

Determinación del desempeño físico-mecánico de vigas de concreto reforzado con la implementación de cementos terciarios con vidrio reciclado


CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Rommel Cuevas Kauffmann, Ing. Miguel Peralta Salas, Ing. Minor Murillo Chacón, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.


Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director


Ing. Rommel Cuevas Kauffmann.
Profesor Guía


Ing. Miguel Peralta Salas.
Profesor Lector


Ing. Minor Murillo Chacón.
Profesor Observador

Abstract

This Project sought to find the mechanical-physical properties acquired by reinforced concrete beams with the inclusion of vitreous material, taking into account a study since the point of view of the material like hydraulic concrete, and evaluation of reinforced concrete elements designed and built to scale and capacity of the laboratory, subjecting them to flexion loads and evaluating different characteristics of the study.

The vitreous material as a substitute for a percentage of the hydraulic cement of a hydraulic concrete mix, can behave as a water reducer, densifier and retarder of the acquisition of compressive strength, so it was sought to study holistically, from the point of view of gray material itself, even in composite elements (hydraulic concrete and reinforcing steel). All of the above in order to improve or achieve the typical behavior of different mixtures of hydraulic concrete (CAD 700 and high strength concrete of 400 kg / cm²), taking into account resistant behaviors, and electron scanning microscopy and diffractometry studies.

Keywords: Concrete, vitreous material, concrete beams

Resumen

El presente proyecto busca identificar las propiedades físico mecánicas adquiridas por vigas de concreto reforzado con la inclusión de material vítreo, tomando en cuenta un estudio desde el punto de vista del concreto hidráulico como material, seguido de la evaluación de los elementos de concreto reforzado diseñados y construidos a escala y capacidad del sitio de ensayo, sometiendo los mismos a cargas de flexión y evaluando distintas características propias del estudio.

El material vítreo, como sustituyente de un porcentaje del cemento hidráulico en una mezcla de concreto hidráulico, puede comportarse como reductor de agua, densificador y retardador de la adquisición de la resistencia a la compresión, por lo que se buscó estudiarlo de forma integral, desde el punto de vista propio del material cementante, hasta en elementos compuestos (concreto hidráulico y acero de refuerzo). Todo lo anterior para poder mejorar o alcanzar los comportamientos típicos de distintas mezclas de concreto hidráulico (CAD 700 y concretos de alta resistencia de 400 kg/cm²), tomando en cuenta comportamientos resistentes y estudios físicos mediante el uso de microscopía de barrido electrónico y difracción.

Palabras clave: concreto, material vítreo, vigas de concreto, difracción.

Determinación del desempeño físico-mecánico de vigas de concreto reforzado con la implementación de cementos terciarios de vidrio reciclado

KARYNA ROJAS CALDERÓN

Proyecto de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Febrero del 2018

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO	1
RESUMEN EJECUTIVO	3
ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	5
METODOLOGÍA	21
RESULTADOS	27
MICROSCOPIA DE BARRIDO ELECTRÓNICO	27
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO.....	36
DISEÑO DE ELEMENTO SIMPLE	44
FALLA DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO	50
ANÁLISIS DE RESULTADOS	51
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
APÉNDICES	75
ANEXOS	82
REFERENCIAS	84

Prefacio

En Costa Rica, cada día las construcciones se llevan a cabo con la utilización de materiales tradicionales para la elaboración del concreto hidráulico (cemento hidráulico, aditivos, agregado grueso y fino), sin dar paso al aprovechamiento de los materiales de desecho que pueden presentar un gran potencial de reciclaje e inclusión y traen consigo grandes beneficios en el desempeño de elementos aplicables, sector social, ambiental e incluso económico.

La investigación o realización de proyectos académicos es una herramienta fundamental para el estudio y comprobación de que los materiales pueden ser seleccionados y verificados como influyentes en los elementos sismo resistentes, abriendo puertas a una tecnología que va de la mano con el ambiente.

Existen diversas investigaciones a nivel internacional en donde se ha desarrollado el estudio del comportamiento del concreto hidráulico con la inclusión de material vítreo, una de ellas se titula *Utilización de vidrio reciclado como remplazante de arena en concreto hidráulico* de Taha y Nounu (2009), en donde se estudia el material vítreo como material sustituto de cantidades del cemento hidráulico, con la verificación de ensayos de resistencia a la compresión y tensión diametral. Además, se han realizado estudios en cuanto a las reacciones a nivel microscópico, presentes en la mezcla de cemento hidráulico, con la inclusión de material molido tomado como una pasta cementante, entre ellos el titulado: *Reacciones químicas del vidrio molido como componente del cemento hidráulico* de Dyer y Dhir (2001).

Así mismo, se llevan a cabo evaluaciones en el comportamiento del estado fresco de la mezcla de concreto hidráulico, con sustituciones porcentuales de agregado fino por vidrio molido en distintas granulometrías, como el estudio *Efecto de la*

sustitución parcial de agregado fino por vidrio de desecho molido en una mezcla de concreto hidráulico de los autores Olofinnade, Ndambuki, Ede y Olukanni (2016). También, existen estudios para la optimización de las cantidades de vidrio reciclado molido como sustituyente del agregado fino en una mezcla de concreto hidráulico, para obtener el mejor resultado en cuanto a la resistencia a compresión obtenida por los especímenes en estudio, por ejemplo, el titulado *Resistencia a la compresión del concreto hidráulico con sustituciones parciales de agregado fino por vidrio reciclado* de Hamid y Zubir (2014).

Por otra parte, existen investigaciones del comportamiento de la trabajabilidad en estado fresco de la mezcla (asentamiento) y endurecido en resistencia a la compresión y tensión diametral, en concretos hidráulicos con sustitución de agregado fino presente, por vidrio de desecho, como la titulada *Comportamiento del concreto hidráulico con remplazo parcial del agregado fino por vidrio molido de desecho* de Otunyo y Okechukw (2017).

A nivel nacional, existe el proyecto de graduación titulado *Estudio de vidrio reciclado como componente para la elaboración de cementos terciarios*, realizado por Espinoza (2017). En donde se da una evaluación estadística de las mejores dosificaciones porcentuales de reemplazo del cemento hidráulico por vidrio blanco molido, en una pasta cementante. El presente proyecto busca el seguimiento de dicho estudio, pero ahora, aplicando las dosificaciones que brindaron las mejores propiedades a la pasta cementante, en tecnología del concreto hidráulico, como lo es el CAD700, tomando en cuenta ensayos de resistencia a la compresión, tensión diametral y módulo de rotura a especímenes de concreto hidráulico, seguido de una evaluación

física y mecánica de elementos simples de concreto reforzado (vigas reforzadas).

El desarrollo de este proyecto tiene un gran impacto de manera ambiental, debido a que la materia prima (material vítreo) fue suministrada por el Departamento de Administración de Mantenimiento del Tecnológico de Costa Rica (TEC), cuya fuente fueron los desechos de ventanales producto de las remodelaciones que han desarrollado en el TEC, por lo que, adicionalmente, la comprobación de un impacto positivo en la utilización de este material dará un camino recorrido en cuanto a la inclusión de materiales reciclados en las construcciones de Costa Rica. Además, brindará un aporte de conocimiento en cuanto a la utilización de estos materiales reciclados en concretos hidráulicos con componentes nacionales, tales como el cemento hidráulico y agregados de la zona.

Por otra parte, se quiere agradecer de sobremanera a las personas que han ayudado para que este estudio se lleve a cabo. A Dios, primeramente, por darme mucha sabiduría y paciencia durante todo el aprendizaje que ha representado para mí la etapa universitaria; a mi familia, por todo su amor y apoyo incondicional; a mis profesores, el ingeniero Rommel Cuevas, por haberme guiado durante mi proyecto de investigación y de graduación; al arquitecto Carlos Ugalde y a la ingeniera Ana Grettel Leandro que siempre me han brindado muchos consejos de aliento, amigos incondicionales durante el proceso; a la empresa Productos de Concreto (PC), al ingeniero Minor Murillo, por creer en mí y aportar mucho a mi crecimiento profesional; a los técnicos de PC, don William Montero y don Eduardo Artavia, por haber trabajado tanto a mi lado e indicarme el mejor camino en todos los procedimientos del proyecto, además, a la Escuela de Ingeniería en Construcción y al Tecnológico de Costa Rica, por haberme puesto tantas pruebas que sirvieron mucho para mi crecimiento personal y profesional.

“Tan luchadora de tanto, tan dueña de nada. Soy testigo de los que llegan para quedarse y de los que mejor nos vemos luego... Cuando finalmente jure hacerte crecer y progresar... te extrañaré”. Rojas K. (2017).

Resumen ejecutivo

Este proyecto se llevó a cabo tanto en las instalaciones de Productos de Concreto (PC), en la planta de San Rafael de Alajuela, como en los laboratorios correspondientes a la Escuela de Ingeniería en Construcción y Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales .

Se buscó realizar un estudio de vigas de concreto reforzado con la inclusión de material vítreo dentro de su cantidad cementante (vidrio blanco molido), evaluando el desempeño físico mecánico e identificando, primeramente, el comportamiento de porcentajes de sustitución de cemento hidráulico por material vítreo, en mezclas de concreto hidráulico de alto desempeño. Los porcentajes de sustitución utilizados a lo largo del proyecto fueron producto del estudio realizado en el proyecto de graduación titulado: *Estudio de vidrio reciclado como componente para la elaboración de cementos terciarios*, realizado por el ingeniero Edwin Espinoza.

Se tomó en cuenta el reglamento correspondiente al ACI (American Concrete Institute), ASTM (American Society for Testing and Materials) y CSCR10 (Código Sísmico de Costa Rica), para poder aplicar ensayos tales como resistencia a la compresión y tensión diametral, módulo de ruptura en vigas de concreto hidráulico y diseño de elementos de concreto reforzado. Además, se contó con estudios tales como pérdidas de masa, microscopía de barrido electrónico y difracción, que ayudaron en el análisis de identificación de la dosificación, la cual mejoraba o igualaba las propiedades típicas de un concreto hidráulico sin material vítreo.

Se identificaron los comportamientos adquiridos por

las mezclas de concreto hidráulico en comparación con uno que no incorpora en su matriz el material vítreo y se determinó que dicho porcentaje correspondía a un 23 % de sustitución, que no llegaba a igualar la resistencia a la compresión de la mezcla patrón en estudio (diferencia del 16 %), pero que sí llegaba a un comportamiento similar al de una mezcla CAD700, comúnmente elaborada en la planta de PC.

En cuanto a los resultados obtenidos por el ensayo de tensión diametral, la mezcla de concreto hidráulico que incluía material vítreo mostraba comportamientos superiores a los de la misma, sin la inclusión de material vítreo. De igual forma, se determinaron bondades atribuidas por el material vítreo a una mezcla de concreto hidráulico, tales como la densificación de la mezcla en estado fresco y cambio en el tipo de falla en cilindros de concreto hidráulico, pues los especímenes que contenían material vítreo llegaban a una falla con desprendimientos ligeros alrededor de su integridad, provocando una pérdida de masa del 12 %, mientras que los especímenes de la mezcla patrón incurrían a una falla explosiva con gran desprendimiento de su integridad (45 %), todos a una edad de falla de 28 días.

Los ensayos de microscopía de barrido electrónico y difracción fueron importantes para poder explicar el contenido elemental de cada uno de los componentes utilizados en las mezclas de concreto hidráulico, pues se conoció que los agregados pétreos podrían encontrarse contaminados y que los mismos pudieran ser culpables de la aparición de fenómenos tales como oxidación o RAS (reacción álcali-agregado), perjudiciales en la reacción química de los concretos

y en la adquisición de resistencia.

Se elaboraron vigas de concreto hidráulico para la determinación de módulo de ruptura, dando consigo grandes resultados resistentes a la flexión (9,4 MPa a 28 días), que superaban en un 34 % al resultado adquirido por un concreto hidráulico sin la inclusión de material vítreo (6,2 MPa), demostrando con lo anterior y con los resultados obtenidos por los ensayos de tensión diametral, que la inclusión de material vítreo podía provocar que los elementos o especímenes en estudio tengan grandes bondades en comportamientos de flexo-compresión.

El diseño de la viga de concreto reforzado se desarrolló para dos elementos cuyas dimensiones abarcan los 150x250 mm con 2 metros de longitud, las mismas concuerdan con la capacidad del sitio de ensayo. Tomando una de las mismas como patrón (concreto hidráulico sin material vítreo) y otra que incluyera material vítreo en su matriz con el porcentaje de 23% de sustitución de cemento hidráulico. La cuantía de acero fue la misma para los dos elementos para que no fuera una variable en el comportamiento adquirido por los elementos, tomando entonces, 4 varillas longitudinales No4 (12,70 mm Grado 60) y aros con varilla No3 (9,50 mm Grado 60) a cada 10 cm, necesarias para soportar dos cargas puntuales de 2180 kg, establecidas y acordadas dentro de las capacidades del sitio de ensayo. Las cargas de diseño contemplaron una carga aplicada por el pistón de carga, y el peso muerto calculado de los elementos en estudio. Además, el concreto hidráulico con el que se elaboraron las vigas de concreto reforzado no fue el mismo de las etapas anteriores de este proyecto, pero, como se mencionó primeramente, el producto de las etapas anteriores fue únicamente la identificación del porcentaje de sustitución que brindara las mejores propiedades físico mecánicas.

Durante la ejecución del ensayo de los elementos de concreto reforzado, el proceso de agrietamiento se dio de igual forma para los dos estudiados y se alcanzó el mismo tipo de falla por compresión localizada en la parte superior derecha de aplicación de falla. En esta etapa del proyecto, la viga de concreto reforzado que incluía material vítreo en su matriz, alcanzó una carga última de 7051,4 kg, inferior a la de una viga de concreto reforzado sin la inclusión

de material vítreo 10 606 kg, sin embargo, la carga residual una vez encontrada la falla del elemento fue de un 67 % superior a la viga patrón (sin material vítreo), además de la obtención de una deformación del 23,9 % superior a la obtenida por la viga patrón. Con lo anterior, se puede afirmar lo descrito por las etapas preliminares, en donde se podía observar que los elementos que contuvieran material vítreo se podían comportar de forma más flexible, sin incurrir a una fuerte pérdida de peso, pues la viga que contenía material vítreo tuvo una menor área de afectación.

Realizado el ensayo de los elementos en estudio, se hizo el corte de una parte de la sección transversal, para poder observar el estado del acero de refuerzo y del concreto. Se identificó que las varillas se encontraban en perfectas condiciones, pues no se presentaba algún tipo de deformación, pues la falla se enfocó completamente a las propiedades del concreto hidráulico.

También se observó que las huellas de las varillas en el concreto se encontraban limpias y sin ningún indicio de oxidación, preocupación adquirida por la identificación de elementos hallados en los agregados pétreos, mediante los análisis de microscopía de barrido electrónico. Además de la aparición de espacios varios o burbujas ocasionadas durante la elaboración y moldeo de las vigas de concreto, por la falta de compactación y acomodo del material, pues, durante el mencionado proceso, se imposibilitó contar con un equipo especializado para dicha tarea.

De manera global, por medio de este proyecto se dio un estudio amplio de la inclusión de material vítreo en mezclas de concreto hidráulico como sustituto parcial del cemento hidráulico y, aunque no se igualaron algunos comportamientos mecánicos adquiridos por los homólogos patrón, las grandes propiedades adquiridas como la poca desintegración de los elementos y la flexibilidad adquirida por los especímenes, sea de concreto masivo o reforzado (cilindros o vigas), mostrará que la inclusión de materiales reciclados como nuevas tecnologías de la construcción puede impactar de manera muy positiva en el sector construcción, desempeño de las estructuras, industria y manejo de residuos.

Antecedentes y Marco teórico

Las diversas investigaciones a nivel internacional se han llevado a cabo con el estudio del comportamiento del concreto hidráulico con la inclusión de material vítreo, dentro de estas se puede mencionar la titulada: *Utilización de vidrio reciclado como remplazante de arena en concreto hidráulico* de Taha y Nounu (2009), en donde se estudia el material vítreo como material sustituto de cantidades del cemento hidráulico, con la verificación de ensayos de resistencia a la compresión y tensión diametral. Además, se han realizado estudios en cuanto a las reacciones a nivel microscópico, presentes en la mezcla de cemento hidráulico con la inclusión de material molido tomado como una pasta cementante, por ejemplo, el estudio titulado *Reacciones químicas del vidrio molido como componente del cemento hidráulico* de Dyer y Dhir (2001).

Como parte de las evaluaciones en el comportamiento del estado fresco de la mezcla de concreto hidráulico con sustituciones porcentuales de agregado fino por vidrio molido en distintas granulometrías, se encuentra el proyecto titulado *Efecto de la sustitución parcial de agregado fino por vidrio de desecho molido en una mezcla de concreto hidráulico* de Olofinnade, Ndambuki, Ede y Olukanni (2016). Así mismo, estudios para la optimización de las cantidades de vidrio reciclado molido como sustituyente del agregado fino en una mezcla de concreto hidráulico, para obtener el mejor resultado en cuanto a la resistencia a compresión obtenida por los especímenes en estudio, como ejemplo se encuentra el estudio titulado: *Resistencia a la compresión del concreto hidráulico con sustituciones parciales de agregado fino por vidrio reciclado* de Hamid y Zubir (2014).

También se cuenta con investigaciones del comportamiento de la trabajabilidad en estado fresco de la mezcla (asentamiento) y endurecido en resistencia a la compresión y tensión diametral en concretos hidráulicos con sustitución de agregado fino presente, por vidrio de desecho, como el estudio titulado: *Comportamiento del concreto hidráulico con remplazo parcial del agregado fino*

por vidrio molido de desecho de Otunyo y Okechukw (2017). Y, finalmente, se toma en cuenta el estudio más reciente, mediante el proyecto de graduación *Estudio de vidrio reciclado como componente para la elaboración de cementos terciarios*, realizado por el ingeniero Edwin Espinoza, el cual es utilizado como base para el presente estudio.

Normativa

Los procedimientos y ensayos aplicados durante el proyecto cumplen con las directrices de las normas ASTM (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales) y el ACI (Instituto Americano del Concreto), es la base con la que se desarrollarán las investigaciones de este proyecto. Las pruebas realizadas a los especímenes se especifican a continuación.

Práctica estándar para preparación de instrucciones de precisión y sesgo para los métodos de prueba de materiales de construcción (ASTM C670-15)

Brinda una guía para la preparación de precisión y sesgos que complementa los resultados estadísticos tomados en una prueba (ASTM C670-15).

Desviación estándar:

De un solo operador, Sr, (o coeficiente de variación, CVr), (adj.): es la desviación estándar (o coeficiente de variación) de las determinaciones de ensayo obtenidas de especímenes de ensayo idénticos, elaborados por un solo operador, utilizando el mismo

equipo, en el mismo laboratorio y durante un periodo relativamente corto de tiempo (ASTM C670).

Coeficiente de variación

El coeficiente de variación (relación entre la desviación estándar y el promedio expresado como un porcentaje) se utiliza si la desviación estándar es proporcional al nivel de las características que se están midiendo (ASTM C670).

Método de prueba estándar para densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado grueso y fino (ASTM C127-15, ASTM C128-15)

Gravedad específica

Relación entre la masa de un volumen unitario de un material y la masa igual al volumen de agua a la misma temperatura (ASTM C128-15).

Gravedad específica aparente

Relación entre el peso de un volumen unitario de la porción impermeable del agregado a cierta temperatura y peso de igual volumen de agua a la misma temperatura (ASTM C128-15).

Absorción

Incremento del peso del agregado debido al agua acumulada, sin incluir el agua adherida a la superficie externa del agregado. Expresado en porcentaje (%) respecto al peso seco (ASTM C128-15).

La determinación de los parámetros anteriormente mencionados es importante para poderlos utilizar en la elaboración de diseños de mezcla de concreto hidráulico, ya que con los mismos se puede encontrar la proporción y estimación del volumen ocupado por el agregado grueso y como control de cantidad de agua en el caso que se necesiten correcciones por humedad.

Método de prueba estándar para densidad aparente (Peso unitario) y vacíos en el agregado (ASTM C29-09)

Densidad bruta

Masa bruta por unidad de volumen del agregado, en el cual incluye el volumen de las partículas del agregado y el volumen de vacíos entre las partículas. Peso unitario del agregado: se define como la masa por unidad de volumen del agregado. Al igual que la anterior normativa, la determinación de dichos parámetros tendrá como objetivo la utilización de estos en la elaboración de la mezcla de concreto hidráulico.

Método de prueba estándar para el análisis de tamices para agregados finos y gruesos (ASTM C136-06)

Esta norma cubre la determinación de distribución y tamaño de partícula en agregados finos y gruesos para el control de calidad de diferentes productos pétreos. La norma recomienda la utilización de tamices cuya malla contiene diferentes tamaños graduados, por el que se determina cuál es el peso pasando o retenido, en cada uno de los mismos. A continuación, se muestran los tamices por utilizar.

Cuadro 1: Tamaños de tamices para el estudio granulométrico de agregado grueso

Tamaño de abertura (mm)	Tamaño de abertura (pulg)
75,00	3
53,00	2
37,50	1 ½
26,50	1
19,00	¾
9,50	3/8
4,75	No4

Fuente: ASTM C136

Cuadro 2: Tamaño de tamices para el estudio de agregado fino

Tamaño de abertura (mm)	Tamaño de abertura
4,75	#4
2,36	#8
1,18	#16
0,60	#30

0,30	#50
0,15	#100
0,075	#200

Fuente: ASTM C136

En este caso, fue necesario el seguimiento de las recomendaciones de la misma para poder determinar la distribución granulométrica de los agregados gruesos y finos, correspondientes al concreto hidráulico con el que se construyeron las vigas de concreto reforzado. Con los datos resultantes, se obtuvieron, además, características tales como Módulo de Finura para agregados finos (sumatoria de los pesos retenidos acumulados de los tamices de 9,50 mm (3/8) a 0,15 mm (No100), dividido entre 100), para poder dar un parámetro de finura, tomando en cuenta 2,1 como una arena fina o 3,2 arena gruesa.

Práctica estándar para la realización y curado de especímenes de concreto en laboratorio (ASTM C192-16^a):

Brinda las recomendaciones necesarias para poder llevar un control adecuado de la preparación de los especímenes de concreto hidráulico en laboratorio, tanto en estado fresco como en endurecido, hasta llegar a la edad definida para efectuar la prueba asignada. La norma recomienda la elaboración de especímenes cilíndricos, especificados en la siguiente tabla:

Tabla 1: Método de compactación y cantidad de capas para el moldeo de diferentes dimensiones de moldes

Tipo y tamaño de espécimen (Diámetro de especímenes (mm))	Tipo de compactación	Número de capas
75 a 100	Consolidación	2
150	Consolidación	3
225	Consolidación	4
Arriba de 225	Vibración	2

Fuente: Realización y curado de especímenes de concreto en laboratorio (ASTM C192-16^a).

Para el procedimiento de curado, los especímenes deben permanecer en temperaturas de 23,0 a 62,0°C [73,5 a 143,5°F], desde que los especímenes fueron desmoldados hasta el momento de aplicación (ASTM C192-16^a).

Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (ASTM C39-17)

Este método de prueba determina el esfuerzo a la compresión de especímenes de concreto cilíndricos y se limita a concretos cuyo peso unitario sea mayor a los 800 kg/m³ [50 lb/ft³]. En este caso, el concreto en estudio contará con un peso unitario de 2400 kg/m³. La cantidad de especímenes moldeados deberá cumplir con un mínimo para poder determinar el resultado promedio de resistencia a la compresión, junto con un coeficiente de varianza y rango permisible especificados en la tabla 3. Además, la prueba de resistencia a la compresión se podrá determinar como mínimo a las edades citadas en la tabla 2, cumpliendo con la tolerancia de aplicación de prueba.

Tabla 2: Edades de especímenes moldeados para la determinación de resistencia a la compresión

Edad de prueba	Tolerancia permisible
24 h	± 0,5 h
3 días	±2 h
7 días	± 6 h
28 días	± 20 h
90 días	±2 días

Fuente: ASTM C39: Prueba de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto

Los cilindros sometidos a ensayos de resistencia a la compresión pueden presentar comportamientos de disipación de carga a través de su integridad, clasificados en diferentes tipologías de falla, citados también por la norma ASTM C39:

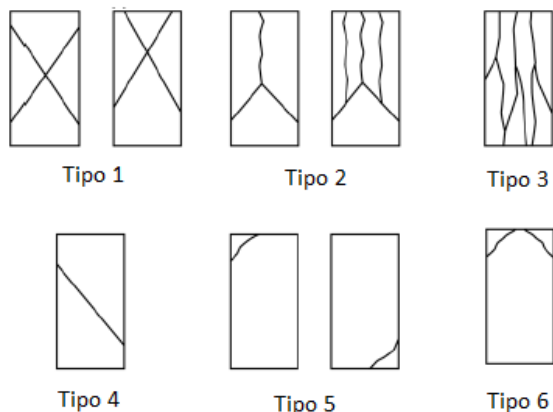


Figura 1: Tipos de falla en cilindros de concreto para resistencia a la compresión. Fuente: ASTM C39. Prueba de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

La identificación del comportamiento adquirido por los especímenes ensayados, durante la etapa correspondiente a este estudio, fue parte del análisis de comparación entre los concretos hidráulicos CAD 700 (ampliado con detalle de definición en este mismo apartado de este documento) y el mismo modificado con material vítreo.

Tabla 3: Coeficiente de variación y rango de aceptabilidad para resultados de resistencia a la compresión.

	Coeficiente de variación	Rango aceptable de cilindros individuales	
		2 cilindros	3 cilindros
150x 300mm			
Condiciones de laboratorio	2,4 %	6,6 %	7,8%
Condiciones de campo	2,9 %	8,0 %	9,5 %
100 x 200mm			
Condiciones de laboratorio	3,2 %	9,0 %	10,6 %

Fuente: ASTM C39: Prueba de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto

Ensayo de tensión diametral de especímenes cilíndricos de concreto (ASTM C496-17)

Este método de prueba consiste en aplicar una fuerza a la compresión a lo largo del espécimen cilíndrico de concreto. Esta carga induce a una tensión en un plano contenido por la aplicación de la

carga y una alta compresión relativa inmediata a lo largo de la aplicación de la carga. (ASTM C496-17).

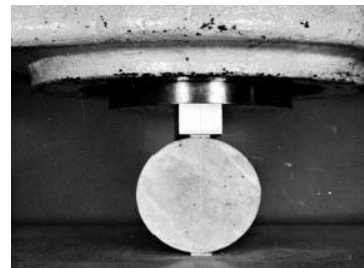


Figura 2: Especimen cilíndrico de concreto sometido a la prueba de tensión diametral. Fuente: ASTM C496-17. Prueba de tensión diametral de especímenes cilíndricos de concreto.

La cantidad de especímenes deberá ser como mínimo dos para determinar un resultado promedio de la resistencia a la tensión diametral, cuya desviación no deberá exceder el 5 % y un rango de variación individual del 14 % (ASTM C496-17).

Ensayo estándar para flujo para mortero de cemento hidráulico (ASTM C1437-15)

Este método consiste en determinar el flujo de morteros de cementos hidráulicos y pastas con demás tipologías de materiales adicionados en estado fresco. En el mismo, se debe realizar una mezcla en estudio para que, mediante la utilización de un cono truncado y una mesa firme de superficie plana, se evalúe la extensión que la mezcla alcanza una vez que se deposita en el cono y que, finalmente, es retirado para reportar el dato que indica la longitud de extensión de la pasta. Esta norma toma en cuenta una precisión del 4 % para un solo operador, entre todos los datos de al menos tres mediciones de la extensión de la mezcla.

Ensayo estándar de resistencia a la flexión del concreto (ASTM C78-16)

Este método es utilizado para determinar la capacidad flexional de especímenes preparados acordes a las normas ASTM C42/C42M o ASTM C31/C31 o ASTM C192. Los resultados de cargas obtenidos son utilizados para que, mediante las distintas ecuaciones, se pueda determinar el módulo

de rotura correspondiente al diseño de mezcla en estudio (ASTM C78-16).

Las dimensiones de los moldes por utilizar dependen primeramente del tamaño máximo del agregado grueso. Para mezclas que utilizan agregados con tamaños entre 9,0-37,5 mm, los moldes corresponderán a dimensiones de sección transversal de 150x150 mm (ASTM C78-16).

