

Relación entre la proporción c/a y las propiedades en estado fresco de morteros que contienen árido de vidrio reciclado

Cabrera-Covarrubias, F. G.¹, Gómez-Soberón J. M.^{2*}, Almaral-Sánchez J. L.³, Corral-Higuera, R.³, Arredondo-Rea S. P.³, Mendivil-Escalante J. M.³.

¹ Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (ETSECCPB), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España

² Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (EPSEB), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España

³ Facultad de Ingeniería Mochis (FIM), Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), Los Mochis, Sinaloa, México

*e-mail autor responsable: josemanuel.gomez@upc.edu

RESUMEN

A partir de la búsqueda de alternativas sustentables para el reciclado de diversos residuos que repercuten en problemáticas económicas y ambientales actuales, se considera como opción para contribuir en este ámbito el uso de residuos de vidrio; éste es un material que se puede encontrar en múltiples aplicaciones, y que una vez terminada su vida útil ocasiona problemas de vertido y reciclado. El vidrio, dadas sus características físicas puede ser utilizado en la construcción, como remplazo de la fracción fina en morteros u hormigones. En esta investigación, se fabricaron morteros con vidrio reciclado como sustituto de árido natural a diferentes porcentajes de contenido (0, 15, 30, 60 y 100%) y con diferente relación c/a (1:3.25, 1:4 y 1:4.75), se presentan y discuten el análisis de las propiedades en estado fresco (consistencia, densidad y contenido de aire), puesto que en este estadio incipiente, se establecen las garantías de un adecuado desempeño en su posterior estado endurecido. Los resultados obtenidos reportan que cuando aumenta la cantidad de árido de vidrio respecto al mortero de referencia, se obtiene una menor consistencia y densidad, así como un mayor contenido de aire.

Palabras claves: residuos de vidrio, relación arena-cemento, morteros reciclados.

ABSTRACT

From the search for sustainable alternatives for the recycling of various waste affecting current economic and environmental issues, it is considered as an option to contribute in this scope using waste glass; this is a material that can be found in multiple applications, and that once it has finished its useful life causes problems of dumping and recycling. The glass, given its physical characteristics can be used in the field of construction, investigated in this work its application as replacement of the fraction fine in mortars. In this research, mortars with recycled glass as a substitute for natural aggregate content at different percentages (0, 15, 30, 60 y 100%) and with different ratio c/a (1:3.25, 1:4 y 1:4.75) were fabricated, are presented and discussed the analysis of the properties in fresh state (consistency, density and air content), since in this incipient state, there are established the guarantees of a suitable performance in his subsequent hardened state.

The results reported that when it increases the amount of aggregate of glass and when compared with the reference mortar, the recycled mortar obtained a lower consistency and density, as well as a higher content of air.

Keywords: waste glass, sand-cement ratio, recycled mortar.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la cantidad de residuos de vidrio (GW) ha aumentado de forma progresiva debido al uso creciente del mismo en la manufactura y uso de productos que lo contienen [1]. Por otra parte, es también sabido que no todos los GW pueden ser reutilizados y reciclados en vidrio nuevo sin una afectación ambiental importante [2], aunándose a ello también los altos costes de reprocesamiento requeridos; por lo cual, su reutilización ha atraído actual atención como nueva posibilidad de uso factible y sostenible [1].

Un gran volumen de botellas de vidrio de bebidas post-consumo se disponen diariamente en todo el mundo, y de éste, sólo una pequeña proporción es nuevamente reutilizada previo proceso industrial para su reutilizar o refundido para la fabricación de vidrio nuevo. Como ejemplo de lo anterior, según las encuestas del gobierno de Hong Kong, sólo el 1.2% son reciclados en la [3], [4] con la tecnología que permitiría su reciclado en plantas de vidrio, su proporción (en favor de las materias primas vírgenes) ha sido restringida para asegurar la calidad de los productos de vidrio que se requieren; por lo cual, surge así la necesidad de identificar otras nuevas posibles aplicaciones [5]. Por lo tanto, los GW no reciclables constituyen un problema para la disposición de residuos sólidos en muchas localidades, provocando que constituyan una carga importante para los vertederos [6]. Puesto que el vidrio es un material no biodegradable, la solución de los vertederos no proporciona una alternativa favorable para el medioambiente, y en consecuencia surge la necesidad de utilizar los GW [1], [4], [7] otra parte, la estricta legislación europea en materia de residuos (incluyendo desperdicios de vidrio) [8] direccionan y evidencian la necesidad y su obligación de búsqueda de nuevas aplicaciones alternativas de este residuo, es particular para la determinación de alternativas sostenibles en el ámbito del reciclaje [2][6].

Los fragmentos de vidrio roto de colores varios, llamado casco (cullet) de vidrio [9], representan un componente omnipresente de los materiales de residuos sólidos municipales, éstos (utilizando procesos simples industriales) son fáciles de separar de los residuos sólidos generales y dadas sus peculiares propiedades físicas y químicas, parece ser un candidato ideal para el reciclaje en la industria de la construcción [10], que en la actualidad, está ávida en la búsqueda de alternativas para satisfacer las crecientes necesidades de producción de cemento, concreto [4] y áridos; por lo que los GW son una de las soluciones más eficaces para los grandes volúmenes de materiales que emplea [9].

