

**Estudio de Vidrio  
Reciclado como  
componente para la  
Elaboración de Cementos  
Terciarios**



# Abstract

With cement production accounting for approximately 9% of the industrial production of greenhouse gases, and in order to generate alternative cementitious materials, this project presents the results of research aimed at developing cementants that potentially represent an environmentally sustainable alternative in civil construction.

Combinations of different dosages of Glass Powder (GP, terminology taken from the publication "Performance of Glass-Powder concrete in Field Sites" from the 13<sup>o</sup> conference of ACI) were used to evaluate and study the compressive and tensile strength, as well as time of setting and normal consistency in mortars.

The results obtained show that the strengths of the mixtures of cement and GP are suitable for a large number of applications in civil construction, and although in several cases the samples with GP do not have the same mechanical properties as their homologues (the results of some specimens are below their control without GP), the results obtained showed great potential for certain industrial applications.

In addition to the compressive and tensile strength, these mixtures were determined their rheological properties defining their characteristics of flow and workability.

**Key words:** cement, glass powder, Glass Powder (GP), resistance, flow, workability, alternative cementitious materials.

# Resumen

Siendo la producción de cemento responsable de aproximadamente el 9% de la producción industrial de gases de invernadero, y en pro de generar materiales cementantes alternativos, en este proyecto se presentan los resultados de una investigación encaminada a desarrollar cementantes que potencialmente representen una alternativa ambientalmente sostenible en la construcción civil.

Combinaciones de distintas dosificaciones de polvo de vidrio (GP por sus siglas en inglés, terminología tomada de la publicación "Performance of Glass-Powder concrete in Field Sites" de la 13<sup>o</sup> conferencia del ACI) fueron utilizadas para evaluar y estudiar la resistencia a la compresión y tensión, además de tiempo de fragua y consistencia normal en morteros.

Los resultados obtenidos muestran que las resistencias de las mezclas compuestas de cemento y GP son adecuadas para una cantidad importante de aplicaciones en construcción civil, y aunque en varios casos las muestras con GP no presentan las mismas propiedades mecánicas que sus homólogos (los resultados de algunos especímenes están por debajo que su control sin GP), los resultados obtenidos mostraron un gran potencial para determinadas aplicaciones industriales.

Adicionalmente a la resistencia a la compresión y tensión, a dichas mezclas se les determinaron sus propiedades reológicas definiendo sus características de flujo y trabajabilidad.

**Palabras clave:** cemento, vidrio en polvo, Glass Powder (GP), resistencia, flujo, trabajabilidad, materiales cementantes alternativos.

# **Estudio de Vidrio Reciclado como componente para la Elaboración de Cementos Terciarios**

Edwin A. Espinoza Rivero

Proyecto final de Graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Junio del 2017

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

Resumen	2	Resistencia a la Compresión	27
Prefacio	2	Resistencia a la Tensión	34
Resumen Ejecutivo	3	Consistencia Normal	40
Introducción	6	Tiempo de Fragua	47
Marco Teórico	8	ANOVAS	54
Composición Química del Cemento Hidráulico	8	Análisis de Resultados	61
Materiales Cementantes Alternativos	10	Diseño Experimental	61
Efectos en el Concreto Hidráulico Fresco	11	Resistencia a la Compresión	62
Demanda de agua	11	Resistencia a la Tensión	63
Tiempo de Fragua	11	Consistencia Normal	64
Efecto en el Concreto Hidráulico Endurecido	12	Tiempo de Fragua	65
Resistencia	12	ANOVAS	65
Permeabilidad y Absorción	12	Análisis Global del Proyecto	66
Reacción Álcali-Sílice	13	Conclusiones y Recomendaciones	67
Caracterización y Dosificación del Material Cementante Alternativo	13	Apéndices	69
Análisis de Varianzas (ANOVA)	18	Referencias	78
Nivel de significancia	18		
Valor P	18		
Factor Estadístico F	18		
Metodología	20		
Diseño Experimental	20		
Resistencia a la Compresión del Cemento Hidráulico	21		
Resistencia a la Tensión	22		
Consistencia Normal del Cemento	22		
Tiempo de Fragua	23		
ANOVA	23		
Resultados	24		
Diseño Experimental	24		

# Prefacio

Esta investigación tiene como objetivo fundamental el contribuir con las mejoras en la producción de cemento hidráulico nacional mediante el análisis de la afectación directa de polvo de vidrio (GP) como material cementante con un tamaño de partícula de 75  $\mu\text{m}$  (material pasando el tamiz #200) en pastas de cemento hidráulico.

El presente proyecto funciona paralelamente como un mecanismo alternativo de reciclaje del vidrio transparente (hoy en día el 100% de su reciclaje se basa únicamente en la reproducción de envases de vidrio), como también, una alternativa poderosa en la lucha contra el daño generado contra el ambiente debido a la producción de cemento. El impacto generado por su producción es considerable, ya que aumenta el consumo de combustibles fósiles e incrementa la emisión de gases de efecto invernadero.

La sustitución parcial de cemento con materiales alternativos reciclados reduciría su producción, y de esta forma también su impacto ambiental.

El proyecto parte de una colaboración entre el Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) y la empresa nacional Productos de Concreto (PC).

A pesar de que ya hay investigaciones internacionales dirigidas hacia el desempeño de morteros con aditivos basados en polvo de vidrio y que la investigación en concretos con estos aditivos es incipiente, este proyecto busca satisfacer la necesidad de hacer indagaciones de este tipo a nivel nacional, además que esto daría pie a nuevas investigaciones en el plano de concretos estructurales, así como con otros tipos de posibles materiales cementantes para así, desarrollar posibles concretos más eficientes en su uso.

De manera más específica, el presente proyecto tiene como objetivo medir la afectación del material cementante alternativo sobre la matriz cementicia en términos de demanda de agua, tiempo de fragua y de resistencia a compresión y tensión. Con esto se podrá tomar mejores decisiones y rutas de acción para investigaciones más especializadas.

Es de suma importancia agradecer la colaboración de la empresa Productos de Concreto (PC), en especial al Ing. Minor Murillo Chacón, a los técnicos William Montero y Eduardo Artavia por toda la ayuda brindada a lo largo del proyecto. De igual manera agradecer al CIVCO y a los técnicos Eduardo, Heiner y Juan Carlos por todo su conocimiento y ayuda brindada, al Ingeniero y profesor guía Rommel Cuevas Kauffmann por su excelente visión de convertir a la escuela de Ingeniería en Construcción en un ente líder en tecnologías del Concreto, por todo su esfuerzo, dedicación y conocimiento aportado y brindado a lo largo del proyecto. De igual manera agradecer a los técnicos Eric Sánchez y Marvin Rodríguez de la escuela de Ingeniería en materiales por su apoyo y extensa colaboración a lo largo del proceso de molienda, paso número 1 para la ejecución de este proyecto. Y por último agradecer a Dios, a mi familia y novia María José por todo el apoyo, comprensión, ayuda y dedicación que me brindaron no solo a lo largo de este proyecto sino a lo largo de toda mi carrera. Definitivamente este proyecto y logro no hubiese sido posible sin ustedes.

# Resumen Ejecutivo

La siguiente es una propuesta para iniciar con una investigación que busca analizar el comportamiento del polvo de vidrio transparente a un tamaño de partícula de 75  $\mu\text{m}$  como material cementante. Este tamaño de partícula, como es explicado en el marco teórico, es tomado de la publicación "Performance of glass-powder Concrete in Field Sites" donde estudios revelan que a este tamaño de partícula (como mínimo) se satisface el índice de actividad puzolánica de un 75%, el cual es necesario para que una puzolana sea beneficiosa para el concreto (ASTM C618-08). El color del vidrio utilizado obedece a la composición química del mismo, ya que el vidrio transparente de uso común (ventanas, celosías, frascos bombillas eléctricas) presenta un alto contenido de óxido de sílice ( $\text{SiO}_2 > 70\%$ ), el cual reacciona con la portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), la cual es generada durante la hidratación del cemento, y forma geles de hidrato de silicato de calcio (CSH).

Debido a este comportamiento se puede pensar que el polvo de vidrio a este tamaño de partícula puede reemplazar una porción del cemento en las mezclas de concreto. De esta forma se puede reducir la cantidad de cemento utilizado en las mezclas de concreto sin que se vean afectadas las propiedades mecánicas del concreto, disminuyendo de esta forma el costo de los proyectos de construcción sustancialmente, además de buscar un mayor equilibrio en las relaciones medio ambiente-construcción, ya que la producción de cemento y los daños que este genera al medio ambiente se verían drásticamente disminuidos.

El vidrio no solo tiene buenas características mecánicas y de durabilidad, sino también es un material amigable con el medio ambiente. Este material al ser molido a diferentes tamaños de partículas (0 a 20 mm) es considerado como un material innovador, durable y sostenible para ser utilizado dentro de mezclas

de concreto como un reemplazo a los agregados finos y gruesos, esto dado a que la densidad del vidrio es muy similar a la de la grava y arena.

A partir de este punto se procedió a la caracterización del material experimental (polvo de vidrio transparente reciclado) a un tamaño de partícula de 75  $\mu\text{m}$ , para el cual se llevó a cabo un extenso proceso de molienda de más de tres meses. Este proceso contempló molienda del material por molino de muelas, molino pulverizador y molino de esferas. Una vez culminada la molienda, se procede a tamizar todo el material por el tamiz #200.

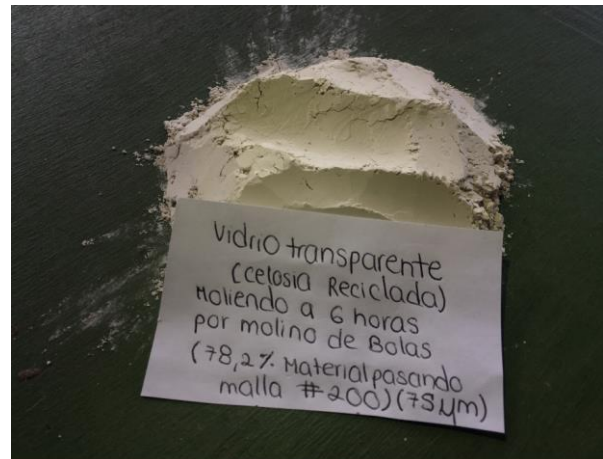


Imagen de polvo de vidrio experimental (GP por sus siglas en inglés). Imagen tomada de la figura 18 del apartado de marco teórico.

Para elaborar una investigación de este tipo es de suma importancia plantearse la interrogante de como irá a comportarse esta nueva adición dentro de la matriz cementante. Para responder esta interrogante se tiene que evaluar esta nueva adición y su interacción con las distintas variables presentes dentro de una mezcla. A saber, este estudio evalúa el comportamiento del GP dentro de mezclas de

mortero. Las cuales presentan 4 componentes: cemento, arena, agua y polvo de vidrio.

Para lograr que interactuasen las 4 variables descritas anteriormente se seleccionó un método de diseño experimental de mezclas propuesto por Douglas Montgomery, el cuál estipula dos restricciones fundamentales:

- $0 \leq x_i \leq 1$ , para cada componente X

- $$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1$$

Estas dos restricciones principales estipulan que cada variable debe de rotar en un rango seleccionado con anterioridad (límite inferior y superior para cada variable), y además que la sumatoria másica de todos los componentes debe de ser de un 100%. Con esta última restricción se asegura que ninguna variable será independiente.

Se evaluó el comportamiento del GP dentro de las mezclas cementicias con 4 pruebas: resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, consistencia normal y tiempo de fragua.

Los resultados de dichas pruebas demuestran que a edades tempranas todos los elementos control se encuentran por debajo que sus homólogos con adición de GP, mientras que a edades posteriores (28 días) las resistencias se comienzan a equiparar e inclusive varios elementos con adición de GP comienzan a superar a sus respectivos controles. Cabe mencionar que las edades de falla para compresión fueron de 24 horas, 7 días y 28 días, mientras que para tensión fueron de 7 días y 28 días. Las fallas de 24 horas a tensión no se toman en cuenta ya que el cemento presenta una resistencia practicamente nula a la tensión a una edad tana temprana, por lo que pierde practicidad evaluar esta edad.

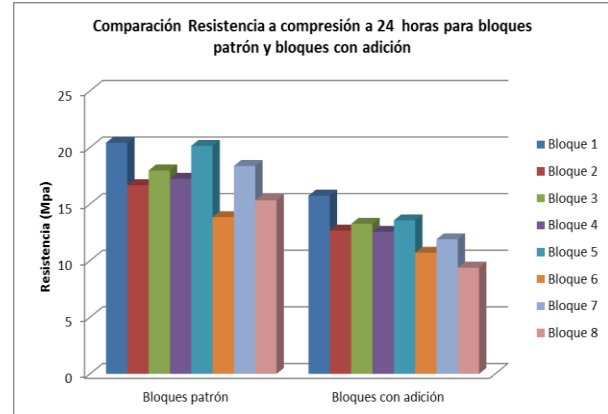


Figura 1. Resistencias a compresión para cada bloque evaluado a 24 horas.

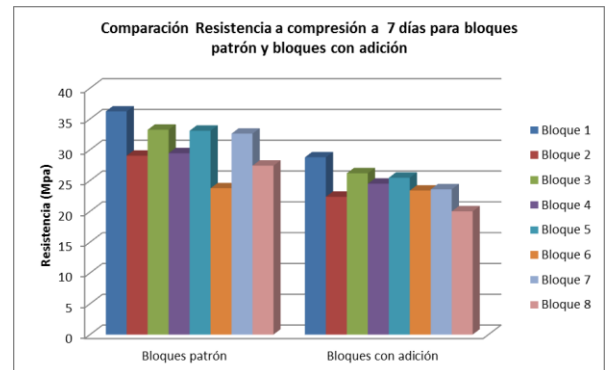


Figura 2. Resistencias a compresión para cada bloque evaluado a 7 días

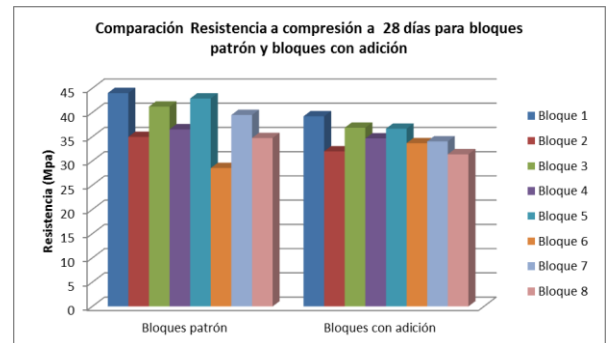


Figura 3. Resistencias a compresión para cada bloque evaluado a 28 días

En las figuras 1, 2 y 3 se enlista un resumen de los valores y comportamiento de los distintos bloques aleatorizados a compresión creados mediante el diseño experimental. En dichas figuras se puede observar el comportamiento del GP dentro de la mezcla cementicia, donde a una edad de 28 días las

resistencias se equiparan con sus controles e incluso algunos casos sobrepasan a su control.

Este comportamiento se mantuvo para las resistencias a tensión como se muestra a continuación.

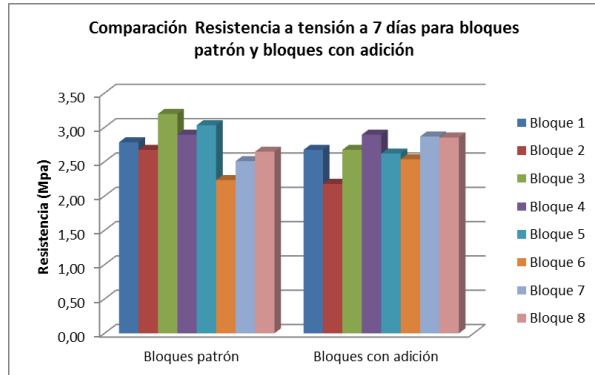


Figura 4. Resistencias a tensión para cada bloque evaluado a 7 días

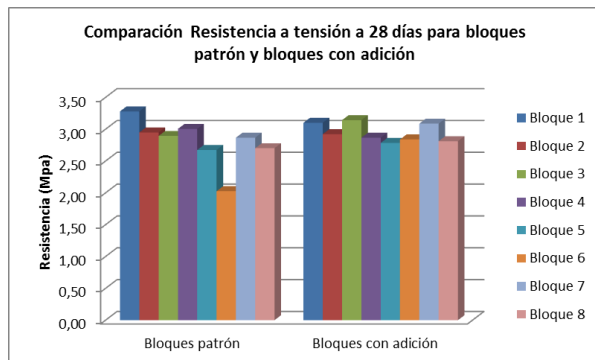


Figura 5. Resistencias a tensión para cada bloque evaluado a 28 días

En las figuras 4 y 5 se observa que a tensión, para edades de 28 días muchos de los bloques con adición superan a su control. Estos comportamientos tanto a compresión como a tensión del GP actuando como sustituto de cemento son muy parecidos a los efectos que produce el humo de sílice y puzolanas naturales estudiadas en la sección de marco teórico.

Observando esta tendencia, es recomendable hacer estudios a plazos de tiempo mas prolongados que 28 días, esto al hacer un análisis global con base en la teoría presentada y los resultados obtenidos en esta investigación.

Con respecto a los ensayos ejecutados para consistencia normal y tiempo de fragua, los resultados arrojan tendencias de mayor demanda de agua para las mezclas conformadas con

adiciones de GP en vez de cemento. Nuevamente es un comportamiento muy similar al humo de sílice y puzolanas naturales.

El GP con respecto a tiempos de fragua afecta tanto al inicial como al final. Disminuye la fragua inicial en 41 min y aumenta su fragua final en 23 minutos. Estos datos evaluados únicamente con el bloque 8 (bloque que presenta mayor porcentaje de adición 30% GP). Para observar el comportamiento de los demás bloques para consistencia normal y tiempo de fragua dirigirse a la sección de resultados.

Se recomienda al lector analizar la sección de resultados y análisis de resultados de este proyecto para una mayor comprensión de estos datos y del estudio realizado en sí.



# Introducción

Según los autores Ahmed Omran, Etienne Morin y Arezki Tagnit-Hamou en su publicación "Performance of glass-powder Concrete in Field Sites" fueron desechados más de 12 millones de toneladas de vidrio únicamente en Europa y 11.5 millones de toneladas en Estados Unidos durante el 2011. Del total del residuo generado por el ser humano en estos dos casos, únicamente el 28% pudo ser reciclado eficazmente debido a diversos factores que afectan el reciclaje del mismo, tales como la facilidad de ruptura del material, mezcla de colores de distintos tipos de vidrio o bien el alto costo de reciclaje del material. Esto genera grandes acumulaciones de basura en todo el mundo, lo cual conlleva a diversos problemas ambientales que afectan día a día a toda la población.

Según Pierre-Claude Aïtcin, Profesor Emérito de la Universidad de Sherbrooke, Québec Canadá; en su trabajo acerca del Hormigón del Futuro y el Futuro del Hormigón, en el año 2008 fueron producidos 2 840 000 miles de toneladas de concreto en el mundo. Su producción conlleva a un impacto ambiental considerable, ya que debido a su producción aumenta el consumo de combustibles fósiles y aumenta la emisión de gases de efecto invernadero.

La sustitución parcial de cemento con materiales alternativos reciclados reduciría la producción de cemento, reduciendo de esta forma su impacto ambiental.

"El 100% del vidrio se reutiliza para crear nuevos envases. Pero no es éste el único motivo para que depositemos los envases inservibles en los contenedores. Reciclar vidrio supone un enorme ahorro de energía: por cada 3.000 botellas se ahorran 130 kg de combustible. También se produce un enorme ahorro de

materias primas (hasta una tonelada de ellas), se reducen el volumen de los vertederos, la contaminación del aire (se quema un 20% menos de combustibles), y la contaminación del agua hasta un 50% y se evita el problema de los vertidos incontrolados." (VICESA, 2015).

El presente proyecto de graduación está pensado para iniciar con el objetivo general de realizar una investigación que busca analizar el comportamiento del polvo de vidrio a un tamaño de partícula de 75  $\mu\text{m}$ . Este tamaño de partícula, como es explicado en el marco teórico, es tomado de la publicación "Performance of glass-powder Concrete in Field Sites" donde estudios revelan que a este tamaño de partícula (como mínimo) se satisface el índice de actividad puzolánica de un 75%, el cual es necesario para que una puzolana sea beneficiosa para el concreto (ASTM C618-08). El color del vidrio utilizado obedece a la composición química del mismo, ya que el vidrio transparente de uso común (ventanas, celosías, frascos bombillas eléctricas) presenta un alto contenido de óxido de sílice ( $\text{SiO}_2 > 70\%$ ), el cual reacciona con la portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), la cual es generada durante la hidratación del cemento, y forma geles de hidrato de silicato de calcio (CSH).

Debido a este comportamiento se puede pensar que el polvo de vidrio a este tamaño de partícula puede reemplazar una porción del cemento en las mezclas de concreto.

De esta forma se puede reducir la cantidad de cemento utilizado en las mezclas de concreto sin que se vean afectadas las propiedades mecánicas del concreto, disminuyendo de esta forma el costo de los proyectos de construcción sustancialmente, además de buscar un mayor equilibrio en las relaciones medio ambiente-construcción, ya que la producción de cemento y los daños que este genera al medio ambiente se verían drásticamente disminuidos.

Para lograr este objetivo general, se tienen que cumplir los siguientes hitos específicos:

1. Diseñar y ajustar de forma estadística una matriz experimental que permita analizar de forma eficiente la afectación del vidrio en polvo dentro de mezclas de mortero.
2. Caracterizar el polvo de vidrio a un tamaño de partícula de 75  $\mu\text{m}$ .
3. Determinar la consistencia normal del cemento control y compararlo con cada porcentaje de adición de vidrio.
4. Determinar el tiempo de fragua inicial y fragua final del cemento control por medio de la aguja de Vicat y compararlo con cada porcentaje de adición de vidrio.
5. Determinar la resistencia a la compresión de cubos de mortero del cemento control y compararlo con cada porcentaje de adición de vidrio.
6. Determinar la resistencia a flexión de vigas de mortero del cemento control y compararlo con cada porcentaje de adición de vidrio.

# Marco Teórico

En el siguiente marco teórico se presentan las definiciones, así como parámetros, conceptos y rangos que se consideran relevantes para la debida comprensión del trabajo realizado.

El cemento es un material comercial de fácil adquisición que posee propiedades adhesivas y cohesivas, el cual tiene la capacidad de aglutinar agregados y formar un producto final que dependiendo de los componentes podría ser concreto o mortero.

Los cementos tipo Portland son los más comunes entre los cementos hidráulicos actuales. Es el producto obtenido por la combinación de un material calcáreo (piedra caliza, conchas, mármol, etc.) y un material arcilloso en el cual la sílice es el constituyente más importante (arcilla o escoria de altos hornos), efectuándose su cocción a unos 1500 °C en grandes hornos giratorios, hasta la formación de bolas nodulizadas duras llamadas clinker o escoria.

Posteriormente el clinker se enfría y se procede a su molienda junto con un retardador (generalmente 4% de yeso) lográndose un grado de finura elevado y un control de las propiedades de fraguado.

“La pasta (cemento) se compone de materiales cementantes, agua y aire atrapado o aire incluido (intencionalmente incorporado). La pasta constituye aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del concreto” (Portland Cement Association (PCA), 2004).

## Composición Química del Cemento Hidráulico

Como se mencionó con anterioridad, los componentes del cemento son dos: el clinker y la adición posterior del yeso (4% a un 6%).

En la fabricación del clinker, durante la calcinación, el calcio se combina con otros componentes de la mezcla para formar cuatro compuestos principales que corresponden a un 90% de la masa total del cemento.

Estos cuatro compuestos principales son: el silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$ ), silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$ ), aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$ ) y ferroaluminato tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$ )

Después de la calcinación se procede a adicionar el yeso durante la molienda u otra fuente de sulfato de calcio y otros auxiliares de molienda. El yeso (sulfato de calcio dihidratado  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaO}\cdot\text{SO}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) es la fuente de sulfato de calcio más empleada en el cemento.

El  $\text{C}_3\text{S}$  y el  $\text{C}_2\text{S}$  en el clinker se conocen como alita y belita, respectivamente. La alita constituye del 50% hasta 70% del clinker, mientras que la belita es responsable por sólo 15% hasta 30%. Los compuestos de aluminato constituyen aproximadamente del 5% hasta 10% del clinker y los compuestos de ferrita del 5% hasta 15%.

“En presencia de agua, estos compuestos se hidratan (se combinan químicamente con el agua) para formar nuevos compuestos, los cuales son la infraestructura de la pasta de cemento endurecida en el concreto.

Los silicatos de calcio,  $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$ , se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio (Portlandita) y silicato de calcio hidratado (arcaicamente llamado de gel de tobermorita). El cemento portland hidratado contiene del 15% hasta 25% de hidróxido de calcio y aproximadamente 50% de silicato de calcio hidratado, en masa. La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente al silicato de calcio hidratado.

El C<sub>3</sub>A reacciona con el agua y el hidróxido de calcio para formar aluminato tetracálcico hidratado. El C<sub>4</sub>AF reacciona con el agua para formar ferroaluminato de calcio hidratado. El C<sub>3</sub>A, sulfato (yeso, anhidrita u otra fuente de sulfato) y el agua combinan para formar etringita (trisulfoaluminato de calcio hidratado), monosulfato de calcio y otros compuestos afines.

Las cantidades de calcio, sílice y alúmina establecen la cantidad de los compuestos principales en el cemento y efectivamente las propiedades del cemento hidratado.” (Portland Cement Association (PCA), 2004).

Estas transformaciones básicas de los compuestos se presentan en el cuadro 1.

Los compuestos principales del cemento tienen las siguientes propiedades:

Silicato Tricálcico: se hidrata y se endurece rápidamente. Responsable, en gran parte, por el inicio del fraguado y la resistencia temprana. En general la resistencia temprana del concreto es mayor cuando el porcentaje de silicato tricálcico aumenta.

Silicato Dicálcico: se hidrata y se endurece lentamente y contribuye al aumento en la resistencia en edades mayores a una semana.

Aluminato Tricálcico: produce una gran liberación de calor durante los primeros días de hidratación.

También contribuye un poco para el desarrollo de las resistencias tempranas.

Ferroaluminato Tetracálcico: producto resultante del uso de las materias primas de hierro y aluminio para la reducción de la temperatura de clinkerización (cocción) durante la fabricación del cemento. Este compuesto aporta muy poco a la resistencia.

Sulfato de Calcio Dihidratado (yeso): ofrece sulfato para la reacción con el aluminato tricálcico y la formación de etringita. Esto controla la hidratación del aluminato tricálcico. Sin sulfato, el fraguado del cemento sería rápido. Este compuesto también puede influenciar la resistencia hasta la edad de 28 días.

Silicato Cálcico Hidratado: es un silicato cálcico que ha sufrido una reacción de hidratación (monohidratada) para convertirse en un gel cementoso. Es uno de los compuestos hidratados principales del cemento Portland. Es el responsable de las propiedades resistentes del cemento. Al fraguar el silicato cálcico hidratado traba el árido (arena y/o grava), lo cual densifica la matriz cementante ayudando en gran parte al incremento de la resistencia del cemento.

