

Experimental study of concrete mixtures to produce UHPRC using sustainable brazilians materials

Estudio experimental de mezclas de concreto para producir UHPRC usando materiales brasileños sustentables



R. R. AGUIRO^a
rosangel.rojas@ufrgs.br
<https://orcid.org/0000-0003-0776-599X>

C. KORZENOWSKI^b
christa-korzenowski@uergs.edu.br
<https://orcid.org/0000-0001-6500-2910>

J. R. Y. AGUIRE^a
jose.aguirre@ufrgs.br
<https://orcid.org/0000-0002-2557-8779>

A. CAMPOS FILHO^a
americo@ufrgs.br
<https://orcid.org/0000-0001-7764-3010>

L. C. P. DA SILVA FILHO^c
lcarlos66@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3703-7328>

C. S. MALLMANN^c
carolinamallmann98@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4856-5361>

Abstract

An experimental study is presented to produce Ultra High Performance Reinforced Concrete (UHPRC) with sustainable materials produced in Brazil. A complete factorial arrangement was defined and five controllable factors were selected based on the literature review. Cylindrical specimens were tested at 7, 14 and 28 days of curing, with and without heat treatment. The residual deviations of the results were determined and an analysis of variance using ANOVA was applied to know the contribution of each controllable factor on the compressive strength, which reached a maximum value of 138.12 MPa. Finally, a mix design is proposed to obtain UHPRC by applying a simple manufacturing procedure using commercial materials, with which a high performance concrete can be obtained, reaching at least 70% of its strength in seven days.

Keywords: UHPRC, sustainable, compressive strength, ANOVA.

Resumen

Se presenta un estudio experimental para producir Ultra High Performance Reinforced Concrete (UHPRC) con materiales sustentables producidos en Brasil. Un arreglo factorial completo fue definido y cinco factores controlables fueron seleccionados basados en la revisión bibliográfica. Especímenes cilíndricos fueron ensayados a los 7, 14 y 28 días de curado, con y sin tratamiento térmico, para determinar la resistencia a la compresión. Desvíos residuales fueron determinados y se aplicó un análisis de varianza usando ANOVA para conocer la contribución de cada factor controlable sobre la resistencia a la compresión, la cual alcanzó un valor máximo de 138,12 MPa. Al final se propone un diseño de mezcla para obtener UHPRC aplicando una metodología simple de fabricación usando materiales comerciales, con los cuales se puede obtener un concreto de alto desempeño que alcanza a los siete días de curado el 70% de su resistencia.

Palavras-chave: UHPRC, sustentable, resistencia a la compresión, ANOVA.

^a Universidade Federal do Rio Grance do Sul, Departamento de Engenharia Civil, Porto Alegre, RS, Brasil;

^b Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves, RS, Brasil;

^c Universidade Federal do Rio Grance do Sul, Laboratorio de Ensaio e Modelos Estruturais, Porto Alegre, RS, Brasil.

1. Introducción

El concreto reforzado de ultra alto desempeño reforzado con fibras o Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (conocido por sus siglas en inglés como UHPFRC) es un material innovador que puede alcanzar resistencias a la compresión superiores a los 150 MPa con 28 días de curado, lo que permite la construcción de elementos estructurales que soportan grandes vanos con una sección transversal menor a las construidas con concreto tradicional. Su composición incluye cemento, aditivos minerales (por ejemplo humo de sílice, cenizas volantes, escoria granular de alto horno, polvo de cuarzo), arena de sílice, superplastificante y agua, para conformar una densa matriz sin agregado grueso con baja porosidad y alta resistencia.

Esa alta resistencia es alcanzada principalmente por la gran cantidad de cemento en la mezcla, convirtiéndolo además de costoso en un material que impacta al ambiente. El costo de UHPFRC por m³ ha sido reportado de cuatro a cinco veces mayor que el concreto tradicional, usando como aglomerante sólo al cemento, Fehling, et al. [1], sin embargo, usando UHPFRC se puede reducir entre un tercio o la mitad el peso de la estructura bajo las mismas cargas, Yoo and Yoon [2], permitiendo diseñar fundaciones con geometrías menores y en general hace posible que el costo final de la obra pueda ser disminuido, Tanaka, et al. [3].

A primera vista puede pensarse que concretos con ultra-alto desempeño van a requerir altas cantidades de cemento y consecuentemente originarán grandes efectos contaminantes para ambiente. Es bien sabido que la industria de la construcción emite un tercio del CO₂ a la atmósfera donde el cemento es responsable del 7%, UNSTAT [4]. Sin embargo, diseños sustentables puede ser producido con UHPFRC adicionando humo de sílice o Silica Fume (SF por sus siglas en inglés) y escoria de alto horno o Ground Granulated Blast-furnace Slag (GGBS por sus siglas en inglés) como materiales aglomerantes sustituyentes parciales del cemento. La SF y la GGBS son materiales provenientes de residuos industriales que aportan, además de economías, menores emisiones de CO₂ al ambiente por cada m³ de concreto ultra resistente fabricado. Varias pesquisas han sido desarrolladas usando UHPFRC con diseño verde y se ha demostrado que el uso de materiales sustentables sustituyentes parciales del cemento no disminuyen significativamente la resistencia a la compresión del UHPFRC, además de hacerla económicamente factible. Las pesquisas de Hassan et al. [5], Yu et al [6], Habel et al [7] y Yang et al. [8], son un ejemplo de ello, en todos esos casos residuos industriales (SF, GGBS) fueron considerados como materiales sustituyentes para el cemento, con los cuales se obtuvieron mezclas económicas con ultra alta resistencia.

Mezclas de UHPFRC pueden ser fabricadas sin la inclusión de fibras, llamadas UHPRC, en esos casos la resistencia a la compresión a los 28 días de curado puede variar entre 100 y 130 MPa. En este trabajo se pretende estudiar nueve tipos de mezclas para producir UHPRC usando materiales sustentables propios de Brasil. Un análisis de varianza aplicando ANOVA será aplicado a los resultados para determinar el porcentaje de contribución de cada factor controlable (edad de la muestra, granulometría de la escoria, tipo de mezcla y tipo de curado) en la variable de respuesta (resistencia a la compresión).

1.1 Objetivo

Producir diseños de mezcla para concreto con ultra alto desempeño sin el uso de fibras (UHPRC) usando materiales sustentables propios de Brasil.

2. Revisión de la literatura

2.1 Desarrollo histórico del concreto con ultra alta resistencia

Después de que Aspdin y Parker patentaran el Cemento Portland en el año 1824, su uso como material cementante en el concreto se incrementó rápidamente. Cuando Joseph Lambot en 1849 construyó y patentó su barco usando concreto y acero detonó el espíritu visionario de Joseph Monier, quien comprando esa patente resolvió el problema de fragilidad de los maceteros que construía y en las siguientes tres décadas fue tal el avance de su técnica que logró construir vigas y puentes en concreto armado. Desde allí el progreso de la ingeniería civil fue acelerado alrededor del mundo, ilustrado por la construcción de rascacielos, puentes con grandes luces, estructuras para control del agua, etc. En cada una de esas obras nuevos retos para la mecánica estructural y para el conocimiento en materiales de construcción fueron asumidos y en el presente se adiciona el desafío de usar de forma racional y sustentable el concreto armado. A continuación se realiza, en orden cronológico, una breve revisión de la literatura con enfoque en la evolución de la resistencia a la compresión del concreto.

Año 1874: Berard, Ahoille obtuvo una patente llamada "Mejoras de la piedra artificial para pavimentos", en la cual describe el proceso para obtener un bloque de piedra de granito gris artificial, llenando moldes con una mezcla formada por dos partes de grava, dos partes de arena, dos partes de cal hidráulica, una parte de residuos de hierro parecidos a una fibra y agua.

Año 1898: René Féret [10] estableció los principios de composición óptima que conducen a la obtención de hormigón de resistencia especificada. Estableció la relación entre la resistencia a la compresión del concreto, con los volúmenes de cemento, agua y vacíos.

