

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en  
Ingeniería Ambiental

**REUTILIZACIÓN DE VIDRIO PLANO COMO AGREGADO FINO  
EN LA ELABORACIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO Y  
CONCRETOS**

David Andrés Vargas Castro

Cartago, Enero, 2015



**“Reutilización de vidrio plano como agregado fino en la elaboración de morteros de cemento y concretos”**

Informe presentado a la Escuela de Química del Tecnológico de Costa Rica como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental con el grado de Licenciatura

**Miembros del Tribunal**

---

**Ing. Macario Pino Gómez**  
**Director**

---

**Ing. Mauricio Araya Rodríguez**  
**Lector 1**

---

**M.Sc. Ing. Ana Lorena Arias Zúñiga**  
**Lectora 2**

---

**Dr. Ing. Luis Guillermo Romero Esquivel**  
**Coordinador COTRAFIG**

---

**Dra. Floria Roa Gutiérrez**  
**Directora Escuela de Química**

---

**M.Sc. Ing. Ana Lorena Arias Zúñiga**  
**Coordinadora Carrera de Ingeniería**  
**Ambiental**

## DEDICATORIA

### ANIMARSE A VOLAR

Y cuando se hizo grande, su padre le dijo: -Hijo mío, no todos nacen con alas. Y si bien es cierto que no tienes obligación de volar, opino que sería penoso que te limitaras a caminar teniendo las alas que el buen Dios te ha dado. - Pero yo no sé volar – contestó el hijo. - Ven – dijo el padre. Lo tomó de la mano y caminando lo llevó al borde del abismo en la montaña. - Ves hijo, este es el vacío. Cuando quieras podrás volar. Sólo debes pararte aquí, respirar profundo, y saltar al abismo. Una vez en el aire extenderás las alas y volarás... El hijo dudó. -¿Y si me caigo? -Aunque te caigas no morirás, sólo algunos machucos que harán más fuerte para el siguiente intento –contestó el padre. El hijo volvió al pueblo, a sus amigos, a sus pares, a sus compañeros con los que había caminado toda su vida. Los más pequeños de mente dijeron: -¿Estás loco? -¿Para qué? - Tu padre está delirando... -¿Qué vas a buscar volando? -¿Por qué no te dejas de pavadas? -Y además, ¿quién necesita? Los más lúcidos también sentían miedo: -¿Será cierto? -¿No será peligroso? -¿Por qué no empiezas despacio? -En todo caso, prueba tirarte desde una escalera. -...O desde la copa de un árbol, pero... ¿desde la cima? El joven escuchó el consejo de quienes lo querían. Subió a la copa de un árbol y con coraje saltó... Desplegó sus alas. Las agitó en el aire con todas sus fuerzas... pero igual... se precipitó a tierra... Con un gran chichón en la frente se cruzó con su padre: -¡Me mentiste! No puedo volar. Probé, y ¡mira el golpe que me di! No soy como tú. Mis alas son de adorno... – lloriqueó. -Hijo mío – dijo el padre – Para volar hay que crear el espacio de aire libre necesario para que las alas se desplieguen. Es como tirarse en un paracaídas... necesitas cierta altura antes de saltar. Para aprender a volar siempre hay que empezar corriendo un riesgo. Si uno no quiere correr riesgos, lo mejor será resignarse y seguir caminando como siempre.

Jorge Bucay

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer en primer lugar a mi mamá quien me ha apoyado a lo largo de toda mi vida. A mi papá quien también ha sido un apoyo importante, a Reychel Sánchez Martínez quien me ha motivado a esforzarme en todo momento; a Luis Diego Ríos Reyes, Alonso Alegre Bravo y Alejandro Montero Merino quienes han sido unos grandes compañeros.

Se le agradece a la empresa Extralum por proporcionar los vidrios planos, materia prima con la cual se realizó el proyecto, al profesor Mauricio Araya Rodríguez por ser guía en este proyecto y un agradecimiento muy especial a Heiner Navarro Mena por estar siempre presente y su ayuda para realizar todas las mezclas y fallas, su aporte fue trascendental. Además agradecer a todo el personal del CIVCO y su apoyo para poder realizar este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDOS

Resumen .....	5
Abstract.....	6
1 Introducción.....	7
1.1 Objetivos .....	9
1.1.1 Objetivo general .....	9
1.1.2 Objetivos específicos.....	9
2 Marco de referencia.....	10
2.1 Morteros y concretos .....	10
2.1.1 Morteros .....	12
2.1.2 Concreto .....	13
2.2 La utilización del vidrio en la preparación de concretos .....	21
2.3 Seguridad laboral al manejar el vidrio.....	25
3 Metodología.....	30
3.1 Molienda del vidrio.....	30
3.2 Preparación de las mezclas .....	31
3.3 Pruebas de resistencia a la compresión.....	33
3.4 Seguridad laboral de la manipulación y uso del vidrio.....	34
3.5 Estimación de costos.....	35
4 Análisis de los resultados obtenidos.....	37
4.1 Comparación de resistencias.....	37
4.1.1 Los morteros .....	37
4.1.2 Los concretos .....	39
4.2 Aspectos de seguridad laboral .....	46
4.3 Comparación económica de los costos de los concretos .....	48
5 Conclusiones.....	53
6 Recomendaciones .....	56
7 Referencias .....	59
Anexos .....	64
Anexo 1: Ficha técnica del cemento Cemex Sansón UG de Alto Desempeño .....	65
Anexo 2: Datos de seguridad.....	67

Sílice .....	67
Cemento.....	68
Anexo 3: Datos técnicos de la trituradora de vidrio a utilizar .....	70
Anexo 4: El vidrio plano en Costa Rica .....	71
Apéndice.....	74
Apéndice 1: Datos experimentales .....	75

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Comportamiento de las partículas del cemento cuando entran en contacto con el agua durante sus tres etapas.....	11
Figura 2.2. Variaciones de las relaciones A/C de concreto con la resistencia a la compresión. ....	15
Figura 2.3. Resistencia del concreto en relación a la edad y al curado. ....	18
Figura 2.4. Usos del vidrio desechado de acuerdo al tamaño al cual se lleve.....	22
Figura 2.5. Góndola en la que se depositan vidrios de desecho en la empresa Extralum ....	25
Figura 2.6. Vidrios molidos y tamizados con la malla #4. Figura A es el vidrio reflectivo. Figura B es el vidrio espejo. Figura C es el vidrio incoloro. ....	26
Figura 3.1. Máquina de Abrasión de los Ángeles ubicada en el CIVCO .....	30
Figura 3.2. A. Moldes utilizados para las muestras de mortero. B. Los moldes de los morteros quedan tapados en la Cámara Húmeda durante las primeras 24 horas. ....	31
Figura 3.3. Cubos de morteros. A. Rotulación de las muestras. B. Cámara Húmeda donde permanecen los morteros. ....	32
Figura 3.4. A. Moldes utilizados para las mezclas de concreto. B. Concreto recién hecho y moldeado. C. Cilindros de concreto rotulados y colocados en la Cámara Húmeda.....	32
Figura 3.5. Máquinas utilizadas para medir resistencia a la compresión del laboratorio del CIVCO. A. Versa Tester. B. Máquina de Ensayos Controls 3000 kN, modelo 50-C5744..	33
Figura 3.6. Ejemplificación del EPP utilizado en diferentes etapas de la realización del proyecto .....	34
Figura 4.1. Valores de las resistencias a la compresión ( $\text{kg/cm}^2$ ) obtenidas para las mezclas de morteros. ....	37
Figura 4.2. Muestras de morteros después de su fallado.....	39
Figura 4.3. Valores de la resistencia a la compresión ( $\text{kg/cm}^2$ ) de los cilindros de concreto. ....	40
Figura 4.4. Variación de la resistencia a la compresión con la relación A/C propuesta por Kostmaka <i>et al</i> (2004). ....	41

Figura 4.5. Relación del comportamiento de la resistencia a la compresión obtenida con respecto al comportamiento mencionado por Araya (2013). A representa los valores de las mezclas de V-E; B representa a V-I; C representa a V-R; D representa los valores Patrón.	43
Figura 4.6. Resultado de una de las pruebas de revenimiento por medio del cono de Abrams. ....	44
Figura 4.7. Máquina de Abrasión de los Ángeles abierta recién terminado un tiraje de molienda del vidrio.....	47

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Aplicaciones de los distintos tipos de cemento. ....	12
Tabla 2.2. Desarrollo porcentual de resistencia a la compresión en el tiempo.....	14
Tabla 2.3. Proporciones de uso común de los agregados y cemento para realizar muestras de concreto y sus resistencias a la compresión esperadas. ....	16
Tabla 2.4. Clasificación de la consistencia de una mezcla en función del revenimiento obtenido. ....	20
Tabla 2.5. Revenimientos recomendados para distintos tipos de construcción.....	21
Tabla 2.6. Resultados obtenidos de otros autores en el estudio del vidrio como sustituto parcial del agregado fino. ....	25
Tabla 4.1. Valores de revenimiento obtenidos para las mezclas de concreto. ....	40
Tabla 4.2. Costos fijos para este proceso de molienda del vidrio plano.....	48
Tabla 4.3. Costo de la unidad de los materiales necesarios para realizar mezclas de concreto. ....	49
Tabla 4.4. Cantidades para obtener un metro cúbico de concreto con vidrio para la proporción de 50% VD y 50% AF .....	50
Tabla 4.5. Cantidades para obtener un metro cúbico de concreto con vidrio para la proporción de 20% VD y 80% AF. ....	50
Tabla 4.6. Costo de realizar un metro cúbico de concreto dependiendo de la composición del AF. ....	51

## LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

Nombre	Sigla o acrónimo
AF	Agregado fino
AG	Agregado grueso
American Society for Testing and Materials	ASTM
Alcali-Silica Reaction	ASR
Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción	CIVCO
Equipo de Protección Especial	EPP
Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto	ICCYC
Ley N°8839 para la Gestión Integral de Residuos Sólidos	Ley GIRS
National Institute for Occupational Safety and Health	NIOSH
P	Mezclas Patrón
Relación Agua/Cemento	A/C
Resistencia a la compresión	$f_c$
VD	Vidrio desechado
V-E	Mezclas con Vidrio Espejo
V-I	Mezclas con Vidrio Incoloro de 6 mm
V-R	Mezclas con Vidrio Reflectivo
Vicesa	Vidriera Centroamericana S.A.



## RESUMEN

La utilización de vidrios planos en el sector de la Construcción se ha venido incrementando, lo que a su vez ha generado un aumento de sus residuos. Los mismos terminan mayormente en rellenos sanitarios a pesar de que esta no es la opción de disposición de estos residuos más óptima. Por lo tanto, se propone como objetivo de este proyecto evaluar la reutilización de los residuos del vidrio plano como sustituto parcial del agregado fino para la realización de morteros de cemento y de concretos; pues el vidrio por sus características es potencialmente reutilizable en la construcción. Para este proyecto, se evaluaron 3 tipos de vidrios planos (reflectivo [V-R], espejo [V-E] e incoloro de 6 mm [V-I]) y se realizaron 4 mezclas de morteros y 4 de concretos con una proporción definida de arena y vidrio molido como parte de los agregados finos, se utilizó un tipo de vidrio distinto en cada mezcla y una mezcla patrón [P] para cada caso. Posteriormente, se efectuaron pruebas de resistencia a la compresión a diferentes edades. En los morteros las resistencias obtenidas a la edad de 28 días para las muestras con vidrios planos fueron mayores en comparación con las muestras patrón (V-E con un valor de  $462 \text{ kg/cm}^2$ , V-R de  $440 \text{ kg/cm}^2$ , V-I de  $409 \text{ kg/cm}^2$  y P con  $390 \text{ kg/cm}^2$ ); por lo que es posible la realización de este tipo de morteros. Además como valor agregado se generan efectos decorativos. Para los concretos la resistencia a la compresión tampoco se ve afectada por la presencia del vidrio pues los valores obtenidos de las mezclas a la edad de 28 días se mantuvieron similares entre todos los tipos de mezclas (V-E tuvo una resistencia de  $307 \text{ kg/cm}^2$ , V-R de  $308 \text{ kg/cm}^2$ , V-I de  $313 \text{ kg/cm}^2$  y el Patrón de  $311 \text{ kg/cm}^2$ ). Con respecto al costo de realizar concreto con o sin vidrio como agregado fino se observa que el costo se mantiene constante para todas las mezclas, el concreto con cada tipo de vidrio plano fue menor en aproximadamente 1% al costo de la mezcla Patrón.

**Palabras claves:** cemento, concreto, mortero, vidrio plano, reutilización de residuos.

## ABSTRACT

There has been an increase in use of flat glass in the Construction sector, which generates as a consequence a rise in the amount of its waste, ending in their majority in landfills even though this is not the most optimal disposal of these residues. Therefore, it is proposed as objective of this project to evaluate the re-use flat glass waste as a partial replacement of the fine aggregate for making cement mortar and concrete; due the nature of the glass it is potentially reusable in the construction sector. For this investigation, three types of flat glasses were evaluated (reflective glass [V-R], mirror glass [V-E] and 6 mm clear glass[V-I]) in which 4 mixtures were performed for mortars and other 4 for concretes in a defined proportion of sand and ground glass as fine aggregate, each type of flat glass was used in a mixture and also a standard [P]. Subsequently, tests of their resistance to compression at different ages were made. In the mortar, the resistances obtained at age of 28 days in the samples with glasses were higher compared with the standards samples (V-E of 462 kg/cm<sup>2</sup>, V-R of 440 kg/cm<sup>2</sup>, V-I of 409 kg/cm<sup>2</sup> y P of 390 kg/cm<sup>2</sup>); making possible the realization of these types of mortars and also it makes some decorative effects. In concretes, the resistance to compression was not affected with the presence of flat glass and remained similar among all the mixtures samples (V-E of 307 kg/cm<sup>2</sup>, V-R of 308 kg/cm<sup>2</sup>, V-I of 313 kg/cm<sup>2</sup> y el P of 311 kg/cm<sup>2</sup>). A comparison of the cost of making concrete with flat glass as fine aggregate and the standard concrete was made, as a result of this comparison the mixtures cost is similar in all the cases, but the concrete with flat glass can cost approximately 1% less than the standard concrete.

**Key words:** cement, concrete, mortar, flat glass, reuse of solid waste.

# 1 INTRODUCCIÓN

En el sector de la construcción, el uso del vidrio plano ha venido en aumento por las ventajas que ofrece tanto en estética como en iluminación y otros factores como su apariencia transparente y liviana y por la seguridad y versatilidad de los productos del vidrio. Un aumento en el consumo de este material implica a su vez un aumento en la cantidad de residuos generados de los mismos vidrios. Además, no todos los tipos de vidrios planos son reciclables, ya que son fabricados con mezclas de varios metales, plásticos o resinas, presentan impurezas o son mezclados en muchos colores distintos lo que encarece costos de reciclaje (Shi & Zheng, 2007).

No obstante, la Ley N°8839 para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (Ministerio de Salud, 2010), conocida como GIRS, obliga a las entidades productoras de residuos sólidos realizar el manejo y disposición adecuado de los mismos generados por sus actividades, tanto industriales como comerciales.

Tal es el caso de la empresa Extralum, una de las empresas más grandes que trabajan el vidrio plano en Costa Rica. Esta empresa se dedica a la manufactura, transformación y comercialización del vidrio plano y actualmente manejan más de 12 tipos de vidrios planos. Anteriormente todos los residuos generados de los procesos en esta empresa eran enviados a un relleno sanitario, sin embargo con la entrada en vigencia de la Ley GIRS (N° 8839) la Vidriera Centroamericana S.A. (Vicesa) viene recibiendo residuos de algunos tipos de vidrio generados, para incorporarlos como materia prima en sus procesos industriales. A pesar de la iniciativa, aún quedan varios tipos de vidrio que no pueden ser reciclados por lo que son llevadas aproximadamente 20 toneladas mensuales al relleno sanitario (J. Varela, comunicación personal, Marzo 2012).

Por otra parte, en el sector de la construcción el concreto es el material más usado en todo el mundo y la demanda en su producción también va en aumento, lo que implica la explotación y utilización de productos naturales para la realización de los mismos, como por ejemplo las arenas utilizadas como agregado fino (Federico & Chidiac, 2009). Además, el proceso para la realización del cemento requiere de mucha energía (muchas veces de fuentes no renovables) lo que genera la emisión de gases que de no ser tratados contribuyen

al aumento del efecto invernadero. Por lo que este sector busca continuamente oportunidades de mejora y por ello se ha empezado a estudiar el uso de materiales alternativos en las mezclas, entre los que incluye los residuos de los distintos tipos de vidrio (Vijayakumar, Vishaliny, & Govindarajulu, 2013).

Ante estas dos problemáticas se hace necesario buscar alternativas a los residuos de vidrio plano y así evitar su descarga en rellenos sanitarios, ya que esta opción no ofrece un manejo amigable con el ambiente debido a no biodegradabilidad del vidrio, lo que incurre también en disminución de la vida útil del relleno sanitario (Jani & Hogland, 2014). Por lo que se propone en el presente proyecto la reutilización de estos desechos dentro de la industria constructora como parte de los agregados finos para la elaboración de morteros y concretos.

Según el mismo autor el uso del vidrio plano debidamente preparado para ser utilizado como agregado en la industria del cemento y concreto puede generar una solución al impacto negativo en el ambiente proveniente de los vidrios desechados, pues la composición química y las propiedades físicas del vidrio son similares a las de la arena.

El reúso del vidrio como parte de los agregados para la realización de concretos se ha venido estudiando a nivel mundial, tanto como sustituto parcial del agregado fino como del grueso e inclusive como sustituto parcial del cemento; la sustitución del cemento y del agregado fino son las que mejores resultados han generado. Para la realización de este proyecto se escoge evaluar el vidrio plano desechado como parte de los agregados finos, por las similitudes en la composición del vidrio y de las arenas utilizadas para la realización de concretos.

