

Propiedades Mecánicas y de Durabilidad de Concretos de Ultra Altas Prestaciones (UHPC), con Diferentes Materiales Cementantes Suplementarios

Diana Carolina Jaramillo Murcia^{a1}, Nancy Torres Castellanos^{a2}, Joaquín Abellán^{b3}

- a. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá, Colombia)
- b. Universidad Politécnica de Madrid (Madrid, España)

1. Ingeniera Civil, Universidad del Cauca. Estudiante Maestría en ingeniería Civil con énfasis en estructuras, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia. E-mail: diana.jaramillo@mail.escuelaing.edu.co, Tel: +57 317 292 9203.
2. Ingeniera Civil, PhD. en Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Associate Professor, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia. E-mail: nancy.torres@escuelaing.edu.co, Tel: +57 300 214 1714.
3. Ingeniero de Caminos C y P, Estudiante Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. E-mail: j.abellang@alumnos.ump.es, Tel: +57 317 649 2528.

Resumen

Con el fin de lograr un material enfocado en la sostenibilidad y reducción de costos, en este artículo se presentan los resultados encontrados en cuanto a propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y velocidad de pulso ultrasónico) y de durabilidad (Absorción superficial inicial, volumen de vacíos permeables y penetración al ion cloruro) de dos dosificaciones de concreto con sustitución parcial de cemento y humo de sílice, por polvo de vidrio reciclado y carbonato de calcio. Los resultados se compararon con los obtenidos en una mezcla control, que contenía solo cemento y humo de sílice como material cementante.

Las dosificaciones fueron producto de la optimización de mezclas de UHPC realizadas con materias primas colombianas bajo criterios de flujo autocompactante. Se empleó el menor contenido posible de cemento, y se limitó la cantidad de humo de sílice a 100 kg/m³.

Los resultados indicaron que la resistencia a la compresión de las dosificaciones que contenían polvo de vidrio y carbonato de

calcio, alcanzaron valores de resistencia a la compresión por encima del 90% a los 90 días de curado, con respecto a la muestra control; sin embargo, en relación con la permeabilidad al ion cloruro y la absorción superficial inicial, el comportamiento fue superior con respecto a la muestra control.

Palabras clave: UHPC, polvo de vidrio, carbonato de calcio, durabilidad, concreto, resistencia a compresión.

Abstract

In order to achieve a material focused on sustainability and cost reduction, this article presents the results found in terms of mechanical properties (resistance to compression, modulus of elasticity and speed of ultrasonic pulse) and durability (surface absorption). initial, volume of permeable voids and chloride ion penetration) of two concrete dosages with partial replacement of cement and silica fume, by recycled glass powder and calcium carbonate. The results were compared with those obtained in a control mixture, which contained only cement and silica fume as cementitious material.

The dosages were the product of the optimization of UHPC mixtures made with Colombian raw materials under self-compacting flow criteria. The lowest possible content of cement was used, and the amount of silica fume was limited to 100 kg / m³.

The results indicated that the compressive strength of the dosages containing glass powder and calcium carbonate, reached compressive strength values above 90% at 90 days of curing, with respect to the control sample; however, in relation to chloride ion permeability and initial surface absorption, the performance was superior with respect to the control sample.

Key words: UHPC, glass powder, calcium carbonate, durability, concrete, compressive strength.

1 Introducción

En los últimos años, enormes adelantos en la tecnología del concreto han logrado el desarrollo de nuevos tipos de concreto, tales como el concreto de ultra alta resistencia – Ultra High Performance Concrete (UHPC por sus siglas en inglés), es un concreto que usualmente se elabora con relaciones agua/binder entre 0.15 y 0.25 y que ofrece mejores propiedades mecánicas, como resistencia a compresión de más de 150 MPa y de durabilidad, en comparación con el concreto de alta resistencia – High Performance Concrete (HPC por sus siglas en inglés) y el concreto de resistencia normal (NPC por sus siglas en inglés) [1], [2]. Típicamente los concretos UHPC, contienen cemento Portland, materiales cementicios suplementarios (SCM por sus siglas en inglés), agua, aditivos reductores de agua de alto rango (HRWRA por sus siglas en inglés) y agregado fino [3], [4]. Habitualmente se utiliza polvo de cuarzo para mejorar la gradación de los materiales y aumentar el empaquetamiento de partículas [5]. Por otro lado, para mejorar la adherencia de los materiales, generalmente no se utiliza

agregado grueso porque tiene una menor superficie específica.

Actualmente, en el medio Latinoamericano, el UHPC presenta un elevado costo e impacto ambiental por el alto contenido en cemento y los procesos industriales que acompañan su producción, es por esto que, con la finalidad de producir un concreto de forma más económica y sostenible, es importante investigar la viabilidad de producir UHPC utilizando materiales y métodos disponibles localmente en el mercado colombiano que no requieren procedimientos especiales de dosificación y curado, con mínimo contenido de materiales cementicios como el cemento, el humo de sílice o el polvo de cuarzo [5], [6], [7].

Uno de los factores que cobra gran importancia en el diseño de una mezcla UHPC es mejorar las propiedades micro y macro de la mezcla, lo que afecta tanto la durabilidad como el rendimiento mecánico [8]. La mejora en las micro propiedades generalmente se logra proporcionando un elevado empaquetamiento de partículas [8], [9]. El UHPC, requiere una mayor proporción de cemento, humo de sílice y otros materiales cementicios (por ejemplo, cenizas volantes, escorias, entre otros.) en comparación con los concretos normales o de alta resistencia (NPC o HPC). Además, se utiliza una baja relación agua / binder (a/b) en el diseño de la mezcla para mejorar las propiedades mecánicas, siendo el binder el conjunto de materiales aglutinantes utilizados para sustituir o complementar parcialmente al cemento. Además, estos componentes deben tener unas determinadas gradaciones de tamaño micro y nano-partícula con la finalidad de incrementar el empaquetamiento mediante el relleno de los espacios que las partículas de cemento dejan entre sí [5], [15].