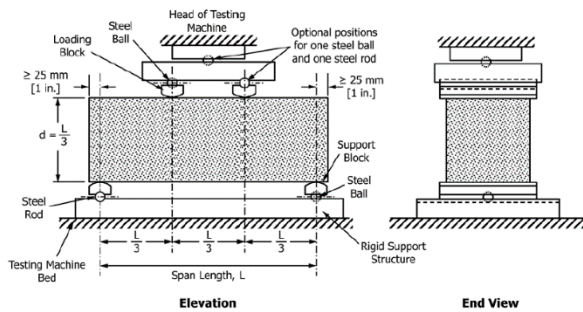


Figura 3: Esquema para la falla flexional de una viga de concreto hidráulico. Fuente: ASTM C78. Prueba de resistencia a la flexión del concreto.

La determinación del módulo de ruptura del concreto hidráulico en estudio, de manera indirecta, se llevó a cabo por medio del estudio *Resistencia a la compresión y módulo de ruptura de mezclas de concreto medidos en núcleos y vigas extraídos en campo*, realizado por el ingeniero Alejandro Navas y el ingeniero Mauricio Moya; en donde, basados en los acuerdos realizados por el comité del ACI 318 y 363, propusieron distintas ecuaciones que aseguran la precisión entre un dato de Módulo de ruptura, calculado por medio de la elaboración de vigas de concreto hidráulica (según el procedimiento citado por el ensayo ASTM C78-16) y la resistencia a la compresión de cilindros de concreto hidráulico. Los datos de precisión rondan los porcentajes de 7 a 10% de error.

Especificación estándar para barras de acero de carbono deformadas y lisas para refuerzo de concreto (ASTM A615-16)

Esta especificación cubre las características de barras de acero corrugadas y lisas para concreto reforzado, conteniendo adiciones y aleaciones correspondientes a su comportamiento mecánico. Están marcadas por la letra S, debido al tipo de acero y son las varillas que más se utilizan en Estados Unidos.

La norma establece cinco niveles de resistencia de acero por utilizar:

- 280MPa (40 000 psi), grado 40
- 420 MPa (60 000 psi), grado 60
- 520 MPa (75 000 psi), grado 75
- 550 MPa (80 000 psi), grado 80
- 690 MPa (100 000 psi), grado 90

Actualmente, los diseños de elementos de concreto reforzado obedecen al grado 40 y 60, debido a que las ecuaciones de diseño recomendadas por el ACI318-14, fueron contempladas para este tipo de características de acero de refuerzo. De la misma forma, durante este proyecto, el acero de refuerzo utilizado correspondió a un grado 60.

Tabla 4: Caracterización de barras de acero para concreto reforzado

Designación de barra (No)	Peso nominal (kg/m)	Dimensión nominal	
		Diámetro (mm)	Área (mm ²)
3	0,560	9,5	71
4	0,994	12,7	129

Fuente: ASTM A615

Código Sísmico de Costa Rica (CSCR-2010)

Este código sísmico establece los requisitos mínimos para el análisis, diseño y construcción sismorresistente de edificaciones y obras afines que se construyan en el territorio de la República de Costa Rica. Toma en cuenta un diseño gobernado por desplazamientos y deformaciones internas, pues ese es el efecto que induce la acción sísmica sobre la estructura (CSCR-2010).

La sección mayormente utilizada en este estudio es la tres, en el capítulo 8 de *Requisitos para el concreto estructural*, para los elementos sometidos a comportamiento flexionante y para poder acatar los requerimientos de ensamble del refuerzo de los elementos de concreto reforzado.

Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-14)

Tal como lo indica su título *Requisitos de Reglamento para concreto estructural*, el documento se redacta para ser incluido como parte de un reglamento de construcción adoptado legalmente y como tal, difiere substancialmente de otros documentos que presentan especificaciones, procedimientos recomendados o ayudas y manuales de diseño (ACI 318-14).

Dicho documento fue tomado en cuenta en este estudio, para el cumplimiento de los requisitos esenciales de diseño de las vigas de concreto reforzado, como elemento simple de estudio con concreto hidráulico con material vítreo incluido como cemento terciario. Los apartados utilizados para este estudio abarcan el capítulo 3: Materiales, capítulo 5: Calidad del concreto, mezclado y colocación; capítulo 7: Detalles de refuerzo, capítulo 8: Análisis y diseño, capítulo 10: Flexión y cargas axiales, capítulo 11: Cortante y Torsión.

Para la definición y actualización de distintos parámetros estructurales por discutir, se crean diferentes comités con la asistencia de diversos ingenieros y personas que se desempeñan en el área y que son provenientes de todas partes del continente. Uno de los comités que intervienen en estos criterios es el comité 363, en donde se definieron distintos criterios correspondientes al cálculo del módulo de ruptura del concreto, basándose en la resistencia a la compresión del mismo en cilindros de concreto de tamaño estándar, una vez alcanzados los 28 días ($f'c$).

Reglamento Técnico RTCR-479-2015 Materiales de Construcción, cementos hidráulicos

El reglamento técnico tiene por objeto establecer los parámetros y las características técnicas que deben cumplir los cementos hidráulicos, para su uso en el territorio nacional; sean estos producidos localmente o importados. Así como establecer la clasificación de dichos cementos por tipos y los requisitos de etiquetado que deben contener los cementos a granel y empacados (RTCR 479, 2015).

Diseño del experimento

El diseño del experimento se basa en conocer las cantidades de variables que pueden influir en el resultado final del estudio, por lo que, en este estudio, se utilizó el fundamento de diseños factoriales, en donde la expresión 2^k incluye el número de factores influyentes en el experimento, el resultado de la expresión anterior permite conocer la cantidad de repeticiones de los bloques planteados. Además, las cantidades mínimas de especímenes en estudio se muestran seguidamente, como simplificación de una expresión utilizada para determinar tamaños de muestras, considerando diferentes errores y precisión en el experimento.

Tabla 5: Diferentes tamaños de muestras según los valores de confianza (α), prevalencia (p) y precisión (d)

α (Z_α)	p	d	n
0,05 (1,96)	0,20	0,08	97
0,05 (1,96)	0,20	0,04	385
0,01(2,58)	0,20	0,08	166

Fuente: Gutiérrez y De la Vara (2011) Análisis y diseño de experimentos

Material vítreo



Figura 4: Tipología de vidrios por color. Fuente: Kilmer (2014).

Una carga de vidrio comercial puede llegar a constar de una mezcla de siete a 12 materias primas diferentes, pero en general está formada por cuatro a seis, elegidos de materiales como la arena, la piedra caliza, la dolomita, la ceniza de sosa, el ácido bórico, el bórax, materiales feldespáticos y compuestos de plomo y bario. Además de estos, en la mayor parte de las cargas comerciales, es común que se incluya vidrio de desecho en la cantidad de 15 – 30 %. El vidrio de desecho se compra o se obtiene de la práctica de producción normal (Blanco, 2017).

A continuación, se presenta una tabla correspondiente a las cantidades de compuestos químicos según la tipología de vidrio, la cual ayudó a visualizar el tipo de vidrio que se utilizó en este estudio:

Tabla 6: Compuestos químicos típicos del vidrio

Componente	Tipología de vidrio (%masa)		
	Blanco	Verde	Amber
CaO	6,43	10,26	10,00
Al ₂ O	2,41	2,81	3,20
SiO ₂	70,39	72,05	70,01
K ₂ O	0,23	0,52	0,82
Na ₂ O	16,66	14,31	15,35
Fe ₂ O ₃	0,32	0,00	0,00
MnO	0,04	0,04	0,04
MgO	2,59	0,90	1,46
TiO ₂	0,08	0,11	0,11
Cl	0,02	0,00	0,00
SO ₃	0,19	0,07	0,06

Fuente: D. Dyer¹ and Ravindra K. Dhir² (2017)

Los tipos de vidrios presentados en la tabla 5 se conocen como sosa, cal y sílice, por sus compuestos químicos adquieren una fácil fabricación. A este tipo de vidrio se le adiciona entre 1 y 4 % de MgO para prevenir la desvitrificación y también se le incorpora de 0,5 a 1,5 % de alúmina para aumentar su duración, aumentando su resistencia química. Para este

estudio, se tomó en cuenta la utilización del vidrio blanco por justificaciones que se ampliarán en el apartado de análisis de resultados de este documento.

En este proyecto, se decidió utilizar el vidrio blanco, debido a la disponibilidad de grandes cantidades de este tipo para realizar la investigación y por su gran contenido de SiO₂, beneficioso para las reacciones químicas del concreto hidráulico y su desempeño mecánico. Además, se quiso llevar el material a una granulometría lo más cercana posible a la característica del cemento hidráulico (0,045 mm), pero, por disponibilidad de equipo del laboratorio, se contó con la obtención de material vítreo con un tamaño de partícula de 0,075 mm.

Difractometría de rayos láser

Los materiales contienen a nivel microscópico diferentes configuraciones y estructuras atómicas y el material vítreo es una de ellas. El mismo se caracteriza por poseer una estructura amorfa, con ordenamiento irregular y posición reticular de los átomos (Cubero, 2017).

Las características anteriores son propias también de la estructura cristalina del vidrio y su principal componente: el óxido de silicio.

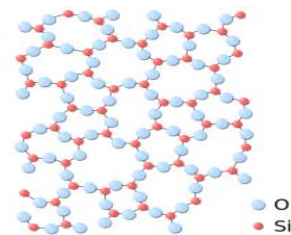


Figura 5: Estructura cristalina del óxido de silicio

Las estructuras cristalinas de los materiales se pueden comprobar mediante la técnica de difracción de rayos X, que se utiliza como ondas electromagnéticas con longitudes entre 0,05 y 0,025 nm, orden de magnitud similar a la distancia entre planos de átomos en sólidos cristalinos (Cubero, 2017).

Colocando un átomo sobre un plano, se produce una serie de dispersión regular, en donde las ondas de los rayos X dispersados por estos átomos pueden interferir de igual manera que las ondas de la luz, desde una serie dispersada en una red de difracción.

En el momento en que los rayos-X encuentran un punto de difracción entre el radiador y la muestra en estudio, se puede confirmar la presencia de materiales cristalinos y con ellos, la identificación aproximada por medio de las bases de datos contenidas por el equipo y personal practicante del estudio. El encuentro de interferencias entre los rayos difractados puede identificar el contenido de otras estructuras atómicas que se verán reflejadas en las gráficas proyectadas.



Figura 6: Máquina para difracción de rayos X. Fuente propia, equipo de laboratorio.

Microscopía de barrido electrónico

El microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscopy) utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz, para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra (CIMAV, 2015).

El microscopio electrónico de barrido está equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: el detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image) y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) que permite coleccionar los

rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis semicuantitativos y de distribución de elementos en superficies (CIMAV, 2015).

Cemento hidráulico

Es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, cuando es amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua (INTECO 06-11-15, 2015).

Tabla 7: Tipos de cementos hidráulicos

Tipo I	Cemento Portland (CPO)
Tipo ME	Cemento hidráulico con escoria de alto horno
Tipo MF	Cemento modificado con humo de sílice
Tipo MP	Cemento modificado con puzolanas, ceniza volante o esquisto
Tipo MC	Cemento hidráulico modificado con caliza
Tipo MM	Cemento hidráulico modificado mixto

Fuente: INTECO 06-11-15 (2015).

El cemento hidráulico utilizado para este estudio se conoce como tipo MC/A-AR debido a que es el que corresponde para un diseño de mezcla de CAD700 en estudio. El mismo se obtiene por medio de la molienda conjunta y uniforme de Clinker tipo Portland, y minerales naturales (Caliza de alta ley), en proporciones que van del 6% al 20% en peso del cemento, una relación de agua-cemento de 0,49 y una resistencia de 32,3 MPa aproximada a 28 días. (Holcim 2015)

Tabla 8: Estudio de contenido de compuestos químicos para cemento MC/A-AR

Compuesto	Contenido (%)	Parámetro RTCR 479:2015
SiO ₂	19,55	NI
MgO	2,72	≤ 6,0
SO ₃	3,06	≤ 4,0

Fuente: Holcim, (2016).

Puzolanas

Materia esencialmente silicosa, que finamente dividida no posee ninguna propiedad hidráulica, pero posee constituyentes (sílice - alúmina) capaces, a la temperatura ordinaria, de fijar el hidróxido de cal para dar compuestos estables con propiedades hidráulicas (Salazar, 2007).

La experiencia americana de este componente se dio al principio del siglo XX, en proyectos de obras públicas, tales como embalses, donde fueron utilizadas para controlar el aumento de la temperatura en concreto masivo. Además, se usan para mejorar la resistencia al ataque de sulfato.

Silicato tricálcico (3CaOSiO_2 o C_3S)

También llamado alita, es un componente del cemento hidráulico que cuando se hidrata se endurece y es responsable en gran parte, por el inicio del fraguado y resistencia temprana (PCA, 2004).

Silicato dicálcico (2CaOSiO_2 o C_2S)

También llamado velita, es un componente del cemento hidráulico que cuando se hidrata se endurece lentamente y contribuye en gran medida para el aumento de la resistencia en edades más allá de una semana (PCA, 2004).

Silicato tricálcico ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{3CaO}$ o C_3A)

También llamado celita, es un componente que libera gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye un poco para el desarrollo de las resistencias tempranas. Los cementos con bajos porcentajes de C_3A resisten mejor a suelos y aguas con sulfatos (PCA, 2004).

Agregados pétreos

Los agregados fino y grueso ocupan cerca del 60 % al 75 % del volumen del concreto hidráulico e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y la economía del concreto. Los agregados finos generalmente consisten en arena natural o piedra triturada con la mayoría de sus partículas menores que 5 mm. Los agregados gruesos consisten en una o en la combinación de gravas o piedras trituradas con partículas predominantes mayores a 5 mm y generalmente entre 9,5 mm y 37,5 mm. (PCA 2004).

Tamaño máximo

Tamaño del menor tamiz por el cual toda la muestra de agregado grueso debe pasar (ASTM C125).

Tamaño máximo nominal

Tamaño del menor tamiz por el cual la mayor parte de la muestra de agregado grueso debe pasar. El tamiz del tamaño máximo nominal puede retener del 5 % a 15 % de la masa (ASTM C125).

Reactividad álcali-agregado

Los agregados que contienen ciertos constituyentes pueden reaccionar con los hidróxidos alcalinos en el concreto y se han reconocido como una fuente potencial de deterioro que se da visualmente como red de grietas, juntas cerradas o erupciones en la superficie. Una de las tipologías de esta reactividad es *reacción álcali-sílice* (RAS), la cual se presenta como un gel que se expande cuando absorbe el agua de la pasta a su alrededor. La cantidad de gel que se forma depende de la cantidad de sílice presente en la mezcla de concreto hidráulico.

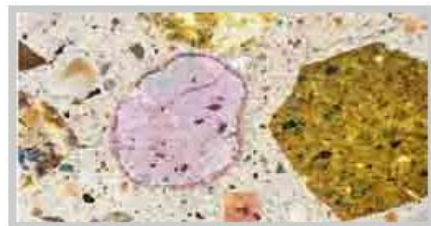


Figura 7: Gel producto de RAS en alrededores del agregado en una muestra endurecida de concreto hidráulico. Fuente: PCA, (2004).

Para este proyecto, se utilizó agregado pétreo, grueso y fino de fuente proveniente de Guápiles. El agregado grueso contó con un tamaño máximo nominal de 9,5 y agregado fino de río e industrial. La hoja correspondiente a la caracterización de los mismos se encuentra en el apartado de Anexos de este documento.

Concretos de alta resistencia (CAD)

A los concretos cuyas resistencias a la compresión excedan los 420 kg/cm², se les llama concretos de alta resistencia o alto desempeño (McCormac, 2011). El concreto de alto desempeño (CAD) supera las propiedades y la constructibilidad del concreto convencional y se produce con materiales de alta calidad (aditivos químicos, agregados y cementos hidráulicos de alta resistencia), con una especial optimización, dosificación colocación y compactación, casi siempre de forma industrial (PCA, 2004).

Normalmente, utilizan aditivos reductores de agua para volverlos más fluidos y trabajables, alto contenido de cementos de altas resistencias iniciales, baja relación de agua-cemento (0,20-0,45) y alta temperatura de curado (PCA, 2004). Los CAD se pueden utilizar en concretos hidráulicos industriales, en donde se requiere una producción masiva de elementos para envío y entrega o en donde la utilización de elementos pretensados requiera del alcance de una resistencia inicial elevada.

El CAD corresponde a una tipología de concretos de alto desempeño, en donde su objetivo principal es el de alcanzar una resistencia de 700 kg/cm² como mínimo, a edades de 28 días. El anterior fue utilizado para este estudio, debido al interés de los involucrados por conocer su comportamiento mecánico con la inclusión de materiales reciclados, en este caso: material vítreo.

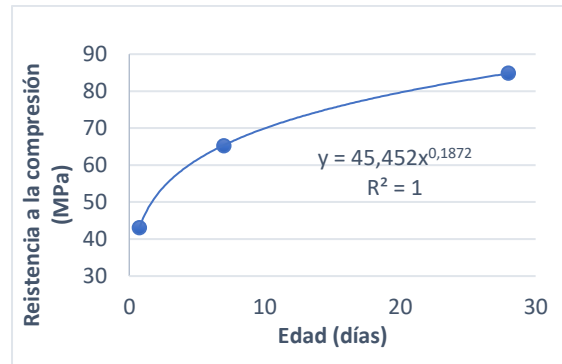


Figura 8: Comportamiento típico de resistencia a la compresión para un CAD700. Fuente PC.



Figura 9: Falla de resistencia a la compresión de un cilindro CAD a 28 días.

Aditivos químicos para concreto



Figura 10: Aditivos líquidos para concreto hidráulico.

Son aquellos ingredientes del concreto que, además del cemento hidráulico, del agua y de los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado (PCA, 2004). Se realizan las clasificaciones de los aditivos de acuerdo con las funciones que aporta a una mezcla de concreto hidráulico.

Tabla 9: Tipología de aditivos de acuerdo con la propiedad que aporta

Tipo	Función
A	Reductor de agua
B	Retardante
C	Acelerante
D	Reductor de agua y retardante
E	Reductor de agua y acelerante
F	Reductor de agua de alto rango
G	Reductor de agua de alto rango y retardante

Fuente: Especificación para aditivos químicos para concreto. ASTM 494-16

Algunas de las razones más importantes para la utilización e incorporación de aditivos químicos en muestras de concreto hidráulico son que con ellos se obtienen propiedades del concreto específicas para el sitio de colocación o fabricación, tales como aumento de trabajabilidad, aumento de la resistencia y obtención de apariencia agradable desde el punto de vista arquitectónico. Además, los mismos deben regirse por la norma ASTM C494-15 que clasifica y describe de manera específica todas las tipologías de estas, como se muestra en la pasada tabla 9.

El aditivo utilizado para el desarrollo de este estudio es un reductor de agua de alto rango de última generación a base de policarboxilatos (polímeros de bajo peso molecular soluble con el agua y de enlace fuerte en contacto con el oxígeno), formulado específicamente para aumentar el tiempo de trabajabilidad en mezclas de concreto y obtener altas resistencias iniciales para concretos en sistemas prefabricados. Cumple con la norma ASTM C-494 Tipo A, como reductor de agua y Tipo F como reductor de agua de alto rango y la AASHTO M-194. (TOXEMENT, 2016).

El aditivo anteriormente mencionado también ha sido utilizado por parte de la empresa Productos de Concreto (PC) para poder producir la tipología de concreto en estudio CAD700.

Concreto reforzado

El concreto reforzado es una combinación de concreto y acero, en la que el refuerzo de acero proporciona la resistencia a la tensión de la cual carece el concreto hidráulico. El acero de refuerzo es también capaz de resistir fuerzas de compresión y se

usa en columnas, así como en otros miembros estructurales (McCormac, 2011).

Además, existen numerosas ventajas de la utilización de este material, entre ellas:

- Obtención de grandes resistencias a los efectos del fuego y el agua.
- Rigidez y restricción de movimiento de las edificaciones constituidas con elementos de concreto reforzado.
- Requiere de poco mantenimiento.
- Larga vida de servicio en comparación con otros materiales.
- Construcción de elementos estructurales tiene variedad de formas geométricas.

Como anteriormente se describieron los componentes y propiedades del concreto hidráulico, se describirá en este caso otro componente importante del concreto reforzado: el acero de refuerzo.

Acero de refuerzo



Figura 11: Varillas de acero corrugado. Fuente: Economía y Negocios, (2015).

El refuerzo en las estructuras de concreto puede ser usado en forma de varillas o malla soldada de alambre. Las varillas corrugadas que tienen protuberancias en sus superficies para aumentar la adherencia entre el concreto y el acero se usan en casi todas las aplicaciones (McCormac, 2011). Las varillas de acero se fabrican con base en acero de lingotes, ejes o rieles y la normativa vigente se muestra en el apartado de normativa de esta sección en en *ASTM A615-16*.

Las propiedades de algunas de las barras estándares dictadas por las anteriores normas

también se mostraron en la especificación de la norma ASTM A615 de esta sección. El refuerzo se oxidará si no está bien protegido, al oxidarse, los óxidos resultantes ocupan un volumen mucho mayor que el del metal original. Como resultado, se dan grandes presiones hacia el exterior que ocasionan agrietamiento y astillado del concreto, además de la disminución de adherencia entre el concreto y acero (McCormac, 2011).

Durante esta investigación, se utilizaron barras de 9,5 mm de diámetro (Nro. 3, grado 60) y 12,7 mm (Nro. 4, grado 60) especificadas y detalladas en la sección de *Resultados* de este documento.

Elementos sometidos a flexión

Los elementos que frecuentemente experimentan esfuerzos flexionantes con la aplicación de una o más cargas a lo largo de la luz son las vigas.

Si bien es cierto, el concreto hidráulico presenta muy buenas propiedades de resistencia a la compresión, no así ante resistencias a la tensión. Es por ello, que se utilizan materiales que le puedan brindar resistencia a la tensión en zonas de vulnerabilidad, cuando el elemento se ve sometido a cargas tanto puntuales como distribuidas. Por lo anterior, las zonas críticas de colocación del material de refuerzo dependerán de la posición de la carga aplicada en el elemento y de las condiciones de apoyo en la que el mismo se encuentre.

Deflexiones

Las deflexiones ocurren tanto en elementos cargados axial como longitudinalmente, cuando ocurre un cambio o movimiento del eje neutro del elemento.

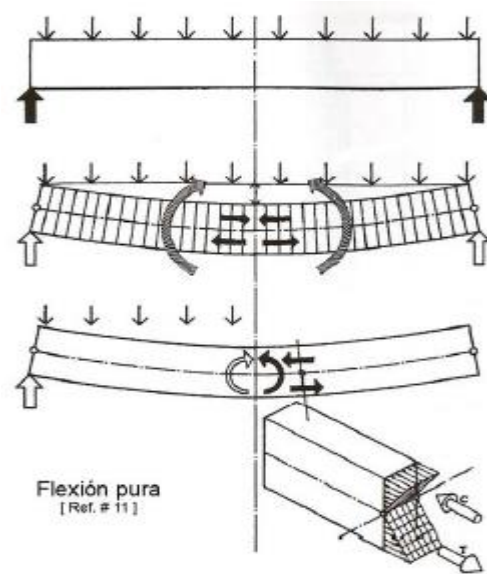


Figura 12: Comportamiento flexionante en vigas de concreto reforzado. Fuente: Diseño de Estructuras de Concreto. Nilson (2001).

Las deflexiones que ocurren una vez aplicada la carga, llamadas deflexiones instantáneas, pueden calcularse con base en las propiedades del elemento elástico no fisurado, pero también existen deformaciones que ocurren de modo gradual durante la vida útil del elemento, ocasionadas por el flujo plástico del concreto y por la retracción del fraguado (Nilson, 2001).

De lo anterior, aunque se tienen deformaciones a largo y corto plazo, para este estudio se determinará únicamente las deformaciones causadas por las cargas que se acordó aplicar, adaptadas a los instrumentos de medición. Las mismas también son comprobadas por las obtenidas en el modelo estructural del *software* SAP200.

Concreto no agrietado

Se da cuando los esfuerzos a tensión son menores que el módulo de ruptura (esfuerzo de tensión por flexión bajo el cual el concreto empieza a agrietarse), la sección transversal total de la viga resistente a flexión, con compresión a un lado de aplicación de carga y tensión en el otro (McCormac, 2011).

Concreto agrietado

Cuando se da la aparición de grietas en las fibras sometidas a flexión de las vigas o del elemento en estudio, se puede decir matemáticamente que los esfuerzos en esta sección se han igualado a los correspondientes del módulo de ruptura, dando como resultado el concepto de momento de agrietamiento (M_{agr})



Figura 13: Comportamiento flexionante longitudinal de vigas de concreto reforzado

Las grietas pueden desplazarse hasta el eje neutro del elemento, haciendo que el concreto hidráulico ya no pueda resistir los esfuerzos flexionantes y que el acero se encargue de resistirlos.

Las grietas de flexión son particularmente verticales, se extienden desde los lados de tensión de las vigas hasta la región de los ejes neutros. Si las vigas cuentan con almas muy altas (90 o 120 cm), las grietas tendrán poca separación (McCormac, 2011).

Las grietas pueden perjudicar la eficiencia y comportamiento mecánico de los elementos, ya que con ellas puede darse la pérdida significativa de la resistencia, acortamiento de la vida útil y exposición del acero de refuerzo a ambientes agresivos, dando como consecuencia elementos y estructuras inseguras para los usuarios. El ACI 318-14 dispone las siguientes tolerancias para la aparición de las grietas en elementos sometidos a flexión y son referenciadas por el libro *Diseño de Estructuras de Concreto* (Nilson, 2001).

Tabla 10: Tolerancia de grietas según condiciones de exposición de los elementos

Condición de exposición	Ancho de grieta (mm)
Aire seco o membrana protectora	0,41
Humedad, aire húmedo	0,30
Agua de mar y rocío de agua de mar	0,15

Estructuras de contención de agua	0,10
-----------------------------------	------

Fuente: Nilson, (2001).

Esta etapa continuará mientras los esfuerzos a compresión de las fibras superiores sean menores aproximadamente la mitad de la resistencia a la compresión f'_c (resistencia a la compresión de cilindros de concreto de 100x200 mm o 150x300 mm, alcanzada a los 28 días) del concreto y mientras el esfuerzo del acero sea menor al de su límite elástico. Los esfuerzos a compresión varían linealmente con la distancia del eje neutro o bien como una línea recta (McCormac, 2011).

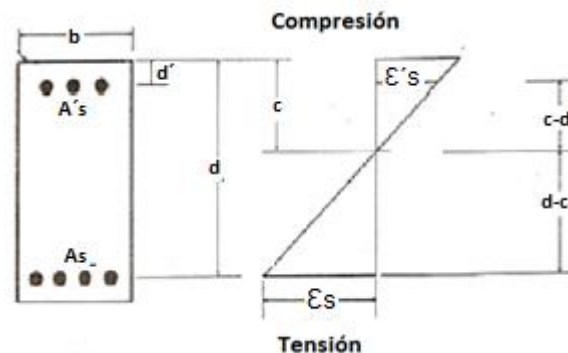


Figura 14: Comportamiento flexionante en la sección de vigas de concreto reforzado.

Falla de la viga

Conforme la carga crece todavía más, de modo que los esfuerzos a la compresión resultan ser mayores a la mitad del f'_c , las grietas de tensión se desplazan aún más arriba y los esfuerzos de compresión dejan de ser lineales, se supondrá que el acero de refuerzo ha cedido (McCormac, 2011).

La identificación de la carga se dará una vez localizada la grieta cuyo grosor abarque 0,3 mm, tomando en cuenta la modificación de una ecuación planteada por el ACI 224.1R, en donde se limitan los anchos de una fisura de 0,4 mm para exposición exterior y 0,3 mm para exposición interior del elemento; seleccionando como parámetro el límite más crítico (0,3 mm).

En el lado de tensión del elemento, se supone perfecta adhesión entre el concreto hidráulico y el acero de refuerzo, pero si las deformaciones unitarias en los materiales en un punto particular son las

mismas, los esfuerzos correspondientes no serán iguales, ya que los módulos de elasticidad son diferentes. De lo anterior, se debe determinar una razón de interacción entre los módulos de elasticidad de los mismos llamada razón modular n:

$$n = \frac{E_{acero}}{E_{concreto}}$$

Si la razón modular para una viga es de 10, el esfuerzo en el acero será 10 veces el esfuerzo del concreto a la misma distancia del eje neutro (McCormac, 2011).