Año 1927: Otto Graf, pionero en el campo de carreteras de concreto, estableció los criterios generales que deben cumplirse para construir carreteras con alta resistencia a la compresión, impacto, tracción y resistencia a los ataques químicos, Reinhardt [11]. También investigó y publicó la influencia de finos en las propiedades del cemento, la relación agua/cemento o water/cement (w/c por sus siglas en inglés) sobre la resistencia y el uso de la escoria de horno para disminuir la retracción del concreto. En los años 50 alcanzó 70 MPa en mezclas de concreto usadas en carreteras con alta durabilidad, Fehling et al. [1].

Año 1930: Eugene Freyssinet [12], diseñaba y construía vigas para puentes con alta resistencia inicial e incluía tratamiento térmico en el curado. Usaba vapor alrededor de moldes de concreto para acortar significativamente el tiempo de curado del hormigón, aspectos que en la actualidad se mantienen vigentes para acelerar el desarrollo de la resistencia del UHPRC.

Año 1966: Kurt Walz demostró que, utilizando métodos especiales de producción, era posible lograr una resistencia de 140 MPa, Fehling et al. [1].

Año 1970: Yudenfreund, et al. [13] alcanzaron 240 MPa después de 180 días de curado a 25°C, usando pastas de cemento Portland con relaciones de w/c de 0,2 y 0,3. Los especímenes ensayados fueron cubos comprimidos lateralmente, para evitar los efectos de una posible sedimentación antes de endurecer. Utilizaron dos tipos de Clinker previamente molidos hasta una finura de 6000 a 9000 cm²/g medida por el método de Blaine.

Año 1972: Roy, et al [14] alcanzaron 509,52 MPa usando cilindros, de ½" de diámetro por ½" de altura, con pastas de cemento Portland con cero porosidad, aplicando alta presión de densificación (entre 25000 a 50000 psi) con tratamiento térmico cercano a los 150 °C. Usando presión de 100000 psi sin tratamiento térmico lograron 318 MPa.

Año 1973: Roy y Gouda [15] experimentaron altas resistencias, entre 175,40 MPa y 652,24 MPa aplicando a materiales cementantes alta temperatura y/o presión, verificaron que la alta resistencia a la compresión del concreto es debida principalmente a la baja porosidad de la mezcla y no solamente a la mayor cantidad de Clinker anhidro.

Año 1981: Birchall et al. [16] demostraron que la remoción de fallas macroscópicas durante la preparación de pastas de cemento, permite obtener resistencias a la flexión entre 60 a 70 MPa y resistencias a la compresión mayores a 200 MPa, sin necesidad de reforzamiento con fibras y sin necesidad de aplicar una alta presión de compactación. La remoción de esas fallas se hizo combinando el control de las propiedades reológicas del material y una eficiente mezcla, éste nuevo concreto fue tipificado como Macro Defect Free (MDF por sus siglas en inglés). Bache, H. [17] presentó un artículo en la 2da conferencia internacional sobre superplastificantes en el concreto, en el cual describe un nuevo tipo de material tipificado como Densified Systems Particles (DSP por sus siglas en inglés), con una alta durabilidad y que tiene de tres a cinco veces la resistencia del concreto tradicional de aquella época. Tales propiedades son posibles de alcanzar gracias al uso de una gran cantidad de humo de sílice y superplastificante, que permite un embalaje denso de la matriz de hormigón pudiendo alcanzar resistencias entre 120 a 270 MPa. Se discuten los principios geométricos, cinemáticos y dinámicos para disponer las partículas finas en una estructura densa, así como también en el desarrollo de las nuevas propiedades del material, como ductilidad y alta resistencia a la tracción.

Año 1982: Lankard y Lease [18] propusieron la técnica de Slurry Infiltrated Fibered Concrete (SIFCON por sus siglas en inglés) que implica rellenar el encofrado con fibras a granel e inyectar una suspensión fluida de mortero. Ellos comprobaron que la adición de fibras de acero a cementos refractarios, con una proporción del 2% en volumen, dan lugar a mejoras significativas en las propiedades de éstos materiales y propusieron un nuevo procedimiento en donde las concentraciones de acero son superiores al 16% en volumen, se discuten las propiedades de ingeniería y el comportamiento en servicio de alguno de estos materiales compuestos reforzados.

Año 1983: Hjorth et al. [19] patentaron y comercializaron una mezcla de concreto con pequeñas partículas densificadas. También usaron como aditivo mineral al humo de sílice y como aditivo químico al superplastificante, con ambos alcanzaron resistencias a la compresión entre 120 y 250 MPa.

Año 1994: Larrard y Sedran [20] fueron uno de los primeros en usar el término Ultra-High Performance Concrete (UHPC) para referirse a un mortero fluido producido con una óptima densidad. Utilizaron el Modelo de Sólidos en Suspensión (SSM por sus si-

glas en inglés), como modelo de empaquetamiento de partículas, basado en el modelo de Mooney. Ensayaron diferentes misturas, con una relación agua/aglomerantes o water/binder (w/b por sus siglas en inglés) que varía entre de 0,106 hasta 0,178. Alcanzaron una resistencia de 237,90 MPa al aplicar sistema de curado que incluye inicialmente los especímenes sumergidos por 4 días en agua a 90 °C y posteriormente a temperatura ambiente.

Año 1995: Richard y Cheyrezy [21] aplicaron un cierto número de principios básicos de diseño referentes a la composición, mezcla y posterior curado térmico del concreto, para obtener un material dúctil con ultra alta resistencia denominado Reactive Powder Concrete (RPC por sus siglas en inglés). La ductilidad fue obtenida por la adición de fibras de acero a la mezcla. Ellos emprendieron un programa de pesquisa para desarrollar concretos con resistencias entre 200 y 800 MPa, a través de mejoras en la homogeneidad de la mezcla mediante la eliminación del agregados grueso, mejoras de la densidad compactada por optimización de la mezcla granular y aplicación de presión antes y durante el ajuste, mejoras en la microestructura mediante tratamiento térmico en el curado, aumento de la ductilidad mediante la incorporación de fibras de acero de tamaño pequeño y mantenimiento de los procedimientos de mezcla y encofrado lo más cerca posible de la práctica existente.

Año 2005: Rossi et al. [22] testaron cilindros de 11 cm de diámetro y 22 cm de altura para obtener 205 MPa usando mezclas con diferentes porcentajes y tipos de fibras de acero, incluyeron tratamiento térmico en el curado el cual consistió en colocar los especímenes en un horno de secado a 90 °C durante cuatro días 48 horas después de ser desmoldados. Lim y Nawy [23] alcanzaron 121 MPa en cubos de concreto de 100 mm con 1,5% de fibras almacenados en cámara húmeda sin tratamiento térmico en el curado.

Año 2006: Habel et al. [7] obtuvieron 168 MPa a los 28 días, utilizaron cemento con bajo contenido de C3A y fibras cortas de acero en la mezcla, con una relación w/b de 0,14 y w/c de 0,18. Desmoldaron al tercer día y los cuerpos de prueba fueron curados en agua a 20 °C.

Año 2007: Graybeal, B. [24] alcanzó 193 MPa a los 28 días para los especímenes con tratamiento térmico en el curado, en esos casos observó una estabilización del valor de la resistencia a las 48 horas de curado, también ensayó especímenes sin tratamiento térmico, alcanzando los 126 MPa, en esos casos observó que ganancias importantes en la resistencia continuaban después de ocho semanas de vaciado.

Año 2008: Thanh, L. [25] desarrollo un extenso trabajo experimental estudiando la influencia de la relación w/c, w/b, tratamiento térmico en el curado, influencia de la GGBS, SF y cenizas pulverizadas, contenido de fibras y efecto del tamaño y tipo de agregado en el diseño de mezcla. Alcanzó resistencia a la compresión en rangos que varían entre 185,90 y 182,20 MPa, aplicando tratamiento térmico y colocando 2,5% de fibras cortas de acero y 143,90 a 129,40 MPa sin tratamiento térmico, en cubos de 50 mm y 100 mm respectivamente.