Todos estos aspectos influyen directamente en la cantidad y el tamaño de la porosidad total del material.

El costo inicial relativamente alto de UHPC ha restringido un uso más amplio en la industria de la construcción [5], sin embargo, investigadores a nivel mundial están llenando las lagunas de conocimiento para obtener UHPC empleando diferentes materiales cementicios suplementarios en sustitución parcial del cemento y del humo de sílice, reduciendo así el coste final de la dosificación. Por ejemplo, podríamos citar el caso del puente peatonal construido en la universidad de Sherbrooke donde se empleó el polvo de vidrio con varios grados de finura para reemplazar las partículas de cemento, polvo de cuarzo (QP por sus siglas en inglés), arena de cuarzo (QS por sus siglas en inglés) y humo de sílice (SF por sus siglas en inglés) [10].

En el caso de aplicaciones en Colombia, se realizó una investigación para el diseño de placas de concreto UHPC como solución para pisos en estaciones de transmilenio, en este caso se realizó una sustitución parcial del material cementicio por carbonato de calcio [25].

Asimismo, la empresa Argos S.A, construyó el puente peatonal de la Universidad EAFIT en Medellín empleando una patente de dosificación de UHPC con el nombre comercial de Concreto Avanzado [5].

Dadas las ventajas que presenta el UHPC en sus diferentes usos y con el fin de conocer y profundizar en las características de este material, se planteó un programa experimental que incluyó una serie de ensayos que permitiera evaluar algunas propiedades mecánicas y de durabilidad, mediante tres dosificaciones distintas de concreto tipo UHPC; donde parte del cemento y el humo de sílice han sido reemplazados parcialmente por materiales cementantes suplementarios como polvo de vidrio y carbonato cálcico. Las pruebas incluyeron determinación del flujo medio sin golpes (ASTMC1437), compresión en cilindros y cubos (ASTM C109), módulo de elasticidad (ASTM C469), velocidad de pulso

ultrasónico (ASTM C597), absorción inicial del concreto (BS 1881-208), densidad, absorción y vacíos (ASTM C642) y permeabilidad a los cloruros (ASTM C1202).

2 Antecedentes

En la década de 1960 aparecen los concretos reforzados con fibras, en los años 70' aparecen los concretos de alta resistencia con una capacidad de soportar a compresión esfuerzos de 120 a 200 MPa, y por último a finales de los años 80 aparece el concreto autocompactante, con el cual se consiguen un conjunto de Concretos especiales capaces de adaptarse a diferentes tipos de ambientes y con capacidad de trabajar para un cierto tipo de diseño. El UHPC se puede decir que es una combinación de estos tres concretos especiales [12].

Debido a las excelentes propiedades mecánicas del UHPC, es posible tener estructuras más livianas y con tramos largos, estructuras híbridas, nuevos diseños y nuevos productos con un potencial para una mejor economía y consumo menor de recursos comparado con estructuras elaboradas con concreto NPC por sus siglas en inglés) o concreto de alta resistencia (HPC por sus siglas en inglés) [1], [5], [14].

En comparación con las dosificaciones de concreto normales, la matriz de UHPC es mucho más densa. Para fabricar este tipo de concreto, es importante alcanzar la máxima densidad combinando adecuadamente todos los componentes de la dosificación (optimización de empaquetamiento) [8], [17]. De acuerdo con la referencia [16], los concretos UHPC tienen varias veces más resistencia, módulo elástico, tenacidad a la fractura, ductilidad y durabilidad comparado con un concreto normal. El UHPC se prepara mezclando grandes cantidades de cemento y humo de sílice con arena fina de cuarzo y polvo de cuarzo entre otros materiales. La relación agua/binder se mantiene muy baja, por lo tanto, se necesita una dosis alta de superplastificantes para mantener la fluidez

requerida de la mezcla. Por otro lado, la necesidad de arena fina de cuarzo y polvo de cuarzo para producir dosificaciones de UHPC aumenta su costo en lugares donde estos componentes no están disponibles de forma natural [5]. En la práctica, el concreto con una resistencia a la compresión menor que 50 MPa es considerado como concreto de resistencia normal. Por otro lado, los materiales componentes de este concreto son relativamente simples, consisten en cemento, agregado y agua. La figura 1 muestra la microestructura de NPC [18].

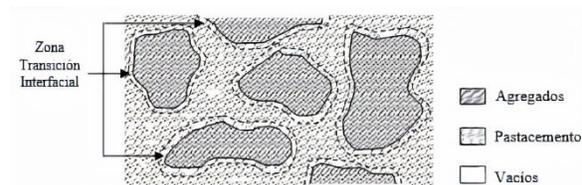


Figura 1. Microestructura de NPC [18].

Mientras que el concreto de alta resistencia (HPC), puede definirse como aquel que tiene una resistencia a la compresión mayor o igual a 50 MPa. Por otro lado, los concretos de resistencia a la compresión de más de 150 MPa se definen como de muy alta resistencia (UHPC por sus siglas en inglés). La figura 2 muestra la microestructura de HPC y UHPC respectivamente.

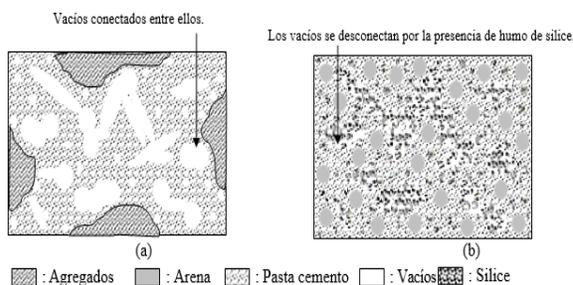


Figura 2. Microestructura de HPC (a) y UHPC (b) [18].