Los GW se han estudiado de forma habitual, como un material de sustitución de áridos gruesos, finos, e incluso del propio cemento (con valor cementante). Por sus características físicas y composición químicas, se han considerado como un buen sustituto de la arena natural (NS) (de forma más plausible en los lugares en los que estos recursos son escasos) [11], corroborándose que como material de reemplazo parcial, contribuye a la sostenibilidad en la construcción [12]. También se ha reportado que el uso de vidrio reciclado en forma de arena (GS) en su uso como árido para morteros se puede considerar como un material con aptitudes ecológica, rentable y atractivo para ser utilizado en aplicaciones para la construcción por sus características intrínsecas de vidrio (por ejemplo: estética agradable y visible, así como su aportación impermeable), aportando además propiedades sumatorias como la resistencia y la durabilidad (resistencia química) [2], [3], [6], [9], [13].

Morteros con vidrio reciclado (GRM), en los cuales se han reemplazado diferentes porcentajes de la NS o del cemento han sido reportados por algunas incipientes investigaciones, aportando resultados de los ensayos realizados tanto en su fase endurecida (propiedades mecánicas) como de durabilidad (con énfasis en las reacciones puzolánica y álcali-sílice); sin embargo, pocas investigaciones se han aportado sobre su comportamiento en estado fresco, el cual se vincula con las actividades de su transporte, puesta en obra y acabado, que pasan a ser determinantes por influir de forma notoria en las prestaciones finales que ofrecerá el mortero [14].

Por lo que respecta al uso de los GW como sustituto de cemento en mortero, investigaciones actuales han reportado diferentes tendencias, las cuales son vinculadas a diversos factores. GRM con sustitución del 20% presentan una disminución en la consistencia, lo cual es ocasionado a la finura de las partículas de vidrio añadido, puesto que a medida que éste aumenta en los morteros las necesidades de agua de las mezclas se ven incrementadas [15] y [16]. El mismo comportamiento se observó en otra investigación, en la cual se estudiaron valores de sustitución del 10, 20, 30, 40 y 50%; la variación del porcentaje de sustitución provocó variaciones que influyen en dicha propiedad, cuya relación fue que a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, la consistencia de los morteros se reduce [17]. Divergiendo a lo anterior, en otra investigación, en la cual se sustituyó del 10 y 20% del cemento por vidrio, se observó el efecto contrario (aumento en la consistencia de 2 y 3% respectivamente, respecto al mortero de referencia) [12]. En otro estudio, morteros con sustituciones del 10, 20, 30 y 40% y utilizando vidrio de diferentes colores, presentaron un comportamiento similar en todas las mezclas (diferencias de $\pm 0,45\%$ respecto al mortero de control, en este caso el mortero con 10% de reemplazo); con vinculación a la finura de GS [4].

Para sustitución de vidrio por NS con porcentajes de 25, 50, 75 y 100%, y con 25% de ceniza volante por cemento, los resultados muestran que la fluidez del mortero puede llegar a aumentar (respecto a mezcla de control), lo cual fue explicado por el hecho de que el vidrio cuenta con una superficie más lisa y capacidad de absorción de agua inferior a la NS [18] [19]. Para morteros similares (con adiciones de ceniza volante) pero con 100% de reemplazo de GS de diferente tamaño de partícula, la fluidez disminuyó con la disminución de la finura del vidrio, esto fue debido a que el tamaño de partícula más fino incrementa el área de superficie total por unidad de volumen [20]. Comportamiento similar se reportó en GRM con porcentajes de 25, 50, 75 y 100% de GS, en los que además se utilizó 10% de metakaolin como reemplazo de cemento; la fluidez aumentó a la vez que se redujo el uso de la dosis del superplastificante [2] [6] [3]. Caso contrario ocurrió en morteros con 100% de vidrio de tubo de rayo catódico (CRT) (con tratamiento de descontaminación y sin él) en reemplazo de la NS; en dichos morteros que contenían 25% de ceniza volante en reemplazo del cemento, reportaron una mayor fluidez que el mortero de control (173% con tratamiento y 165% sin tratamiento). En otros estudios, pero utilizando en esta ocasión escoria de alto horno, también reportaron igual comportamiento [21]. En otras investigaciones en las cuales solo se sustituyó GS por NS, se reporta una mayor demanda de agua para alcanzar el mismo valor en el ensayo de la mesa de flujo (ASTM C230). En esta ocasión, los bordes más agudos y la forma irregular de las partículas fueron los factores que se dedujeron como los responsables de dificultar el movimiento (del cemento y las partículas) en la pasta. Además, se detalla que el aumento del área de la superficie en la GS (en comparación con la NS casi redonda) requerirá más agua para mojar y más pasta para recubrir y lubricar a los áridos. Las

anteriores hipótesis se validaron para porcentajes del 30 y 70% [22], así como para el 25, 50, 75 y 100% y de forma indiferente para colores marrón, verde, transparente y mixto [23].