Se trabajó con tres tipos de vidrio plano: incoloro de 6 mm, reflectivo y espejo. Éstos fueron molidos y tamizados para realizar mezclas de mortero y concreto con cada uno de los vidrios como agregado fino. A las mezclas realizadas se les realizaron pruebas de resistencia compresión a diferentes edades para evaluar el comportamiento de esta característica. Además, se realizó una comparación de los costos de producir un metro cúbico de concreto normal, con respecto a concretos con vidrio plano como agregado fino.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo general**

Evaluar el uso del vidrio plano desechado como parte del agregado fino para la realización de concretos y morteros de cemento para ser utilizado en el sector de la construcción.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Determinar el comportamiento de la resistencia a la compresión de las mezclas de morteros y concretos con vidrio plano como parte del agregado fino.
- Analizar qué aspectos de Seguridad Laboral son necesarios tomar en cuenta para disminuir potenciales riesgos a la salud e integridad física debido al uso y manipulación de los residuos de vidrio.
- Realizar una comparación del costo de producir un metro cúbico de concreto con agregado de vidrio plano, con respecto al concreto normal.

## 2 MARCO DE REFERENCIA

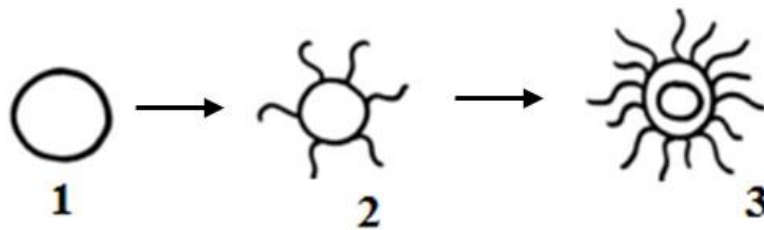
### 2.1 MORTEROS Y CONCRETOS

El Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto (2004), conocido por sus siglas como ICCYC, definió el cemento como “un conglomerante hidráulico, esto es, productos que mezclados con agua forman pastas que fraguan y endurece, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables”. El cemento puede tener diversas composiciones químicas según sea el uso que se le vaya a dar y de las especificaciones que debe cumplir. No obstante, sí existe una base en la composición química del cemento independientemente de cuál sea su clasificación, esta base está compuesta principalmente por los minerales calcáreos, de sílice y la alúmina (Ingianna, Pérez, & Torrentes, 2002). La combinación de los minerales calcáreos, de sílice y alúmina con el calor generan un producto llamado Clinker, y éste combinado con yeso es el conocido cemento Portland.

Los minerales calcáreos se obtienen del óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) o en rocas que presenten más de un 75% de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), la sílice se obtiene de minerales llamados silicatos, y la alúmina (que es óxido de aluminio III) proviene de los aluminatos que se encuentran en las arcillas. El yeso (sulfato de calcio anhidro que se agrega en su forma hidratada,  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , en el proceso) se añade con el fin de controlar el tiempo de fraguado del cemento. También están presentes el hierro, el sodio y el potasio que vienen dentro de las arcillas agregadas (Araya, 2012).

La combinación de éstos genera otros compuestos en forma anhidra que si entran en contacto con el agua se produce una reacción de hidratación. Araya (2012) menciona que este proceso tiene tres etapas. En la **primera etapa** se forma el hidróxido de calcio y de etringita (sulfoaluminato de calcio) a temperatura ambiente. En la **segunda etapa** se da la formación de pequeñísimos cristales con tubosidades de silicato de calcio hidratado, llamados tobermorita. Éstos en conjunto con la etringita crecen en forma de tubificación y se continúan subdividiendo de ese modo, lo que forma entrecruzamientos de microcristales fibrosos dando lugar a la estructura básica. Finalmente la **tercera etapa** se extiende hasta la hidratación total y los poros existentes se llenan con los productos de la hidratación que se producen en cada caso y, como consecuencia, se aumenta la compacidad de la estructura.

Para que estas tres etapas se realicen exitosamente es necesario que la mezcla se mantenga hidratada. En la Figura 2.1 se puede apreciar cómo van cambiando las partículas del cemento con el tiempo y como se van formando las tubosidades en la partícula de cemento anhidro. Esas mismas tubosidades que se aprecian en la Figura 2.1 son las que al entrelazarse entre sí dan lugar a la estructura.



**Figura 2.1. Comportamiento de las partículas del cemento cuando entran en contacto con el agua durante sus tres etapas.**

Tomado de (Araya, 2012)

Cuando se le agrega agua al cemento se forma una pasta y el paso del estado fluido al estado rígido de esta pasta se conoce como fraguado. Durante el fraguado los componentes que reaccionan primero son el Aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y el Silicato tricálcico ( $C_3S$ ). El yeso sirve para retardar el fraguado del  $C_3A$ , retrasando la formación de hidratos de aluminato de calcio y permitiendo que el fraguado del  $C_3S$  se realice primero, el cual genera una ganancia progresiva de resistencia. Si el fraguado del  $C_3A$  no se retrasa con ayuda del yeso se pueden ocasionar agrietamientos y debilidad al ataque de sulfatos (Araya, 2012).

Existen dos tipos de mezclas que se realizan con el cemento: el concreto y el mortero. Entre estas dos mezclas la diferencia radica en sus componentes principales ya que el mortero no posee agregado grueso mientras que el concreto sí, lo que implica variaciones en sus características y en sus usos. Asimismo, existen diferentes tipos de cemento que varían dependiendo de cuál sea uso final. En la Tabla 2.1 se detallan varias aplicaciones según sea el cemento a utilizar.

**Tabla 2.1. Aplicaciones de los distintos tipos de cemento.**

<b>Tipo de cemento</b>	<b>Aplicaciones en concretos y morteros</b>
I	Concretos de usos generales
I-AR	Concretos de alta resistencia inicial
MP-AR	Concretos de alta resistencia inicial con moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación
MP	Concretos y morteros de uso general que no demanden alta resistencia inicial y con resistencia a los sulfatos, agua de mar, y de bajo calor de hidratación
GU, MS	Concretos y morteros de uso general que no demanden alta resistencia inicial, concretos de uso masivo, con requerimientos de alta resistencia a los sulfatos, o al agua de mar y de bajo calor de hidratación
Albañilería	No se recomienda para la fabricación de concretos de uso estructural. Se recomienda solo para fabricación de morteros

Fuente: (Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto, 2004)

### **2.1.1 Morteros**

El mortero es una mezcla constituida por el ligante o conglomerante (cemento), áridos finos o aglomerados (arena) y agua; y en algunos casos se le puede agregar aditivos químicos y adiciones que le otorgan características especiales. La utilidad de la arena es la de brindar consistencia a la mezcla y evitar que se produzcan fisuras cuando la misma se endurezca. Por su parte el agua tiene la funcionalidad de realizar la pasta y tiene que ser añadida en una cantidad ideal ya que si se agrega en menor cantidad generaría una hidratación incompleta y en caso contrario diluiría la mezcla (Araya, 2012). La relación existente entre el agua y el cemento se comentará en los apartados 2.1.2.1 y 2.1.2.2.

Para la realización de los morteros se puede utilizar tanto el cemento Tipo I (el Portland) como un cemento especial para albañilería, dependiendo del uso que se le quiera dar y de las características que se busquen de los morteros.

A la hora de preparar un mortero, la dosificación con que se va a realizar se expresa como una relación entre la cantidad de cemento que se agrega y la cantidad de arena que se va a agregar. Por ejemplo, si se da una proporción 1:2 significaría que se debe agregar dos medidas de arena por cada medida de cemento.

Los morteros tienen 5 propiedades principales: la trabajabilidad, la retención del agua, la adherencia, la resistencia y la durabilidad. Por **trabajabilidad** se refiere a que el mortero tenga una consistencia adecuada que facilite las tareas de mezclado de los componentes y la



aplicación de la mezcla en la obra, así como su transporte y su acabado; también se refiere a que la pasta de la mezcla no sea pesada para evitar posibles desprendimientos durante su colocación o después de la misma. La **retención y contenido del agua** indica que la mezcla del mortero debe tener una cantidad de agua que permita la fluidez de la mezcla y una hidratación adecuada de las partículas del cemento, además que el agua no se pierda por evaporación o por absorción de los mampuestos. La **adherencia** es la capacidad del mortero “para resistir tensiones normales o tangenciales a la superficie de la interfase mortero-base”, es decir, que pueda soportar los mampuestos sin deformarse antes de endurecerse. La **resistencia** es la capacidad de resistir fuerzas de compresión, de tensión y de impacto. Finalmente la **durabilidad** se refiere a que el mortero debe resistir cambios en el ambiente (de temperatura, lluvias excesivas), o ataque químicos como el de sulfatos, además de desgastes. (Araya, 1998; Cátedra de Construcción, 2002).

### 2.1.2 Concreto

El concreto es el material de construcción más utilizado debido a su versatilidad, durabilidad y economía. Básicamente consiste en dos componentes: el agregado y la pasta. La pasta se forma con el cemento y agua, y tiene la función de unir los agregados, que son una mezcla de piedra y arena, en una masa similar a una roca (Trifunovic, s.f.). Así entonces, el cemento es el que produce la reacción química que permite el endurecimiento de la pasta, formando el concreto, y los agregados permiten mejorar la trabajabilidad, la resistencia y la disminución de costos (Williams, 2010).

En las mezclas de concreto es importante recalcar que el cemento solo debe representar entre el 10 y el 20% del volumen final de la mezcla, mientras que los agregados fino y grueso tienen un porcentaje en el volumen de 65 a 75%; los cuales influyen de manera significativa en las propiedades y características que tenga la mezcla tanto en su estado fresco como endurecido (Araya, 2012). Asimismo tienen una atribución importante en el tema económico pues entre más agregado la mezcla puede resultar más económica; siempre y cuando las proporciones sean adecuadas para que exista un buen pegue con la pasta y una buena trabajabilidad (Kostmaka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

### 2.1.2.1 Resistencia del concreto

Kotsmaka et al (2004) definen a la resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) como “la medida máxima de resistencia a carga axial de especímenes de concreto”, es decir es la propiedad del concreto de resistir cargas aplicadas. Esta medida se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) y también en megapascuales (MPa).

La resistencia a la compresión crece continuamente con el tiempo, sin embargo los reglamentos establecen que debe darse su valor a una edad de 28 días (Araya, 2012). El aumento paulatino de la resistencia con el tiempo suele darse siguiendo un patrón de relaciones, las cuales en los últimos años han cambiado debido a la incorporación de algunos aditivos y puzolanas en la fabricación del cemento (Tabla 2.2). Esta nueva composición del cemento genera un desarrollo más lento de la resistencia del concreto, principalmente en las 3 primeras semanas, pero al mismo tiempo este factor ayuda a obtener concretos más resistentes, densos y durables a mediano y largo plazo (Araya, 2013).

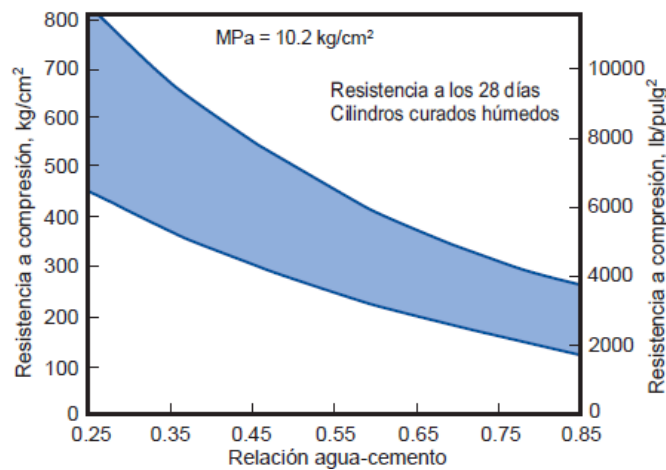
En la Tabla 2.2 se aprecian los valores porcentuales del crecimiento de la resistencia a la compresión del concreto. Araya (2013) explica que los análisis realizados en laboratorio durante los años 2012 y 2013 han dado como resultado los valores porcentuales obtenidos aproximados del comportamiento del concreto durante su fase de crecimiento. Estos valores porcentuales tienen un valor importante ya que en el campo son muy usados para evaluar si el concreto realizado en la obra va a lograr cumplir con la resistencia a la compresión deseada; pues como no siempre es posible esperar la comprobación del concreto realizado por los laboratorios acreditados a la edad de 28 días, es necesario dar proyecciones aproximadas del comportamiento del concreto utilizando estos valores.

**Tabla 2.2. Desarrollo porcentual de resistencia a la compresión en el tiempo.**

<b>Edad (días)</b>	<b>Resistencia (2006 – 2011)</b>	<b>Resistencia (2012-2013)</b>
3	55%	30%
7	70%	50%
14	85%	70%
28	100%	100%
56	---	125%
365	125%	---

Tomado de: (Araya, 2013)

La resistencia a la compresión depende de la relación agua/cemento (A/C), de cuanto ha progresado la hidratación, del curado, de las condiciones ambientales y de la edad del concreto (Williams, 2010). No obstante, de esos factores el que más influye es la relación A/C ya que entre más agua se le agrega a la mezcla menor va a ser la resistencia obtenida (Figura 2.2); esta correlación se debe a que cuando la pasta se endurece quedan poros llenos de agua y de aire que no presentan resistencia, por lo que si hay gran cantidad de poros implicaría la existencia de muchos de estos puntos disminuyendo el valor de resistencia a la compresión, mientras que si hay pocos poros la resistencia tendería a aumentar (Kostmaka et al, 2004).



**Figura 2.2. Variaciones de las relaciones A/C de concreto con la resistencia a la compresión.**

Tomado de: (Kostmaka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

Asimismo las proporciones de los componentes con que se realicen las mezclas son importantes, y dependiendo del diseño de cada mezcla y por ende de la cantidad de agregados que se añadan se pueden esperar distintas resistencias a la compresión a la edad de 28 días, tal y como se observa en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3. Proporciones de uso común de los agregados y cemento para realizar muestras de concreto y sus resistencias a la compresión esperadas.**

Proporción por volumen tomando al cemento como unidad			Cantidad de materiales para 1 m <sup>3</sup> de concreto			Resistencia esperada a 28 días de edad
Cemento	AF	AG	Sacos	m <sup>3</sup> AF	m <sup>3</sup> AG	kg/cm <sup>2</sup>
1	3,00	6,00	4,400	0,486	0,972	105
1	2,50	5,00	5,130	0,472	0,944	140
1	2,00	4,00	6,150	0,456	0,912	195
1	1,50	3,00	7,700	0,427	0,854	245
1	1,00	2,00	10,250	0,378	0,756	295

Fuente: Araya, 2013.

Según el Código Sísmico de Costa Rica 2010 (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2011) el concreto cuya finalidad sea estructural debe tener una resistencia a la compresión de mínimo 210 kg/cm<sup>2</sup>.

A parte de la resistencia, el concreto debe cumplir con otra propiedad importante: la durabilidad. Esta propiedad Kostmaka et al (2004) la definen como: “la habilidad del concreto en resistir a la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades de ingeniería”. Cada tipo de cemento va a generar un concreto con durabilidad diferente que va a depender de la exposición al ambiente a que esté sometido y de cuáles son las propiedades que quieren en ese concreto. Asimismo, la proporción de los componentes del concreto y de las prácticas realizadas en la mezcla cuando esté fresca y endurecida van a influir en la durabilidad del concreto y en su vida útil.

### **2.1.2.2 El agua**

Como se ha mencionado uno de los componentes más importantes a la hora de realizar mezclas de concreto y de morteros es el agua. Dentro de las funciones que tiene el agua en el concreto es la de hidratar el cemento y dar inicio a una serie de reacciones químicas donde se combinan cemento-agua formando una pasta; este proceso es conocido como hidratación del cemento y tiene la función de ligar a todos los agregados en forma permanente una vez que ha fraguado y se ha endurecido. Asimismo, el agua ayuda a darle trabajabilidad a la mezcla cuando está recién mezclada para poder ser transportada y aplicada en la construcción.

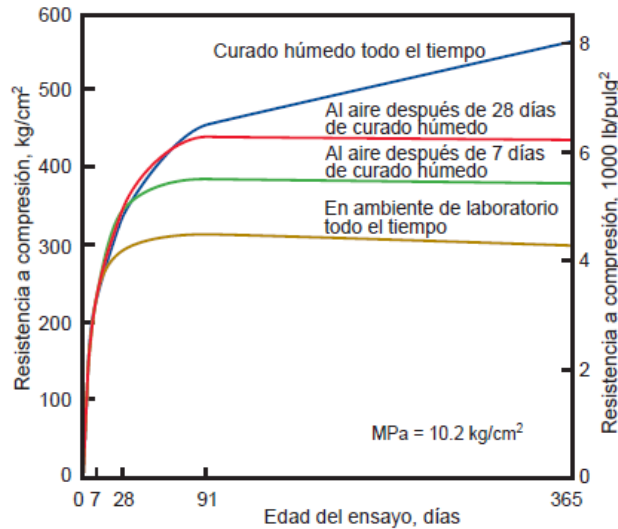
El ICCYC (2009) establece qué tipos de agua deben rechazarse, ya que de utilizarse agua de mala calidad se pueden acarrear ciertas consecuencias negativas para el concreto como: afectaciones en el tiempo de fraguado y en la resistencia del concreto, puede generar manchas, corrosión del acero con que se refuerzan las estructuras, disminuir la durabilidad del concreto, entre otras cosas.

Con respecto a la relación A/C es primordial saber qué relación se va a usar y por qué se va a utilizar esa relación, es decir conocer cuáles son las características finales requeridas del concreto. Son varios los factores que dependen de esta relación como la resistencia a la compresión cuando el concreto esté endurecido, la trabajabilidad y la consistencia cuando el concreto esté fresco (Kostmaka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). También está el impacto económico en la obra, una relación A/C baja implica una mayor cantidad de cemento, lo que puede subir los costos de la obra pues el cemento es el material más caro; por lo tanto es necesario saber cuáles son las resistencias requeridas para cada parte de la obra y manejar así las cantidades de agua y cemento adecuadas. (Williams, 2010).

Según Araya (2012) para hidratar el cemento se necesita un 25% de agua, o sea una relación agua/cemento de 0,25. La trabajabilidad se logra elevando esa relación hasta valores entre 0,4 y 0,8; sin embargo, la relación A/C usualmente tiene un valor entre 0,5 y 0,6.

El agua también es necesaria para el curado del concreto y el endurecimiento del mismo. Por curado se entiende como los procesos que garanticen el agua de hidratación óptima en la mezcla, de manera que se evite la pérdida de agua.