Año 2009: Yang et al. [8] enfocaron su pesquisa en la disminución de costos de producción y en la utilización en obra (in situ) de la mezcla. Usaron dos diferentes tipos de agregados para sustituir la arena de sílice, primero incorporaron vidrio roto reciclado de la producción de vidrio o Recycled Glass Cullet (RGC por sus siglas en inglés) y segundo lugar usaron dos tipos de arenas locales.

Aplicaron tratamiento térmico en el proceso de curado, ensayaron a la compresión cubos de concreto de 50 mm. Demostraron que usando el vidrio la resistencia disminuyó un 20% y usando las arenas locales no se obtuvo diferencia significativa en la resistencia comparada al uso de arena de sílice. Alcanzaron entre 160-180 MPa usando arenas locales curadas a 90°C y 100-140 MPa a 20 °C. Usando RGC alcanzaron entre 150-160 MPa a 90°C y 80-120 MPa. La relación w/b fue de 0,15.

Año 2011: Tuan et al. [26] incorporaron a la mistura ceniza molidas de cáscara de arroz o Rice Husk Ash (RHA por sus siglas en inglés) como sustituyente del humo de sílice. Utilizaron el modelo de empaquetamiento de partículas desarrollado por Larrard [20] para optimizar la granulometría de la mistura. Demostraron que a medida que aumenta el tamaño promedio de la RHA la resistencia a la compresión disminuye. Alcanzaron 150 MPa con un tamaño máximo del grano de 8 μm y 20% de ese material respecto al peso del cemento.

Año 2012: Hassan et al. [5] desarrollaron una metodología para determinar la resistencia a la compresión, alcanzando 121,32 MPa y 150,56 MPa a los 28 días con y sin fibras respectivamente, emplearon el diseño de mezclas de la University of Liverpool [25], que incluye, además del cemento, a la SF y la GGBS como materiales aglomerantes. La relación w/b es de 0,17 y la de w/c es de 0,24. Usaron tratamiento térmico en el agua de curado a 90 °C por 48 horas y posteriormente a temperatura ambiente hasta el día de la prueba. Toledo et al. [27] obtuvieron 160 MPa de resistencia a la compresión, maximizando la compactación de la mezcla granular, basados en la distribución del tamaño de los granos, la gravedad específica y la virtual densidad de empaquetamiento de los constituyentes de la mezcla, así como también, la contribución del tipo de cemento (Bast furnace cement type III/40) y el contenido de aditivos químicos. Usaron como aditivos minerales la Wollastonita y la SF.

Año 2014: Yu et al. [6] produjeron y evaluaron tres mezclas densamente compactadas con bajo contenido de cemento, empleando

el modelo modificado de empaquetamiento de partículas de Andreassen & Andersen. Alcanzaron 94,2 MPa a los 28 días con la mezcla con mayor cantidad de cemento (875 kg/m³) y 148,6 MPa con la mezcla que incluía 2,5% de fibras cortas de acero, con esa misma cantidad de cemento.

Año 2016: Wu et al. [28] consiguieron 118 MPa a los 28 días usando 25% de humo de sílice, una relación w/b de 0,18 y una relación w/c de 0,21; estudiaron diferentes contenidos del humo de sílice dentro de la mistura, demostrando su importante efecto en la resistencia a la compresión. Lampropoulos et al. [29] ensayaron cubos de 100 mm en compresión, con una velocidad de carga de 0,0007 mm/seg, alcanzando 164 MPa a los 28 días en los especímenes que incluían 3% de fibras cortas de acero en la mistura y aplicando tratamiento térmico de curado en agua, inicialmente a 90 °C por tres días y posteriormente a temperatura ambiente. Liu et al. [30] agregaron a la mistura basalto triturado como agregado grueso con diámetros entre 5 a 20 mm y arena de río con tamaño máximo de 5 mm, alcanzaron una resistencia a la compresión de 99,70 MPa sin fibras y 143,6 MPa usando 2,5% de fibras cortas de acero en cubos de 100 mm de lado; trabajaron con una relación w/b de 0,18 y variaron, en cuatro niveles cada uno, las cantidades de agregado grueso, superplastificante y fibras de acero. Kang et al. [31] investigaron la resistencia a la compresión en cubos de 50 mm de lado usando como materiales aglomerantes el cemento y el humo de sílice de zirconio, usaron también aditivos para reducir la retracción autógena, fibras de acero y fibras híbridas; la mayor resistencia en los especímenes híbridos fue obtenida combinando 1,5% de fibras de acero con 0,5% de fibras de polivinilo, obteniendo en ese caso 147,49 MPa.

Año 2017: Lee et al. [32] desarrollaron estudios de resistencia a la compresión y a la tracción en elementos planos, ensayaron cilindros para dos tipos de mezcla con y sin fibras, alcanzando valores de 127,38 MPa sin fibras y 157,46 MPa con fibras para la mistura B. Hoang y Fehling [33] determinaron que no existen cambios

Tabla 1

Comparación entre diseños de mezcla y la resistencia a la compresión (28 días)

Referencia	(kg/m ³)						w/b	w/c	% fibras	MPa	
	Cemento	GGBS	SF	W	Cuarzo	Arena				f _{ck}	f _{ck} *
Hassan [5]	657	418	119	0	0	1051	0,15	0,28	2	151	121
Yu [6]	875	0	44	0	0	1273	0,22	0,23	2,5	149	94
Habel [7]	1050	0	275	0	0	730	0,14	0,18	6	168	-
Yang [8]	657	430	119	0	0	1050	0,15	0,28	2	190	-
Bache [17]	300	0	100	0	0	0	0,19	0,25	0	0	130
Larrard [20]	1081	0	334	0	0	813	0,14	0,18	0	238	165
Rossi [23]	1050	0	268	0	0	514	0,16	0,20	5	205	-
Lim [24]	543	0	80	0	0	1242	0,21	0,24	1,5	121	-
Graybeal [25]	710	0	230	0	210	1020	0,14	0,15	2	193	126
Thanh [26]	657	418	119	0	0	1051	0,15	0,28	2,5	186	144
Toledo [28]	1011	0	58	76	0	962	0,17	0,16	2	162	-
Wu [29]	863	315	216	0	0	1079	0,18	0,21	2	-	118
Lampropoulos [30]	657	418	119	0	0	1051	0,15	0,28	3	-	-
Hoang [34]	795	0	169	0	198	971	0,16	0,24	1,5	212	217
Kahanji [35]	967	0	251	0	0	675	0,20	0,25	1	155	-
Wu [36]	472	315	262	0	0	1049	0,17	0,38	2	144	98

*f_{ck}: Resistencia a la compresión sin usar fibras en la mezcla; W: micro fibras de Wollastonita.

importantes en la resistencia a la compresión ni en el módulo de elasticidad por la inclusión de fibras de acero en pruebas usando cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, alcanzaron 216,66 MPa y 211,69 MPa sin y con 1,5% de fibras. Kahanji et al. [34] alcanzaron 97,20 MPa usando 1% de fibra con curado en agua a 20 °C y 154,60 MPa con curado en agua a 90 °C, ambas por 7 días y posteriormente en sala húmeda hasta el día de la prueba. Wu et al. [35] fabricaron una mezcla sin fibras y cinco con fibras para evaluar las propiedades estáticas y dinámicas del concreto sometido a compresión, alcanzando 98,30 MPa y 143,6 MPa respectivamente. Alsalmán et al. [36] alcanzaron 118,6 MPa sin fibras y sin tratamiento térmico en el curado, usando materiales comerciales locales.

2.2 Diseño de mezcla

El diseño de mezclas del UHPRC se diferencia del concreto tradicional por excluir el agregado grueso e usar arena fina. Incluye aditivos minerales que actúan como microfiller, rellenando los pequeños vacíos entre partículas, mejorando así la zona intersticial y también reaccionando con el hidróxido de calcio para incrementar la resistencia final. El superplastificante es usado como aditivo químico para mejorar la trabajabilidad y disminuir la relación w/b, que generalmente es menor o igual a 0,20. En la Tabla 1 podemos observar un resumen del diseño de mezcla usado por algunos autores y comparar los valores de la resistencia a la compresión obtenida con y sin el uso de fibras en la muestra. Cuando la mezcla incluye fibras el concreto es llamado Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRC por sus siglas en inglés). En este estudio trabajaremos sin fibras, es decir, con UHPRC.

