecer aislamiento térmico y acústico al igual que cargas muertas menores. Sin embargo, el autor no conoce trabajos relacionados con la elaboración de concretos con adición de icopor triturado en reemplazo de parte del agregado pétreo.
3. En este trabajo de grado se realizaron 3 mezclas diferentes de concreto en base al porcentaje de agregado fino (arena) reemplazado por desecho de icopor molido, a saber, 0%, 10% y 20%.
4. La metodología de triturado del icopor utilizado y propuesta por el autor es la molienda, empleando un molino similar al de carne o de maíz, obteniendo diámetros aproximados de icopor entre 1 mm y 10 mm.
5. Las 3 mezclas elaboradas presentaron buena manejabilidad y un valor de asentamiento dentro del rango de concreto en condiciones normales (entre 5 y 10 cm). El icopor molido incorporado a las mezclas dificultó la elaboración del concreto y por tanto el autor recomienda una metodología de mezclado específica, enunciada en el numeral 7.1 del presente documento.
6. Al aumentar el porcentaje de reemplazo con icopor, las mezclas evidenciaron menor peso unitario (más livianas); no obstante, estos valores se encontraron entre 2.107 kg/m³ (concreto elaborado con 0% de reemplazo) y 1830 kg/m³ (concreto elaborado con 20% de reemplazo), y de acuerdo a la Nota 7 de la norma INV E-410-07, estos concretos elaborados son de peso normal.
7. Los resultados encontrados evidencian que todas las mezclas elaboradas en promedio alcanzaron el 50% de la resistencia requerida a la compresión a los 7 días de curado, a los 14 días la resistencia registrada era aproximada al 100% de la requerida y a los 28 días de endurecido la resistencia obtenida era superior a la solicitada. Las diferencias encontradas entre mezclas no es significativa y por tanto se concluye, a partir de estos resultados, que concretos elaborados con incluso 20% de reemplazo con icopor presentan una resistencia a la compresión similar que concretos tradicionales sin reemplazo alguno.

8. El cálculo del módulo de elasticidad de cada mezcla de evidenció que los valores tanto de esfuerzo como de deformación unitaria se encuentran cercanos entre mezclas de concreto y las diferencias no son significativas.
9. El concreto a 0% de reemplazo muestra el mayor valor de módulo de elasticidad (188.000 kg/cm²). Aunque la probeta a 10% de reemplazo de icopor registró el menor valor de módulo de elasticidad (173.000 kg/cm²), su valor es aproximadamente igual al presentado para la probeta a 20% (174.000 kg/cm²), con solo una diferencia de 0,3%; por tanto y en base a estos resultados, se concluye que el módulo de elasticidad no varía de forma apreciable entre concretos elaborados incluso con 20% de reemplazo con desecho de icopor.
10. El valor de K^{18} citado por el reglamento NSR-10 en el literal C.8.5 “Módulo de elasticidad”, es de 14.863 (f_c y E en kg/cm²). los valores obtenidos para las mezclas ensayadas son inferiores al establecido por la norma para utilizar en el análisis y diseño estructural; para la muestra patrón (probeta al 0%) la diferencia aproximada es de 15%.
11. El valor de K contenido por el reglamento NSR-98 correspondía a 12.500 (f_c y E en kg/cm²), el cual es similar al obtenido para la muestra patrón; para las otras 2 probetas el valor de K registrado es inferior al pre-escrito en la NSR-98, con una diferencia aproximada del 6%.
12. Diversos son los factores que afectan el módulo de elasticidad de un concreto; en algunos existe control por parte del fabricante (cementeras y canteras) y otras en el personal del laboratorio (ensayo y cálculos). Esta variación en las propiedades mecánicas del material es la que, en parte, la filosofía de diseño para estados límites pretende tener en cuenta al momento de introducir el coeficiente de reducción de resistencia. Sin embargo, el autor recomienda aumentar el grado de investigación y el número de ensayos de laboratorio de los concretos acá elaborados que permitan tener mayor certeza de los valores de módulo de elasticidad a utilizar en análisis y diseños.
13. Las muestras a 10% y 20% de reemplazo de icopor registraron menor módulo de rotura que la muestra patrón (0% de reemplazo) como era de esperarse; no obstante, estos valores tan solo difieren en un 7% y 2%, en comparación con la muestra de 10% y 20% de reemplazo respectivamente; una diferencia del 2% se asume despreciable. Por tanto y en base a estos resultados, se concluye que el módulo de rotura del concreto elaborado con un 10% de reemplazo de icopor es similar al concreto patrón. En contraste con la mezcla de 20% de reemplazo con icopor, no es posible llegar a la misma conclusión dado que una diferencia de 7% entre módulos de rotura se considera apreciable.