El concreto tiene que mantener su humedad para que la hidratación y el aumento de la resistencia no se vean interrumpidos. Como se ha mencionado el concreto seguirá adquiriendo resistencia con la edad y el tiempo de curado puede influenciar en ese valor (Figura 2.3).



**Figura 2.3. Resistencia del concreto en relación a la edad y al curado.**

Fuente: (Kostmaka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

El agua va a ser entonces esencial para la activación de las reacciones químicas del cemento, va a ser responsable de la trabajabilidad lograda en el concreto, de la consistencia, que el concreto se endurezca conforme avanza el tiempo y de la resistencia final que tenga el concreto.

### 2.1.2.3 Los agregados

Para la elaboración del concreto los agregados también tienen un rol de gran importancia, pues ocupan un gran porcentaje del volumen de la mezcla (entre el 65 y el 75%); lo que tiene influencia en aspectos como el económico (pueden abaratar costos), además en propiedades de la mezclas tanto en estado fresco como endurecido, tales como la trabajabilidad, colocación, etc (Cordero M. , 2004). Debido al gran volumen que representan en la mezcla sus propiedades son de gran importancia para la calidad de los concretos, por lo que es importante conocerlas previo a la realización de los diseños y de realizar las mezclas; entre los aspectos físicos que se deben conocer están: la granulometría y contenido de finos, la gravedad específica y absorción, los pesos unitarios de los agregados, la abrasión, la sanidad, la angularidad del agregado fino y la forma y textura de todos los agregados (Cordero M. , 2004).

Los agregados que se utilicen en el concreto son un material que teniendo una resistencia propia no van a perturbar ni afectar las propiedades y características del concreto y van a garantizar una adherencia al cemento (Araya, 1998). Además, deben estar constituidos por

partículas duras, con formas preferiblemente rugosas o granuladas, tienen que ser inertes y no deben ser reactivas con los álcalis del cemento, deben estar limpias, ser durables y no deben contener sustancias que lleguen a afectar la mezcla como polvo muy fino, arcillas o sustancias orgánicas (ICCYC, 2009; Ingianna et al, 2002)

Araya (2012) explica que los agregados se pueden clasificar de acuerdo en 5 características distintas: origen geológico, proceso de obtención utilizado, tamaño, resistencia y peso unitario. No obstante, en el presente documento solo se ahondará en la clasificación por tamaño.

De acuerdo a su tamaño los agregados se van a clasificar en agregado grueso y en agregado fino. La distribución de los agregados se realiza con el uso de mallas o tamices con aberturas específicas, que dejan pasar los agregados más pequeños y van reteniendo los más grandes, es decir existen fracciones definidas por su tamaño máximo y su tamaño mínimo. Esta distribución que se practica de los agregados por los distintos tamices se llama graduación (Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto, 2009).

Como se mencionó la graduación de los agregados influye en la mezcla de concreto ya que los agregados finos van a llenar los espacios vacíos que los agregados de mayor tamaño dejan, además esto ayuda a lograr una mayor adherencia de las partículas gruesas y una mezcla densa que también mejorará la trabajabilidad y la resistencia final. Asimismo puede disminuir costos ya que se disminuye la cantidad de cemento necesaria para llenar estos espacios (Williams, 2010).

La separación entre el agregado fino y el grueso tiene un tamaño máximo de 5 mm, es decir el tamiz #4; lo que pasa por este tamiz es considerado como fino, mientras lo que se retiene es considerado como grueso. Para el agregado fino el tamaño máximo es entonces el tamiz #4, mientras que su mínimo es el tamiz #200 (0,075 mm de abertura). Partículas más finas que logran pasar la malla #200 pueden generar un aumento en el uso del agua para lograr una buena trabajabilidad y manejabilidad.

El agregado fino suele ser arena mientras que el agregado grueso es grava o piedra, y tiene que tener un tamaño uniforme y que sea resistente. Comercialmente en Costa Rica se conocen distintos tipos de agregado grueso: cuarta, cuartilla, quinta y quintilla.

Además de los agregados finos y gruesos, en ocasiones se añaden otros aditivos o compuestos a las mezclas de concreto, como por ejemplo las puzolanas. La puzolana es un material silíceo o silíceo aluminoso que, cuando está en la forma de polvo fino y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento portland para formar silicato de calcio hidratado y otros compuestos cementantes (Kostmaka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). Las puzolanas son muy usadas para ser suplemento del cemento en las construcciones pues son más económicas, desarrollan una resistencia a la comprensión similar o mayor a la del concreto sin modificar, se puede incrementar la adherencia de los componentes de las mezclas, facilita su trabajabilidad, manipulación e incrementar su impermeabilidad (Araya, 2012)

#### **2.1.2.4 Consistencia de la mezcla**

La consistencia es la capacidad del concreto de fluir cuando está en estado fresco y esta característica depende de la cantidad de agua utilizada a la hora de realizar la mezcla. (Araya, 2012).

Para medir la consistencia de una mezcla el método más usado es la prueba de revenimiento con el cono de Abrams. El revenimiento se refiere a la distancia vertical que el concreto se asienta una vez que se quita el cono. En la Tabla 2.4 se detalla el tipo de consistencia de la mezcla en función del revenimiento obtenido.

**Tabla 2.4. Clasificación de la consistencia de una mezcla en función del revenimiento obtenido.**

<b>Consistencia</b>	<b>Asiento en el cono de Abrams (mm)</b>	<b>Tolerancia (mm)</b>
Seca (S)	0 – 20	0
Plástica (P)	30 – 50	± 10
Blanda (B)	60 – 90	± 10
Fluida (F)	100 – 150	± 20
Líquida (L)*	>150	0

\*Esta consistencia solo debe conseguirse mediante la utilización de superplastificantes  
Fuente: (Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto, 2009)

El valor de revenimiento no solo se utiliza para saber qué tipo de consistencia tiene la mezcla y su clasificación sino también como un indicador para seguir un control de que, cuando se realizan varias mezclas con las mismas características, no existan cambios significativos de consistencia, contenido de agua, proporciones de las mezclas, etc; y así



asegurar que la distintas mezclas cumplen las mismas características (Ingianna, Pérez, & Torrentes, 2002).

Dependiendo de qué es lo que se quiere construir, la consistencia de la mezcla (y por ende su revenimiento) puede variar; por lo tanto el diseñador debe especificar cuál es el revenimiento requerido para ese tipo de mezcla. No obstante, Kostmaka et al (2004) recomiendan revenimientos para varios tipos de construcción (Tabla 2.5).

**Tabla 2.5. Revenimientos recomendados para distintos tipos de construcción.**

Construcción de concreto	Revenimiento mm (pulg)	
	Máximo*	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzado	75 (3)	25(1)
Zapatas, cajones y muros de subestructuras sin refuerzo	75 (3)	25 (1)
Vigas y muros reforzados	100 (4)	25 (1)
Columnas de edificios	100 (4)	25 (1)
Pavimentos y losas	75 (3)	25 (1)
Concreto masivo	75 (3)	25 (1)

\*Se puede aumentar 25 mm (1 pulg.) para los métodos de consolidación manuales

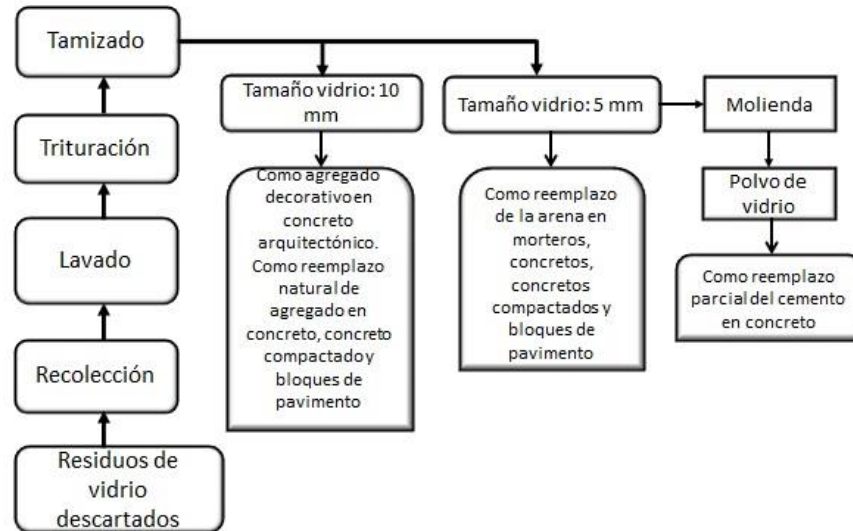
Fuente: (Kostmaka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

## 2.2 LA UTILIZACIÓN DEL VIDRIO EN LA PREPARACIÓN DE CONCRETOS

Se considera posible la incorporación del vidrio en la industria cementera debido a que el vidrio posee grandes proporciones de sílice y de calcio convirtiéndolo en teoría en un compuesto puzolánico o incluso del cemento, así como también comparte características con las arenas que se utilizan como agregado fino (Cassar & Camilleri, 2012; Shi & Zheng, 2007; Jani & Hogland, 2014). Además, el concreto provee una solución de largo plazo a la disposición del vidrio.

El primer estudio ocurrió en los años sesentas sin embargo este falló debido a la interacción de la sílice en los agregados con la pasta de cemento que es alcalina, generando expansiones en el concreto que provocaban agrietamientos en el mismo con el pasar de los años, lo que implicaba pérdidas de seguridad estructural en las obras (Schwarz, Cam, & Neithalath, 2008). Posteriormente, se volvieron a realizar estudios hasta hace unos 10 años y se ha estudiado la utilización del vidrio como sustituto parcial del cemento, del agregado

fino y del agregado grueso, así como sus propiedades puzolánicas (de Castro & de Brito, 2013). En la Figura 2.4 Ling et al (2013) proponen usos para el vidrio desechado de acuerdo al tamaño deseado.



**Figura 2.4. Usos del vidrio desechado de acuerdo al tamaño al cual se lleve.**  
Fuente: (Ling, Poon, & Wong, 2013)

La reacción Alkali-Silica (ASR, por sus siglas en inglés) es la formación de un gel el cual se expande por el concreto causando el agrietamiento del mismo de manera prematura. Shayan & Xu (2004) explican que la formación de este gel se debe a que el vidrio por tener alto contenido de sílice y una estructura amorfa es susceptible a un ataque químico de condiciones altamente alcalinas, las cuales presenta la pasta de cemento.

Esta reacción tiende a darse mayormente cuando el vidrio utilizado tiene tamaños grandes, mientras que el vidrio finamente molido no suele afectar pues por el contrario presenta propiedades puzolánicas evitando la ASR (Shao, Lefort, Moras, & Rodriguez, 2000). Partículas de vidrio de tamaño mayor a 1.2 – 1.5 mm son potenciales para que ocurra la ASR en el concreto, esto quiere decir que al utilizar partículas de este tamaño o mayores no necesariamente se va presentar dicha reacción pero sí que existe el riesgo de darse por lo que se deben tomar medidas y precauciones a la hora de realizar concretos con estas características como por ejemplo agregar cenizas volátiles (Shayan & Xu, 2004; Schwarz et al, 2008)

Es importante destacar que esta reacción no es exclusiva de concretos en los que se utilicen vidrio como agregado ya que también puede ocurrir en el concreto convencional si los agregados utilizados contienen minerales silicios (Meyer, Egosi, & Andela, 2001).

En cuanto a los usos del vidrio en la industria constructora, el vidrio como agregado grueso es la menos recomendable sin embargo se puede utilizar en pequeñas cantidades. Esto debido a que su naturaleza plana y alargada afecta la trabajabilidad (para agregado grueso es recomendable que se tenga una superficie rugosa), lo que genera uniones débiles entre el agregado y la pasta disminuyendo la resistencia a la compresión; además el manejo se hace más difícil pues se requiere Equipo de Protección Personal en todo momento por el riesgo a cortaduras (Vijayakumar et al, 2013; Cassar & Camilleri, 2012).

Mezclas de concreto de este tipo no se puede realizar sin tomar en cuenta la ASR pues las posibilidades que dicha reacción suceda son mayores, por lo que Federico & Chidiac (2009) citan un estudio donde se afirma que el vidrio de desecho como agregado grueso solo se debe recurrir si se utiliza cemento poco alcalino o si se agregan grandes porcentajes de puzolanas.

El vidrio como agregado fino es mayormente recomendado por la literatura pues no produce cambios notables en las propiedades del concreto, tiende a aumentar la resistencia a la compresión, especialmente a largo plazo, mejora las propiedades térmicas del concreto, no afecta la durabilidad del concreto, además si el vidrio es molido de manera fina éste no contribuye a la ASR (Shi & Zheng, 2007). Sin embargo la característica que mayormente se ve afectada por el vidrio es el asentamiento del concreto y la trabajabilidad, esta última se puede mejorar agregando más agua a la mezcla (Ismail & Al-Hashmi, 2009; Jani & Hogland, 2014).

Dentro de los beneficios que se pueden obtener del utilizar vidrio desechado en el cemento y en el concreto Shi & Zheng (2007) citan los siguientes:

- Elimina o disminuye los costos de disposición, los cuales en algunos lugares van en aumento debido a los controles y costos impuestos por los rellenos sanitarios.
- La vida útil de los rellenos sanitarios no se ve disminuida por las enormes cantidades de vidrio.

- Ayuda a preservar recursos naturales, como las arenas de río, que no estarían siendo usados en la industria constructora y cementera.
- Si se utilizara como sustituto parcial del cemento se ayuda a ahorrar energía utilizada en el proceso de realización de este producto así como se reduciría las emanaciones de contaminantes atmosféricos generados en este proceso.
- Potencial para aumentar la conciencia ambiental en cuanto a los beneficios del reciclaje y reúso de residuos valorizables.

A nivel nacional, Williams (2010) estudió el vidrio en la elaboración de concreto mediante la adición de vidrio de panel frontal de tubos de rayos catódicos como componente del agregado fino. Este estudio concluye que a nivel de morteros una sustitución grande de arena por vidrio aumenta la resistencia de la compresión a la edad de 28 días con respecto a la muestra patrón; en concreto la resistencia a la compresión se mantiene similar en las muestras patrón y con sustitución de arena.

Por otra parte, Cordero, Gómez & Vargas (2012) hicieron un estudio de la utilización de vidrios planos como sustituto de la arena para la realización de morteros, con el cual se observó que el vidrio espejo molido aumentó considerablemente la resistencia a la compresión de los morteros, el vidrio plano laminado también aumentó la  $f'_c$  sin embargo este vidrio requirió de más trabajo pues el vidrio quedaba pegado en la lámina plástica que une ambos vidrios.

En el Anexo 4: El vidrio plano en Costa Rica (página 71) se hace mención al vidrio plano en Costa Rica.

En la Tabla 2.6 se hace un resumen de los resultados obtenidos por varios autores que realizaron estudios con características similares a las del este estudio.

**Tabla 2.6. Resultados obtenidos de otros autores en el estudio del vidrio como sustituto parcial del agregado fino.**

<b>Autor(es)</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Resultados</b>
(de Castro & de Brito, 2013)	Utilizó vidrio de ventanas de edificaciones y carros. Utilizó cemento CEM II A-L 42.5R	No especifican los resultados, solo que a una proporción de 20-80 vidrio y arena la mezcla obtuvo una resistencia a la compresión 0,85% menor que la mezcla patrón
(Emam Ali & Al-Tersawy, 2012)	Utilizó cemento CEM I 42.5N. Realizaron pruebas a distintas proporciones de agregados y variando la cantidad de cemento utilizado.	A una proporción del 50-50 obtuvieron un valor de resistencia a la compresión de 363 kg/cm <sup>2</sup>
(Ismail & Al-Hashmi, 2009)	El vidrio utilizado fue una mezcla de vidrio de botellas con vidrio plano incoloro. Se utilizó cemento Tipo I. Realizó el agregado fino sustituyendo la arena por el vidrio en proporciones de 10, 15 y 20%	Para la proporción de sustitución del 20% la resistencia a la compresión fue de 468 kg/cm <sup>2</sup>
(Shayan & Xu, 2004)	Utilizó cemento Tipo I y se agregaron aditivos, superplastificante y aire comprimido.	Resistencia a la compresión obtenida de 407 kg/cm <sup>2</sup>

### **2.3 SEGURIDAD LABORAL AL MANEJAR EL VIDRIO.**

Las personas que trabajen y manipulen el vidrio se ven expuestas a peligros potenciales que pueden generar algún tipo de daño o lesión. En especial en el caso de trabajar con vidrios de desecho pues éstos son depositados en los contenedores donde se quiebran en pedazos grandes y pequeños, con puntas filosas, pedazos muy finos, etc. Son muchas las formas en que se encuentran los vidrios que son desechados (Figura 2.5).



**Figura 2.5. Góndola en la que se depositan vidrios de desecho en la empresa Extralum**

En el presente proyecto se tuvo que manipular el vidrio de desecho quebrado en distintos tamaños como los mostrados en la Figura 2.5 y el vidrio molido (Figura 2.6). Los vidrios pueden provocar cortaduras de diversos tamaños y profundidades, pueden incrustarse en la piel y el vidrio molido puede ser respirado, lo que a largo plazo puede generar enfermedades como la silicosis o agravar enfermedades respiratorias ya existentes.



**Figura 2.6. Vidrios molidos y tamizados con la malla #4. Figura A es el vidrio reflectivo. Figura B es el vidrio espejo. Figura C es el vidrio incoloro.**

Por lo tanto, es necesario tomar medidas que prevengan o eviten que accidentes sucedan pues la seguridad y salud de las personas son aspectos esenciales. Con el objetivo de prevenir y evitar accidentes se consultó con el Ingeniero David Gómez Murillo (comunicación personal, Abril, 2014) en Seguridad Laboral e Higiene Industrial sobre la manipulación adecuada del vidrio, sus recomendaciones son descritas a continuación.

Como se mencionó, el riesgo de un corte por la manipulación del vidrio desechado es alto por lo que es necesario utilizar Equipo de Protección Personal (EPP) para las manos, así entonces la utilización de guantes resistentes a cortes y punzones es trascendental. Se recomienda recurrir a guantes anatómicos con palma *Dyneema*, el cual es un material sintético que tiene las mismas propiedades protectoras que el *Kevlar* pero que es más flexible, lavable, liviano y no causa irritación.