3. Metodología

3.1 Definición de las variables del programa experimental

Para producir UHPRC económicamente sustentable debemos estudiar las proporciones de los residuos industriales a utilizar en el



Figura 1
Ensayo de compresión uniaxial

diseño de mezcla, así como también comparar la evolución de la resistencia en el tiempo, es decir, determinar la magnitud de la resistencia acelerada que produce el tratamiento térmico en edades tempranas para compararlo con procesos económico de curado a temperatura ambiente.

Adicionalmente, en la revisión de la literatura fue claramente observado que para conseguir concretos con ultra alta resistencia a la compresión debemos (i) reducir la relación w/c, (ii) utilizar una relación w/b entre 0,15-0,20 e (iii) incrementar el grado de compactación de la mezcla. El primer aspecto implica un incremento en el calor de hidratación del cemento con posibles consecuencias de agrietamiento por retracción térmica. El segundo aspecto podría incrementar la cantidad de vacíos entre las partículas del cemento y el agregado y por tanto producir baja resistencia. El tercer aspecto demanda densificar la matriz de concreto ocupando los posibles vacíos con diferentes tamaños de partículas y aplicar vibración mecánica.

Por esas razones el uso de aditivos minerales como el humo de sílice o SF y la escoria de alto horno o GGBS se incluyen en la mezcla. Ambos minerales pueden ser combinados con el cemento y reaccionar con el agua para producir el duradero C-S-H, también pueden controlar la cantidad del calor de hidratación y prevenir el agrietamiento térmico. La SF está compuesta por partículas muy finas que pueden ocupar la zona intersticial y junto a la GGBS aumentar la densidad de la mezcla, con esto, la demanda de agua también será incrementada, por tanto la incorporación de un aditivo químico para mejorar la trabajabilidad sin aumentar la relación w/b es necesario.

Por tal motivo se consideran como variables o factores controlables en nuestro estudio experimental aquellos relacionados a: (i) la sustentabilidad, para lo cual se trabajará con diferentes cantidades de residuos industriales como sustitutos parciales de la cantidad de cemento; (ii) la densificación de la matriz, para lo cual se usarán diferentes granulometrías de la escoria de alto horno; (iii) el tipo de curado, para lo cual aplicaremos tratamiento térmico en el curado a la mitad de los especímenes y la otra parte será curada a temperatura ambiente, con ello podrá ser evaluado la ganancia de resistencia en edades tempranas; y (iv) la resistencia a diferentes edades de curado.

3.2 Materiales

Los materiales aglomerantes usados en la mezcla están constituidos por: (i) cemento nacional tipo Portland CP V ARI con alta resistencia inicial, (ii) escoria de alto horno (GGBS) donada por la empresa ArcelorMittal Tubarão do Estado do Espírito Santo, de la cual se obtuvo el lote de material para los ensayos siguiendo las estipulaciones de la norma NBR NM 26 [41], (iii) el humo de sílice (SF) es del tipo ND SILMIX fabricado por Dow Corning Metais do Pará Indústria e Comércio Ltda, Pará-Brasil. Posee un único agregado constituido por arena de sílice (identificado por sus siglas en inglés como SS), con tamaño máximo del grano de 0,30 µm. Como aditivo superplastificante se utilizó una solución de policarboxilatos en medio acuoso (ViscoCrete 3535) suministrado por la empresa SIKA, el cual ajusta la trabajabilidad del concreto y es mezclado con agua corriente para ser colocados en la mezcla.

Tabla 2
Diseño de tratamientos

Designación	Factor control	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
A	Edad de la muestra	7 días	14 días	28 días
B	Tamaño máximo GGBS	850 μm	1700 μm	1180 μm
C	Tipo de trazo	UHPRC-1	UHPRC-2	UHPRC-3
	Cemento:	50%	55%	65%
	GGBS:	45%	35%	15%
	SF:	5%	10%	20%
D	Tipo de curado	Sin tratamiento térmico	Con tratamiento térmico	-

3.3 Diseño de mezclas

Las mezclas utilizadas en este estudio son mostradas en la Tabla 4. Esos tres diseños se combinaron con tres diferentes tamaños de la GGBS, para obtener nueve diseños de mezcla para producir concreto con ultra alta resistencia y evaluar su resistencia a la compresión. Se tomó como diseño de mezcla base el desarrollado por Thanh [25] identificado como UHPRC-2, a partir de la cual se variaron las cantidades individuales de aglomerantes, manteniendo constante la relación w/b y el superplastificante se usó en una proporción de 3,35% del total del peso de los aglomerantes.

3.4 Fabricación de las mezclas

Serán concretados nueve diseños de mezcla para ser ensayados bajo solicitaciones de compresión uniaxial a los 7, 14 e 28 días. Dos tratamientos de curado en agua serán aplicados, el primero con cura térmica (identificado como CTT) el cual consiste en sumergir los cuerpos de prueba por 24 horas en baño térmico a 60 °C y luego a temperatura 20 °C \pm 3 °C y el segundo sin cura térmica (identificado como STT) el cual se realizará sumergiendo los especímenes en agua a temperatura ambiente (20 °C \pm 3 °C) hasta el día de la prueba.

Tabla 3
Grados de libertad requeridos

Designación	Grados de libertad
A	2
B	2
C	2
D	1
A x B	4
A x C	4
A x D	2
B x C	4
B x D	2
C x D	2
A x B x C	8
B x C x D	4
C x D x A	4
D x A x B	4
A x B x C x D	8
Média general	1
Total	52

En el proceso de mezclado, los materiales deben ser primeramente pesados y colocados en una mezcladora para argamasa siguiendo el siguiente orden: humo de sílice, cemento, escoria de alto horno y arena de sílice. Los materiales secos se mezclan por aprox. 5 minutos antes de colocar el superplastificante previamente mezclado con el agua. Todos los materiales deben mezclarse por aprox. 10 minutos más, hasta que la mezcla se convierta en una húmeda pasta de concreto. En ese estado la mezcla para el UHPRC se considera lista y es entonces cuando se procede a vaciarla en los moldes cilíndricos con 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, los cuales una vez llenos, son compactados sobre una mesa vibratoria por 1 minuto. Los cuerpos de prueba son almacenados y cubiertos con una manta plástica por 24 horas, luego de ese tiempo se dividen en dos partes para aplicar los diferentes tipos de curado. El primer curado consiste en almacenarlos en agua a temperatura ambiente hasta el día del ensayo y el segundo curado consiste en colocarlos en baño térmico por 24 horas a una temperatura de 60 °C y luego almacenarlos en agua a temperatura ambiente hasta el día del ensayo, cuidando de que los espécimen no sufran choque térmico.

3.5 Preparación de los especímenes y ensayo de compresión

Se realizó el ensayo de compresión uniaxial en las 162 probetas (ver Figura 1), fabricadas en moldes de acero de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura, según los criterios especificados en la norma ABNT NBR7215 [42]. Previamente las caras superior e inferior de los cilindros son niveladas por medios mecánicos usando una rectificadora y se mide la altura de cada cuerpo de prueba para verificar la necesidad de aplicar algún factor de corrección en la resistencia según lo estipulado en el ítem 6.1.2 Tabla 2 de la norma ABNT NBR5739 [43].

Los especímenes serán ensayados a los 7, 14 y 28 días de curado

Tabla 4
Diseños de mezclas para UHPRC (kg/m^3)

Material	UHPRC-1	UHPRC-2	UHPRC-3
Cemento	597	657	776
GGBS	537	418	179
SF	60	119	239
SS	1051	1051	1051
Superplastificante	40	40	40
Agua	185	185	185

Tabla 5

Resistencia a la compresión promedio del UHPRC (MPa) para 7, 14 y 28 días

A1: 7 días									
A	B1: 850 µm			B2: 1700 µm			B3: 1180 µm		
B	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
D	51	84	106	63	81	89	56	74	119
	60	95	93	70	68	86	78	77	95

A2: 14 días									
A	B1: 850 µm			B2: 1700 µm			B3: 1180 µm		
B	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
D	58	104	120	64	65	95	61	63	125
	67	97	96	82	85	92	84	99	112

A3: 28 días									
A	B1: 850 µm			B2: 1700 µm			B3: 1180 µm		
B	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
D	72	113	138	46	98	122	90	102	135
	81	116	122	94	106	115	110	100	117

en una prensa hidráulica con capacidad de 2000kN, a una tasa de carga de 1 MPa/seg hasta la carga última. Para disminuir la varianza experimental se utilizarán materiales de un mismo lote y los mismos equipos para la fabricación y ensayo de las probetas.