En cuanto a la densidad de los GRM, trabajos previos ha reportado que disminuye con contenidos altos de GS (debido al peso específico más bajo en comparación con el de la NS). Además también, se indicó que el color del vidrio no tiene ningún efecto sobre la densidad en fresco de los morteros, sobre todo cuando el contenido no sobrepasa de 75%. La densidad en fresco de mortero con 100% de GS para vidrio de color marrón, verde, transparente y mixto, llegó a ser del 97, 96, 95 y 97% respectivamente de la del mortero de control [23]. Sin embargo, en otro estudio similar, se reportó que la densidad fue mayor en los morteros de estudio, atribuyéndose en este caso a la propia densidad más alta de la GS (que en este caso fue empleado un CRT) [21]. Sobre el contenido de aire de estos GRM, solo un estudio precedente ha reportado que éstos llegan a tener valores de entre 3 y 3.5%, los cuales pueden llegar a tener sensibles incrementos cuando se realizan sustituciones de hasta el 75% (el estudio se realizó para vidrios de los colores: marrón, verde, transparente y mixto); y acentuándose de forma más notoria, para reemplazos del 100%. Lo anterior fue evidenciado al borde más agudo y al coeficiente de aspecto de la GS, que permiten que más aire pueda ser retenido en la superficie de las partículas de vidrio (atracción molecular de partículas). El caso reportado extremo, fue el del vidrio transparente, el cual presentó el mayor contenido de aire (5.9%) para un reemplazo del 100%; éste comportamiento lo atribuyeron a micro fisuras observadas en las partículas trituradas, las cuales podrían haber afectado la envolvente de los áridos, y siendo evidenciado mejor en altos contenidos de vidrio [23].

En este trabajo, las propiedades en estado fresco de los GRM son estudiados: consistencia, densidad y contenido de aire; así mismo, se estudian éstas en función de los diferentes porcentajes de sustitución aplicados: 15, 30, 60 y 100%. Por último, la investigación se amplía a incluir como variables de análisis el efecto que causa la relación cemento/arena de estos morteros; para lo cual se utilizaron las proporciones de: 1:3.25, 1:4 y 1:4.75.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales.

Como árido de estudio se utilizó arena de vidrio (GS) transparente con tamaño de partículas entre 0 y 1.8 mm; dicho material fue adquirido de una industria que procesa el vidrio de desecho, en específico se trató de un vidrio laminar (con procedencia de ventanas, puertas y parabrisas de vehículos). Como árido de referencia se utilizó arena usual (UA) natural, que consistió en arena silícea constituida por partículas de tamaño de entre 0 y 4 mm.

Haciendo referencia en los perfiles granulométricos de las arenas utilizadas, fue necesario realizar un ajuste en sus curvas con el fin de unificarlas y lograr satisfacer los límites establecidos en la norma ASTM C144. Para esto y de acuerdo con los perfiles reales, se procedió a separar ambos materiales por el tamiz No. 30 (0.59 mm) y establecer un criterio de combinación de diferentes porcentajes de cada uno de ellos, optando por la que obtuviese la máxima compacidad (para cada arena por separado) [24]. Las combinaciones ideales fueron las siguientes:

- 30 % de GS con partículas > al tamiz No. 30, y 70% con partículas < al mismo tamiz.
- 50% de UA con partículas tanto por arriba como por abajo del tamiz No. 30

Las propiedades físicas que presentan estas arenas se muestran en la Tabla 1, que fueron testadas de acuerdo a normativa ASTM. En la misma tabla, se puede observar que la densidad de los GS es menor que UA (diferencias de 107.76 y 134.8 kg/m³), así como menor coeficiente de absorción (diferencia del 1%).

Tabla 1. Propiedades físicas de los áridos.

Propiedad	UA	GS
D_{OD} (Kg/m³)	2581.6	2473.84
D_{SSD} (Kg/m³)	2623.6	2488.8
COEFICIENTE DE ABSORCIÓN (%)	1.6	0.6
MÓDULO DE FINURA	2.4	1.8
PARTÍCULAS <75-µm (%)	2.9	5.3

* D_{OD} = Densidad seca, D_{SSD} = Densidad húmeda superficialmente seca.

Por último, cemento Portland clasificado como CEM I 42.5 N/SR (UNE EN 197-1:2011) fue utilizado como aglutinante por ser de uso, con propiedades y componentes usuales y habituales para la construcción; y por último, el agua utilizada fue de grifo.

2.1. Metodología.

Tres series de mezclas de GRM, cada una con diferente relación c/a iguales a 1:3.25, 1:4 y 1:4.75 y con reemplazos de GS por UA del 15, 30, 60 y 100%, fueron realizadas para el estudio y evaluación de sus propiedades en estado fresco, éstas propiedades fueron: la consistencia, la densidad en fresco y el contenido de aire incluido en las mezclas.

Morteros de referencia mortero usual (UM), 100% de GS y para cada c/a de estudio) fueron identificados como UM-3.25, UM-4.00 y UM-4.75, y para identificar los morteros con contenido de GS se estableció el siguiente acuerdo: GRM-d.dd-XX; donde d.dd = c/a (1:3.25, 1:4 y 1:4.75); y XX = % de GS reemplazando a UA en GRM (15, 30, 60 y 100). Todas las mezclas se diseñaron con una relación agua/cemento (a/c) = 0.5 inicial. Las características y proporciones de las mezclas en estudio, para obtener 1 dm³ son presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Cantidad de materiales utilizados en la dosificación para 1 dm³ de los GRM.