Ductilidad de elementos

La ductilidad es el grado de deformación que puede soportar un material sin romperse. Se mide por la relación de la longitud original de la probeta entre marcas calibradas antes (l_0) y después del ensayo (l_f) (Garavito, 2008).

Cargas permanentes

Las cargas permanentes son de magnitud constante que permanecen en un mismo lugar (McCormac, 2011). Según lo dictado por el CSCR-10, los valores de carga permanente deben incluir:

- Pesos propios de elementos constructivos, sean estructurales o no estructurales.
- Pesos de sistemas y componentes arquitectónicos.

En el caso de este estudio, la magnitud de la misma tendrá que ver con el peso propio del elemento por construir (vigas de concreto reforzado).

Carga temporal

Son las cargas que pueden cambiar de magnitud y posición e incluyen cargas de los ocupantes en función de la tipología de inmueble para el cual fue construida. El CSCR-10 realiza una clasificación de cargas temporales según tipología de ocupación estructural. Sin embargo, para este estudio, la carga temporal fue magnificada mediante la capacidad de falla especificada y detallada en los siguientes apartados de este documento.

Filosofía de diseño LRFD (Load and Resistance factor design)

También llamado diseño por estado límite de resistencia, que corresponde a la condición más allá del elemento que deja de satisfacer los requisitos para los cuales fue diseñado (ASTHO SI, 2004). El diseño del mismo toma en cuenta la naturaleza de las cargas a las cuales el elemento es sometido, tales como las cargas permanentes, temporales y ambientales o accidentales.

Esta metodología tiene un enfoque probabilístico, ya que utiliza factores de mayoración de carga de acuerdo con la naturaleza de la misma y coeficientes de reducción de resistencia para que el elemento en estudio tenga un comportamiento holgado de resistencia (Chaverri, 2016).

Cargas últimas \leq Resistencia última

$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi S_n$$

Figura 15: Principio básico de metodología de diseño LRFD. Fuente: Introducción de estructuras de concreto. Chaverri, (2016).

Los factores de mayoración de carga citados por el CSCR-10 son los siguientes:

- CU = 1,4 CP
- CU = 1,2 CP + 1,6 f_R CT + 1,6 CE
- CU = 1,05 CP + f_{1fR} CT ± CS + CE
- CU = 0,95 CP ± CS + CE

De las combinaciones anteriores se debe de utilizar la envolvente que muestre los mayores resultados para poder garantizar el cumplimiento resistente de los elementos en diseño, para que finalmente, se pueda analizar la cantidad de acero que los mismos requerirán. Debido a que el estudio se realizó tomando en cuenta únicamente cargas gravitacionales, las ecuaciones cuyo envolvente incluyen cargas sísmicas (CS) o de empuje (CE), no fueron tomadas en cuenta.

Modelo de análisis

Se utilizan para poder crear una simulación de las cargas que van a ser aplicadas en los elementos estructurales, para poder predecir su comportamiento resistente y determinar la cantidad de acero que necesitará la sección para poder soportarlas, manteniéndose como un elemento íntegro y seguro para su lugar de ocupación. Los cálculos se pueden realizar perfectamente a mano o incluso, utilizar un *software* avanzado, tal como SAP2000. En el caso de este estudio, se utilizaron los dos métodos de comprobación de comportamiento resistente del elemento.

El comportamiento de elementos a flexión, simplemente apoyados con cargas puntuales aplicadas a una distancia determinada, puede predecirse sin importar la magnitud de su carga, como se muestra en la siguiente figura:

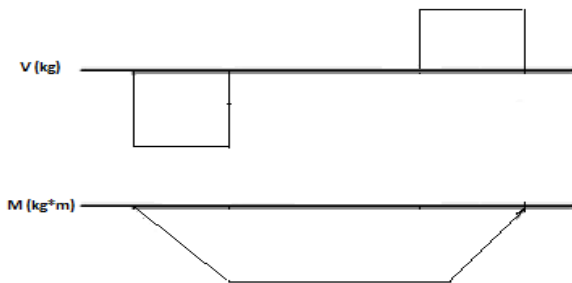


Figura 16: Diagramas predichos de momento y cortante para viga simplemente apoyada.

SAP2000 es un programa desarrollado por la empresa CSI, Computer and Structures, Inc., en Berkeley, California, EE. UU. Cuenta con varias plantillas predeterminadas que permiten generar la geometría de los mismos en forma rápida y eficiente. Además, es capaz de manejar los más grandes y complejos modelos impulsados por un motor de análisis incomparable e instrumentos de diseños para ingenieros que trabajan en el área de transporte, industrial, trabajos públicos y otras en donde permite realizar diversos análisis elásticos y dinámicos de forma lineal y no lineal, a través de funciones espectrales y Tiempo-Historia. SAP2000 determina a través del método de elementos finitos la respuesta en términos de fuerzas, esfuerzos y deformadas en los elementos de área y sólidos, presentando una salida gráfica y por tablas (Hernández, 2015).

Detalles de refuerzo

Una vez realizado el diseño de los elementos en estudio y cuantificados los requerimientos de acero de refuerzo, se siguen las recomendaciones indicadas por el ACI 318-14 y CSCR10.

Para el acero de confinamiento, se deben colocar aros de confinamiento en toda la longitud del elemento, con un espaciamiento máximo del menor de $d/4$, 8 veces el diámetro del refuerzo longitudinal, 24 veces el diámetro del refuerzo transversal o 30 cm.

En el caso del amarre de acero de refuerzo se debe de realizar por alambre negro (1,6 mm o No16), que asegure la fijación entre los refuerzos longitudinales y de confinamiento (aros). En este estudio se utilizó el llamado “pata de gallo” o en “equis”, doble para la fijación del acero de refuerzo:



Figura 17: Amarre de acero de refuerzo longitudinal y de confinamiento.

Doblado de acero de refuerzo: el acero de refuerzo se hace de forma cerrada para garantizar el confinamiento del concreto hidráulico, respetando lo dictado por la norma ACI-318-14 en cuanto al ángulo de doblado y la longitud del gancho, según se muestra en la siguiente figura:

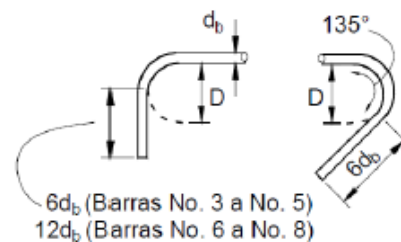


Figura 18: Especificación de doblado y longitud de gancho.

Instrumentos de medición para la falla

El extensómetro, galga extensiométrica o *strain gage* (en inglés) es un dispositivo de medida universal que se utiliza para la medición electrónica de diversas magnitudes mecánicas, como pueden ser la presión, carga, torque, deformación, posición, etc. Se entiende por *strain* o esfuerzo a la cantidad de deformación de un cuerpo debida a la fuerza aplicada sobre él. Si se coloca en términos matemáticos, se define como la fracción de cambio en longitud (Erasmus, 2015).

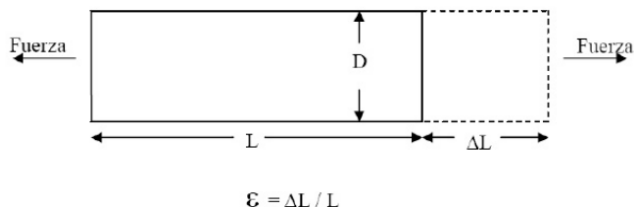


Figura 19: Diagrama de comportamiento para extensómetros.

El dispositivo marcará sus resultados como negativo, cuando el mismo se está comprimiendo o positivo, cuando el mismo se está expandiendo (tensión). Para este estudio, se realizará la instalación de las galgas en el punto medio superior e inferior, con el fin de poder medir los resultados en las zonas críticas de compresión y tensión de las vigas de concreto reforzado.

El *crackmeter* o medidor de grietas es un dispositivo alargado con capacidad de extenderse y que envía señales a un equipo de lectura en cuanto a su elongación. En este proyecto, se utilizó ubicándolo en el centro de los elementos, para poder medir la deflexión en milímetros, experimentada por los elementos, en cuanto se les aplicaba una carga a través del tiempo.

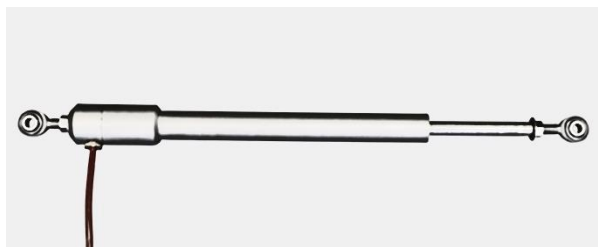


Figura 20: Crackmeter

Metodología

El proyecto se ha dividido en cuatro diferentes etapas necesarias para el cumplimiento de los objetivos planteados, respetando la normativa correspondiente y mencionada en el anterior apartado de *Marco teórico* de este documento.

Realizar un estudio físico-mecánico de mezclas de concreto hidráulico con diferentes dosificaciones de material vítreo, para identificar la mezcla cuyas propiedades adquiridas muestren ser el mejor desempeño.

- a) Se realizó el análisis de la tipología de material vítreo que se iba a utilizar, con base en la disponibilidad de material, a la consideración de tipo de vidrio que se utilizó en el proyecto de graduación *Estudio de vidrio reciclado como componente para la elaboración de cementos terciarios* de Espinoza (2017) (ya que este estudio le da seguimiento) y a las cantidades de compuestos químicos que a las tres tipologías de vidrio caracterizan (las mismas se amplían en la tabla 5 del apartado de Marco teórico de este documento).
- b) Se realizó el cálculo de las cantidades de material vítreo a procesar con base en las tres dosificaciones de sustitución que mostraron mejor comportamiento en la tesis de investigación supra indicada (23 %, 26% y 28%). El procesamiento del material consistió en la limpieza y reducción preliminar del tamaño de los elementos de ventanería de desecho suministrados por el Departamento de Administración de Mantenimiento del Tecnológico de Costa Rica de la sede Central.

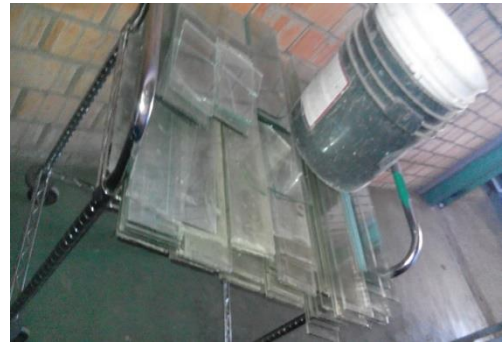


Figura 21: Ventanería preparada para ser triturada y molida.

- c) Seguidamente, el mismo fue triturado y molido en la Máquina de los Ángeles localizada en el CIVCO de la Escuela de Ingeniería en Construcción y se verificó el tamaño de la partícula mediante el tamizado del material por medio del tamiz con abertura de 0,075 mm (nro. 200).



Figura 22: Vidrio molido con tamaño de partícula de 0,075 mm

- d) Para la verificación de influencia del aditivo utilizado (Plastol 5000), junto con la cantidad de agua y cemento, se decidió realizar la prueba de flujo (ASTM C1437-15) tomando en cuenta una pasta de cemento hidráulico sin la adición de material vítreo: patrón. Otras tomando en cuenta una sustitución del 26% de material cementante por material vítreo: iteración 1, en donde se dio la cantidad de aditivo sin reducción. Y, finalmente, iteración 2 con una reducción del 26% del cemento hidráulico y de aditivo. Las mismas cantidades se especifican en la tabla 13

del apartado de *Resultados* de este documento. Las cantidades de aditivos que se utilizaron obedecieron a la dosificación típica de aditivo superplastificante del concreto en estudio ($7 \text{ cc/kg}_{\text{cemento}}$), que es comúnmente utilizado para la elaboración del CAD700 y se tomó en cuenta la relación de agua/cemento correspondiente al concreto en estudio (0,32).



Figura 23: Materiales cuantificados para la realización de la prueba de flujo.

e) En las instalaciones de PC (Productos de Concreto), se realizaron tandas para el moldeo de especímenes de concreto hidráulico, cuyas dimensiones abarcan dimensiones de 100x 200 mm, correspondientes a las pruebas de resistencia a la compresión y tensión diametral, y 150x150x600 mm para la prueba de módulo de rotura. Cabe destacar que las únicas variables en el estudio de la mezcla serán los porcentajes de sustitución de cemento hidráulico por material vítreo en una mezcla CAD 700.

Cada uno de los diseños propuestos debieron obedecer a una cantidad de especímenes determinada para dar validez estadística basada en la ecuación 1, en donde se tiene un tipo de experimento de dos o más factores que van a influir en el comportamiento de las mezclas de concreto hidráulico.

Ecuación para el modelo de primer orden

$$2^k \dots\dots\dots E1$$

Fuente: Gutiérrez y De la Vara (2011). Análisis y diseño de

experimentos.

De la ecuación anterior, se tomó en cuenta k como el número de variables que afectarán el comportamiento de la mezcla; en este caso, influyen dos, debido a que la inclusión de material vítreo a la mezcla implica la disminución de cantidad de cemento hidráulico presente en la misma. De lo anterior, se determinó que la cantidad de repeticiones por diseño será de cuatro. Además, la población total de especímenes se comparó con la sugerida en la tabla 5, de determinación de tamaño de la muestra de experimentación.

Tabla 11: Cantidad de especímenes por edad por realizar según ensayo cumpliendo con norma ASTM C192

Tipo de concreto	Dimensiones (mm)	Ensayo	Cantidad de especímenes	Edad de falla (días)
CAD 700 (70 MPa)	100x200	Resistencia a la compresión	3	3
			3	7
			3	28
	100x200	Tensión diametral	3	3
			3	7
			3	28
	150x150x600	Módulo de rotura*	3	3
			3	7
			3	28

Lo anterior obedece a una cantidad de especímenes de 18 por repetición y 72 por diseño.

f) Una vez obtenidos los resultados de desempeño de cada una de las dosificaciones de material vítreo, se compararon con el desempeño físico mecánico de la misma

tipología de concreto hidráulico (CAD 700), sin la inclusión de vidrio para identificar la influencia del material vítreo en la mezcla de concreto hidráulico y seleccionar el porcentaje de sustitución que brinde las mejores propiedades.

Una vez realizados los ensayos de resistencia a la compresión y tensión diametral, e identificado el porcentaje de sustitución que brindó el mejor comportamiento mecánico, se procedió a realizar una prueba correspondiente a la determinación de Módulo de Rotura, por medio directo e indirecto: el método indirecto fue aplicado a todos los diseños en estudio, según la información brindada por el American Concrete Institute, que brinda la posibilidad de correlacionar el módulo de rotura con la resistencia a la compresión de cilindros de 100x200 mm fallados a 28 días (f'_c). Dicho cálculo se realiza tomando en cuenta lo recomendado por comité 363 del American Concrete Institute, en donde establece que el módulo de rotura se encuentra en un rango entre las siguientes ecuaciones:

$$1,99 * \sqrt{f'_c} \left[\frac{kg}{cm^2} \right] \dots \dots \dots E2$$

$$3,18 * \sqrt{f'_c} \left[\frac{kg}{cm^2} \right] \dots \dots \dots E3$$

Siendo el recomendado por los mismos la siguiente ecuación:

$$2 * \sqrt{f'_c} \left[\frac{kg}{cm^2} \right] \dots \dots \dots E4$$

El método directo obedece a lo estipulado por la norma ASTM C78, con la construcción de vigas de concreto hidráulico de 150x50x600 mm para la aplicación de cargas a tercios del elemento y, posteriormente, la determinación del módulo de rotura. Dicha prueba se aplicó únicamente al diseño de mezcla cuyas propiedades de resistencia a la compresión y tensión diametral mostraron los mejores comportamientos. La misma no se aplicó para todos los diseños, debido a que solo el desarrollo y elaboración de los especímenes representaba un costo elevado en la totalidad de la investigación, tanto en tiempo como en cantidades de los materiales que la empresa estaba donando.



Figura 24: Vigas de concreto hidráulico



Figura 25: Falla de vigas a flexión

Realizar el diseño de vigas de concreto reforzado, determinar la cantidad de materiales requeridos en su construcción a escala real

- a) Se calculó la carga permanente del peso propio de las vigas y una sobre carga de acuerdo con la capacidad de carga del sistema de falla del piso duro del Centro de Investigación en Vivienda y Construcción CIVCO.
- b) Se realizaron estudios tales como la determinación de la resistencia a la fluencia del acero utilizado para las vigas de concreto reforzado, siguiendo lo descrito por la norma ASTM A616 y dando como un estimado de aplicación de prueba a varillas corrugadas nro. 3 y nro. 4 (0,95 cm y 1,27 cm correspondientemente).
- c) Se fijaron dimensiones para las vigas de concreto reforzado, tomando en cuenta la disponibilidad y capacidad del piso fuerte del CIVCO y las siguientes consideraciones provenientes del ACI318-14:

Tabla 12: Altura mínima de vigas no presforzadas

Condición de apoyo	Altura mínima
Simplemente apoyada	L/16,0
Con un extremo continuo	L/18,5
Ambos extremos continuos	L/21,0
En voladizo	L/28,0

Fuente: ACI318-14

La carga aplicada fue de 2 ton también tomado en cuenta por la capacidad del sitio de ensayo para poder realizar un modelo de comportamiento flexionante en el software SAP2000 y determinar la cuantía de acero requerida sin dejar de lado el cumplimiento de acero requerido dictado por el ACI318-14:

Tabla 13: Cuantía mínima para tipo de viga preesforzada

Tipo de viga	As mín	
No preesforzadas $A_{ps}f_{se} < 0,4(A_{ps}f_{su} + A_s f_y)$	El mayor de:	$0,75\sqrt{f'_c} \frac{b_w}{f_{yt}}$
		$50 \frac{b_w}{f_{yt}}$

Fuente: ACI318-14

Con lo anterior, se determinó la cuantía de acero de refuerzo necesaria para soportar la carga gravitacional, con las ecuaciones de diseño de concreto reforzado de la metodología de diseño de LRFD y consideración del modelo de análisis estructural del software SAP 2000. Además de la determinación de las características propias a la construcción de armadura de los mismos y se cuantificaron las variables correspondientes al diseño de encofrado de los elementos.

- a) Se realizó el estudio y verificación de los instrumentos disponibles en el lugar en donde se iba a llevar a cabo los ensayos de falla de los elementos en estudio (vigas de concreto reforzado), para que se pudiera satisfacer con la carga mínima de diseño (2180 kg) que toma en cuenta la carga aplicada en estudio más el peso propio del elemento en estudio.

Desarrollar la construcción de las vigas de concreto reforzado por medio de metodologías experimentales a escala real, para someterlos a pruebas estructurales de falla y desempeño resistente.

- a) Se llevó a cabo la construcción de una viga de concreto reforzado con y sin la adición de material vítreo, para someterlo a pruebas estructurales (marco patrón).
Se construyó la armadura de refuerzo de los elementos de concreto reforzado (vigas).



Figura 26: Armadura de viga.

Así mismo, se realizó el moldeo de separadores de concreto hidráulico, para poder asegurar el recubrimiento de 3 cm correspondientes a las vigas de concreto reforzado.



Figura 27: Separadores de concreto reforzado

El concreto que se empleó para la elaboración de las vigas de concreto reforzado se desarrolló en las instalaciones del CIVCO, mediante la ayuda de los técnicos de laboratorio de Productos de Concreto (PC), siguiendo el mismo

procedimiento de elaboración (tiempo y secuencia), con el que se contó durante la primera etapa del proyecto, utilizando la misma tipología de cemento hidráulico y aditivos; y en este caso en particular, los agregados pétreos (agregado grueso y fino) disponibles en el CIVCO.

Se dificultó tener acceso al diseño de mezcla de concreto hidráulico con el que se estaba trabajando en las etapas anteriores de este proyecto, pues la protección de datos de la empresa Productos de Concreto lo restringió, por lo que en esta ocasión se trabajó con las mismas proporciones anteriores, pero con distintitos agregados pétreos como se mencionó anteriormente.

Seguidamente, se instaló la armadura y encofrado, se realizará la chorrea de la mezcla de concreto hidráulico y se desencofrará una vez transcurridas las 72 horas como aseguramiento de una ganancia de resistencia que permitiera que el elemento no sufriera de deformaciones. Todos los

procedimientos de construcción se realizarán en las instalaciones del CIVCO, con el fin de la fabricación de los elementos en el mismo lugar de falla estructural.

La figura 28 muestra la distribución arquitectónica del piso fuerte y la zonificación de trabajo correspondiente a la construcción de las vigas y falla de las mismas. Los anteriores también fueron definidos de acuerdo con los permisos otorgados por la Coordinación del CIVCO.

Aunque se tiene una distancia considerable entre cada área de trabajo, se cuenta con la disponibilidad de una grúa con una capacidad de 5000 kg, la cual facilita la movilización de los elementos en estudio.

Las vigas fueron sujetadas a la grúa por medio de lingas de amarre cada 66 cm, para evitar que los elementos sufrieran alguna caída durante su movilización al área de falla.

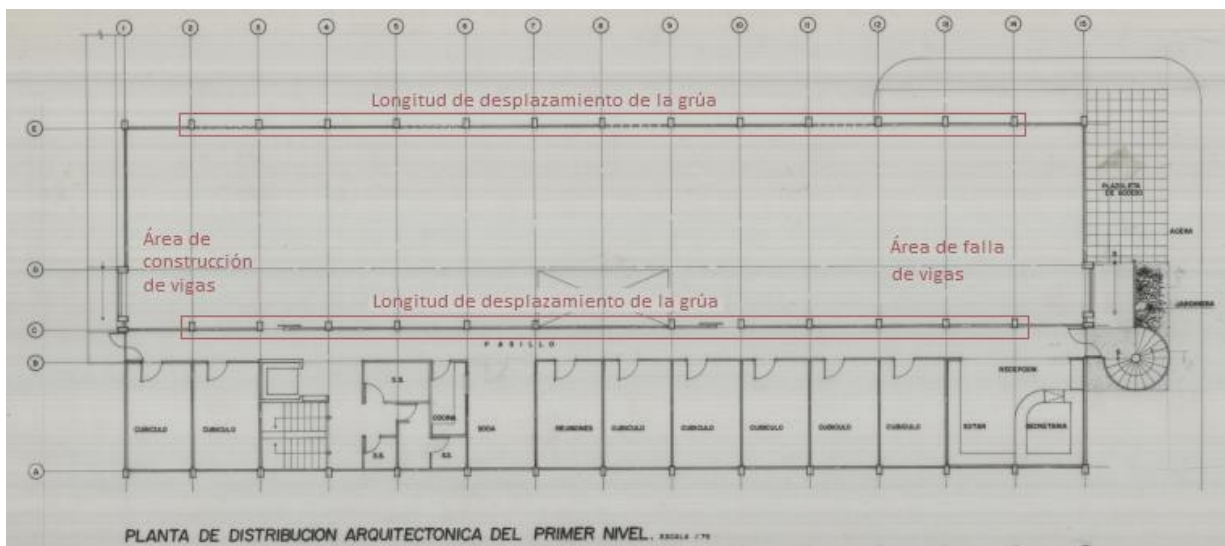


Figura 28: Plano de piso fuerte y zonificación de trabajo

Las vigas de concreto reforzado fueron curadas mediante la utilización de paños humedecidos constantemente, que cubrían en su totalidad a los elementos. El proceso anterior fue

importante para que las propiedades de los materiales no se vieran influenciadas por pérdidas de humedad, debido a la reacción exotérmica del concreto hidráulico. De igual forma, en esta etapa

se quiso conocer con mayor certeza las propiedades correspondientes a los materiales que se iban a utilizar para el diseño y construcción de las vigas de concreto reforzado, por lo que se utilizó la máquina universal ubicada en el CIVCO, para determinar la resistencia de fluencia (f_y) de las barras de acero.

Determinar las propiedades estructurales adquiridas por las vigas de concreto reforzado en estudio, para identificar el desempeño del material vítreo incorporado en la mezcla de concreto hidráulico.

El marco de falla de las dos vigas de concreto reforzado (con y sin la inclusión de material vítreo) se construyó de acuerdo con la capacidad de los equipos existentes en el CIVCO, siguiendo el modelo ilustrado en la siguiente figura, tomando en cuenta un pistón, dos galgas extensométricas ubicadas en el centro superior e inferior del elemento en estudio, seguido de la instalación de un *crackmeter* para poder determinar la deflexión experimentada por las vigas de concreto reforzado, durante la aplicación de la carga.

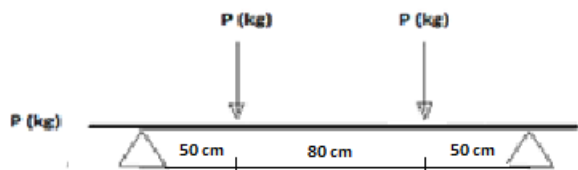


Figura 29: Ubicación de cargas puntuales aplicadas en vigas de concreto reforzado.



Figura 30: Marco de falla para vigas de concreto reforzado.

Una vez realizado el ensayo en cada uno de los elementos en estudio, se hizo un estudio visual en cuanto a la aparición de las grietas, identificando su trayectoria, para que las mismas puedan ser descritas por medio de un diagrama de fases de grietas mostrado en la sección de *Análisis de resultados* de este documento. El estudio visual de los elementos ensayados abarcó, además, el corte de una sección para poder examinar el estado del acero de refuerzo y la apariencia del concreto hidráulico.



Figura 31: Corte de sección en vigas falladas para estudio visual.

Los datos obtenidos durante la realización de la falla se compararon entre cada uno de los elementos, duración del ensayo, deflexiones máxima y cargas de falla, para poder determinar el comportamiento final de una viga de concreto reforzado con la inclusión de material vítreo contra la misma sin la inclusión.

Resultados

Microscopía de barrido electrónico

Este estudio se llevó a cabo para poder observar la topografía de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla de concreto (cemento hidráulico, material vítreo) y

de especímenes con y sin la inclusión de material vítreo, y con ello identificar las cantidades de elementos químicos que en ellos reside.