¹⁸ Factor que multiplicado por la raíz cuadrada de f_c corresponde al módulo de elasticidad

14. Para el ensayo de permeabilidad del cloruro (penetración del ion cloruro), las 3 muestras registraron una calificación de permeabilidad alta al ion cloruro; no obstante, la muestra patrón acumuló un total de carga eléctrica de 6975 C, inferior a lo evidenciado para la muestra al 10% (7021 C) y lo estimado para la respectiva al 20% (9494 C); las diferencias variaron entre 1% (en comparación con muestra al 10%) y 18% (en comparación con muestra al 20%).
15. El concreto de resistencia elaborado en este proyecto no es apto para condiciones moderadas o severas de exposición a ambientes agresivos (congelamientos, deshielo, sulfatos y susceptibles a corrosión) en ninguna de sus 3 variantes analizadas (0%, 10 % y 20% de reemplazo de icopor), dado que evidenciaron una alta permeabilidad a los cloruros y por la relación agua/cemento utilizada. Aún lo anterior, la diferencia entre resultados entre muestra patrón y muestra al 10% no es significativa y la permeabilidad al ion cloruro se podría clasificar similar; no se puede concluir lo mismo con la muestra al 20%, dado que la diferencia es apreciable. Por tanto, por criterio de durabilidad y en base a estos ensayos iniciales, el concreto elaborado con reemplazos de 10% es similar a la muestra patrón.
16. El autor recomienda complementar este estudio con una investigación más profunda, aumentar el número de muestras a probar y ensayos de laboratorio a desarrollar, dado que los resultados encontrados en este trabajo evidencian que el concreto elaborado con desechos de icopor tiene potencial para ser usado como material de construcción.

11. REFERENCIAS

1. AMERICAN SECTION OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS – ASTM. Norma ASTM C1202-05. *Ensayo rápido de permeabilidad del cloruro*. Estados Unidos. 2005.
2. ARGOS. *Cemento gris de uso estructural*. Colombia. 2010
3. BEDOYA, Carlos Mauricio. *El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos sostenibles*. Escuela de Hábitat. Facultad de Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2003.
4. BOJACÁ, Néstor Raúl. *Concreto reciclado como alternativa estructural en la construcción sostenible de obras civiles*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá. 2013

5. CRUZ, Carlos. *Clase Construcción de Edificaciones*. Universidad Nacional. Bogotá. 2009
6. COMISIÓN ASESORA PERMANENTE PARA EL RÉGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES Y LA ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente NSR-10. Colombia. 2012.
7. COMPROMISO EMPRESARIAL PARA EL RECICLAJE – CEMPRE. *Plásticos*. Colombia. <www.cempre.org.co>.
8. FUERTES, Antonio José. *Hacia un desarrollo sostenible en la producción de concreto a partir de desechos de construcción de mampostería de arcilla*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá. 2012.
9. ICOFORMAS. *Usos del icopor, el EPS*. <<http://www.icoformas.com/noticias.html>>
10. ICOPORES DE OCCIDENTE S.A.S. *Recuperación y reciclado de EPS (icopor)*. Bogotá. 12 de octubre de 2006. <http://www.icoporesdeoccidentesas.com.co/index.php?option=com_content&view=article&id=24:recuperacion-y-reciclado-de-eps-icopor&catid=29:el-eps&Itemid=38>
11. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC. Norma NTC 174. *Concretos, especificaciones de los agregados para concreto*. Colombia. 2000.
12. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC. Norma NTC 4025. *Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión*. Colombia. 2006.
13. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC. Norma NTC 5551. *Concretos, durabilidad de estructuras de concreto*. Colombia. 2010.
14. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVIAS. Norma INV E-401-07. *Toma de muestras de concreto fresco*. Colombia. 2007.
15. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVIAS. Norma INV E-402-07. *Elaboración y curado en el laboratorio de muestras de concreto para ensayos de compresión y flexión*. Colombia. 2007.

16. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVIAS. Norma INV E-404-07. *Asentamiento del concreto (slump)*. Colombia. 2007.
17. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVIAS. Norma INV E-405-07. *Masa unitaria del concreto*. Colombia. 2007.
18. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVIAS. Norma INV E-410-07. *Resistencia a la compresión de cilindros de concreto*. Colombia. 2007.
19. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVIAS. Norma INV E-414-07. *Resistencia a la flexión del concreto - método de la viga simple cargada en los tercios de la luz*. Colombia. 2007.
20. LABORATORIO EXPERIMENTAL DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y MINAS. Universidad de Sonora. *Módulo de elasticidad estático del concreto*. México. 2003.
21. LIZARAZO, Juan Manuel. *Ensayos típicos en la determinación de la durabilidad del concreto*. Grupo de Investigación en Análisis y Diseños. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
22. PARK y CHISHOLM. *Polystyrene Aggregate Concrete*. BRANZ. 1999.
23. SOY ECOLOMBIANO. <www.soyecolombiano.com>

12. ANEXOS

12.1 CÁLCULO VOLUMEN DE MEZCLA

ESTADO FRESCO				
ENSAYO	TAMAÑO MUESTRA Lts	NÚMERO DE MUESTRAS Por % de reemplazo	% DE REEMPLAZO	VOLUMEN ENSAYO Lts
Asentamiento	En cada mezcla se tomará el asentamiento			
Masa unitaria	10.00	1.00	3	30.00
TOTAL				30.00

Tabla 28. Volumen de mezcla ensayos en estado fresco

ESTADO ENDURECIDO									
ENSAYO	TAMAÑO PROBETA		TAMAÑO MUESTRA Lts	NÚMERO DE MUESTRAS Por % de reemplazo	% DE REEMPLAZO	NÚMERO DE EDADES A ENSAYAR	EDADES ENSAYO días	NÚMERO DE MUESTRAS Total	VOLUMEN ENSAYO Lts
	ancho/diámetro mm	Longitud mm							
Resistencia a la compresión	100	200	7.00	2	3	3	7, 14 y 28	18	126
Módulo elástico									
Penetración con cloruros									
Resistencia a la flexión	150	500	11.25	2	3	1	28	6	68
TOTAL									194

Tabla 29. Volumen de mezcla ensayos en estado endurecido

12.2 RESULTADOS ENSAYO MÓDULO DE ELASTICIDAD

La Tabla 30 presenta para cada probeta diámetro, altura y área de la muestra, así como las diferentes distancias al equipo de medición de deformaciones.

PROBETA		0% - 1	10% - 1	20% - 1
DIÁMETRO cm	D ₁	10,3	10,0	10,0
	D ₂	10,3	10,0	10,0
	D ₃	10,4	10,1	10,1
	D _{PROM}	10,3	10,0	10,0
ALTURA cm	H ₁	20,1	20,0	19,8
	H ₂	20,2	20,1	19,9
	H ₃	20,1	20,0	19,8
	H _{PROM}	20,1	20,0	19,8
RELACIÓN ALTURA/ DIÁMETRO		1,95	2,00	1,98
ÁREA cm ²		83,9	79,1	79,1
DISTANCIAS DEFORMÍMETRO cm	d _{deformímetro}	5,6	5,9	6,0
	d _{barra}	5,2	5,3	5,4
	h ₁	10,0	9,9	10,0
	h ₂	9,9	9,9	9,6

Tabla 30. Cálculo diámetros, alturas y áreas para determinar módulo de elasticidad

La Tabla 31, Tabla 32 y Tabla 33 presentan los valores de deformación longitudinal de cada probeta y el cálculo del esfuerzo promedio correspondiente, para cada una de las probetas. Las expresiones utilizadas se presentan a la izquierda o debajo del ítem calculado.