Clasificación y proporciones de la mezcla	a/c inicial	Cemento (g)	UA**		GA**	
			< tamiz 30 (g)	> tamiz 30 (g)	< tamiz 30 (g)	> tamiz 30 (g)
UM-3.25	0.5	480	781	781	0	0
GRM-3.25-15		451	623	623	154	66
GRM-3.25-30		420	478	478	287	123
GRM-3.25-60		367	239	239	501	215
GRM-3.25-100		301	0	0	684	293

UM-4.00		400	800	800	0	0
GRM-4.00-15		349	593	593	146	63
GRM-4.00-30		339	474	474	284	122
GRM-4.00-60		305	244	244	513	220
GRM-4.00-100		271	0	0	758	325
UM-4.75		342	811	811	0	0
GRM-4.75-15		318	643	643	159	68
GRM-4.75-30		284	472	472	283	121
GRM-4.75-60		263	250	250	526	225
GRM-4.75-100		234	0	0	780	334

**Condición seca

La cantidad de agua resultante de la a/c inicial, fue utilizada para realizar una saturación previa de los áridos por un minuto y de esta manera evitar movilidad de agua necesaria para el proceso de hidratación; a continuación fue incorporado el cemento al recipiente con los áridos para incitar la secuencia de amasado en la mezcladora (Mod. E93, marca Matest) a velocidad media durante 60 segundos. Transcurrido ese tiempo se continuó el mezclado a velocidad alta durante 30 segundos, posteriormente se permitió 90 segundos en reposo de la mezcla, y finalmente 60 segundos más a velocidad alta.

Una vez concluido el proceso de mezclado, se procedió a llevar a cabo los ensayos previstos: el primer ensayo realizado fue la obtención de consistencia; ésta prueba se rige por la norma ASTM C230 y su arreglo experimental está constituido por una mesa de sacudidas dispuesta por una placa superior circular rígida (ver la Figura 1), la cual se sustenta en el centro por un soporte; la configuración del equipo permite hacer caer la placa circular de forma que esta recibe un golpe al llegar al final del recorrido, ocasionando que la mezcla dispuesta sobre la parte superior de esta, se extienda de forma libre y en horizontal en todas las direcciones. En este estudio, se buscó obtener una consistencia constante para todas las mezclas, la cual permitiera una fluidez de $110 \pm 5\%$ (en acuerdo a la norma ASTM C109) posterior al aplicarle 25 caídas en la mesa de sacudidas en un periodo de 15 segundos. Dicha fluidez se determina mediante la medida promedio de los dos diámetros perpendiculares (d_1 y d_2 en la Figura 1) que se forman en la mezcla después de su extensión provocada. Tomando en cuenta el diámetro del molde inicial (Figura 1), se establece una consistencia adecuada de 21 ± 0.5 mm; por tanto, si la mezcla no cumple con este requerimiento, se procede a incrementar la cantidad de agua en pequeñas porciones, y a continuación, se repite esta determinación hasta lograr la fluidez deseada.

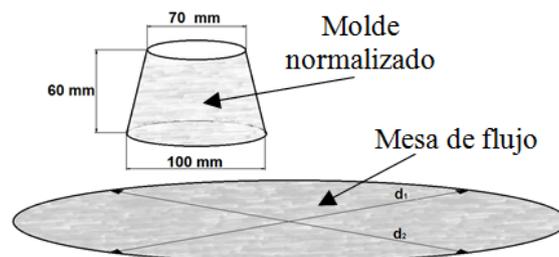


Figura 1. Mesa de flujo y molde.

Posterior a la obtención de la cantidad de agua necesaria para la consistencia solicitada, se determina la densidad; ésta, se obtiene llenando de mortero un recipiente cilíndrico (normalizado con capacidad de un litro) colocado la mezcla de prueba en 3 capas de igual espesor, y apisonando 20 veces en cada una de forme uniforme y distribuida para lograr compactación. Una vez llenado el recipiente, se procede a enrasar y pesar (restando la tara) (Figura 2). La densidad de los GRM se calcula por medio de la fórmula (1), en la cual se sustituyen los valores de peso (mortero dentro del recipiente) y volumen (del recipiente) conocidos.



Figura 2. Medición de densidad del GRM.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Donde:

ρ = Densidad (g/cm³)

M = Masa (g)

V = Volumen (cm³)

Por último, el contenido de aire incluido se obtuvo siguiendo el procedimiento basado en el método de presión (ASTM C231); para esto se utilizó un aerómetro normalizado (Luftgehaltsprüfer TESTING, 1 Liter, marca TESTING) y un recipiente pre-regulado de un litro de capacidad (Figura 3). El equipo está compuesto por una cámara de presión en la cual se genera presión. La apertura de una válvula de descarga permite equilibrar la presión entre la cámara presurizada y el recipiente que contiene la muestra; entendiéndose que la caída de presión se equipará a la medida del contenido de aire del mortero en su estado fresco. El resultado del contenido de aire presentado por cada mortero se obtiene mediante la lectura realizada en el manómetro de calibración.