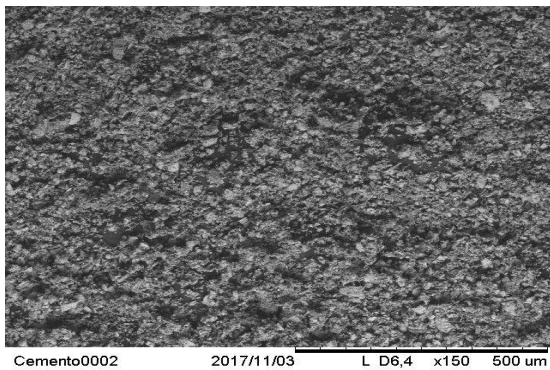


Figura 32: Microscopía de barrido electrónico del cemento hidráulico escala 500 um

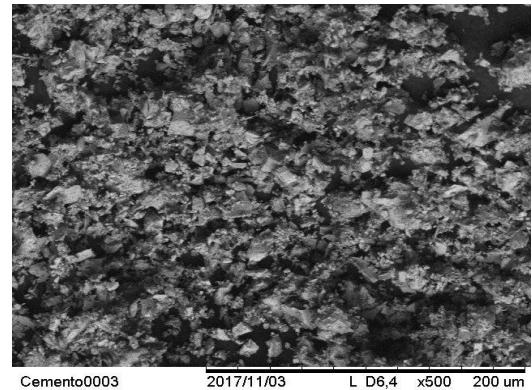


Figura 33: Microscopía de barrido electrónico del cemento hidráulico escala 200 um

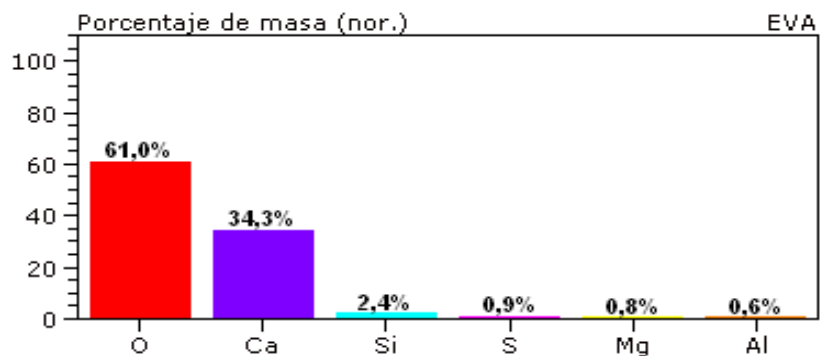
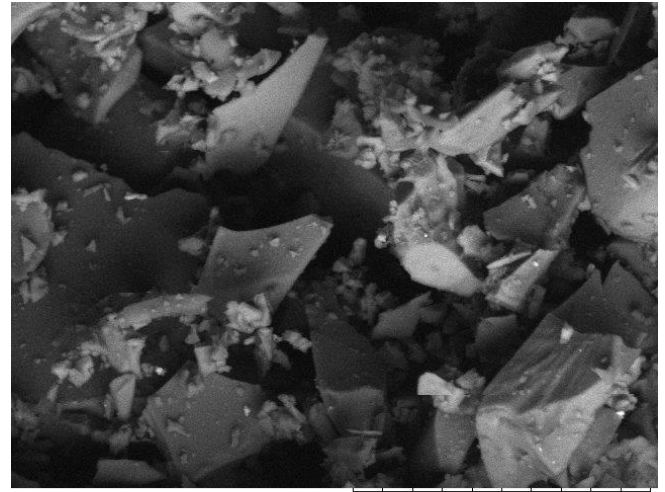


Figura 34: Contenido elemental del cemento hidráulico



Vidrio0001 2017/11/03 L D5,2 x150 500 um



Vidrio0003 2017/11/03 L D5,3 x1,5k 50 um

Figura 35: Microscopía de barrido electrónico de material vítreo escala 500 um

Figura 36: Microscopía de barrido electrónico del material vítreo a escala de 50 um

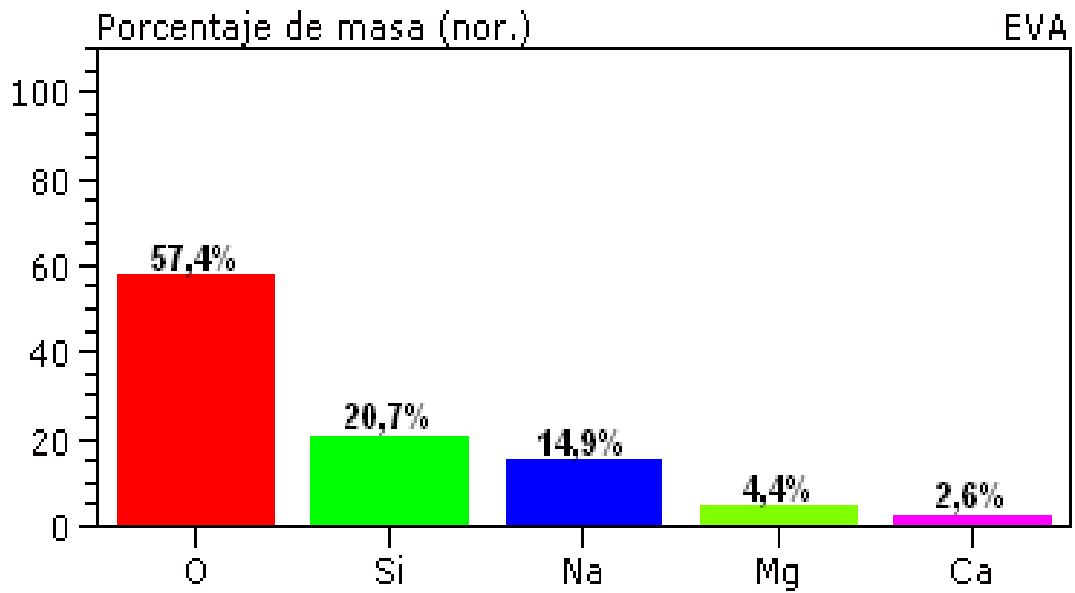
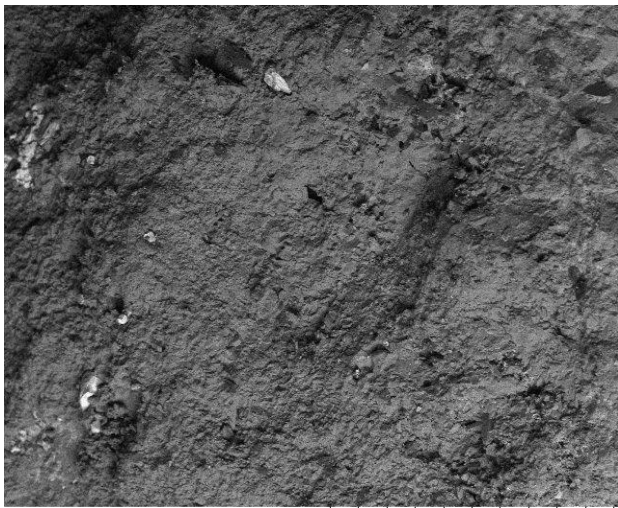
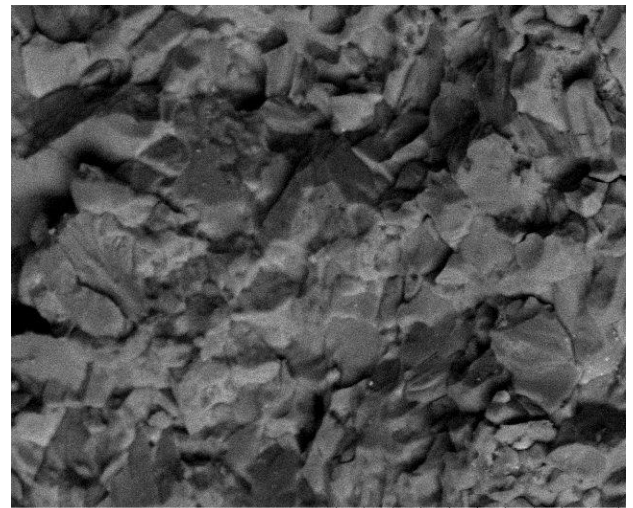


Figura 37: Contenido elemental del material vítreo.



Concreto0006 2017/11/03 L D7,2 x150 500 um

Figura 38: Microscopía de barrido electrónico de concreto sin material vítreo a escala de 500 um



Concreto0008 2017/11/03 L D7,2 x1,5k 50 um

Figura 39: Microscopía de barrido electrónico de concreto sin material vítreo a escala de 50 um

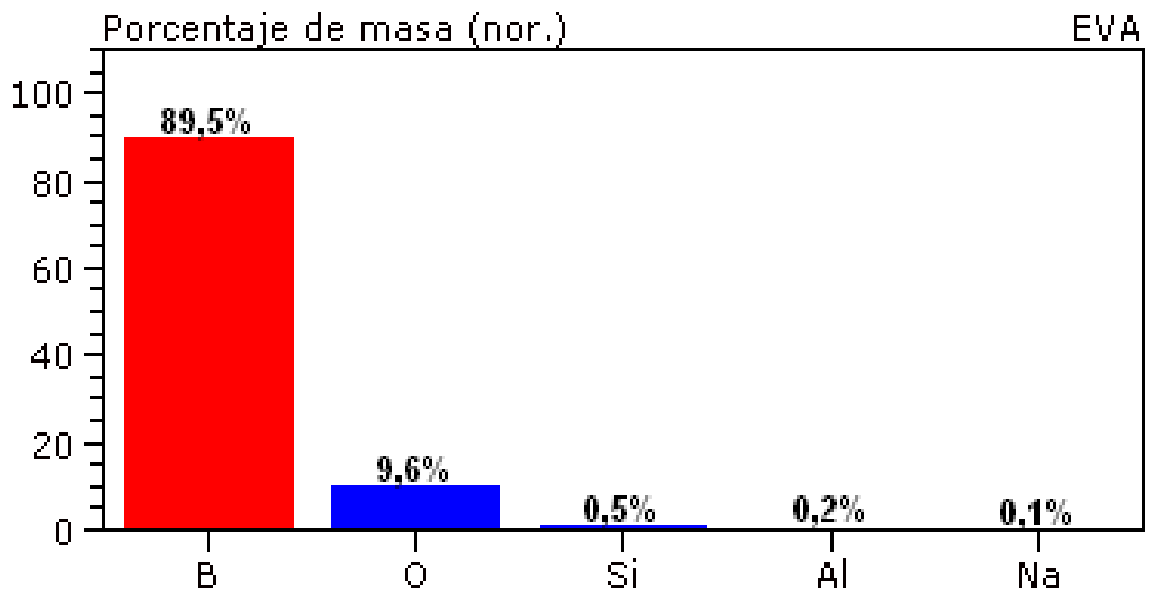
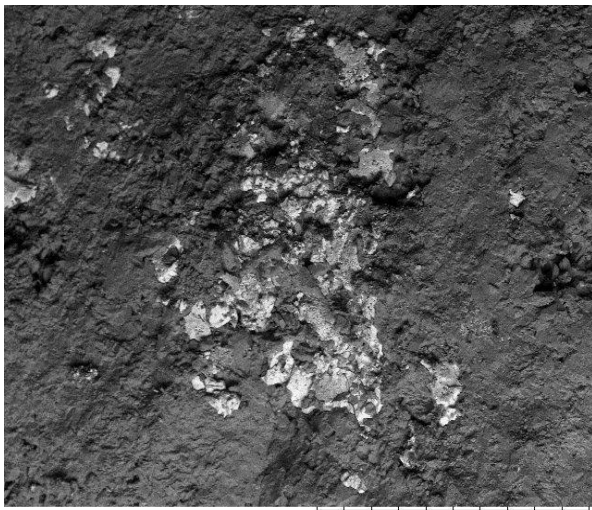
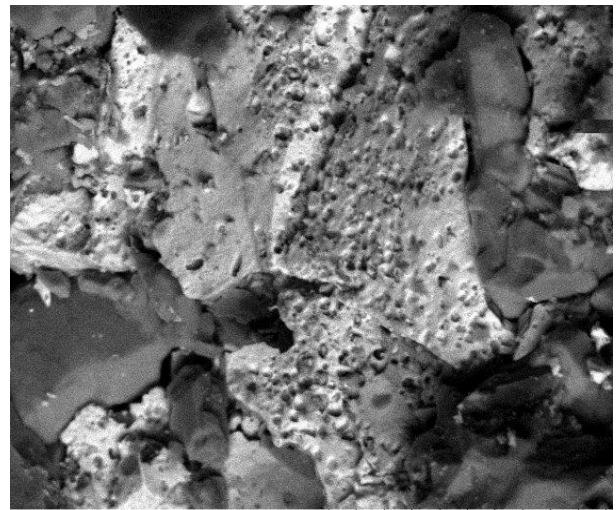


Figura 40: Contenido elemental del concreto hidráulico sin cemento hidráulico



Concreto0002 2017/11/03 L D7,2 x150 500 um

Figura 41: Microscopía de barrido electrónico de concreto con la inclusión de material vítreo a escala de 500 um



Concreto0004 2017/11/03 L D7,2 x1,5k 50 um

Figura 42: Microscopía de barrido electrónico de concreto con la inclusión de material vítreo a escala de 50 um

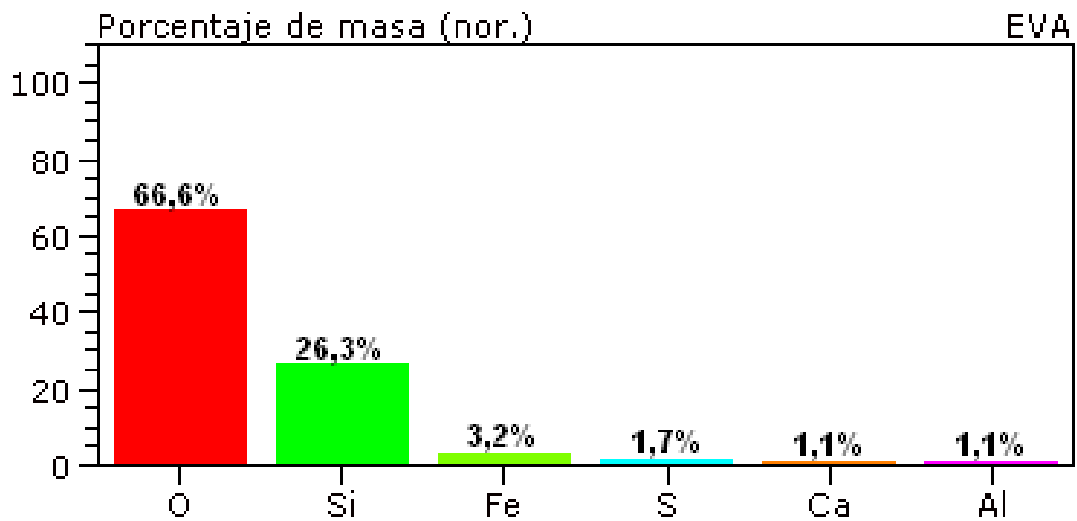


Figura 43: Contenido elemental de concreto con la inclusión de material vítreo

Una vez elaborado el concreto hidráulico correspondiente a las vigas de concreto reforzado, se tomó en cuenta una cantidad para la elaboración de cilindros (dimensiones de 100x 200 mm) que iban a ser sometidos a ensayos de resistencia a la compresión, a distintas edades alcanzadas (3,7 y 28 días). Cuando los mismos se destruían por medio del ensayo, se pudo observar la matriz del

concreto hidráulico y se decidió llevar a cabo la preparación de muestras para la realización de un análisis de microscopía de barrido electrónico, considerando muestras del agregado grueso utilizado en la mezcla, coloraciones existentes en la matriz y distintas locaciones aleatorias del espécimen.

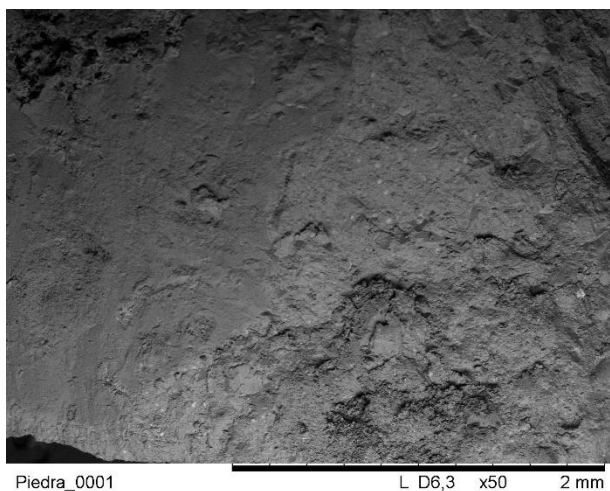


Figura 44: Microscopía de barrido electrónico para agregado grueso del concreto hidráulico utilizado en vigas a escala de 2 mm

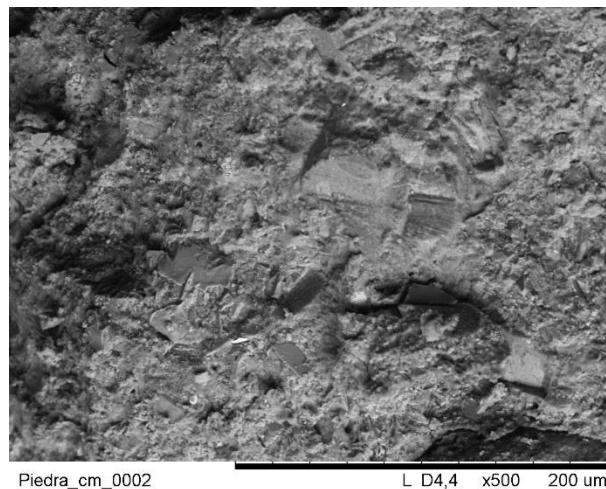


Figura 45: Microscopía de barrido electrónico para agregado grueso del concreto hidráulico utilizado en vigas a escala de 200 um

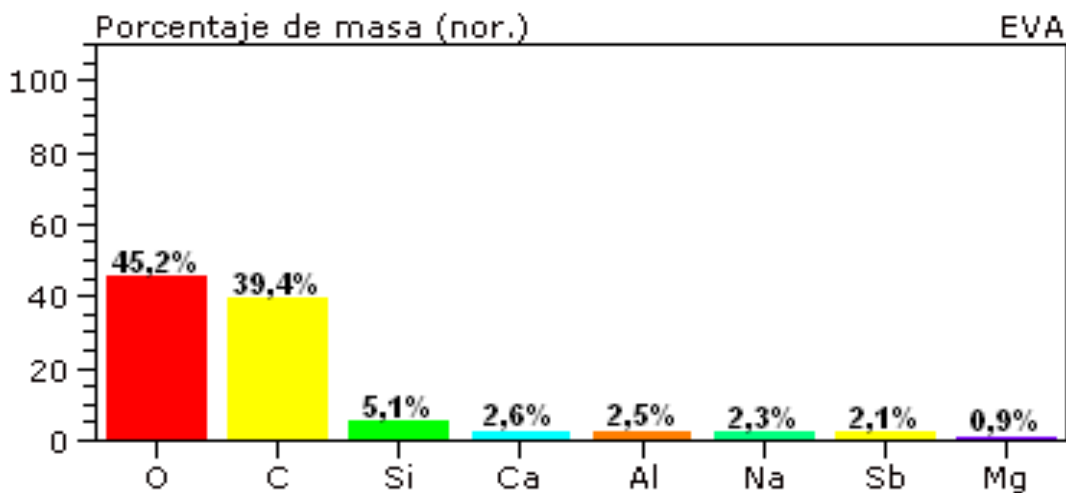
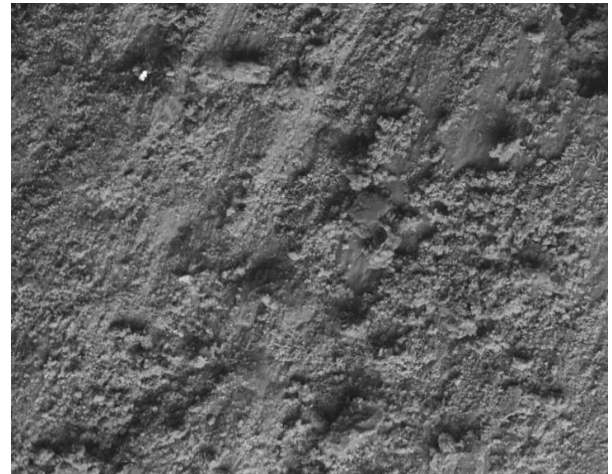


Figura 46: Contenido elemental del agregado grueso correspondiente al concreto de las vigas de concreto reforzado



Conc_sv_0003 L D3,3 x50 2 mm

Figura 47: Microscopía de barrido electrónico para concreto hidráulico utilizado en vigas a escala de 2 mm



Conc_sv_0004 L D3,0 x500 200 um

Figura 48: Microscopía de barrido electrónico para concreto hidráulico utilizado en vigas a escala de 200 um

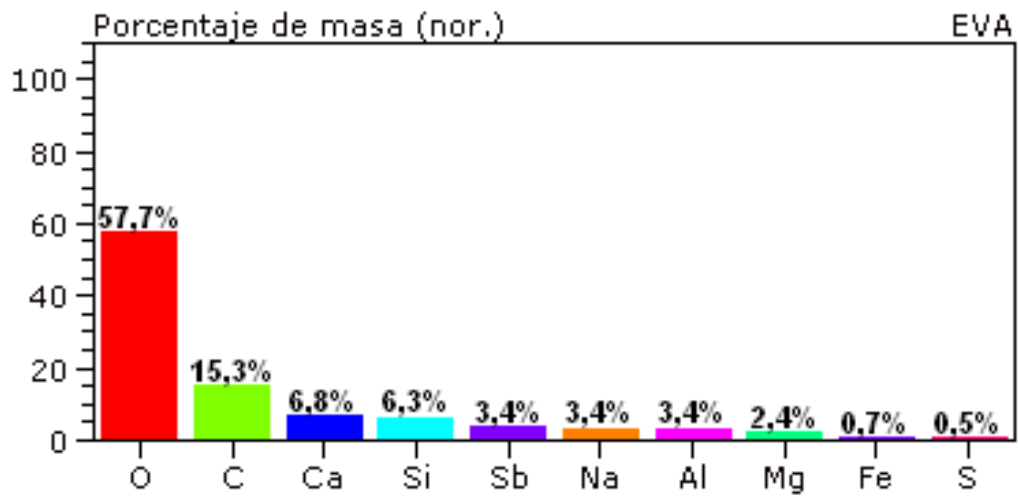


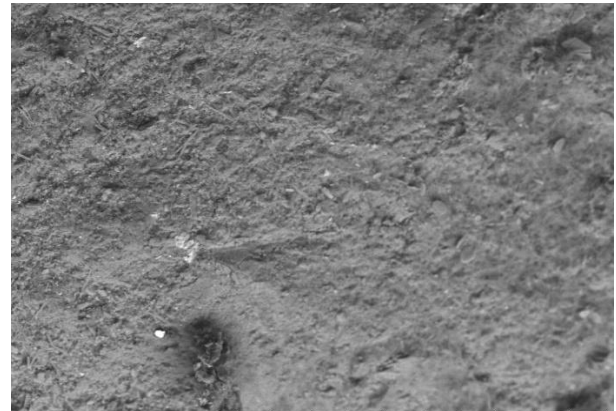
Figura 49: Contenido elemental para el concreto hidráulico de vigas

A continuación, se muestran figuras en donde es visible la aparición de manchas blancas en algunas secciones del concreto hidráulico en

estado endurecido, las cuales fueron analizadas por el mencionado estudio de microscopía, para poder determinar su contenido elemental.



Figura 50: Mancha blanca superficial en el concreto hidráulico de vigas



Mancha bl_0005 L D2,9 x500 200 um

Figura 51: Microscopía de barrido electrónico para mancha blanca superficial en el concreto hidráulico de vigas, a escala de 2 um.

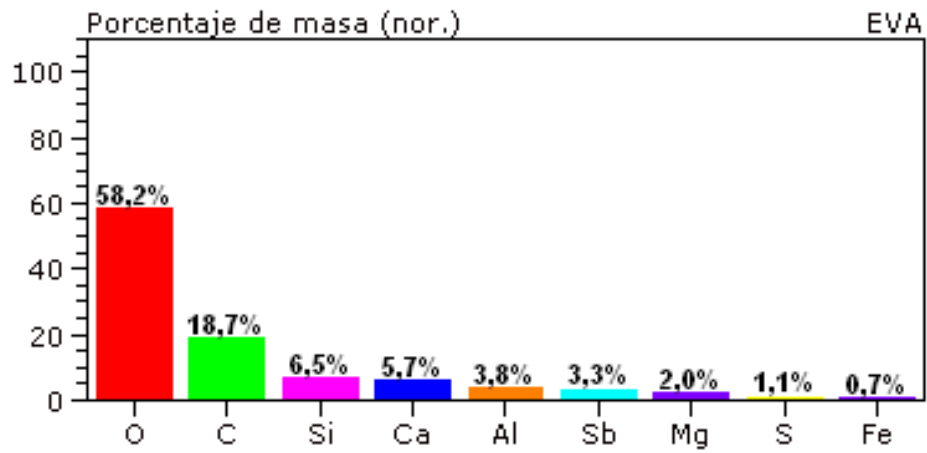


Figura 52: Contenido elemental para mancha blanca en el concreto hidráulico de vigas.

Caracterización del material vítreo

Una vez obtenida la cantidad necesaria de material vítreo para la realización del proyecto, se dispuso de una cantidad para poder realizar la caracterización del mismo. Los datos obtenidos se muestran a continuación.

Cuadro 3: Datos obtenidos para el cálculo de gravedad específica y porcentaje de absorción ASTM C 128-15

Peso recipiente (g)	347,4
Peso picnómetro + agua (g)	664,0
Peso muestra saturada superficie seca (g)	500,0
Peso muestra seca al horno (g)	452,0
Peso muestra seca al horno + recipiente (g)	799,4
Peso picnómetro + muestra + agua (g)	935,7
Peso muestra saturada superficie seca + recipiente (g)	847,4

Cuadro 4: Resultados de gravedades específicas y porcentajes de absorción para el material vítreo.

Gravedad específica (Gbs)	1,98
Gravedad específica saturada superficie seca (Gbsss)	2,19
Absorción (%abs)	10,60

Difractometría de rayos X

Una vez realizada la molienda de material vítreo, se tomó en cuenta la captación de tres muestras (en función de las cantidades de moliendas que se llevaron a cabo), para comprobar, mediante estudios de difractometría, que la misma no tuviera metales perjudiciales al comportamiento mecánico del concreto hidráulico. Los estudios se

llevaron a cabo en la escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

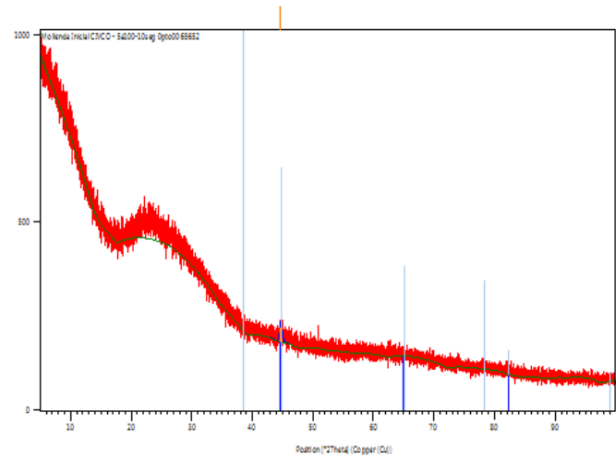


Figura 53: Estudios de difractometría para las muestras de material vítreo.

Además, se realizó un estudio granulométrico del material vítreo, tomando en cuenta tamices de 0,075 mm (nro. 200) y 0,044 mm (nro. 325) de abertura. Los datos se muestran a continuación.

Cuadro 5: Retenidos acumulados de material vítreo

Tamiz (mm)	Retenido (g)	Retenido (%)
0,075 (No200)	0	0
0,044 (No325)	341,02	68,20
Charola	158,98	31,82

Con el 26 % de sustitución de cemento por material vítreo, se quiso identificar visualmente la influencia del vidrio con la existencia del aditivo en una pasta de cemento hidráulico, por medio de la identificación de la trabajabilidad obtenida en la pasta. Las mezclas tomaron en cuenta una dosificación general de 7 cc/kg_{cemento} de aditivo (típica dosificación presente en una mezcla de CAD elaborado en la empresa involucrada) para la

cantidad de pasta en estudio, que se tradujo en las cantidades de aditivo especificado en el siguiente cuadro, en función a 500 g de cemento hidráulico:

Tabla 14: Cantidades necesarias para prueba de flujo de diferentes iteraciones

Diseño 26%	Cemento (g)	Vidrio (g)	Agua (ml)	Aditivo (ml)
Patrón	500,0	0,0	163,0	3,5
Iteración 1	370,0	130,0	120,0	3,5
Iteración 2	370,0	130,0	120,0	2,6

Se obtuvieron los datos de extensibilidad de 42 cm para la pasta patrón (cemento hidráulico, agua y aditivo plastificante) mostrado en la siguiente figura:



Figura 54: Flujo de pasta patrón.

Para la segunda mezcla llamada iteración 1 constituida por cemento hidráulico, agua, aditivo plastificante de alto rango e inclusión de material vítreo, se tiene una extensibilidad de 30 cm.

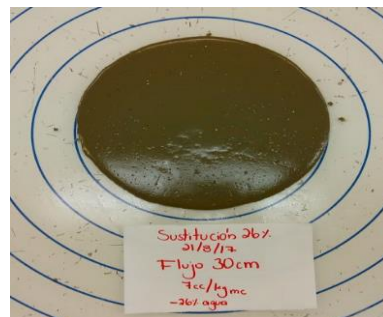


Figura 55: Flujo de pasta con 26% de sustitución y 100% de aditivo

La mezcla final, de 26% de sustitución de cemento hidráulico por material vítreo y 26% de disminución de la dosificación original de aditivo, mostró una extensibilidad de 28 cm.

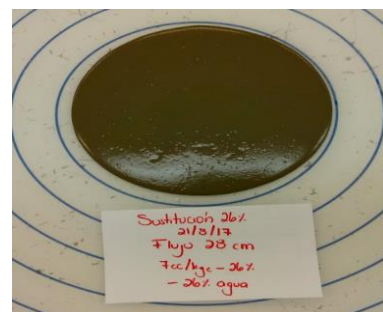


Figura 56: Flujo de pasta con 26% de sustitución y 26% de aditivo.

Aunque los procedimientos emitidos por la norma correspondiente a extensibilidad de la mezcla fueron seguidos, no se hicieron numerosas repeticiones que dieran consigo alguna validez estadística, pues la anterior se tomó en cuenta como un procedimiento rápido de verificación visual para identificar la influencia del material vítreo en una mezcla de cemento-agua-aditivo.