La protección respiratoria varía dependiendo del tamaño de partícula con el cual se trabaja, así entonces puede ser obligatoria o no. Las partículas con diámetros menores a 100 micras son inhalables y se debe usar protección respiratoria.

El tipo de protección (mascarilla o respirador) varía según la concentración y el tiempo de exposición, por lo que es necesario realizar una Evaluación del Riesgo para determinar el tipo de protección más adecuado. El equipo de protección respiratoria tiene 3 componentes los cuales deben ser evaluados para escoger el más indicado:

- Tipo de protección: desde mascarillas desechables hasta aparatos de respiración autocontenidos.
- Resistencia a aceite: el equipo puede ser N (no resistente a aceites), R (resistente a aceites) o P (a prueba de aceites).
- Porcentaje de eficiencia del filtro: 95, 99 ó 100 (99.97) %.

Así entonces se puede escoger por ejemplo una mascarilla desechable con un filtro R99 o un respirador de media cara con un filtro N95, todo dependiendo de los resultados de la Evaluación de Riesgos.

Asimismo Gómez (2014) indica que los EPP son solo una barrera entre el trabajador y el riesgo por lo que hay que tomar otras medidas a la hora de trabajar con vidrio como las siguientes:

- Asegurarse de mantener un lugar de trabajo limpio y ordenado para evitar caídas o tropezones, especialmente cuando se están trasladando láminas de vidrio.
- Dependiendo del tamaño de las láminas, hacerles una marca visible con un pilot para evitar que alguien se accidente contra ellas durante el transporte.
- Evitar, siempre que sea posible, el almacenamiento o manipulación del vidrio a alturas superiores a la cabeza.
- Si es necesario transportar el vidrio molido, procurar hacerlo en recipientes cerrados para evitar derrames.
- Evitar levantar más de 25 kg por persona.

Recalcando que la sílice es el principal componente de los vidrios planos, se considera que de no usarse los EPP adecuados un trabajador puede contraer diversas afectaciones tanto físicas como al sistema respiratorio. Organizaciones norteamericanas como son las Occupational Safety & Health Administration (OSHA) y la National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) perteneciente al Center for Disease Control and

Prevention (CDC) poseen diversos documentos donde se habla de la afectaciones a la salud debido a las partículas respirables de la sílice, así como normas para la medición y concentraciones máximas permitidas y el equipo correspondiente de acuerdo a la concentración.

Por otra parte con el cemento también hay que tener medidas de seguridad para la manipulación del mismo pues también puede provocar afectaciones a la salud de los trabajadores. La empresa Holcim (2005) menciona que una exposición puntual al polvo de cemento seco no causa daño grave; sin embargo el cemento mojado puede causar destrucción grave de los tejidos de la piel o los ojos en forma de quemaduras químicas o pueden causar una reacción alérgica. Estas mismas consecuencias pueden ocurrir si se exponen áreas mojadas o húmedas del cuerpo al cemento seco por mucho tiempo.

Por lo tanto la utilización de EPP para la manipulación del cemento y para las realizaciones de las mezclas de morteros y de concreto, especialmente en el presente proyecto que se combina con vidrio molido, es indispensable.

Para **protección de la piel** es necesaria la utilización de guantes impermeables resistentes a abrasiones y álcalis. Es recomendado también la utilización de calzado cerrado impermeable y de camisas de manga larga y pantalones largos para proteger la piel, así como el uso de rodilleras o pantalones impermeables si hay que realizar trabajos sobre concreto o mortero fresco; también es importante reemplazar la ropa y el EPP saturado con cemento mojado no endurecido y lavarla antes de volverla a usar (Holcim, 2005). Hay que evitar el contacto con el cemento mojado que no ha endurecido, si por algún motivo el contacto se da hay que lavar con abundante agua y jabón. Para **protección de los ojos** es necesario utilizar lentes de seguridad con resguardos laterales certificadas cuando se maneje el cemento en polvo o húmedo, además se recomienda no utilizar lentes de contacto (Holcim, 2005). En cuanto a la **protección respiratoria** primeramente hay que evitar acciones que dispersen el cemento en polvo por el lugar de trabajo, además es recomendable trabajar en lugares ventilados o que exista ventilación de extracción local o dilución para controlar la exposición al cemento; en casos en los cuales las condiciones de trabajo implican zonas no ventiladas, excedente en los límites de exposición o donde el polvo de cemento cause incomodidad o irritación al respirar, es necesario la utilización de



respiradores o protección respiratoria, la cual se debe adecuar a la concentración de partículas presentes (Cemex, s.f.; Holcim, 2011).

En el Anexo 2: Datos de seguridad se recopila información de seguridad de la sílice importante a tomar en cuenta para el manejo del vidrio plano y sobre posibles efectos a la salud de una exposición no controlada al cemento.

### 3 METODOLOGÍA

El vidrio utilizado en este trabajo fue proporcionado por la empresa Extralum, en su sede de Heredia. Se escogieron 3 tipos de vidrio plano para la realización del proyecto: el vidrio incoloro de 6 mm, el vidrio espejo y el vidrio reflectivo. El vidrio incoloro y el reflectivo se escogen por ser tipos de vidrio plano que se utilizan en grandes cantidades en el sector de construcción, lo que aumenta sus residuos. El vidrio espejo se escogió porque está entre los tipos de vidrio plano que Extralum desecha en un relleno sanitario pues no hay empresa que lo recicle, además de los buenos resultados que se obtuvieron en un estudio previo realizado por Cordero, Gómez & Vargas (2012).

Para la realización de las muestras de mortero y de concreto se contó con el apoyo del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

#### 3.1 MOLIENDA DEL VIDRIO

La molienda se realizó en la Máquina de Abrasión de los Ángeles del CIVCO (Figura 3.1). Posteriormente se procedió a tamizar el vidrio (Figura 2.6), para lo cual se utilizó el tamiz #4 (de 4,75 mm) que separa a los agregados finos de los gruesos tal y como lo menciona la literatura y las normas de la American Society for Testing and Materials C33 (2013) y la C136 (2006), conocidas también como ASTM. Asimismo se tamizó la arena utilizada como agregado fino con la misma malla, con la finalidad que ambos agregados finos fueran homogéneos y de tamaño similar.



Figura 3.1. Máquina de Abrasión de los Ángeles ubicada en el CIVCO

Por recomendación de M. Pino (comunicación personal, Abril 2013) se estableció que la sustitución de la arena en el agregado fino fuera del 50%.

### 3.2 PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS

Las dosificaciones de las mezclas de los morteros y del concreto se especifican en el Apéndice 1: Datos experimentales, las cuales fueron diseñadas siguiendo la normativa ASTM C109 (2013) para los morteros y para el concreto las dosificaciones sugeridas por Araya en su estudio “Dosificación de concretos” (2013).

Se utilizó cemento Sansón UG marca Cemex para la realización de los morteros y del concreto. Este cemento tipo Portland de uso general, es resistente a los sulfatos, tiene un bajo calor de hidratación, lo cual contribuye a reducir fisuras y agrietamientos y que tiene una resistencia a la compresión esperada de 280 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días. En el Anexo 1: Ficha técnica del cemento Cemex Sansón UG de Alto Desempeño (página 65) se encuentra la ficha técnica del cemento proporcionada por la empresa Cemex de Costa Rica.

Las mezclas de los morteros se hicieron según las normas ASTM C109 (2013) y la ASTM C305 (2013). Una vez que se obtuvo la pasta, se procedió a llenar los moldes (Figura 3.2.A), siguiendo lo establecido por la norma ASTM C109. De manera seguida se llevaron a la Cámara Húmeda en donde permanecieron aproximadamente 24 horas en los moldes y tapados con una bandeja (Figura 3.2.B).



**Figura 3.2. A. Moldes utilizados para las muestras de mortero. B. Los moldes de los morteros quedan tapados en la Cámara Húmeda durante las primeras 24 horas.**

Pasadas las 24 horas se procedió a desmoldar los cubos y rotularlos especificando el tipo de vidrio utilizado y el número de muestra; los mismos fueron llevados a la Cámara Húmeda nuevamente donde se mantuvieron hasta su día de fallado (Figura 3.3).



**Figura 3.3. Cubos de morteros. A. Rotulación de las muestras. B. Cámara Húmeda donde permanecen los morteros.**

Por otra parte, para la realización del concreto se siguió la norma ASTM C31 (2012) y la ASTM C192 (2013). Inmediatamente después de la realización de las mezclas de concreto se realizó una prueba para medir la consistencia de las mezclas siguiendo la norma ASTM C143 (2012). Luego de realizada la mezcla se llenaron los moldes cilíndricos (Figura 3.4.A). De manera similar a los morteros, el concreto se deja fraguar y endurecer por 24 horas en los moldes (Figura 3.4.B). Una vez que se desmoldan fueron rotulados y colocados en la Cámara Húmeda (Figura 3.4.C).



**Figura 3.4. A. Moldes utilizados para las mezclas de concreto. B. Concreto recién hecho y moldeado. C. Cilindros de concreto rotulados y colocados en la Cámara Húmeda.**

La rotulación utilizada es la siguiente:

- P: para las mezclas patrón. La mezcla Patrón es una mezcla estándar sin agregar vidrio a sus componentes.
- V-E: para las mezclas con vidrio espejo.
- V-I: para las mezclas con vidrio incoloro.
- V-R: para las mezclas con vidrio reflectivo.

### 3.3 PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Estas pruebas se realizaron a las edades de 3, 7, 14, 28 y 56 días de realizada la muestra. Si bien las normativas y las mismas especificaciones de los cementos realizan la prueba hasta los 28 días, se decidió realizar otra más a los 56 días por recomendación del Ing. Araya (comunicación personal, Mayo, 2013), quien en estudios previos ha visto una tendencia diferente en el comportamiento de los cementos actuales (Ver apartado 2.1.2.1.)

Las muestras se realizaron por triplicado, es decir, que para cada edad y cada tipo de vidrio se realizaron 3 muestras.

Esta prueba de resistencia a la compresión se ejecutó de acuerdo a la norma ASTM C109 (2013) para los morteros y a la norma ASTM C39 (2012) para los cilindros de concreto. Para las fallas de los morteros se utilizó la máquina Versa Tester (Figura 3.5.A) mientras que para el concreto fue la Máquina de Ensayos Controls 3000 kN, modelo 50-C5744 (Figura 3.5.B).



**Figura 3.5. Máquinas utilizadas para medir resistencia a la compresión del laboratorio del CIVCO. A. Versa Tester. B. Máquina de Ensayos Controls 3000 kN, modelo 50-C5744.**

Los valores que la máquina Versa Tester proporciona están en la unidad de kilogramos fuerza por lo que es necesaria su conversión a  $\text{kg/cm}^2$ . Esta conversión se realiza con la Ecuación 1:

$$f_c = \frac{\text{Carga} \times K}{A} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,  $K$  es una constante para corregir la carga y tiene un valor de 1,0667;  $A$  es el área del cubo de mortero, cuyo valor es de  $2581 \text{ mm}^2$ .

La Máquina de Ensayos Controls 3000 kN, modelo 50-C5744 muestra los valores de resistencia a la compresión en kilonewtons (kN) y en megapascales (MPa), por lo que solo es necesario hacer un cambio de unidades para obtener el valor en  $\text{kg/cm}^2$ . Esta máquina tiene una incertidumbre de 0,226 – 0,329; la Versa Tester maneja una incertidumbre entre los valores de  $\pm 12,5$ .

### **3.4 SEGURIDAD LABORAL DE LA MANIPULACIÓN Y USO DEL VIDRIO**

Se desea evaluar de manera general las implicaciones desde el punto de vista de seguridad laboral en el uso del vidrio durante la realización de las mezclas de morteros y de concretos. Para tal efecto se contactó con el Ingeniero en Seguridad Laboral e Higiene Industrial David Gómez Murillo, quien proporcionó información general de los cuidados que hay que tener al manejar el vidrio (Ver apartado 2.3). Además se realizan anotaciones de cuáles son los puntos críticos durante la realización del proyecto y qué efectos se evidenciaron.

Debido a los peligros potenciales de la manipulación del vidrio se utilizaron guantes resistentes a las cortaduras en todo momento de su manipulación. Además por lo fino de las partículas del vidrio molido se utilizó mascarilla en las etapas de molido, tamizado y realización de la mezcla (Figura 3.6), y se utilizaron los lentes de seguridad.



**Figura 3.6. Ejemplificación del EPP utilizado en diferentes etapas de la realización del proyecto**

### 3.5 ESTIMACIÓN DE COSTOS

Se realizó una comparación económica básica de los costos del concreto tradicional con respecto al concreto elaborado con vidrio plano como parte del agregado fino. Para esta comparación se toman dos proporciones distintas de vidrio plano-arena: la de 50%-50% utilizada en este proyecto y otra proporción de 20%-80% utilizada por Ismail & Al-Hashmi (2009).

La venta de la arena y la piedra utilizada como agregados finos y gruesos respectivamente se realiza por metro cúbico, en el caso del vidrio se analizarán los costos de moler y tamizar el vidrio plano para establecer un costo del suministro de este componente como agregado del concreto objeto de este estudio. La comparación de costos se realizó de acuerdo a las dosificaciones más comúnmente usadas en el campo de los materiales para obtener un metro cúbico de concreto de acuerdo a la resistencia a la compresión esperada (Tabla 2.3).

Fernández (2010) explica que para conocer el precio de venta de un producto, es necesario conocer el punto de equilibrio entre dicho precio y la cantidad de producto que se debe vender en un periodo establecido; y para encontrar el punto de equilibrio se utiliza la Ecuación 2. Existen dos enfoques distintos: el primero en estimar cuánta cantidad de producto se espera vender por mes, resultando el valor al que habría que vender el producto; y para el segundo enfoque se propone un costo para el producto final, implicando la cantidad de producto que habría que vender mensualmente. En el presente proyecto se utilizó la segunda opción para calcular el valor del vidrio molido.

$$Q_e = \frac{CF}{P_{vu} + C_{vu}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde CF son los costos fijos,  $P_{vu}$  es el precio de venta unitario y  $C_{vu}$  es costo variable unitario.

Como la finalidad de este proyecto era la comparación de los costos de preparar concreto tradicional con respecto a los costos de preparar concreto con vidrio plano como sustituto parcial de la arena como el agregado fino, se partió de las siguientes premisas:

- El costo fijo de alquiler no se toma en cuenta pues la planta moledora del vidrio se encontraría en las instalaciones de la planta productora de cemento u otra planta ya existente, como parte de la misma.

- Inversiones iniciales como la compra del EPP y de la máquina moladora de vidrio no se toman en cuenta para los cálculos pues el fin de este análisis económico es meramente el costo del producto final.
- Se forja una alianza con la empresa Extralum para que sea ésta la que proporcione los vidrios al igual que cubra los costos de transporte del material, tal y como lo viene haciendo actualmente pues paga el transporte para disponer sus vidrios desechados en el relleno sanitario y para llevar los vidrios reciclables a Vicesa. Por lo tanto, el costo del suministro del vidrio desechado es de cero.
- Como se está empezando con la producción se contará solamente con 2 operarios encargados de realizar el proceso de molienda y tamizado. Inicialmente se contará con una trituradora de martillos para moler el vidrio y el tamizado se hará manual. Se propone la utilización de una trituradora de martillos, la cual consume 2.2 kW. (Anexo 3: Datos técnicos de la trituradora de vidrio a utilizar).



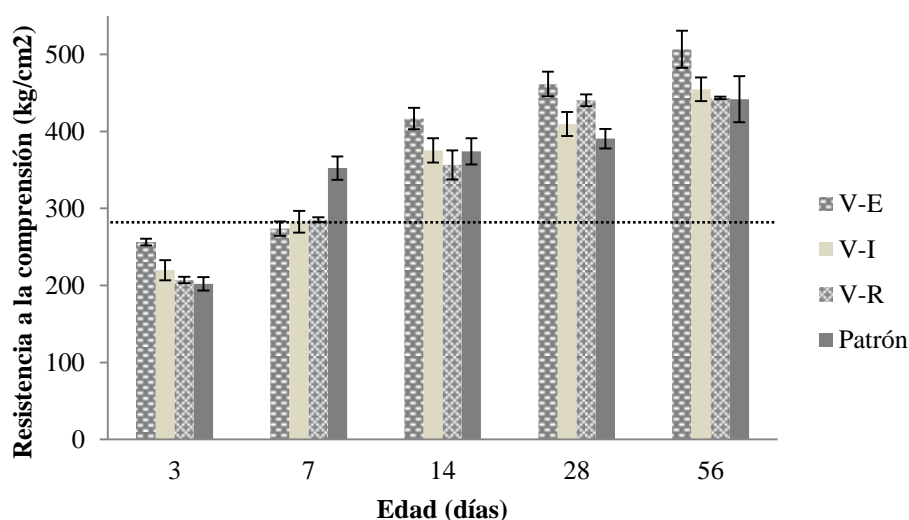
## 4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

### 4.1 COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS

Como se mencionó se realizaron fallas para conocer la resistencia a la compresión de los cubos de morteros y de los cilindros de concreto a los días 3, 7, 14, 28 y 56 de la realización de cada una de las mezclas.

#### 4.1.1 Los morteros

En la Figura 4.1 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las edades de los cubos de mortero. Como las fallas se hicieron por triplicado para cada una de las edades, en esta figura se muestra el valor promedio obtenido; los valores de cada una de las fallas se encuentran en el Apéndice 1: Datos experimentales (página 75).



**Figura 4.1.** Valores de las resistencias a la compresión ( $\text{kg/cm}^2$ ) obtenidas para las mezclas de morteros.

Con los datos obtenidos se puede observar que el uso de vidrios planos en morteros, como agregado fino en conjunto con la arena, genera resistencias a la compresión de gran valor, inclusive los valores obtenidos con las muestras de vidrio superan al valor de la mezcla patrón a la edad de 28 días (Figura 4.1).

Sin embargo cabe recalcar que a la edad de 56 días la resistencia a la compresión de los morteros se vuelve muy similar, con excepción del vidrio espejo que sí muestra una

resistencia mucho más elevada que los otros dos vidrios e inclusive que la mezcla patrón (Figura 4.1).