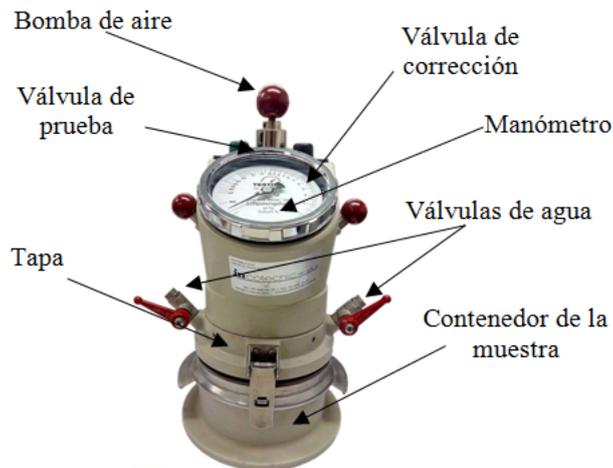


Figura 3. Medidor de contenido de aire.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos por los GRM en estudio se presentan a continuación, en la Figura 4 se muestran las cantidades de agua requeridas para cada uno de los morteros una vez realizado el ensayo de consistencia. Estos resultados se han dividido en una gráfica con dos colores (oscuro y claro) para identificar dos métodos de dosificación; las barras de color oscuro reportan la cantidad de agua necesaria cuando se hace la dosificación por peso, eligiendo una cantidad fija de cemento para todas las mezclas (tomando como referencia la cantidad necesaria para 1 dm³ de cada una de las mezclas UM), mientras que las barras de color claro reportan la cantidad de agua necesaria para 1 dm³ de cada una de la GRM. A partir de estos resultados, se pueden mencionar algunas relaciones establecidas en el estudio:

1. Al dosificar peso, el contenido de GS en los GRM demanda una mayor cantidad de agua necesaria para alcanzar la condición de consistencia establecida por la normativa, presentando un incremento a medida que el porcentaje aumenta; y siendo los morteros con reemplazo de 100% de GS, los que reportan el valor máximo significativo.
2. En cuanto a las tres diferentes relaciones c/a estudiadas, la tendencia de cada una presenta similar comportamiento; sin embargo, la cantidad de agua necesaria para mezclas con 100% de GS presentará un incremento directo, siendo sensiblemente mayor para la c/a = 1:4.75.
3. Cuando se presentan las cantidades de agua para obtener el mismo volumen para todos los GRM, se pueden observar que las solicitudes son sensiblemente menores que los UM (promedio de 7% menos), siendo la mezcla GRM-3.25-100, la que presenta la menor solicitud (15% respecto al UM).

De lo anterior, se puede explicar estos comportamientos indicando que la mayor cantidad de agua necesaria en relación con el aumento en el contenido de GS, se debe a la mayor cantidad de material utilizado cuando se realiza la dosificación por peso; esto debido a la menor densidad de los GS con respecto al UA (ver Tabla 1). Lo anterior ocasiona un aumento en la cantidad de agua necesaria para el perfecto acomodo de sus partículas y lograr obtener la consistencia adecuada.

Comportamiento similar se ha reportado en otros trabajos en los cuales GS reemplazó el 30 y 70% [22], y en otro el 25, 50, 75 y 100%, de UA, para diferentes colores de vidrio [23]. Los resultados reportaron una mayor demanda de agua para alcanzar el mismo valor en el ensayo de la mesa de sacudidas, atribuyéndose a las propiedades físicas de las partículas (borde más agudo, forma irregular y un coeficiente de forma mayor de las partículas), el cual, dificulta el movimiento de la pasta entre el cemento y las partículas. Además, que el aumento en el área específica del GS comparada con el UA (partícula casi redonda), requiere mayor cantidad de agua para humectar, y más pasta para recubrir y lubricar.

A partir de lo anterior, se puede decir que la necesidad de mayor cantidad de agua en los GRM, causada por los porcentajes presentes de GS y por la relación c/a, podrían generar morteros más porosos con consecuencias en el estado endurecido, consiguiendo afectar en una disminución de resistencia a la compresión y en aspectos de durabilidad; sin embargo, será necesario validar dicho comportamiento.