Estudio del comportamiento mecánico de las mezclas de concreto hidráulico

Los resultados de comportamiento mecánico de las mezclas en estudio para cada una de las repeticiones de cada diseño, se presentan en los siguientes cuadros, tomando en cuenta la

Cuadro 6: Resultados de resistencia a la compresión de mezcla patrón.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	70,5	81,3	98,5
	68,5	72,0	100,7
	70,4	77,2	99,6
Promedio	69,8	76,8	99,6
Desvt	0,92	3,81	0,90
CV	1,3	5,0	0,9

Cuadro 8: Resultados de resistencia a la compresión de D1/1.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	52,9	59,8	85,4
	53,0	53,9	83,5
	52,8	61,3	85,6
Promedio	52,9	58,3	84,8
Desvt	0,09	3,20	0,95
CV	0,2	5,5	1,1

desviación estándar y coeficiente de varianza propios en cada una de las pruebas realizadas, mencionados anteriormente en el apartado de Marco teórico de este documento.

Cuadro 7: Resultados de tensión diametral para mezcla patrón.

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	125,0	113,5	177,5
	127,0	114,0	178,0
	131,0	122,0	178,5
Promedio	127,7	116,5	178,0
Desvt	2,49	3,89	0,41
CV	2	3	0

Cuadro 9: Resultados tensión diametral de D1/1

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	126,5	157,5	178,5
	144,0	134,0	177,0
	149,5	153,0	179,5
Promedio	140,0	148,2	178,3
Desvt	9,81	10,18	1,03
CV	7	7	1

Cuadro 10: Resultados de resistencia a la compresión de D1/2.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	47,9	60,2	83,5
	51,3	60,5	82,3
	49,7	61,5	84,4
Promedio	49,6	60,7	83,4
Desvt	1,38	0,57	0,86
CV	2,8	0,9	1,0

Cuadro 11: Resultados tensión diametral para diseño D1/2

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	123,0	152,0	182,0
	125,5	158,5	181,0
	126,0	157,5	184,5
Promedio	124,8	156,0	182,5
Desvt	1,31	2,86	1,47
CV	1	2	1

Cuadro 12: Resultados de resistencia a la compresión de D1/3.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	48,8	67,3	79,5
	44,2	68,6	79,6
	49,5	64,0	80,7
Promedio	47,5	66,6	79,9
Desvt	2,34	1,91	0,54
CV	4,9	2,9	0,7

Cuadro 13: Resultados tensión diametral de D1/3

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	126,0	156,5	180,0
	122,5	154,5	180,0
	120,5	159,0	181,0
Promedio	123,0	156,7	180,3
Desvt	2,27	1,84	0,47
CV	2	1	0

Cuadro 14: Resumen de datos obtenidos para D1 en resistencia a la compresión

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	52,9	58,3	84,8
	49,6	60,7	83,4
	47,5	66,6	79,9
	51,7	55,1	71,6
Promedio	50,4	60,2	82,72
Desvt	2,05	4,23	5,12
CV	4,1	7,0	6,2

Cuadro 15: Resumen de datos obtenidos para tensión diametral D1

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	140,0	148,2	178,3
	124,8	156,0	182,5
	123,0	156,7	180,3
	132,5	151,0	177,3
Promedio	130,08	152,96	179,63
Desvt	6,74	3,53	1,98
CV	5	2	1

Cuadro 16: Resultados de resistencia a la compresión de D2/1.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	52,7	62,6	85,3
	52,3	64,5	84,2
	53,1	63,7	82,1
Promedio	52,7	63,6	83,9
Desvt	0,33	0,77	1,33
CV	0,6	1,2	1,6

Cuadro 17: Resultados tensión diametral de D2/1

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	134,0	143,0	179,5
	134,5	139,5	175,4
	135,5	141,0	166,3
Promedio	134,7	141,2	173,7
Desvt	0,62	1,43	5,52
CV	0	1	3

Cuadro 18: Resultados de resistencia a la compresión de D2/2.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	49,2	69,8	87,0
	50,0	67,6	87,8
	50,7	68,3	85,6
Promedio	50,0	68,5	86,8
Desvt	0,58	0,92	0,91
CV	1,2	1,3	1,0

Cuadro 19: Resultados tensión diametral de D2/2

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	135,0	146,0	180,0
	142,5	140,5	176,2
	138,0	139,0	177,4
Promedio	138,5	141,8	177,9
Desvt	3,08	3,01	1,59
CV	2	2	1

Cuadro 20: Resultados de resistencia a la compresión de D2/3.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	49,9	64,6	80,4
	51,7	62,3	78,1
	53,8	64,5	80,0
Promedio	51,8	63,8	79,5
Desvt	1,58	1,07	1,02
CV	3,1	1,7	1,3

Cuadro 21: Resultados tensión diametral de D2/3

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	143,5	153,0	176,2
	135,5	153,5	175,6
	139,0	157,0	175,9
Promedio	139,3	154,5	175,9
Desvt	3,27	1,78	0,24
CV	2	1	0,14

Cuadro 22: Resultados de resistencia a la compresión de D2/4.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	51,0	61,9	79,2
	47,2	65,8	83,0
	49,3	64,4	81,3
Promedio	49,1	64,0	81,2
Desvt	1,56	1,61	1,55
CV	3,2	2,5	1,9

Cuadro 23: Resultados tensión diametral de D2/4

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	133,0	151,5	174,3
	130,0	155,0	175,6
	130,5	152,0	178,6
Promedio	131,2	152,8	176,2
Desvt	1,31	1,55	1,80
CV	1	1	1

Cuadro 24: Resumen de datos obtenidos para D2 en resistencia a la compresión.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	52,7	63,6	83,9
	50,0	68,5	86,8
	51,8	63,8	79,5
	49,1	64,0	81,2
Promedio	50,9	65,0	82,8
Desvt	1,42	2,06	2,77
CV	2,8	3,2	3,3

Cuadro 25: Resumen de datos obtenidos para tensión diametral D2

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	134,7	141,2	173,7
	138,5	141,8	177,9
	139,3	154,5	175,9
	131,2	152,8	176,2
Promedio	135,9	147,6	175,9
Desvt	3,26	6,12	1,47
CV	2	4	1

Cuadro 26: Resultados de resistencia a la compresión de D3/1.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	55,8	67,2	83,7
	56,7	66,6	82,8
	56,2	67,9	84,2
Promedio	56,2	67,2	83,6
Desvt	0,36	0,51	0,58
CV	0,6	0,8	0,69

Cuadro 27: Resultados tensión diametral de D3/1

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	135,0	169,0	202,3
	13x8,0	170,0	191,8
	136,5	180,0	213,3
Promedio	136,5	173,0	202,5
Desvt	1,22	4,97	8,78
CV	1	3	4

Cuadro 28: Resultados de resistencia a la compresión de D3/2.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	56,7	68,5	85,5
	55,9	68,8	84,2
	57,1	71,3	84,9
Promedio	56,6	69,5	84,9
Desvt	0,49	1,24	0,53
CV	0,9	1,8	0,6

Cuadro 29: Resultados tensión diametral de D3/2

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	138,2	172,3	197,5
	135,7	179,6	194,2
	136,1	174,2	196,6
Promedio	136,7	175,4	196,1
Desvt	1,10	3,09	1,39
CV	1	2	1

Cuadro 30: Resultados de resistencia a la compresión de D3/3.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	57,3	66,5	90,0
	55,7	68,4	88,9
	54,2	68,6	87,3
Promedio	55,8	67,8	88,7
Desvt	1,28	0,91	1,11
CV	2,3	1,3	1,2

Cuadro 31: Resultados tensión diametral de D3/3

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	133,0	176,5	177,2
	138,5	178,0	175,8
	135,5	179,5	177,7
Promedio	135,7	178,0	176,9
Desvt	2,25	1,22	0,80
CV	2	1	0

Cuadro 32: Resultados de resistencia a la compresión de D3/4.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	54,3	65,0	83,5
	57,1	65,2	81,0
	56,2	65,4	81,2
Promedio	55,9	65,2	81,9
Desvt	1,17	0,19	1,13
CV	2,1	0,3	1,4

Cuadro 33: Resultados tensión diametral de D3/4

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	140,0	166,0	183,7
	136,5	168,0	188,4
	138,0	170,5	186,2
Promedio	138,2	168,2	186,1
Desvt	1,43	1,84	1,92
CV	1	1	1

Cuadro 34: Resumen de datos obtenidos para D3 en resistencia a la compresión.

Edad (días)	3	7	28
Compresión (MPa)	56,2	67,2	83,6
	56,6	69,5	84,9
	55,8	67,8	88,7
	55,9	65,2	81,9
Promedio	56,1	67,4	84,8
Desvt	0,32	1,53	2,52
CV	0,6	2,3	3,0

Cuadro 35: Resumen de datos obtenidos para tensión diametral D3.

Edad (días)	3	7	28
TD (kN)	136,5	173,0	202,5
	136,7	175,4	196,1
	135,7	178,0	176,9
	138,2	168,2	186,1
Promedio	136,8	173,6	190,4
Desvt	0,90	3,62	9,73
CV	1	2	5

Cuadro 36: Comparación de resistencia (MPa) a la compresión de diseños en estudio con diseño Patrón

Diseño/edad (días)	3	7	28
D1	50,4	60,2	82,7
D2	50,9	65,0	82,8
D3	56,1	67,4	83,6
Patrón	69,8	76,8	99,6

Cuadro 37: Comparación de tensión diametral (kN) compresión de diseños en estudio con diseño Patrón.

Diseño/edad (días)	3	7	28
D1	130,1	153,0	179,6
D2	135,9	147,6	175,9
D3	136,8	173,6	190,4
Patrón	127,7	129,8	178,0

Módulo de rotura indirecta

Con la utilización de la ecuación 4, se puede determinar que el módulo de ruptura correspondiente al diseño de mezcla patrón es de: **6,2 MPa**.

Para los demás diseños, los resultados se muestran en los siguientes cuadros:

Cuadro 38: Módulo de ruptura indirecto para diseño D1

Diseño	MR (MPa)
D1/1	5,8
D1/2	5,7
D1/3	5,6
D1/4	5,3
Promedio	5,6
Desvt	0,18
CV	3,25

Cuadro 39: Módulo de ruptura indirecto para diseño D2

Diseño	MR (MPa)
D2/1	5,7
D2/2	5,8
D2/3	5,6
D2/4	5,6
Promedio	5,7
Desvt	0,1
CV	1,7

Cuadro 40: Módulo de ruptura indirecto para diseño D3

Diseño	MR (MPa)
D3/1	5,7
D3/2	5,8
D3/3	5,9
D3/4	5,7
Promedio	5,8
Desvt	0,1
CV	1,5

Módulo de ruptura directa

Se elaboraron vigas de concreto hidráulico cuyas dimensiones abarcan los 150x150x600 mm siguiendo las recomendaciones dadas por la norma ASTM C78-, para determinar el módulo de ruptura directa mediante la aplicación de una carga a tercios, sometiendo el elemento a flexión.



Figura 57: Elaboración de las vigas de concreto hidráulico

Cuadro 41: Resultados de módulo de ruptura para vigas de concreto hidráulico

Diseño/edad	3	7	28
D3 (MPa)	6,50	6,95	9,73
	7,40	7,73	8,97
	6,35	7,18	9,62
Promedio	6,75	7,29	9,44
Desvt	0,46	0,37	0,34
CV	6,87	4,88	3,55

Diseño de elemento simple

Se realizó el estudio de resistencia a la fluencia del acero de refuerzo (f_y), tanto para varillas de 9,5 mm de diámetro (Nro. 3, grado 60) como para 12,7 mm (Nro. 4, grado 60); con la ayuda de la máquina universal del CIVCO y se determinaron los siguientes resultados.

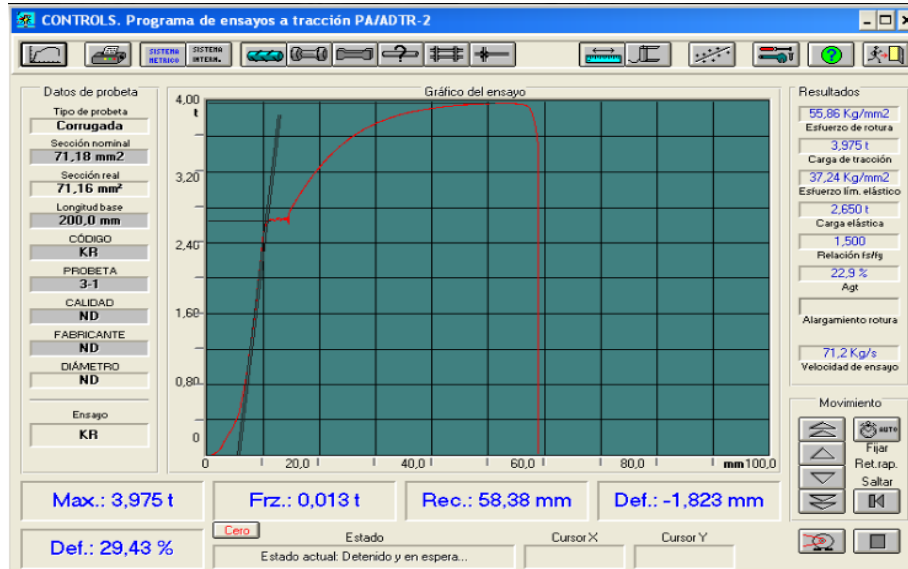


Figura 58: Determinación de esfuerzo a la fluencia de varilla corrugada nro. 3

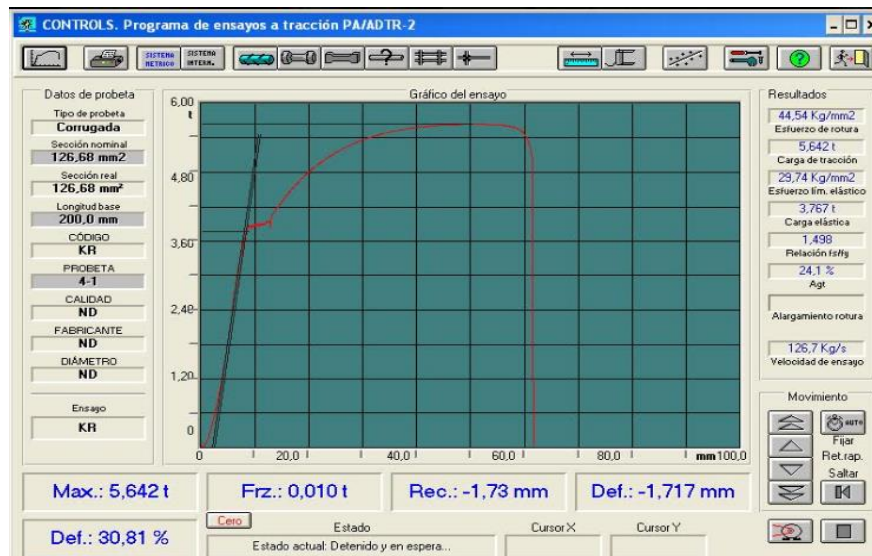


Figura 59: Cálculo de la resistencia a la fluencia para varilla corrugada nro. 4

Para la varilla Nro. 3 el $f_y = 5477,99$ MPa, dando como resultado una clasificación grado 60 y para la varilla Nro. 4 el $f_y = 4367,88$ MPa correspondiente a un grado 60.

Se elaboraron cilindros de concreto hidráulico para llevar el control de la resistencia a la compresión, necesaria para el diseño de las vigas de concreto reforzado. Los anteriores se muestran a continuación, con curva de comportamiento resistente alcanzada por los especímenes a edades de 3, 7 y 28 días.

Cuadro 42: Promedios de resistencia a la compresión de cilindros de concreto para vigas de concreto reforzado

Diseño\Edad	3	7	28
Con vidrio	22,45	31,26	40,63
Sin vidrio	27,89	36,76	46,66

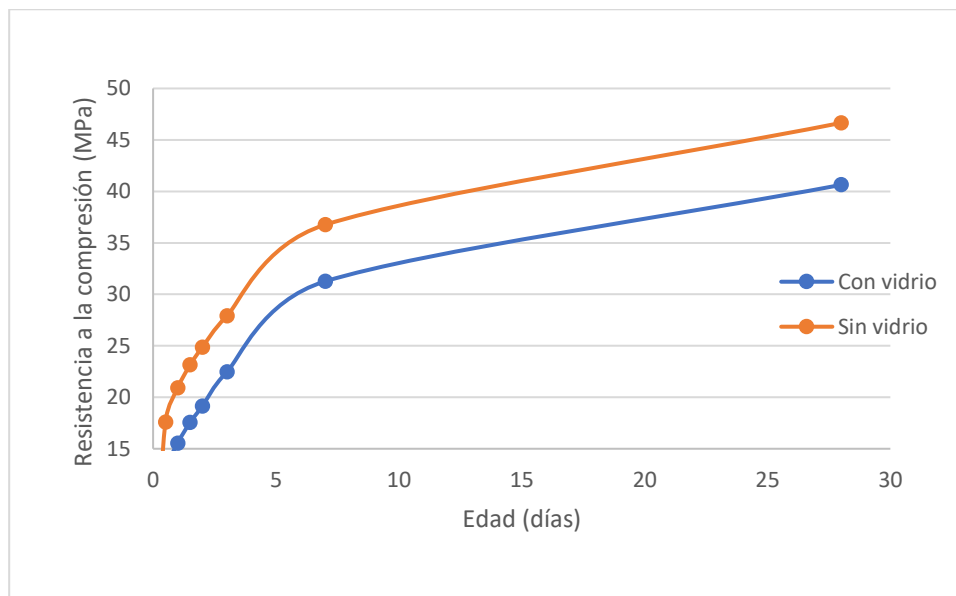


Figura 60: Resistencia a la compresión de cilindros de concreto hidráulico para elaboración de viga.

Seguidamente, se procedió a realizar el diseño de dos elementos de concreto reforzado (vigas), uno con la incorporación de material vítreo y otro con el diseño de la mezcla patrón.

El método de diseño se llevó a cabo por medio de LRFD y el desarrollo del mismo se muestra por medio de las siguientes secciones:

Cálculo de la altura de la viga

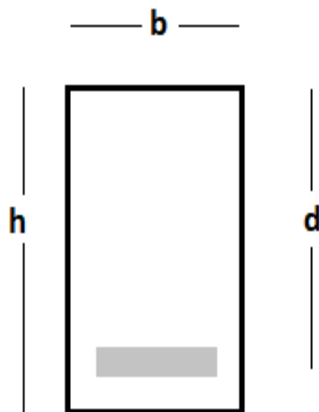
Se estableció una dimensión de 2 m para la longitud de las vigas en estudios y con esta, la determinación de alturas (h) de las mismas por medio de lo descrito por el ACI318-14.

Cuadro 43: Alturas mínimas para vigas según su condición de apoyo

Condición de apoyo	Altura mínima
Simplemente apoyada	L/16
Con un extremo continuo	L/18,5
Ambos extremos continuos	L/21

Fuente: ACI 318-14

Características del elemento

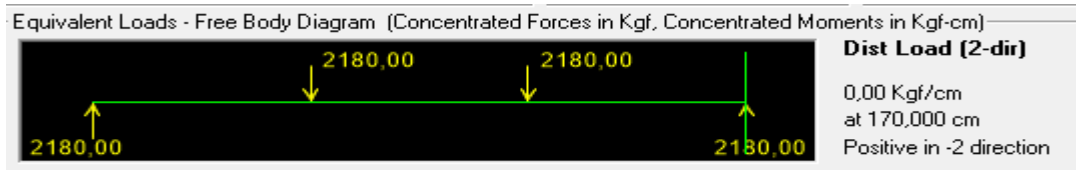


Características físicas	
b (cm)	15
d (cm)	22
h (cm)	25
rec (cm)	3

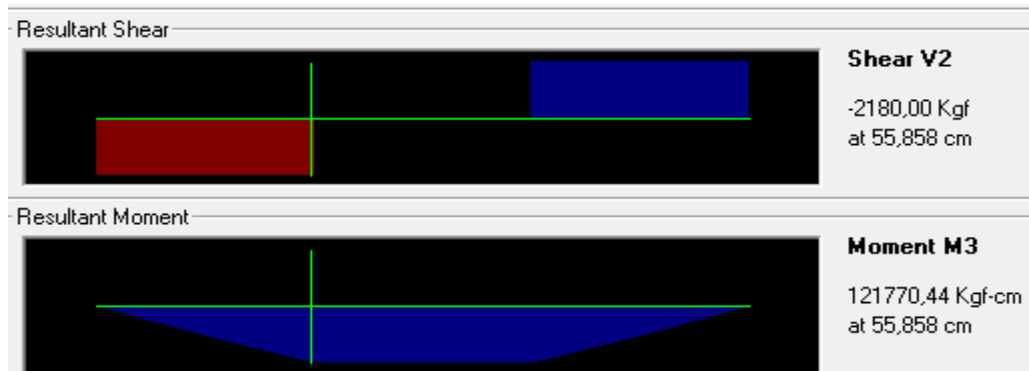
Peso del elemento	
Pu (kg/m ³)	2400,0
H (m)	0,25
b (cm)	0,15
L (m)	2,0
W (kg)	180,0

Características mecánicas	
f'c (kg/cm ²)	475,80
fy (kg/cm ²)	2800,0
Pu (kg)	2180,0
Mu (kg*cm)	145333,3

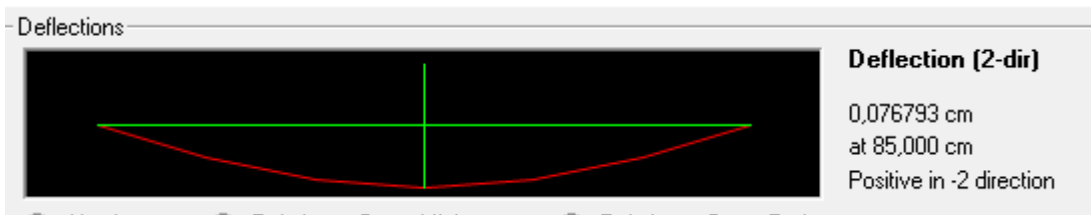
Modelo estructural



Diagramas de fuerzas internas



Deflexiones



Comprobación zona de tensión

$$a = d - \sqrt{d^2 - \frac{2 * M_u}{\phi * 0,85 * f'_c * b_w}}$$

$$a \text{ (cm)} = 1,09$$

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.85 & \text{si } f_c \leq 280 \text{ kg/cm}^2 \\ 0,85 - \frac{f_c - 280}{70} * 0,05 & \text{si } 280 < f_c \leq 560 \\ 0.65 & \text{si } f_c > 560 \end{cases} \quad \beta = 0,75$$

$$a = \beta_1 * c$$

$$c = 1,67$$

Determinación de acero en tensión

$$A_s = \frac{0,85 * f'_c * b_w * a}{f_y}$$

$$A_s \text{ (cm}^2\text{)} = 1,20$$

$$\rho_{\min} = \frac{0,8 \sqrt{f'_c}}{f_y} \geq \frac{14}{f_y}$$

$$\rho_{\min} = 0,003$$

$$A_{s,\min} = \rho_{\min} * b * d$$

$$A_{s,\min} \text{ (cm}^2\text{)} = 0,99$$

Determinación de acero por cortante

$$V_c = \left(0,5 \sqrt{f'_c} + 175 \rho \frac{V_u d}{M_u} \right) \cdot b_w d \leq 0,93 \sqrt{f'_c} \cdot b_w d$$

$$4011,18 \leq 6405,30$$

$$V_c = 0,53 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$V_c \text{ (kg)} = 3650,33$$

$V_u \geq \phi V_c$ entonces no colocar aros

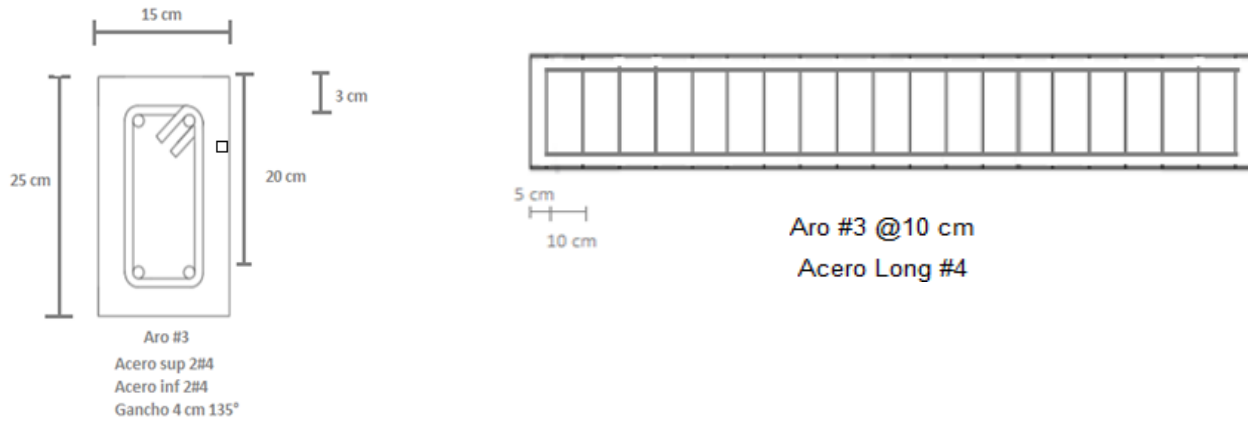
$$2180,00 \leq 2798,20$$

Colocar aros

Separación de acero

$$S_{\text{máx}} = \text{mín} \left\{ \begin{array}{l} d / 4 = 5,5 \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right. \quad S_{\text{max}} = \text{Min} (d/2) = 11 \text{ cm} \\ (60 \text{ cm}) = 30 \text{ cm}$$

Diagrama de la viga



Cálculo del momento último alcanzado por el acero por asignar

$$0,85 - \frac{f'_c - 280}{70} + 0,05 \quad \text{si } 280 < f'_c \leq 560 \quad \beta = 0,75$$

$$\rho_b = 0,85 \frac{f'_c}{f_y} \beta_1 \frac{6300}{6300 + f_y} \quad \rho_0 = 0,03$$

Suponer que se trata del 3er caso: $\varepsilon_s > \varepsilon_y$ y $\varepsilon'_s > \varepsilon_y$

$$a = \frac{(A_s - A'_s) \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b_w} \quad a \text{ (cm)} = 0,00 \text{ pues}$$

$$A_s = A'_s$$

$$M_n = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s \cdot f_y \left(d - d' \right) \quad M_n \text{ (kg*cm)} = 260134,43$$

Factor de reducción $\phi = 0,9$

$$M_u \text{ (kg*m)} = 2341,2$$

Falla de vigas de concreto reforzado



Figura 61: Desarrollo de grietas en vigas en estudio

Se realizó el acondicionamiento de las vigas de concreto reforzado con su respectiva instrumentación, para poder determinar el tiempo en el que se daba la aparición de grietas,

desplazamientos máximos y capacidad última de los elementos. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 15: Datos finales de falla para viga de concreto sin material vítreo

Condición de ensayo	Tiempo de aparición [±0,01] min	Carga [±0,000001] kg	Desplazamiento [±0,001] mm
Inicial	0,00	70,000000	0,000
Agrietamiento de 0,30 mm	23,12	7334,100202	5,392
Falla del elemento	38,32	10606,026002	35,821
Culminación de ensayo	39,65	2572,711290	45,543

Tabla 16: Datos finales de falla para viga de concreto con material vítreo

Condición de ensayo	Tiempo de aparición [±0,01] min	Carga [±0,000001] kg	Desplazamiento [±0,001] mm
Inicial	0,00	106,600101	0,000
Agrietamiento de 0,30 mm	23,01	7186,002010	8,510
Falla del elemento	34,43	9651,247760	28,422
Culminación de ensayo	36,23	7051,400200	47,401

Análisis de resultados

Los estudios de difracción fueron resultados adicionales a los objetivos de este proyecto, pero necesarios para poder explicar de mejor manera el comportamiento adquirido por la implementación del material vítreo a la mezcla de concreto hidráulico en estudio, ya que, por medio de este, se puede identificar la aparición de algún material perjudicial, en este caso el aluminio:

El reglamento prohíbe el uso de aluminio en concreto estructural, a menos que esté perfectamente revestido o cubierto. El aluminio reacciona con el concreto y en presencia de iones de cloruro, puede reaccionar electrolíticamente con el acero, provocando fisuración o descascamiento del concreto. (ACI 318-14)

Los estudios de difracción ayudaron a garantizar que las muestras de material vítreo en cada una de las moliendas realizadas no contuvieran óxidos de aluminio y que los mismos no fueran causantes de algún problema en el comportamiento mecánico de las mezclas en estudio.