De lo anterior se infiere que, con el fin de mejorar la resistencia del concreto, es necesario optimizar los factores que inciden en ella. Para esto se consideran tres aspectos: (a) la pasta de cemento hidratado debe reforzarse, (b) la porosidad en el concreto se debe reducir, y (c) la zona de transición

interfacial (ITZ por sus siglas en inglés) debe ser reducida [18].

En primer lugar, la pasta de cemento hidratado se puede reforzar reduciendo la porosidad de gel dentro de la pasta, mediante empleo de adiciones adecuadas (por ejemplo, humo de sílice). En segundo lugar, la porosidad en el concreto se puede disminuir mediante la adición de materiales adecuados, que pueden llenar el espacio vacío en el interior del concreto, como sería el caso del uso de harina de cuarzo o cenizas volantes para rellenar los vacíos entre las partículas de arena y cemento. Con dichas adiciones se logra que la conectividad de los poros se reduzca debido a que las partículas muy finas bloquean eficazmente la red capilar como se mostró en la figura 2. En tercer lugar, la zona de transición de la interfaz puede disminuirse mediante la reducción de la relación agua/binder y mejorando el empaquetamiento de las partículas en esta zona. Por otro lado, los superplastificantes se incorporan a la dosificación de concreto para lograr una adecuada manejabilidad, cuando se tienen muy bajas relaciones agua/binder (menos de 0.2) que permiten favorecer la resistencia a compresión [19], [20].

En la investigación adelantada por [22], se elaboraron 9 mezclas de UHPC con diferente proporción de humo de sílice densificado (SFU por sus siglas en inglés) y harina de sílice (SFL por sus siglas en inglés) como sustitución parcial de cemento y una mezcla de control sin adición de SFU y SFL, para estudiar el efecto de esta combinación en propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas. La relación agua /binder se mantuvo en 0.22. Se evaluaron cilindros de 100x200mm y cubos de 50x50x50mm a 1,3,7 y 28 días.

Como conclusiones se tienen:

el uso de SFU con un contenido del 20% mejora significativamente la resistencia a la compresión a la edad de 28 días. Una comparación de las resistencias a la

compresión de 28 días revela que mejoró la en un 18%, en comparación con la mezcla de control.

La adición de SFU, disminuyó el volumen de vacíos permeables en un 38% si se compara con un concreto sin adición de SFU. Esto se atribuyó al efecto de relleno y efecto puzolánico de SFU, que densificó la microestructura del concreto.

De acuerdo con [23], cuyo objeto principal fue explorar la posibilidad de producir mezclas de UHPC mediante la sustitución parcial de cemento por material cementicio tal como: humo de sílice, puzolana natural, cenizas volantes, polvo de piedra caliza, polvo de horno de cemento y escoria de alto horno pulverizado, disponible localmente. Se elaboraron 8 mezclas con diferentes proporciones de sustitución parcial de material cementante, y se encontró que todas poseen una resistencia a la compresión superior a 150 MPa. La absorción de agua para estas mezclas de UHPC se encuentra alrededor de una décima parte de los límites permisibles para el concreto normal. La profundidad de penetración del agua es cero en todos los casos, lo que indica una permeabilidad insignificante del agua. Los valores de permeabilidad al ion cloruro para las ocho mezclas de UHPC indican un riesgo de corrosión de refuerzo "muy bajo" a "insignificante".

En la investigación realizada en [24], se encontró que la velocidad de pulso ultrasónico del concreto para 7.5% de reemplazo de humo de sílice fue 5780 m/s y para 5% de humo de sílice fue 5494 m/s, esto se puede clasificar dentro de la categoría excelente.

Se obtuvo una resistencia a la compresión máxima de 89.25 MPa a los 90 días con reemplazo del 7.5% de humo de sílice y 75.75 MPa a los 90 días con reemplazo de 5% de humo de sílice.

3 Programa Experimental

A continuación, se presentan los diferentes materiales seleccionados para el correspondiente estudio.

3.1. Materiales

Los materiales utilizados para la elaboración de las dosificaciones estaban disponibles localmente en Colombia. En la tabla 1 se presenta la composición química de los materiales cementantes usados, donde se observa que la densidad del cemento es de 3.15 g/cm^3 , característica de los cementos "casi puros", del medio colombiano; el humo de sílice está compuesto en más del 90% por sílice amorfa, el carbonato cálcico tiene una pérdida por ignición muy alta y contenido de carbonato cálcico elevado, el polvo de vidrio es predominantemente silíceo con una pequeña composición de carbonato cercano al 10% y la arena silícea en más del 90% compuesta por sílice [7].

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de los materiales [7].

| Análisis químico % | Cemento | Humo de sílice | Carbonato | Polvo de vidrio | Arena de sílice |
|------------------------------------|---------|----------------|-----------|-----------------|-----------------|
| Densidad g/cm^3 | 3.16 | 2.20 | 2.73 | 2.55 | 2.65 |
| Pérdida de ignición % | 2.58 | 0.60 | 42.21 | 1.00 | 0.20 |
| SiO ₂ , % | 19.42 | 92.29 | 0.90 | 72.89 | 99.80 |
| Al ₂ O ₃ , % | 4.00 | 0.59 | 0.10 | 1.67 | 0.14 |
| CaO, % | 64.42 | 3.89 | 55.51 | 9.73 | 0.17 |
| MgO, % | 1.52 | 0.26 | 0.70 | 2.08 | 0.01 |
| SO ₃ , % | 1.93 | 0.07 | 0.10 | 0.01 | — |
| Na ₂ O, % | 0.19 | 0.31 | 0.03 | 12.54 | — |
| K ₂ O, % | 0.39 | 0.54 | 0.00 | 0.76 | 0.05 |
| TiO ₂ , % | 0.38 | 0.01 | 0.00 | 0.04 | — |
| Mn ₂ O ₄ , % | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | — |
| Fe ₂ O ₃ , % | 3.61 | 0.24 | 0.05 | 0.81 | 0.04 |

En la figura 3 se muestra la distribución del tamaño de partículas del cemento con diámetro medio de partícula d_{50} de 8 μm , humo de sílice con tamaño de partícula d_{50} de 0.15 μm , carbonato de calcio con tamaño d_{50} de 2 μm , polvo de vidrio d_{50} de 28 μm y 7 μm y arena sílicea con un tamaño máximo de partículas de 600 μm [7].