### Cuadro 1. Reacciones de Hidratación de los Compuestos del Cemento Portland (Expresados en óxidos)

2 (3CaO·SiO <sub>2</sub> ) Silicato tricálcico	+ 11 H <sub>2</sub> O agua	= 3CaO·2SiO <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ 3 (CaO·H <sub>2</sub> O) Hidróxido de calcio
2 (2CaO·SiO <sub>2</sub> ) Silicato dicálcico	+ 9 H <sub>2</sub> O agua	= 3CaO·2SiO <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ CaO·H <sub>2</sub> O Hidróxido de calcio
3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Aluminato tricálcico	+ 3 (CaO·SO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O) Yeso	+ 26 H <sub>2</sub> O agua	= 6CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3SO <sub>3</sub> ·32H <sub>2</sub> O Etringita
2 (3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Aluminato tricálcico	+ 6CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3SO <sub>3</sub> ·32H <sub>2</sub> O Etringita	+ 4 H <sub>2</sub> O agua	= 3 (4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SO <sub>3</sub> ·12H <sub>2</sub> O) Monosulfoaluminato de calcio
3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Aluminato tricálcico	+ CaO·H <sub>2</sub> O Hidróxido de calcio	+ 12 H <sub>2</sub> O agua	= 4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·13H <sub>2</sub> O Aluminato tetracálcico hidratado
4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Ferroaluminato tetracálcico	+ 10 H <sub>2</sub> O agua	+ 2 (CaO·H <sub>2</sub> O) Hidróxido de calcio	= 6CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·12H <sub>2</sub> O Ferroaluminato de calcio hidratado

Fuente: (Portland Cement Association (PCA), 2004)

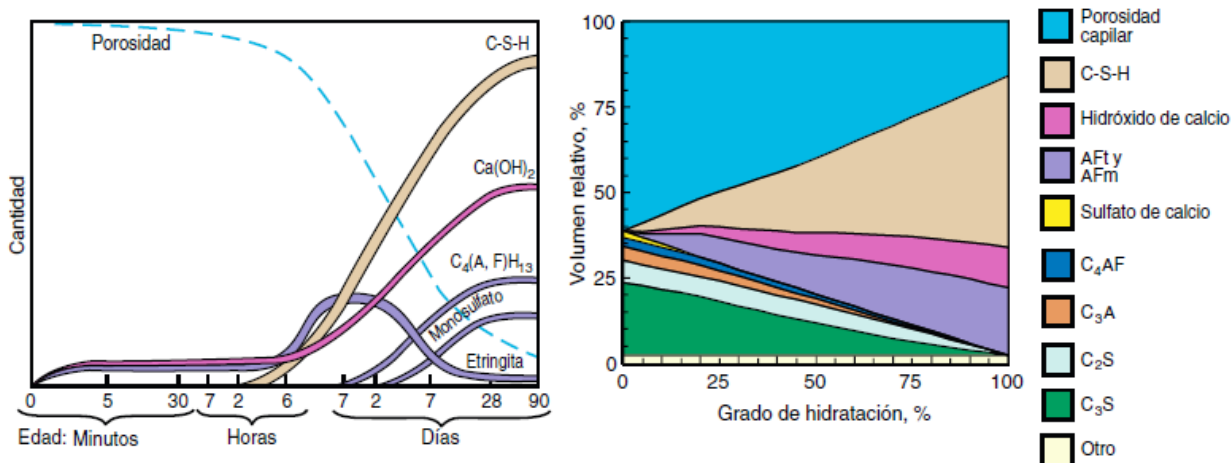


Figura 6. Volúmenes relativos de los compuestos principales en la microestructura de las pastas de cemento a distintas edades. Fuente: (Portland Cement Association (PCA), 2004)

## Materiales Cementantes Alternativos

El cemento no es el único material cementante en una mezcla de concreto o mortero, adiciones minerales como las cenizas volantes, el humo de sílice, las escorias, puzolanas naturales, entre otros son conocidos como materiales cementantes suplementarios o alternativos que se integran a la mezcla, usualmente con el fin de mejorar características de durabilidad y resistencia.



Figura 7. Materiales cementantes suplementarios. De la izquierda para la derecha, ceniza volante (Clase C), metacaolinita (arcilla calcinada), humo de sílice, ceniza volante (Clase F), escoria y esquisto. Fuente: (Portland Cement Association (PCA), 2004)

“Los materiales cementantes suplementarios se adicionan al concreto como parte del sistema

cementante. Se los puede utilizar como adición o como sustitución parcial del cemento portland o del cemento adicionado, dependiendo de las propiedades de los materiales y de los efectos esperados en el concreto” (Portland Cement Association (PCA), 2004).

Tradicionalmente, la ceniza volante, escoria, arcilla calcinada y humo sílice se usaban separadamente en el concreto. Actualmente, con la mejoría al acceso de estos materiales, los productores de cemento tratan de optimizar las propiedades del concreto con la mayor utilización de estos materiales. Las mezclas que usan tres materiales cementantes, llamadas mezclas ternarias, se están tornando comunes.

Cenizas Volantes: según el manual de la Asociación del Cemento Portland (PCA por sus siglas en inglés) es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas generadoras de electricidad. La ceniza volante es un polvo finamente dividido parecido al cemento portland. El tamaño de las partículas de las cenizas volantes varía entre 1 a 100  $\mu\text{m}$ , siendo 20  $\mu\text{m}$  el tamaño más utilizado.

Este material es básicamente un vidrio de silicato conteniendo sílice, alúmina, hierro y calcio.

Escoria: es un cemento hidráulico no metálico que consiste básicamente en silicatos y aluminosilicatos de calcio. Este producto se desarrolla en el estado fundido simultáneamente con el acero en un alto horno. La escoria fundida a la temperatura cercana a 1500  $^{\circ}\text{C}$  se enfría rápidamente y se apaga en el agua para formar

un material granulado vítreo. Este material es molido hasta menos de 45 µm.

“La escoria granulada de alto horno molida, cuando empleada en los concretos para uso general en los Estados Unidos, normalmente constituye del 30% al 45% de la masa del material cementante en la mezcla, pero algunos concretos de escoria tienen 70% o más de escoria” (Portland Cement Association (PCA), 2004).

Humo de Sílice: subproducto utilizado como puzolana. Es el resultado de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos eléctricos durante la producción de liga de silicio o ferrosilicio. El humo de sílice sube como un vapor oxidado de los hornos a 2000 °C. Cuando se enfría este se condensa y se colecta en bolsas de tela.

“El humo de sílice condensado es básicamente dióxido de silicio (normalmente más del 83%) en una forma no cristalina. Se trata de un material extremadamente fino, con partículas de 1mm de diámetro y con diámetro promedio de cerca de 0,1 µm, aproximadamente 100 veces menor que el promedio de las partículas de cemento” (Portland Cement Association (PCA), 2004).

Según datos del manual de la PCA, el humo de sílice se usa en cantidades que van del 5% al 10% de la masa total del material cementante. Se emplea donde sea necesario un alto grado de impermeabilidad y alta resistencia del concreto.

Puzolanas Naturales: “Las puzolanas naturales se usan hace siglos. El término puzolana viene de una ceniza volcánica extraída de Pozzuoli, un pueblo en Nápoles, Italia. Esta ceniza fue resultado de la erupción del monte Vesuvio, en 79 D.C” (Portland Cement Association (PCA), 2004).

Además del control del aumento de la temperatura, las puzolanas naturales se usan para mejorar la resistencia al ataque de sulfato y está entre los primeros materiales a controlar la reacción alcali-agregado.

“Las puzolanas naturales mas comunmente empleadas hoy en día son los materiales procesados, los cuales se tratan por altas temperaturas en los hornos y después se muelen hasta que se transformen en un polvo fino. Estos materiales incluyen arcillas calcinadas, esquisto calcinado y metacaolinita. Normalmente su porcentaje de sustitución se encuentra entre

15% y 35%” (Portland Cement Association (PCA), 2004).

## **Efectos en el Concreto Hidráulico Fresco**

Luego de adicionar estos materiales cementantes alternativos o suplementarios en la mezcla fresca, el manual de la PCA describe algunos efectos que estas adiciones tienen sobre la misma a lo largo de los años. A continuación, se hace un breve resumen de estos.

### **Demanda de agua**

El dato de demanda de agua es el parámetro que se toma en cuenta para que la mezcla presente una fluidez y trabajabilidad aceptable, además de ser la cantidad de agua necesaria para asegurar una buena reacción del cemento cuando este entra en contacto con la misma.

El manual de la PCA concluye que, cuanto mayor es la cantidad de humo de sílice, mayor la demanda de agua en el concreto (cerca de 1% a 10%), a menos que se use un reductor de agua o un plastificante. En algunas mezclas pobres puede no ocurrir un aumento de la demanda de agua, cuando se empleen pequeñas cantidades (menos del 5%) de humo de sílice.

Las arcillas calcinadas y los esquistos calcinados (puzolanas) en dosis normales generalmente tienen poco efecto sobre la demanda de agua, pero otras puzolanas naturales pueden aumentar o disminuir considerablemente la necesidad de agua.

### **Tiempo de Fragua**

Según el manual de la PCA, el uso de ceniza volante y humo de sílice normalmente retarda el tiempo de fraguado. El grado de retardo depende de factores como la cantidad de cemento, la demanda de agua, el tipo, la reactividad y la dosis de aditivo y la temperatura del concreto. Las arcillas y esquistos calcinados (puzolanas) tienen poco efecto sobre el tiempo de fraguado.

## Efecto en el Concreto Hidráulico Endurecido

Una vez que la fragua final ocurre en la mezcla, la matriz cementante comienza su verdadera ganancia de resistencia y es en este punto cuando los materiales cementantes alternativos adicionados comienzan con sus verdaderas funciones dentro de la misma.

### Resistencia

Respecto a la resistencia a la compresión y tensión, la adición de estos elementos tiene efectos mixtos respecto a las muestras patrón, (muestras sin ningún tipo de adición de estos materiales). La resistencia a la compresión y tensión de mezclas conformadas con estos aditivos son relativamente menores al control a edades menores a los 28 días; sin embargo, al

pasar los días esta resistencia se incrementa y sobrepasa el control.

### Permeabilidad y Absorción

Dentro de lo que refiere el manual de la PCA, éste recalca que la ceniza volante, escoria molida y puzolana natural generalmente reducen la permeabilidad y la absorción del concreto bien curado. El humo de sílice y la metacaolinita (puzolanas) son especialmente eficientes en este sentido, de ahí que son recomendados para resistir ataque de sulfatos ya que evita el proceso de difusión limitada.

Las pruebas demuestran que la permeabilidad de los concretos disminuye a medida que la cantidad de material cementante hidratado aumenta y a medida que la relación agua-material cementante disminuye.

## Cuadro 2. Análisis Químico y Propiedades Seleccionadas de Ceniza Volante, Escoria, Humo de Sílice, Arcilla Calcinada, Esquisto Calcinado y Metacaolinita Típicos

	Clase F (ASTM)	Clase C (ASTM)	Escoria granulada	Humo de sílice	Arcilla calcinada	Esquisto calcinado	Metacaolinita
SiO <sub>2</sub> , %	52	35	35	90	58	50	53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	23	18	12	0.4	29	20	43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	11	6	1	0.4	4	8	0.5
CaO, %	5	21	40	1.6	1	8	0.1
SO <sub>3</sub> , %	0.8	4.1	9	0.4	0.5	0.4	0.1
Na <sub>2</sub> O, %	1.0	5.8	0.3	0.5	0.2	—	0.05
K <sub>2</sub> O, %	2.0	0.7	0.4	2.2	2	—	0.4
Total Na eq. alc, %	2.2	6.3	0.6	1.9	1.5	—	0.3
Pérdida por ignición	2.8	0.5	1.0	3.0	1.5	3.0	0.7
Finura Blaine, m <sup>2</sup> /kg	420	420	400	20,000	990	730	19,000
Densidad relativa	2.38	2.65	2.94	2.40	2.50	2.63	2.50

Fuente: (Portland Cement Association (PCA), 2004)

## Reacción Álcali-Sílice

Desde hace algunas décadas, varios de los profesionales dedicados al estudio de la tecnología del concreto, se han preocupado y dedicado específicamente al estudio de la reacción álcali-agregado cuya manifestación más frecuente y conocida es la reacción álcali-sílice (en adelante RAS).

“Esta reacción, que en casos extremos puede ocasionar serios problemas estructurales y económicos, sólo puede generarse en estructuras construidas con hormigón elaborado a partir de un conjunto de materiales componentes (cemento portland, agua, agregados, adiciones minerales y aditivos) capaces de combinarse químicamente y formar un compuesto que incrementa su volumen con la humedad denominado gel de RAS” (Becker, 2017).

Este gel comienza a absorber el agua presente en la mezcla, así como agua del ambiente, lo cual genera una expansión del mismo dentro de la mezcla de concreto. Este gel comienza a crecer por medio de los espacios vacíos dentro de la mezcla creando mayor cantidad de planos de falla y por ende provoca una reducción considerable en la resistencia del elemento afectado y en casos críticos ocasiona la falla del elemento estructural. Cabe mencionar que la expansión del gel no cesará hasta que termine de absorber la totalidad del agua presente en la mezcla, y si el elemento afectado se encuentra en contacto constante con agua o con contacto de humedad muy fuerte del ambiente, su crecimiento no cesará, de aquí la importancia del estudio de la misma.

Hobbe y Gutteridge en su publicación “Influencia del Tamaño de las Partículas sobre la Expansión causada por la reacción Sílice-Alcali”, afirman que la expansión del gel de RAS aumenta al incrementarse el tamaño de las partículas de los compuestos que se encuentran interactuando dentro de la reacción.

Si la velocidad de reacción, expresan los Srs. Hobbe y Gutteridge, es una función de la totalidad del área superficial del árido reactivo y la concentración volumétrica permanece constante se podrá esperar que el período durante el cual aparece expansión disminuye con el tamaño de la partícula hasta que éstas son tan pequeñas que el líquido de los poros queda exento de iones  $\text{OH}^-$  o las partículas son disueltas mientras el hormigón no ha endurecido. Sus estudios revelan

que ha tamaños de partícula inferiores a  $75 \mu\text{m}$  no se observó expansión apreciable hasta terminar sus ensayos después de 196 días.

## Caracterización y Dosificación del Material Cementante Alternativo

“El vidrio es un material transparente producido al derretir sílice, carbonato de sodio y carbonato de calcio a altas temperaturas seguido por un proceso de enfriamiento, durante el cual se da el proceso de solidificación del material sin que exista cristalización” (Zidol, Tohoue-Tognonvi, & Tagnit-Hamou, 2012).

El vidrio no solo tiene buenas características mecánicas y de durabilidad, sino también es un material amigable con el medio ambiente. Este material al ser molido a diferentes tamaños de partículas ( $0$  a  $20 \text{ mm}$ ) es considerado como un material innovador, durable y sostenible para ser utilizado dentro de mezclas de concreto como un reemplazo a los agregados finos y gruesos, esto dado a que la densidad del vidrio es muy similar a la de la grava y arena.

Ahora bien, según estudios realizados por Ahmed Omran, Etienne Morin y Arezki Tagnit-Hamou en su publicación “Performance of Glass-Powder Concrete in Field Sites”, este material al ser molido a tamaños de partículas de  $75 \mu\text{m}$  o inferiores da como resultado polvo de vidrio o Glass Powder (de ahora en adelante GP por sus siglas en Inglés) y se piensa que puede ser utilizado como material cementante alternativo por varias razones dentro de las cuales se destacan su alto índice de actividad puzolánica mayor a  $75\%$ , su alto contenido de óxido de sílice ( $\text{SiO}_2 > 70\%$ ), y su naturaleza amorfa.

Los estudios presentados en la publicación revelan una ventaja adicional del GP ya que se demuestra actividad puzolánica cuando el dióxido de sílice presente en el GP reacciona con la portlandita (hidróxido de calcio  $\{\text{Ca}(\text{OH})_2\}$ ) generada durante la hidratación del cemento y forma gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), gel encargado de entubar los áridos en las mezclas de concreto.

Como se mencionó anteriormente, el silicato de calcio hidratado es uno de los principales componentes del cemento, responsable de brindar resistencia a este mismo a edades posteriores de 7 días.



A raíz de lo explicado anteriormente de la reacción Alcalí-Sílice y su tamaño de partícula donde esta reacción se ve prácticamente anulada (tamaño de partícula inferior a 75  $\mu\text{m}$ ) y el tamaño de partícula mencionado en los estudios realizados en la publicación "Performance of Glass-Powder Concrete in Field Sites" de la décima tercera conferencia internacional en avances en la tecnología de concretos se toma la decisión de trabajar con GP en este proyecto con un tamaño de partícula de 75  $\mu\text{m}$  (material pasando el tamiz #200).

El vidrio con el que se trabajó este proyecto fue suministrado por MADI, ente encargado del reciclaje interno del Instituto Tecnológico de Costa Rica. MADI suministró celosías de vidrio transparente desechadas, las cuales llevaron varios procesos de molienda para poder obtener GP de 75  $\mu\text{m}$ .

Valga decir que el estudio fue realizado con cemento de uso general de alta resistencia (UG-AR) de la cementera Holcim. La escogencia de este cemento es gracias a una recomendación experta del Ing. Minor Murillo Chacón, asesor de este proyecto, colaborador de Productos de Concreto. Él fundamenta su decisión en que el cemento UG-AR tiene una gravedad específica considerablemente mayor a su contraparte UG, muy cercana a lo que suponen los códigos del American Concrete Institute (ACI); la cual se aproxima a 3,15 tomado como dato ideal (el Gs del UG-AR de Holcim es aproximadamente 3,12 según datos presentados por el fabricante).

En este proyecto se utiliza el reglamento técnico pasado (anterior al PN INTE 06-11-15:2015 "Cementos Hidráulicos Especificaciones y Requisitos"), esto debido a que el nuevo reglamento fue firmado en diciembre del 2015, momento para el cual ya se había comenzado este proyecto, razón por la cual se trabajará con la nomenclatura del reglamento anterior.

Una vez obtenido el vidrio transparente reciclado se procede a su molienda. La molienda se realizó en los laboratorios de la escuela de Ingeniería en Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica. El vidrio primeramente se pasó por un molino de muelas rotatorio, el cual quiebra el vidrio en tamaños considerablemente grandes. Este proceso es necesario debido al molino pulverizador (segundo molino utilizado), ya que como se muestra en la figura 6, la entrada para depositar material dentro del molino pulverizador es extremadamente pequeña, por lo que las

celosías tienen que estar quebradas para poderlas introducir.

Una vez quebradas las celosías se procede a introducirlas en el molino pulverizador. Este molino disminuye considerablemente el tamaño de partícula de las celosías sin llegar a ser completamente eficiente, ya que no hay un porcentaje de material pasando el tamiz #200 aún. El tamaño de partícula obtenido después de varias moliendas por el molino pulverizador se muestran en las figuras 14, 15 y 16 respectivamente.

Se procede a volver a poner en funcionamiento un molino de esferas presente en los laboratorios que contaba con más de 2 años de inactividad. Se utilizó 600 esferas de acero de tres tamaños diferentes (grandes, medianas y pequeñas) en cantidades de 100, 200 y 300 respectivamente según los tamaños mencionados anteriormente. La escogencia de estos tamaños, así como la cantidad de bolas por tamaño, responde al tamaño de partícula deseado, ya que al ser una partícula tan pequeña se necesita mayor cantidad de esferas pequeñas y medianas para poder separar adecuadamente las partículas del vidrio.

Se lleva a cabo varias horas de molienda del material, hasta que se extrae una muestra del molino y se tamiza obteniendo arriba de un 70% de material pasando el tamiz #200 con lo cual el proceso de molienda llega a su fin, ya que con un porcentaje arriba del 70% del total de vidrio depositado en el molino era suficiente para realizar esta investigación. Los resultados del proceso de molienda del material por el molino de esferas se presentan en las imágenes 17 y 18.

Cabe destacar que este proceso de molienda llevó más de 3 meses en ejecución, debido a diversos problemas que se presentaron como el hecho de que en el país no exista un molino de vidrio ni ninguna empresa del ámbito local (incluyendo VICESA) cuenta con el material o procedimiento necesario para la ejecución de la molienda. Esto sumado al hecho de que el molino de esferas no fuera utilizado en más de 2 años por el laboratorio de Ingeniería en Materiales y el mismo se encontraba en un deterioro significativo, con partes faltantes para su funcionamiento, así como las esferas utilizadas presentaban un proceso de oxidación bastante significativo, por lo que se tuvo que limpiar y lijar las esferas y el molino con un material arenoso capaz de arrancar el óxido de las paredes del

molino y de las esferas (con esto se evita contaminación del GP), adquirir las partes faltantes del molino y realizarle las pruebas necesarias para el correcto funcionamiento del molino.



Figura 8. Molino de muelas utilizado para quebrar las celosías de vidrio transparente.



Figura 9. Muelas de tamaño 5"x6" molino de muelas.



Figura 10. Molino pulverizador



Figura 11. Entrada del material y distancia de separación de discos para molino giratorio pulverizador



Figura 12. Molino giratorio de esferas.



Figura 14. Motor y fajas adquiridas para el correcto funcionamiento del molino giratorio de esferas



Figura 15. Estado inicial de las esferas utilizadas para molienda del GP



Figura 13. Unica entrada y salida para material del molino giratorio de esferas.



Figura 16. Tamaños de las esferas utilizadas en la molienda del vidrio.



Figura 17. Estado final de las esferas antes de su utilización para la molinda de GP



Figura 18. Tamaños finales utilizados para la molinda de GP

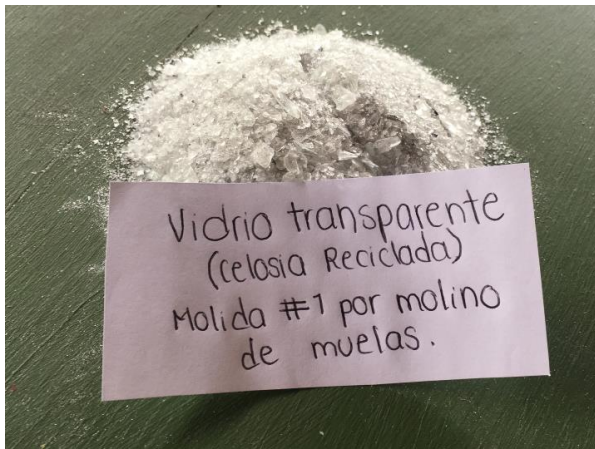


Figura 19. Vidrio transparente luego de molida 1 por molino pulverizador

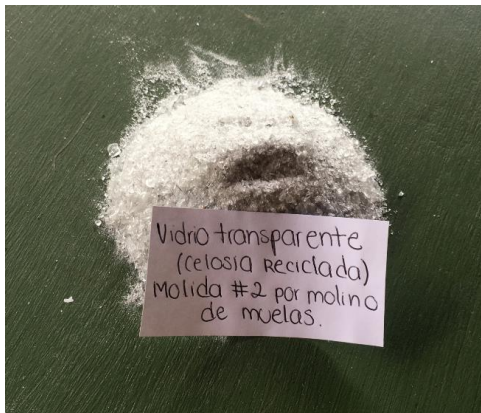


Figura 20. Vidrio transparente luego de 2 molidas por el molino pulverizador

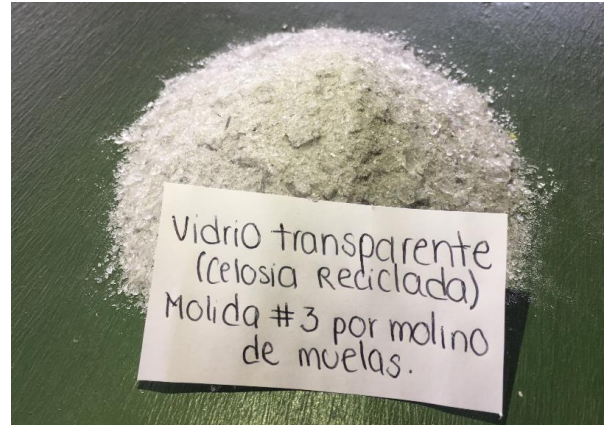


Figura 21. Vidrio transparente luego de 3 molidas por molino pulverizador

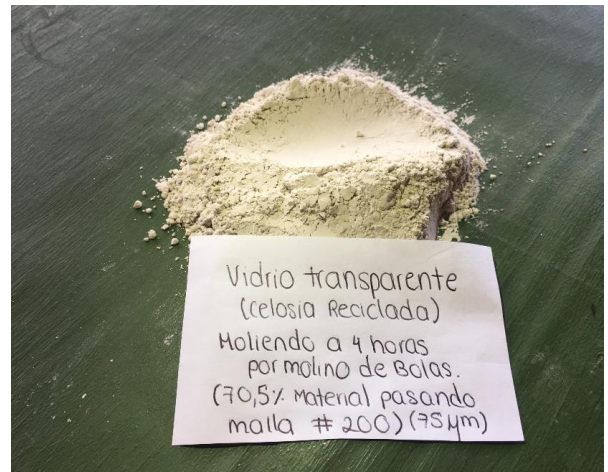


Figura 22. Vidrio transparente molinda a 4 horas mediante molino de esferas

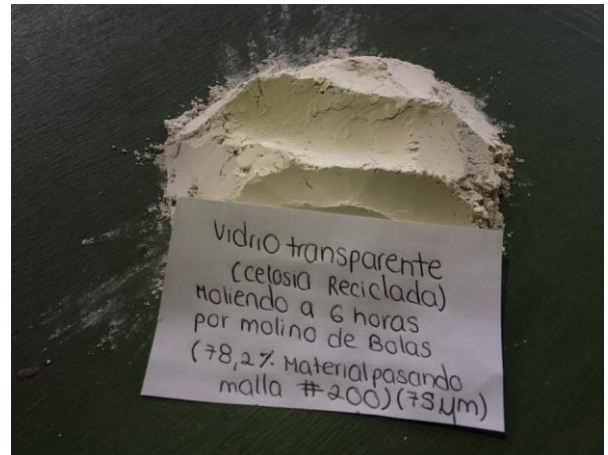


Figura 23. Vidrio transparente molinda a 6 horas mediante molino de esferas (obtención de GP)

## Análisis de Varianzas (ANOVA)

Un análisis de varianza (ANOVA) prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores.

La hipótesis nula establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente.

Para ejecutar un ANOVA, se debe tener una variable de respuesta continua y al menos un factor categórico con dos o más niveles. Los análisis ANOVA requieren datos de poblaciones que sigan una distribución aproximadamente normal con varianzas iguales entre los niveles de factores.

A continuación, se establecen las hipótesis anteriormente descritas:

- Hipótesis nula: Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alterna: Por lo menos una media es diferente.

Al realizar este análisis a los datos se obtienen varios factores estadísticos de suma importancia para el correcto entendimiento de la ANOVA, los cuales se describen a continuación.

### Nivel de significancia

Según el software estadístico minitab, el nivel de significancia ( $\alpha$ ) es el máximo nivel aceptable de riesgo de rechazar una hipótesis nula verdadera (error de tipo I) y se expresa como una probabilidad que oscila entre 0 y 1.

El nivel de significancia también determina la probabilidad de error que es inherente a la prueba. En pocas palabras, se define como la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando ésta es verdadera (decisión conocida como error de tipo I, o "falso positivo"). La decisión se toma a menudo utilizando el valor p (o p-valor): si el valor p es inferior al nivel de significación, entonces la hipótesis nula es rechazada.

### Valor P

Se utiliza para saber si los resultados son estadísticamente significativos. Los valores p suelen utilizarse en las pruebas de hipótesis, donde se rechaza o no se puede rechazar una hipótesis nula.

Cuando se realiza una prueba de hipótesis, el elemento clave de la salida en el que hay que concentrarse es el valor p.

Un valor p oscila entre 0 y 1. El valor p es una probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula. Las probabilidades más bajas proporcionan una evidencia más fuerte en contra de la hipótesis nula.

Se puede comparar el valor p con el nivel de significancia ( $\alpha$ ) para decidir si se debe rechazar la hipótesis nula de la siguiente manera:

- Si el valor p es menor que o igual a  $\alpha$ , rechace la hipótesis nula.
- Si el valor p es mayor que el nivel de significancia ( $\alpha$ ), no se puede rechazar la hipótesis nula.

Para el nivel de significancia ( $\alpha$ ) suele utilizarse un valor de 0.05, entonces, si el valor p es menor que o igual a 0.05, se rechaza la hipótesis nula.

### Factor Estadístico F

El estadístico F o F-test se obtiene al estimar la variación de las medias entre los grupos de la variable independiente y dividirla por la estimación de la variación de las medias dentro de los grupos. Lo que hace es dividir la variación entre los grupos por la variación dentro de un grupo.

Si las medias entre los grupos varían mucho y la media dentro de un grupo varía poco, es decir, los grupos son heterogéneos entre ellos y similares internamente, el valor de F será más alto, y, por tanto, indica que las medias poblacionales se encuentran muy dispersas entre sí. Por el contrario, si un valor de F se acerca a 1 o a un valor menor, indica que la diferencia estadística entre las poblaciones es irrelevante, por lo que se podría concluir que las medias de cada población se pueden tomar como iguales.

Cabe resaltar que existen dos factores estadísticos F, los cuales son el práctico y el teórico. El práctico es calculado a partir de la división de la variación de las medias poblacionales entre la variación de las medias de una población, y el teórico es calculado a partir de los

grados de libertad del numerador y denominador de la división anteriormente descrita.

A continuación, se describen las fórmulas utilizadas por minitab para el cálculo de los grados de libertad:

- Grados de libertad del numerador:  $k-1$
- Grados de libertad del denominador:  
 $k(n-1)$

Donde “k” son la cantidad de factores en estudio y “n” el número de iteraciones por factor.