Figura 62: Preparación de muestras de material vítreo para estudio de difracción.

Por medio de la figura 53, se puede notar que el contenido de la muestra presenta una estructura cristalina a lo largo de su cantidad, características propias del material vítreo con altos contenidos de óxido de sílice (SiO_2) y se descarta la tenencia de materiales metálicos tales como el óxido de aluminio. En el caso de haber identificado la aparición del aluminio, se hubiera visto cómo la frecuencia o longitudes de onda cambian, debido a su distinta propiedad de difracción ocasionada por su estructura metálica, provocando diferencias de amplitud de onda.

Para poder valorar la cantidad de variables que podían estar afectando por la presencia del material vítreo, se tomó en cuenta el factor directo de sustitución: el cemento hidráulico, y con el mismo la cantidad de agua en la mencionada relación agua/cemento (0,32) del diseño de mezcla en estudio. Pero, considerando que uno de los componentes de la misma, (el aditivo) se encuentra dosificado en función a la cantidad de cemento hidráulico, se tenía que realizar un ensayo en donde se pudiera identificar el cambio del comportamiento del aditivo en presencia con el material vítreo, por lo que se llevó a cabo una prueba de extensibilidad y medición de flujo, según lo recomendado por la norma ASTM C1437-15 para poder realizar pastas de cemento: agua y aditivo, con y sin la inclusión del material vítreo.

Según el procedimiento de norma, una vez que se retiró el cono truncado y se midió la capacidad de extensión de la mezcla, se observó que la consistencia de la misma es aún más uniforme y que disminuye la capacidad de extensión en cuanto a la presencia del material fino. Lo anteriormente mencionado se puede notar con mayor facilidad en la siguiente figura:

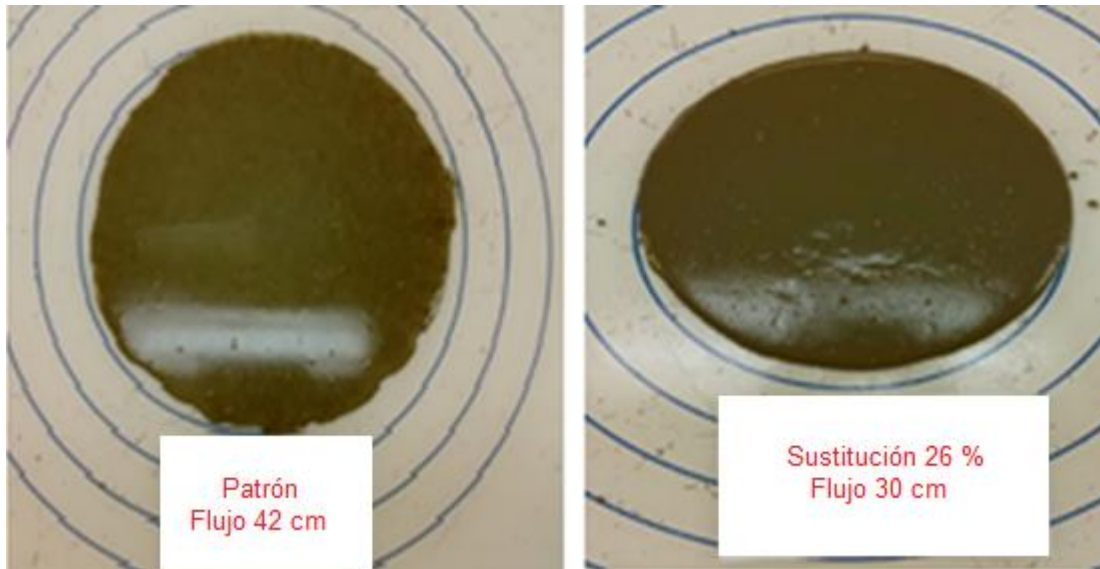


Figura 63: Comparación de consistencia de pasta con y sin la presencia de material vítreo.

La pasta podía observarse con una mayor densificación esperada, debido a la inclusión de un material que, además de ser fino (pasando por tamiz 0,075 mm (No200)), presentaba un porcentaje de absorción de 10,6% que disminuía su capacidad de fluir con mayor facilidad en comparación al patrón.

La ceniza volante y las características puzolánica de un material disminuye la demanda del agua (entre un 1% a un 10%) de la misma manera que los reductores de agua químicos líquidos, además de contribuir a la cohesión de la mezcla de concreto hidráulico. (PCA, 2001)

Lo anteriormente descrito por la literatura confirma que este estudio se encuentra describiendo las propiedades dadas por el material vítreo con características de cementos con adición puzolánica, en una mezcla de concreto hidráulico y se está identificando desde las pruebas visuales de interacción con el aditivo fluidificante de alto rango.

La cantidad de especímenes en estudio dependió de la ecuación 1 mostrada en el apartado de *Metodología* de este documento, para tener una cantidad significativa de especímenes a las distintas edades especificadas (3, 7 y 28 días), para

cada uno de los diseños propuestos e identificados por su porcentaje de sustitución de material cementante, por material vítreo.

Se tiene como resultado un total de 72 especímenes cilíndricos, 24 por edad para los ensayos mecánicos a los que los mismos fueron sometidos. Aunque se dé la comparación de la cantidad anteriormente mencionada, con lo recomendado por la tabla 5 para la determinación de una muestra estadística con error de 5% (96 especímenes en total), la definición de la cantidad de especímenes fue analizada conforme al recurso humano, material y temporal, tomando consigo un número que permitiera un promedio recomendado por las normas ASTM C39-17 y ASTM C496-17, respetando los coeficientes de variación y su respectivo cumplimiento.

Debido a que la tecnología del concreto hidráulico que se estudió es utilizada comúnmente a nivel industrial en elementos prefabricados con altos estándares de producción masiva, la determinación de comportamiento resistente a edades tempranas era de vital importancia para todos los involucrados en este estudio. Por lo que se establecieron edades de falla de 3 y 7 días, acordados por los mismos, en cantidades de tres especímenes cilíndricos de 100x200 mm para la

obtención de un promedio de datos. Así mismo, también se determinó el comportamiento mecánico a la edad de 28 días como dato especificado por la norma ASTM C192-17

Las cantidades de sustitución fueron establecidas como seguimiento del proyecto de graduación *Estudio de vidrio reciclado como componente para la elaboración de cementos terciarios* realizado por el ingeniero Edwin Espinoza, en donde se concluyó que las dosificaciones de material vítreo que brindaban mejores propiedades mecánicas (resistencia a la compresión y tensión diametral) en pastas de cemento hidráulico se encontraban en un rango de 25% a 30%. Teniendo así el estudio de dosificación del 26% (D1), 28% (D2) y 23% (D3) con sus respectivas series: D1/1, D1/2, D1/3, etc.

Hasta la realización del diseño D2 (28% de sustitución), se determinó que no se estaban alcanzando los supuestos iniciales del estudio en donde se debía igualar o superar los comportamientos físico-mecánicos del diseño patrón, por lo anterior, se presenta seguidamente una comparación entre los comportamientos mecánicos adquiridos entre los diseños propuestos y la mezcla patrón.

Cuadro 44: Diferencia del comportamiento a la resistencia a la compresión de D1-Patrón

Diseño\Edad	3	7	28
D1 (MPa)	50,4	60,2	82,7
Patrón (MPa)	69,8	76,8	99,6
Diferencia (%)	27,8	21,7	16,9

Cuadro 45: Diferencia del comportamiento a la resistencia a la compresión de D2-Patrón

Diseño\Edad	3	7	28
D2 (MPa)	50,9	65,0	82,8
Patrón (MPa)	69,8	76,8	99,6
Diferencia (%)	27,1	15,4	16,8

De los datos obtenidos para la resistencia a la compresión a edades especificadas, se puede ver como los datos positivos de diferencia muestran que el diseño patrón tiene un comportamiento superior a los diseños en estudio. Sin embargo, es notable como los resultados entre los diseños D1 (26%) y D2 (28%) de tan solo un 0,1%, por lo que el incremento de un 2% de sustitución de cemento hidráulico por material vítreo no mostró un cambio significativo para tratar de alcanzar el comportamiento resistente de la mezcla patrón. Con lo anterior, se decide que el siguiente diseño en estudio debe contener un menor porcentaje de sustitución de cemento hidráulico por material vítreo, para que haya una reacción mucho más rápida en el proceso de activación del silicato tricálcico y aluminato tricálcico (C₃S), responsables de la resistencia inicial y calor de hidratación como corresponden en la mezcla de concreto hidráulico.

Cuadro 46: Diferencia del comportamiento a la resistencia a la compresión de D3-Patrón.

Diseño\Edad	3	7	28
D3 (MPa)	56,1	67,4	83,6
Patrón (MPa)	69,8	76,8	99,6
Diferencia (%)	19,6	12,2	16,0

Para el diseño D3 (23%), las diferencias de resistencia a la compresión a edades tempranas para con el diseño patrón muestran ser menores y realizando una comparación entre los diseños D1 y D2 como grupo para con D3, mostró que cuanto mayor cantidad de vidrio en la matriz de mezcla de concreto hidráulico haya, habrá mayor reacción retardante de resistencia a la compresión a edades

tempranas (3 y 7 días). Este comportamiento puede ser esperado, debido a que la cantidad de cemento hidráulico en el diseño D3 es mayor y con el anterior, mayor cantidad de cemento hidráulico reacciona con el aditivo acelerante con el que se elaboraron los especímenes.

Los datos obtenidos para resistencias a la compresión a edades de 28 días son también ubicados en el rango de 16-17% de diferencia para los tres diseños, como una de las citas realizadas por el ingeniero Edwin Espinoza en el proyecto de graduación *Estudio de vidrio reciclado como componente para la elaboración de cementos terciarios*, en donde a edades tardías las diferencias de resistencia a la compresión se ubicaban entre el 15 y 20% para sustituciones de 20 a 30 % de cemento hidráulico por material vítreo.

La actividad puzolánica característica brinda a la mezcla de concreto hidráulico altas resistencias a la compresión a edades tardías alcanzadas por los especímenes en estudio. Lo anterior llama la atención cuando se observan los resultados obtenidos en los tres diseños a edades tempranas, pues es evidente que las diferencias de resistencia a la compresión en comparación con el diseño patrón mostradas en los cuadros 44, 45 y 46 pueden ser mayores.

La presencia del material retrasa la ganancia de la resistencia y al desarrollo de la cristalización de los silicatos tricálcicos (C₃S), responsables de la resistencia temprana de los especímenes. Además, se ve la alteración del comportamiento característico de los silicatos dicálcicos (C₂S) responsables de la resistencia final de los especímenes, pues ninguno de los diseños en estudio pudo igualar la resistencia a la compresión a 28 días del diseño patrón, lo anterior tomado en cuenta mediante las curvas de comportamiento mecánico y los conceptos de funcionamiento de cada uno de los compuestos químicos (C₃S y C₂S).

Cuadro 47: Diferencia del comportamiento de tensión diametral

de D1-Patrón

Diseño\Edad	3	7	28
D1 (kN)	130,1	153,0	179,6
Patrón (kN)	127,7	129,8	178,0
Diferencia (%)	1,9	17,8	0,9

Cuadro 48: Diferencia del comportamiento de tensión diametral de D2-Patrón.

Diseño\Edad	3	7	28
D2 (kN)	135,9	147,6	175,9
Patrón (kN)	127,7	129,8	178,0
Diferencia (%)	6,5	13,7	1,2

Cuadro 49: Diferencia del comportamiento de tensión diametral de D3-Patrón.

Diseño\Edad	3	7	28
D3 (kN)	136,8	173,6	202,2
Patrón (kN)	127,7	129,8	178,0
Diferencia (%)	7,1	33,7	13,6

En este caso, los resultados en las diferencias de comportamiento para tensión diametral significan que los diseños propuestos (D1, D2 y D3) son mayores a los del diseño patrón.

Los coeficientes de variación de los datos establecidos por las normas correspondientes a las distintas pruebas mecánicas muestran importancia de que los datos se encuentren dentro de un rango, para que tengan validez estadística y peso en los promedios encontrados. En todos los cuadros del apartado de *Resultados* de este documento, se muestra que para edades de 28 días se respeta la cantidad mínima de especímenes especificados por la norma ASTM C39-17 (tres especímenes), teniendo un resultado de coeficiente de variación también, dentro de lo establecido tanto para la resistencia a la compresión (3,2 %) como para tensión diametral (5,6 %), mientras que para

edades tempranas (3 y 7 días), el coeficiente de variación no se está cumpliendo, debido a que un espécimen (resaltado con rojo) altera el resultado de coeficiente de variación y este sale del máximo permitido; pero el espécimen demarcado puede dejar de ser tomado en cuenta para el valor de promedio y coeficiente de variación, ya que la norma establece que, para edades tempranas, el estudio puede ser llevado a cabo con dos especímenes como mínimo.

El espécimen resaltado con rojo y mencionado anteriormente fue identificado después de haber obtenido los resultados de los ensayos, ya que, durante el proceso de desmolde, se contó con un molde con defectos en las llaves de cierre, por lo que se debía aplicar fuerza adicional para que el espécimen pudiera ser liberado, con lo anterior se pudo haber alterado la resistencia que podía haber desarrollado desde este esfuerzo aplicado a edades tempranas (1 día).

Cuando se llevaron a cabo las pruebas de resistencia a la compresión del diseño D2, se pudo observar la aparición de secciones blancas en distintas partes dentro del espécimen y se identificó una textura, apariencia y consistencia similar a la del material vítreo adicionado. Lo anterior llama mucho la atención, mostrando cómo grandes cantidades de sustitución de cemento por material vítreo no garantizan que todo el material sea consumido dentro de la reacción química de la mezcla de concreto hidráulico.



Figura 64: Aparición de decoloración en sección del espécimen

Por lo anterior, se decidió realizar un estudio en el cual se pudieran identificar los compuestos químicos que en las muestras se encontraban, para poder explicar de mejor manera el comportamiento físico y mecánico de los diseños en estudio.

La prueba de microscopía o barrido electrónico ayudó a identificar los elementos presentes en distintas coloraciones a lo largo del espécimen y alrededor de los agregados gruesos de la mezcla, como se muestra en la siguiente figura:

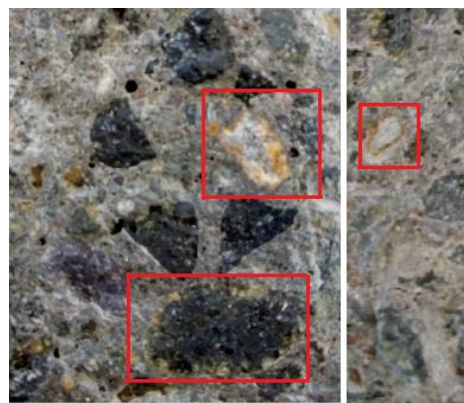


Figura 65: Decoloraciones naranja alrededor del agregado.

Para la realización del estudio de microscopía de barrido electrónico, primero se quiso analizar pequeñas muestras de cemento hidráulico, material vítreo y concreto hidráulico (sin inclusión de material vítreo), para poder ver su contenido elemental y compararlo con las cantidades de elementos presentes en una muestra de concreto hidráulico con decoloraciones naranja alrededor del agregado.

Los contenidos elementales dentro de las muestras en estudio se muestran en las figuras 34, 37, 40 y 43, correspondientes al apartado de *Resultados* de este documento.

Analizando la muestra de cemento hidráulico, se tiene un acierto en cuanto al gran contenido de calcio (34,3 %), debido a que se está contando con un cemento tipo MC/A-AR (Modificado con calizas de alta resistencia).

El contenido elemental del material vítreo

también da razón a los grandes contenidos de óxido de sílice (Si_2O), característicos al vidrio blanco cuyos contenidos típicos de este compuesto van de los 70-75%, en donde también se le adiciona entre un 1-4% de óxido de magnesio (MgO) dentro de su producción, para prevenir la desvitrificación. Lo anterior es información que se detalla en el *Marco teórico* de este documento.

Cuando se procedió a realizar el análisis del contenido elemental de una muestra de concreto hidráulico con la inclusión de material vítreo, cuya coloración naranja alrededor de su agregado grueso llamaba de sobremanera la atención, surgió la sorpresa de la identificación de la misma como forma heterogénea dentro de la muestra, la coloración sobresalía y se notaba en las imágenes tomadas en la microscopía de barrido electrónico:

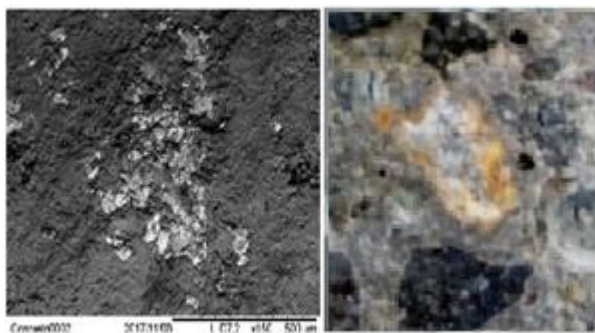


Figura 66: Resultados de microscopía de barrido electrónico.

El estudio del contenido elemental para la muestra de concreto hidráulico con la inclusión de material vítreo identificó la aparición de hierro (Fe) con un porcentaje de 3,2 %, no presente en muestras de concreto hidráulico sin la inclusión de material vítreo, como se muestra en la figura 43 del apartado de *Resultados* de este documento. Se descarta que el contenido de hierro fuera detectado por la máquina a causa del porta muestras utilizado para el análisis, ya que el mismo era de material aluminio. Descartando lo anterior, se puede pensar que la inclusión de material vítreo a una mezcla de concreto hidráulico puede causar una reacción de oxidación para con los agregados utilizados, debido a que las coloraciones naranja se muestran alrededor de los mismos, por lo que sería de gran aporte el poder realizar un estudio más profundo de sanidad a los agregados pétreos utilizados a los

largo del estudio, pues los mismos podrían ser susceptibles a reacciones de oxidación a largo plazo que puedan influir en la resistencia físico mecánica de los elementos que se elaboran con los mencionados, por lo que podría ser un análisis interesante el poder estudiar la sanidad de los agregados pétreos incluidos en todo el estudio.

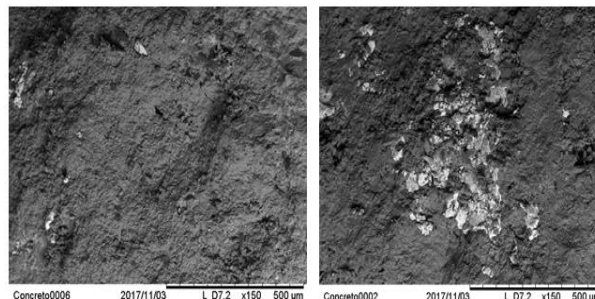


Figura 67: Microscopía de barrido electrónico para muestra de concreto hidráulico con y sin la inclusión de material vítreo

La anterior identificación también podría explicar la disminución en la resistencia en pruebas de compresión y tensión diametral, ya que la aparición de óxidos que envuelven el agregado puede actuar con una capa que evita la buena adherencia entre la pasta y el agregado y con ello la baja de las capacidades en flexión de los especímenes en estudio.

En el aspecto físico y a la hora de llevar a la falla a los especímenes, sería natural que, al haber poca adherencia entre la pasta y el agregado debido a la aparición del óxido, se provoque un tipo de falla con una disipación de energía entre sus planos débiles, no así un concreto hidráulico sin la inclusión de material vítreo, por lo que se realizaron observaciones durante la falla de los especímenes: para los estudios de la muestra patrón, se obtuvieron grandes resistencias a la compresión (datos visualizados en el cuadro 6 y 7 del apartado de *Resultados* de este documento), junto con un tipo 1 de falla, una falla explosiva en donde se da la desintegración de gran parte del espécimen; mientras que los especímenes que contenían una sustitución del 26% y 23% presentaron una falla tipo 3, dando como resultado la aparición de grietas superficiales y una pérdida mínima de la integridad del mismo. De lo anterior se tiene un resumen de la llamada prueba *pérdida de masa* para los

especímenes fallados a distintas edades:

Cuadro 50: Pérdida de masa para especímenes fallados a 7 días a resistencia a la compresión.

Espécimen	Peso inicial (kg)	Peso después de falla (kg)	Pérdida de masa (%)
Patrón	3,90	2,18	44,11%
D3	3,98	3,92	1,53%



Figura 68: Especímenes ensayados a resistencia a la compresión a 7 días de edad.

Cuadro 51: Pérdida de masa para especímenes fallados a 28 días a resistencia a la compresión.

Espécimen	Peso inicial (kg)	Peso después de falla (kg)	Pérdida de masa (%)
Patrón	4,05	2,18	46,11
D3	4,20	3,68	12,48

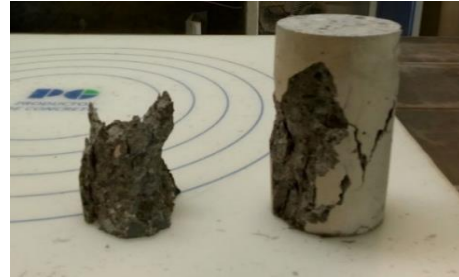


Figura 69: Especímenes ensayados a resistencia a la compresión a 28 días de edad.

La densificación obtenida en especímenes con cantidades de vidrio era notoria desde los estudios realizados en las pruebas de extensibilidad y no descartaban este mismo comportamiento durante su falla, pues se dio la cristalización del mismo, la cual provocaba la disipación dúctil del esfuerzo aplicado, en donde los núcleos de los mismos pudieron resistir las cargas sin perder gran parte de su estructura. Además, relacionándolo con la aparición de oxidación dentro de la matriz de la muestra, conforme el mismo va adquiriendo madurez, el espécimen pierde aún más masa, como se muestra en el cuadro 50, al igual que la aparición de dicha reacción a edades tardías (cuadro 51).

En la siguiente figura, se muestra el comportamiento general de los diseños en estudio

para ensayos de resistencia a la compresión y tensión diametral.

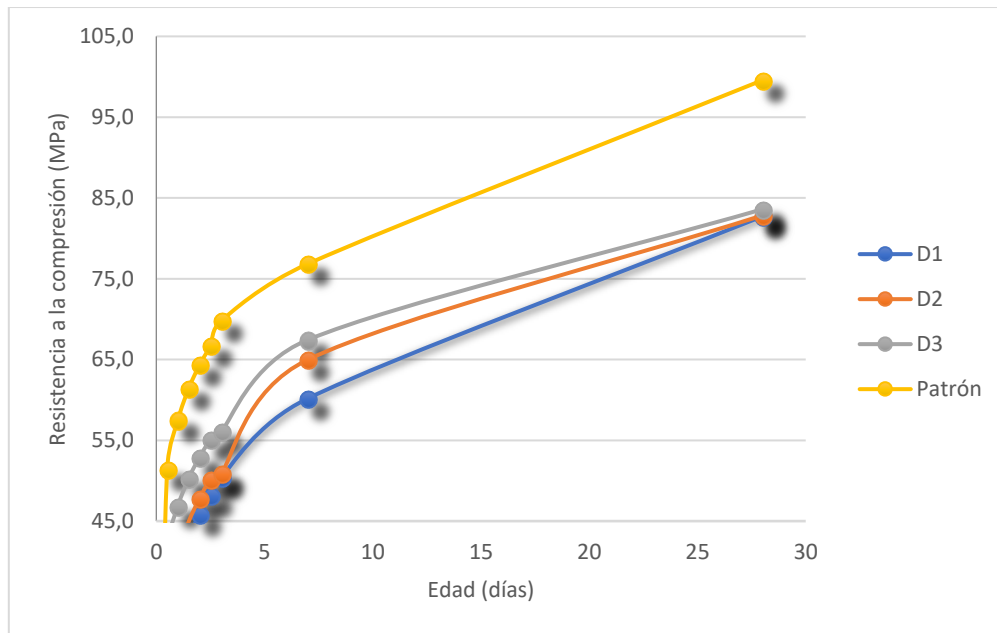


Figura 70: Comparación resistencia a la compresión de diseños en estudio.

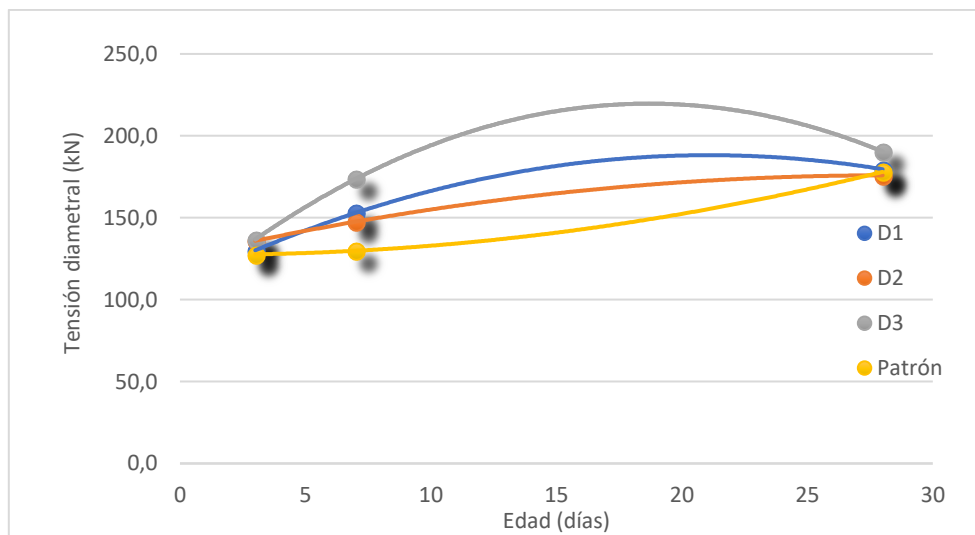


Figura 71: Comparación de tensión diametral para diseños en estudio.

Fuera de los datos obtenidos por la mezcla

patrón en este estudio, se quiso averiguar los datos

típicos que muestran las mezclas de concreto hidráulico de CAD700 realizada por PC, y que, en esta comparación, se nombrará diseño Patrón-PC.

De igual forma, los datos positivos mostraron que la resistencia de Patrón PC es mayor en comparación con los diseños estudiados con la inclusión de material vítreo.

Cuadro 52: Comparación porcentual resistencia a la compresión D1-Patrón PC.

Diseño\Edad	3	7	28
D1 (MPa)	50,4	60,2	82,7
Patrón PC (MPa)	55,8	65,3	84,9
Diferencia (%)	9,7	7,8	2,6

Cuadro 53: Comparación porcentual resistencia a la compresión D2-Patrón PC.

Diseño\Edad	3	7	28
D2 (MPa)	50,9	65,0	82,8
Patrón PC (MPa)	55,8	65,3	84,9
Diferencia (%)	8,8	0,5	2,4

A edades tempranas entre los diseños D1 y D2, las diferencias porcentuales se ubican en orden de 0-10%, mientras que, como pasó con la comparación con la muestra patrón original, las resistencias a edades de 28 días disminuyen como característica propia de la inclusión de un material que actúa como un retardante, en este caso el material vítreo. El orden de 2,0 a 2,6 % de diferencia es un dato importante y muy cercano en cuanto a alcanzar el comportamiento típico del CAD700 elaborado en planta, tomando en cuenta que el objetivo de este tipo de concreto es que el mismo alcance mínimo los 700 kg/cm² a los 28 días. Con el criterio anterior, todos los diseños alcanzan dicho comportamiento en términos de comportamientos mecánicos.

Para el diseño D3, la diferencia del comportamiento resistente es muy similar al Patrón PC, teniendo prácticamente la igualdad resistente con una disminución del 23% de cemento hidráulico, que siempre será un beneficio de ahorro para la planta, ya que el objetivo principal de una empresa como PC será el de disminuir costos igualando o sobrepasando las resistencias obtenidas por los elementos elaborados. El anterior criterio se basa, únicamente, en el costo atribuido al cemento hidráulico utilizado en las mezclas de concreto hidráulico, mediante los comportamientos mecánicos obtenidos.

Cuadro 54: Comparación porcentual resistencia a la compresión D3-Patrón PC.