El polvo de vidrio se obtuvo moliendo vidrio reciclado disponible localmente con un molino de chorro a diferentes grados de finura, aplicando diferentes velocidades de molienda [7].

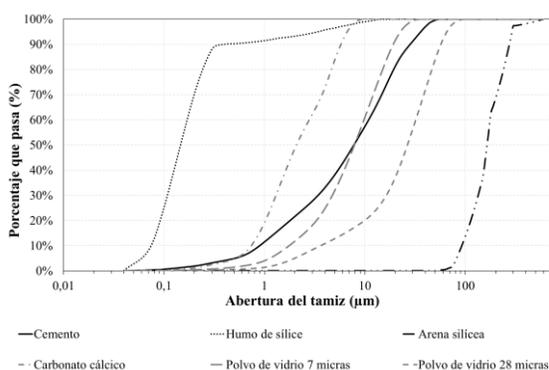


Figura 3. Distribución del tamaño de partícula de los materiales usados [7].

3.2. Dosificaciones

Para la elaboración de las mezclas se definieron previamente tres dosificaciones; estas fueron:

Dosificación D1 se ha denominado como la de control [29].

Dosificación D2 se sustituye parcialmente el material cementicio por carbonato de calcio Betocarb ultra fino y polvo de vidrio de 28 μm [14], [29].

Dosificación D3 se sustituye parcialmente el material cementicio por carbonato de calcio Betocarb ultra fino, polvo de vidrio de 28 μm y 7 μm [7], [29].

Las dosificaciones utilizadas en esta investigación identificadas como D2 y D3 son producto de la optimización de dosificaciones de UHPC realizadas con materias primas colombianas bajo criterios

esperados de flujo autocompactante y resistencia a compresión superior a 150 MPa con el menor contenido en cemento posible, y limitando el contenido de humo de sílice a 100 kg/m^3 [29].

En la tabla 2 se muestran los volúmenes de cada material dentro de las mezclas y la relación agua/binder para las tres dosificaciones.

Tabla 2. Proporción de materiales usados en dosificaciones [29].

| | Dosificación D1 | Dosificación D2 | Dosificación D3 |
|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Material | Peso kg/m^3 | Peso kg/m^3 | Peso kg/m^3 |
| Cemento Concretero | 852.26 | 620 | 620 |
| Humo de Sílice Toxement | 271,7 | 100 | 100 |
| Superplastificante e MasterGlenium | 26.46 | 21.48 | 21 |
| Agua | 245 | 210.2 | 200 |
| Arena Sílicea 600 μm | 834.27 | 778.16 | 888.83 |
| Polvo de vidrio 28 μm | - | 309.98 | 168.6 |
| Polvo de vidrio 7 μm | - | - | 187.55 |
| Carbonato de Calcio Betocarb Ultra Fino | - | 257.09 | 118.43 |
| Agua/binder | 0.218 | 0.163 | 0.167 |

Estas dosificaciones fueron elaboradas utilizando teoría de empaquetamiento de Andreasen y Andersen modificada [11] y técnicas estadísticas como el diseño central compuesto [12] y la optimización multiobjetivo [13]. Para mayor información sobre los procesos de optimización de la dosificación D2 se puede consultar [14] mientras que para la dosificación D3 se pueden consultar [7], [14], [29].

La dosificación de referencia (D1) fue diseñada sin restricciones al contenido de cemento ni al humo de sílice, con la restricción de flujo estático en el rango de 240 – 260 mm. Esta dosificación se asume tiene un costo superior a las D2 y D3 por sus elevados contenidos en cemento y humo de

sílice. Además, su huella de carbono es superior a las dosificaciones D2 y D3 [29].

La relación agua/binder se mantuvo constante para las dosificaciones D2 y D3 con el fin de no incluir más variables en la investigación, sin embargo, para la dosificación D1 la relación agua/binder fue ligeramente mayor debido a que la cantidad de humo de sílice aumenta y la dosificación se debe hidratar para lograr que fluya. Por otro lado, la cantidad de superplastificante es limitada porque si se produce una dosificación muy viscosa no puede salir el aire y se crea una estructura muy porosa y de baja resistencia a la compresión [26].

3.3. Metodología

A continuación, se presentan los ensayos realizados Tabla 3.

Tabla 3. Ensayos realizados a las muestras.

| Ensayos | Edades de ensayo (días) | Tipo de probeta | Cantidad de probetas por edad | Normas aplicadas |
|--------------------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|
| Resistencia a compresión | 7,28 y 90 | Cubo 50mm | 6 | ASTM C109 |
| Módulo de elasticidad | 7,28 y 90 | Prisma 75x150mm | 27 | ASTM C469 |
| Velocidad de pulso | 7,28 y 90 | Prisma 75x150mm | 23 | ASTM C597 |
| Tasa de absorción inicial ISAT | 7,28 y 90 | Prisma 75x150mm | 25 | BS 1881-208 |
| Absorción, masa unitaria y porosidad | 7,28 y 90 | Prisma 100x200mm | 23 | ASTM C642 |
| Permeabilidad a cloruros | 7,28 y 90 | Prisma 100x200mm | 23 | ASTM C1202 |

3 Resultados y Análisis

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión realizados a los cubos se muestran en la figura 4, se determinan los promedios de nueve muestras para la dosificación D1 y ocho muestras para las dosificaciones D2 y D3 para 7, 28 y 90 días.

El curado se realizó en cámara húmeda al 95%±5%, y se mantuvo constante para todas las muestras.