3.6 Análisis de los datos

Una estrategia práctica ampliamente usada para analizar los resultados de ensayos de resistencia a la compresión del concreto es el arreglo factorial, en el cual se definen diferentes tratamientos que se quieren comparar. En el diseño de tratamientos se seleccionan los factores controlables, sus niveles y la combinación entre ellos. En el diseño experimental se indica la manera en que los tratamiento se aleatorizan y la forma de controlar la variabilidad natural de las mismas.

En este estudio un arreglo factorial completo fue definido. El diseño experimental fue desarrollado a través de un análisis de varianza usando ANOVA, que es el tratamiento estadístico más comúnmente aplicado a los resultados experimentales para determinar si algún factor controlable o alguna interacción entre factores tienen

influencia significativa en la variable de respuesta, con bajo porcentaje de incerteza, Ayan et al. [37], Mucteba U. [38], Yoon et al. [39], Mukharjee et al. [40].

En el diseño de los tratamientos se establecieron cuatro factores controlables (i) edad de la muestra, (ii) tamaño máximo de la

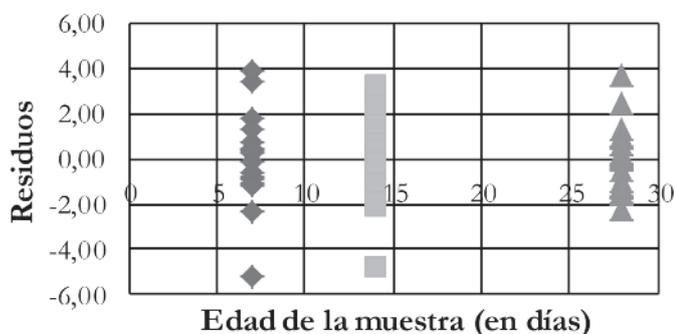


Figura 2
Edad de la muestra & desvíos residuales para la mistura UHPRC-1

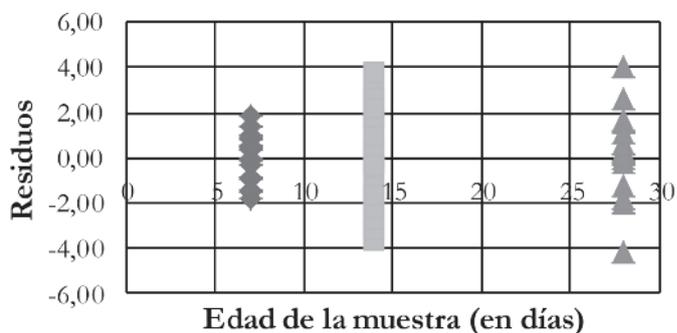


Figura 3
Edad de la muestra & desvíos residuales para la mistura UHPRC-2

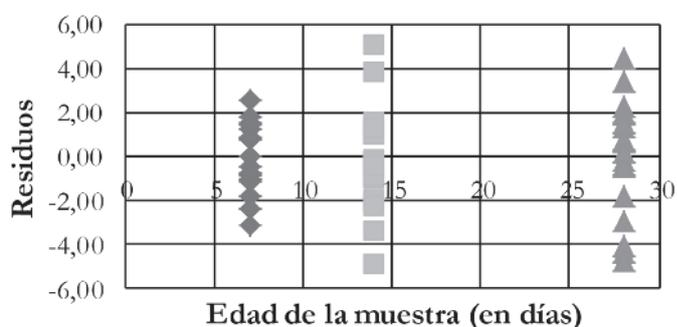


Figura 4
Edad de la muestra & desvíos residuales para la mistura UHPRC-3

Tabla 6
Resultados del análisis de variancia ANOVA

Factores controlables	Fuente	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabilidad
Edad de la muestra	A	16521	2	8260	1481	3,1E-79
Granulometría de la GGBS	B	2965	2	1482	266	1,93E-42
Tipo de trazo	C	39614	2	19807	3552	2,97E-99
Tipo de curado	D	639	1	639	115	1,14E-18
	AB	185	4	46	8	6,99E-06
	AC	444	4	111	20	2,61E-12
	AD	322	2	161	29	9,16E-11
	BC	5414	4	1354	243	5,27E-53
	BD	793	2	396	71	2,00E-20
	CD	6961	2	3480	624	4,58E-60
	ABC	2502	8	313	56	5,44E-35
	BCD	658	4	164	29	1,44E-16
	CDA	721	4	180	32	1,08E-17
	DAB	1426	4	356	64	1,32E-27
	ABCD	1368	8	171	31	1,59E-24
	Erro	602	108	6	-	-
	TOTAL	81135	161	-	-	-

GGBS (iii) tipo de mezcla (UHPRC-1, UHPRC-2, UHPRC-3) y (iv) tipo de curado, identificados con las letras A, B, C con tres niveles de control y D con dos niveles de control respectivamente, lo que conduce a 54 experimentos que incluyen todas las posibles combinaciones que deberían ser introducidas en el diseño, ver Tabla 2. Se realizaron tres repeticiones en cada caso para conformar un total de 162 experimentos. El total de grados de libertad resultantes son 52, los cuales están señalados en la Tabla 3.

La relación w/b se mantuvo fija en 0,15 y la relación w/c fue de 0,31 para UHPRC-1, de 0,28 para UHPRC-2 y de 0,24 para UHPRC-3. La cantidad de arena de sílice, superplastificante y agua se mantu-

vieron constantes. Los tres tipos de mezclas son diferenciadas por los porcentajes de aglomerantes en cada caso, como se observó en la Tabla 2.

4. Resultados y discusiones

4.1 Ensayo de resistencia a la compresión

Para cada ensayo de compresión uniaxial a los 7, 14 y 28 días de curado al menos tres especímenes fueron testados, sus valores promedio son mostrados en la Tabla 5. En cada par de datos

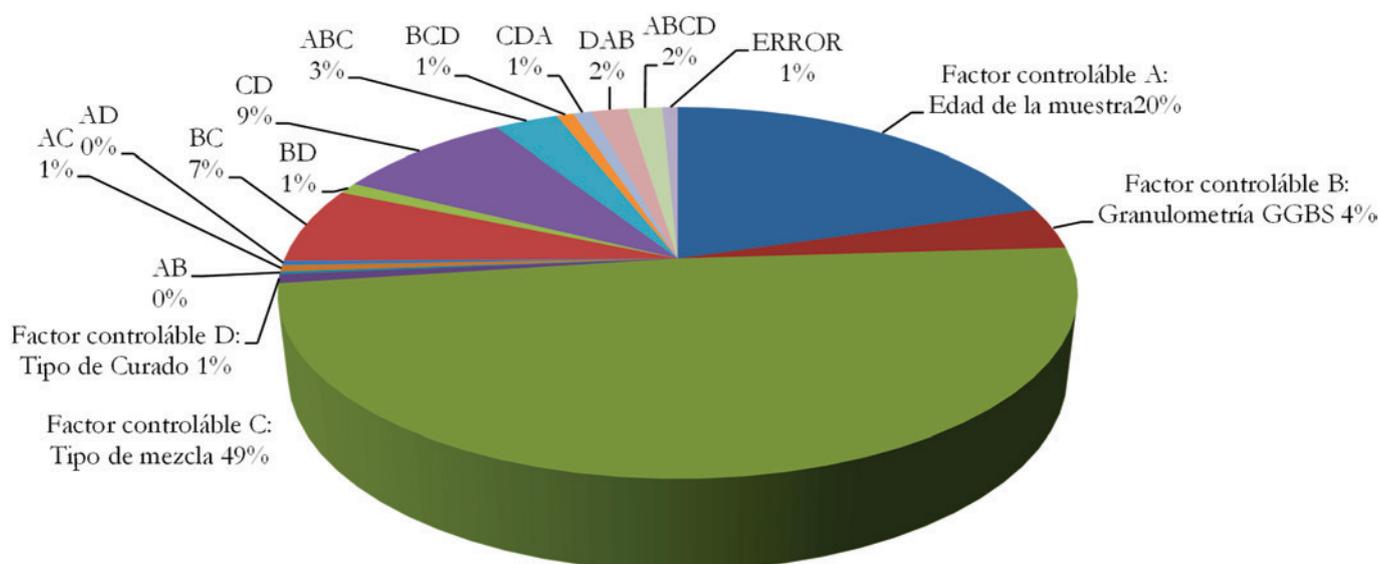


Figura 5
Contribución de los factores controlables y sus interacciones en la resistencia a la compresión