Diseño\Edad	3	7	28
D3 (MPa)	56,1	67,4	83,6
Patrón PC (MPa)	55,8	65,3	84,9
Diferencia (%)	0,5	3,3	1,5

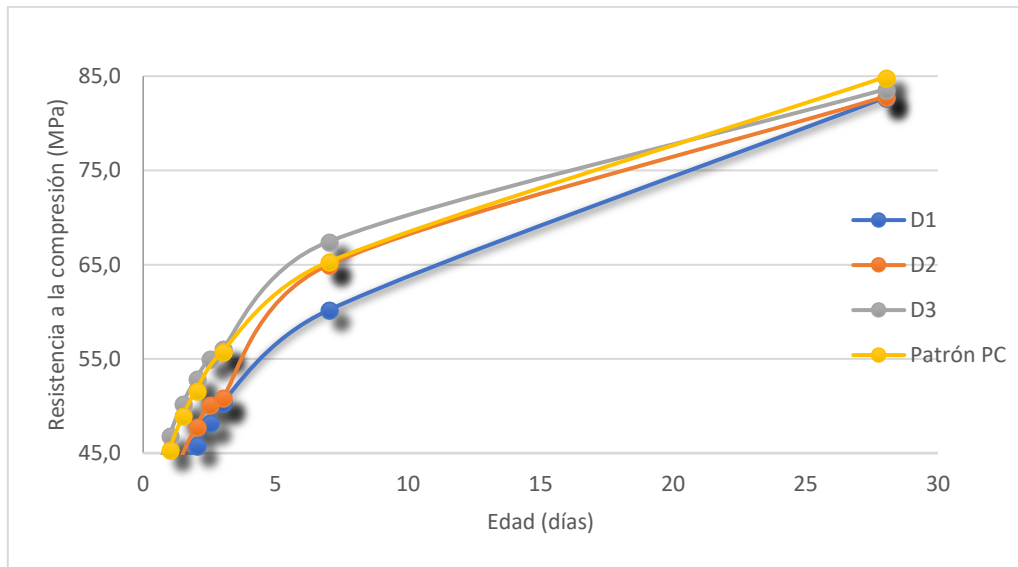


Figura 72: Comparación resistencia a la compresión diseños en estudio con Patrón PC.

En la figura 72 anteriormente mostrada, se puede observar cómo la línea de tendencia de una mezcla CAD700 (Patrón PC), comúnmente realizada en la planta de prefabricado pesado de las instalaciones de Productos de Concreto, muestra un comportamiento similar al obtenido por uno de los diseños en estudio: D3, garantizando con mayor certeza que el anterior diseño es el que está cumpliendo con las mejores resistencias mecánicas en comparación con sus compañeros: D1 y D2. Con lo anterior, también se puede garantizar que el diseño de mezcla patrón, con el que se realizaron todas las comparaciones en este estudio, tuvo un gran factor de seguridad de **1,17**, en donde el diseño de mezcla patrón tuvo un desempeño de resistencia a la compresión de un 17% mayor al de la mezcla PC-Patrón comúnmente desarrollada por la empresa, que contribuyeron a que el mismo obtuviera grandes resultados mecánicos.

Se mostró únicamente un análisis entre los comportamientos de resistencia a la compresión de patrón PC, debido a que otro ensayo como tensión diametral no es comúnmente realizado por la empresa, por lo que no se tienen datos respectivos, pero tanto resultados de ensayos de resistencia a

la tensión diametral como determinación de Módulo de ruptura podrían arrojar datos interesantes en cuanto a la tecnología de concreto hidráulico que se está produciendo en términos de flexibilidad aportada por el material, a elementos de concreto reforzado. Aunque la resistencia a la compresión fue mayor en el diseño de la mezcla patrón, el cambio en el tipo de falla podría demostrar que la inclusión de material vítreo en concretos de altos desempeños podría aumentar el factor de seguridad del elemento, cuando el mismo se ve sometido a cargas que provoquen sus fallas, ya que las apariciones de grietas superficiales darían alerta a la necesidad de reparación del elemento. Mientras que, en el caso de falla de un elemento CAD700, sin la inclusión de vidrio, tendrá una falla peligrosa para con la estructura, hablando en los términos de comportamiento que estos mostraron.

La determinación del módulo de ruptura se llevó a cabo tomando en cuenta el estudio *Resistencia a la compresión y módulo de ruptura de mezclas de concreto medidos en núcleos y vigas extraídos en campo*, realizado por el ingeniero Mauricio Moya y el ingeniero Alejandro Navas, en donde recomendaron la utilización de la ecuación $2\sqrt{f'c}$, que muestra ser el rango intermedio entre

las ecuaciones de $1,99 \sqrt{f'c}$ y $3,18\sqrt{f'c}$, citadas por el comité del ACI 363.

Los resultados obtenidos se muestran en los cuadros 38, 39 y 40 del apartado de *Resultados* de este documento, tomando en cuenta las resistencias a la compresión alcanzadas por el diseño D3, escogido como el que mostró las mejores propiedades físico-mecánicas. Seguidamente, se llevó a cabo el ensayo de determinación de módulo de ruptura según la norma ASTM C78-16, con la construcción de vigas de concreto hidráulico sometidas a cargas de flexión y se compararon los resultados obtenidos entre las prueba directa e indirecta, mostrando que, para el módulo de ruptura directa, se dio un valor de 9,4 MPa y para la prueba indirecta 5,8 MPa, provocando un error del 38%, cuando lo citado en el estudio anteriormente mencionado, el error debió de encontrarse en un rango del 20-24%. Además, el estudio propone un coeficiente de ajuste para poder disminuir el error entre la prueba directa e indirecta, siendo así una ecuación de $2,5\sqrt{f'c}$. Los resultados comparativos se muestran a continuación:

Cuadro 55: Comparación de módulo de ruptura directa e indirecta.

Diseño	MR (MPa)	
D3 Directo	9,4	
D3 indirecto	5,8	7,2
Error (%)	38,9	23,7

Del cuadro anterior, se tiene que el D3 indirecto de la columna izquierda corresponde al resultado de la ecuación $2\sqrt{f'c}$, mientras que el D3 indirecto de la columna derecha mostró ser el

resultado de la ecuación con factor de ajuste de $2,5\sqrt{f'c}$. Si bien es cierto, el error obtenido entre los dos valores (prueba indirecta e indirecta) disminuyó con la utilización de la ecuación con coeficiente de ajuste, no se alcanzó el error concluido también por el estudio (7-10%) y el anterior no muestra dar un módulo de ruptura que garantice ser cercano a uno determinado por medio de una prueba directa, por lo que la utilización de estas ecuaciones no se adecúa para el tipo de concreto de alto desempeño que se está estudiando.



Figura 73: Elementos fallados para determinación de módulo de ruptura

La identificación de un módulo de ruptura del 9,4 MPa para concretos hidráulicos puede traer consigo beneficios en cuanto al aporte en flexión para elementos sometidos a estos comportamientos, tales como losas o vigas de concreto reforzado, ya que sus componentes, en este caso el material vítreo, pueden mostrar mayor elasticidad al verse sometidos a cargas puntuales o distribuidas. Para el diseño de mezcla patrón, se estima un módulo de ruptura del 6,25 MPa, calculado por medio de la ecuación propuesta por el estudio descartado para la determinación del módulo de ruptura, debido a su gran porcentaje de error, pero que da una idea acerca de la superioridad alcanzada por el diseño D3 con respecto a diseño patrón.

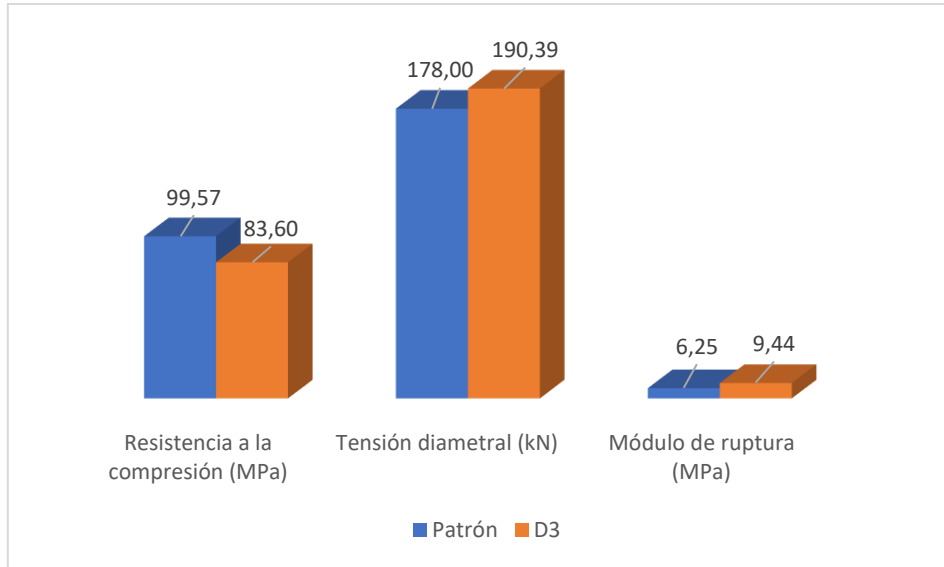


Figura 74: Comparación de comportamientos mecánicos para patrón y D3.

En la anterior figura, se muestran los datos obtenidos para ensayos mecánicos entre el diseño patrón y D3, siendo el último mencionado el que muestra los mejores resultados en comparación con sus compañeros D1 y D2, en donde se visualiza nuevamente que, aunque el diseño patrón tenga una superior resistencia a la compresión obtenida a los 28 días, el diseño D3 arroja mejores valores para las pruebas de tensión diametral y módulo de ruptura, visualizando cómo el D3 tiene características de flexibilidad aportadas por el material vítreo en una adición del 23% de la cantidad total del cemento hidráulico correspondiente al diseño en estudio.

Las vigas de concreto reforzado fueron diseñadas tomando en cuenta datos de entrada, tales como características propias de los materiales con los que las mismas se iban a construir. Parámetros como resistencias del acero de refuerzo (f_y) y la resistencia a la compresión de cilindros de concreto hidráulico obtenido a los 28 días de edad (f'_c). En el parámetro anteriormente mencionado en particular, se contó con el caso de la imposibilidad de tener acceso al diseño de mezcla y agregados pétreos (agregado fino y grueso) con los que se había trabajado para las

etapas anteriores de este proyecto, debido a políticas de protección de diseños de mezcla correspondientes a la empresa, por lo que se decidió trabajar con los agregados pétreos disponibles en el CIVCO (caracterización adjunta en anexos) y se elaboraron los concretos con las dosificaciones correspondientes y propias de la empresa involucrada, en donde los técnicos de la misma colaboraron para llevar a cabo el colado de las vigas de concreto reforzado.



Figura 75: Vigas de concreto reforzado

Debido a que en la etapa de diseño de las vigas de concreto reforzado se pensaba contar con los mismos materiales, se llevó a cabo el diseño de las vigas, tomando en cuenta la obtención de una resistencia a la compresión de cilindros a edades de 28 días (f_c) de 700 kg/cm², por lo que se construyeron las armaduras con cuatro varillas longitudinales nro. 4 (1,27 cm) y aros nro. 3 (0,95 cm). Sin embargo, en vista de que no se iban a utilizar los mismos materiales para la elaboración de concreto hidráulico, se decidió llevar el control y monitoreo de la resistencia adquirida por el concreto con el que se iban a elaborar las vigas, apartando una cantidad de concreto hidráulico para el moldeo de cilindros cuyas dimensiones abarcaban los 100 x 200 mm, con el fin de poder conocer el desempeño de los mismos a distintas edades alcanzadas (3, 7 y 28 días). El comportamiento del concreto se puede visualizar de mejor manera en la figura 60, evidenciando que la inclusión de material vítreo en mezclas de concreto hidráulico sigue obteniendo un desempeño menor a uno que el que no contiene material vítreo, con diferencias mostradas en el siguiente cuadro:

Cuadro 56: Diferencias en el desempeño resistente del concreto elaborado para vigas de concreto hidráulico

Diseño\Edad	3	7	28
Con vidrio	20,15	31,26	40,63
Sin vidrio	26,20	36,76	46,66
Diferencia (%)	23,09	14,96	12,92

Los datos de diferencia porcentual muestran que el concreto hidráulico con la inclusión de material vítreo obtiene menores resultados, pero que conforme los especímenes van ganando edad, la diferencia porcentual se va disminuyendo.

Además de visualizar estos resultados, se examinó el espécimen una vez fallado (nalaisis visual) y se observaron diferentes manchas a lo largo de la matriz, por lo que se decidió preparar muestras para poder realizar un estudio de microscopía de barrido electrónico de los escombros resultantes de la falla y así conocer el contenido elemental correspondiente a estas manchas.

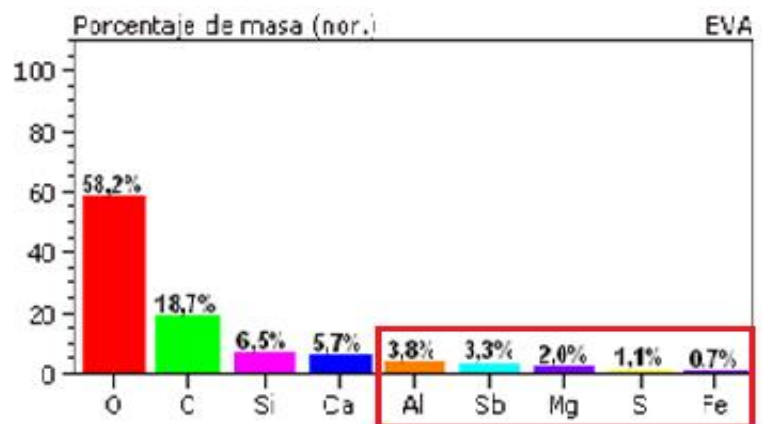


Figura 76: Resultados de contenido elemental por microscopía de barrido electrónico a concreto de elaboración de vigas de concreto reforzado.

En el apartado de *Resultados* de este documento, se muestra que, en los análisis de contenido elemental de microscopía de barrido electrónico correspondientes a las nuevas muestras de concreto hidráulico con el que se elaboraron las vigas de concreto reforzado, se da la aparición de elementos tales como el antimonio (Sn), aluminio (Al) y azufre (S), y si se toma en cuenta que el único material que ha variado en la elaboración de este concreto ha sido el agregado pétreo (agregado grueso y fino), el mismo pudo haber ocasionado una contaminación a lo largo de los especímenes, incluso en la aparición de las manchas superficiales, como se muestra en la anterior figura y pudo también haber ocasionado la baja en el desempeño de los concretos hidráulicos elaborados.

Sin embargo, no inhiben el comportamiento mecánico correspondiente a la incorporación de material vítreo en concreto hidráulico, ya analizado en las anteriores etapas de este proyecto. De lo anterior, independientemente del concreto hidráulico que se esté analizando con respecto a las resistencias obtenidas, se determinó que, en esta etapa, el comportamiento del concreto hidráulico con la inclusión de material vítreo es

menor a su patrón (sin inclusión de material vítreo), y que ahora será interesante observar su desempeño en estructuras tales como las vigas de concreto reforzado.

Una vez instalado el marco de falla, se instrumentaron las vigas de concreto reforzado, con *strain gage* en la parte inferior y superior del centro de los elementos, junto con un dispositivo de medición de deformaciones (*crackmeter*). Se llevó a cabo el ensayo aplicado, primeramente, en la viga de concreto sin la inclusión de material vítreo; seguido de la viga de concreto con material vítreo. Fue en el anterior en donde se generó un inconveniente técnico, en el cual los equipos se detuvieron y al cabo de alrededor de 2 min se retomó el procedimiento con la aplicación de la última carga aplicada antes de que sucediera el atraso.

Los cuadros de desempeño mecánico de los elementos se muestran en el apartado de *Resultados* de este documento, pero también, en las siguientes figuras, se pueden visualizar diferentes parámetros obtenidos de los resultados de falla:

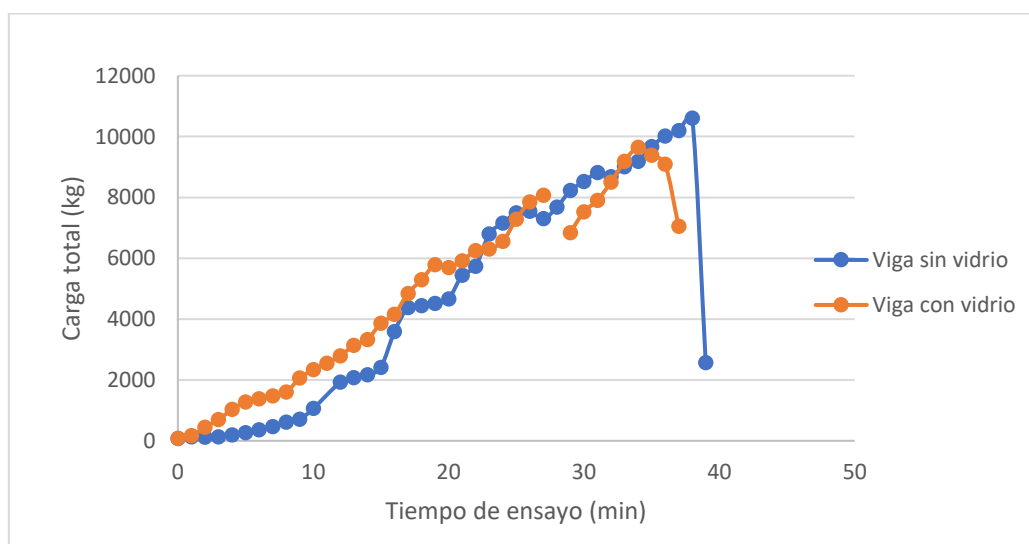


Figura 77: Carga versus tiempo de ensayo para vigas de concreto reforzado con y sin la inclusión de material vítreo.

Como se mencionó anteriormente, en la curva de desempeño de la viga de concreto reforzado con la inclusión de material vítreo, se muestra una discontinuidad que se dio a causa del inconveniente técnico del equipo. Además, se visualiza que la misma tardó menos en alcanzar su máxima capacidad. La curva de desempeño resistente de la viga de concreto sin inclusión de

material vítreo presenta una baja al cabo del minuto 38, debido a que es en este momento, en el que la misma alcanza su capacidad última. Y, finalmente, se obtiene una diferencia de un 33,5 % a favor de la viga de concreto hidráulico sin la inclusión de material vítreo, del cual se estima que hubiera sido menor en el caso de no haber ocurrido el desperfecto mecánico.

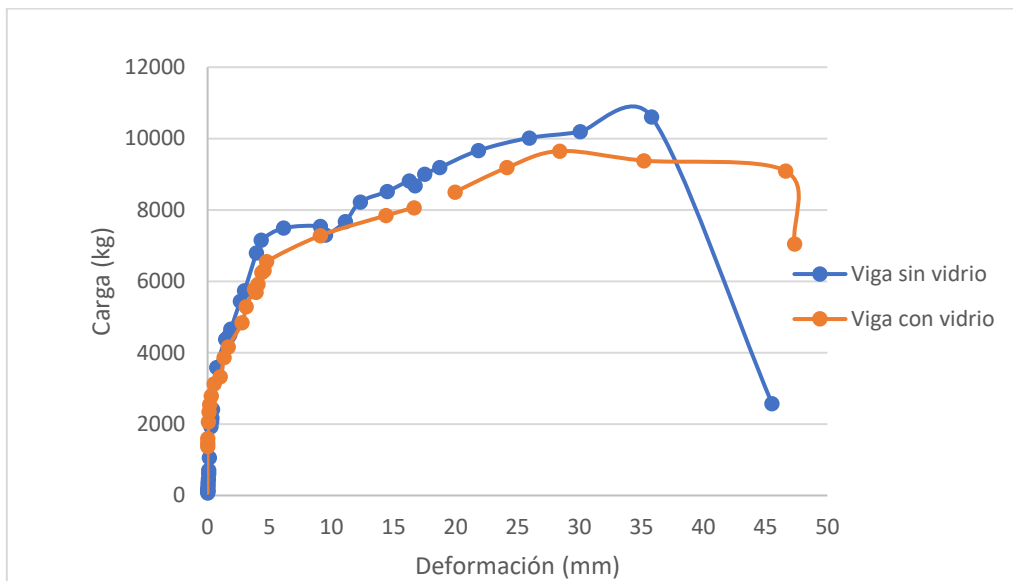


Figura 78: Carga versus deformación para vigas de concreto reforzado con y sin la inclusión de material vítreo.

La figura anterior muestra el desempeño mecánico de los elementos en estudio, en cuanto a la deformación alcanzada versus la carga aplicada. Se visualiza que la viga de concreto con la inclusión de material vítreo alcanza una mayor deformación que la viga de concreto sin material vítreo, a una carga menor, pero que reafirma el comportamiento encontrado en etapas anteriores de este documento, en el cual el concreto muestra tener una capacidad de deformación mayor a uno, que no lleva consigo la inclusión del adicionado en estudio y que llama la atención en el momento en el que se observa el área de falla entre cada una de las vigas de concreto reforzado, traduciéndose en los siguientes porcentajes de elongación para los elementos, una vez que han alcanzado su máxima

carga soportante (etapa plástica), hasta la culminación del ensayo, cuando las grietas sobrepasaron el eje neutro y provocaron la falla por compresión.

Cuadro 57: Porcentajes de diferencia de deformación después de carga máxima.

Elemento	Deformación plástica (mm)	Deformación plástica (%)
Viga sin vidrio	9,72	27,14
Viga con vidrio	18,93	66,66

:



Figura 79: Área de falla en viga de concreto con material vítreo versus sin material vítreo

En la figura 79, se puede apreciar cómo los dos elementos fallaron en la misma zona (parte superior en apoyo derecho), mostrando una falla por compresión en donde el rectángulo equivalente (figura 14) va adquiriendo el aumento del área de

tensión con la aparición de grietas y con ello, el acortamiento del área soportante en la zona de compresión, llegando, finalmente, a la falla de los elementos.



Figura 80: Área de afectación en falla en viga de concreto con material vítreo versus sin material vítreo

Aunque los dos elementos han fallado perjudicando la misma zona, en la figura 80 se ve cómo la longitud máxima de afectación es mayor para la viga de concreto sin la inclusión de material vítreo (18 cm), que para una viga con la inclusión

de material vítreo (11 cm). Lo anterior da consigo una pérdida menor de la integridad del elemento con una mayor deformación para la viga de concreto con la inclusión de material vítreo.



Figura 81: Vigas después de ensayo de falla

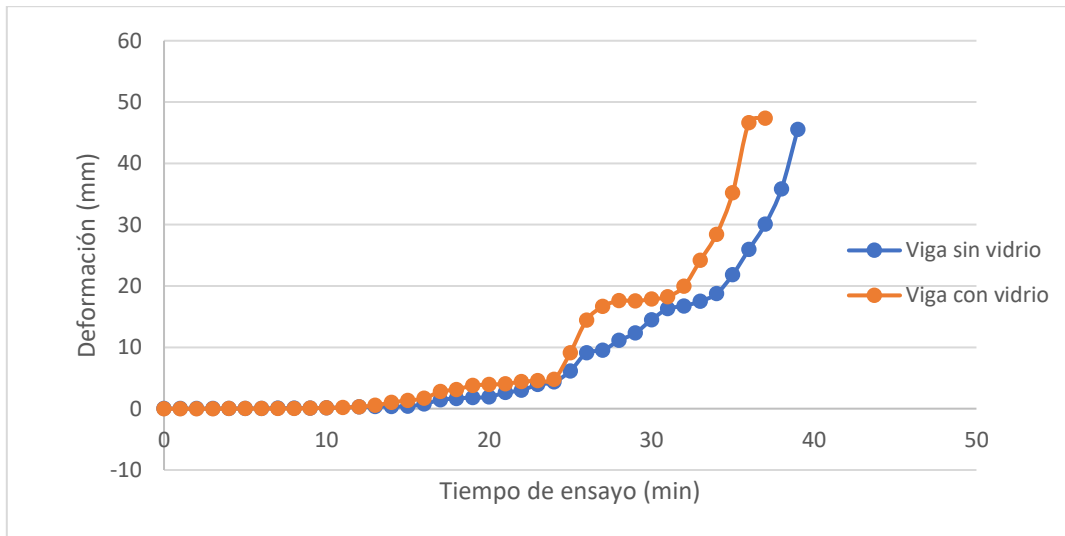


Figura 82: Deformación versus tiempo de ensayo para vigas de concreto reforzado con y sin la inclusión de material vítreo

El tiempo de falla fue menor para la viga de concreto con la inclusión de material vítreo y se presume que el mismo fue ocasionado por el inconveniente ocurrido durante la ejecución del ensayo. Sin embargo, se visualiza que la deformación adquirida por dicho elemento muestra ser mayor, afirmando que la inclusión de material vítreo puede hacer que los elementos se comporten de una forma más flexible sin el desprendimiento de

gran parte de su integridad, a una carga que se le esté aplicando hasta su capacidad última, tomando en cuenta la misma aparición de las grietas mostradas por el elemento que no presentaba material vítreo en su matriz, de lo anterior se muestra, a continuación, un diagrama de fases de aparición de grietas hasta la que originó el punto de falla:



Figura 83: Diagrama de fase de aparición de grietas para las vigas de concreto reforzado



Figura 84: Vigas de concreto reforzadas una vez culminado el ensayo.

La aparición de las grietas se dio de la misma manera para los dos elementos en estudio, incluso la grieta de 0,30 mm surgió en el mismo minuto 23 de haberse ejecutado el ensayo y las mismas surgían a una distancia de más o menos 10 cm entre cada una de ellas, hasta la aparición de las grietas críticas en la zona de compresión que originaron la falla final del elemento y que se visualiza como zona roja en el anterior diagrama de aparición de grietas.



Figura 85: Grosor de grietas en viga de concreto con material vítreo

Aunque la zona crítica de tensión de las vigas de concreto reforzado simplemente apoyadas muestra ubicarse en la parte media inferior del elemento y se espera que la zona de falla por compresión se dé en el centro superior; los dos elementos en estudio encontraron su zona de falla en el apoyo de aplicación de carga superior derecho, ocasionado por el pivoteo del mismo durante la aplicación de la carga, dando consigo que la misma no se estuviera aplicando de manera uniforme. Lo anterior se confirma debido a que el equipo no se cambió de configuración, originando que los dos elementos encontraran una misma ubicación de la falla.

Realizando una comparación entre los datos obtenidos por el diseño de los elementos de concreto reforzado y los resultados obtenidos durante la falla de los mismos, las deformaciones a una carga de 2800 kg prácticos versus teóricos (determinados el modelo SAP2000), se visualizan los siguientes datos:

Cuadro 58: Deformaciones obtenidas para carga de diseño de 2180 kg

Viga	Tiempo (min)	Deflexión teórica (mm)	Deflexión práctica (mm)
Sin vidrio	18	0,78	1,67
Con vidrio	16		2,06

El aporte del material vítreo sigue dando consigo una mayor flexibilidad para los elementos que en su matriz lo contengan, comportamiento que no puede ser determinado por un modelo estructural (deformación teórica). Y en cuanto a los momentos máximos encontrados entre el teórico y práctico, se obtienen datos en el siguiente cuadro:

Cuadro 59: Momentos resistentes y de diseño para las vigas de concreto reforzado

Viga	f'c de diseño (kg/cm ²)	Momento de diseño (kg*m)	Momento resistente (kg*m)
Sin vidrio	414,31	1235,33	2341,2
Con vidrio	475,8	1217,704	

Los momentos de diseños fueron obtenidos por medio del modelo de SAP2000, tomando en cuenta las diferentes resistencias del concreto hidráulico (f'c). El momento resistente fue calculado ahora sí, con la cuantía de acero con la que iba a contar las vigas: cuatro varillas longitudinales de 12,7 mm de diámetro (nro. 4) y aros de 9,5 mm (nro. 3) a cada 10 cm. Los dos elementos utilizaron la misma cuantía para que el diseño estructural no fuera una variable en el análisis del comportamiento mecánico de las vigas y para que el mismo siguiera concentrándose en el comportamiento del concreto hidráulico, ocasionando el mismo resultado de momento resistente para los dos elementos. Si bien es cierto, la utilización de cuatro varillas nro. 3 longitudinales hubiera cumplido con los momentos de diseño, el haber contado con cuatro varillas nro. 4 casi duplicó el momento resistente en comparación con el momento de diseño, pero para este estudio, el haber sobre diseñado los elementos hace que el mismo siga priorizando el comportamiento mecánico del concreto, pues las barras de acero quedaron intactas (sin ningún daño) durante la aplicación de las cargas hasta la llegada de la falla.