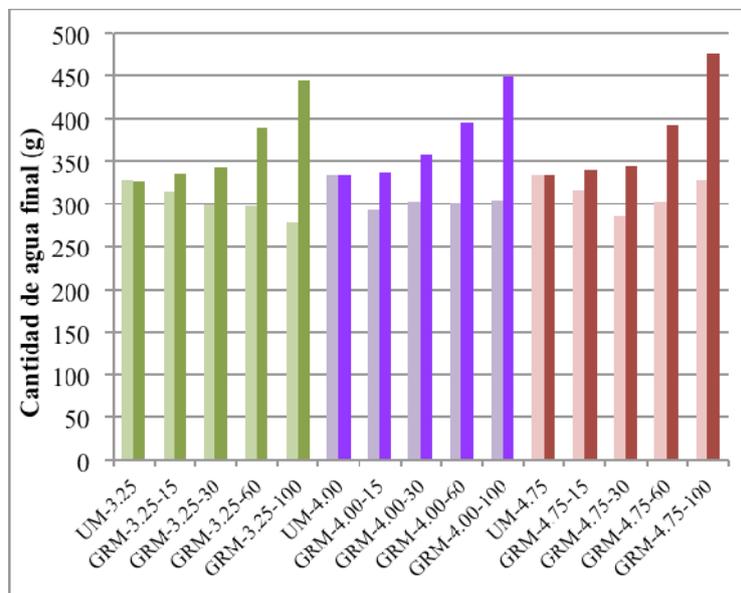


Figura 4. Cantidad de agua necesaria para los GRM.

En la Figura 5 se presentan los resultados de la relación a/c final de cada una de las mezclas estudiadas, las cuales son el resultado definitivo y necesario para alcanzar la consistencia adecuada requerida por norma. Las relaciones en cuanto al efecto del contenido de GS así como de c/a, son consecuencia directa de las hipótesis y relaciones antes establecidas (Figura 4).

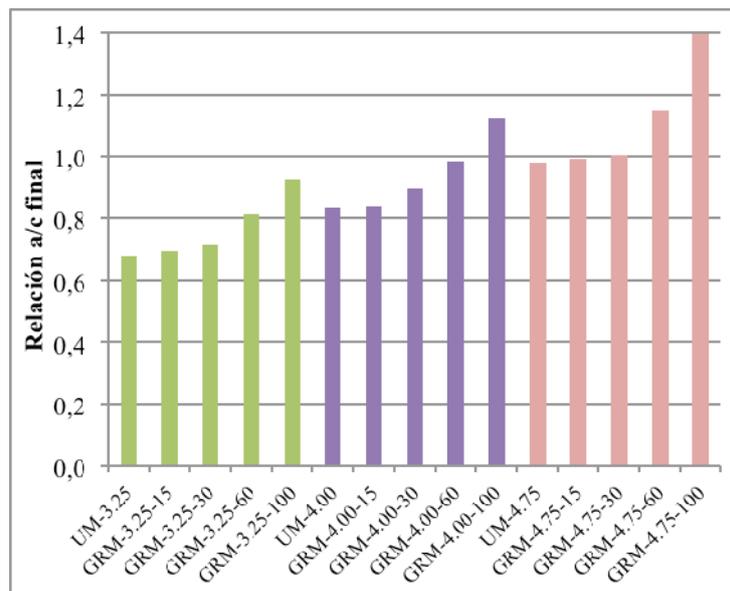


Figura 5. Relación a/c de los GRM.

Por otra parte, los resultados obtenidos de la densidad de los GRM estudiados se presentan en la Figura 6, observándose dos tendencias claramente establecidas, siendo para ambas de una relación inversa entre ellas:

1. La densidad de los GRM disminuye de forma inversa y proporcional al incremento del porcentaje de GS; siendo más notable para porcentajes de reemplazo menor (hasta el 60%).
2. El cambio o incremento de c/a, conduce a diferencias en la densidad de los GRM; cuando la relación c/a es mayor, la densidad disminuye. En este estudio, la relación c/a = 1:4 y 1:4.75 presentaron menor diferencia entre ellos, respecto a la c/a = 1:3.25.

En este estudio, la densidad propia de los GS la cual es menor que la del UA (ver Tabla 1), es la posible causante en los comportamientos anteriores, ya que al incrementar su porcentaje de uso ocasiona por consiguiente la disminución de la densidad de los GRM; para el caso de la relación c/a, los GS presentan menor densidad que el cemento (usualmente 3160 kg/m³) [12], por lo cual también ocasionan disminución en los GRM comparando con el UM. Investigación previa reporta tendencias similares en cuanto al uso de mayor contenido de GS, atribuyendo dicho comportamiento a la gravedad específica menor del mismo en comparación con el UA, agregando que el color del vidrio no presenta ningún efecto. Para reemplazos del 100% de GS y con relación c/a = 1:2.75 reportaron densidades del 97, 96, 95 y 97% respecto al mortero de control [23], comparando con nuestro trabajo se puede decir que la menor relación c/a utilizada, confirma la tendencia de c/a presentada en nuestro estudio. Caso contrario se presenta en otro estudio, donde la densidad de los GRM resultó mayor que la de UM; este comportamiento también fue atribuido a la propia densidad de los GS, que para este caso fue ocasionada por el tipo de vidrio más denso utilizado (CRT) [21]. Puesto que hay relación directa entre el incremento de densidad y el incremento de resistencia, es de esperarse que el efecto del

incremento de GS o de la relación c/a, pueda generar efectos adversos en el estado endurecidos de los GRM en estudio.