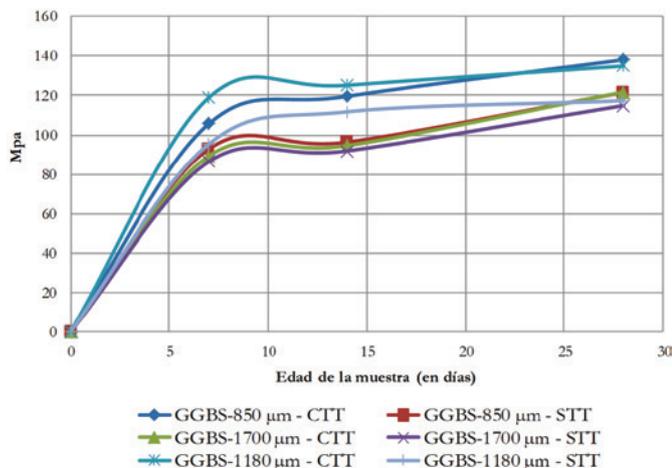


Figura 6
Resistencia a la compresión UHPRC-3 en función de la edad de la muestra

reflejados, el valor en la línea superior corresponde espécimen con tratamiento térmico y el inferior sin tratamiento térmico en el curado. B1, B2 y B3 corresponden a los tipos de granulometría de la GGBS para 850 μm, 1700 μm y 1180 μm, y los tipos de mezcla C1, C2 y C3 corresponden a los concretos UHPRC-1, UHPRC-2 y UHPRC-3 respectivamente. La mezcla UHPRC-3 arrojó los mayores valores de resistencia para todas las edades. El mayor valor promedio de resistencia la compresión fue de 138 MPa que corresponde a la mezcla con tratamiento térmico de curado y con un tamaño máximo de la escoria de 850 μm.

4.2 Análisis de los desvíos residuales

El desvío relativo máximo fue calculado dividiendo el valor absoluto de la diferencia entre la resistencia media y la resistencia individual que más se aparte de la media, pela resistencia media y multiplicando este valor por 100, ABNT NBR7215 [42].

En los casos que el desvío relativo máximo superó el 6% se procedió a repetir el ensayo para todas las edades. Los desvíos residuales para cada tipo de concreto pueden ser observados en las Figuras 2, 3 y 4. En cada gráfico se muestra la variabilidad de la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días respecto a la media para cada tipo de mezcla UHPRC. Notamos que las mezclas

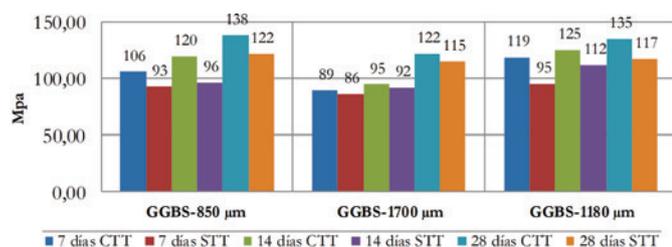


Figura 7
Resistencia a la compresión UHPRC-3 en función del tamaño máximo de la GGBS

UHPRC-2 y 3 presentan menos dispersión a los siete días, la mezcla UHPRC-2 a los catorce y la mezcla UHPRC-1 a los veintiocho días de curado. Algunos valores se alejan más de la media, sin embargo, en todos los casos, los desvíos se encuentran dentro del rango permitido por la norma ABNT NBR7215 [42].

4.3 Análisis de variancia y comparación de medias

Los resultados del análisis de variancia usando ANOVA son mostrados en la Tabla 6, en la cual cuatro factores controlables fueron analizados y once interacciones fueron generadas.

Para todos los casos el valor de la probabilidad indicado por la distribución F es menor que 1%, esto quiere decir que todos los factores controlables tienen influencia significativa sobre la variable de respuesta, en nuestro caso la resistencia a la compresión, con un nivel de confianza superior al 99%. Dicho de otra forma, las diferencias en la variable de respuesta se deben a la influencia de los factores controlables y no al error experimental.

El porcentaje de contribución de cada factor controlable sobre la resistencia a la compresión puede ser visualizado en la Figura 5. Esos valores fueron calculados dividiendo cada suma cuadrada entre el total de sumas cuadradas y luego multiplicando por 100. Altas resistencia fueron obtenidas con tratamiento térmico en el curado en [12-15, 20-22, 24 y 28], sin embargo, en nuestro estudio el tipo de curado demostró tener 1% de importancia sobre la resistencia a la compresión para los diseños de mezcla estudiados. En las referencias mencionadas anteriormente la temperatura usada fue mayor a 60°C y por un periodo de tiempo superior a 24 horas, en la fecha de realización de los experimentos de este estudio limitaciones en el equipamiento del laboratorio impidió aplicar un tratamiento térmico más cercano al comúnmente usado en la literatura.

Posiblemente sumergir los especímenes en agua a 60°C por 24 horas no consiguió acelerar suficientemente la resistencia a la compresión. Diferencias significativas en la resistencia a la compresión aplicando o no el tratamiento térmico en el curado no fueron alcanzadas, como aconteció en [8, 24, 25, 34]. En [17, 19, 24 y 36] resultados semejantes a los nuestros fueron encontrados usando una cantidad importante de humo de sílice, superplastificante y sin el uso de tratamiento térmico.

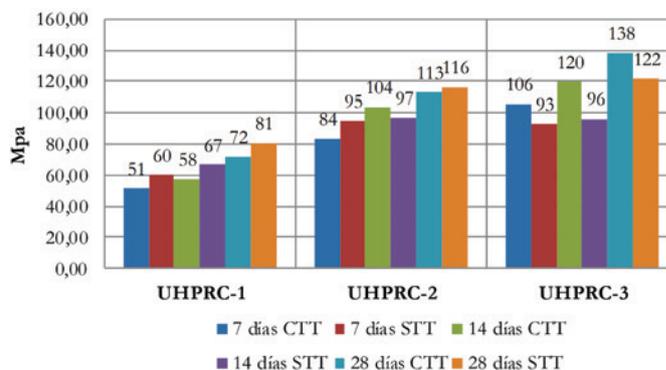


Figura 8
Resistencia a la compresión para los tres tipos de mezcla

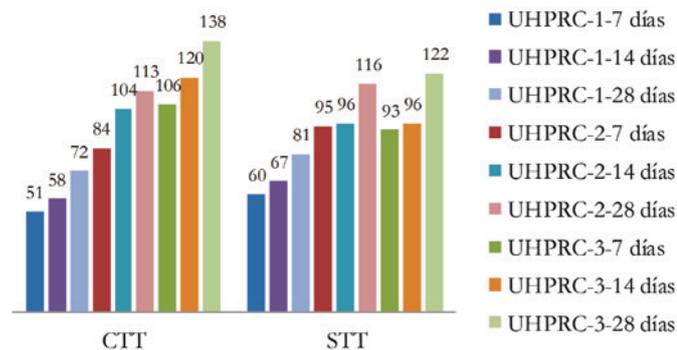


Figura 9
Valores de la resistencia a la compresión para GGBS-850 μm con el tipo de curado

Como todos los factores controlables tienen influencia significativa en la resistencia a la compresión del UHPRC, podemos realizar un análisis de medias en cualquiera de ellas. Existen diferencias significativas entre las medias de cada nivel, como se pudo observar en la Tabla 5, entonces al ordenarlas en orden creciente logramos verificar si el intervalo entre ellas supera el Límite de Decisión (LD), donde LD es igual a tres veces el desvío padrón de las medias de las muestras. Este procedimiento se llama comparación múltiple de medias, el cual será desarrollado a continuación, enfocándonos principalmente en los resultados obtenidos para el diseño de mezcla UHPRC-3 que arrojó los mejores resultados y las mayores resistencias.