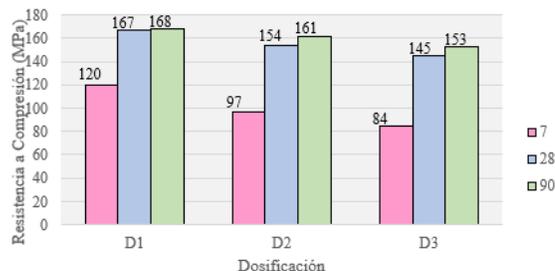


Figura 4. Resistencia a la compresión promedio de las dosificaciones de concreto (cubos).

Mediante los valores presentados en la figura 4, se puede apreciar la variación de las resistencias a la compresión de las muestras de concreto en función del tiempo. También es posible evaluar si existen diferencias significativas entre las resistencias medias de las distintas dosificaciones, encontrándose que la dosificación control presenta la resistencia mayor a los 7 días de ensayo, lo cual se justifica teniendo en cuenta que es la que tiene mayor contenido de cemento, y humo de sílice, seguida de la dosificación D2. Sin embargo, a edades superiores las resistencias se muestran muy similares. La resistencia alcanzada en los cubos a los 90 días, muestra que el concreto se puede clasificar como UHPC ya que este supera los 150 MPa.

Por lo tanto, se resalta así la conveniencia de la utilización de materiales cementantes suplementarios para sustitución parcial de cemento, lo cual se puede comparar con las investigaciones realizadas en [2], [21] y [23] donde reemplazando el humo de sílice, se consiguen resistencias superiores a 150 MPa e incluso hasta 160 MPa.

En la Tabla 4, se muestra una comparación entre las resistencias obtenidas en el ensayo a compresión de las muestras cilíndricas y los cubos en las diferentes edades.

Tabla 4. Comparación de la resistencia a compresión entre cilindros y cubos.

| Dosificación | Edad (días) | Resistencia f'c | | Diferencia |
|--------------|-------------|-----------------|-----------------|------------|
| | | Cubos (Mpa) | Cilindros (Mpa) | |
| D1 | 7 | 120 | 113 | 6% |
| D1 | 28 | 167 | 155 | 7% |
| D1 | 90 | 168 | 159 | 5% |
| D2 | 7 | 97 | 91 | 6% |
| D2 | 28 | 154 | 148 | 4% |
| D2 | 90 | 161 | 149 | 8% |
| D3 | 7 | 84 | 79 | 6% |
| D3 | 28 | 145 | 138 | 4% |
| D3 | 90 | 153 | 141 | 8% |

De acuerdo con la Tabla 4 se tiene que la resistencia a compresión de los cubos está en promedio por encima del 6%, este resultado es cercano a lo encontrado en [6] donde el tamaño de las muestras influye en las propiedades mecánicas debido a la posibilidad de encontrar defectos en muestras de mayor tamaño.

En la figura 5, se presentan el módulo elástico en las tres edades de ensayo para cada una de las dosificaciones bajo estudio. Con los resultados se observa que el módulo elástico aumenta con la edad de curado. Se encontró que las dosificaciones D2 y D3 presentan valores mayores que la muestra control para los primeros 7 días, sin embargo, a los 28 y 90 días la dosificación de control supera las otras dos.

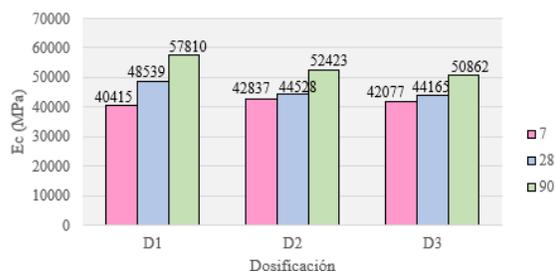


Figura 5. Resultados módulo elástico.

De acuerdo con lo reportado en [27] el aumento del módulo de elasticidad con la

edad de curado, varía dependiendo de la puzolana que se adicione, indicando que, para materiales muy activos como el humo de sílice, a edades tempranas el incremento de E_c , es más rápido comparado con la muestra control, esto se explica a través del proceso de hidratación de dicho material. Por otro lado, de acuerdo con lo reportado en [7], la incorporación de carbonato de calcio en UHPC mejora el proceso de hidratación de las dosificaciones a una edad temprana, lo que lleva a un relleno de partículas más denso y a mejorar las propiedades mecánicas. Asimismo, en [7] se encontró que el polvo de vidrio aumenta la velocidad de disolución del cemento Portland, por lo que el proceso de hidratación se acelera.

Por los resultados expuestos se concluye que la adición de otros materiales cementantes suplementarios de menor costo igualan los valores de la mezcla control donde se utilizó humo de sílice para los primeros 7 días.

Por otro lado, se tiene que de acuerdo con ACI 239 Tabla 4.2, el módulo de elasticidad (E_c) de un concreto UHPC está entre los 40000 MPa y 50000 MPa. De acuerdo a lo anterior, los valores encontrados en esta investigación del módulo de elasticidad para las diferentes dosificaciones, se encuentra que todas están por encima de los 40000 MPa a los 7 días, y alcanzan valores por encima de los 50000 MPa a los 28 días. Estos módulos elásticos altos en el área de ingeniería estructural son favorables dado que se aumenta la rigidez de los elementos y por consiguiente, se tendrán menos deformaciones; a su vez, este comportamiento permite que dichos elementos tengan menores dimensiones lo que se ve reflejado en una reducción en el peso de la estructura.

Así mismo, el Reglamento de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-10, indica una correlación entre el módulo de elasticidad, E_c , y la resistencia a la compresión para cualquier tipo de agregado, cuyo valor se expresa en la ecuación 1:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

Donde

E_c =módulo de elasticidad del concreto (MPa)

f'_c = resistencia a la compresión del concreto (MPa)

De acuerdo con la ecuación Ec. 1, 4700 es una correlación entre la raíz cuadrada de f'_c y E_c . Esta correlación se denominará con la letra K. En la figura 6 se muestra un comparativo del valor K de acuerdo a estas resistencias obtenidas.