PROBETA	0%	
ÁREA cm ²	83,9	A
LONGITUD cm	20,1	L = H _{prom}
FACTOR	1,08	F = d _{deformímetro} /d _{barra}

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR

CARGA kg	DEFORMÍMETRO		PROBETA		ESFUERZO PROMEDIO kg/cm ²
	DEFORMACIÓN 0,01 mm	DEFORMACIÓN cm	DEFORMACIÓN cm	DEFORMACIÓN UNITARIA	
0	0,00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,0
1.000	0,10	1,00E-04	1,08E-04	5,35E-06	11,9
2.000	1,00	1,00E-03	1,08E-03	5,35E-05	23,8
3.000	2,00	2,00E-03	2,15E-03	1,07E-04	35,8
4.000	3,00	3,00E-03	3,23E-03	1,60E-04	47,7
5.000	4,00	4,00E-03	4,31E-03	2,14E-04	59,6
6.000	5,50	5,50E-03	5,92E-03	2,94E-04	71,5
7.000	7,00	7,00E-03	7,54E-03	3,74E-04	83,5
8.000	8,00	8,00E-03	8,62E-03	4,28E-04	95,4
9.000	9,5	9,50E-03	1,02E-02	5,08E-04	107,3
10.000	11,0	1,10E-02	1,18E-02	5,88E-04	119,2
11.000	12,5	1,25E-02	1,35E-02	6,69E-04	131,2
12.000	14,00	1,40E-02	1,51E-02	7,49E-04	143,1
13.000	15,50	1,55E-02	1,67E-02	8,29E-04	155,0
14.000	17,50	1,75E-02	1,88E-02	9,36E-04	166,9
15.000	19,00	1,90E-02	2,05E-02	1,02E-03	178,9
16.000	21,50	2,15E-02	2,32E-02	1,15E-03	190,8
17.000	23,50	2,35E-02	2,53E-02	1,26E-03	202,7
18.000	25,50	2,55E-02	2,75E-02	1,36E-03	214,6
19.000	29,00	2,90E-02	3,12E-02	1,55E-03	226,6
20.000	32,00	3,20E-02	3,45E-02	1,71E-03	238,5
20.900	43,00	4,30E-02	4,63E-02	2,30E-03	249,2

P $\Delta_{\text{deformímetro}}$ $\Delta = \Delta_{\text{deformímetro}} \times F$ $\varepsilon = \Delta/L$ $\sigma_{\text{promedio}} = P/A$

Tabla 31. Cálculo deformaciones unitarias y esfuerzos promedios, módulo de elasticidad – probeta 0%