# Metodología

Si bien se sabe una de las limitantes del proyecto es la obtención del vidrio en polvo (GP Glass Powder, por sus siglas en inglés), se parte de esta limitante para poder obtener una matriz experimental estadísticamente válida y que sea capaz de poder analizar y tratar las demás variables que estarán en juego. También es de suma importancia el contenido de agua presente en las mezclas a realizar, debido a que se sabe que el vidrio no absorbe agua, y es imperante conocer la cantidad de la misma que va a estar presente para poder asegurar una adecuada reacción del cemento. Se desprende que el vidrio molido (GP) podría afectar la consistencia de la mezcla y su tiempo de fragua. De ahí la importancia en buscar un método de análisis estadístico que permitiese reducir la matriz experimental (debido a la limitante antes mencionada) como a su vez, que asegurase la validez estadística de la misma.

## Diseño Experimental

Se propone crear una matriz experimental con el propósito de elaborar bloques aleatorizados para poder estudiar el comportamiento del vidrio en polvo (Glass Powder GP) como material cementante alternativo en un rango de sustitución del 20% al 30% con el menor error experimental posible. No se trata de crear la cantidad de iteraciones que se le ocurra al experimentador, debido a la falta de practicidad que representa esto y a la limitante principal del proyecto. “El objetivo de los bloques aleatorizados es hacer el error experimental tan pequeño como fuera posible; es decir, querría eliminarse del error experimental la variabilidad entre los ejemplares de prueba” (Montgomery, 2008).

Es por esta razón que se selecciona el método de análisis de experimentos con mezclas

propuesto por Douglas Montgomery para la elaboración de los bloques aleatorizados.

En los experimentos con mezclas, “los factores son los componentes o ingredientes de una mezcla y, por consiguiente, sus niveles no son independientes” (Montgomery, 2008).

Existen dos restricciones fundamentales en la composición de estas mezclas:

- $0 \leq x_i \leq 1$ , para cada componente X

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1$$

Lo que implican estas restricciones es que en una mezcla la sumatoria de todos sus componentes es igual a 1 (o 100%), en el caso de que haya una variación en la proporción de algunos de los componentes es imperativo el cambio en la proporción de uno o más de los restantes elementos. Con esto se afirma que ningún elemento es independiente.

Para efectos de esta investigación, en los casos de fallas mecánicas (fallas a compresión y tensión), son cuatro los componentes de una mezcla típica: cemento, agua, arena y un aditivo o sustituto parcial de cemento. A cada una de estas variables es imperante estipularle los límites en los cuales estas van a variar para cumplir con las restricciones anteriormente mencionadas. El rango de variación para cada variable se explicará en este apartado más adelante.

Los 4 componentes de esta mezcla formarán una pirámide de base triangular, cuyos límites serán los vértices de la pirámide, como se muestra a continuación:

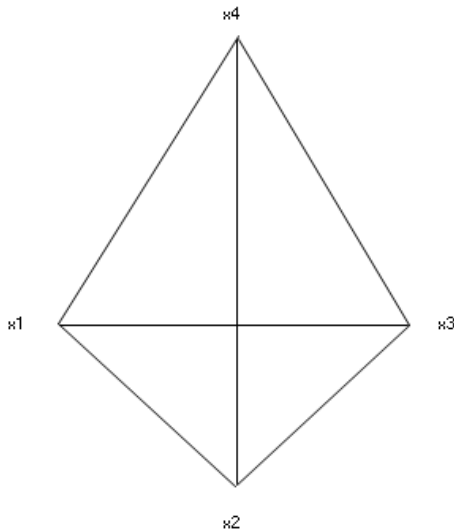


Figura 24. Representación gráfica de la región experimental para un total de 4 componentes o variables.

La pirámide o diseño simplex es la “representación natural de la región experimental para un experimento de mezclas” (Statgraphics, 2006) y “son utilizados para estudiar los efectos de los componentes de una mezcla sobre la variable de respuesta” (Montgomery, 2008).

Los vértices representan las mezclas puras o mezclas que contienen 1 solo componente. Por su parte las aristas representan mezclas binarias o mezclas de dos componentes, las caras representan las mezclas terciarias o mezclas que contienen 3 componentes y las mezclas cuaternarias, que son las de interés para este proyecto, son todos los puntos ubicados dentro del diseño simplex.

Para efectos de esta investigación se trabajó el diseño de mezcla con el software Statgraphics, en el cual se introducen las 4 variables o componentes y una variable de respuesta. El tipo de diseño utilizado corresponde a Simplex-Centroide ya que permite que las corridas sean hasta el centroide del simplex (región de mezclas cuaternarias). La técnica de distribución de puntos a analizar dentro del prisma utilizada fue la cúbica especial, ya que permite colocar los puntos de distribución dentro del prisma sin tocar los extremos del mismo. Al colocar los puntos de análisis dentro del prisma, nos aseguramos que las corridas (bloques aleatorizados) adquieran un sentido práctico, ya

que todas las corridas serán mezclas cuaternarias. El software devuelve un número de bloques experimentales aleatorizados, con sus respectivas proporciones másicas, necesarios para que todo el experimento tenga validez estadística.

Una vez que se obtienen los bloques experimentales se procede a realizar los ensayos de compresión y tensión del cemento hidráulico, así como los de consistencia normal y tiempo de fragua que se analizarán a continuación.

## Resistencia a la Compresión del Cemento Hidráulico

La norma aplicada para la resistencia a la compresión de cubos de mortero es la ASTM C-109. En esta norma se estipulan varios parámetros a tomar en cuenta para poder estipular los límites en los cuales se van a encontrar cada una de las variables anteriormente descritas.

La primera variable en ser tomada en cuenta es la relación agua-cemento de la mezcla, la cual debe de ser la suficiente para que exista un flujo de  $110 \pm 5$ . Para efectos de este proyecto la escogencia del rango en el cual se desean realizar los experimentos es tomada de la tesis de graduación del Ingeniero Ronald Vargas, en la cual el experimentador realiza un análisis de flujo con relaciones entre el rango de 0,42 a 0,52 con el mismo tipo de cemento utilizado para este proyecto, por lo cual sus resultados son de suma validez. Los resultados del análisis de flujo revelan que el rango de variación de la relación agua-cemento que asegura trabajabilidad, conformación y buen moldeo de la mezcla es de 0,44-0,5.

Cabe mencionar que se toman los límites de la A/C del análisis de flujo debido a que el flujo para cada prueba de la investigación no estará dentro del rango que estipula la norma, esto debido a las restricciones del diseño de mezcla, ya que al variar un componente dentro de la mezcla los demás también van a variar en relación a que la mezcla siempre se mantenga como un 100%, y al ser cuatro variables en juego, el flujo se verá afectado. De igual manera se reportará los flujos obtenidos para su posterior análisis.

La segunda variable en ser considerada es la arena (arena Ottawa, con granulometría



controlada y estandarizada según norma ASTM C-109). La norma estipula una relación másica de cemento-arena de 1:2,75. Para poder cumplir con las restricciones del diseño de mezcla se tiene que cumplir con que cada variable fluctúe en un rango estipulado y controlado, por lo que se decide tomar el rango de 1:2,5 - 1:3 como los límites de la relación másica de cemento-arena.

La próxima variable es el material cementante alternativo (GP) cuyo rango de estudio se encuentra entre el 20% al 30% de sustitución másica de cemento hidráulico. Se escoge de esta forma debido a que en investigaciones recopiladas y presentadas en la décima tercera conferencia internacional en avances en la tecnología de concretos realizada por ACI en Montreal, Canadá durante el 2014 se ha descubierto que la pasta de cemento mejora sus propiedades de trabajabilidad y resistencia a la compresión con dosificaciones cercanas al 20% y 30% de polvo de vidrio.

En el caso del cemento, sus límites son dependientes de dos relaciones (A/C y cemento-arena), por lo que sus límites varían conforme lo hacen los límites de las variables anteriormente mencionadas.

La norma ASTM C-109 toma 6 cubos de mortero como cantidad mínima de especímenes para que el resultado sea estadísticamente válido. Debido a esto se selecciona 3 edades de falla, las cuales son a 24 horas, 7 días y 28 días; tomando 2 cubos a fallar por edad. La norma toma esta distribución de especímenes por edad como válida, solo que restringe en parte el rango de variabilidad de un resultado con respecto a otro al ser 2 cubos por edad en vez de 3.

## Resistencia a la Tensión

Con respecto a la prueba de resistencia a la tensión en morteros, se toma como base la norma ASTM C-307, pero su procedimiento no es claro en la elaboración de los especímenes, ni establece las relaciones másicas para su elaboración, por lo que se utiliza un procedimiento homólogo al de la norma ASTM C-307. El procedimiento es brindado por el técnico William Montero de PC. Es un procedimiento elaborado por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme) de la Universidad de Costa Rica, donde se toma como relación cemento-arena una proporción de

1:3 y aconseja utilizar una relación agua-cemento entre el rango de 0,25-0,30. Como se explicó anteriormente se necesita que cada variable tenga un rango experimental para cumplir con las restricciones del diseño de mezclas, pero este rango se encuentra por debajo del analizado anteriormente, por lo que los especímenes no tendrán la trabajabilidad necesaria y las mezclas presentaran gran cantidades de espacios vacíos, afectando de gran manera la resistencia final de cada espécimen por lo que se mantendrá el rango de relación agua-cemento como se estipuló anteriormente.

La cantidad de especímenes por bloque aleatorizado es de 6, igual que en compresión, esto debido a la validez estadística que rige la norma para poder tomar un resultado como válido. De esta manera se tendrá 3 especímenes para falla a 3 días y 3 especímenes para falla a los 28 días. Esta selección de días de falla se debe a que el cemento no presenta una buena resistencia a falla a tensión, por lo que realizar fallas a las 24 horas es completamente irrelevante ya que la resistencia probablemente sea muy cercana a 0 y no se pueda analizar cómo influye el GP dentro de la mezcla.

## Consistencia Normal del Cemento

La norma utilizada para este ensayo fue la ASTM C-187 que regula el porcentaje de agua por peso de cemento para asegurar una buena movilidad y trabajabilidad de la mezcla fresca de concreto. El porcentaje de agua presente en la mezcla es de suma importancia, ya que está íntimamente ligado a la resistencia final de la mezcla debido al porcentaje de vacíos que puede generar en la misma.

De aquí la importancia de realizar este ensayo como el de tiempo de fragua para las muestras con el material alternativo cementante.

Se tomarán cada bloque aleatorizado con su respectivo porcentaje de sustitución de GP, así como la relación cemento-arena de cada bloque y se comparará con una muestra control sin GP. De esta forma se verá la influencia del GP a diferentes dosificaciones en las mezclas. Cabe resaltar que el porcentaje de agua obtenido para cada bloque aleatorizado obtenido mediante esta prueba, será el utilizado posteriormente para

realizar el ensayo de tiempo de fragua, de igual manera para cada bloque aleatorizado.

## **Tiempo de Fragua**

El sulfato (yeso) es el principal componente que regula el tiempo de fragua de una mezcla. Sin embargo, entre otros factores, la finura del cemento también afecta. En este caso también va a afectar el tamaño de partícula del GP, debido a su funcionamiento como material cementante.

Como se mencionó anteriormente, el porcentaje de agua para realizar este ensayo fue el obtenido de la prueba de consistencia normal, tal y como lo regula la norma ASTM C-191. Se realizará la prueba de igual manera a cada bloque aleatorizado obtenido del diseño experimental y se comparará con una muestra control sin presencia de GP.

## **ANOVA**

Se realizarán 3 ANOVAS en total, la primera para determinar si la adición de vidrio representa cambios estadísticamente significativos a las medias poblacionales en estudio, de esta manera se podrá estudiar la interacción del GP dentro de la mezcla, una segunda ANOVA para analizar si el porcentaje de sustitución es estadísticamente determinante en las medias poblacionales, y una tercera ANOVA para determinar con cual porcentaje de sustitución se presentan mejores rendimientos de las mezclas en estudio.

Cabe resaltar que cada ANOVA descrita anteriormente se estará realizando por edad de falla, esto debido a que uno de los requisitos de este análisis es que los resultados presenten una distribución normal de datos y si se realizan estos estudios con todos los datos de todas las edades este parámetro no se cumple, ya que la variación entre los datos será muy grande y presentarán otro tipo de distribución.

# Resultados

## Diseño Experimental

En este apartado se muestran los resultados obtenidos a partir de las actividades llevadas a cabo descritas anteriormente en la metodología.

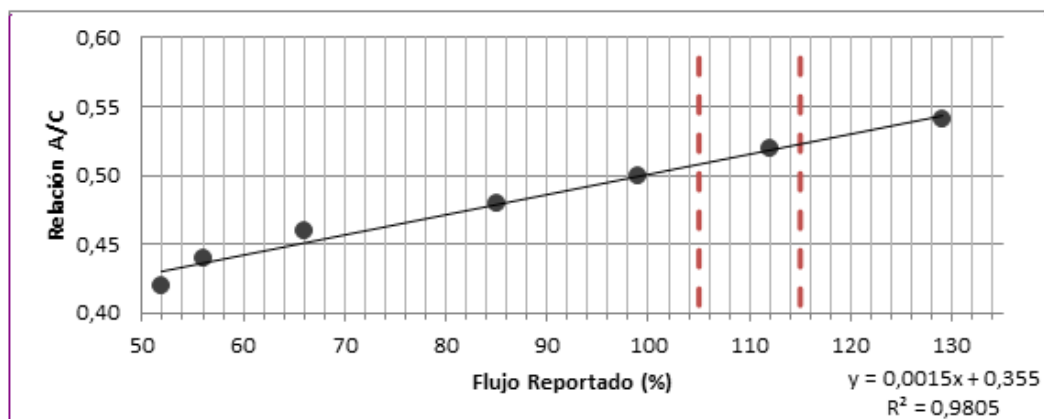
A continuación, se muestra el análisis y los resultados de flujo aceptables obtenidos por el Ingeniero Ronald Vargas en su tesis de

graduación, los cuales son tomados como los límites inferior y superior de la relación A/C utilizados dentro del diseño de mezcla. Cabe resaltar que este análisis se realizó con cemento UG-AR marca HOLCIM, iguales materiales utilizados para este proyecto.

**Cuadro 3. Análisis de Flujo a Cemento UG-AR para escogencia de límites de porcentaje de agua**

N	A/C	Cemento (g)	Arena (g)	Agua (g)	Flujo (%)
1	0,42	500,00	1375,00	210,00	52
2	0,44	500,00	1375,00	220,00	56
3	0,46	500,00	1375,00	230,00	66
4	0,48	500,00	1375,00	240,00	85
5	0,50	500,00	1375,00	250,00	99
6	0,52	500,00	1375,00	260,00	112
7	0,54	500,00	1375,00	270,00	129

Fuente: (Zúñiga, 2015)



**Figura 25. Representación gráfica de la relación A/C vs el comportamiento del flujo dentro de la muestra control.**  
Fuente: (Zúñiga, 2015)

A partir de estos resultados y basándose en observaciones del experimentador, se toma la decisión de discretizar el rango utilizado en el análisis a un rango que presente una trabajabilidad suficiente para la realización de los ensayos posteriores.

Con estos resultados, y los parámetros anteriormente descritos de cada variable se culmina con la selección de los rangos para cada variable y se procede a realizar el diseño de mezcla de 4 componentes.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la elaboración del diseño de mezclas, el cual dará como resultado la creación de la base de ejecución del resto del proyecto.

**Cuadro 4. Cálculo de porcentajes máxicos para la elaboración de Bloques Aleatorizados**

Limites	Cemento	Arena	A/C	Vidrio	Totales
Inferior	1,00	2,50	0,44	0,20	4,14
%	24,15	60,39	10,63	4,83	100,00
Típico	1,00	2,75	0,46	0,00	4,21
%	23,75	65,32	10,93	0,00	100,00
Superior	1,00	3,00	0,50	0,30	4,80
%	20,83	62,50	10,42	6,25	100,00

Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro 5. Límites superior e inferior de cada variable para a aleatorización de bloques experimentales**

	Cemento	Arena	A/C	Vidrio	Totales
% Inferior	24,15	60,39	10,63	4,83	100,00
% Típico	23,75	65,32	10,93	0,00	100,00
% Superior	20,83	62,50	10,42	6,25	100,00

Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro 6. Datos obtenidos de Statgraphics luego de la aleatorización.**

<u>Bloque</u>	<u>Proporciones</u>			
1	1,00	2,50	0,44	0,20
2	1,00	2,78	0,45	0,22
3	1,00	2,52	0,49	0,23
4	1,00	2,81	0,47	0,26
5	1,00	2,65	0,45	0,27
6	1,00	2,97	0,48	0,30
7	1,00	2,68	0,46	0,28
8	1,00	3,00	0,50	0,30

Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 7. Bloques aleatorizados sin contenido de vidrio (Patrón)**

Bloque #	Cemento	Arena	A/Mc	Vidrio
1	1,00	2,50	0,44	0,00
2	1,00	2,78	0,45	0,00
3	1,00	2,52	0,49	0,00
4	1,00	2,81	0,47	0,00
5	1,00	2,65	0,45	0,00
6	1,00	2,97	0,48	0,00
7	1,00	2,68	0,46	0,00
8	1,00	3,00	0,50	0,00

Fuente: cuadro 6

**Cuadro 8. Bloques aleatorizados con dosificación de vidrio (Experimentales)**

Bloque #	Cemento	Arena	A/Mc	Vidrio
1'	1,00	2,50	0,44	0,20
2'	1,00	2,78	0,45	0,22
3'	1,00	2,52	0,49	0,23
4'	1,00	2,81	0,47	0,26
5'	1,00	2,65	0,45	0,27
6'	1,00	2,97	0,48	0,29
7'	1,00	2,68	0,46	0,28
8'	1,00	3,00	0,50	0,30

Fuente: cuadro 6

Cabe resaltar que a partir de este momento cualquier dato, tabla o figura que se encuentre resaltada en verde será porque es un factor experimental con adición de vidrio. Una vez que se crea el modelo final experimental con el cual se va a trabajar se procede a realizar los especímenes a fallar a compresión según la normativa ASTM C-109.

## Resistencia a la Compresión

En este apartado se presentan los resultados de las fallas a compresión de los distintos bloques

creados anteriormente. Según normativa, se debe de cumplir con el parámetro de flujo, pero por motivos de parámetros y elaboración del diseño experimental este punto no se va a cumplir; sin embargo, se reporta de igual manera el flujo para cada mezcla de mortero para observar el comportamiento de la misma. A continuación, se muestran los resultados promedios finales de las fallas a 24 horas, 7 días y 28 días respectivamente. Las tablas con la totalidad de datos se encuentran en la sección de anexos.

**Cuadro 9. Resumen de flujos reportados por bloque con su respectiva resistencia a la compresión a 24h, 7 días y 28 días respectivamente**

Bloque #	Cemento	Arena	A/Mc	Vidrio	Flujo	Resistencia 24h (Mpa)	Resistencia 7 días (Mpa)	Resistencia 28 días (Mpa)
1	1,00	2,50	0,44	0,00	90,5%	20,41	36,21	44,01
2	1,00	2,78	0,45	0,00	68,0%	16,67	29,04	34,98
3	1,00	2,52	0,49	0,00	130,0%	17,97	33,24	41,21
4	1,00	2,81	0,47	0,00	84,5%	17,23	29,44	36,53
5	1,00	2,65	0,45	0,00	82,5%	20,14	33,08	42,90
6	1,00	2,97	0,48	0,00	61,5%	13,85	23,75	28,55
7	1,00	2,68	0,46	0,00	77,5%	18,36	32,61	39,50
8	1,00	3,00	0,50	0,00	101,5%	15,33	27,41	34,75
1'	1,00	2,50	0,44	0,20	102,5%	15,74	28,77	39,22
2'	1,00	2,78	0,45	0,22	63,5%	12,66	22,36	32,00
3'	1,00	2,52	0,49	0,23	-	13,25	26,18	36,87
4'	1,00	2,81	0,47	0,26	102,5%	12,55	24,48	34,65
5'	1,00	2,65	0,45	0,27	101,5%	13,56	25,46	36,66
6'	1,00	2,97	0,48	0,29	84,0%	10,70	23,37	33,68
7'	1,00	2,68	0,46	0,28	86,0%	11,89	23,57	34,05
8'	1,00	3,00	0,50	0,30	84,0%	9,38	19,99	31,39

Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 10. Comparación porcentual de incrementos en la resistencia a compresión para fallas a 24 horas y 7 días, así como el aumento porcentual de la resistencia por bloques sin y con GP respectivamente para mismas edades.**

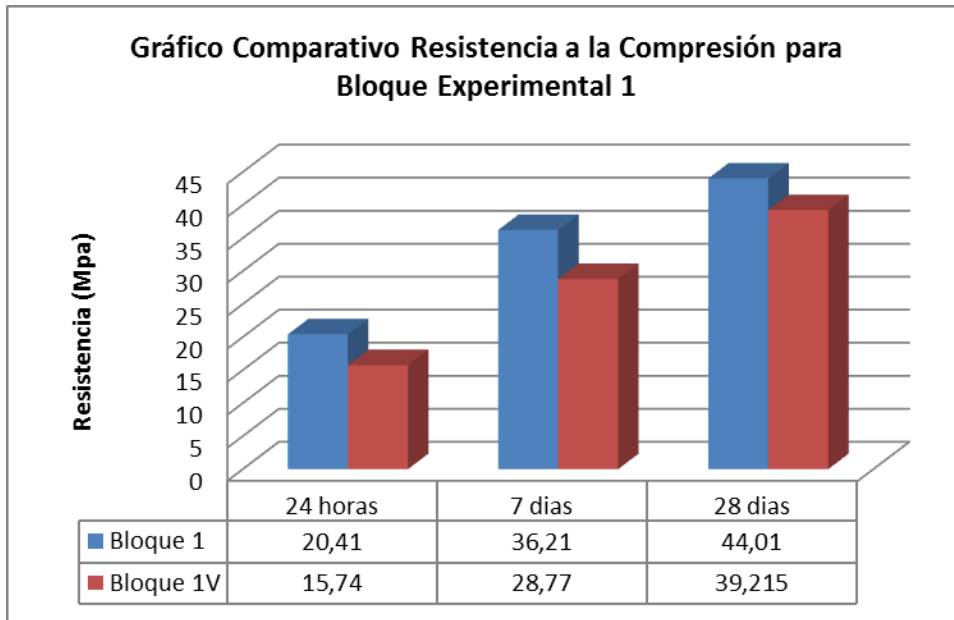
Bloques de Experimentación						Resistencia (Mpa)		Incremento en Resistencia%	Incremento Promedio de Resistencia%
N	Cemento	Arena	A/C	% Vidrio	Agua %	24 horas	7 Días		
1	1,00	2,50	0,44	0,00	11,2	20,41	36,21	43,63%	42,78%
2	1,00	2,78	0,45	0,00	10,6	16,67	29,04	42,59%	
3	1,00	2,52	0,49	0,00	12,2	17,97	33,24	45,95%	
4	1,00	2,81	0,47	0,00	11,0	17,23	29,44	41,46%	
5	1,00	2,65	0,45	0,00	11,0	20,14	33,08	39,12%	
6	1,00	2,97	0,48	0,00	10,8	13,85	23,75	41,69%	
7	1,00	2,68	0,46	0,00	11,1	18,36	32,61	43,70%	
8	1,00	3,00	0,50	0,00	11,1	15,33	27,41	44,06%	
1'	1,00	2,50	0,44	0,20	10,6	15,74	28,77	45,29%	48,81%
2'	1,00	2,78	0,45	0,22	10,1	12,66	22,36	43,40%	
3'	1,00	2,52	0,49	0,23	11,6	13,25	26,18	49,39%	
4'	1,00	2,81	0,47	0,26	10,4	12,55	24,48	48,75%	
5'	1,00	2,65	0,45	0,27	10,3	13,56	25,46	46,75%	
6'	1,00	2,97	0,48	0,29	10,1	10,70	23,37	54,21%	
7'	1,00	2,68	0,46	0,28	10,4	11,89	23,57	49,58%	
8'	1,00	3,00	0,50	0,30	10,4	9,38	19,99	53,08%	

Fuente: cuadro 9

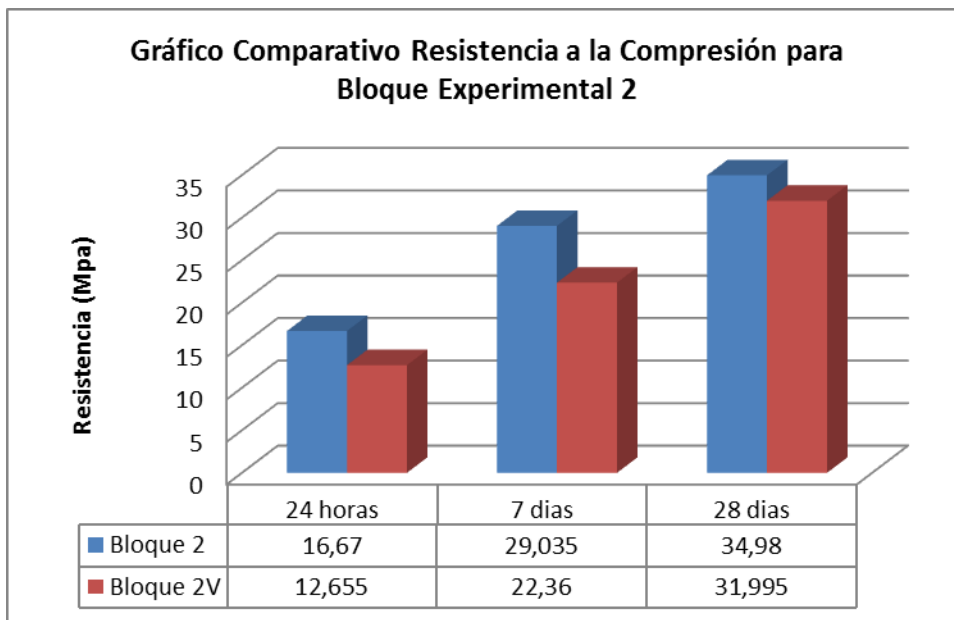
**Cuadro 11. Comparación porcentual de incrementos en la resistencia a compresión para fallas a 7 días y 28 días, así como el aumento porcentual de la resistencia por bloques sin y con GP respectivamente para mismas edades.**

Bloques de Experimentación						Resistencia (Mpa)		Incremento en Resistencia%	Incremento Promedio de Resistencia%
N	Cemento	Arena	A/C	% Vidrio	Agua %	7 días	28 días		
1	1,00	2,50	0,44	0,00	11,2	36,21	44,01	17,72%	19%
2	1,00	2,78	0,45	0,00	10,6	29,04	34,98	17,00%	
3	1,00	2,52	0,49	0,00	12,2	33,24	41,21	19,35%	
4	1,00	2,81	0,47	0,00	11,0	29,44	36,53	19,42%	
5	1,00	2,65	0,45	0,00	11,0	33,08	42,90	22,89%	
6	1,00	2,97	0,48	0,00	10,8	23,75	28,55	16,82%	
7	1,00	2,68	0,46	0,00	11,1	32,61	39,50	17,43%	
8	1,00	3,00	0,50	0,00	11,1	27,41	34,75	21,13%	
1'	1,00	2,50	0,44	0,20	10,6	28,77	39,22	26,64%	30%
2'	1,00	2,78	0,45	0,22	10,1	22,36	32,00	30,11%	
3'	1,00	2,52	0,49	0,23	11,6	26,18	36,87	28,99%	
4'	1,00	2,81	0,47	0,26	10,4	24,48	34,65	29,35%	
5'	1,00	2,65	0,45	0,27	10,3	25,46	36,66	30,56%	
6'	1,00	2,97	0,48	0,29	10,1	23,37	33,68	30,61%	
7'	1,00	2,68	0,46	0,28	10,4	23,57	34,05	30,78%	
8'	1,00	3,00	0,50	0,30	10,4	19,99	31,39	36,31%	

Fuente: cuadro 9

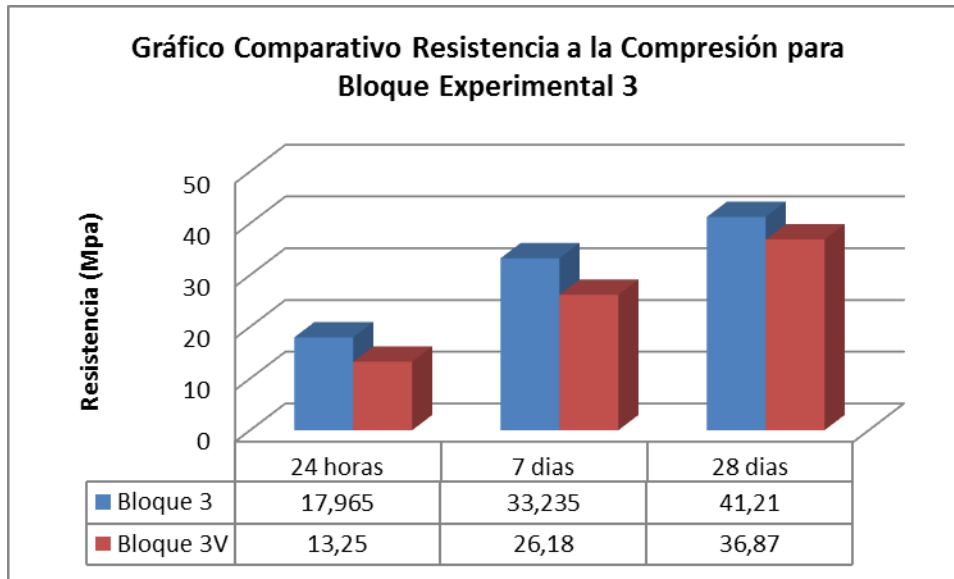


9) **Figura 26. Comparación gráfica de resistencias a compresión por edad para bloque experimental 1 (Fuente: cuadro**