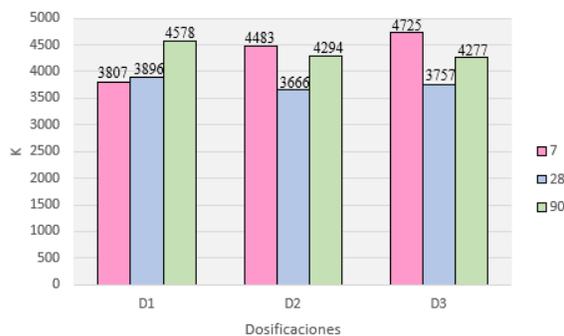


Figura 6. Relación entre el módulo elástico obtenida de los cilindros y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión (K).

De acuerdo con la figura 6, los valores encontrados de K en promedio están del orden de 4164, inferior al determinado en el Reglamento NSR-10 de 4700, el cual es un valor estándar para emplearlo en el diseño. Sin embargo, si se tiene en cuenta que para UHPC el E_c se encuentra entre 40000 - 50000 MPa y $f'_c = 150$ MPa, el valor de K debería estar ente 3266 – 4083.

Por otro lado, si experimentalmente se tiene que los valores de K son menores a los sugeridos por el Reglamento NSR-10, se tiene que el módulo de elasticidad utilizado para el diseño estructural se está tomando superior al que realmente podría desarrollar el material, por lo tanto, los resultados tanto de derivas, deflexiones y ductilidad del material se pueden estar sobreestimando.

La velocidad de pulso ultrasónico se muestra en la figura 7. acuerdo con estos resultados, se observa en los valores de esta propiedad un aumento constante a lo largo de las diferentes edades de ensayo encontrándose mejor comportamiento en la dosificación de control seguida por la dosificación D2. De acuerdo con lo reportado en [15] sólo se encontró referencia a esta propiedad en dosificaciones adicionales con humo de sílice, concordando en este mejoramiento con lo reportado en [28].

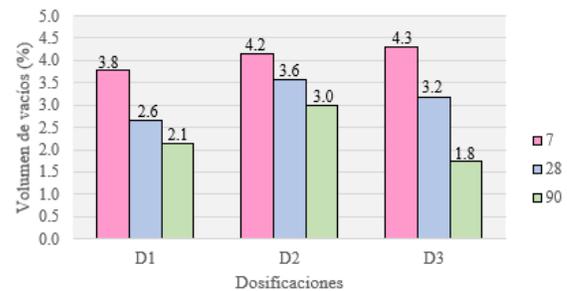


Figura 7. Resultados velocidad de pulso ultrasónico.

Con los resultados anteriores, se determina que la sustitución parcial de materiales cementantes, al igual que la edad, producirán tasas promedio diferentes en la variable respuesta a la velocidad de pulso ultrasónica.

Los resultados del ensayo de absorción inicial superficial, indican que todas las muestras tienen una reducida absorción, disminuyendo a lo largo de las diferentes edades de curado. La dosificación D1 presenta menores valores que la D2 y D3, lo que indica que se obtiene una estructura más compacta posiblemente por efecto de relleno de los poros, esto coincide con los datos obtenidos en el ensayo de densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido.

En la figura 8, se encuentran consignados los datos de las lecturas tomadas a los 30 minutos, para cada una de las dosificaciones evaluadas y para las diferentes edades de curado.

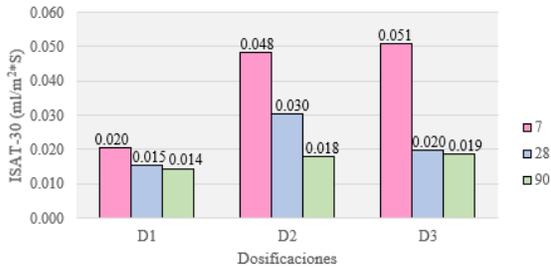


Figura 8. Resultados absorción inicial superficial 30min.

En la figura 9, se presentan los resultados encontrados de permeabilidad al ion cloruro, para las diferentes dosificaciones y a las diferentes edades de ensayo.

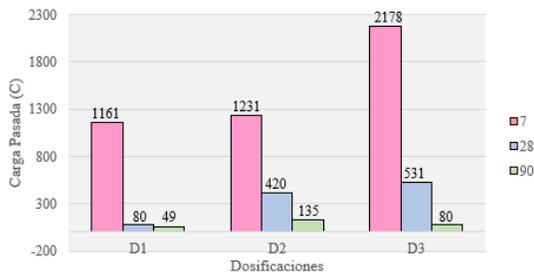


Figura 9. Resultados de la permeabilidad al ion cloruro.

Se observa un buen comportamiento de las dosificaciones bajo estudio, ya que, en todas las edades de ensayo, y para todas las dosificaciones, se presenta una reducción drástica, de la permeabilidad ante el paso de este ion, siendo el mejor comportamiento el de la dosificación de control en las primeras edades. pero como se puede observar esta fue disminuyendo a lo largo del tiempo siendo prácticamente similar en todas las muestras a los 90 días, esto coincide con lo encontrado por [23] en donde se hace una sustitución parcial del material cementicio por humo de sílice y se obtuvieron valores inferiores a 100 Coulombs lo cual indica que la carga que pasa es insignificante; este material puede considerarse apto para el uso en estructuras que pueden estar sometidas a esta agresión; por ejemplo estructuras en zonas costeras.

Con los resultados anteriores, se determina que los factores dosificación y edad, al igual

que la interacción entre ambos, producirán tasas promedio diferentes en la variable respuesta a la absorción superficial inicial. Lo cual permite afirmar que la edad de curado beneficia la disminución de los valores de esta propiedad.