Para comparar las medias del factor controlable A (edad de la muestra) y de sus interacciones AB, AC, AD fijaremos los niveles de B, C y D. Así en la Figura 6 podemos observar como varía la resistencia a la compresión con la edad de la muestra, para los tres tamaños de escoria, con y sin tratamiento térmico en el curado. Los mayores valores de la resistencia a la compresión se obtuvieron a los 28 días de curado con tratamiento térmico, los resultados fueron de 138, 122 y 135 MPa para GGBS con tamaño máximo de 850, 1700 y 1180 μm respectivamente. Los resultados de resistencia sin tratamiento térmico fueron de 122, 115 y 117 MPa para GGBS con tamaño máximo de 850, 1700 y 1180 μm respectivamente.

Para comparar las medias del factor controlable B (granulometría de la GGBS) y de sus interacciones BA, BC, BD fijaremos los niveles de A, C y D. Así en la Figura 7 podemos observar como varía la resistencia a la compresión con la granulometría de la GGBS, para las tres edades de la muestra, con y sin tratamiento térmico en el curado.

Los mayores valores de resistencia fueron de 138 MPa, 122 MPa y de 135 MPa para las GGBS-850, GGBS-1700 y GGBS-1180 μm respectivamente, a los 28 días de curado con tratamiento térmico. Sin tratamiento térmico los resultados fueron 122, 115 y 117 MPa respectivamente.

Para comparar las medias del factor controlable C (tipo de mezcla) y de sus interacciones CA, CB, CD fijaremos los niveles de A, B y D. Así en la Figura 8 podemos observar como varía la resistencia a la compresión con el tipo de mezcla UHPRC, para las tres edades de la muestra, con y sin tratamiento térmico en el curado. Para las mezclas UHPRC-1 y UHPRC-2, los mayores valores de resis-

tencia a la compresión fueron de 81 y 116 MPa respectivamente, a los 28 días de curado sin tratamiento térmico. Para la mezcla UHPRC-3 el mayor valor alcanzado fue de 138 MPa a los 28 días con tratamiento térmico en el curado.

Para comparar las medias del factor controlable D (tipo de curado) y de sus interacciones DA, DB, DC fijaremos los niveles de A, B y C. Así en la Figura 9 podemos observar como varía la resistencia a la compresión con el tipo de curado, para las tres edades de la muestra y los tres tipos de mezcla. En este caso reflejaremos los resultados para la granulometría de la escoria GGBS-850 μm con la que se obtuvo la mayor resistencia. A los 7 días de curado con tratamiento térmico las mezclas UHPRC-1, 2 y 3 alcanzaron respectivamente el 72, 74 y 76% de la resistencia a los 28 días; sin tratamiento térmico alcanzaron el 74, 81 y 76%. A los 14 días de curado con tratamiento térmico las mezclas UHPRC-1, 2 y 3 incrementaron respectivamente en 12, 24 y 13% la resistencia de los 7 días; sin tratamiento térmico incrementaron en 11, 2 y 4%. A los 28 días de curado con tratamiento térmico las mezclas UHPRC-1, 2 y 3 incrementaron respectivamente en 40, 35 y 31% la resistencia de los 7 días; sin tratamiento térmico incrementaron en 34, 23 y 31%.

5. Conclusiones

El diseño de mezcla UHPRC-3 con tamaño máximo de escoria de 850 μm arrojó los mayores valores de resistencia a la compresión a los 28 días. Con tratamiento térmico en el curado los resultados fueron 136, 137 y 142 MPa; con los cuales se obtuvo una resistencia promedio de 138 MPa. Sin tratamiento térmico en el curado la mayor resistencia promedio fue de 122 MPa.

A los 7 días de curado se alcanzó al menos el 70% de la resistencia a la compresión de los 28 días. En promedio, la ganancia de la resistencia desde los 7 a los 28 días fue de 32, 26 y 44% para UHPRC-1, 2 y 3 respectivamente.

Para un GGBS de tamaño máximo 850 μm , los diseños de mezcla UHPRC-1 y UHPRC-2 no arrojaron diferencias significativas en los resultados con y sin tratamiento térmico en el curado. La mezcla UHPRC-1 debió ser repetida varias veces porque los cuerpos de prueba sumergidos en cura térmica se agrietaban. Esas mezclas contienen los porcentajes más bajos de humo de sílice y de GGBS, por tanto podemos presumir que gran cantidad del calor de hidratación fue generado y posibles agrietamientos térmicos impidieron el desarrollo de la resistencia a edades tempranas. Para UHPRC-3 mayores diferencias entre tratamientos de curado fueron encontradas, sin embargo las mismas no superaron el 20%. El comportamiento descrito anteriormente influyó en el bajo porcentaje de contribución de esa variable (tipo de curado) sobre la resistencia a la compresión.

Para un GGBS de tamaño máximo 1700 μm y 1180 μm se obtuvo un mejor comportamiento en los especímenes sin tratamiento térmico en el curado. La resistencia a los 7 días fue en promedio un 25% menor en los especímenes que incluyeron 24 horas de tratamiento térmico en el curado. Por tanto a mayor tamaño de la escoria el tratamiento térmico parece haber influido negativamente en la ganancia de resistencia a edades tempranas.

Incluir tratamiento térmico en el curado acelera la resistencia a la compresión del concreto en edades tempranas, sin embargo,

en nuestro estudio, el tipo de curado demostró tener 1% de importancia sobre la resistencia a la compresión para los diseños de mezcla estudiados. Por tanto, en este caso, la fabricación de la mezcla sin tratamiento térmico en el curado resulta una mejor opción desde el punto de vista económico.

Se recomienda ampliar los niveles del factor controlable D referente al tipo de curado, para estudiar distintos tipos de tratamiento térmico y determinar si una mayor temperatura o un mayor tiempo de exposición al calor pueden diferenciar de forma más acentuada la ganancia de resistencia a la compresión en edades tempranas. El diseño de mezcla que se recomienda en este estudio es el UHPRC-3, usando como materiales aglomerantes 65% de cemento CP-V, 15% de GGBS con tamaño máximo de 850 μm , 20% de humo de sílice, como agregado usar arena fina con tamaño máximo de 600 μm , agua corriente y superplastificante SIKA o similar.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen principalmente a la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), al Laboratorio de Ensayos y Modelos Estructurales (LEME) de la UFRGS principalmente a los funcionarios Eurípedes Martins Fontes y Edgar Wallace Pereira. También los autores desean agradecer a la empresa AcerloMittal-Tubarão y SIKA-Brasil por la donación de material para la investigación.