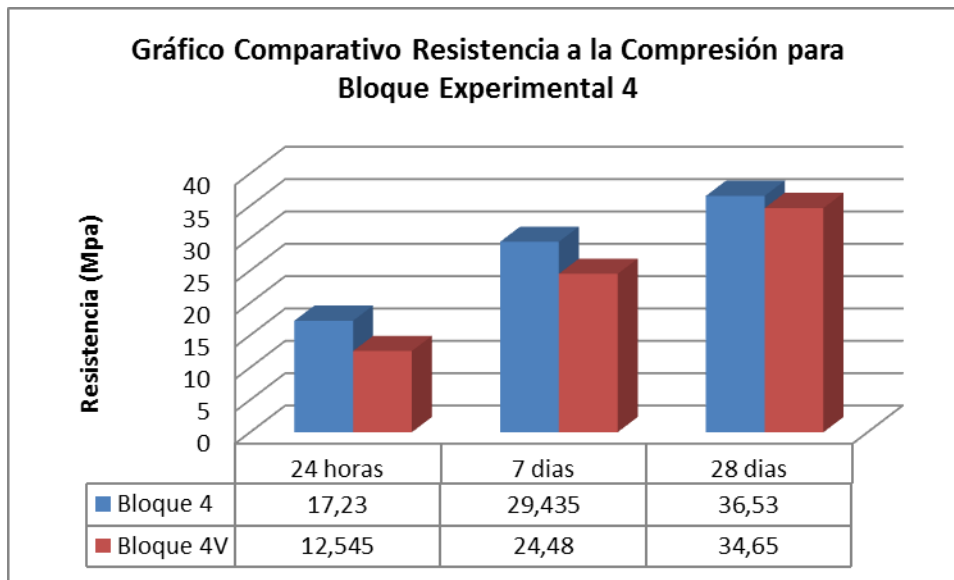


9) **Figura 27. Comparación gráfica de resistencias a compresión por edad para bloque experimental 2 (Fuente: cuadro**

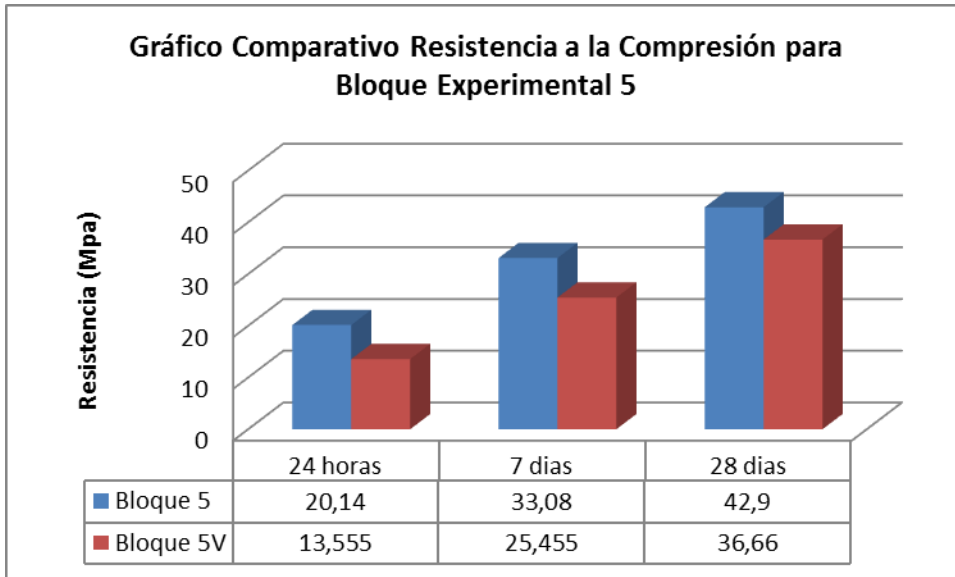




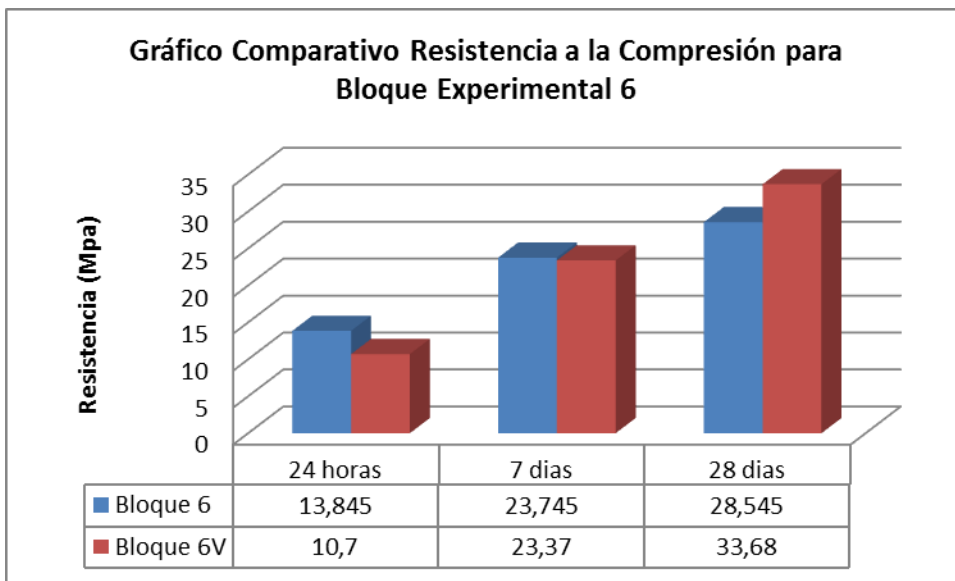
9) **Figura 28. Comparación gráfica de resistencias a compresión por edad para bloque experimental 3.(Fuente: cuadro**



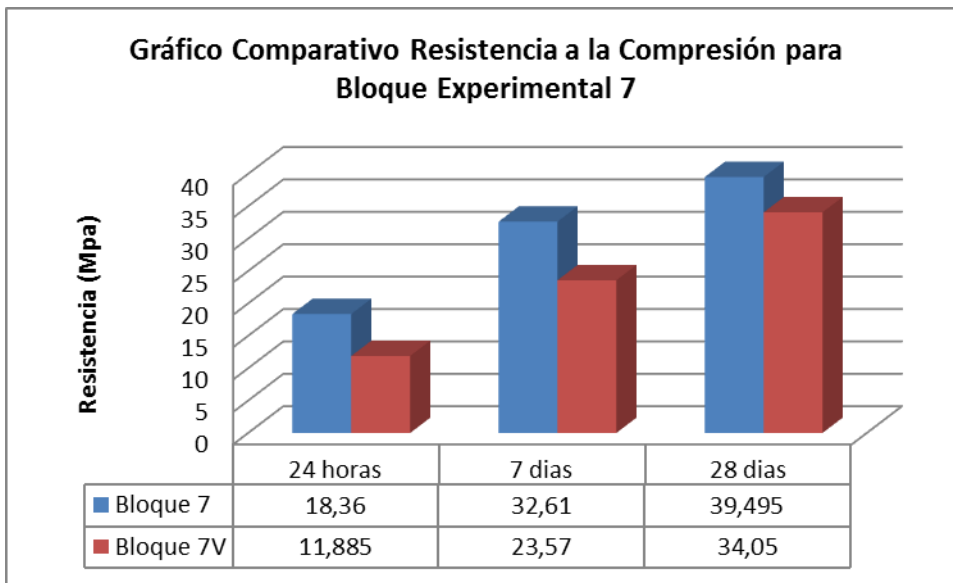
9) **Figura 29. Comparación gráfica de resistencias a compresión por edad para bloque experimental 4.(Fuente: cuadro**



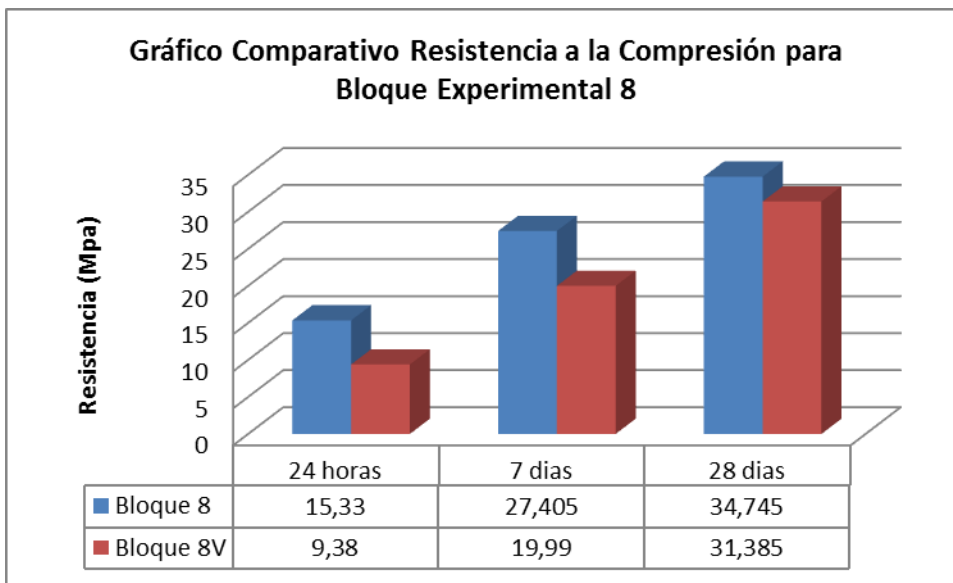
9) **Figura 30. Comparación gráfica de resistencias a compresión por edad para bloque experimental 5(Fuente: cuadro**



9) **Figura 31. Comparación gráfica de resistencias a compresión por edad para bloque experimental 6(Fuente: cuadro**



9) **Figura 32. Comparación gráfica de resistencias a compresión por edad para bloque experimental 7(Fuente: cuadro**



9) **Figura 33. Comparación gráfica de resistencias a compresión por edad para bloque experimental 8(Fuente: cuadro**

**Cuadro 12. Comparación de rendimientos de las mezclas con su respectivo control directo (muestra sin GP) para fallas a compresión a 24 horas y 7 días respectivamente.**

Comparación	24h	7 días	Mejoria %
C 1-1'	-22,88%	-20,55%	10,20%
C 2-2'	-24,09%	-22,99%	4,55%
C 3-3'	-26,25%	-21,23%	19,12%
C 4-4'	-27,19%	-16,83%	38,09%
C 5-5'	-32,70%	-23,05%	29,50%
C 6-6'	-22,72%	-1,58%	93,05%
C 7-7'	-35,27%	-27,72%	21,39%
C 8-8'	-38,81%	-27,06%	30,29%

Fuente: cuadro 10

**Cuadro 13. Comparación de rendimientos de las mezclas con su respectivo control directo (muestra sin GP) para fallas a compresión a 7 días y 28 días respectivamente.**

Comparación	7 días	28 días	Mejoria %
C 1-1'	-20,55%	-10,90%	46,97%
C 2-2'	-22,99%	-8,53%	62,88%
C 3-3'	-21,23%	-10,53%	50,39%
C 4-4'	-16,83%	-5,15%	69,43%
C 5-5'	-23,05%	-14,55%	36,90%
C 6-6'	-1,58%	17,99%	1239,07%
C 7-7'	-27,72%	-13,79%	50,27%
C 8-8'	-27,06%	-9,67%	64,26%

Fuente: cuadro 11

## Resistencia a la Tensión

Las pruebas de resistencia a la tensión directa en morteros se realizaron con la norma ASTM C-307. Como se mencionó anteriormente, esta norma no presenta un procedimiento claro a seguir en la elaboración de las briquetas (especímenes a fallar), por lo que se utilizó el procedimiento de LANAMME brindado por el técnico William de PC. Este procedimiento en la fase de conformación y moldeo de las briquetas estipula que hay que utilizar los dedos pulgares para realizar el moldeo de los especímenes y regula la fuerza en un rango de 15-20 lb. Al no utilizar un apisonador normado (con peso y altura de caída normada, por ende, una fuerza de caída

constante), no se puede asegurar una distribución de esfuerzos 100% equitativa en el espécimen, por lo que se generarán acumulaciones de esfuerzos no necesariamente en la parte angosta de la briketa (sección de falla) y consecuentemente la falla no siempre será representativa.

A pesar de estos inconvenientes, se selecciona esta prueba de igual manera (en vez de vigas), debido a la limitante de la obtención de GP, y al ser las briquetas especímenes mucho más pequeños, se necesitará menos GP para su conformación. A continuación, se muestran los resultados de las fallas a tensión directa en las mezclas de mortero conformadas para 7 días y 28 días de falla respectivamente.

**Cuadro 14. Resumen de resistencias obtenidas a tensión directa por bloque con sus respectivas edades de falla**

Bloque #	Cemento	Arena	A/Mc	Vidrio	Resist. 7 días (Mpa)	Resist. 28 días (Mpa)
1	1,00	2,50	0,44	0,00	2,78	3,28
2	1,00	2,78	0,45	0,00	2,67	2,95
3	1,00	2,52	0,49	0,00	3,20	2,89
4	1,00	2,81	0,47	0,00	2,89	3,00
5	1,00	2,65	0,45	0,00	3,03	2,67
6	1,00	2,97	0,48	0,00	2,23	2,03
7	1,00	2,68	0,46	0,00	2,51	2,87
8	1,00	3,00	0,50	0,00	2,65	2,70
1'	1,00	2,50	0,44	0,20	2,67	3,10
2'	1,00	2,78	0,45	0,22	2,18	2,92
3'	1,00	2,52	0,49	0,23	2,67	3,14
4'	1,00	2,81	0,47	0,26	2,89	2,87
5'	1,00	2,65	0,45	0,27	2,62	2,78
6'	1,00	2,97	0,48	0,29	2,54	2,84
7'	1,00	2,68	0,46	0,28	2,87	3,09
8'	1,00	3,00	0,50	0,30	2,85	2,81

Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 15. Comparación porcentual de incrementos en la resistencia a tensión directa para fallas a 7 días y 28 días, así como el aumento porcentual de la resistencia por bloques sin y con GP respectivamente para mismas edades**

Bloques de Experimentación						Resistencia (Mpa)			Incremento Promedio %
N	Cemento	Arena	A/C	% Vidrio	Agua %	7 días	28 días	Incremento en Resistencia%	
1	1,00	2,50	0,44	0,00	11,2	2,78	3,28	15,13%	1,08%
2	1,00	2,78	0,45	0,00	10,6	2,67	2,95	9,35%	
3	1,00	2,52	0,49	0,00	12,2	3,20	2,89	-10,48%	
4	1,00	2,81	0,47	0,00	11,0	2,89	3,00	3,67%	
5	1,00	2,65	0,45	0,00	11,0	3,03	2,67	-13,40%	
6	1,00	2,97	0,48	0,00	10,8	2,23	2,03	-10,20%	
7	1,00	2,68	0,46	0,00	11,1	2,51	2,87	12,50%	
8	1,00	3,00	0,50	0,00	11,1	2,65	2,70	2,04%	
1'	1,00	2,50	0,44	0,20	10,6	2,67	3,10	13,78%	9,44%
2'	1,00	2,78	0,45	0,22	10,1	2,18	2,92	25,47%	
3'	1,00	2,52	0,49	0,23	11,6	2,67	3,14	14,91%	
4'	1,00	2,81	0,47	0,26	10,4	2,89	2,87	-0,96%	
5'	1,00	2,65	0,45	0,27	10,3	2,62	2,78	5,94%	
6'	1,00	2,97	0,48	0,29	10,1	2,54	2,84	10,68%	
7'	1,00	2,68	0,46	0,28	10,4	2,87	3,09	7,14%	
8'	1,00	3,00	0,50	0,30	10,4	2,85	2,81	-1,47%	

Fuente: Cuadro 14

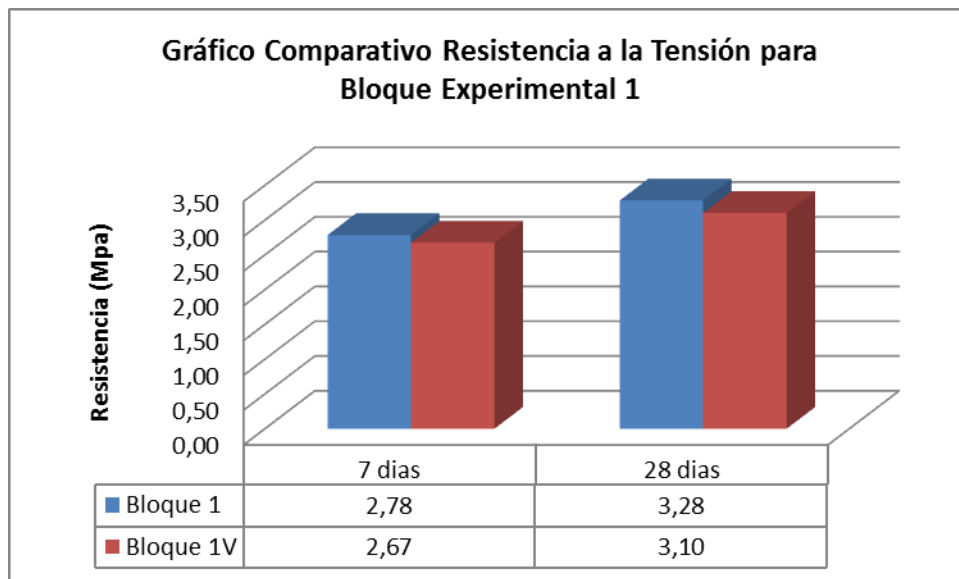


Figura 34. Comparación gráfica de resistencias a tensión por edad para bloque experimental 1(Fuente: cuadro 14)

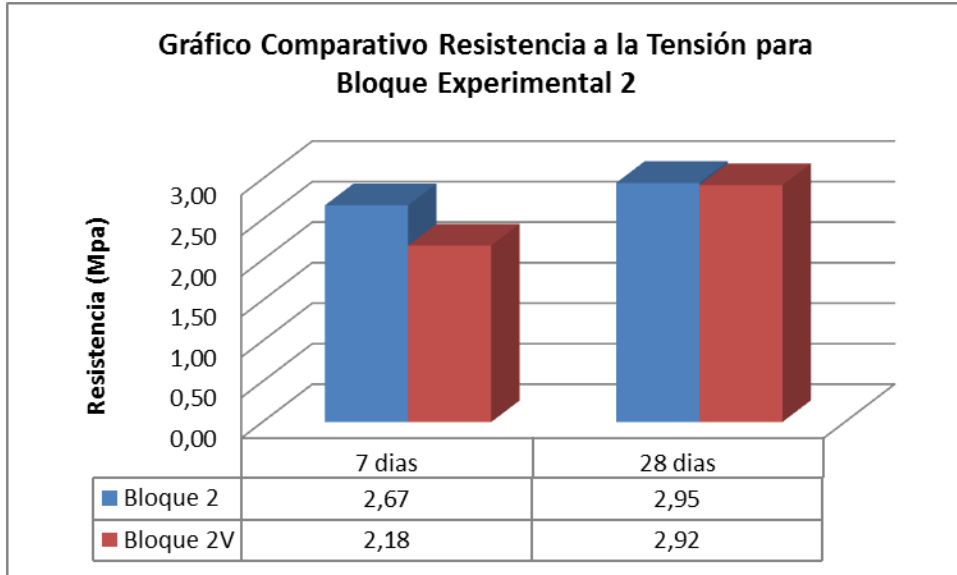


Figura 35. Comparación gráfica de resistencias a tensión por edad para bloque experimental 2(Fuente: cuadro 14)

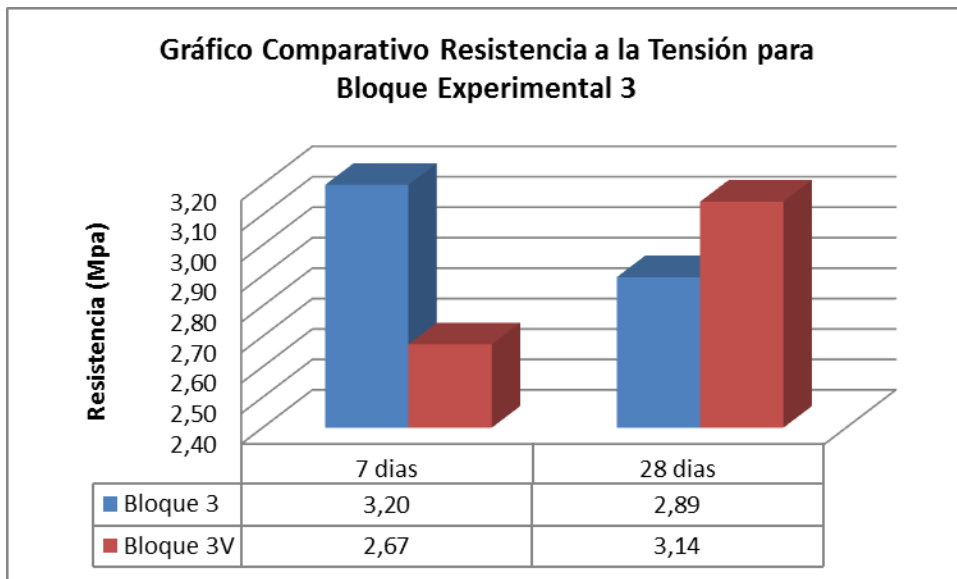


Figura 36. Comparación gráfica de resistencias a tensión por edad para bloque experimental 3(Fuente: cuadro 14)

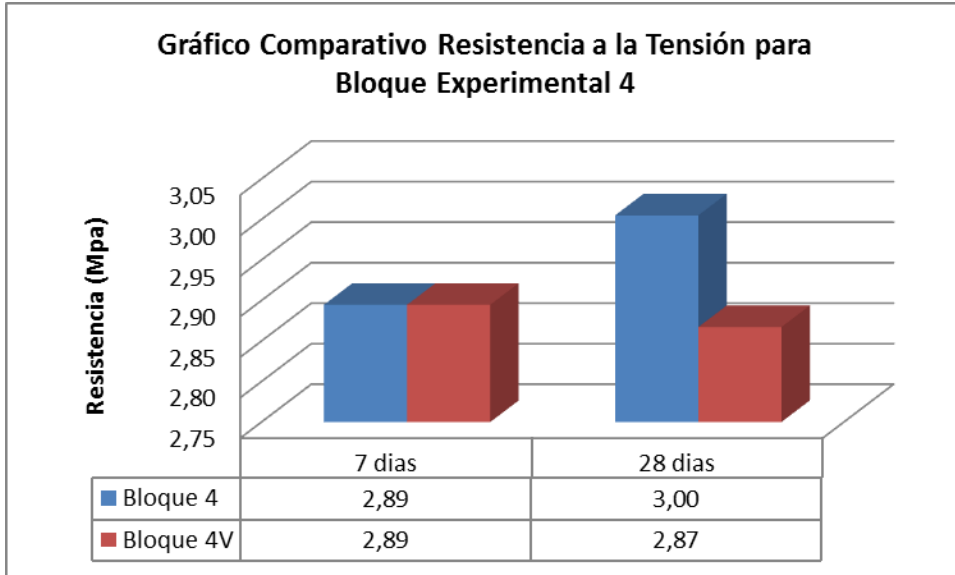


Figura 37. Comparación gráfica de resistencias a tensión por edad para bloque experimental 4(Fuente: cuadro 14)

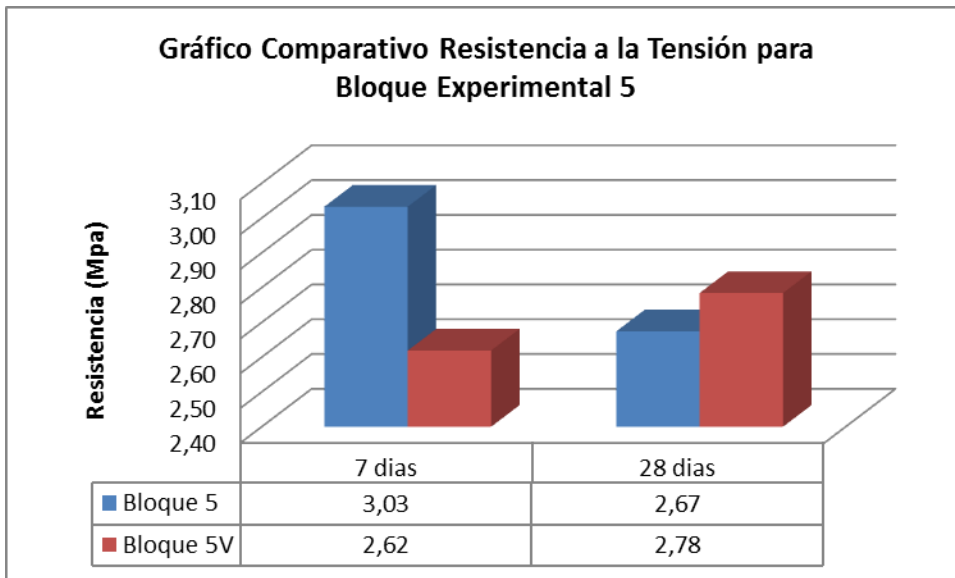


Figura 38. Comparación gráfica de resistencias a tensión por edad para bloque experimental 5(Fuente: cuadro 14)



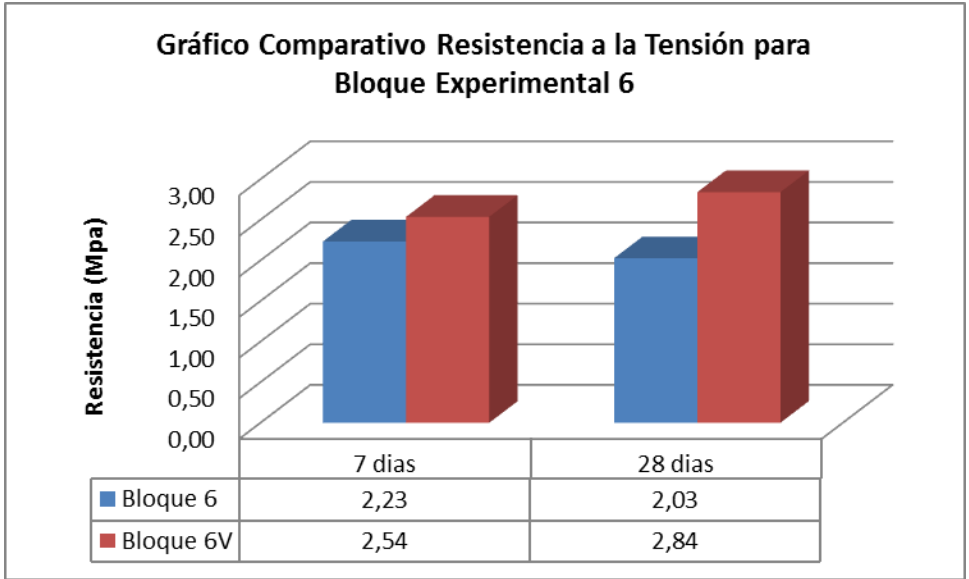


Figura 39. Comparación gráfica de resistencias a tensión por edad para bloque experimental 6(Fuente: cuadro 14)

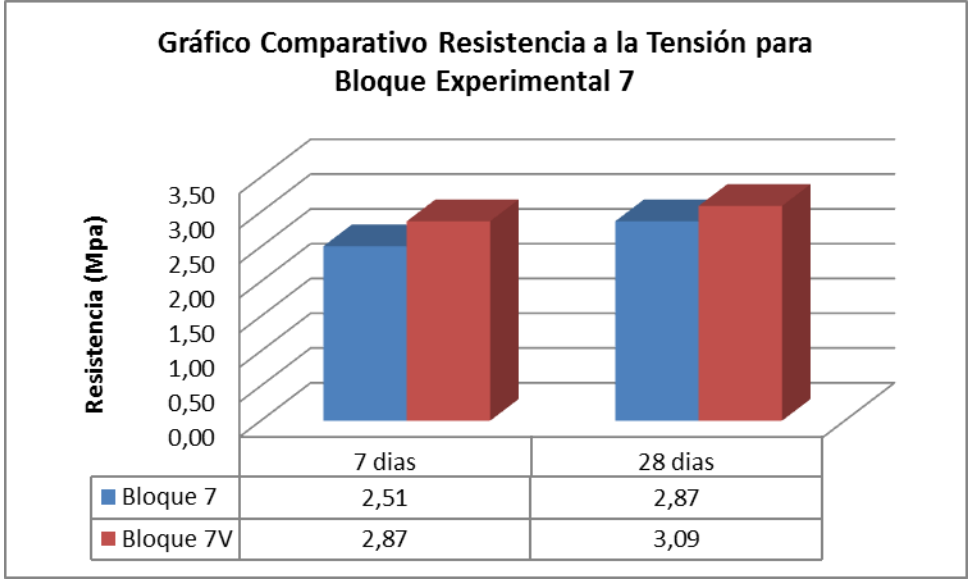


Figura 40. Comparación gráfica de resistencias a tensión por edad para bloque experimental 7(Fuente: cuadro 14)

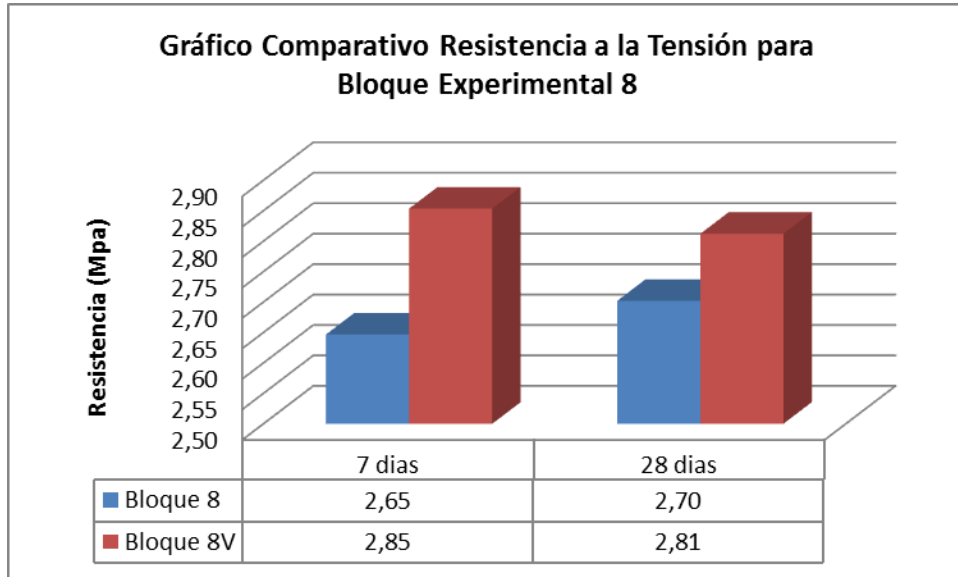


Figura 41. Comparación gráfica de resistencias a tensión por edad para bloque experimental 8(Fuente: cuadro 14)

**Cuadro 16. Comparación de rendimientos de las mezclas con su respectivo control directo (muestra sin GP) para fallas a tensión a 7 días y 28 días respectivamente.**

Comparación	7 días	28 días	Comportamiento	Característica del comportamiento
C 1-1'	-3,96%	-5,46%	-27,49%	Retroceso
C 2-2'	-18,56%	-0,93%	94,96%	Mejoría
C 3-3'	-16,38%	8,57%	152,33%	Mejoría
C 4-4'	0,00%	-4,59%	-100,00%	Retroceso
C 5-5'	-13,64%	4,12%	130,24%	Mejoría
C 6-6'	13,58%	40,14%	66,16%	Mejoría
C 7-7'	14,29%	7,69%	-46,15%	Mejoría
C 8-8'	7,81%	4,08%	-47,76%	Mejoría

Fuente: cuadro 15

## Consistencia Normal

Para esta prueba se respeta el porcentaje de sustitución de GP en vez de cemento presente en cada bloque para poder analizar la demanda de agua que cada uno requiere. Cabe mencionar que la norma utilizada es la ASTM C-187.