Tanto a los 28 como a los 56 días el vidrio espejo mostró una resistencia mucho mayor que las demás muestras; característica similar a la obtenida por Cordero, Gómez & Vargas (2012) que, aunque se utilizó un cemento distinto variando mucho las resistencias a la compresión ( $f'_c$ ) finales obtenidos, se obtuvo una resistencia muchísimo mayor por parte de la mezcla con vidrio espejo en comparación con las mezclas patrón y la de los otros vidrios utilizados en ambos estudios.

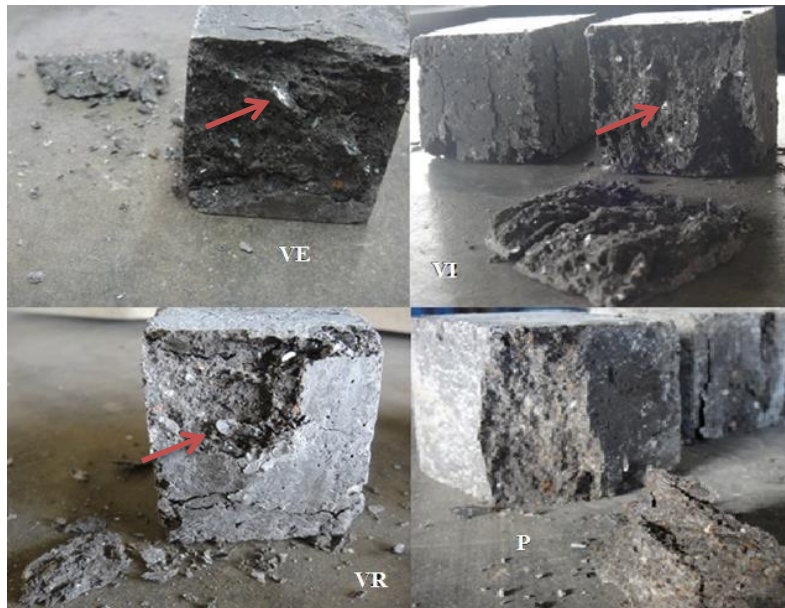
La mezcla V-E de morteros tuvo una consistencia más seca en relación a las otras mezclas realizadas ya que se utilizaron 100 ml menos de agua (ver Apéndice 1, página 75); lo que posiblemente implicó en que la resistencia final de esta mezcla sea mucho mayor a las otras. Se decidió agregar más agua a las demás mezclas (elevando su A/C de 0.4 a 0.48) pues la consistencia tan seca de V-E no dio abasto para llenar los moldes, haciendo falta una muestra; además la trabajabilidad de esta muestra se vio un poco afectada pues la mezcla al estar tan seca comenzaba a endurecerse muy rápidamente complicando la aplicación de la mezcla a los moldes. Con el aumento del agua utilizada se logró evitar estas situaciones descritas y por ende mejorar la trabajabilidad y la fluidez de la mezcla.

Se observa que el crecimiento de la resistencia a la compresión de todas las mezclas de morteros aumenta de manera regular y continua, siendo la única excepción V-E que en el periodo de 3 a 7 días se mantuvo constante y sin mayor crecimiento.

En la Figura 4.1, la línea punteada representa el valor de  $280 \text{ kg/cm}^2$ , valor esperado para las mezclas realizadas con el cemento utilizado. Este valor es alcanzado y superado desde la edad de 14 días y por la mezcla Patrón desde una edad de 7 días, situación que refleja un crecimiento rápido de la resistencia a la compresión en los primeros días de realizada las mezclas.

También los valores obtenidos sobrepasan los valores mínimos estipulados en el Código Sísmico de Costa Rica 2010 (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2011) para los morteros de clase A, B y C.

En la Figura 4.2 se observa que la distribución del vidrio molido en la mezclas es bastante homogénea. Sin embargo en algunos casos se observan partículas de vidrio que son de gran tamaño, probablemente que apenas lograron pasar la malla #4. Estas partículas de mayor tamaño pueden afectar algunas aplicaciones de morteros como revestimientos y acabados que requieren un mayor detalle y finura.

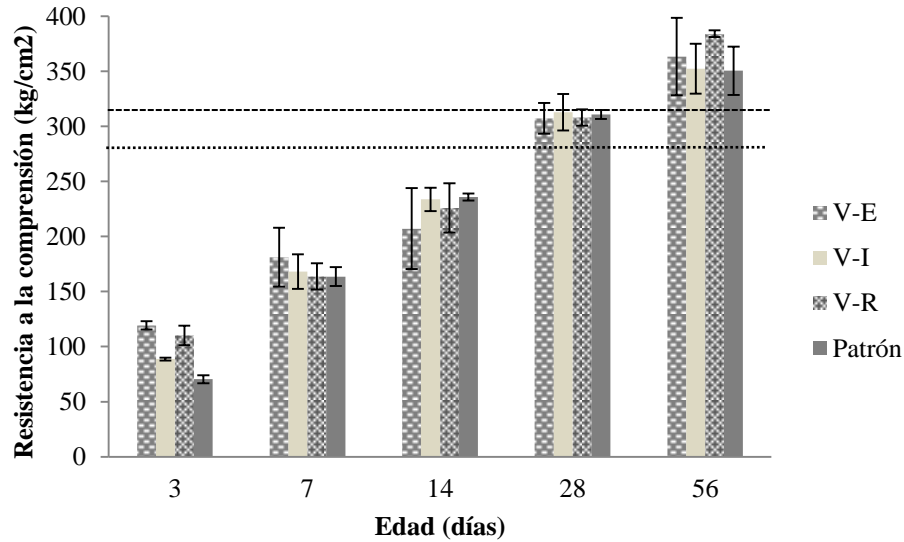


**Figura 4.2. Muestras de morteros después de su fallado.**

Un punto a destacar es que las mezclas de los morteros todas fueron realizadas por el mismo operador, asegurando que la repetitividad ideal de las muestras. Caso contrario sucedió con las mezclas de concreto en donde se necesitaban un mínimo de cuatro personas para realizarlas, dos de ellas estuvieron presentes en todas las ocasiones mientras que las otras dos fueron diferentes para cada mezcla. Esto pudo influenciar y afectar las muestras, razón por la cual en los resultados experimentales (Apéndice 1) se ven grandes variaciones de los datos, con desviaciones estándar mayores a 10 en algunas de las pruebas realizadas, las cuales están por arriba de los valores permitidos por la norma ASTM C109.

#### **4.1.2 Los concretos**

Las resistencias a la compresión promedios obtenidas a cada edad para los cilindros de concreto se muestran en la Figura 4.3. En el Apéndice 1, se pueden observar los valores obtenidos de las fallas de dichos cilindros.



**Figura 4.3. Valores de la resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) de los cilindros de concreto.**

Estas mezclas se mantuvieron con una relación A/C de 0,53. Con esta relación los valores de revenimiento obtenidos se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1. Valores de revenimiento obtenidos para las mezclas de concreto.**

Muestra	Revenimiento (cm)
Patrón	19
V-E	18
V-I	20
V-R	16

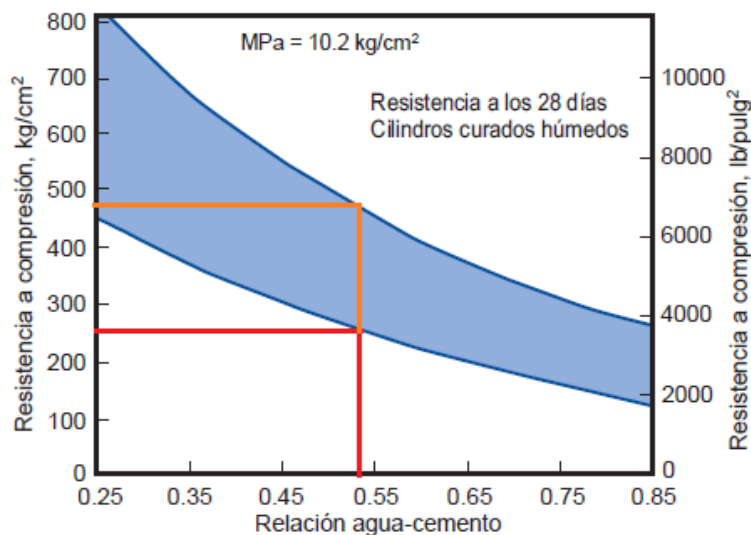
Los valores de resistencia obtenidos para los concretos presentaron desviaciones estándar bastante grandes, sin embargo al tener pocos datos no fue recomendable eliminar los que más discrepaban. Una de las razones que pudieron afectar esto fue el no contar con un equipo de trabajo definido, si no que éste variara cada vez que se realizó una mezcla de concreto diferente.

No obstante, se observa en la Figura 4.3 que las resistencias a la compresión obtenidas a los 28 días tienen resultados muy similares. Además, se destaca que los valores obtenidos son mucho mayores a los establecidos por el Código Sísmico de Costa Rica 2010 (210 kg/cm<sup>2</sup>), por lo que desde este punto de vista la utilización del vidrio plano como parte del agregado fino es factible en concretos estructurales. También se recalca que entre las características propias del cemento utilizado la  $f'_c$  tiene una resistencia a 28 días esperada de 280 kg/cm<sup>2</sup>

(valor representado con la línea punteada en la Figura 4.3), valor que ha sido superado por todas las mezclas con vidrio plano e inclusive por la misma mezcla Patrón a la edad de 28 días.

Además, para la realización de este proyecto se utilizó una dosificación por peso de la mezcla del concreto de 1:1.8:1.8, es decir que por cada unidad de cemento se agregaron 1.8 unidades de agregado fino y una cantidad igual de agregado grueso. Según las dosificaciones recomendadas por Araya (2013) y las resistencias esperadas según esas dosificaciones, y de acuerdo a la utilizada en este proyecto, la resistencia a la compresión esperada a 28 días debe ser de aproximadamente  $315 \text{ kg/cm}^2$ , representada en la Figura 4.3 por la línea segmentada. Se observa que a los 28 días de edad las muestras no alcanzaron este valor aunque sí tuvieron un valor cercano; no obstante a la edad de 56 días las  $f'_c$  de las muestras sí alcanzaron este valor esperado.

Por otra parte, de acuerdo a Kostmaka *et al* (2004) las resistencias obtenidas están dentro del rango que establecen para una relación A/C como la utilizada en este proyecto, tal y como se aprecia en la Figura 4.4.



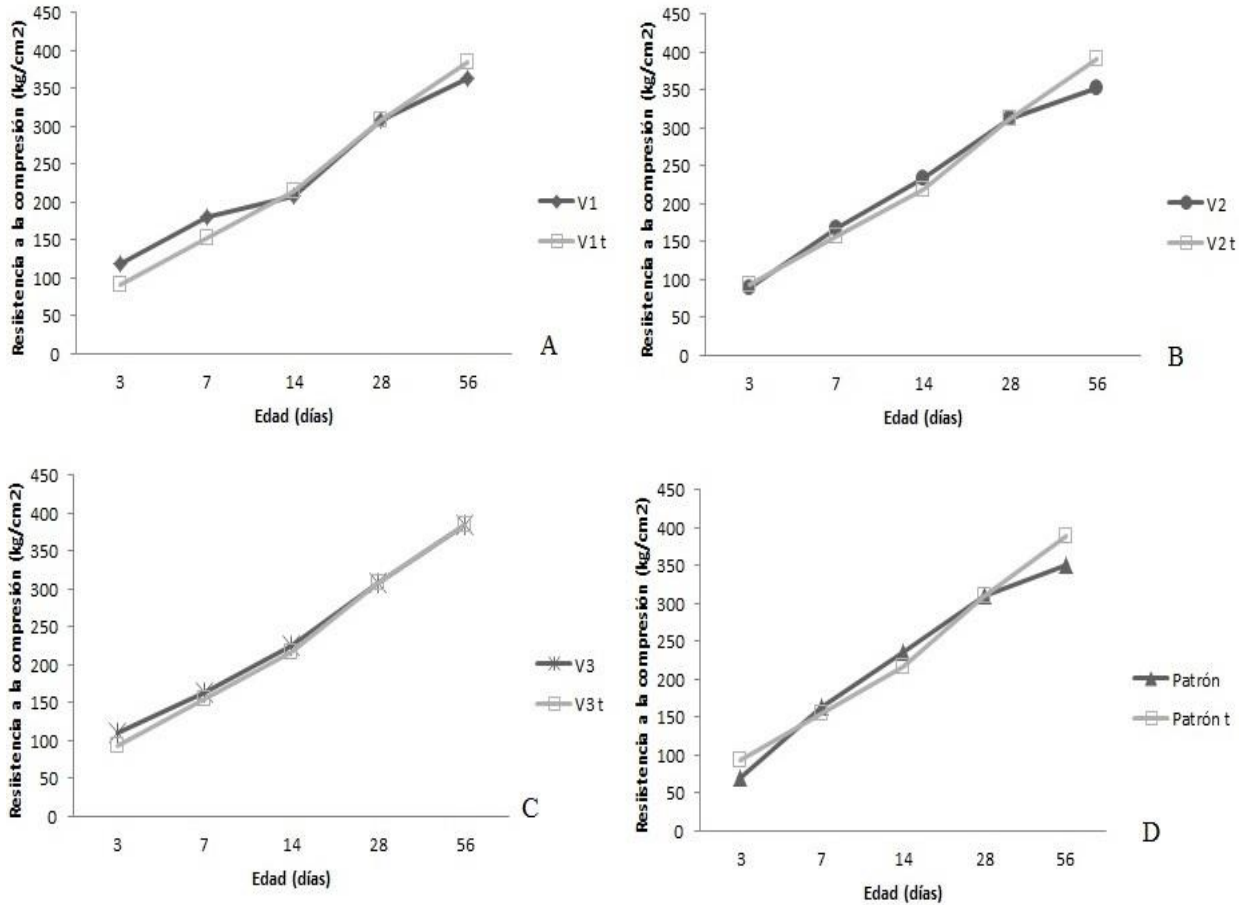
**Figura 4.4.** Variación de la resistencia a la compresión con la relación A/C propuesta por Kostmaka *et al* (2004).

Contrario a los morteros, el V-E fue el valor más bajo de resistencia obtenida; sin embargo éste caso específico pudo deberse a complicaciones a la hora de realizar la mezcla pues inicialmente se realizó en una batidora de poca capacidad, por lo que hubo que dividir la

realización de esta mezcla en dos partes y en algunos momentos se observó que la mezcla no se homogenizó adecuadamente, por lo que hubo que homogenizarla manualmente con la ayuda de una barra. Esto se ve reflejado en el gran valor de desviación estándar obtenido para todas las edades del concreto con espejo a excepción de la edad de 3 días (Figura 4.3).

A nivel general, en la misma Figura se puede notar que el crecimiento conforme avanzaba la edad de las diferentes mezclas siempre se mantuvo muy similar, especialmente luego de la edad de 7 días, dando un indicio que el vidrio molido como agregado fino para el concreto funciona de manera similar a como funciona con arena solamente como agregado, y además que la arena y el vidrio molido se complementan de buena manera para cumplir a cabalidad la función de amarre y de adherencia entre el agregado grueso y la pasta.

La Tabla 2.2 (página 14) muestra el desarrollo porcentual aproximado del crecimiento de la resistencia a la compresión conforme se avanza en la edad del concreto. Araya (2013) indica que una variación en los últimos años con respecto a estos porcentajes. En la Figura 4.5 se observa el comportamiento que tuvieron las mezclas de concreto elaboradas, confirmando el estudio mencionado, donde se indica que en años recientes los cambios en la composición del cemento, han llevado a cambios en los comportamientos de la resistencia a la compresión conforme se avanza con la edad. Se puede observar también que, con excepción del V-R (Vidrio Reflectivo) los concretos disminuyeron la rapidez de su crecimiento luego de los 28 días, lo que implicó que el valor resultante a los 56 días no estuviera cerca del valor esperado por la teoría.



**Figura 4.5. Relación del comportamiento de la resistencia a la compresión obtenida con respecto al comportamiento mencionado por Araya (2013). A representa los valores de las mezclas de V-E; B representa a V-I; C representa a V-R; D representa los valores Patrón.**

\*Los valores representados por una "t" se refieren al comportamiento mencionado por Araya.

Con respecto a las consistencia de las mezclas, el revenimiento obtenido al realizar las mezclas de concreto y en comparación con la clasificación de revenimientos (Tabla 2.4) se aprecia el resultado que todas las mezclas serían de tipo Líquida (Figura 4.6); clasificación que solo se debería obtener por medio de aditivos superplastificantes.



**Figura 4.6. Resultado de una de las pruebas de revenimiento por medio del cono de Abrams.**

Los revenimientos obtenidos son un indicador que sí se mantuvieron características similares durante todas las mezclas. Sin embargo si fuera el caso de una construcción en donde se obtuvieron estos revenimientos, debido a la consistencia tan líquida y no haber agregado aditivos, el único uso posible sería el relleno de blocks de concreto. Aunque sugiere el Ing. Araya (comunicación personal, Octubre 2013) que hubiera sido mejor desechar estas mezclas y trabajar la relación A/C para encontrar una mejor consistencia de la mezcla.

Las mezclas quedaron con una consistencia líquida a pesar de haber utilizado una relación A/C adecuada. Kostmaka et al (2004) indican que la relación A/C normalmente tiene un valor entre 0,5 y 0,6 y en el caso de las mezclas elaboradas para el proyecto se mantuvo una relación A/C aproximada de 0,53; por lo que se cumplió con esta característica inicial pero sin embargo la mezcla resultó ser de consistencia líquida.

Dentro de las razones del porqué el revenimiento obtenido dio un valor tan elevado se puede considerar que la cantidad de vidrio molido agregada es demasiado grande y en vista que el polvo del vidrio es considerado insoluble en agua (TablaAx.2.1, Anexo 2: Datos de seguridad) se obtuvo una mezcla donde el agua no se mezcló de manera adecuada con el cemento y los agregados. También pudo influir el tamaño del vidrio molido por cuanto, a pesar de haber utilizado el mismo procedimiento para moler todos los vidrios, el vidrio reflectivo quedó más fino mientras que los otros vidrios presentaban muchas partículas de



gran tamaño que tenían dificultad para pasar por el tamiz #4. Situación que se puede observar en los revenimientos obtenidos pues el V-R fue el que presentó el revenimiento más bajo. De la misma manera, Jani & Hogland (2014) recomiendan disminuir el tamaño de la partícula del vidrio utilizado con el objetivo de asegurarse mayor regularidad en estas partículas, además de que afirman que un menor tamaño de partícula puede aumentar la resistencia a la compresión final de los concretos.