7. Referencias bibliográficas

- [1] Fehling, E.; Schmidt, M.; Walraven, T.; Leutbecher, T.; Frohlich, S. Ultra High Performance Concrete UHPC Fundamentals, Design, Examples. First Edition, 2014, 188 p. <http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-3433030871.html>
- [2] Doo-Yeol Yoo, Young-Soo Yoon. A Review on Structural Behavior, Design, and Application of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials, v.10, n.2, 2016; p.125-142. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40069-016-0143-x>
- [3] Tanaka, Y., Musya, H., Ootake, A. et al. Design and Construction of Sakata-Mirai Footbridge Using Reactive Powder Concrete. In: Proc. Of 1st fib Congress Concrete Structure in the 21st Century, Osaka, Japan, 2002, v.1, p.103-104. <https://structurae.net/structures/sakata-mirai-footbridge>
- [4] UNSTAT, Greenhouse gas emissions by sector (absolute values). United Nation Statistics Division. https://unstats.un.org/unsd/environment/air_greenhouse_emissions%20by%20sector.htm
- [5] Hassan, A.; Jones, S.; Mahmud, G. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRC). Journal Construction and Building Materials, v.37, 2012; p.874-882. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812002322>
- [6] Yu, R.; Spiesz, P.; Brouwers, H. Mix design and properties assessment of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRC). Journal Cement and Concrete Research, v.56, 2014; p.29-39. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884613002275>
- [7] Habel, K.; Viviani, M.; Denarié, E.; Brühwiler, E. Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRC). Journal Cement and Concrete Research, v.36, 2006; p.1362-1370. <https://www.researchgate.net/publication/223459609>
- [8] Yang, S.L.; Millard, S.G.; Soutsos, M.N.; Barnett, S.J.; Le, T.T. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRC). Journal Construction and Building Materials, v.26, n.6, 2009; p.2291-2298. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808003449>
- [9] EMMA. [http://minhateca.com.br/clubedoconcreto/emma+elkem,674040748.rar\(archive\)](http://minhateca.com.br/clubedoconcreto/emma+elkem,674040748.rar(archive))
- [10] Feret, René. Sur la Compacité des mortiers hydrauliques. Annals des Ponts et Chaussées, 1894.
- [11] Reinhardt, H. W. Otto Graf's research on concrete roads—A retrospective view. Journal Otto Graf. Annual Journal on Research and Testing of Materials, v.14, 2003; p.9-19. https://www.mpa.uni-stuttgart.de/publikationen/otto_graf_journal/ogj2003/beitrag_reinhardt.pdf
- [12] Freyssinet, Eugene. <https://structurae.info/personnes/eugene-freyssinet>
- [13] Yudenfreund, M.; Odler, I.; Brunauer, S. Hardened Portland cement pastes of low porosity I. Materials and experimental methods. Journal Cement and Concrete Research, v.2, 1972; p.313-330. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884672900737>
- [14] Roy, D.; Gouda, G.; Bobrowsky, A. Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques. Journal Cement and Concrete Research, v.2, 1972; p.349-366. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884672900750>
- [15] Roy, D. and Gouda, G. High strength generation in cement pastes. Journal Cement and Concrete Research, v.3, 1973; p.807-820. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884673900136>
- [16] Birchall, J.; Howard, A.; Kendall, K. Flexural strength and porosity of cements. Journal Nature Publishing Group, v.289, 1981; p.388-390. <https://www.nature.com/nature/journal/v289/n5796/pdf/289388a0.pdf>
- [17] Bache, H. H. Densified cement ultra-fine particle-based materials. In Proceedings of the 2nd international conference on superplasticizers in concrete, Ottawa, Canada, 1981, p. 33. <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/DE93500154.xhtml>
- [18] Lankard, D.; and Lease, D. Refractarios monolíticos precolados altamente reforzados. Journal of the American Ceramic Society, bulletin 61, 1982; p.728. <http://boletines.secv.es/upload/20120509120356.z19832202.pdf>
- [19] Hjorth, L.; Alford, N.; Mangabhai, R.; Hirsch, P.; Moir, G.; Jefferis, S.; Blundell, R.; Kelly, A.; Defosse, C.; Sing, K.; Massazza, F.; Bensted, J. Journal Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences, v.310, n. 1511, 1983; p.167-173.
- [20] Larrard, F.; Sedran, T. Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the use of a packing model. Journal Cement and Concrete Research, v.24, n.1, 1994;

- p.997–1009. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S008884694900221>
- [21] Richard, P., and Cheyrezy, M. Composition of reactive powder concretes. *Journal Cement and Concrete Research*, v.25, 1995; p.1501–1511. <https://www.researchgate.net/publication/222388936>
- [22] Rossi, P.; Arca, a.; Parant, e.; Fakhri, P. Bending and compressive behaviors of a new cement composite. *Journal Cement and Concrete Research*, v.35, n.1, 2005; p.27–33. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S008884604002492>
- [23] Lim, D.H. and Nawy, E. G. Behavior of plain and steel-fiber-reinforced high-strength concrete under uniaxial and biaxial compression. *Journal Magazine of Concrete Research*, v.57, n.10, 2005; p.603-610. <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/mac.2005.57.10.603>
- [24] Graybeal, B. Compressive behavior of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete. *Journal ACI Materials*, v.104, n.2, 2007; p.146-152. <https://www.researchgate.net/publication/259435679>
- [25] Thanh, LE. Ultra high performance fiber reinforced concrete paving flags, Liverpool, 2008, PHD Thesis - University of Liverpool, 670 p. <http://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.502191>
- [26] De Larrard, F. *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*, London: E & FN Spon, 1ed, 1999, 419 p. <http://d.telegchannel.com/1/10/18/2409770b-d9ab-4c65-ba02-b8a3bd71ef50.pdf>
- [27] Toledo, R.; Koenders, E.; Formagini, S.; Fairbairn, E. Performance assessment of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in view of sustainability. *Journal Materials and Design*, v.36, 2012; p.880-888. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911006364>
- [28] Wu, Z.; Shi, C.; Khayat, K. Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement based materials (UHSC). *Journal Cement and Concrete Composites*, v.71, 2016; p.97-109. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946516301317>
- [29] Lampropoulos, A; Paschalis, S.; Tsioulou, O.; Dritsos, S. Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). *Journal Engineering Structures*, v.16, 2016; p.370-384. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029615006768>
- [30] Liu, J.; Han, F.; Cui, G.; Zhang, Q.; Lv, Z.; Zhang, L.; Yang, Z. Combined effect of coarse aggregate and fiber on tensile behavior of ultra-high performance concrete. *Journal Constructions and Building Materials*, v.121, 2016; p.310-318. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816307620>
- [31] Kang, S.; Choi, J.; Koh, K.; Lee, K.; Lee, B. Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete. *Journal Composites Structures*, v.145, 2016; p.37-42. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822316301167>
- [32] Lee, J.; Hong, S.; Joh, Ch.; Kwahk, I.; Lee, J. Biaxial tension-compression strength behaviour of UHPRC in plane elements. *Journal Materials and Structures*, v.50, 2017; p.1-17. <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-016-0918-1>
- [33] Hoang, A and Fehling, E. Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high performance concrete. *Journal Construction and Building Materials*, v.153, 2017; p.790-806. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817314733>
- [34] Kahanji, Ch.; Ali, F.; Nadjai, A. Structural performance of ultra-high performance fiber-reinforced concrete beams. *Journal Structural Concrete*, v.18, 2017; p.249-258. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/suco.201600006/full>
- [35] Wu, Z.; Shi, C.; He, W.; Wang, D. Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements. *Journal Cement and Concrete Composites*, n.79, 2017; p.148-157. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946517301622>
- [36] Alsalmán, A.; Dang, C.; Micah, W. Development of ultra-high performance concrete with locally available materials. *Journal Construction and Building Materials*, v.133, 2017; p.135-145. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816319468>
- [37] Ayan, E.; Saatçioğlu, Ö.; Turanlı, L. Parameter optimization on compressive strength of steel fiber reinforced high strength concrete. *Journal Construction and Building Materials*, v.25, 2011; p.2837-2844. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810007427>
- [38] Uysal, Mucteba. Taguchi and Anova approach for optimization of design parameters on the compressive strength of HSC. *Journal Magazine of Concrete Research*, v.64, 2012; p.727-735. <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/mac.11.00156>
- [39] Yoon, S.; Monteiro, P.; Macphee, D.; Glasser, F.; Salah, M. Statistical evaluation of the mechanical properties of high-volume class F fly ash concretes. *Journal Construction and Building Materials*, v.54, 2014; p.432-442. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813012348>
- [40] Mukharjee, B. and Barai, S. Assessment of the influence of Nano-Silica on the behavior of mortar using factorial design of experiments. *Journal Construction and Building Materials*, v.68, 2014; p.416-425. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181400693X>
- [41] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregados - Amostragem - NBR NM 26*, Rio de Janeiro, 2001.
- [42] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland Determinação da Resistência à Compressão - NBR 7215*, Rio de Janeiro, 1995.
- [43] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos - NBR 5739*, Rio de Janeiro, 2007.