PROBETA	10%
ÁREA cm ²	79,1
LONGITUD cm	20,0
FACTOR	1,11

A

L = H_{prom}

F = d_{deformímetro}/d_{barra}

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR

CARGA kg	DEFORMÍMETRO		PROBETA		ESFUERZO PROMEDIO kg/cm ²
	DEFORMACIÓN 0,01 mm	DEFORMACIÓN cm	DEFORMACIÓN cm	DEFORMACIÓN UNITARIA	
0,00	0,00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,0
1.000,00	0,10	1,00E-04	1,11E-04	5,56E-06	12,6
2.000,00	1,00	1,00E-03	1,11E-03	5,56E-05	25,3
3.000,00	2,00	2,00E-03	2,23E-03	1,11E-04	37,9
4.000,00	3,50	3,50E-03	3,90E-03	1,94E-04	50,6
5.000,00	5,00	5,00E-03	5,57E-03	2,78E-04	63,2
6.000,00	6,50	6,50E-03	7,24E-03	3,61E-04	75,9
7.000,00	8,00	8,00E-03	8,91E-03	4,45E-04	88,5
8.000,00	9,50	9,50E-03	1,06E-02	5,28E-04	101,2
9.000,00	11,00	1,10E-02	1,22E-02	6,11E-04	113,8
10.000,00	13,00	1,30E-02	1,45E-02	7,22E-04	126,5
11.000,00	14,50	1,45E-02	1,61E-02	8,06E-04	139,1
12.000,00	16,00	1,60E-02	1,78E-02	8,89E-04	151,8
13.000,00	18,00	1,80E-02	2,00E-02	1,00E-03	164,4
14.000,00	20,00	2,00E-02	2,23E-02	1,11E-03	177,1
15.000,00	22,00	2,20E-02	2,45E-02	1,22E-03	189,7
16.000,00	24,00	2,40E-02	2,67E-02	1,33E-03	202,4
17.000,00	27,00	2,70E-02	3,01E-02	1,50E-03	215,0
18.000,00	31,00	3,10E-02	3,45E-02	1,72E-03	227,7
19.000,00	41,00	4,10E-02	4,56E-02	2,28E-03	240,3
19.600,00	43,00	4,30E-02	4,79E-02	2,39E-03	247,9

$$P \quad \Delta_{\text{deformímetro}} \quad \Delta = \Delta_{\text{deformímetro}} \times F \quad \varepsilon = \Delta/L \quad \sigma_{\text{promedio}} = P/A$$

Tabla 32. Cálculo deformaciones unitarias y esfuerzos promedios, módulo de elasticidad – probeta 10%

PROBETA	20%	
ÁREA cm ²	79,1	A
LONGITUD cm	19,8	L = H _{prom}
FACTOR	1,11	F = d _{deformímetro} /d _{barra}

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON DESECHOS DE ICOPOR

DEFORMÍMETRO

PROBETA

CARGA kg	DEFORMACIÓN 0,01 mm	DEFORMACIÓN cm	DEFORMACIÓN cm	DEFORMACIÓN UNITARIA	ESFUERZO PROMEDIO kg/cm ²
0,00	0,00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,0
1.000,00	0,10	1,00E-04	1,11E-04	5,60E-06	12,6
2.000,00	1,50	1,50E-03	1,67E-03	8,40E-05	25,3
3.000,00	2,50	2,50E-03	2,78E-03	1,40E-04	37,9
4.000,00	4,50	4,50E-03	5,00E-03	2,52E-04	50,6
5.000,00	6,00	6,00E-03	6,67E-03	3,36E-04	63,2
6.000,00	7,00	7,00E-03	7,78E-03	3,92E-04	75,9
7.000,00	8,50	8,50E-03	9,44E-03	4,76E-04	88,5
8.000,00	10,00	1,00E-02	1,11E-02	5,60E-04	101,2
9.000,00	11,50	1,15E-02	1,28E-02	6,44E-04	113,8
10.000,00	13,00	1,30E-02	1,44E-02	7,28E-04	126,5
11.000,00	15,00	1,50E-02	1,67E-02	8,40E-04	139,1
12.000,00	16,50	1,65E-02	1,83E-02	9,24E-04	151,8
13.000,00	17,50	1,75E-02	1,94E-02	9,80E-04	164,4
14.000,00	20,50	2,05E-02	2,28E-02	1,15E-03	177,1
15.000,00	23,00	2,30E-02	2,56E-02	1,29E-03	189,7
16.000,00	25,50	2,55E-02	2,83E-02	1,43E-03	202,4
17.000,00	29,00	2,90E-02	3,22E-02	1,62E-03	215,0
18.000,00	33,50	3,35E-02	3,72E-02	1,88E-03	227,7
18.700,00	42,00	4,20E-02	4,67E-02	2,35E-03	236,5

P $\Delta_{\text{deformímetro}}$ $\Delta = \Delta_{\text{deformímetro}} \times F$ $\varepsilon = \Delta/L$ $\sigma_{\text{promedio}} = P/A$

Tabla 33. Cálculo deformaciones unitarias y esfuerzos promedios, módulo de elasticidad – probeta 20%