Una alta proporción de vidrio en la mezcla causa una unión débil entre el vidrio molido y la pasta de cemento, lo que también tiende a elevar la relación A/C en las mezclas ya que el rango de absorción del vidrio de desecho molido es mucho más bajo que el de la arena generalmente utilizada disminuyendo así el el rango de absorción de agua de toda la mezcla (Jani & Hogland, 2014). Asimismo, Castro & de Brito (2013) observaron que entre mayor cantidad de vidrio se agregara el asentamiento del concreto y la eficiencia de compactación decrecían debido a lo irregular de las forma de las partículas de vidrio, las cuales promueven fricción entre todas las partículas y encapsulan burbujas de aire en la pasta del cemento. Esto confirma el por qué se debió agregar más agua a las mezclas de la establecida en el diseño inicial, haciendo más fluidas las mezclas obtenidas.

Estos resultados de revenimiento obtenidos son similares con los obtenidos por Khatib, Negim, Sohl & Chileshe (2012) los cuales demuestran como el valor de revenimiento aumenta conforme se aumenta la proporción de mezcla en el vidrio.

Por lo tanto, a pesar de que en su estado endurecido el concreto realizado sí cumple con las especificaciones es recomendable buscar una proporción de vidrio-arena donde el revenimiento de las mezclas logre ser menor y así mejorar la trabajabilidad de las mezclas.

Finalmente, en comparación con los resultados obtenidos por otros autores se puede observar de la Tabla 2.6 que las resistencias a la compresión de las mezclas realizadas en este estudio estuvieron por debajo de las obtenidos por los autores citados en la tabla. Si bien, las características de cada estudio son diferentes y por lo tanto los resultados siempre van a diferir, se puede realizar una pequeña comparación, especialmente con el estudio de Ismail & Al-Hashmi el cual tenía condiciones similares al presente.

El estudio de este autor obtuvo una  $f'_c$  de 468 kg/cm<sup>2</sup> para una proporción de 20% vidrio y 80% arena en el agregado fino, valor muy elevado en comparación al obtenido en este estudio. No obstante, varios autores afirman que entre mayor sea la proporción de vidrio dentro de los agregados la resistencia la comprensión va a tender a disminuir (Jani & Hogland, 2014; de Castro & de Brito, 2013). Razón por la cual es importante continuar este estudio buscando la relación de vidrio-arena en donde las características del concreto sean las más óptimas, incluyendo la resistencia a la comprensión y la consistencia de la mezcla.

## **4.2 ASPECTOS DE SEGURIDAD LABORAL**

Durante la realización del proyecto fue posible corroborar las necesidades de utilizar EPP para evitar daños o lesiones por la utilización del vidrio.

Empezando por el uso de los guantes, mientras se traspasaba el vidrio espejo que venía llegando de Extralum de un recipiente a otro se observaron vidrios que presentaban sangre, así como pequeñas cortaduras que me sucedieron por haber manipulado este vidrio sin el uso de guantes la primera vez. Estos accidentes ocurrieron con el manejo de una pequeña cantidad de vidrio desechado, por lo que manipular grandes cantidades implica la utilización de guantes en indispensable.

El uso de lentes de seguridad también es fundamental, existen riesgos de que un pedazo de vidrio se introduzca en los ojos y causen una lesión grave en los mismos. Durante la parte de tamizado, en momentos donde había mucho viento se levanta gran cantidad de polvo de vidrio, el cual puede entrar en los ojos de las personas si no usaran lentes de seguridad mientras se realizan operaciones como esta.

Al viento levantar el polvo de vidrio hace indispensable el uso de mascarillas para evitar lesiones o enfermedades respiratorias. Asimismo el proceso de tamizado, al estar en movimiento la malla, igualmente generó una pequeña cantidad de polvo que se eleva y que la persona puede llegar a respirar; en el presente proyecto sucedió a pequeña escala pues las cantidades que se tamizaban por cada tiraje eran pequeñas, pero en el caso que el tamizado fuera de mayor escala; igualmente mayor sería la cantidad de polvos que se elevarían en el ambiente laboral. Aspecto similar sucedió a la hora de la molienda del vidrio en la

Máquina de Abrasión de los Ángeles en la cual, una vez terminado el proceso de molienda, se lograban apreciar las cantidades de polvo que se elevaban creando una neblina tan espesa que muchas veces no se podía ver el fondo de la máquina hasta pasados unos minutos (Figura 4.7).



**Figura 4.7. Máquina de Abrasión de los Ángeles abierta recién terminado un tiraje de molienda del vidrio.**

Un proceso de molienda con cantidades de vidrio mayores generaría mucho polvo de vidrio que se levantaría y podría afectar la salud de trabajadores. No obstante, para una molienda de grandes cantidades de vidrio es indispensable tener una máquina especial para moler y triturar el vidrio la cual, la cual debería tener un sistema de extracción localizada para evitar que se forme esta nube de polvo; además un extractor puede llegar a reducir o incluso eliminar el uso de mascarillas o respiradores en este proceso.

Consecuencias a la salud por parte del polvo de vidrio, como la irritación de las vías respiratorias y dificultad de respirar pueden suceder fácilmente, inclusive si se porta EPP que no es la adecuada. Como el Ing. David Gómez (comunicación personal, Marzo 2014) afirma es necesario la realización de un Estudio de Evaluación del Riesgo con el manejo y la manipulación del vidrio, en especial cuando éste ha sido molido para conocer con claridad el EPP adecuado que el personal debiera de utilizar así como tecnologías que se pudieran utilizar para disminuir y evitar riesgos o afectaciones a la salud de las personas.

Debido a las medidas de seguridad estrictas y a los cuidados que se debe tener para el manejo del vidrio, la mezcla del vidrio molido con la arena para el agregado fijo no se recomienda para realizarse en el campo; puesto que no se puede asegurar el uso en todo momento del EPP necesario, lo que puede afectar la salud de los trabajadores o causarles daños físicos. Por lo tanto, de realizarse esta sustitución la misma debe ser realizada por las empresas productoras de cemento y morteros como un producto premezclado.

### 4.3 COMPARACIÓN ECONÓMICA DE LOS COSTOS DE LOS CONCRETOS

Dadas las premisas expuestas en la Metodología, se procedió a averiguar cuál sería el precio de venta del vidrio molido desechado como producto de venta, para lo cual se determinan los costos fijos expuestos en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2. Costos fijos para este proceso de molienda del vidrio plano.**

<b>Característica</b>	<b>Observación</b>	<b>Costo</b>
Depreciación	Valor aproximado de trituradora de martillos: $\text{C}\$13.600.000$ . Depreciación del 7% anual y vida útil de 15 años según Decreto 18455-H implicaría un costo anual de $\text{C}\$906.666,67$	$\text{C}\$75.555,56$
Salarios	Son 2 Operarios. Salario de la tabla de Salarios Mínimos del Ministerio de Trabajo: $\text{C}\$198.520$	$\text{C}\$397.040,00$
Seguros	Aproximadamente el 26,5% del salario del trabajador según el Instituto Nacional de Seguros (INS)	$\text{C}\$106.009,68$
Energía	Según el CNFL el costo por kWh para consumos menores de 3000 kWh es de $\text{C}\$126$ ; se asume uso de 8 horas diarias por 23 días laborales al mes.	$\text{C}\$52.000,00$
		<b><math>\text{C}\\$630.605,24</math></b>

\*Tipo de cambio  $\$1 = \text{C}\$540$

De la Ecuación 2 propuesta por Fernández (2010) para obtener el punto de equilibrio entre las ventas y el precio tenemos los siguientes datos:  $CF = \text{C}\$630.605,24$ ;  $C_{vu} = \text{C}\$0$  y  $P_{vu} = \text{C}\$11.500$ . El Costo de variable unitario es igual a 0 pues como se especificó en las premisas para realizar esta comparación económica, el vidrio que la empresa Extralum desecha no incurre en ningún costo pues la empresa se encarga de cubrir los gastos de transporte del desecho y dona sus desechos. El Precio de Venta Unitario dado es un costo propuesto el cual puede variar; trabajando con este valor en la Ecuación 2 se llega al punto de equilibrio vendiendo mensualmente  $55 \text{ m}^3$  del producto, es decir del vidrio molido. Este valor de

₡11.500 se propone pues el punto de equilibrio obtenido no es muy alto, por lo que se hace accesible vender el vidrio molido a este valor.

En la Tabla 4.3, se resumen entonces el costo de cada uno de los materiales necesarios para realizar este concreto, estos valores mostrados hacen referencia al costo que tienen los materiales en Ferreterías EPA.

**Tabla 4.3. Costo de la unidad de los materiales necesarios para realizar mezclas de concreto.**

<b>Material</b>	<b>Costo (₡)</b>
Cemento	6.150 cada saco de 50 kg
AG	13.500 el m <sup>3</sup>
AF	13.500 el m <sup>3</sup>
VD	11.500 el m <sup>3</sup>

**Fuente:** Valor del cemento, AG y AF son los proporcionados por Ferreterías EPA en Marzo del 2014. El valor del VD es el calculado en este proyecto.

Los precios dados hacen referencia al precio por comprar el material en la tienda, no cuenta el valor del transporte al lugar de construcción.

En las Tabla 4.4 y Tabla 4.5 se muestran las cantidades de cada agregado y de cemento para preparar el concreto con vidrio plano molido como sustituto parcial de la arena, en relación a la proporción de vidrio-arena propuesta y sus resistencias a la compresión esperadas.

**Tabla 4.4. Cantidades para obtener un metro cúbico de concreto con vidrio para la proporción de 50% VD y 50% AF**

Proporción por volumen tomando al cemento como unidad				Cantidad de materiales para 1 m <sup>3</sup> de concreto				Resistencia esperada a 28 días de edad
Cemento	AF	VD	AG	Sacos	m <sup>3</sup> AF	m <sup>3</sup> VD	m <sup>3</sup> AG	kg/cm <sup>2</sup>
1	1,500	1,500	6,000	4,400	0,243	0,243	0,972	105
1	1,250	1,250	5,000	5,130	0,236	0,236	0,944	140
1	1,000	1,000	4,000	6,150	0,228	0,228	0,912	195
1	0,750	0,750	3,000	7,700	0,214	0,214	0,854	245
1	0,500	0,500	2,000	10,250	0,189	0,189	0,756	295

Fuente: Adaptación de Tabla 2.3.

**Tabla 4.5. Cantidades para obtener un metro cúbico de concreto con vidrio para la proporción de 20% VD y 80% AF.**

Proporción por volumen tomando al cemento como unidad				Cantidad de materiales para 1 m <sup>3</sup> de concreto				Resistencia esperada a 28 días de edad
Cemento	AF	VD	AG	Sacos	m <sup>3</sup> AF	m <sup>3</sup> VD	m <sup>3</sup> AG	kg/cm <sup>2</sup>
1	2,400	0,600	6,000	4,40	0,389	0,097	0,972	105
1	2,000	0,500	5,000	5,13	0,378	0,094	0,944	140
1	1,600	0,400	4,000	6,15	0,365	0,091	0,912	195
1	1,200	0,300	3,000	7,70	0,342	0,085	0,854	245
1	0,800	0,200	2,000	10,25	0,302	0,076	0,756	295

Fuente: Adaptación de Tabla 2.3.

A partir de los costos de los agregados y del cemento según la Tabla 4.6 y de las cantidades que se requiere de cada uno de ellos según la resistencia obtenida, los costos de preparar un metro cúbico de concreto para cada una de las mezclas se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 4.6. Costo de realizar un metro cúbico de concreto dependiendo de la composición del AF.**

<b>Resistencia esperada a 28 días de edad</b>	<b>Costos (₡)</b>		
	<b>Patrón</b>	<b>Proporción 50 - 50%</b>	<b>Proporción 20 - 80 %</b>
105	46.743,00	45.892,50	46.402,80
140	50.665,50	49.839,50	50.335,10
195	56.290,50	55.492,50	55.971,30
245	64.648,50	63.901,25	64.349,60
295	78.346,50	77.685,00	78.081,90

Se observa que el costo final del concreto patrón es similar al costo del concreto con vidrio plano como AF, la diferencia de costos no es mayor al 1% para el caso de la proporción de vidrio-arena de 50-50% mientras que para la proporción 20-80% la diferencia de costos no es mayor al 0.4%. En un estudio realizado por Topçu & Canbaz (2004) donde se evaluó el vidrio desechado como AG la variación de los costos fue menor al 2.8%; es importante recalcar de estas dos comparaciones que la disminución del costo por el uso del vidrio desechado como parte de los materiales para realizar concreto no es significativa.

Como esta diferencia no resulta ser significativa, el aspecto económico no condiciona ni limita el posible uso del vidrio plano como parte de los agregados finos del concreto. Aunque un estudio de factibilidad y viabilidad económica completo es necesario, con esta comparación de costos se puede apreciar que la reutilización del vidrio plano desechado en las construcciones como parte del AF es viable de seguir estudiando y analizando, para encontrar así la sustitución ideal de arena por vidrio plano molido y el costo real de producir el concreto para valorar una posible producción en el futuro.

No obstante, se pueden generar ahorros importantes por la no disposición de los vidrios en los rellenos sanitarios. Varela (comunicación personal, Marzo 2012) mencionaba que durante ese año el costo de llevar una tonelada de desecho al relleno sanitario estaba en ₡12500, por lo que evitar que el vidrio fuera llevado al relleno sanitario reciclándolo en

Vicesa generó ahorros de hasta ₡3000000 mensuales. Tomando en cuenta que los costos de disposición en rellenos sanitarios aumentan continuamente, esta opción de reutilización del vidrio se espera genere ahorros a las empresas que trabajen con vidrio, así como darle a este una opción de disposición de largo plazo.

Además, el hecho de disminuir la cantidad de vidrios que se desechen en los rellenos sanitarios implica impactos positivos pues la vida útil de los mismos no se ve tan afectada por recibir materiales que tardan miles de años en descomponerse. Además, de una reducción del uso de recursos naturales pues el vidrio desechado puede suplir adecuadamente el uso de arenas y otros recursos naturales. Asimismo, esta opción puede aumentar la conciencia ambiental de las personas sobre el problema de los residuos sólidos y los beneficios de reutilizar y/o reciclar y de la posibilidad de buscar alternativas para reutilizar residuos sin comprometer la calidad del producto final ni los costos.



## 5 CONCLUSIONES

La utilización del vidrio molido como parte del agregado fino para la realización de morteros es muy factible. Las muestras elaboradas con vidrio plano en su composición presentaron resistencias a la compresión mayores a las obtenidas con la mezcla patrón. Además, la trabajabilidad de la pasta en estado fresco fue bastante buena, especialmente cuando se trabajó con una relación A/C de 0,48, es decir con las mezclas de V-I y V-R.

Los morteros con vidrio plano pueden ser usados para rellenos, repellos, adoquines, material de agarre, etc. Con la proporción utilizada (50% arena – 50% vidrio) puede tener gran impacto en acabados decorativos pues hay mucha partícula de vidrio que puede dar matices interesantes con la luminosidad y el reflejo de la luz, así como la diferentes tonalidades de colores.

En los concretos, los resultados de resistencia a la compresión a la edad de 28 días dieron valores similares entre todas las mezclas realizadas incluyendo la mezcla Patrón, por lo que se considera que el vidrio molido no afecta al comportamiento de la resistencia en el concreto.

Asimismo, el valor de resistencia obtenido por todas las mezclas de concreto fue mayor al descrito en la ficha técnica del cemento utilizado, por lo que vidrio sí puede aumentar la resistencia de los concretos sí se utiliza como agregado fino.

Sin embargo, los concretos tuvieron desventaja en su estado fresco pues tenían una consistencia líquida, lo que dificultó su trabajabilidad, no obstante haciendo los ajustes en la cantidad de agua de la mezcla se puede evitar que el concreto obtenga la consistencia líquida.

El Equipo de Protección Personal es indispensable para el manejo y manipulación del vidrio durante todas las fases de preparación de mezclas de mortero y/o concreto. Se observaron distintas afectaciones potenciales a la salud e integridad física de las personas que manipulan el vidrio y el concreto.

El estudio y observación continua del trabajo con el vidrio en la industria constructora, así como la realización de una Evaluación de Riesgos por una persona calificada, puede

determinar con exactitud el EPP necesario para todas las actividades para disminuir cualquier tipo de riesgo y optimizar todos los procesos en esta área de Seguridad Laboral.

La comparación de costos de producir un metro cúbico de concreto se hizo con respecto a dos proporciones distintas del vidrio y arena como agregados finos, la de 50% vidrio – 50% arena estudiada en este proyecto y la de 20% vidrio – 80% arena propuesta por Ismail & Al-Hashmi en su estudio. Para la primera proporción la diferencia de costos no es mayor al 1% y para la segunda no alcanza el 0,5%. Por lo tanto, el aspecto económico no se vuelve una limitante para la reutilización del vidrio desechado como parte de los agregados finos del concreto.

Son entonces las características técnicas requeridas para una construcción específica las que se tienen que buscar cumplir a la hora de utilizar estas mezclas de concreto, por lo que la continuación del estudio del vidrio como AF es factible.

Consecuentemente, la propuesta de generar una simbiosis ambiental entre la industria manufacturera del vidrio plano y el sector de Construcción, por medio de la introducción de los residuos del vidrio como agregado fino, se convierte inicialmente en viable y meritoria de seguir estudiando y evaluando. Esto sería un avance importante en la Gestión de Residuos Sólidos y la Producción Más Limpia, pues se disminuirían costos de disposición de los vidrios, el impacto que las grandes cantidades de vidrios que son desechadas generan en los rellenos sanitarios se vería disminuido, se le daría una solución de largo plazo a la disposición de los vidrios y se podría disminuir la utilización de materia prima proveniente de fuentes naturales en la industria de la construcción

Esto por cuanto, como se ha mostrado, la reutilización de este residuo genera impactos positivos en el mortero y para el concreto no se observó ninguna afectación en su estado endurecido.