A diferencia de las pruebas mecánicas anteriores, en esta prueba se cuenta únicamente con un control (muestra sin GP), debido a que la única variable a controlar es el GP (en sus dosificaciones de sustitución estipuladas en los bloques creados anteriormente). A continuación se muestran los resultados de la demanda de agua obtenidos mediante curvas de mejor ajuste ante la tendencia de los datos para cada bloque.

**Cuadro 17. Penetraciones del vástago obtenidas para muestra control a diferentes relaciones A/C**

N	A/C	Cemento (g)	Vidrio		Agua (g)	Lect. Inicial	Lect. Final	Penetración (mm)
			%	(g)				
1	0,26	650	0	0	169	21	26	5
2	0,27	650	0	0	175,5	20	30	10
3	0,28	650	0	0	182	19	25	12
4	0,29	650	0	0	188,5	19	32	13

Fuente: elaboración propia



### Demanda de agua para control

9 mm: 0,267

11 mm: 0,274

10 mm: 0,270

Figura 42. Representación gráfica de la demanda de agua para y cálculo de rango de consistencia normal para muestra control. (Fuente: cuadro 17)

**Cuadro 18. Penetraciones del vástago obtenidas para bloque 1 a diferentes relaciones A/C**

N	A/MC	Cemento (g)	Vidrio		Agua (g)	Lect. Inicial	Lect. Final	Penetración (mm)
			%	(g)				
1	0,26	520	20%	130	169	16	22	6
2	0,27	520	20%	130	175,5	17	26	9
4	0,28	520	20%	130	182	18	30	12
5	0,29	520	20%	130	188,5	17	34	17

Fuente: Elaboración propia

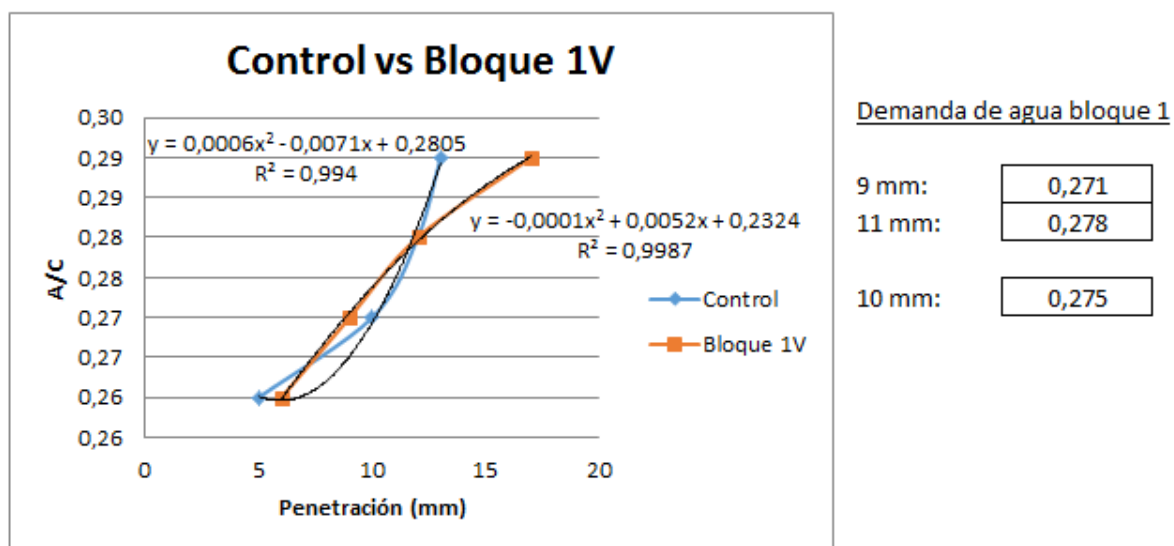
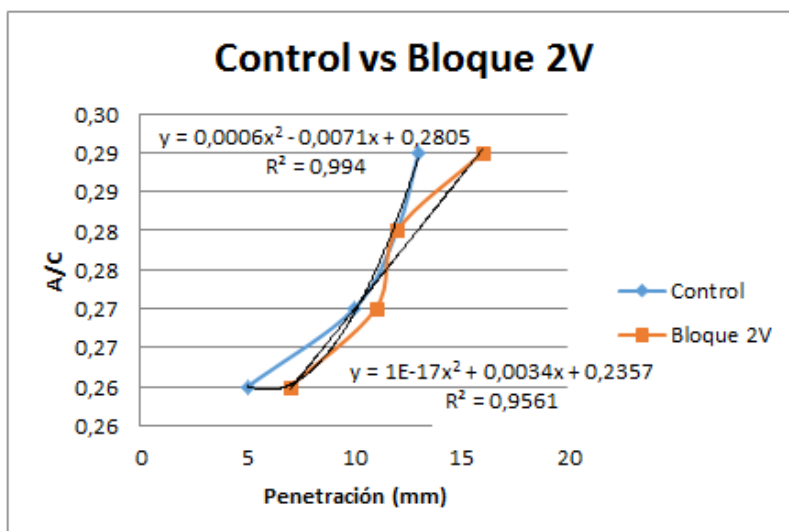


Figura 43. Representación gráfica de la demanda de agua para y cálculo de rango de consistencia normal para bloque 1. (Fuente: cuadro 18)

**Cuadro 19. Penetraciones del vástago obtenidas para bloque 2 a diferentes relaciones A/C**

N	A/MC	Cemento (g)	Vidrio		Agua (g)	Lect. Inicial	Lect. Final	Penetración (mm)
			%	(g)				
1	0,26	507	22%	143	169	17	24	7
2	0,27	507	22%	143	175,5	17	28	11
3	0,28	507	22%	143	182	16	28	12
4	0,29	507	22%	143	188,5	15	31	16

Fuente: Elaboración propia



Demanda de agua bloque 2

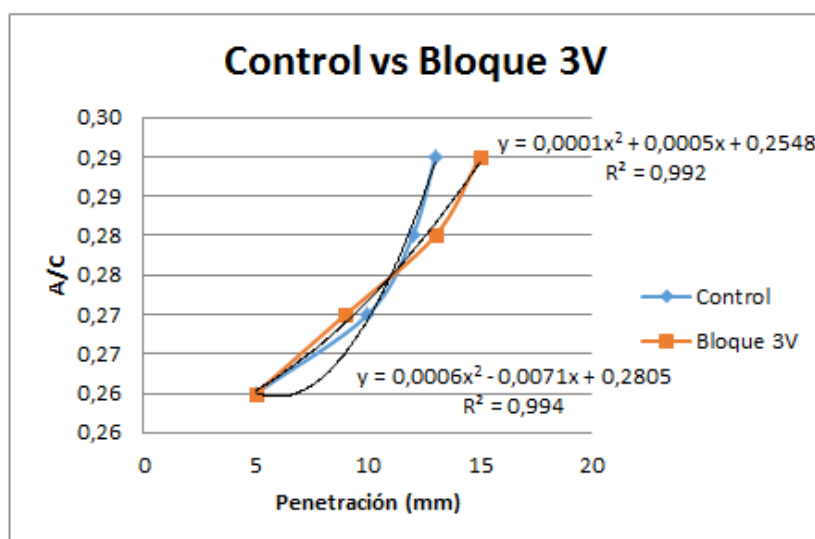
9 mm:	0,266
11 mm:	0,273
10 mm:	0,270

Figura 44. Representación gráfica de la demanda de agua para y cálculo de rango de consistencia normal para bloque 2 (Fuente: cuadro 19)

**Cuadro 20. Penetraciones del vástago obtenidas para bloque 3 a diferentes relaciones A/C**

N	A/MC	Cemento (g)	Vidrio		Agua (g)	Lect. Inicial	Lect. Final	Penetración (mm)
			%	(g)				
1	0,26	500,5	23%	149,5	169	14	19	5
2	0,27	500,5	23%	149,5	175,5	14	21	9
3	0,28	500,5	23%	149,5	182	17	30	13
4	0,29	500,5	23%	149,5	188,5	16	31	15

Fuente: Elaboración propia



Demanda de agua bloque 3

9 mm:	0,267
11 mm:	0,272
10 mm:	0,270

Figura 45. Representación gráfica de la demanda de agua para y cálculo de rango de consistencia normal para bloque 3 (Fuente: cuadro 20)

**Cuadro 21. Penetraciones del vástago obtenidas para bloque 4 a diferentes relaciones A/C**

N	A/MC	Cemento (g)	Vidrio		Agua (g)	Lect. Inicial	Lect. Final	Penetración (mm)
			%	(g)				
1	0,26	481	26%	169	169	12	16	4
2	0,27	481	26%	169	175,5	14	19	5
3	0,28	481	26%	169	182	17	30	13
4	0,29	481	26%	169	188,5	17	34	17

Fuente: Elaboración propia

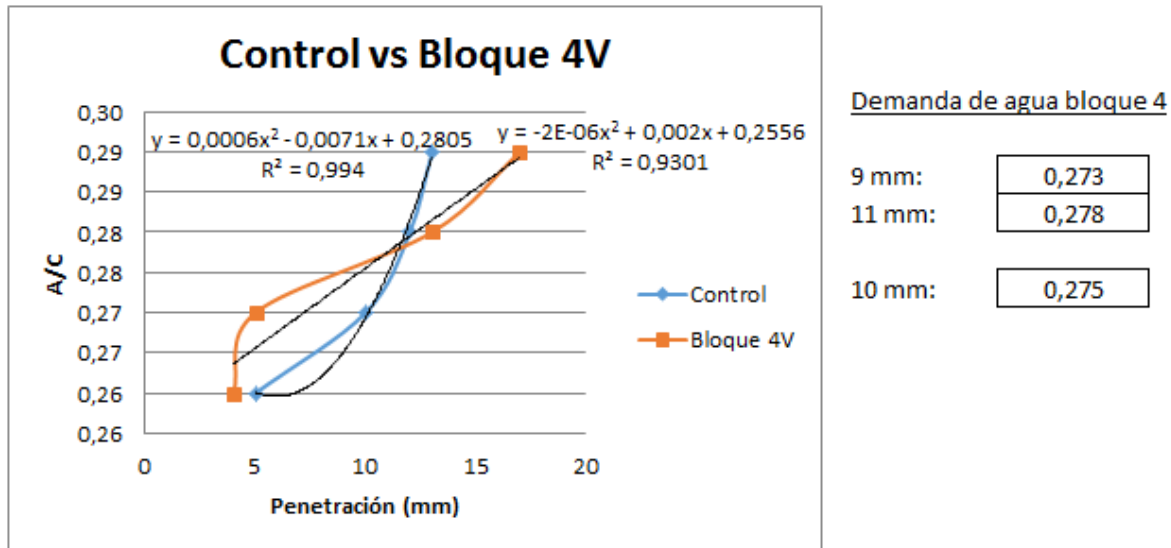
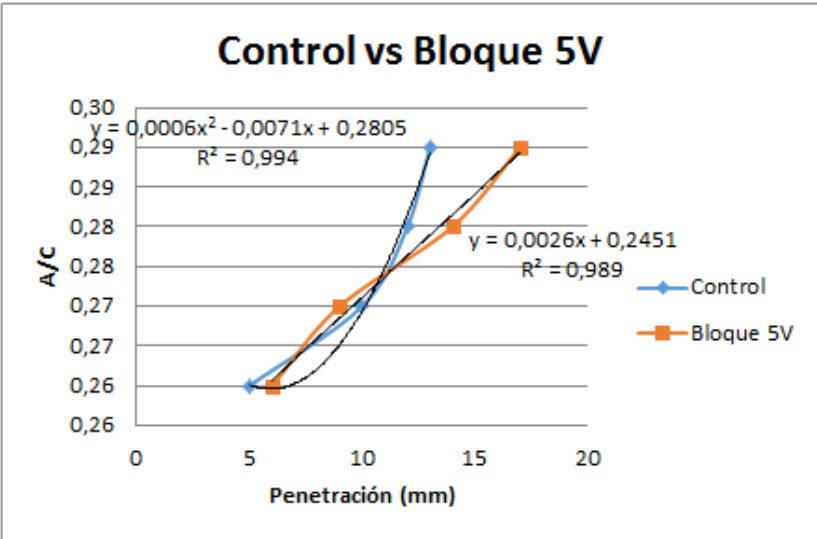


Figura 46. Representación gráfica de la demanda de agua para y cálculo de rango de consistencia normal para bloque 4 (Fuente: cuadro 21)

**Cuadro 22. Penetraciones del vástago obtenidas para bloque 5 a diferentes relaciones A/C**

N	A/MC	Cemento (g)	Vidrio		Agua (g)	Lect. Inicial	Lect. Final	Penetración (mm)
			%	(g)				
1	0,26	474,5	27%	175,5	169	17	23	6
2	0,27	474,5	27%	175,5	175,5	17	26	9
3	0,28	474,5	27%	175,5	182	17	31	14
4	0,29	474,5	27%	175,5	188,5	17	34	17

Fuente: Elaboración propia



Demanda de agua bloque 5

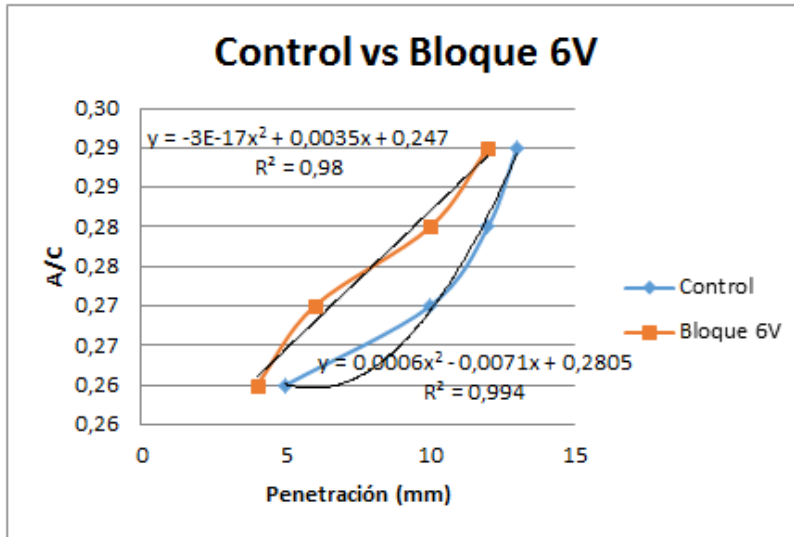
9 mm:	0,268
11 mm:	0,274
10 mm:	0,271

Figura 47. Representación gráfica de la demanda de agua para y cálculo de rango de consistencia normal para bloque 5 (Fuente: cuadro 22)

**Cuadro 23. Penetraciones del vástago obtenidas para bloque 6 a diferentes relaciones A/C**

N	A/MC	Cemento (g)	Vidrio		Agua (g)	Lect. Inicial	Lect. Final	Penetración (mm)
			%	(g)				
1	0,26	461,5	29%	188,5	169	14	18	4
2	0,27	461,5	29%	188,5	175,5	17	23	6
3	0,28	461,5	29%	188,5	182	16	26	10
4	0,29	461,5	29%	188,5	188,5	18	30	12

Fuente: Elaboración propia



Demanda de agua bloque 6

9 mm:	0,279
11 mm:	0,286
10 mm:	0,282

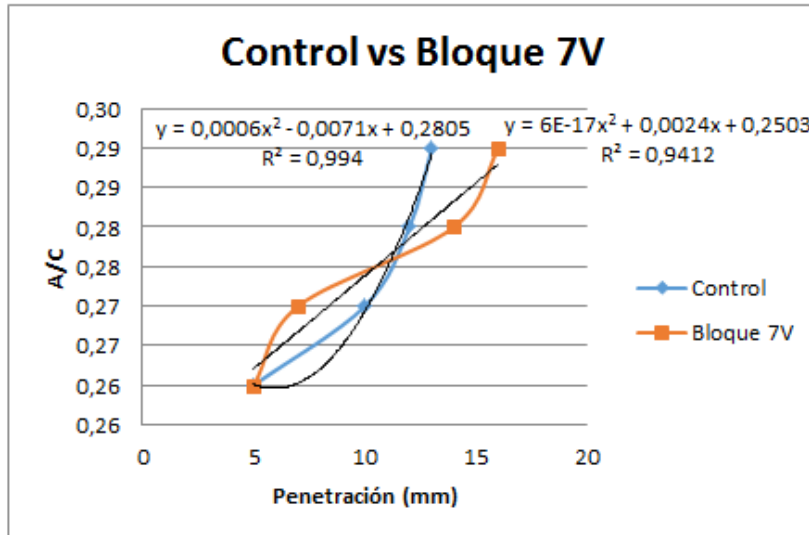
Figura 48. Representación gráfica de la demanda de agua para y cálculo de rango de consistencia normal para bloque 6 (Fuente: cuadro 23)

**Cuadro 24. Penetraciones del vástago obtenidas para bloque 7 a diferentes relaciones A/C**

N	A/MC	Cemento (g)	Vidrio		Agua (g)	Lect. Inicial	Lect. Final	Penetración (mm)
			%	(g)				
1	0,26	468	28%	182	169	15	20	5
2	0,27	468	28%	182	175,5	15	22	7
3	0,28	468	28%	182	182	17	31	14
4	0,29	468	28%	182	188,5	16	32	16

Fuente: Elaboración propia





Demanda de agua bloque 7

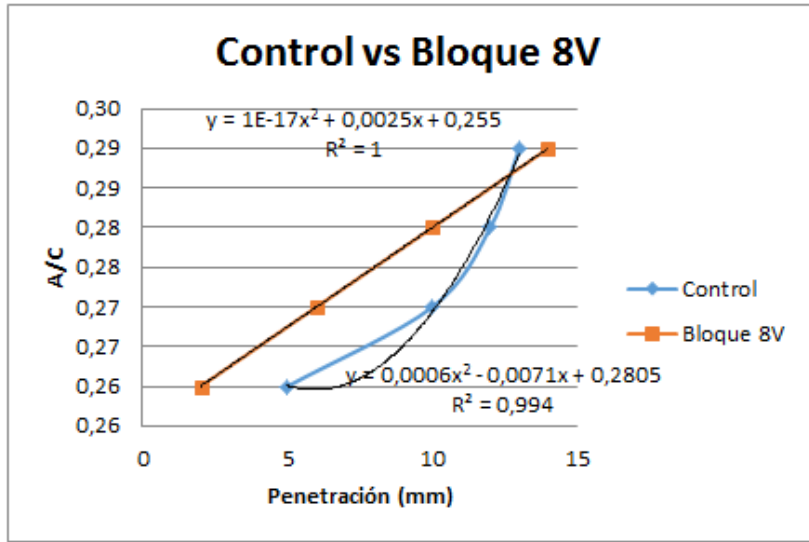
9 mm:	0,272
11 mm:	0,277
10 mm:	0,274

Figura 49. Representación gráfica de la demanda de agua para y cálculo de rango de consistencia normal para bloque 7 (Fuente: cuadro 24)

**Cuadro 25. Penetraciones del vástago obtenidas para bloque 8 a diferentes relaciones A/C**

N	A/MC	Cemento (g)	Vidrio		Agua (g)	Lect. Inicial	Lect. Final	Penetración (mm)
			%	(g)				
1	0,26	455	30%	195	169	14	16	2
2	0,27	455	30%	195	175,5	16	22	6
5	0,28	455	30%	195	182	18	28	10
6	0,29	455	30%	195	188,5	18	32	14

Fuente: Elaboración propia



**Demanda de agua bloque 8**

9 mm:	0,278
11 mm:	0,283
10 mm:	0,280

Figura 50. Representación gráfica de la demanda de agua para y cálculo de rango de consistencia normal para bloque 8 (Fuente: cuadro 25)

**Tiempo de Fragua**

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los tiempo de fragua de cada bloque en comparación con la muestra control (parámetro sin GP). Para esta prueba también se respetan los porcentaje de sustitución de

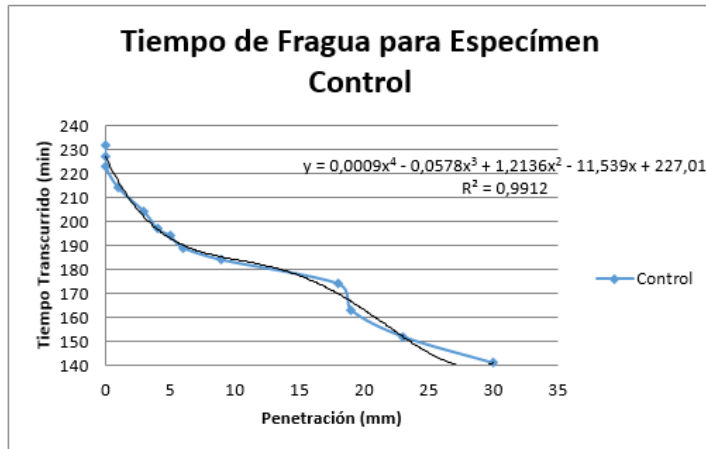
cemento por GP para cada bloque como en la prueba de consistencia normal.

La demanda de agua utilizada para la ejecución de la norma ASTM C-191 para cada bloque es la mostrada en las figuras de consistencia normal para lograr una penetración del vástago de 10 mm.