Del ensayo de densidad, absorción y vacíos se tiene que, en general todas las muestras presentan una absorción baja, la cual va disminuyendo a lo largo de las diferentes edades de curado. Se presenta una tendencia de disminución mayor de los valores de esta propiedad en el tiempo, para la muestra control y la muestra adicionada polvo de vidrio de 28 μ m y 7 μ m. Todos los concretos con 90 días de curado, presentan un volumen de vacíos menor al 5 %.

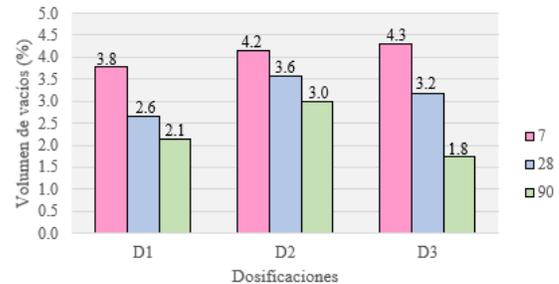


Figura 10. Resultados volumen de vacíos.

Se observa un mejor comportamiento a los 90 días para la dosificación D3, presentando incluso valores inferiores que la muestra de control debido a la contribución de las adiciones en el efecto de relleno, probablemente debido a la modificación de la microestructura de los concretos que las contienen y al curado, que al hidratar el cemento crea una matriz más densa, con un menor volumen de poros capilares, disminuyendo así la permeabilidad [15].

Por otro lado, la formación de cristales de CSH a través de la reacción de la portlandita con los materiales cementantes suplementarios podría aumentar la eficiencia para llenar espacios sin dejar que los poros se interconecten entre sí, por lo tanto, eso explica la disminución del volumen de vacíos en el tiempo [15].

Al comparar con los resultados obtenidos mediante el ensayo de ISAT la dosificación D3 presenta menor absorción superficial a los 90 días para los primeros 10 min del ensayo que la D2 y D3, lo cual corresponde a un menor porcentaje de vacíos obtenido para la dosificación D3 a los 90 días. Sin embargo, para las tres dosificaciones los valores disminuyen durante el tiempo del ensayo, lo cual se puede correlacionar con el menor contenido de vacíos.

Con los resultados anteriores, se determina que la sustitución parcial de cemento por los materiales cementantes suplementarios analizados, al igual que la interacción entre los dos factores dosificación y edad, producirán tasas promedio diferentes en la variable respuesta a la absorción superficial inicial.

4 Costos

Dentro del alcance de esta investigación se incluyó el análisis del costo de los materiales para producir las tres dosificaciones utilizadas, estos se muestran en la tabla 5; basados en un metro cúbico de concreto.

Tabla 5. Costo de las dosificaciones.

| MATERIAL | D1 | D2 | D3 |
|---|-------------|-----------|-----------|
| | costo | costo | costo |
| Cemento Concreteero | \$298,291 | \$217,000 | \$217,000 |
| Humo de Sílice Toxement | \$543,400 | \$200,000 | \$200,000 |
| Superplastificante MasterGlenium | \$211,680 | \$171,840 | \$168,000 |
| Arena Silícea 600µm | \$166,854 | \$155,632 | \$177,766 |
| Polvo de vidrio 28µm | - | \$46,497 | \$25,290 |
| Polvo de vidrio 7µm | - | - | \$37,510 |
| Carbonato de Calcio Betocarb Ultra Fino | - | \$64,273 | \$29,608 |
| TOTAL | \$1,220,225 | \$855,242 | \$855,174 |

De acuerdo a la tabla 5 se tiene que la dosificación de control (D1) por tener un contenido de cemento más alto es la que representa mayor costo de producción estando un 30% por encima del costo de las dosificaciones D2 y D3.

5 Conclusiones

Los resultados de resistencia a compresión en cubos para las tres dosificaciones en estudio fueron en promedio para la edad de 90 días superiores a 150 MPa, por lo cual se puede considerar como concreto tipo UHPC. Con respecto al módulo de elasticidad, se observa la tendencia a aumentar con la edad de curado. Los valores en todas las muestras están por encima de los 40000 MPa a los 7 días, y alcanzan valores por encima de los 50000 MPa a los 28 días para concreto tipo UHPC, de acuerdo con ACI 239 tabla 4.2.

Por otro lado, en términos generales, se concluye que el porcentaje del 27% de reemplazo parcial de cemento y 63% de humo de sílice con polvo de vidrio y carbonato de calcio en las dosificaciones D2 y D3 se acerca o iguala las propiedades mecánicas respecto a la dosificación control D1.

En propiedades como la velocidad de pulso ultrasónico para las dosificaciones D2 y D3, se observa que los valores obtenidos en los indicadores son cercanos a la muestra control (D1) alcanzando 93 y 91% respectivamente, a las diferentes edades de curado.

Los resultados del volumen de vacíos y absorción inicial en la dosificación D3 presentan valores similares a la muestra de control, y mejoran su comportamiento a los 90 días, superándola. Sin embargo, para las tres dosificaciones, los valores disminuyen manteniendo esta tendencia durante todas las edades de los ensayos.

En el caso de cloruros, se observa mejor desempeño con la edad de curado. La dosificación D3 presenta mejor comportamiento, seguida por la D2. Esto obedece a la baja penetrabilidad de los agresores externos (perjudiciales) en el material UHPC. La microestructura muy densa es crucial para evitar daños internos, asegurando así una mejor durabilidad.

En términos generales, se concluye que el carbonato de calcio y el polvo de vidrio, como

reemplazo parcial de cemento y humo de sílice, mejora en algunos casos las propiedades mecánicas y de durabilidad, de concretos UHPC, en otros se obtienen valores muy cercanos con respecto a una dosificación de control.

Los resultados obtenidos en la investigación muestran la viabilidad técnica de la sustitución parcial de cemento con materias primas de menor costo tales como carbonato de calcio y polvo de vidrio. Asimismo, al comparar el precio por m³ de cada dosificación se encontró que estas son viables y puede significar una oportunidad para la industria de la construcción, pues podría llegar a competir favorablemente en el mercado con otro tipo de dosificaciones para concretos UHPC. Igualmente, la reutilización de un residuo industrial como el polvo de vidrio y la disminución en la cantidad de cemento, trae beneficios desde el punto de vista ambiental.