En la siguiente figura, se muestra una comparación de los parámetros obtenidos por los dos elementos de concreto reforzado, en donde se puede visualizar nuevamente, que, aunque el concreto sin adición de material vítreo con el que se vayan a elaborar los elementos de concreto reforzado muestre mejores comportamientos en comparación con uno cuya adición se encuentra presente en su matriz, los resultados en cuanto a las deformaciones obtenidas e incluso la carga residual es mayor, dando consigo bondades en cuanto a la ductilidad adquirida.

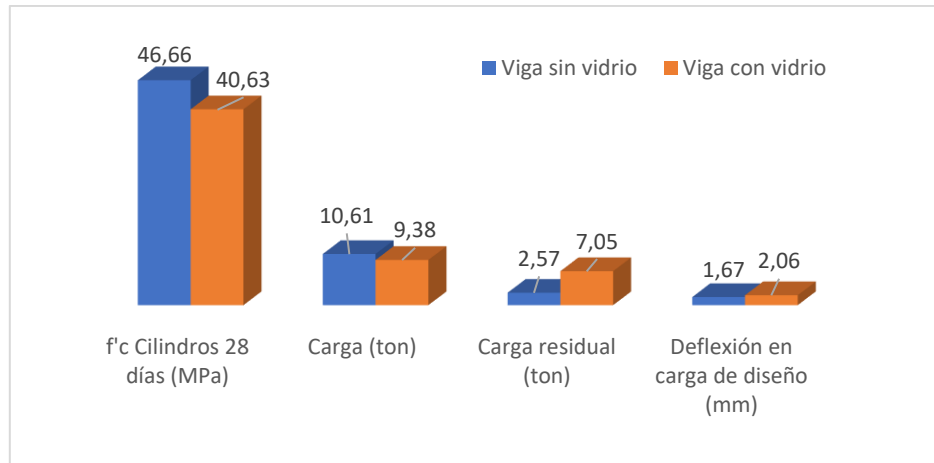


Figura 86: Comparación de comportamiento de vigas de concreto reforzado

Una vez realizada la falla, se procedió a realizar un corte en la zona crítica afectada, para dejar expuesto el acero de refuerzo y revisar si el mismo había sufrido de algún daño en el proceso

del ensayo. Sin embargo, los dos elementos muestran mantener el mismo en excelentes condiciones, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 87: Acero y grietas de falla en viga de concreto con material vítreo versus sin material vítreo.

Una de las observaciones realizadas durante el estudio del concreto de los elementos cortados fue la reacción entre el concreto con material vítreo y el acero de refuerzo, para visualizar si había presencia de algún tipo de coloración u oxidación ocasionada por el contacto entre los mencionados,

pero, en la siguiente figura, se puede apreciar que la huella dejada por la varilla es completamente limpia y sin alteraciones, por lo que se dio una buena cobertura entre ellos durante su construcción.



Figura 88: Huella de acero de refuerzo en viga de concreto con material vítreo

Otro de los hallazgos realizados durante el análisis visual es la aparición de burbujas o espacios vacíos a lo largo de la matriz del concreto, para los dos elementos en estudio. Los anteriores pudieron ser provocados por la falta de vibrado para el favorecimiento del acomodo del concreto

hidráulico en el proceso de la elaboración de las vigas. En la siguiente figura, se encierra con recuadros de color rojo la ubicación de los espacios vacíos provocados por la falta del acomodo del material.

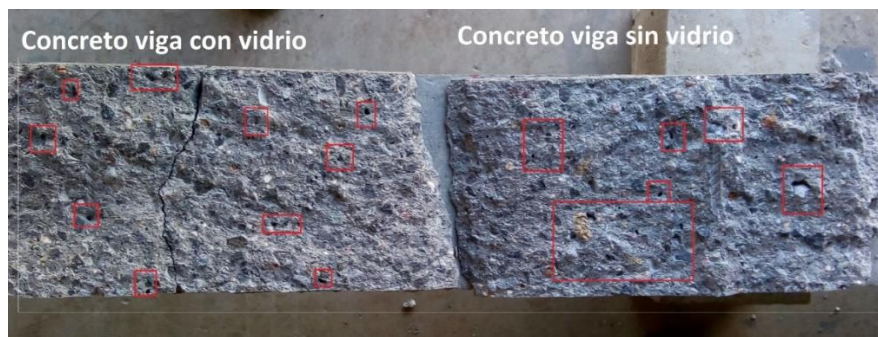


Figura 89: Espacios vacíos en matriz de concreto hidráulico.

Una de las consecuencias más grandes de la aparición de estas burbujas, durante la construcción o elaboración de los elementos, es la baja en la resistencia mecánica, ya que, durante la aplicación de las cargas, la energía se disipará por donde la misma encuentre planos débiles, en este caso, estas superficies, originando grietas a través de ellas. Si el elemento cuenta con muchos espacios vacíos, habrá mayor probabilidad de la aparición de más grietas producto de la falta de densificación del material o el concreto en este caso.

De manera global, por medio de este

proyecto se dio un estudio amplio de la inclusión de material vítreo en mezclas de concreto hidráulico como sustituto parcial del cemento hidráulico y, aunque no se igualaron algunos comportamientos mecánicos adquiridos por los homólogos patrón, las grandes propiedades adquiridas como la poca desintegración de los elementos y la flexibilidad adquirida por los especímenes, sea de concreto masivo o reforzado (cilindros o vigas), mostrará que la inclusión de materiales reciclados como nuevas tecnologías de la construcción puede impactar de manera muy positiva en el sector construcción, desempeño de las estructuras, industria y manejo de residuos.

Conclusiones y recomendaciones

- De los porcentajes de sustitución recomendados por el proyecto de graduación *Estudio de vidrio reciclado como componente para la elaboración de cementos terciarios* realizado por el ingeniero Edwin Espinoza, el 23% mostró mejores propiedades físico-mecánicas.
- Los desempeños obtenidos por los especímenes de concreto hidráulico, con la inclusión de material vítreo, dieron como resultado menores diferencias con respecto a los resultados del concreto hidráulico patrón, conforme se fue incrementando la edad.
- Aunque los porcentajes de sustitución en estudio no brindaron comportamientos superiores a los obtenidos por el concreto patrón, sí mostraron comportamientos físicos favorables, tales como mayor densificación de la mezcla, mayor integridad del elemento, una vez alcanzada la falla, y resultados favorecedores para los elementos sometidos a la flexión.
- Desde el punto de vista mecánico, tomando en cuenta el comportamiento típico del CAD700 comúnmente realizado (Patrón PC) en la empresa involucrada, las diferencias mecánicas entre el mencionado y el concreto hidráulico con material vítreo incorporado muestran ser mínimas (1%), y si se profundiza el resultado de un error del 0,001, se puede decir que se iguala el comportamiento mecánico del CAD700 (Patrón PC) con uno cuya matriz sustituye un 23% de cemento hidráulico por material vítreo
- La realización de una prueba de pérdida de masa determinó que un elemento de concreto hidráulico con la inclusión de material vítreo pierde un porcentaje de su integridad de alrededor 12% a los 28 días, cuando alcanza su capacidad última, mientras que uno sin la inclusión de material vítreo pierde un porcentaje de su integridad de alrededor 45%.
- El estudio de grandes sustituciones de cemento hidráulico por material vítreo no garantiza el consumo total del mismo durante la reacción química, ya que los especímenes en esta condición mostraron manchas polvosas de material vítreo molido, una vez que los mismos eran ensayados.
- El concreto hidráulico utilizado para la elaboración de las vigas de concreto reforzado no fue el mismo al estudiado anteriormente, pero obtiene los mismos comportamientos mecánicos mostrados en la primera etapa de este documento, comparándolo entre el concreto hidráulico sin y con la inclusión de material vítreo (sustitución del 23 %).
- Las diferencias del comportamiento mecánico del concreto hidráulico no varían porcentualmente entre el mismo que contenga material vítreo en su matriz y el que no, siempre y cuando se esté comparando la misma cantidad de sustitución.
- El diseño de las vigas de concreto reforzado correspondió a cuatro varillas 12,7 mm de diámetro (Nro. 4 grado 60) colocadas longitudinalmente y varilla de 9,5 mm (Nro. 3 grado 60) para aros a cada 10 cm, obedeciendo la misma cuantía en los dos elementos para que el mismo no influyera

como nueva variable del comportamiento estructural.

- Los dos elementos de concreto reforzado en estudio localizaron su falla en el mismo lugar, con una aparición de grietas similar, que provocaron una falla por compresión.
- Para los dos elementos de concreto reforzado, la aparición de la grieta con grosor de 0,30 mm se da en el mismo minuto 23 del proceso de falla, igualando su comportamiento mecánico de aparición de grietas.
- La viga de concreto reforzado con la inclusión de material vítreo llegó a una carga menor a la obtenida por la viga de concreto reforzado sin material vítreo. Sin embargo, llegó a obtener una mayor deformación sin la pérdida mayor de su integridad, como uno de los datos encontrados en las etapas anteriores a este estudio.
- El porcentaje de deformación durante la etapa plástica de la viga de concreto reforzado sin inclusión de material vítreo fue de un 27,14%, mientras que la viga con material vítreo obtuvo un 66,66%. Demostrando que la inclusión del material en estudio atribuye grandes características de ductilidad en los elementos.
- Durante la realización de la falla, la viga de concreto reforzado sin la inclusión de material vítreo soportó mayor carga, una vez alcanzada la falla. La misma tuvo una reacción explosiva tomando un comportamiento similar a cuando se estudiaban los especímenes de concreto hidráulico y soportó una carga residual mucho menor (60% menos) a la de la viga de concreto reforzado con la inclusión de material vítreo.
- Los agregados pétreos pueden contribuir a la aparición de fenómenos tales como RAS u oxidación de la matriz, por lo que se recomienda realizar un estudio de sanidad de los mismos, para evitar que el fenómeno se intensifique a causa de contaminaciones.
- El aseguramiento de que el material vítreo logra obtener una granulometría inferior a 0,045 mm (No325) puede beneficiar a que el

mismo se consuma en su totalidad durante la reacción química del concreto hidráulico, por lo que se recomienda utilizar el material pasando el mencionado tamiz.

- Se recomienda la mejora del proceso de obtención de material vítreo, el cual asegure una mayor eficacia en cuanto a la cantidad, granulometría lograda, recurso humano y temporal.
- Para la elaboración de los elementos, se recomienda contar con los materiales adecuados en buen estado, tales como formaletas íntegras y firmes y equipo necesario para la correcta elaboración, densificación y vibrado del concreto.
- La determinación del módulo de ruptura, por medio del estudio *Resistencia a la compresión y módulo de ruptura de mezclas de concreto medidos en núcleos y vigas extraídos en campo*, arroja porcentajes de error fuera de lo recomendado en el mencionado estudio, por lo que se recomienda seguir con seguridad las especificaciones dictadas por el ACI318-14, para obtención de este parámetro.
- Se recomienda contar con un método de curado constante de los elementos de concreto reforzado, que eviten la fisuración por contracción o evaporación de humedad del concreto hidráulico.
- El tiempo de ensayo de la viga de concreto reforzado con la inclusión de material vítreo fue menor al de su homóloga sin material vítreo, sin embargo, el anterior pudo haberse atribuido al caso atípico de detención inesperada del equipo de falla, por lo que se recomienda revisar el perfecto estado de los instrumentos de medición y conexión.
- Se recomienda estudiar las propiedades adquiridas por la inclusión de material vítreo en concretos hidráulicos de elementos de concreto reforzado compuestos, tales como marcos de concreto, muros, etc.
- Se recomienda realizar ensayos similares para otros tipos de fuerzas internas distintas a las de flexión, tales como simulación de fuerzas sísmicas, tracción, compresión, etc.

- Se recomienda realizar un estudio en el cual, las propiedades del material vítreo se incluyan durante los procedimientos de diseños de mezcla.
- Con la realización de diferentes ensayos se recomienda revisar si las ecuaciones de diseño recomendadas por el ACI318-14, pueden incluir un factor que consideren el comportamiento encontrado por los elementos de concreto reforzado.

Apéndices

Apéndice 1: Caracterización agregado fino: arena de río

1. Peso unitario

Volumen de recipiente (m ³)	0,003
Peso del recipiente (g)	2615
Pmuestra+ recipiente (g)	7880
	7840
	7840
Peso unitario piedra quintilla (kg/m ³)	1877,5

2. Análisis granulométrico

Peso seco (g)	350,0
Peso seco lavado (g)	327,2

Tamíz	Tamíz (mm)	Peso retenido (g)	Peso Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	% Pasando	Límite superior	Limite Inferior
3/8	9,5	1,3	0,4	0,4	99,6	100	100
No4	4,75	31,1	8,9	9,3	90,7	100	95
No8	2,36	50,0	14,3	23,5	76,5	100	80
No16	1,18	57,1	16,3	39,8	60,2	85	50
No30	0,6	59,68	17,1	56,9	43,1	60	25
N050	0,3	54,7	15,6	72,5	27,5	30	10
No100	0,15	36,5	10,4	83,0	17,0	10	2
No200	0,075	22,01	6,3	89,2	10,8	-	-
Charola	-	0,78	0,22	89,5	10,5	-	-

$$\% \text{ Pasando por la malla No.200} = \frac{\text{Peso seco total} - \text{Peso seco lavado}}{\text{Peso seco total}} \times 100$$

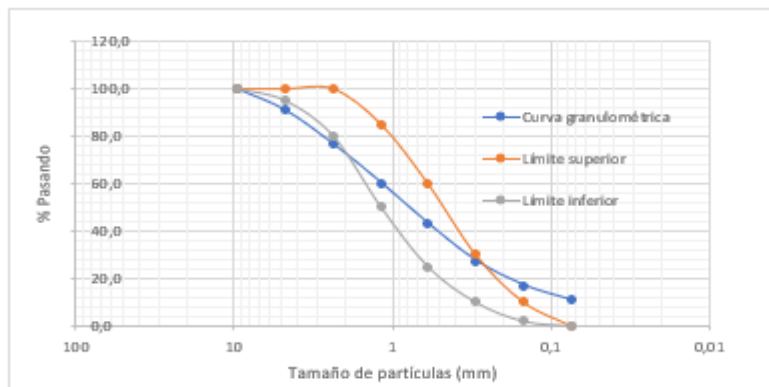
% Pasando por la malla No 200 6,51

$$M.F = \frac{\sum \% \text{ Retenidos acumulados}}{100}$$

Módulo de finura 2,85

$$\% \text{ Diferencia finos} = \frac{\text{Peso seco lavado} - \sum \text{Peso retenido}}{\text{Peso seco lavado}} \times 100$$

% Diferencia de finos 4,30



3. Gravedad específica

Peso bandeja (g)	426,3
Peso seco de la muestra [A] (g)	458,1
Peso pignómetro [B] (g)	678,89
Peso del pignómetro mas muestra [C] (g)	966,20

Gravedad específica bruta (Gbs) (a 0,01):

$$Gbs = \frac{A}{B + S - C}$$

Donde S es aproximadamente 500g

Gbs 2,15

□ Gravedad específica saturada superficie seca (Gsss)

a (0,01):

$$G_{sss} = \frac{S}{B + S - C}$$

Gsss 2,35

Gravedad específica aparente (Ga) (a 0,01):

$$G_a = \frac{A}{B + A - C}$$

Ga 2,68

$$\text{Absorción (\%)} = \left(\frac{S-A}{A} \right) \times 100$$

Abs (%) 9,15

Resumen de caracterización

Peso unitario (kg/m ³)	1877,54
Gravedad específica SSS	2,35
Gravedad específica aparente	2,68
Absorción (%)	9,15
Módulo de finura	2,85

Apéndice 2: Caracterización agregado fino: arena industrial

1. Peso unitario

Volumen de recipiente (m ³)	0,00279
Peso del recipiente (g)	2615

Pmuestra+ recipiente (g)	7000
	7200
	7100
Peso unitario piedra quintilla (kg/m ³)	1607,5

2. Análisis granulométrico

Peso seco (g)	350,0
Peso seco lavado (g)	317,2

Tamíz	Tamíz (mm)	Peso retenido (g)	Peso Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	% Pasando	Límite superior	Limite Inferior
3/8	9,5	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100
No4	4,75	10,9	3,1	3,1	96,9	100	95
No8	2,36	89,0	25,4	28,5	71,5	100	80
No16	1,18	73,5	21,0	49,5	50,5	85	50
No30	0,6	55,38	15,8	65,4	34,6	60	25
N050	0,3	36,32	10,9	76,3	23,7	30	10
No100	0,15	25,98	7,4	83,7	16,3	10	2
No200	0,075	18,15	5,2	88,9	11,1	0	0
Charola	-	5,7	1,63	90,5	9,5	-	-
		316,9					

$$\% \text{ Pasando por la malla No.200} = \frac{\text{Peso seco total} - \text{Peso seco lavado}}{\text{Peso seco total}} \times 100$$

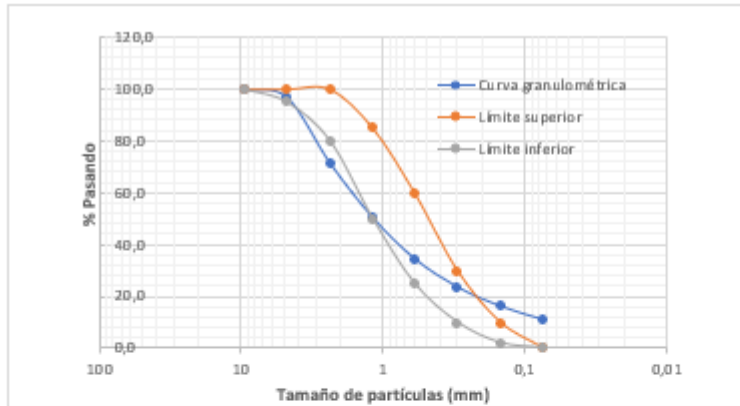
% Pasando por la malla No 200 9,37

$$M.F = \frac{\sum \% \text{ Retenidos acumulados}}{100}$$

Módulo de finura 3,07

$$\% \text{ Diferencia finos} = \frac{\text{Peso seco lavado} - \sum \text{Peso retenido}}{\text{Peso seco lavado}} \times 100$$

% Diferencia de finos 0,09



3. Gravedad específica

Peso bandeja (g) 426,41
 Peso seco de la muestra [A] (g) 470,86
 Peso pignómetro [B] (g) 672,42
 Peso del pignómetro mas muestra [C] 982,4

Gravedad específica bruta (Gbs) (a 0,01):

$$Gbs = \frac{A}{B + S - C}$$

Donde S es aproximadamente 500g

Gbs 2,48

Gravedad específica saturada superficie seca (Gsss) a (0,01):

$$Gsss = \frac{S}{B + S - C}$$

Gsss 2,63

Gravedad específica aparente (Ga) (a 0,01):

$$Ga = \frac{A}{B + A - C}$$

Ga 2,93

$$Absorción (\%) = \left(\frac{S-A}{A} \right) \times 100$$

Abs (%) 6,19

Resumen de caracterización

Peso unitario (kg/m ³)	1607,5
Gravedad específica SSS	2,63
Gravedad específica aparente	2,93
Absorción (%)	6,19
Módulo de finura	3,07

Apéndice 3: Caracterización agregado grueso

1. Peso unitario

Volumen de recipiente (m3)	0,003
Peso del recipiente (g)	2615,0
Pmuestra+ recipiente (g)	7080,0
	7080,0
	7060,0
Peso unitario piedra quintilla (kg/m3)	1598,0

2. Análisis granulométrico

Peso seco (g)	2444,7
---------------	--------

Tamíz	Peso retenido (g)	Peso Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	% Pasando
9,5 mm	780,0	31,9	31,9	68,1
No4	1600,0	65,4	97,4	2,6
No8	58,8	2,4	99,8	0,2
No16	5,9	0,2	100,0	0,0

2. Gravedad específica

Peso de la bandeja (g)	1302,6
Peso de la muestra seca [A] (g)	3577,4
Peso muestra SSS [B] (g)	3664
Peso sumergido [C] (g)	2296,4

- Gravedad específica bruta (Gbs) (a 0,01):

$$Gbs = \frac{A}{(B - C)}$$

Gbs	2,62
-----	------

- Gravedad específica saturada superficie seca (Gsss) a (0,01):

$$Gsss = \frac{B}{(B - C)}$$

Gsss	2,68
------	------

- Gravedad específica aparente (Ga)

$$Ga = \frac{A}{A - C}$$

Ga 2,79

$$\text{Absorción (\%)} = \left(\frac{B - A}{A} \right) \times 100$$



Abs (%) 2,42

Resumen de caracterización


Peso unitario (kg/m ³)	1597,97
Gravedad específica SSS	2,68
Gravedad específica aparente	2,79
Absorción (%)	2,42

Anexos

Formato
F-CG.OP 06.00.02
Informe de Resultados de Ensayo del Laboratorio
Holcim (Costa Rica) S.A.

		INFORME DE RESULTADOS	
		Consecutivo: 7-17	
		Pagina 1/1	
Mes:	Julio	 <p>Laboratorio de ensayo Alcance de Acreditación N°. LE-095 Acreditado a partir de: 17.01.2012 De acuerdo a la Norma Art. 1.1. Decreto ejecutivo 35512 y sus modificaciones Alcance disponible en www.eca.or.cr</p>	
Periodo:	1 al 31 de JULIO 2017		
Fecha de Informe:	09/08/2017		
Producto:	Cemento		
Tipo:	MC/A-AR		
Identificación Cliente:	ULTRA		
<p>Holcim (Costa Rica) S.A. cuenta con un sistema de Gestión Integrado (SGI) de Calidad, Ambiente y OH&S. Nuestras Operaciones en Planta Cemento estan certificadas segun Normas: ISO 9001:2008 Gestión de Calidad ISO 14001:2004 Gestión de Ambiente ISO 18001:2001 Gestión de Salud y Seguridad Ocupacional ISO 14064:2006 Gestión Gases de Efecto Invernadero</p>			
Información General		Información Cliente	
Laboratorio:	Control Calidad, Holcim (Costa Rica) S.A.	Cliente:	PRODUCTOS DE CONCRETO
Dirección Laboratorio:	Planta Cemento Holcim (Costa Rica) S.A., Agua Caliente, Cartago Costa Rica	Dirección:	SAN RAFAEL, ALAJUELA
email:	contactenos-cri@holcim.com	email:	
Telefono:	(506) 2205-2800	Teléfono:	
Fax:	(506) 2205-3100	Fax:	

Informe de Resultados

Parámetro (+)	Resultado	Unidad Medida	Reglamento RTCR 479:2015	Parámetro (+)	Resultado	Unidad Medida	Reglamento RTCR 479:2015	Parámetro (+)	Resultado	Unidad Medida	Reglamento RTCR 479:2015
SiO ₂ *	19,55	%	NI	R1D** Uc= ± 0,2	15,9	MPa	>12	Contenido Aire** Uc= ± 0,4	6	%	< 12
MgO*	2,72	%	≤ 6,0	R3D** Uc= ± 0,2	26,3	MPa	>24	Expansión Autoclave** Uc= ± 0,002	0,06	%	< 0,8
SO ₃ *	3,06	%	≤ 4,0	R7D** Uc= ± 0,3	32,3	MPa	NI	Expansión Barras Mortero** Uc= ± 0,003	0,007	%	< 0,02
Residuo Insoluble** Uc= ± 0,05	NI	%	NI	28 D** Uc= ± 0,5	40,4	MPa	NI	Expansión Alcali-Agregado* 14 días	NI	%	NI
Pérdida Fuego*	2,5	%	NI	CN** Uc= ± 0,05	26,4	%	NI	Calor Hidratación 7 Días*	NI	kJ/kg	< 250
Blaine** Uc= ± 80	348	m ² /kg	NI	SET IN** Uc= ± 4	121	Minutos	> 45	Calor Hidratación 28 Días*	NI	kJ/kg	< 290
Finura 45 um** Uc= ± 0,8	1,8	%	NI	SET FN** Uc= ± 4	225	Minutos	< 420	Durabilidad a Sulfatos 180 Días*	NI	%	< 0,05
A/C**	48,9	%	NI	Densidad** Uc= ± 0,06	3,11	g/cm ³	NI	Durabilidad a Sulfatos 365 Días*	NI	%	< 0,1
<p>Los resultados de los análisis químicos están calculados en porcentaje en peso.</p> <p>Ensayos según Normas: Blaine, INTE 06-11-06 Consistencia Normal, ASTM C 187 Tiempos de Fragua, INTE 06-11-05 (ASTM C191) Pérdida de fuego, INTE 06-11-02 (ASTM C114) Residuo insoluble, INTE 06-11-02 (ASTM C114) Expansión por Autoclave, INTE 06-11-03 (ASTM C151) Expansión barras de mortero en agua, ASTM C 1038 Durabilidad y/o resistencia a los Sulfatos, ASTM C 1012 Densidad, ASTM C 188 Resistencia a la Compresión, INTE 06-02-20 (ASTM C109) Finura en malla 45 um, INTE 06-11-10 (ASTM C430) Calor de Hidratación, ASTM C 186 Contenido de Aire, INTE 06-11-04 (ASTM C185) Reactividad Alcali-Agregado, ASTM 227</p>								<p>Nombre: Jose Antonio Mejias Perez</p> <p>Firma: NI Coordinador Control Calidad</p> <p>Nombre: Estefany Muñoz Zamora</p> <p>Firma:  Control Calidad</p> <p>Interpretaciones Adicionales:</p>			

Referencias

- ACI C78. 2016. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)
- ACI 224.1R. 1993. Causas, evaluación y reparación de fisuras.
- American Society for Testing and Materials. 2013. ASTM C 33: Standard Specification for Concrete Aggregates
- American Society for Testing and Materials. 2013. ASTM C 39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- American Society for Testing and Materials. 2015. ASTM C 143: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete
- American Society for Testing and Materials. 2015. ASTM C494: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete
- American Society for Testing and Materials. 2016. ASTM C192: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- Bentur, A y Goldman, A. 1989. Curing effects, strength and physical Properties of high strength silica Fume concretes
- Bashar Taha y Ghassan Nounu. 2009. Utilizing Waste Recycled Glass as Sand/Cement Replacement in Concrete.
- Smith, B. 2001. Durability of silica fume concrete exposed to chloride in Hot climates
- Craig P./ M. Cramer/ and Rodolfo V. de la Cruz³. 1998. Potential for using waste glass in Portland Cement concrete

- Espinoza, E. 2017. Estudio de vidrio reciclado como componente para la elaboración de cementos terciarios. (Tesis de licenciatura). Escuela de Ingeniería en Construcción. Tecnológico de Costa Rica.
- Farshad R., Maraghechi H; and Fischer G. 2010. Investigating the Alkali-Silica Reaction of Recycled Glass Aggregates in Concrete Materials
- Hernández, E. 2015. Manual de aplicación del programa SAP200.
- Kilmer, K. 2013. Manualidades usando vidrios rotos. Recuperado de http://www.ehowenespanol.com/manualidades-usando-vidrios-rotos-lista_106629/
- Lievano, M. y Gutiérrez A. 2011. Caracterización de fisuras en vigas de concreto reforzado con adición de fibras de polipropileno sometidas a flexión dinámica. Pontificia Universidad Javeriana. No 138 p.
- Ministerio de Economía, Industria y Comercio y Salud, RTCR-479. 2015. Recuperado de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80899&nValor3=102882&strTipM=TC
- Moya, M. y Navas, A. 2007. Resistencia a la compresión y módulo de ruptura de mezclas de concreto medidos en núcleos y vigas extraídos en campo. Universidad de Costa Rica. No 18 p.
- Nasser A. and Ingham J. 2014. Effect of Waste Glass on the Properties of Concrete
- Rivera G. Resistencia del concreto. Recuperado de <ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/geanrilo/docs/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM%20%20de%202010/Tecnologia%20del%20Concreto%20-%20-%20PDF%20ver.%20%202009/Cap.%2006%20-%20Resistencia.pdf>
- Pineda, A. 2010. Microscopía electrónica de barrido. Recuperado de <http://mty.cimav.edu.mx/sem/>
- Safwan A. Khedr, and Nagib M. Abou-Zeid 2. 1994. Characteristics of silica-fume concrete.
- Salazar, A. 2002. ¿Qué es una puzolana? Recuperado de <http://www.ecoingenieria.org/docs/Puzolanas.pdf>
- Thomas D. Dyer and Ravindra K. Dhir. 2001. Chemical reactions of glass cullet Used as cement component
- Z. Xie¹; W. Xiang²; and Y. Xi³. 2003. ASR Potentials of Glass Aggregates in Water-Glass