Optimizando la proporción de arena-vidrio a utilizarse para obtener concretos y morteros con las mejores características, se podría cuantificar con exactitud las cantidades de vidrio plano que se pueden evitar que terminen en un relleno sanitario. Esto implicaría un impacto positivo para el medio ambiente pues el vidrio puede durar hasta varios miles de años en descomponerse naturalmente, convirtiéndose en una manera de disponer este residuo más

óptima y con un reuso a largo plazo; lo que a su vez implicaría en una disminución en la disposición de estos residuos en rellenos sanitarios, ayudando con la vida útil de los mismos. Además, se incurre a su vez en la reducción del uso de recursos naturales como las arenas para agregado fino en los morteros y concretos; así como otros compuestos si se estudia la utilización del vidrio plano molido como sustituto del cemento como lo han realizado otros autores.

## 6 RECOMENDACIONES

Primeramente se recomienda la continuidad de este estudio pues se demuestra que la utilización del vidrio plano como parte del agregado fino mantiene la resistencia a la compresión en igualdad con las mezclas patrón y en algunos casos las llegó a aumentar.

Sin embargo, se recomienda disminuir la cantidad de vidrio utilizado, en especial para la realización de concreto puesto que se observó una cantidad tan elevada de vidrio como agregado fino desfavorece la consistencia y la trabajabilidad de la mezcla convirtiéndola en una mezcla muy líquida y disminuyendo las posibilidades de uso del concreto realizado.

Disminuyendo la proporción del vidrio utilizado en la mezcla, se puede estudiar cuál es la proporción de estos componentes que optimiza las características de los concretos y morteros tanto en los estados fresco y endurecido; además de que se pueden disminuir los riesgos potenciales a la salud e integridad físicas de las personas por manipulación del vidrio

Debido variables en las que se puede incurrir por la realización de las muestras de concreto por diferentes personas en cada ocasión, afectando la repetitividad y la reproducción de las muestras, se recomienda establecer un equipo de trabajo para la realización de las mezclas, así como elaborar más muestras de cada edad.

Otro aspecto a considerar es realizar pruebas en donde se mezclen todos los vidrios de desecho. Esto por cuanto a empresas, como por ejemplo Extralum, resulta más complicada la separación individual de cada tipo de vidrio.

De contarse con un equipo adecuado para moler el vidrio, se podría estudiar disminuir el tamaño de las partículas de vidrio. La recomendación se hace a partir que el concreto de V-R, que presentaba más polvo, bajo el revenimiento del concreto a pesar de haber utilizado la misma A/C; además de Castro & de Brito (2013) confirman esta recomendación pues concluyen que partículas grandes de vidrio disminuyen la trabajabilidad de las mezclas y aumentan la relación A/C. Agregado a esto Jani & Hogland (2014) concluyeron que entre menor sea el tamaño de partícula del vidrio molido la resistencia a la compresión aumenta y Vijayakumar *et al* (2013) consideran que disminuyendo el tamaño de las partículas del

vidrio se evita la reacción alkali-silica; por lo que se recomienda evaluar tamaños menores de partícula. Se podría utilizar el tamiz #8 como en el proyecto realizado por Cordero et al (2012) donde las resistencias de los morteros con vidrio espejo fueron mucho mayores a las obtenidas de los morteros patrones.

No obstante, para el caso de morteros podría mantenerse el tamaño de partícula y evaluar la utilización de éstos para fines decorativos, especialmente el espejo o los vidrios de colores. En el estudio realizado por Shi & Zheng (2007) se habla sobre una investigación en morteros donde la sustitución de hasta el 70% de arena por vidrio era factible pues no se notaron efectos negativos en las mezclas y al contrario se vieron mejoras en el rendimiento mecánico; sin embargo hay que tomar en consideración que el tamaño del vidrio molido era más fino del utilizado en la realización de este proyecto.

Se debe evaluar otros aspectos importantes de la construcción en los que la utilización del vidrio como parte de la mezcla puede llegar a tener algún efecto, por ejemplo la afectación a largo plazo a otros materiales utilizados en la construcción como las varillas. Además, es necesario evaluar otras características de los concretos como las que mencionan Kostmaka *et al* (2004): resistencias a la tensión, a la flexión, a la torsión y el módulo de elasticidad.

De experimentar con otras proporciones de vidrio-arena, con la que se optimice las características de los concretos y morteros se debe estudiar el efecto de la reacción Alkali-Silica, la cual según Cassar & Camilleri (2012) es de los mayores problemas del uso de vidrio de desecho como agregado ya que genera grietas en el concreto.

Los mismos autores hacen una comparación de concretos realizados con dos técnicas diferentes para disminuir el tamaño del vidrio: la tradicional mediante el triturado y otra por medio de implosión; dando mejores resultados la segunda además que les facilitó la manipulación del vidrio (eliminó riesgos de afectaciones físicas en la manipulación, requirió menos energía, el material resultante era de mejor calidad y disminuye costos de mantenimiento del equipo); por lo que se podría considerar como una opción de equipo a utilizar.

Es recomendable también que se realice un Estudio de Evaluación del Riesgo del manejo y manipulación del vidrio para conocer qué EPP se debe utilizar en cada proceso. Así como

un trabajo conjunto para optimizar los procesos con el objetivo de disminuir los riesgos implícitos de trabajar con vidrio en polvo. Asimismo, una optimización

De manera similar, es necesario realizar un estudio de factibilidad y viabilidad económica completo para conocer la verdadera inversión que habría que realizarse para poder sacar el producto al mercado.

Por otra parte, sería importante tomar en cuenta que existen estudios realizados a la fecha en donde el vidrio molido sustituye parcialmente al cemento y no a la arena, esta nueva sustitución puede traer mayores beneficios económicos si resulta ser factible en la parte técnica, por lo que se podría tomar en cuenta para futuros estudios.

## 7 REFERENCIAS

- Araya, M. (1998). *Control de calidad del concreto estructural y del mortero de pega en viviendas*. San Pedro, Costa Rica: Tesis de Licenciatura Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
- Araya, M. (2012). *Manual de Concreto*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Araya, M. (Julio - Diciembre de 2013). Dosificación de concretos. *Ingeniería en Construcción*, 1(1), 24-29.
- ASTM C 109. (2013). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. United States: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C 136. (2006). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate*. United States: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C 143. (2012). *Slump of Hydraulic Cement Concrete*. United States: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C 192. (2013). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. United States: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C 305. (2013). *Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. United States: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C 31. (2012). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. United States: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C 33. (2013). *Standard Specifications for Concrete Aggregates*. United States: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C 39. (2012). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. United States: American Society for Testing and Materials.
- ASTM E 1132. (2013). *Standard Practice for Health Requirements Relating to Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica*. United States: American Society for Testing and Materials.
- ASTM E 2625. (2009). *Standard Practice for Controlling Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica for Construction and Demolition Activities*. United States: American Society for Testing and Materials.

- Cassar, J., & Camilleri, J. (2012). Utilisation of imploded glass in structural concrete. *Construction and Building Materials*, 29, 299-307.
- Cátedra de Construcción. (2002). *Construcción 1: Morteros*. Facultad de Arquitectura, Universidad de la República, Departamento de Enseñanzas de las Tecnologías de la Construcción, Montevideo, Uruguay.
- Cemex. (s.f.). *Hoja de Seguridad de Material: Cemento Portland*. Cemex Dominicana.
- Chiu Leung, C., Tak Sun Yu, I., & Chen, W. (Mayo de 2012). Silicosis. *The Lancet*, 379(9830), 2008-2018.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2011). *Código Sísmico de Costa Rica 2010*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Cordero, M. (2004). *Calidad de Agregados para Concreto*. Cartago: Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Cordero, M., Gómez, A. L., & Vargas, D. (2012). *Vidrios planos*. Ingeniería Ambiental, Tecnológico de Costa Rica, Proyecto Final del curso de Gestión de Residuos Sólidos, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- de Castro, S., & de Brito, J. (2013). Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 41, 7-14.
- Emam Ali, E., & Al-Tersawy, S. (2012). Recycled glass as a partial replacement for the fine aggregate in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 785-791.
- Federico, L., & Chidiac, S. (2009). Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete - Critical review of treatment methods. *Cement & Concrete Composites*, 31, 606 - 610.
- Fernández Espinoza, S. (2010). *Los proyectos de inversiones*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- García, D. (2012). *Cristal vs Vidrio*. Recuperado el Mayo de 2013, de <http://dimetilsulfuro.es/2012/09/03/cristal-vs-vidrio/>
- Holcim. (2005). *Hoja de Datos de Seguridad del Material: Cemento Portland*. Holcim Ltd.
- Holcim. (2011). *Ficha de Datos de Seguridad de Cementos: Cemento Portland*. Holcim Ltd.



- Ingianna, C., Pérez, V., & Torrentes, G. (2002). *Proyecto de Graduación: Concretos livianos a base de desechos*. Cartago: Escuela de Ingeniería en Construcción, Tecnológico de Costa Rica.
- Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto. (2004). *Tipos de cemento y sus usos*. Recuperado el Junio de 2013, de <http://www.iccyc.com/pagecreator/paginas/TIPOS%20DE%20CEMENTO%20Y%20US%20USOS.pdf>
- Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto. (2009). *Manual de Consejos prácticos sobre concreto*. Recuperado el Junio de 2013, de <http://www.iccyc.com/pagecreator/paginas/userFiles/Manual%20Consejos%20ICC%202009.pdf>
- IPAQ Verre Recycle. (2008). *Glass Powder Safety Sheet*. Recuperado el Marzo de 2014, de [http://www.ipaq-recycling.fr/version-gb/documents\\_gb/GLASS%20POWDER%20SAFETY%20DATASHEET.pdf](http://www.ipaq-recycling.fr/version-gb/documents_gb/GLASS%20POWDER%20SAFETY%20DATASHEET.pdf)
- Ismail, Z., & Al-Hashmi, E. (2009). Recycling of waste glass as partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 29, 655 - 659.
- Jani, Y., & Hogland, W. (2014). Waste glass in the production of cement and concrete. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- Khatib, J., Negim, E., Sohl, H., & Chileshe, N. (2012). Glass powder utilisation in concrete production. *European Journal of Applied Sciences*, 4(4), 173 - 176.
- Kostmaka, S., Kerkhoff, B., Panarese, C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. México DF: Portland Cement Association.
- Ling, T.-C., Poon, C.-S., & Wong, H.-W. (2013). Management and recycling of waste glass in concrete products: Current situations in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 70, 25 - 31.
- López, T., & Martínez, A. (1995). *El mundo mágico del vidrio*. Recuperado el Mayo de 2013, de <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/137/html/mundoma.html>
- Mari, E. (1995). Ecology: Glass recycling and environmental pollution. *Glass Machinery Plants and Accesories*, 93 - 97.

- Meyer, C., Egosi, N., & Andela, C. (19 de March de 2001). Concrete with waste glass as aggregate. *International Symposium Concrete Technology Unit of ASCE and University of Dundee*.
- Ministerio de Salud. (2010). *Ley N°8839 para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS)*. San José: Publicada en La Gaceta 135 del 13 de Julio del 2010.
- New Jersey Department of Health. (2010). *Hoja Informativa sobre Sustancias Peligrosas: Sílice*. Recuperado el Marzo de 2014, de <http://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1657sp.pdf>
- NIOSH. (2002). *NIOSH Hazard Review: Health Effects of Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica*. Ohio, Estados Unidos: Center for Diseases Control and Prevention.
- Schwarz, N., Cam, H., & Neithalath, N. (2008). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement & Concrete Composites*, 30, 486 - 496.
- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., & Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30, 91 - 100.
- Shayan, A., & Xu, A. (2004). Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 81 - 89.
- Shi, C., & Zheng, K. (2007). A review on the use of waste glass in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation & Recycling*, 52, 234 - 247.
- Topçu, I., & Canbaz, M. (2004). Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 267 - 274.
- Trifunovic, M. (s.f.). *¿Cómo hacer un buen concreto?* Recuperado el Mayo de 2013, de Holcim: [http://www.holcim.cr/uploads/CR/Como\\_hacer\\_concreto\\_en\\_obra.pdf](http://www.holcim.cr/uploads/CR/Como_hacer_concreto_en_obra.pdf)
- Triturados Barcelona. (2002). *Ficha Técnica de Seguridad de la Arena de Sílice*. Recuperado el Marzo de 2014, de [http://0101.nccdn.net/1\\_5/169/0e0/2c0/SILICE-FICHA-SEGURIDAD.pdf](http://0101.nccdn.net/1_5/169/0e0/2c0/SILICE-FICHA-SEGURIDAD.pdf)
- Vijayakumar, G., Vishaliny, H., & Govindarajulu, D. (2013). Studies on glass powder as partial replacement of cement and concrete production. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(2), 153 - 157.

Williams, N. (2010). *Evaluación de la adición de vidrio del panel frontal de tubos de rayos catódicos en la elaboración de concreto*. San Pedro, Costa Rica: Tesis de Licenciatura de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica.

## **ANEXOS**

# ANEXO 1: FICHA TÉCNICA DEL CEMENTO CEMEX SANSÓN UG DE ALTO DESEMPEÑO



## CEMENTO PARA USO GENERAL

**NOMBRE:** Sansón UG  
**TIPO DE CEMENTO:** Tipo UG según RTCR 383:2004

### USOS Y APLICACIONES

Morteros y concretos de uso general. Ideal para estructuras que no requieren alta resistencia inicial.

### DATOS TÉCNICOS

Cumple con los requisitos del Reglamento RTCR 383:2004, como cemento tipo UG  
 Su fabricación es controlada por un Sistema de Calidad Certificado ISO 9001, ISO 14001 y ISO 17025

#### Requerimientos Químicos (RTCR 383:2004)

	Valores Máximos
MgO, %	6
SO <sub>3</sub> , %	4

#### Requerimientos Físicos (RTCR-383)

	Valores Reglamento		Valores Minimos Reglamento
Exp.Autoclave, %	0.80 máx		
Fraguado Inicial, min	45 min	3 días, MPa.	10
Fraguado Final, min	420 máx	7 días, MPa.	17
		28 días, MPa.	28

### COMPONENTES

Clinker Gris  
 Yeso  
 Adiciones Activas  
 Otros minoritarios

### BENEFICIOS

Mayor durabilidad en todo tipo de obras, especialmente en zonas costeras  
 Reduce el riesgo de fisuras y contracciones

### EMBALAJE Y ALMACENAMIENTO

Se suministra en sacos de 50 kg o a granel  
 Consérvese en un lugar seco y evite el contacto directo con el suelo y/o paredes

### RECOMENDACIONES DE USO

Controle el agua de mezclado. El exceso disminuye la resistencia del concreto  
 Verifique el grado de finura y humedad de la arena para ajustar su mezcla  
 Controle las proporciones definidas de los materiales utilizados en su mezcla

Ficha técnica del cemento Sansón UG proporcionada por Luis Ernesto Baltodano Segura,  
 Control de Calidad y Medio Ambiente, Cemex, Costa Rica.



**Figura Ax.1.1. Cemento utilizado para la realización de los morteros y del concreto**

## ANEXO 2: DATOS DE SEGURIDAD

### Sílice

El vidrio es un sólido amorfo (sin orden molecular) y su componente principal es el silicio, en forma de óxido ( $\text{SiO}_2$ ), además de otros óxidos como el de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y el de calcio ( $\text{CaO}$ ). Por lo tanto, los átomos que constituyen el vidrio se encadenan entre sí por medio del calor y se forma finalmente un sistema rígido en el que un átomo de Si se une a átomos de O y también con átomos de Ca y Na (López & Martínez, 1995).

En la Tabla Ax.2.1 se aprecian algunas de las características físicas-químicas del polvo de vidrio.

**Tabla Ax.2.1. Características físico-químicas del polvo de vidrio.**

<b>Apariencia</b>	Polvo grisáceo-verdusco	<b>Explosividad</b>	NA
<b>Olor</b>	No tiene olor	<b>Presión de vapor</b>	NA
<b>Estado físico</b>	Sólido (polvo)	<b>Densidad de vapor</b>	NA
<b><math>\text{SiO}_2</math></b>	>71%	<b>Punto de ebullición</b>	NA (>1000 °C)
<b>Solubilidad en agua</b>	Insoluble en agua	<b>Punto de fusión</b>	850 °C
<b>Punto de inflamación</b>	NA	<b>Gravedad específica</b>	1,5 g/cm <sup>3</sup>

Fuente: (IPAQ Verre Recycle, 2008)

El polvo de sílice no es inflamable, ni reactivo pero sí presenta una potencial afectación a la salud. Realmente la sílice en su fracción respirable si una persona la inhala de manera prolongada y/o en grandes cantidades puede causar enfermedades respiratorias como la silicosis; también la IARC (Agencia Internacional de Investigación contra el Cáncer, por sus siglas en inglés) considera a la sílice cristalina como potencial cancerígeno pulmonar, aunque recalca que no en todas las condiciones de trabajo puede llegar a ser cancerígeno. Además, la sílice cristalina respirable puede agravar otras enfermedades respiratorias como el asma, bronquitis crónica, enfisema, anomalías de función pulmonar, etc. (Triturados Barcelona, 2002; NIOSH, 2002; New Jersey Department of Health, 2010).

La silicosis Chiu Leung, Tak Sun Yu, & Chen (2012) la definen como una enfermedad pulmonar fibrótica provocada por la inhalación de la sílice. Es una enfermedad ocupacional de gran impacto en las industrias, sin embargo las medidas de protección como el control del polvo y el uso de respiradores ha provocado una disminución en los índices de mortalidad debido a la silicosis en las últimas décadas. Tanto en el artículo publicado por Chiu Leung et al como en el informe de la NIOSH del 2002 se pueden observar la gran

cantidad de industrias que sus trabajadores potencialmente pueden verse afectados por esta enfermedad.

El factor más importante para el desarrollo de silicosis es la dosis de sílice respirable en el ambiente de trabajo, además de otros factores como el tamaño de la partícula, la naturaleza del sílice, la duración de la exposición al polvo de sílice y el periodo del diagnóstico de la enfermedad el cual puede durar de varios meses hasta varios años (NIOSH, 2002).

Por otra parte, en contactos cortos se puede generar irritación en los ojos y en las mucosas de la nariz. Para su manipulación es importante evitar la formación de polvo y manipularlo en lugares ventilados y con EPP adecuada, además se recomienda no barrer los restos de polvo en seco si no utilizar una aspiradora o humedecer la zona a limpiar y usar siempre anteojos de seguridad.