6 Agradecimientos

Un agradecimiento a las empresas Toxement, Omya Andina, Cristalería Peldar S.A, Argos por donar los materiales. A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, a mi directora de tesis PhD. Nancy Torres Castellanos y codirector ing. Joaquín Abellán.

7 Bibliografía

[1] J. Abellán, N. Torres, A. Núñez, and J. Fernández, “Influencia del exponente de Fuller, la relación agua conglomerante y el contenido en poli carboxilato en concretos de muy altas prestaciones,” in IV Congreso Internacional de Ingeniería Civil, 2018.

[2] S. Abbas, M. L. Nehdi, and M. A. Saleem, “Ultra-High-Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges,” *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 10, no. 3, pp. 271–295, 2016.

[3] A. Tagnit-Hamou, N. A. Soliman, and A. Omran, “Green Ultra - High - Performance Glass Concrete,” vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2016.

[4] F. De Larrard and T. Sedran, “Mixture-proportioning of high-performance concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 11, pp. 1699–1704, 2002.

[5] J. Abellán, N. Torres, A. Núñez, and J. Fernández, “Concretos de muy altas prestaciones reforzados con fibras: estado del arte, aplicaciones y posibilidades en el mercado latinoamericano.,” in XXXVIII Jornadas Sudamericanas de ingeniería estructural, 2018.

[6] Z. Li, “Proportioning and properties of ultra-high-performance concrete mixtures for application in shear keys of precast concrete bridges,” 2015.

[7] J. Abellán, J. Fernández, N. Torres, and A. Núñez, “Statistical Optimization of ultra-high-performance glass concrete,” *ACI Mater J*, 2020.

[8] F. de Larrard and T. Sedran, “Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 24, no. 6, pp. 997–1009, 1994.

[9] B. A. W. Ragalwar, K. A., H. Nguyen, R. Ranade, W. F. Heard, “Influence of Distribution Modulus of Particle-Size Distribution on Rheological and Mechanical Properties of Ultra-High-Strength SHCC Matrix,” pp. 1–9.

[10] A. Tagnit-Hamou, N. Soliman, and A. Omran, “Green Ultra - High - Performance Glass Concrete,” *First Int. Interact. Symp. UHPC – 2016*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2016.

[11] J. E. Funk and D. Dinger, “Predictive process control of crowded particulate

- suspensions: Applied to ceramic manufacturing.” 1994.
- [12] D. C. Montgomery, “Design and analysis of experiments.” New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [13] G. Derringer and R. Suich, “Simultaneous Optimization of Several Response Variables,” *J. Qual. Technol.*, vol. 21, no. 4, pp. 214–219, 1980.
- [14] J. Abellán, N. Torres, A. Núñez, and J. Fernández, “Quality optimization of low-cost UHPC using micro limestone powder and glass flour,” *Comput. Concr.*
- [15] N. Torres Castellanos, “Estudio en estado fresco y endurecido de concretos adicionados con catalizador de craqueo catalítico usado (FCC),” Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [16] ACI Committe 239, “ACI – 239 Committee in Ultra-High-Performance Concrete.” ACI, Toronto, 2018.
- [17] J. Abellán et al., “Ultra high performance fiber reinforced concrete: state of the art, applications and possibilities into the latin american market,” in XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, 2018.
- [18] O. Büyüköztürk and D. Lau, “High performance concrete: fundamentals and application,” in *Proceedings of the International Conference on New Developments in Concrete Technologies*, 2002, pp. 177–198.
- [19] Man-Chung Tang, *High Performance Concrete – Past, Present and Future*, no. 3. 2004.
- [20] D. Carnovale and F. J. Vecchio, “Effect of Fiber Material and Loading History on Shear Behavior of Fiber-Reinforced Concrete,” no. 111, 2014.
- [21] Shamsad Ahmad, Ibrahim Hakeem & Mohammed Maslehuddin (2015): Development of an optimum mixture of ultra-high-performance concrete, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, DOI: 10.1080/19648189.2015.1090925
- [22] Z. Li, “proportioning and properties of ultra-high-performance concrete mixtures for application in shearnkeys of precast concrete bridges,” 2015.
- [23] Shamsad Ahmad, Ibrahim Hakeem & Mohammed Maslehuddin (2017): Use of alternative waste materials in producing ultra-high-performance concrete, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, DOI: 10.1051/mateconf/20171200
- [24] K. Jayakumar., “Role of Silica fume Concrete in Concrete Technology,” in *International Symposium on Ultra High-Performance Concrete*, Kassel Uni., Kassel, Alemania, 2004, pp. 165–174.
- [25] M. Reyes Suárez, J. Camargo Jiménez, “Placas de concreto de ultra alto desempeño (UHPC) como solución para pisos en estaciones de transmilenio,” Pontificia Universidad Javeriana, 2016.
- [26] Shi, Caijun & Xiao, Jianfan & Wang, Dehui & Zhengyu, Huang & Fang, Zhi. (2015). A review on ultra high-performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*. 101. 741-751. 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088.
- [27] Nassif, Hani & Najm, Husam & Suksawang, Nakin. (2005). Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC. *Cement and Concrete Composites*. 27. 661-670. 10.1016/j.cemconcomp.2004.12.005.

[28] Sri Ravindrarajah, R. (1992). Strength evaluation of high-strength concrete by ultrasonic pulse velocity method Paper presented at the Australian Institute of Non-Destructive Testing National Conference, Melbourne (Australia).

[29] Abellán, J., Fernández, J., Torres, N., Núñez, A., Development of cost-efficient UHPC with local materials in Colombia, in: Proc. Hipermat 2020 - 5th Int. Symp. UHPC Nanotechnol. Constr. Mater., Kassel, Germany, 2020: pp. 97–98.