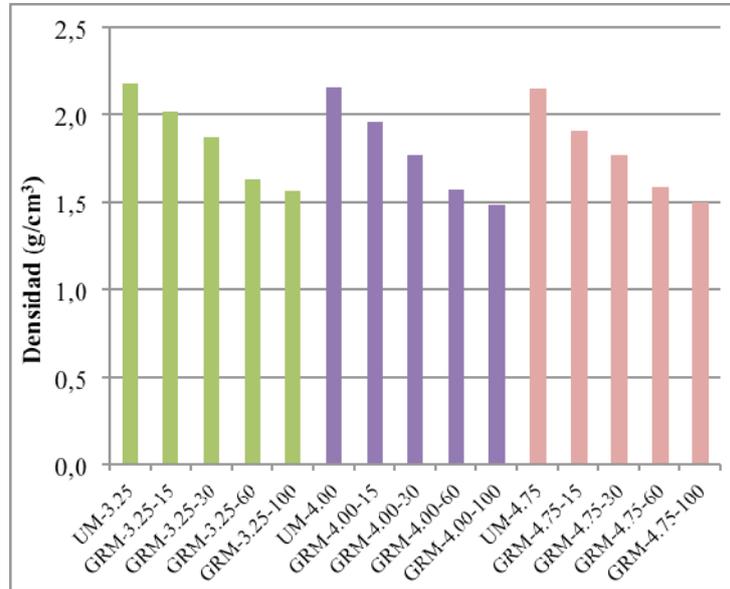


Figura 6. Densidad de los diferentes GRM estudiados.

En la Figura 7 se presentan los resultados del contenido de aire determinado en los GRM estudiados, de la gráfica es posible deducir estas observaciones:

1. El contenido de aire aumenta a medida que el porcentaje de GS en los GRM se incrementa; observándose notable diferencia de los GRM con porcentajes bajos (hasta el 60%) y muy similar cuando se sustituye entre 60 y 100% de GS.
2. Cuanto mayor es la relación c/a, los GRM presentan una tendencia de incremento del contenido de aire, siendo aplicable hasta con sustituciones del 30%, reemplazos del 60 y 100% reportan contenidos muy similares.

Los comportamientos anteriores, pueden ser atribuidos a la baja densidad aparente y mayor porcentaje de vacíos que presentan los GS con respecto a UA, tal como se reporta en trabajo previo [24]; esto, puede ser atribuido a la forma de las partículas, las cuales impiden una mejor compactación entre ellas dentro de la mezcla. En estudio anterior se reportan valores de entre 3 y 3.5% en GRM con vidrios de diferentes colores (marrón, verde, transparente y mixto) –con sustituciones de hasta el 75%–; para reemplazos del 100% el contenido de aire aumentó, acentuándose esta tendencia en las mezclas que incluían el vidrio transparente (5.9%). Estos comportamientos fueron atribuidos a la forma de las partículas de vidrio, las cuales presentaban bordes agudos y coeficiente de forma mayores, permitiendo que el aire quedara retenido en la superficie de las mismas de forma más fácil. En cuanto al mayor contenido de aire del vidrio transparente, se reportó que éstos contenían más micro fisuras en las partículas trituradas, las cuales pudieron haber afectado la envolvente o recubrimiento de los áridos, en específico para contenidos de reemplazo altos [23]. Comparando este trabajo previo con los resultados de la presente investigación, podemos mencionar que los menores contenidos de aire reportados,

podieron ser causa de la menor relación $c/a = 1:2.75$ utilizada, comparada con las de nuestro estudio: $c/a = 1:3.25$, $1:4$ y $1:4.75$; la cual permite corroborar la tendencia observada.

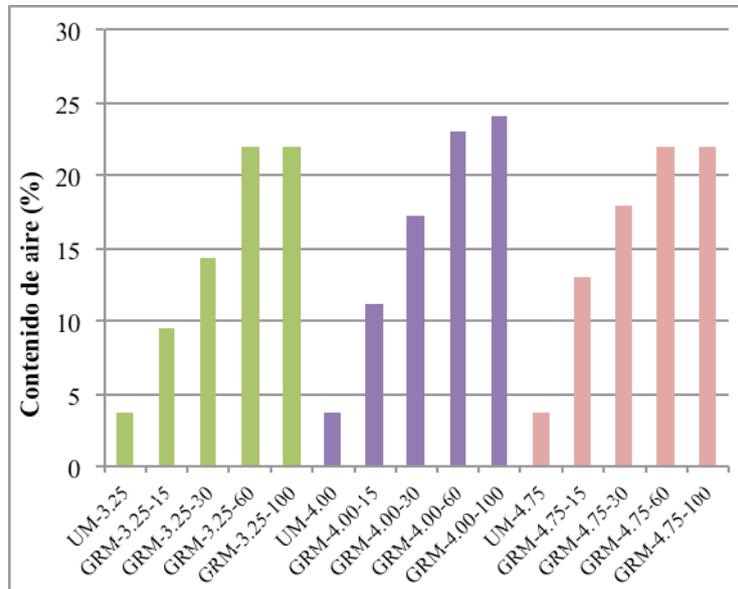


Figura 7. Contenido de aire para los diferentes GRM.