**Cuadro 26. Datos de penetración de la aguja Vicat vrs. Tiempo reportado para control**

Tiempo transcurrido (min)	141	152	163	174	184	189	194	197	204	214	223	227	232
Penetración (mm)	30	23	19	18	9	6	5	4	3	1	0	0	0

Fuente: elaboración propia



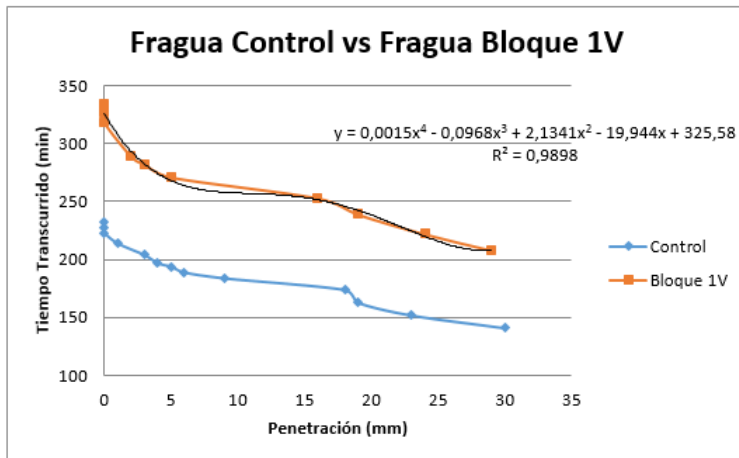
Fragua Inicial:  min  
 Fragua Final:  min

Figura 51. Representación gráfica del tiempo transcurrido vs la penetración para la muestra control, además de su respectiva línea de mejor ajuste y sus respectivos tiempos de fragua. (Fuente: cuadro 26)

**Cuadro 27. Datos de penetración de la aguja Vicat vs. Tiempo reportado para bloque 1**

Tiempo transcurrido (min)	208	222	239	253	271	282	289	318	327	334
Penetración (mm)	29	24	19	16	5	3	2	0	0	0

Fuente: elaboración propia



Fragua Inicial:  min  
 Fragua Final:  min

Figura 52. Comparación del tiempo transcurrido vs la penetración para la muestra control y bloque 1, además de sus respectivas líneas de mejor ajuste y los tiempo de fragua para bloque 1. (Fuente: cuadro 27)

**Cuadro 28. Datos de penetración de la aguja Vicat vrs. Tiempo reportado para bloque 2**

Tiempo transcurrido (min)	130	155	170	185	200	217	223	228	241	264	273	282
Penetración (mm)	33	30	21	19	13	5	4	3	1	0	0	0

Fuente: elaboración propia

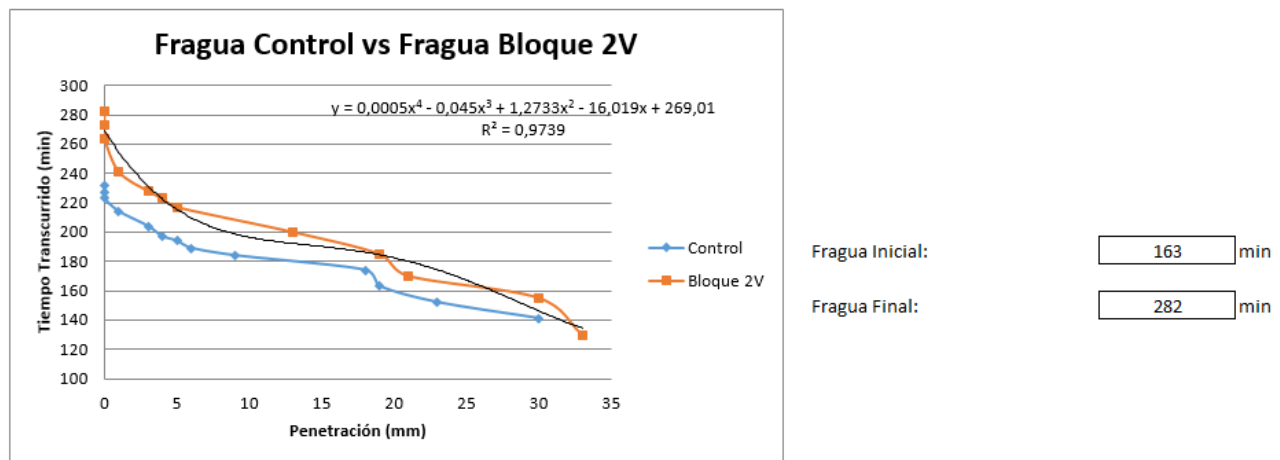
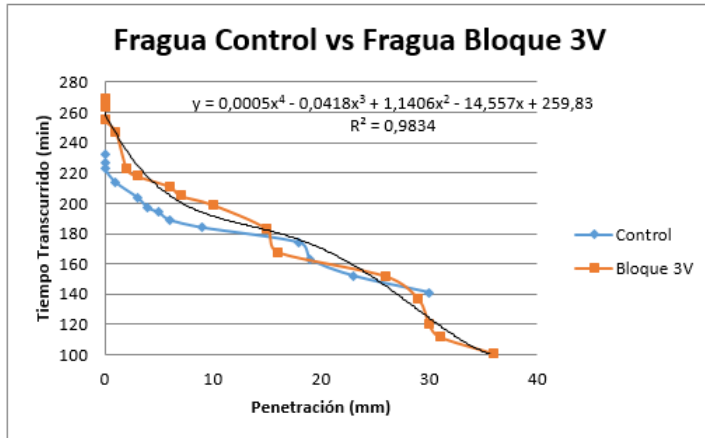


Figura 53. Comparación del tiempo transcurrido vrs la penetración para la muestra control y bloque 2, además de sus respectivas líneas de mejor ajuste y los tiempo de fragua para bloque 2. (Fuente: cuadro 28)

**Cuadro 29. Datos de penetración de la aguja Vicat vrs. Tiempo reportado para bloque 3**

Tiempo transcurrido (min)	101	112	120	137	152	168	183	199	205	211	218	223	247	255	264	269
Penetración (mm)	36	31	30	29	26	16	15	10	7	6	3	2	1	0	0	0

Fuente: elaboración propia



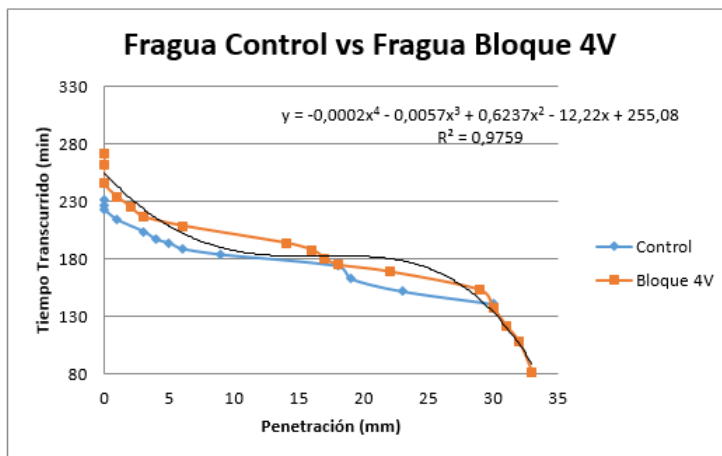
Fragua Inicial:  min  
 Fragua Final:  min

Figura 54. Comparación del tiempo transcurrido vrs la penetración para la muestra control y bloque 3, además de sus respectivas líneas de mejor ajuste y los tiempo de fragua para bloque 3. (Fuente: cuadro 29)

**Cuadro 30. Datos de penetración de la aguja Vicat vrs. Tiempo reportado para bloque 4**

Tiempo transcurrido (min)	82	108	122	138	153	169	175	181	188	194	209	217	226	234	246	262	272
Penetración (mm)	33	32	31	30	29	22	18	17	16	14	6	3	2	1	0	0	0

Fuente: elaboración propia



Fragua Inicial:  min  
 Fragua Final:  min

Figura 55. Comparación del tiempo transcurrido vrs la penetración para la muestra control y bloque 4, además de sus respectivas líneas de mejor ajuste y los tiempo de fragua para bloque 4. (Fuente: cuadro 30)

**Cuadro 31. Datos de penetración de la aguja Vicat vrs. Tiempo reportado para bloque 5**

Tiempo transcurrido (min)	54	67	73	84	110	141	155	170	182	195	202	219	236	247	263	273
Penetración (mm)	35	32	32	30	27	26	21	17	16	12	7	4	3	0	0	0

Fuente: elaboración propia

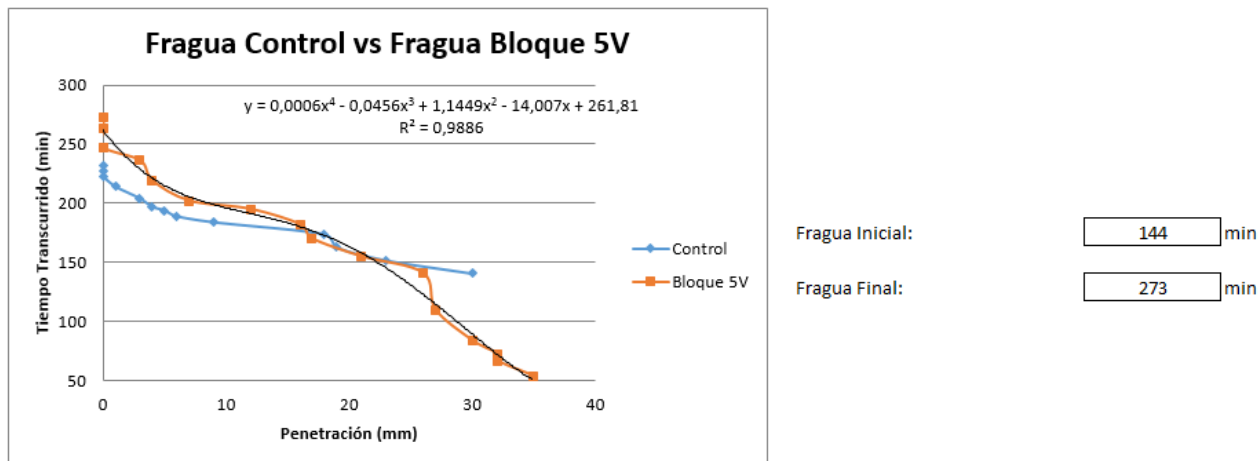
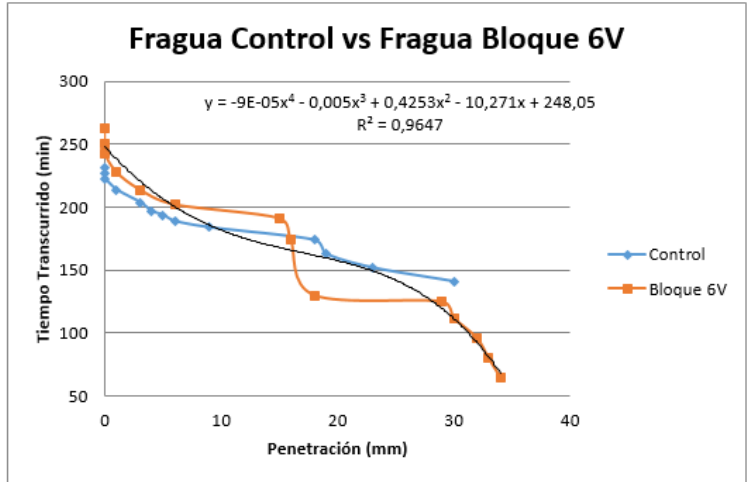


Figura 56. Comparación del tiempo transcurrido vrs la penetración para la muestra control y bloque 5, además de sus respectivas líneas de mejor ajuste y los tiempo de fragua para bloque 5. (Fuente: cuadro 31)

**Cuadro 32. Datos de penetración de la aguja Vicat vrs. Tiempo reportado para bloque 6**

Tiempo transcurrido (min)	65	80	96	112	125	130	174	191	202	214	228	243	250	263
Penetración (mm)	34	33	32	30	29	18	16	15	6	3	1	0	0	0

Fuente: elaboración propia



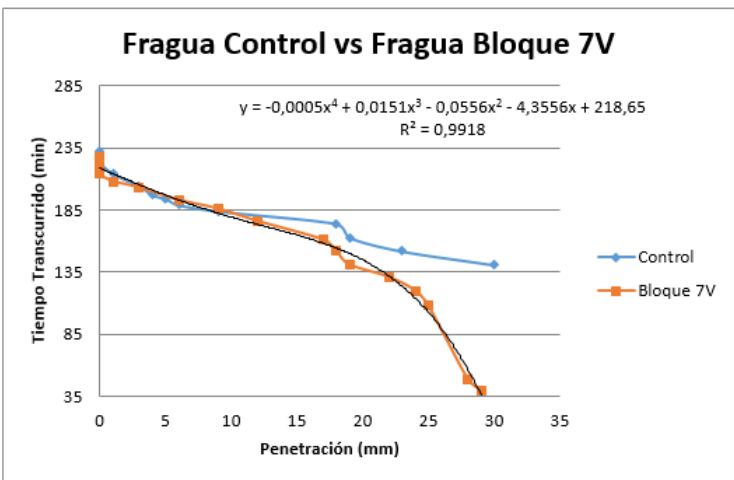
Fragua Inicial:  min  
 Fragua Final:  min

Figura 57. Comparación del tiempo transcurrido vs la penetración para la muestra control y bloque 6, además de sus respectivas líneas de mejor ajuste y los tiempo de fragua para bloque 6. (Fuente: cuadro 32)

**Cuadro 33. Datos de penetración de la aguja Vicat vs. Tiempo reportado para bloque 7**

Tiempo transcurrido (min)	40	49	108	120	131	141	152	161	176	186	193	203	208	214	220	228
Penetración (mm)	29	28	25	24	22	19	18	17	12	9	6	3	1	0	0	0

Fuente: elaboración propia



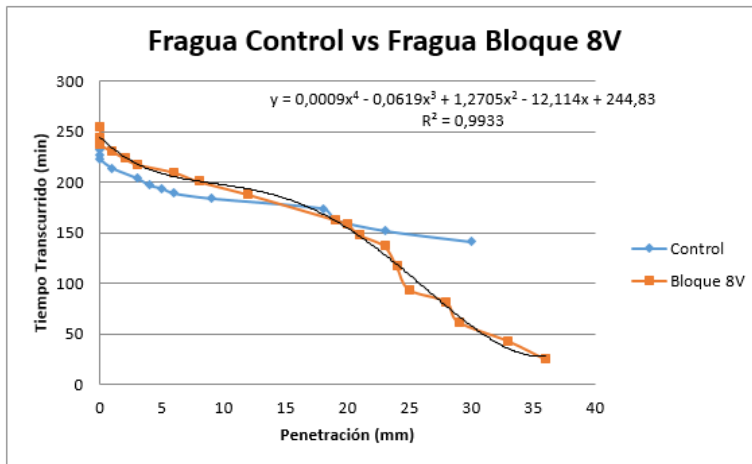
Fragua Inicial:  min  
 Fragua Final:  min

Figura 58. Comparación del tiempo transcurrido vs la penetración para la muestra control y bloque 7, además de sus respectivas líneas de mejor ajuste y los tiempo de fragua para bloque 7. (Fuente: cuadro 33)

**Cuadro 34. Datos de penetración de la aguja Vicat vrs. Tiempo reportado para bloque 8**

Tiempo transcurrido (min)	25	43	62	82	94	117	137	148	159	163	188	201	210	218	224	231	238	244	255
Penetración (mm)	36	33	29	28	25	24	23	21	20	19	12	8	6	3	2	1	0	0	0

Fuente: elaboración propia



Fragua Inicial:  min  
 Fragua Final:  min

Figura 59. Comparación del tiempo transcurrido vrs la penetración para la muestra control y bloque 8, además de sus respectivas líneas de mejor ajuste y los tiempo de fragua para bloque 8. (Fuente: cuadro 34)

**Cuadro 35. Resumen Fraguas Iniciales y Finales según Bloque Experimental**

Bloque	Fragua Inicial (min)	Fragua Final (min)
Control	149	232
1V	219	334
2V	163	282
3V	154	269
4V	162	272
5V	144	273
6V	127	263
7V	102	228
8V	108	255

Fuente: figuras de la 46 a la 54



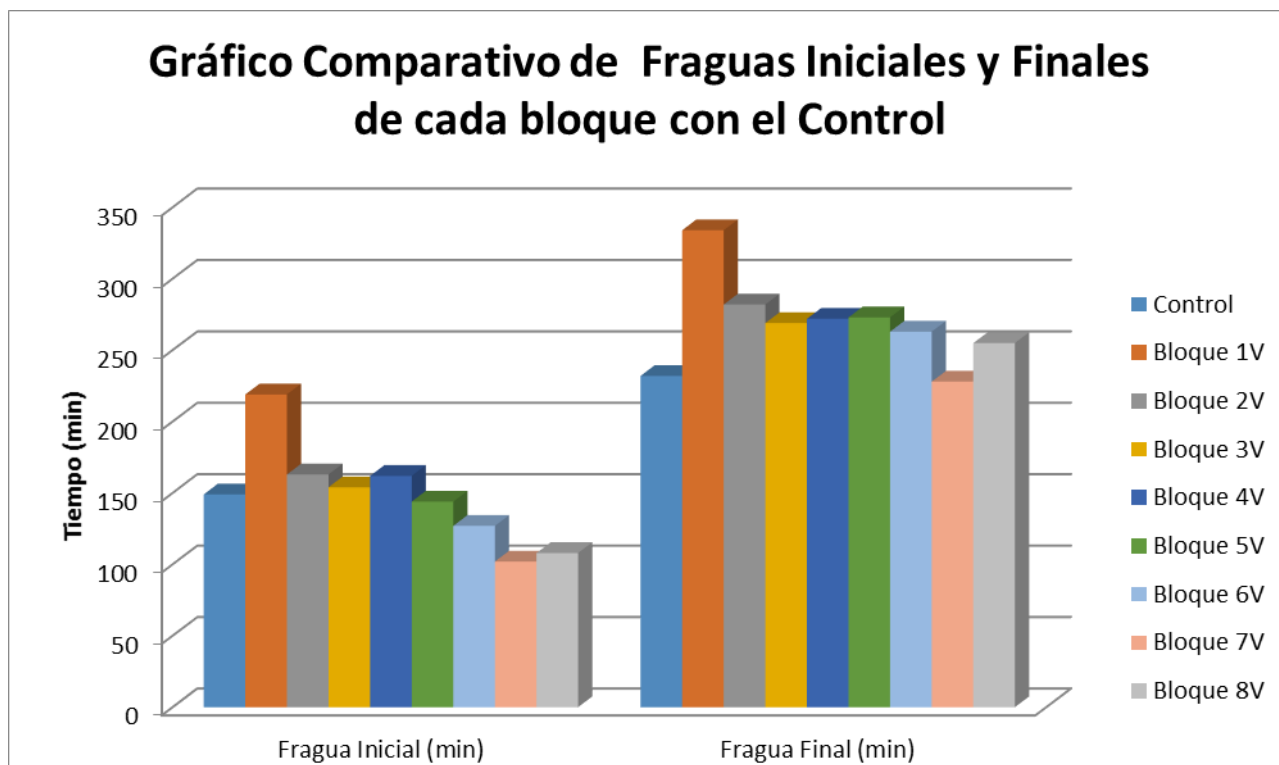


Figura 60. Resumen comparativo de fraguas iniciales y finales para cada bloque experimental con la muestra control (Fuente: cuadro 31)

## ANOVAS

A continuación se presentan los resultados de los análisis de varianzas descritos en la sección de

metodología. Cabe resaltar que las ANOVAS se realizaron por edad de falla para asegurarse una distribución normal dentro de los datos.

### Cuadro 36. Afectación de la adición de GP dentro de las mezclas de Mortero a compresión

Edad	Factor estadístico F práctico	Factor estadístico F teórico	Nivel de significancia	Valor p	1° Comparación (F práctico vs F teórico)	2° Comparación (valor p vs nivel de significancia)
24 horas	48,87	4,171	0,05	0	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
7 días	29,47		0,05	0	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
28 días	5,85		0,05	0,0222	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula

Fuente: Elaboración propia

### Cuadro 37. Afectación de la adición de GP dentro de las mezclas de Mortero a tensión

Edad	Factor estadístico F práctico	Factor estadístico F teórico	Nivel de significancia	Valor p	1° Comparación (F práctico vs F teórico)	2° Comparación (valor p vs nivel de significancia)
7 días	0,07	4,052	0,05	0,796	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
28 días	0,87		0,05	0,355	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula

Fuente: Elaboración propia

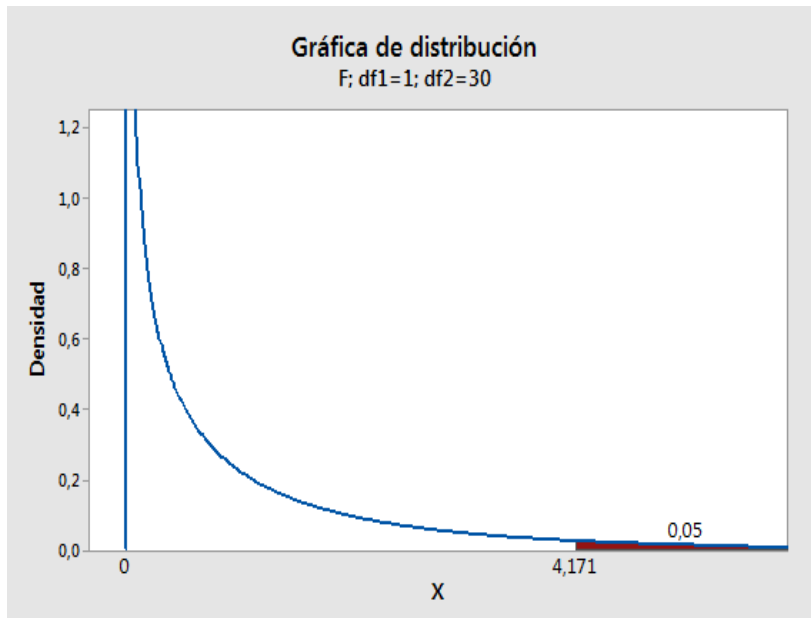


Figura 61. Grafica de distribución F teórica para elementos a compresión para primer análisis

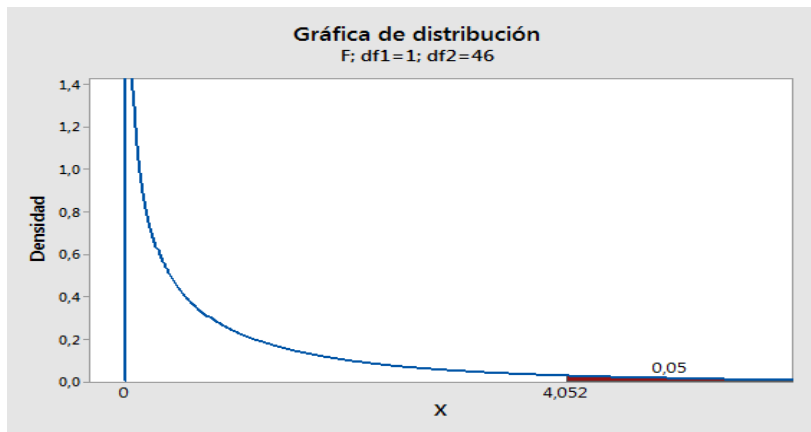


Figura 62. Grafica de distribución F teórica para elementos a tensión para primer análisis

### Cuadro 38. Afectación del porcentaje de sustitución de GP por cemento a elementos a compresión

Edad	Factor estadístico F práctico	Factor estadístico F teórico	Nivel de significancia	Valor p	1° Comparación (F práctico vs F teórico)	2° Comparación (valor p vs nivel de significancia)
24 horas	43,29	3,5	0,05	0,000	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
7 días	42,69		0,05	0,000	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
28 días	2,81		0,05	0,086	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula

Fuente: Elaboración propia

### Cuadro 39. Afectación del porcentaje de sustitución de GP por cemento a elementos a tensión

Edad	Factor estadístico F práctico	Factor estadístico F teórico	Nivel de significancia	Valor p	1° Comparación (F práctico vs F teórico)	2° Comparación (valor p vs nivel de significancia)
7 días	1,96	2,657	0,05	0,126	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
28 días	0,54		0,05	0,793	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula

Fuente: Elaboración propia

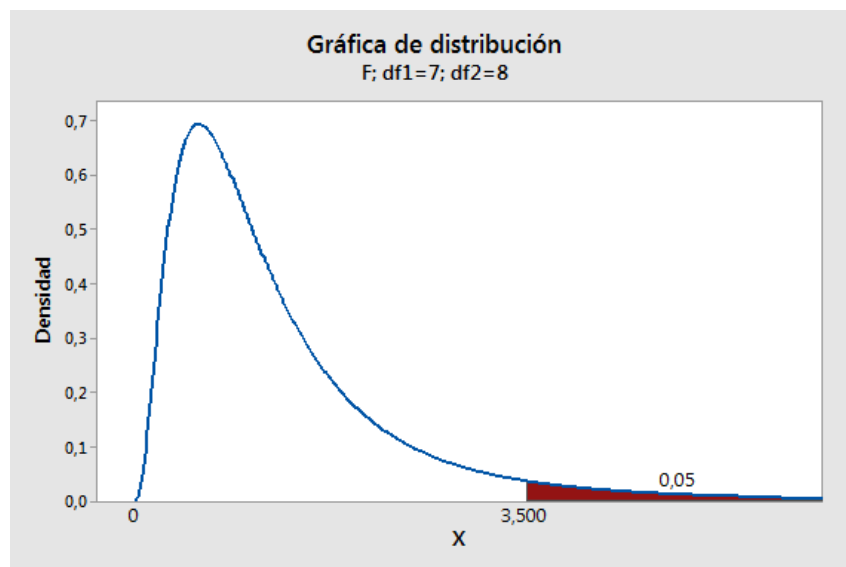


Figura 63. Grafica de distribución F teórica para elementos a compresión para segundo análisis

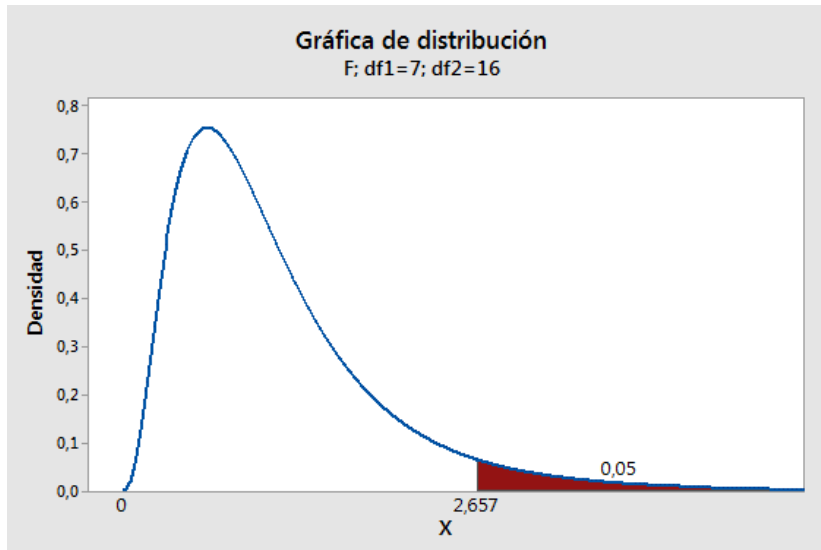


Figura 64. Gráfica de distribución F teórica para elementos a tensión para segundo análisis

**Cuadro 40. Análisis del Rendimiento Estadístico por bloque y por edad para comprensión**

% de Sustitución	Bloque	Edad	Factor estadístico F práctico	Factor estadístico F teórico	Nivel de significancia	Valor p	1 Comparación (F práctico vs F teórico)	2 Comparación (valor p vs nivel de significancia)
20%	1-1'	24 horas	289,24	18,51	0,05	0,003	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		7 días	46,40		0,05	0,021	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		28 días	60,01		0,05	0,016	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
22%	2-2'	24 horas	152,47		0,05	0,006	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		7 días	98,77		0,05	0,010	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		28 días	12,19		0,05	0,073	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
23%	3-3'	24 horas	627,56		0,05	0,002	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		7 días	53,66		0,05	0,018	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		28 días	92,6		0,05	0,011	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
26%	4-4'	24 horas	59,97		0,05	0,016	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		7 días	341,83		0,05	0,003	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		28 días	4,91		0,05	0,157	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
27%	5-5'	24 horas	1569,67		0,05	0,001	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		7 días	64,06		0,05	0,015	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		28 días	6,03		0,05	0,133	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
29%	6-6'	24 horas	139,07		0,05	0,007	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		7 días	0,80		0,05	0,465	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
		28 días	67,43		0,05	0,015	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
28%	7-7'	24 horas	78,86		0,05	0,012	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		7 días	113,93		0,05	0,009	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		28 días	32,85		0,05	0,029	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
30%	8-8'	24 horas	237,12		0,05	0,004	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		7 días	520,54		0,05	0,002	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		28 días	21,03		0,05	0,044	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula

Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 41. Análisis del Rendimiento Estadístico por bloque y por edad para tensión**

% de Sustitución	Bloque	Edad	Factor estadístico F práctico	Factor estadístico F teórico	Nivel de significancia	Valor p	1ª Comparación (F práctico vs F teórico)	2ª Comparación (valor p vs nivel de significancia)
20%	1-1'	7 días	0,35	7,709	0,05	0,588	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
		28 días	2,63		0,05	2,63	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
22%	2-2'	7 días	7,91		0,05	0,048	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		28 días	1,56		0,05	0,28	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
23%	3-3'	7 días	4,73		0,05	0,095	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
		28 días	3,44		0,05	0,137	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
26%	4-4'	7 días	0,85		0,05	0,41	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
		28 días	1,85		0,05	0,245	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
27%	5-5'	7 días	8,55		0,05	0,043	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		28 días	0,19		0,05	0,687	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
29%	6-6'	7 días	3,14		0,05	0,151	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
		28 días	10,69		0,05	0,031	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
28%	7-7'	7 días	21,4		0,05	0,01	Se rechaza hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula
		28 días	0,81		0,05	0,419	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula
30%	8-8'	7 días	0,4	0,05	0,563	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula	
		28 días	0,74	0,05	0,44	Se acepta hipótesis nula	No se rechaza hipótesis nula	

Fuente: Elaboración propia

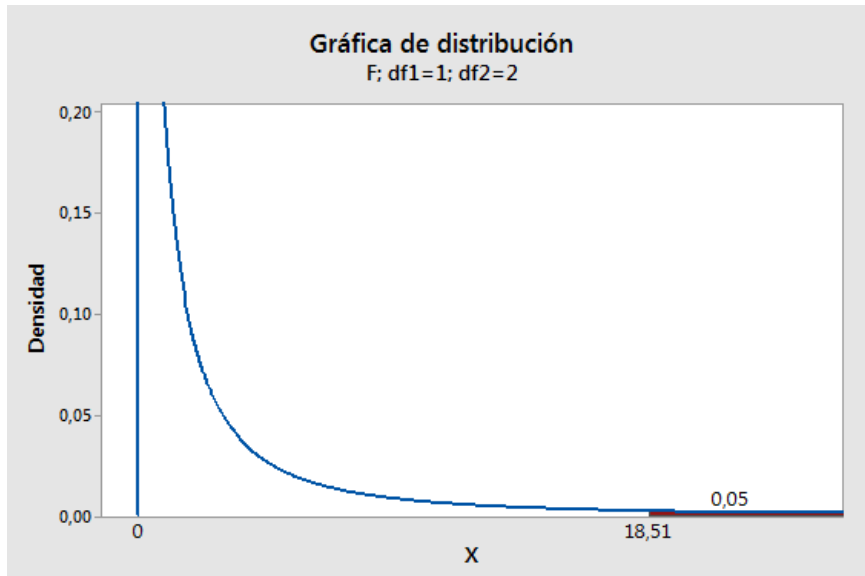


Figura 65. Gráfica de distribución F teórica para elementos a compresión para tercer análisis

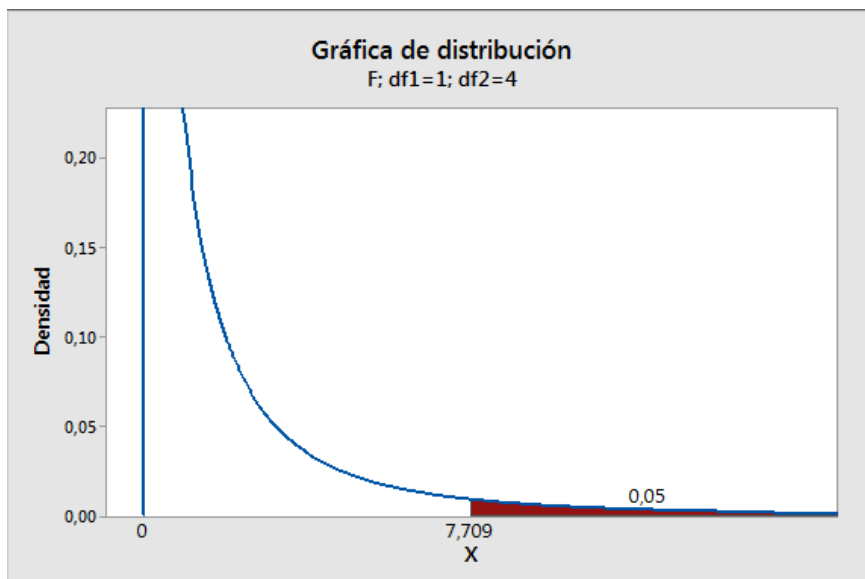


Figura 66. Gráfica de distribución F teórica para elementos a tensión para tercer análisis

# Análisis de Resultados

Para nadie es un secreto que el ser humano está atravesando actualmente por 2 factores que pueden cambiar la vida totalmente de la forma en la que conocemos. Estos 2 factores que están alterando nuestra forma de vivir son el cambio climático y los avances a pasos agigantados en lo que a tecnología se refiere.