Por lo tanto se debe evitar un trabajo irresponsable con el vidrio plano molido y siempre utilizar el EPP adecuado para que no haya afectaciones a los trabajadores, siguiendo las normas que han sido previamente establecidas y las recomendaciones que documentos estandarizados como la ASTM E1132 y la ASTM E2525 y los de NIOSH ofrecen para asegurar una calidad de trabajo ideal, evitando o minimizando impactos negativos a la salud de los trabajadores. Como lo menciona la NIOSH en su Hazard Review: “Occupational exposure to respirable crystal-line silica is a serious but preventable health hazard” (NIOSH, 2002).

### **Cemento**

En la Tabla Ax.2.2 se aprecian las principales propiedades físico-químicas del cemento Tipo I, es decir el cemento Portland.

**Tabla Ax.2.2. Propiedades físicas y químicas del cemento Portland**

<b>Apariencia</b>	Polvo grisáceo	<b>Presión de vapor</b>	NA
<b>Olor</b>	No tiene olor	<b>Densidad de vapor</b>	NA
<b>Estado físico</b>	Sólido (polvo)	<b>Punto de ebullición</b>	NA (>1000 °C)
<b>pH</b>	12 – 13	<b>Punto de fusión</b>	NA
<b>Solubilidad en agua</b>	Leve (0.1 – 1%)	<b>Gravedad específica</b>	3.15 g/cm <sup>3</sup>
<b>Tasa de evaporación</b>	NA		

Fuentes: (Cemex, s.f.; Holcim, 2005)



Por su parte, para la identificación de peligros se tiene que el cemento es corrosivo y puede causar quemaduras severas, puede ser tóxico y dañino si se inhala constantemente, no es ni inflamable ni comburente ni explosivo.

Los posibles efectos en la salud de las personas se describen a continuación (Cemex, s.f.; Holcim, 2005):

- En los ojos el polvo puede causar irritación. Si las cantidades de contacto ojo-cemento seco son elevadas o los tiempos de exposición son prolongados, o bien hay contacto del ojo con cemento húmedo, se puede causar irritaciones moderadas, quemaduras químicas e inclusive ceguera.
- Si hay contacto con la piel el cemento puede causar resequedad de la piel, irritación, quemaduras químicas (cáusticas), alergias y dermatitis. Las quemaduras se dan por exposiciones prolongadas al cemento húmedo o al cemento seco si la piel está húmeda (inclusive debido al sudor); en estos dos casos descritos también se puede provocar engrosamiento, ruptura o agrietamiento de la piel. Hay personas que reaccionan al primer contacto con el cemento mientras que otras tienen los efectos después de años de estar en contacto con el cemento (sin utilizar protección adecuada y en constante contacto con el cemento húmedo).
- Por ingestión de largas cantidades de cemento se puede causar quemaduras químicas en la boca, garganta y estómago.
- Por inhalación el mayor problema resulta debido a la presencia de sílice cristalino, la exposición prolongada a este compuesto puede agravar afecciones pulmonares ya existentes en las personas y puede causar silicosis. El riesgo de lesión o enfermedades va a depender de la duración y el grado de exposición. Exposiciones cortas al cemento pueden generar irritación de las membranas mucosas de la nariz, en la garganta y en las vías respiratorias superiores.
- El cemento no es considerado cancerígeno, sin embargo la sílice cristalino sí lo es, pero este compuesto está en pequeñas cantidades en el cemento.

### ANEXO 3: DATOS TÉCNICOS DE LA TRITURADORA DE VIDRIO A UTILIZAR

Para la estimación de costos, se propone la utilización de una trituradora de vidrio. Esta máquina para la molienda de vidrio sería proporcionada por Maquinaria para Reciclaje de Soluciones Eco-rentables S.A. la cual tiene las siguientes características técnicas (Figura Ax.3.1).



Motor	2,2 kW (3Hp)
Energía	TRIFÁSICO 220V 60Hz
Sistema de molienda	Diez (10) martillos móviles en acero 41-40 templados
Estructura	Tubo cuadrado de 1 ½" Cr Cold Roller laminado frio
Medidas de la cámara de molido (milímetros)	300 x 300
Transmisión de potencia	Poleas y volante
Diámetro del rotor (milímetros)	120
Diámetro de la boca de la tolva (milímetros)	280
Niveladores	4
Acabados	Pintura electrostática
Diámetro de los pasos de la criba (milímetros)	50
Rendimiento promedio (Kilogramos /hora)	500
Sistema de bloqueo eléctrico por apertura de la cámara de molido	SI
Sistema de parada de emergencia	SI
Tapa de seguridad de la tolva	SI
Peso (Kilogramos)	220
Medidas del molino (milímetros)	600 x 740 x 1750

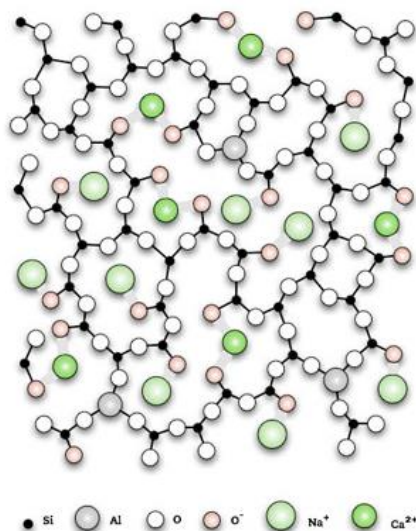
Figura Ax.3.1. Características técnicas del Molino para vidrio de la empresa Maquinaria para Reciclaje.

Fuente: Mario Silva, Maquinaria para Reciclaje de Soluciones Eco-rentables S.A.

## ANEXO 4: EL VIDRIO PLANO EN COSTA RICA

El vidrio es un sólido amorfo (sin orden molecular) y el componente principal es el silicio, en forma de óxido ( $\text{SiO}_2$ ), además de otros óxidos como el de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y el de calcio ( $\text{CaO}$ ) (López & Martínez, 1995).

Para la fabricación del vidrio hay que fundir el  $\text{SiO}_2$  que es materia prima esencial, sin embargo éste compuesto funde a temperaturas de hasta  $1700\text{ }^\circ\text{C}$  por lo que se le añade el  $\text{Na}_2\text{O}$  para reducir el punto de fusión, además de la viscosidad; el  $\text{CaO}$  se añade para darle estabilidad a la mezcla realizada y evitar que cuando el vidrio solidifique reorganice su formación molecular en estructuras cristalinas organizadas, ya que la estructura amorfa del vidrio es lo que ayuda a manejar y modelar los vidrios (García, 2012). En ocasiones se puede añadir también otros compuestos como aluminio o magnesio. Por lo tanto, los átomos que constituyen el vidrio se encadenan entre sí por medio del calor y se forma finalmente un sistema rígido en el que un átomo de Si se une a átomos de O y también con átomos de Ca y Na (Figura Ax.4.1).



**Figura Ax.4.1. Composición molecular del vidrio**

Fuente: (García, 2012)

El vidrio es un material 100% reciclable que además se puede reciclar varias veces ya que no pierde sus propiedades. Su reciclado implica ventajas un ahorro de energía y disminución de la materia prima necesaria para producir vidrio nuevo, disminución de la

contaminación del aire y del agua, aumento de la vida útil de los rellenos sanitarios, ahorros económicos, entre otras.

Por otra parte, el vidrio puede tardar miles de años en descomponerse en la naturaleza por sí solo, por lo que es importante su reutilización y su reciclado. Esta larga degradabilidad del vidrio se debe a que los vidrios son prácticamente inertes frente al agua, a soluciones acuosas y a cualquier sustancia química, inorgánica u orgánica; son disueltos sólo “por el ácido fluorhídrico y son atacados por el ácido fosfórico caliente o por hidróxidos alcalinos concentrados; y ninguna de estas sustancias existe en los suelos” (Mari, 1995).

En Costa Rica, la Vidriera Centroamericana S.A. (Vicesa) es la mayor compañía que recibe el vidrio desechado, el cual es incorporado como materia prima en la elaboración de las botellas y como parte de otros procesos operativos. Vicesa recibe mayormente los envases de vidrio pues éstos presentan mayor facilidad para ser reciclados; los vidrios planos presentan mayor dificultad para ser reciclados al estar fabricados con mezclas de varios metales, plásticos o resinas. Sin embargo en los últimos años ha recibido también los vidrios planos, lo que ha ayudado a mejorar la situación ambiental de estos tipos de vidrios en el país y ha ayudado con la disposición de los desechos de las vidrieras del país.

Tal es el caso de la empresa Extralum, la cual se dedica a la manufactura, transformación y comercialización de múltiples tipos de vidrio de plano, entre ellos los vidrios: incoloros, de color, templados, grabados, mateados, arenados, laminados, reflectivos, espejos, de baja emisividad, de doble vidriado y el vidrio armado.

Desde la entrada en vigencia de la Ley GIRS, Vicesa ha estado recibiendo desechos de vidrios planos de varios de los tipos de vidrio que se manejan en la compañía, situación que ha disminuido considerablemente las cantidades de vidrio que se disponían en el relleno sanitario. Por ejemplo, en la empresa para septiembre del 2011 se disponían 214 toneladas de vidrio en el relleno sanitario y solo 82 toneladas eran recicladas, pero para marzo del 2012 la situación se revirtió para dar lugar a 225 toneladas recicladas y solamente 73 toneladas en el relleno sanitario. Dicha situación no solo concluyó en un beneficio ambiental sino también en uno económico pues la empresa, solo en el mes de marzo del

2012 se logró ahorrar más de tres millones de colones por el reciclado de sus residuos (Varela, comunicación personal, Abril 2012).

Sin embargo, a pesar de esta gran disminución de residuos llevados al relleno sanitario, aún queda mucho trabajo por hacer con el resto del vidrio que no puede ser procesado para ser reciclado, es necesario buscar su revaloración y reutilización en otros procesos, razón por la cual es necesaria la investigación y se propuso este proyecto, para buscar una alternativa a las toneladas de vidrio que siguen llegando a los rellenos sanitarios diariamente.

## **APÉNDICE**

## APÉNDICE 1: DATOS EXPERIMENTALES

En la Tabla Ap.1.1 se muestran las dosificaciones utilizadas para las realizaciones de las mezclas de los morteros.

**Tabla Ap.1.1. Dosificación de las mezclas de los morteros realizados**

<b>Muestra</b>	<b>Cemento (kg)</b>	<b>Arena (kg)</b>	<b>Vidrio (kg)</b>
V-E	1,25	1,75	1,75
V-I	1,25	1,75	1,75
V-R	1,25	1,75	1,75
Patrón	1,25	3,50	---

Fuente: Ing. Mauricio Araya.

Por su parte, la Tabla Ap.1.2 muestra las dosificaciones que fueron utilizadas para elaborar las mezclas de concreto.

**Tabla Ap.1.2. Dosificaciones de las mezclas de los cilindros de concreto realizados.**

<b>Muestra</b>	<b>Cemento (kg)</b>	<b>Arena (kg)</b>	<b>Vidrio (kg)</b>	<b>Piedra (kg)</b>
V-E	62,50	56,25	56,25	112,50
V-I	62,50	56,25	56,25	112,50
V-R	62,50	56,25	56,25	112,50
Patrón	62,50	112,50	---	112,50

Fuente: Ing. Mauricio Araya.

Se puede apreciar que el agregado fino de las mezclas elaboradas se dividió en un 50% de arena (agregado fino tradicional) y un 50% del vidrio plano molido correspondiente.

La proporción que se utilizó en la elaboración de los morteros fue 1:2.8, es decir por cada medida de cemento se agregaron 2.8 medidas de agregado fino. La proporción utilizada para el concreto fue de 1:1.8:1.8, es decir por cada medida de cemento se agregaron 1.8 medidas de agregado fino y 1.8 medidas de agregado grueso.

En cuanto al agua agregada, para los morteros se agregó 500 ml para la mezcla V-E y 600 ml para las demás mezclas; para los concretos se agregaron 33.25 kg de agua obteniendo relaciones A/C de 0,53 aproximadamente para los concretos y de 0,4 para los morteros de la mezcla V-E y de 0,48 para los morteros de las otras mezclas.

En la Tabla Ap.1.3 y la Tabla Ap.1.4 se muestran los resultados experimentales de las pruebas de resistencia a la compresión de los morteros y concretos respectivamente.

**Tabla Ap.1.3. Resultados experimentales de las resistencias a la compresión de los cubos de morteros.**

Muestra	Día																			
	3				7				14				28				56			
	kgf	kg/cm <sup>2</sup>	Prom.	Desv.	kgf	kg/cm <sup>2</sup>	Prom.	Desv.	kgf	kg/cm <sup>2</sup>	Prom.	Desv.	kgf	kg/cm <sup>2</sup>	Prom.	Desv.	kgf	kg/cm <sup>2</sup>	Prom.	Desv.
V-E	6325	261			6850	283			9750	403			11450	473			12675	524		
	6150	254	256	5	6625	274	274	9	10075	416	417	14	11325	468	462	16	11850	490	507	24
	6125	253			6400	265			10425	431			10725	443				0		
V-I	5325	220			6525	270			9250	382			9475	392			10850	448		
	5000	207	220	13	7200	298	283	14	8650	357	375	16	10150	419	410	16	10725	443	455	15
	5625	232			6800	281			9350	386			10100	417			11425	472		
V-R	5025	208			6925	286			8125	336			10650	440			10700	442		
	4900	203	207	4	6975	288	286	3	9025	373	356	19	10475	433	440	8	10775	445	444	2
	5100	211			6825	282			8725	361			10850	448			10725	443		
Patrón	5050	209			8200	339			9525	394			9575	396			9975	412		
	4975	206	202	9	8925	369	352	15	8825	365	374	17	9675	400	391	13	10675	441	442	30
	4650	192			8450	349			8800	364			9100	376			11425	472		

\*La primera falla de V-I se hizo a 4 días.

**Tabla Ap.1.4. Resultados experimentales de las resistencias a la compresión de los cilindros de concreto.**

Muestra	Día																			
	3*				7				14				28				56			
	MPa	kg/cm <sup>2</sup>	Prom	Desv	MPa	kg/cm <sup>2</sup>	Prom	Desv	MPa	kg/cm <sup>2</sup>	Prom	Desv	MPa	kg/cm <sup>2</sup>	Prom	Desv	MPa	kg/cm <sup>2</sup>	Prom	Desv
V-E	12,10	123,40			19,51	198,96			19,19	195,70			31,24	318,59			32,32	329,60		
	11,36	115,85	119,32	4	19,04	194,17	181,18	2	17,41	177,55	207,12	37	30,52	311,24	307,20	14	39,20	399,76	363,22	35
	11,64	118,70			14,75	150,42			24,33	248,12			28,61	291,76			35,33	360,30		
V-I	8,72	88,93			17,34	176,83			22,30	227,42			31,60	322,26			32,00	326,34		
	8,82	89,95	88,69	1	14,72	150,11	168,13	16	24,11	245,87	233,64	11	28,80	293,70	312,74	16	35,50	362,03	352,20	23
	8,55	87,19			17,40	177,45			22,32	227,62			31,60	322,26			36,11	368,25		
V-R	11,73	119,62			16,26	165,82			24,67	251,58			30,63	312,36			37,34	380,79		
	9,99	101,88	110,21	9	17,09	174,28	163,64	12	20,71	211,20	225,82	22	30,62	312,26	308,01	7	37,72	384,67	384,06	3
	10,70	109,12			14,79	150,83			21,05	214,67			29,36	299,41			37,92	386,71		
P	6,87	70,06			15,65	159,60			23,34	238,02			30,03	306,25			35,05	357,44		
	6,57	67,00	70,37	4	15,48	157,87	163,58	8	23,24	237,00	235,74	3	30,80	314,10	310,80	4	36,08	367,94	350,44	22
	7,26	74,04			16,99	173,26			22,77	232,21			30,60	312,06			31,96	325,93		



\*La primera falla de P y V-I se realizó a 2 días.

En la Tabla Ap.1.5, Tabla Ap.1.6 y Tabla Ap.1.7 se muestran los costos obtenidos de realizar un metro cúbico de concreto tanto patrón como con las distintas proporciones de AF, incluyendo el costo de cada material.

**Tabla Ap.1.5. Costo de preparar un metro cúbico de concreto con arena como único AF.**

Resistencia esperada a 28 días de edad kg/cm <sup>2</sup>	Costos de los materiales (₡)			Costo total (₡)
	Cemento	AF	AG	
105	27.060,00	6.561,00	13.122,00	46.743,00
140	31.549,50	6.372,00	12.744,00	50.665,50
195	37.822,50	6.156,00	12.312,00	56.290,50
245	47.355,00	5.764,50	11.529,00	64.648,50
295	63.037,50	5.103,00	10.206,00	78.346,50

**Tabla Ap.1.6. Costo de preparar un metro cúbico de concreto con una proporción del 50% VD y 50% AF.**

Resistencia esperada a 28 días de edad kg/cm <sup>2</sup>	Costos de los materiales (₡)				Costo total (₡)
	Cemento	AF	VD	AG	
105	27.060,00	3.280,50	2.794,50	13.122,00	46.257,00
140	31.549,50	3.186,00	2.714,00	12.744,00	50.193,50
195	37.822,50	3.078,00	2.622,00	12.312,00	55.834,50
245	47.355,00	2.882,25	2.455,25	11.529,00	64.221,50
295	63.037,50	2.551,50	2.173,50	10.206,00	77.968,50

**Tabla Ap.1.7. Costo de preparar un metro cúbico de concreto con una proporción del 20% VD y 80% AF.**

Resistencia esperada a 28 días de edad kg/cm <sup>2</sup>	Costos de los materiales (₡)				Costo total (₡)
	Cemento	AF	VD	AG	
105	27.060,00	5.248,80	1.117,80	13.122,00	46.548,60
140	31.549,50	5.097,60	1.085,60	12.744,00	50.476,70
195	37.822,50	4.924,80	1.048,80	12.312,00	56.108,10
245	47.355,00	4.611,60	982,10	11.529,00	64.477,70
295	63.037,50	4.082,40	869,40	10.206,00	78.195,30