4. CONCLUSIONES

Con base a los resultados presentados, se pueden hacer mención de las siguientes conclusiones formuladas de la investigación experimental efectuada:

- El incremento en el porcentaje de reemplazo de GS por UA, provocará mayor demanda de agua para alcanzar la consistencia establecida por la normativa, siendo más notorio para reemplazos del 100%; y para el mismo reemplazo con una mayor relación c/a (en este estudio $c/a = 1:4.75$). Esto cuando se dosifica por peso.
- La densidad de los GRM disminuye de forma inversa y proporcional al aumento en el porcentaje de sustitución de GS; así mismo cuando aumenta la relación c/a . En este estudio las diferencias entre las c/a fueron menos distantes entre sí.
- El contenido de aire aumenta cuanto mayor sea el reemplazo de GS por UA, y mayor relación c/a sea utilizada en los GRM; en ambos casos de este estudio, sustituciones entre 60 y 100%, reportan comportamientos no significativos.
- Variaciones en los contenidos de GS en los GRM, como las diferentes relación c/a , repercutirán en las propiedades en estado fresco de los mismos; siendo más sensible su diferencia por el efecto del porcentaje de sustitución de GS, que de la propia c/a .

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al programa de becas de doctorado de CONACYT, a la ETSECCPB-UPC, al departamento CAII-EPSEB-UPC, a la FIM-UAS y al programa de Doctores Jóvenes de la UAS.

5. REFERENCIAS

- [1] Park S.-B. Lee B.-C. (2004). "Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 7, pp. 1145–1152.
- [2] Poon C. S. Ling T. C. B. (2010). "Use of Recycled Glass in Architectural Mortars.pdf," *J. Wuhan Univ. Technol.*, vol. 32, no. 17, pp. 231–235.
- [3] Ling T.-C. Poon C.-S. (2011). "Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with different particle sizes," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 5, pp. 2675–2684.
- [4] Pereira-de-Oliveira L. A. Castro-Gomes J. P. Santos P. M. S. (2012). "The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components," *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 197–203.
- [5] Xie Z. Xiang W. Xi Y. (2003). "ASR Potentials of Glass Aggregates in Water-Glass Activated Fly Ash and Portland Cement Mortars," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 67–74.
- [6] Ling T.-C. Poon C.-S. Kou S.-C. (2011). "Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 8, pp. 848–854.
- [7] Shao Y. Lefort T. Moras S. Rodriguez D. (2000). "Studies on concrete containing ground waste glass," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 91–100.
- [8] Karamberi A. Chaniotakis E. Papageorgiou D. Moutsatsou A. (2006). "Influence of glass cullet in cement pastes," *China Particuology*, vol. 4, no. 5, pp. 234–237.
- [9] Topçu I. B. Boğa A. R. Bilir T. (2008). "Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li_2CO_3 ," *Waste Manag.*, vol. 28, no. 5, pp. 878–84.
- [10] Karamberi A. Moutsatsou A. (2005). "Participation of coloured glass cullet in cementitious materials," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 2, pp. 319–327.
- [11] Du H. Tan K. H. (2013). "Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali-silica reaction and mitigation methods," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 118–126.
- [12] Matos A. M. Sousa-Coutinho J. (2012). "Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 205–215.
- [13] Ling T.-C. Poon C.-S. (2014). "Feasible use of large volumes of GGBS in 100% recycled glass architectural mortar," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 53, pp. 350–356.
- [14] Rodríguez-Mora O. (2003). *Morteros Guía General*. Madrid: p. 52.

- [15] Shi C. Wu Y. Riefler C. Wang H. (2005). "Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 5, pp. 987–993.
- [16] Khmiri A. Chaabouni M. Samet B. (2013). "Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 74–80.
- [17] Wang H.-Y. (2011). "The effect of the proportion of thin film transistor–liquid crystal display (TFT–LCD) optical waste glass as a partial substitute for cement in cement mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 791–797.
- [18] Ling T.-C. Poon C.-S. (2011). "Utilization of recycled glass derived from cathode ray tube glass as fine aggregate in cement mortar," *J. Hazard. Mater.*, vol. 192, no. 2, pp. 451–456.
- [19] Ling T.-C. Poon C.-S. (2012). "A comparative study on the feasible use of recycled beverage and CRT funnel glass as fine aggregate in cement mortar," *J. Clean. Prod.*, vol. 29–30, pp. 46–52.
- [20] Ling T.-C. Poon C.-S. (2012). "Effects of particle size of treated CRT funnel glass on properties of cement mortar," *Mater. Struct.*, vol. 46, no. 1–2, pp. 25–34.
- [21] Hui Z. Sun W. (2011). "Study of properties of mortar containing cathode ray tubes (CRT) glass as replacement for river sand fine aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 10, pp. 4059–4064.
- [22] Corinaldesi V. Gnappi G. Moriconi G. Montenero A. (2005). "Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars," *Waste Manag.*, vol. 25, no. 2, pp. 197–201.
- [23] Tan K. H. Du H. (2013). "Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 109–117.
- [24] Cabrera-Covarrubias F. G. Gómez-Soberón J. M. Almaral-Sánchez J. L. Corral-Higuera R. Navarro-Ezquerria A. Tous-Coll M. (2014). "Characterization of three recycled materials for alternative use of mortars," *Int. J. Sustain. Mater. Process. ECO-Efficient – IJSMPE*, vol. 1, no. 3, pp. 13–17.