Durante décadas el ser humano ha ignorado completamente los productos que se han generado como resultado de llevar una vida completamente consumista.

Las toneladas de desechos de materiales que se han generado han empezado a consumirnos a nosotros mismos y al planeta. Este mismo consumismo rodea muchas áreas, y el área de la ingeniería civil o ingeniería en construcción no se ha visto exenta. Durante años se han destruido hectáreas de bosques con el fin de producir materiales que nos aseguren una “mejor” manera de vivir, como el cemento, el cual nos asegura muchas comodidades a la hora de construir las viviendas en las cuales residen todos los seres humanos, pero hemos perdido de vista el medio por el cual hemos llegado a tal fin.

A la larga los seres humanos se han dado cuenta que continuar con las prácticas con las cuales se ha venido trabajando no es factible y se tiene que actuar inmediatamente antes de que el daño sea completamente irreparable.

Específicamente el sector construcción es uno de los principales generadores de gases de efecto invernadero, gases responsables de la destrucción de la capa de ozono y responsables de todo el cambio climático que vivimos hoy en día.

Estos 2 factores fueron los que convirtieron en imperativo todo razonamiento cuidadosamente meditado, que al final dieron forma al presente proyecto.

El objetivo de este proyecto se conformó con base en el deseo de hacer evolucionar la industria de la construcción, así como de minimizar la huella que ésta genera. Varias

investigaciones han ahondado en la incorporación de materiales alternativos a las mezclas de concreto, pero muy pocas con respecto a transformar nuestra basura, generada por años, en una de las principales fuentes de materia prima para lograr el objetivo anteriormente mencionado.

Con esta investigación se da pie para continuar y mejorar una línea de investigación: la incorporación de materiales considerados desechos a las mezclas cementicias para minimizar el impacto ambiental de 2 frentes (producción de cemento y reciclaje) e inclusive para mejorar las propiedades físico-mecánicas de las mezclas de concreto.

La principal inquietud a partir de este punto, es no saber a ciencias cierta, como va a actuar el polvo de vidrio reciclado a nivel micro dentro de la matriz cementicia. Con investigaciones realizadas en Canadá, se observa que, si hay reacción química del GP dentro de la matriz, lo que da pie para investigaciones macro a cerca de la aplicación de este material en mezclas cementicias.

## Diseño Experimental

El diseño experimental utilizado fue el de mezclas de Montgomery, el cual es un método de ordenamiento de componentes de las mezclas para que cada una de ellas sea manejable dentro de rangos estipulados, parámetro muy importante más cuando se cuenta con poco material cementante alternativo (GP) experimental.

Con esto surge la primera duda: ¿Qué variables hay que mantener fijas? Ninguna. No se conoce a fondo como interactúa el GP con distintas dosificaciones de cemento, arena y agua. Una de las principales interrogantes, es el contenido de agua dentro de las mezclas, esto debido al conocido comportamiento del vidrio que no absorbe agua, parámetro muy importante, ya que el contenido de agua presente en las



mezclas influye directamente en la resistencia final de la misma.

En este proyecto se presentan las iteraciones realizadas por el Ingeniero e investigador Ronald Vargas, el cual realiza un análisis de la iteración de la cantidad de agua para poder reportar un flujo. El investigador hace variar el agua en múltiples mezclas, para medir su resistencia al cortante en estado fresco y poder tomar la decisión con cuánta agua se está cómodo para el proceso de moldeo y medición de resistencia. Este estudio realizado se observa en el cuadro 3 y figura 25 respectivamente. Del análisis realizado se discretiza varias iteraciones debido al comportamiento del vidrio ya que al no observar agua se espera que la mezcla tenga mejor trabajabilidad con porcentajes menores de agua.

Este comportamiento se corrobora con el cuadro 9 donde se muestra que el flujo de las mezclas aumenta con adiciones de vidrio siempre manteniendo constantes las relaciones A/C ó A/Mc (donde Mc es material cementante) de cada bloque. A raíz de esto se toma como rango de A/C 0,44 - 0,50, ya que relaciones inferiores a 0,44 en adiciones con vidrio presentarán mayor flujo, lo cual llevará a mayores rangos de trabajabilidad y moldeo que los presentados por el investigador, y relaciones superiores a 0,50 llevarán a un exceso de trabajabilidad y moldeo, ya que serán mezclas muy líquidas e incluso se verían afectadas las resistencias finales debido a esto y se perdería de vista el efecto del GP dentro de las mezclas.

Es importante recalcar que los flujos reportados para este rango, tanto dentro del análisis como los reportados para los ensayos, no cumplen con lo que especifica la norma. Esto es porque la ASTM, C-109 se toma como un proceso estandarizado para la conformación de especímenes destinados a formular una comparación, y este proyecto tiene como objetivo medir el desempeño físico – mecánico de un material cementante alternativo y no para reportar la resistencia de un conglomerado en particular.

Una vez discretizados los datos de relación A/C, a utilizar se procede a realizar la aleatorización de cada componente para la elaboración de los bloques.

En el cuadro 4 y 5 se observan los límites inferiores y superiores utilizados para cada componente, así como su porcentaje másico respectivo dentro de la mezcla. Cabe mencionar

que una de las principales restricciones de este método es que todos sus componentes deben de sumar 100%, lo cual también se corrobora en los cuadros 4 y 5. El cuadro 6, responde a las proporciones másicas devueltas por el Software Statgraphics para cemento, arena, agua y vidrio respectivamente, tomando como base el cemento para realizar las proporciones.

Es importante mencionar que el tipo de diseño utilizado (Simplex-Centroide) procede con una fórmula de corridas  $2^q - 1$  donde q es la cantidad de variables o componentes de la mezcla, en este caso 4, lo cual da como resultado 15 corridas (o 15 bloques aleatorizados), lo cual para este proyecto no es práctico ya que al tener adiciones de un material nuevo siempre se va a tener un patrón o control para cada adición, por lo que se requiere por fuerza que la cantidad de corridas sea un número par. Debido a esto se extienden las corridas de 15 a 16, dando como resultado 8 bloques patrón (o sin adición de GP) y 8 bloques con distintos porcentajes de adición de GP.

Estos bloques finales se observan en los cuadros 7 y 8, siendo el cuadro 7 la aleatorización de los patrones y el cuadro 8 la aleatorización de los bloques con adición de GP en un rango de 20% a 30%. La consistencia normal y tiempo de fragua son pruebas que no permiten variaciones sistemáticas, ya que estas harían inconsistentes los resultados. De aquí se parte que únicamente se hacen pruebas comparativas estándar, para poder intuir el grado de afectación que presenta la mezcla de GP.

## Resistencia a la Compresión

Con respecto a resistencia a compresión, se crearon 8 bloques control, como 8 bloques con distintos porcentajes de adición. Para cada bloque se realizaron 6 cubos a fallar de la siguiente manera: 2 cubos a fallar a 24 horas, 2 cubos a fallar 7 días y 2 cubos a fallar a 28 días, dando un total de 96 cubos a compresión. Los resultados de las fallas a compresión se muestran en el cuadro 9. Los resultados de los especímenes con adiciones a 24 horas son menores que sus patrones, en todos los casos. Este comportamiento se extiende para los elementos fallados a 7 días, donde los patrones superan a sus homólogos especímenes con vidrio en todos los casos. Para la falla 28 días podemos observar donde la mayoría de los

especímenes sin vidrio superan los que tienen presencia de vidrio, pero ya no en todos los casos. En el cuadro 9 se puede observar que el bloque 6 (con un porcentaje de sustitución de cemento por GP de un 29%) supera con creces a su patrón sin vidrio.

Tomando las 3 edades de falla conjuntamente para los 8 bloques sin vidrio y los 8 bloques con vidrio, podemos observar como hay un incremento porcentual de resistencia mayor en los especímenes con vidrio.

Esto queda claro en los cuadros 10 y 11, donde en promedio los bloques sin vidrio incrementan su resistencia a la compresión de 24 horas a 7 días en un 42,78%, mientras que en promedio todos los bloques con polvo de vidrio presentan un incremento de resistencia de un 48,81% para las mismas edades.

El comportamiento es el mismo para las edades de 7 a 28 días, donde en promedio todos los cubos sin GP hacen un incremento de resistencia de un 19% mientras que en promedio todos los bloques con GP hacen un incremento en su resistencia de un 30%. El incremento porcentual de resistencia de 24 horas a 7 días, es mayor que el de 7 días a 28 días, debido al tipo de cemento utilizado (UG-AR marca Holcim), el cual presentará aumentos considerables de resistencia a edades más tempranas.

En las figuras de la 26 a la 33 se observa el comportamiento para cada bloque con su homólogo sin vidrio, para las 3 edades de falla, donde resalta la figura 31 donde el espécimen con vidrio supera a su control a los 28 días. Incluso se observa que a los 7 días sus resistencias son prácticamente iguales. Para poder analizar las figuras de una mejor manera están los cuadros 12 y 13 donde se muestra el rendimiento mecánico por edades para cada bloque. Cabe resaltar que los rendimientos son negativos porque se utilizan los bloques con polvo de vidrio como base, esto quiere decir, tomando como ejemplo el bloque 1, que para una edad de 24 horas el rendimiento de la resistencia del bloque con polvo de vidrio se encuentra en un 22, 88% debajo que se homólogo sin polvo de vidrio.

Rendimientos positivos indican que el rendimiento del bloque con polvo de vidrio supera a su homólogo sin polvo de vidrio, como se observa en el cuadro 13 para bloque 6 (rendimiento positivo de un 18%).

En general observando los cuadros 12 y 13 conjuntamente se asegura que las resistencias de los bloques con polvo de vidrio se van equiparando a las resistencias de sus homólogos sin polvo de vidrio a edades mayores. Esto se observa en la columna 4 de los cuadros 12 y 13, donde se asegura que todos los bloques mejoran (sus resistencias se equiparan).

En este sentido el GP presenta un comportamiento muy similar al humo de sílice y puzolanas naturales estudiadas en el marco teórico. A edades mayores, la resistencia de los elementos con presencia de GP mejora considerablemente e incluso sobrepasan (como el caso del bloque 6) a la muestra control.

La investigación que acá se presenta, arroja resultados que indican imperativo medir resistencias mecánicas de mezclas a edades posteriores a 28 días, para rematar tendencias.

## Resistencia a la Tensión

El procedimiento llevado a cabo para la resistencia a la tensión, es similar al de compresión, con la diferencia que no se cuenta con fallas a 24 horas, esto debido a la nula o baja resistencia que presenta el cemento a tensión, por lo que sería completamente irrelevante tener resultados a 24 horas, ya que no se podría observar nada.

Para este caso se cuenta con 2 edades de falla (7 días y 28 días). Para cada bloque se elaboran 6 briquetas, tal y como lo cita la norma ASTM C-307, de las cuales 3 briquetas se fallan a 7 días y 3 briquetas se fallan a 28 días. El total de briquetas elaboradas y falladas son de 96, igual que en compresión.

En el cuadro 14 se puede observar los resultados para las 2 edades de fallas para cada bloque patrón y con adición.

Se puede observar como los primeros 5 bloques control a 7 días superan en resistencia a sus homólogos con GP, pero del bloque 6 al 8, los bloques con GP superan a sus controles.

Para la resistencia a 28 días este comportamiento se mantiene y se supera, ya que solo los bloques 1 y 4 control superan a sus homólogos con vidrio. Los bloques 3, 5, 6, 7 y 8 con porcentajes de sustitución de 23%, 27%, 29%, 28% y 30% superan a sus controles.

El cuadro 15 refleja que existe un incremento en la resistencia promedio de los bloques con GP mayor al incremento en la

resistencia promedio de todos los bloques patrón o sin polvo de vidrio. Específicamente el incremento promedio en la resistencia de los bloques patrón corresponde a un 1% y la de los bloques con adición con GP a un 9% para las edades de 7 días y 28 días.

En el cuadro 15 se observa, individualmente por bloque, que existen incrementos negativos en la resistencia, específicamente para los bloques 3, 5, 6 sin GP y bloques 4 y 8 con GP.

La razón de estos incrementos negativos viene a raíz de que, en vez de existir un incremento en la resistencia a la tensión para la falla de 28 días con respecto a la falla de 7 días, existe una disminución (caída en la resistencia) para los bloques mencionados anteriormente. Gráficamente se puede observar en las figuras 31, 33, 34, 32 y 36 respectivamente.

Esta caída en la resistencia obedece al proceso de conformación y moldeo de las briquetas, ya que al no ser un proceso normado (proceso empírico de Lanamme) no se cuenta con un apisonador normado ni nada por el estilo, más bien las briquetas se conformaron realizando presión con los dedos pulgares, fuerza que no puede ser controlada el 100% de las veces. Esto lleva a una mala distribución de los esfuerzos dentro de los especímenes lo cual produce las caídas de las resistencias anteriormente descritas.

El cuadro 16 muestra los rendimientos por bloque patrón con su respectivo bloque con adición. De la misma manera que en compresión, rendimientos negativos, reflejan que la resistencia del bloque con GP se encuentra por debajo de la resistencia de su bloque control para la edad seleccionada y rendimientos positivos reflejan aumentos en las resistencias de los bloques con GP que sobrepasan las resistencias de sus controles.

Para fallas a los 7 días, los bloques 1, 2, 3 y 5 control superan a los bloques con GP y los bloques 6, 7, 8 con GP superan a sus controles, mientras que el bloque 4 obtuvo la misma resistencia que su control.

Este comportamiento mejora para la falla de 28 días ya que solamente el bloque 1, 2 y 4 control superan a su homólogo con GP. Todos los demás bloques con adición superan a sus controles.

La quinta columna del cuadro 16 refleja que para los bloques 1 y 4 hay un retroceso, esto

quiere decir que la resistencia a 28 días del bloque GP, se distancia de la resistencia a 28 días de su control. Para los bloques 2, 3, 5, 6, 7 y 8 hay una mejoría, lo cual indica que las resistencias de los bloques con adición se están equiparando a sus controles. Por estos resultados también es importante realizar fallas a edades mayores a 28 días para corroborar tendencias.

Tanto como para compresión, como para tensión, los bloques con adición de GP arriba de un 25% de sustitución, reflejan que a edades de 28 días presentan resistencias superiores a sus controles, esto es de esperarse por lo estudiado en el marco teórico. Los estudios químicos presentados en la publicación "Performance of Glass-Powder Concrete in Field Sites" reflejan que la reacción puzolánica del GP es más lenta que la hidratación del cemento Portland, por lo que la formación de silicato de calcio hidratado (C-S-H) tomaría más tiempo.

Los resultados de las fallas a 28 días, tanto para compresión como tensión, reflejan una densificación de la matriz cementicia, ya que las resistencias de las dosificaciones se equiparán con sus controles y a edades posteriores se piensa que dichas resistencias superarán las resistencias de sus controles.

## Consistencia Normal

La consistencia normal fue el método estandarizado que se definió para establecer una comparación respecto a la demanda de agua que puede presentar mezclas modificadas con el GP.

Tanto para consistencia normal como para tiempo de fragua, se respeta los porcentajes de sustitución de GP por cemento para cada bloque, por lo que se cuenta con un control y 8 bloques con sustitución de cemento por GP.

Se itero con la cantidad de agua. Se empezó con una base de 0,26 relación agua-cemento hasta llegar inclusive a 0,29 para cada bloque y control.

Los resultados arrojan una relación A/C control (sin GP) de 0,270 necesaria para una penetración del vástago de 10mm como lo muestra la figura 42. Las curvas de mejor ajuste de cada uno de los 8 bloques presentan sustancialmente la misma pendiente, sin embargo, su intersección con el eje "y" (relación A/C para penetración de 10mm) es distinta, por lo que se asegura que la demanda de agua de las

mezclas con GP es distinta que la de control, excepto en el bloque 2 y 3 la cual es la misma.

Para los demás bloques (1, 4, 5, 6, 7 y 8) la demanda de agua es mayor, inclusive se observa en las figuras que a mayor porcentaje de sustitución de GP por cemento, mayor demanda de agua presenta. Esto se apega a las tendencias prácticas que presentan comparaciones entre mezclas ordinarias o patrón y mezclas adicionales con humo de sílice o puzolanas naturales.

## Tiempo de Fragua

Los datos de tiempo de fragua se muestran en los cuadros del 26 al 34 y en las figuras de la 51 a la 59. El cuadro 35 es una tabla resumen de los tiempos de fragua iniciales y finales, para el control como para cada bloque con porcentaje de sustitución.

Como se muestra en el cuadro 35 a mayor porcentaje de sustitución de GP por cemento, el tiempo de fragua inicial disminuye considerablemente (control presenta un tiempo de fragua inicial igual a 149 min y el bloque 8 con 30% de sustitución presenta una fragua inicial de 108 min; 41 min menos) pero un aumento en su fragua final (control presenta una fragua final de 232 min y bloque 8 255 min; 23 min mayor a su control).

Con esto se vería reducido el tiempo con el cual la pasta presenta fluidez y se alargaría el tiempo en el cual la mezcla comienza a ganar resistencia.

Cabe destacar que los tiempos de fragua inicial y final, tanto del control como de cada uno de los bloques, se encuentran dentro de los rangos estipulados según normativa (mínimo de fragua inicial igual a 45 min y máximo de fragua final de 375 min, según MEIC) con lo cual se podría asegurar un transporte y colocación de la mezcla para fines prácticos.

Con respecto a la fragua final, el comportamiento del GP es muy similar a la ceniza volante y humo de sílice, los cuales normalmente retardan el tiempo de fraguado, esto según manual de la PCA.

## ANOVAS

Como se explicó con anterioridad, el análisis de varianza o ANOVAS es un estudio a los datos

obtenidos de los ensayos para analizar desde un punto estadístico si las medias de las poblaciones difieren o si se pueden considerar iguales.

Para efectos de este proyecto se busca que las medias sean iguales, esto debido a que si estadísticamente con un nivel de confiabilidad del 95% los resultados no difieren de sus homólogos sin vidrio significa que existe reacción por parte del GP adicionado a las mezclas.

Como se mencionó anteriormente, se realizaron 3 estudios o ANOVAS, los cuales están distribuidos de la siguiente forma: cuadros 36 y 37 primer análisis que busca analizar la afectación directa de la adición de GP, cuadros 38 y 39 segundo análisis que busca analizar si el porcentaje de sustitución afecta o no a las resistencias y finalmente los cuadros 40 y 41 del tercer análisis que busca analizar el rendimiento estadístico por bloque directo a compresión y tensión

Del primer análisis (cuadros 36 y 37) se observa que el factor estadístico F a compresión decrece de 48,87 a 24 horas hasta 5,85 a 28 días. Esto quiere decir que conforme transcurre el tiempo las medias con adición de GP se van equiparando a sus homólogos sin adición.

De mantenerse esta tendencia de los datos a compresión, se piensa que a edades posteriores de 28 días el factor F decrecería a valores inferiores de 4,171 (F teórica para compresión), lo que llevaría a concluir a un 95% de confiabilidad que la interacción del GP dentro de la mezcla es tan fuerte que estadísticamente no existirían diferencias entre las medias con y sin adición de GP (se aceptaría la hipótesis nula que todas las medias poblacionales son iguales). Esto quiere decir, de mantenerse la tendencia, que a edades mayores a 28 días es indiferente si la mezcla es pura (100% cemento) o con adición, su resistencia no variaría de una manera estadísticamente significativa.

Por su parte los resultados a tensión (cuadro 37) reflejan valores F prácticos menores a 1 o muy cercanos a 1, a edades de 7 y 28 días. Para este caso, para ambas edades, se acepta la hipótesis nula (todas las medias son iguales), lo que significa que a tensión no existen diferencias estadísticamente significativas entre elementos con sustitución de cemento por GP y elementos elaborados 100% con cemento, lo que revela un alto grado de interacción del GP dentro de la mezcla.

Para el segundo análisis se observa en el cuadro 38 (a compresión) que el valor F decrece de un 43,29 a 24 horas hasta 2,81 a 28 días. Como el valor F teórico para este análisis es de 3,5 se acepta la hipótesis nula para la edad de 28 días. Esto quiere decir que a compresión el porcentaje de sustitución en el rango de estudio de este proyecto (20% a 30% de sustitución), se vuelve irrelevante después de 28 días.

El porcentaje de sustitución afectaría a compresión únicamente a edades tempranas.

A tensión (cuadro 39) se aceptan las hipótesis nulas para ambas edades (7 días y 28 días) por lo que el porcentaje de sustitución a tensión es irrelevante.

En los cuadros 40 y 41, se observan las últimas ANOVAS realizadas por bloque a compresión y tensión respectivamente. Este análisis arroja resultados de rendimientos según el porcentaje de sustitución de GP por cemento. En el cuadro 40 los resultados a compresión por bloque y por edad. Se observa que los valores F más cercanos a 1 se obtienen a edades de 28 días, específicamente para los bloques del 4 al 8 (bloques con porcentajes de sustitución de GP por cemento arriba de un 25%), por lo que se concluye que el mejor rendimiento es obtenido en un rango de sustitución desde un 25% hasta un 30%.

Este comportamiento se extiende para los resultados a tensión (cuadro 41) donde también se observa que los mejores rendimientos son obtenidos en los mismos bloques que a compresión (del 4 al 8) para la misma edad (28 días), por lo que se concluye que a tensión los mejores rendimientos son obtenidos con porcentajes de sustitución iguales o mayores que un 25% hasta un 30%.

## **Análisis Global del Proyecto**

Con base en toda la información recolectada a lo largo de este proyecto y con los resultados de cada una de las pruebas ejecutadas con distintos porcentajes de sustitución de GP por cemento, se puede tener una idea de cómo actúa el GP dentro de una matriz cementicia.

En lo que respecta al flujo, a mayor adición de GP mayor flujo presenta la mezcla. Este fenómeno ocurre debido a la naturaleza del vidrio de no absorber agua, la cual se queda dentro de la mezcla mejorando sus características de trabajabilidad.

A cerca de la resistencia a compresión y tensión, se observa como el GP comienza a mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla a edades cercanas a 28 días, por lo que se presume que estas características superarán las de sus controles a edades mayores a 28 días.

Debido a los resultados obtenidos se piensa que las mezclas con adiciones de GP, pueden presentar calores de hidratación menores, con esto se tendría permeabilidades disminuidas. Para corroborar esto es imperante realizar los ensayos respectivos a las muestras con adición.

De ser cierto este parámetro y con los resultados obtenidos, se tendría un material cementante alternativo que ayude a incrementar la resistencia del cemento a edades lejanas de su elaboración, con menor calor de hidratación, menor fisuramiento y menor permeabilidad. Con estas características se podría afirmar que el material cementante alternativo utilizado en este proyecto (GP), ayude a incrementar la resistencia del concreto al ataque de sulfatos.

En lo que se refiere a consistencia normal y tiempo de fragua no se ven cambios de gran medida, aun así, los resultados se encuentran dentro de los rangos de la normativa.

# Conclusiones y Recomendaciones

Del proyecto realizado se desprenden las siguientes conclusiones:

- El método de diseño de Montgomery es propicio para este tipo de proyectos en los cuales entran en consideración tantas variables que afectan directamente el resultado final, siempre y cuando se estipulen los rangos en los cuales las variables van a girar.
- Se obtuvo un tamaño de partícula de 75  $\mu\text{m}$  luego de un amplio proceso de molienda continuo y sin interrupciones.
- Las adiciones de GP no presentan un impacto considerable en la consistencia normal ni los tiempos de fragua de las mezclas.
- Los valores de tiempos de fraguas para los elementos con adiciones de GP se encuentran dentro de normativa excepto para el bloque 1 (49-202 min para tiempo de fragua inicial y 185-312 min para tiempo de fragua final).
- El GP mejora las condiciones mecánicas del cemento a edades de 28 para compresión y edades de 7 días y 28 días para tensión.
- Las dosificaciones óptimas son las presentes del bloque 5 al 8 tanto sin vidrio como con vidrio.
- Los mejores rendimientos son obtenidos con porcentajes de sustitución desde un 25% hasta un 30%.
- Se corrobora la actividad puzolánica del GP dentro de la mezcla cementicia, así como la densificación de la matriz cementicia, a edades lejanas de la conformación de los elementos, esto debido a la ganancia tardía de resistencia a compresión y tensión.
- El porcentaje de sustitución de GP por cemento se vuelve irrelevante a edades

posteriores de los 28 días tanto a compresión como a tensión.

De igual manera a continuación se desglosan las recomendaciones que se consideran necesarias para el mejoramiento de los resultados anteriormente descritos y para futuras investigaciones relacionadas a este campo:

- Dejar los especímenes a edades mayores a los 28 días, con el fin de corroborar el crecimiento en la resistencia promedio de los bloques y de esta forma poder observar si la resistencia promedio de los elementos que contienen vidrio supera a la resistencia promedio de los bloques control. (Tendencia del comportamiento de elementos con vidrio muy cercana a igualar resistencias de elementos control en todas las dosificaciones).
- Realizar los ensayos en condiciones óptimas por parte del laboratorio, esto debido a las fallas que presentaron los aires acondicionados a lo largo de la realización de los elementos a compresión y tensión. (No se pudo mantener la humedad relativa y la temperatura constantes a la hora de la realización de los ensayos). (Afectación directa en el flujo reportado).
- Mejorar el proceso de molienda adquiriendo un molino adecuado para moler vidrio o mejorar las condiciones del molino de bolas en la escuela de Ing en Materiales, ya que no es un molino para moler vidrio (picos en vez de esferas).
- En caso de no poder realizar recomendación anterior, mejorar las condiciones de sonido del establecimiento del molino de bolas, con el fin de poder realizar la molienda durante más horas a las realizadas para

este proyecto (6 horas como máximo debido a múltiples quejas del director de la escuela de Ing en Producción Industrial).

- Disminuir el tamaño de partícula del vidrio (el utilizado en este proyecto es de  $75\mu\text{m}$ , pasando el tamiz #200), con el fin de buscar un mejor acople de las partículas del vidrio con las de cemento, esto para aumentar la densificación de la matriz cementante.
- Realizar un estudio químico al vidrio a utilizar antes de la ejecución de pruebas, de modo que se conozca con certeza los componentes y sus cantidades (porcentajes).
- Realizar las pruebas de consistencia normal y tiempo de fragua en un ambiente 100% controlado todo el tiempo. De esta forma se podrá observar la influencia del ambiente dentro de las mezclas.
- Realizar la prueba de Consistencia Normal con un rango de A/C más amplio, de esta forma se obtendrán mayores puntos de observación y la correlación de datos será más precisa.
- Realizar ensayos de calor de hidratación y permeabilidad para las muestras con adición de GP para corroborar comportamientos esperados de las mezclas.
- Realizar un análisis granulométrico al GP a utilizar para poder controlar de mejor manera el tamaño de partícula.

# Apéndices

**Apéndice 1. Datos moldeo de cubos a compresión para primeros 4 bloques sin GP**

Código	Edad falla	Fecha Realización	Hora Realización	T ambiente °C	Humedad Rel.	Fecha de falla	Hora de Falla
BL1-ED	24h	11/05/16	2:10pm	26,9	40%	12/05/16	2:07pm
	24h					12/05/16	2:10pm
	7 días					18/05/16	2:25pm
	7 días					18/05/16	2:28pm
BL2-ED	28 días	11/05/16	2:55pm	27,1	38%	08/06/16	8:20am
	28 días					08/06/16	8:23am
	24h					12/05/16	2:50pm
	24h					12/05/16	2:53pm
BL3-ED	7 días	12/05/16	9:00am	25,4	43%	18/05/16	2:49pm
	7 días					18/05/16	2:51pm
	28 días					08/06/16	8:25am
	28 días					08/06/16	8:27am
BL4-ED	24h	12/05/16	9:50am	25,9	51%	13/05/16	9:20am
	24h					13/05/16	9:25am
	7 días					19/05/16	10:23am
	7 días					19/05/16	10:24am
BL4-ED	28 días	12/05/16	9:50am	25,9	51%	09/06/16	8:56am
	28 días					09/06/16	8:58am
	24h					13/05/16	9:50am
	24h					13/05/16	9:53am
BL4-ED	7 días	12/05/16	9:50am	25,9	51%	19/05/16	10:28am
	7 días					19/05/16	10:30am
	28 días					09/06/16	9:02am
	28 días					09/06/16	9:06am

Fuente: elaboración propia



**Apéndice 2. Datos moldeo de cubos a compresión para últimos 4 bloques sin GP**

Código	Edad falla	Fecha Realización	Hora Realización	T ambiente °C	Humedad Rel.	Fecha de falla	Hora de Falla
BL5-ED	24h	12/05/16	11:50am	27,5	49%	13/05/16	12:01pm
	24h					13/05/16	12:04pm
	7 días					19/05/16	11:40am
	7 días					19/05/16	11:42am
BL6-ED	28 días	12/05/16	1:40:00 p. m.	27,6	51%	09/06/16	9:10am
	28 días					09/06/16	9:12am
	24h					13/05/16	1:48pm
	24h					13/05/16	1:51pm
BL7-ED	7 días	12/05/16	3:15:00 p. m.	24,4	49%	19/05/16	12:20pm
	7 días					19/05/16	12:22pm
	28 días					09/06/16	9:16am
	28 días					09/06/16	9:20am
BL8-ED	24h	17/05/16	9:26:00 a. m.	23,8	53%	13/05/16	2:50pm
	24h					13/05/16	2:52pm
	7 días					19/05/16	1:20pm
	7 días					19/05/16	1:22pm
BL8-ED	28 días	17/05/16	9:26:00 a. m.	23,8	53%	09/06/16	9:25am
	28 días					09/06/16	9:27am
	24h					18/05/16	9:50am
	24h					18/05/16	9:52am
BL8-ED	7 días	17/05/16	9:26:00 a. m.	23,8	53%	24/05/16	10:55am
	7 días					24/05/16	10:57am
	28 días					14/06/16	1:17pm
	28 días					14/06/16	1:19pm

Fuente: elaboración propia

### Apéndice 3. Datos moldeo de cubos a compresión para primeros 4 bloques con GP

Bloque #	Código	Edad falla	Fecha Realización	Hora Realización	T ambiente °C	Humedad Rel.	Fecha de falla	Hora de Falla
1	BL1V-ED	24h	17/05/16	10:26am	25,5	64%	18/05/16	10:23am
		24h					18/05/16	10:25am
		7 días					24/05/16	11:01am
		7 días					24/05/16	11:03am
2	BL2V-ED	28 días	17/05/16	11:25am	27,5	56%	14/06/16	1:28pm
		28 días					14/06/16	1:30pm
		24h					18/05/16	11:40am
		24h					18/05/16	11:42am
3	BL3V-ED	7 días	17/05/16	12:10pm	28,5	50%	24/05/16	11:09am
		7 días					24/05/16	11:11am
		28 días					14/06/16	1:34pm
		28 días					14/06/16	1:37pm
4	BL4V-ED	24h	17/05/16	1:40pm	28,9	54%	18/05/16	12:06pm
		24h					18/05/16	12:07pm
		7 días					24/05/16	11:19am
		7 días					24/05/16	11:21am
5	BL5V-ED	28 días	17/05/16	2:30pm	28,5	58%	14/06/16	1:40pm
		28 días					14/06/16	1:43pm
		24h					18/05/16	1:47pm
		24h					18/05/16	1:49pm
6	BL6V-ED	7 días	17/05/16	1:40pm	28,9	54%	24/05/16	11:22am
		7 días					24/05/16	11:28am
		28 días					14/06/16	1:46pm
		28 días					14/06/16	1:49pm

Fuente: elaboración propia

### Apéndice 4. Datos moldeo de cubos a compresión para últimos 4 bloques con GP

Bloque #	Código	Edad falla	Fecha Realización	Hora Realización	T ambiente °C	Humedad Rel.	Fecha de falla	Hora de Falla
5	BL5V-ED	24h	17/05/16	2:30pm	28,5	58%	18/05/16	2:35pm
		24h					18/05/16	2:37pm
		7 días					24/05/16	1:11pm
		7 días					24/05/16	1:13pm
6	BL6V-ED	28 días	18/05/16	11:15am	25,2	52%	14/06/16	1:50pm
		28 días					14/06/16	1:53pm
		24h					19/05/16	10:53am
		24h					19/05/16	10:55am
7	BL7V-ED	7 días	18/05/16	12:30pm	25,5	50%	25/05/16	1:11pm
		7 días					25/05/16	1:13pm
		28 días					15/06/16	1:45pm
		28 días					15/06/16	1:48pm
8	BL8V-ED	24h	18/05/16	2:10pm	25,5	55%	19/05/16	12:11pm
		24h					19/05/16	12:14pm
		7 días					25/05/16	1:14pm
		7 días					25/05/16	1:16pm
9	BL9V-ED	28 días	18/05/16	2:10pm	25,5	55%	15/06/16	1:52pm
		28 días					15/06/16	1:54pm
		24h					19/05/16	1:50pm
		24h					19/05/16	1:52pm
10	BL10V-ED	7 días	18/05/16	2:10pm	25,5	55%	25/05/16	1:17pm
		7 días					25/05/16	1:19pm
		28 días					15/06/16	2:00pm
		28 días					15/06/16	2:03pm

Fuente: elaboración propia

**Apéndice 5. Resultados falla a compresión para 24 horas, 7 días y 28 días de todos los cubos sin adición de GP con su respectivo cálculo de desviación estándar y varianza comparada con los valores permitidos por normativa**

Bloque #	Edad	Código	1		2		Promedio (Mpa)	Desv. Estandar	Varianza	Desv. Permitida	Control
			Carga (kN)	Resistencia (Mpa)	Carga (kN)	Resistencia (Mpa)					
1	24 h	BL1-ED	51,7	20,68	50,3	20,14	20,41	0,38	0,15	-	-
	7 días		88,4	35,38	92,6	37,04	36,21	1,17	1,38	1,38	Cumple
	28 días		109,9	43,94	110,2	44,08	44,01	0,10	0,0098	1,50	Cumple
2	24 h	BL2-ED	41,7	16,66	41,7	16,68	16,67	0,01	0,0002	-	-
	7 días		71,1	28,45	74,1	29,62	29,035	0,83	0,68445	1,10	Cumple
	28 días		89,5	35,81	85,4	34,15	34,98	1,17	1,3778	1,19	Cumple
3	24 h	BL3-ED	45,3	18,11	44,5	17,82	17,965	0,21	0,04	-	-
	7 días		80,9	32,35	85,3	34,12	33,235	1,25	1,57	1,26	Cumple
	28 días		102,1	40,76	104,2	41,66	41,21	0,64	0,405	1,40	Cumple
4	24 h	BL4-ED	43,1	17,23	43,1	17,23	17,23	0,00	0	-	-
	7 días		73,8	29,5	73,4	29,37	29,435	0,09	0,01	1,12	Cumple
	28 días		92,1	36,84	90,5	36,22	36,53	0,44	0,1922	1,24	Cumple
5	24 h	BL5-ED	50,4	20,16	50,3	20,12	20,14	0,03	0,0008	-	-
	7 días		80,5	32,2	84,9	33,96	33,08	1,24	1,55	1,26	Cumple
	28 días		106,8	42,62	108	43,18	42,9	0,40	0,1568	1,46	Cumple
6	24 h	BL6-ED	35,3	14,11	34	13,58	13,845	0,37	0,14	-	-
	7 días		59,8	23,92	58,9	23,57	23,745	0,25	0,06	0,90	Cumple
	28 días		69,8	27,92	72,9	29,17	28,545	0,88	0,78125	0,97	Cumple
7	24 h	BL7-ED	44,1	17,64	47,7	19,08	18,36	1,02	1,04	-	-
	7 días		79,6	31,83	83,5	33,39	32,61	1,10	1,22	1,24	Cumple
	28 días		96,6	38,62	100,9	40,37	39,495	1,24	1,53125	1,34	Cumple
8	24 h	BL8-ED	38,5	15,4	38,1	15,26	15,33	0,10	0,01	-	-
	7 días		68,2	27,28	68,8	27,53	27,41	0,18	0,03	1,04	Cumple
	28 días		86,1	34,46	87,6	35,03	34,745	0,40	0,16245	1,18	Cumple

Fuente: elaboración propia

**Apéndice 6. Resultados falla a compresión para 24 horas, 7 días y 28 días de todos los cubos con adición de GP con su respectivo cálculo de desviación estándar y varianza comparada con los valores permitidos por normativa**

Bloque #	Edad	Código	1		2		Promedio (Mpa)	Desv. Estandar	Varianza	Desv. Permitida	Control
			Carga (kN)	Resistencia (Mpa)	Carga (kN)	Resistencia (Mpa)					
1'	24 h	BL1V-ED	39,2	15,69	39,5	15,79	15,74	0,07	0,005	-	-
	7 días		70,1	28,06	73,8	29,48	28,77	1,00	1,01	1,09	Cumple
	28 días		99,6	39,83	96,5	38,6	39,215	0,87	0,75645	1,33	Cumple
2'	24 h	BL2V-ED	30,8	12,33	32,4	12,98	12,655	0,46	0,21	-	-
	7 días		55,1	22,03	56,7	22,69	22,36	0,47	0,2178	0,85	Cumple
	28 días		79,5	31,79	80,5	32,2	31,995	0,29	0,08405	1,09	Cumple
3'	24 h	BL3V-ED	33,4	13,37	32,8	13,13	13,25	0,17	0,03	-	-
	7 días		64,5	25,8	66,4	26,56	26,18	0,54	0,2888	0,99	Cumple
	28 días		92,1	36,84	92,2	36,9	36,87	0,04	0,0018	1,25	Cumple
4'	24 h	BL4V-ED	29,9	11,94	32,9	13,15	12,545	0,86	0,73	-	-
	7 días		61,9	24,74	60,5	24,22	24,48	0,37	0,1352	0,83	Cumple
	28 días		84,7	33,86	88,6	35,44	34,65	1,12	1,2482	1,18	Cumple
5'	24 h	BL5V-ED	33,5	13,39	34,3	13,72	13,555	0,23	0,05	-	-
	7 días		64,6	25,82	62,8	25,09	25,455	0,52	0,26645	0,97	Cumple
	28 días		70,3	28,12	91,7	36,66	36,66	-	-	-	Cumple
6'	24 h	BL6V-ED	26,8	10,73	26,7	10,67	10,7	0,04	0,0018	-	-
	7 días		57,5	22,99	59,4	23,75	23,37	0,54	0,2888	0,89	Cumple
	28 días		84,1	33,66	84,2	33,7	33,68	0,03	0,0008	1,15	Cumple
7'	24 h	BL7V-ED	30	12	29,4	11,77	11,885	0,16	0,03	-	-
	7 días		59,8	23,9	58,1	23,24	23,57	0,47	0,2178	0,90	Cumple
	28 días		86,1	34,42	84,2	33,68	34,05	0,52	0,2738	1,16	Cumple
8'	24 h	BL8V-ED	22,5	9	24,4	9,76	9,38	0,54	0,29	-	-
	7 días		50,8	20,29	49,2	19,69	19,99	0,42	0,18	0,76	Cumple
	28 días		80,1	32,06	76,8	30,71	31,385	0,95	0,91125	1,07	Cumple

Fuente: elaboración propia

**Apéndice 7. Proceso de descarte de cubos sin adición de GP a compresión según parámetros de desviación de resultados respecto a su valor promedio y valor promedio final reportado**

Bloque #	Edad	Descarte			Control Cubo 1	Control Cubo 2	Valor Reportado
		Valor mín	Valor Promedio	Valor Max			
1	24 h	18,86	20,41	21,96	Cumple	Cumple	20,41 Mpa
	7 días	33,46	36,21	38,96	Cumple	Cumple	36,21 Mpa
	28 días	40,67	44,01	47,35	Cumple	Cumple	44,01 Mpa
2	24 h	15,40	16,67	17,94	Cumple	Cumple	16,67 Mpa
	7 días	26,83	29,04	31,24	Cumple	Cumple	29,035 Mpa
	28 días	32,32	34,98	37,64	Cumple	Cumple	34,98 Mpa
3	24 h	16,60	17,97	19,33	Cumple	Cumple	17,965 Mpa
	7 días	30,71	33,24	35,76	Cumple	Cumple	33,235 Mpa
	28 días	38,08	41,21	44,34	Cumple	Cumple	41,21 Mpa
4	24 h	15,92	17,23	18,54	Cumple	Cumple	17,23 Mpa
	7 días	27,20	29,44	31,67	Cumple	Cumple	29,435 Mpa
	28 días	33,75	36,53	39,31	Cumple	Cumple	36,53 Mpa
5	24 h	18,61	20,14	21,67	Cumple	Cumple	20,14 Mpa
	7 días	30,57	33,08	35,59	Cumple	Cumple	33,08 Mpa
	28 días	39,64	42,90	46,16	Cumple	Cumple	42,9 Mpa
6	24 h	12,79	13,85	14,90	Cumple	Cumple	13,845 Mpa
	7 días	21,94	23,75	25,55	Cumple	Cumple	23,745 Mpa
	28 días	26,38	28,55	30,71	Cumple	Cumple	28,545 Mpa
7	24 h	16,96	18,36	19,76	Cumple	Cumple	18,36 Mpa
	7 días	30,13	32,61	35,09	Cumple	Cumple	32,61 Mpa
	28 días	36,49	39,50	42,50	Cumple	Cumple	39,495 Mpa
8	24 h	14,16	15,33	16,50	Cumple	Cumple	15,33 Mpa
	7 días	25,32	27,41	29,49	Cumple	Cumple	27,405 Mpa
	28 días	32,10	34,75	37,39	Cumple	Cumple	34,745 Mpa

Fuente: elaboración propia

**Apéndice 8. Proceso de descarte de cubos con adición de GP a compresión según parámetros de desviación de resultados respecto a su valor promedio y valor promedio final reportado**

Bloque #	Edad	Descarte			Control Cubo 1	Control Cubo 2	Valor Reportado
		Valor mín	Valor Promed	Valor Max			
1'	24 h	14,54	15,74	16,94	Cumple	Cumple	15,74 Mpa
	7 días	26,58	28,77	30,96	Cumple	Cumple	28,77 Mpa
	28 días	36,23	39,22	42,20	Cumple	Cumple	39,215 Mpa
2'	24 h	11,69	12,66	13,62	Cumple	Cumple	12,655 Mpa
	7 días	20,66	22,36	24,06	Cumple	Cumple	22,36 Mpa
	28 días	29,56	32,00	34,43	Cumple	Cumple	31,995 Mpa
3'	24 h	12,24	13,25	14,26	Cumple	Cumple	13,25 Mpa
	7 días	24,19	26,18	28,17	Cumple	Cumple	26,18 Mpa
	28 días	34,07	36,87	39,67	Cumple	Cumple	36,87 Mpa
4'	24 h	11,59	12,55	13,50	Cumple	Cumple	12,545 Mpa
	7 días	22,62	24,48	26,34	Cumple	Cumple	24,48 Mpa
	28 días	32,02	34,65	37,28	Cumple	Cumple	34,65 Mpa
5'	24 h	12,52	13,56	14,59	Cumple	Cumple	13,555 Mpa
	7 días	23,52	25,46	27,39	Cumple	Cumple	25,455 Mpa
	28 días	33,87	36,66	39,45	Cumple	Cumple	36,66 Mpa
6'	24 h	9,89	10,70	11,51	Cumple	Cumple	10,7 Mpa
	7 días	21,59	23,37	25,15	Cumple	Cumple	23,37 Mpa
	28 días	31,12	33,68	36,24	Cumple	Cumple	33,68 Mpa
7'	24 h	10,98	11,89	12,79	Cumple	Cumple	11,885 Mpa
	7 días	21,78	23,57	25,36	Cumple	Cumple	23,57 Mpa
	28 días	31,46	34,05	36,64	Cumple	Cumple	34,05 Mpa
8'	24 h	8,67	9,38	10,09	Cumple	Cumple	9,38 Mpa
	7 días	18,47	19,99	21,51	Cumple	Cumple	19,99 Mpa
	28 días	29,00	31,39	33,77	Cumple	Cumple	31,385 Mpa

Fuente: elaboración propia

### Apéndice 9. Datos moldeo de briquetas a tensión para primeros 4 bloques sin GP

Código	Edad falla	Fecha Realización	Hora Realización	T ambiente °C	Humedad Rel.	Fecha de falla	Hora de Falla
BL1-ED	7 días	01/06/16	1:47pm	25,8	58%	08/06/16	1:52:00 p. m.
	7 días					08/06/16	1:55:00 p. m.
	7 días					08/06/16	1:58:00 p. m.
	28 días					29/06/16	2:02:00 p. m.
	28 días					29/06/16	2:05:00 p. m.
	28 días					29/06/16	2:08:00 p. m.
BL2-ED	7 días	01/06/16	2:30pm	25,7	64%	08/06/16	2:42:00 p. m.
	7 días					08/06/16	2:45:00 p. m.
	7 días					08/06/16	2:47:00 p. m.
	28 días					29/06/16	2:55:00 p. m.
	28 días					29/06/16	2:57:00 p. m.
	28 días					29/06/16	3:00:00 p. m.
BL3-ED	7 días	02/06/16	11:20am	24,7	66%	09/06/16	11:37:00 a. m.
	7 días					09/06/16	11:39:00 a. m.
	7 días					09/06/16	11:45:00 a. m.
	28 días					30/06/16	11:50:00 a. m.
	28 días					30/06/16	11:55:00 a. m.
	28 días					30/06/16	11:57:00 a. m.
BL4-ED	7 días	02/06/16	11:50am	24,3	62%	09/06/16	11:35:00 a. m.
	7 días					09/06/16	11:37:00 a. m.
	7 días					09/06/16	11:40:00 a. m.
	28 días					30/06/16	11:37:00 a. m.
	28 días					30/06/16	11:39:00 a. m.
	28 días					30/06/16	11:45:00 a. m.

Fuente: elaboración propia

### Apéndice 10. Datos moldeo de briquetas a tensión para últimos 4 bloques sin GP

Código	Edad falla	Fecha Realización	Hora Realización	T ambiente °C	Humedad Rel.	Fecha de falla	Hora de Falla
BL5-ED	7 días	02/06/16	12:50pm	24,4	56%	09/06/16	1:00:00 p. m.
	7 días					09/06/16	1:03:00 p. m.
	7 días					09/06/16	1:05:00 p. m.
	28 días					30/06/16	1:10:00 p. m.
	28 días					30/06/16	1:13:00 p. m.
	28 días					30/06/16	1:15:00 p. m.
BL6-ED	7 días	02/06/16	1:45pm	24,6	61%	09/06/16	1:52:00 p. m.
	7 días					09/06/16	1:55:00 p. m.
	7 días					09/06/16	1:58:00 p. m.
	28 días					30/06/16	2:02:00 p. m.
	28 días					30/06/16	2:05:00 p. m.
	28 días					30/06/16	2:08:00 p. m.
BL7-ED	7 días	02/06/16	2:35pm	23,4	59%	09/06/16	2:42:00 p. m.
	7 días					09/06/16	2:45:00 p. m.
	7 días					09/06/16	2:47:00 p. m.
	28 días					30/06/16	2:55:00 p. m.
	28 días					30/06/16	2:57:00 p. m.
	28 días					30/06/16	3:00:00 p. m.
BL8-ED	7 días	20/06/16	10:05am	22,8	90%	27/06/16	10:10:00 a. m.
	7 días					27/06/16	10:13:00 a. m.
	7 días					27/06/16	10:15:00 a. m.
	28 días					18/07/16	10:30:00 a. m.
	28 días					18/07/16	10:33:00 a. m.
	28 días					18/07/16	10:36:00 a. m.

Fuente: elaboración propia

## Apéndice 11. Datos moldeo de briquetas a tensión para primeros 4 bloques con GP

Bloque #	Código	Edad falla	Fecha Realización	Hora Realización	T ambiente °C	Humedad Rel.	Fecha de falla	Hora de Falla
1	BL1V-ED	7 días	20/06/16	10:49am	22,6	64%	27/06/16	11:00:00 a. m.
		7 días					27/06/16	11:00:00 a. m.
		7 días					27/06/16	11:00:00 a. m.
		28 días					18/07/16	11:35:00 a. m.
		28 días					18/07/16	11:37:00 a. m.
		28 días					18/07/16	11:40:00 a. m.
2	BL2V-ED	7 días	20/06/16	11:35am	22,8	53%	27/06/16	11:37:00 a. m.
		7 días					27/06/16	11:39:00 a. m.
		7 días					27/06/16	11:45:00 a. m.
		28 días					18/07/16	11:45:00 a. m.
		28 días					18/07/16	11:47:00 a. m.
		28 días					18/07/16	11:55:00 a. m.
3	BL3V-ED	7 días	20/06/16	12:00pm	23,2	53%	27/06/16	12:10:00 p. m.
		7 días					27/06/16	12:14:00 p. m.
		7 días					27/06/16	12:16:00 p. m.
		28 días					18/07/16	12:30:00 p. m.
		28 días					18/07/16	12:33:00 p. m.
		28 días					18/07/16	12:35:00 p. m.
4	BL4V-ED	7 días	21/06/16	12:46pm	22	58%	28/06/16	1:00:00 p. m.
		7 días					28/06/16	1:03:00 p. m.
		7 días					28/06/16	1:05:00 p. m.
		28 días					19/07/16	1:10:00 p. m.
		28 días					19/07/16	1:13:00 p. m.
		28 días					19/07/16	1:15:00 p. m.

Fuente: elaboración propia

## Apéndice 12. Datos moldeo de briquetas a tensión para últimos 4 bloques con GP

Bloque #	Código	Edad falla	Fecha Realización	Hora Realización	T ambiente °C	Humedad Rel.	Fecha de falla	Hora de Falla
5	BL5V-ED	7 días	21/06/16	1:20pm	24,2	59%	28/06/16	1:25:00 p. m.
		7 días					28/06/16	1:27:00 p. m.
		7 días					28/06/16	1:30:00 p. m.
		28 días					19/07/16	1:40:00 p. m.
		28 días					19/07/16	1:43:00 p. m.
		28 días					19/07/16	1:45:00 p. m.
6	BL6V-ED	7 días	21/06/16	1:50pm	24	50%	28/06/16	1:52:00 p. m.
		7 días					28/06/16	1:55:00 p. m.
		7 días					28/06/16	1:58:00 p. m.
		28 días					19/07/16	2:02:00 p. m.
		28 días					19/07/16	2:05:00 p. m.
		28 días					19/07/16	2:08:00 p. m.
7	BL7V-ED	7 días	21/06/16	2:40pm	23,8	51%	28/06/16	2:42:00 p. m.
		7 días					28/06/16	2:45:00 p. m.
		7 días					28/06/16	2:47:00 p. m.
		28 días					19/07/16	2:55:00 p. m.
		28 días					19/07/16	2:57:00 p. m.
		28 días					19/07/16	3:00:00 p. m.
8	BL8V-ED	7 días	21/06/16	3:20pm	23,1	47%	28/06/16	3:30:00 p. m.
		7 días					28/06/16	3:33:00 p. m.
		7 días					28/06/16	3:35:00 p. m.
		28 días					19/07/16	3:50:00 p. m.
		28 días					19/07/16	3:52:00 p. m.
		28 días					19/07/16	3:55:00 p. m.

Fuente: elaboración propia

**Apéndice 13. Resultados falla a tensión para 7 días y 28 días de todas las briquetas sin adición de GP con su respectivo cálculo de desviación estándar y varianza**

Bloque #	Edad	Código	1		2		3		Promedio (Mpa)	Desv. Estandar	Varianza
			Carga (kN)	Resistencia (Mpa)	Carga (kN)	Resistencia (Mpa)	Carga (kN)	Resistencia (Mpa)			
1	7 días	BL1-ED	1,81	2,89	1,6	2,56	1,81	2,89	2,78	0,19	0,04
	28 días		2,07	3,31	2,02	3,23	2,07	3,31	3,28	0,05	0,00
2	7 días	BL2-ED	1,76	2,81	1,5	2,40	1,76	2,81	2,67	0,24	0,06
	28 días		1,86	2,98	1,86	2,98	1,81	2,89	2,95	0,05	0,00
3	7 días	BL3-ED	2,070	3,31	1,86	2,98	2,070	3,31	3,20	0,19	0,04
	28 días		1,76	2,81	1,86	2,98	1,81	2,89	2,89	0,08	0,01
4	7 días	BL4-ED	1,81	2,89	1,29	2,07	1,81	2,89	2,62	0,48	0,23
	28 días		1,91	3,06	1,76	2,81	1,96	3,14	3,00	0,17	0,03
5	7 días	BL5-ED	1,910	3,06	1,81	2,89	1,96	3,14	3,03	0,13	0,02
	28 días		1,91	3,06	1,45	2,32	1,65	2,65	2,67	0,37	0,14
6	7 días	BL6-ED	1,030	1,65	1,34	2,15	1,45	2,32	2,04	0,34	0,12
	28 días		1,24	1,98	1,6	2,56	1,29	2,07	2,21	0,31	0,10
7	7 días	BL7-ED	1,550	2,48	1,550	2,48	1,6	2,56	2,51	0,05	0,00
	28 días		1,65	2,65	1,86	2,98	1,86	2,98	2,87	0,19	0,04
8	7 días	BL8-ED	1,29	2,07	1,550	2,48	1,76	2,81	2,45	0,37	0,14
	28 días		1,71	2,73	1,65	2,65	1,71	2,73	2,70	0,05	0,00

Fuente: elaboración propia

**Apéndice 14. Resultados falla a tensión para 7 días y 28 días de todas las briquetas con adición de GP con su respectivo cálculo de desviación estándar y varianza**

Bloque #	Edad	Código	1		2		3		Promedio (Mpa)	Desv. Estandar	Varianza
			Carga (kN)	Resistencia (Mpa)	Carga (kN)	Resistencia (Mpa)	Carga (kN)	Resistencia (Mpa)			
1'	7 días	BL1V-ED	1,81	2,89	1,71	2,73	1,5	2,40	2,67	0,25	0,06
	28 días		1,4	2,23	1,91	3,06	1,96	3,14	2,81	0,50	0,25
2'	7 días	BL2V-ED	1,29	2,07	1,29	2,07	1,5	2,40	2,18	0,19	0,04
	28 días		1,5	2,40	1,86	2,98	2,12	3,39	2,92	0,50	0,25
3'	7 días	BL3V-ED	1,91	3,06	1,45	2,32	1,65	2,65	2,67	0,37	0,14
	28 días		1,91	3,06	2,86	2,98	2,12	3,39	3,14	0,22	0,05
4'	7 días	BL4V-ED	1,76	2,81	1,71	2,73	1,96	3,14	2,89	0,22	0,05
	28 días		1,81	2,89	1,76	2,81	1,81	2,89	2,87	0,05	0,00
5'	7 días	BL5V-ED	1,76	2,81	1,65	2,65	1,5	2,40	2,62	0,21	0,04
	28 días		1,65	2,65	1,91	3,06	1,65	2,65	2,78	0,24	0,06
6'	7 días	BL6V-ED	1,4	2,23	1,55	2,48	1,81	2,89	2,54	0,33	0,11
	28 días		1,86	2,98	1,76	2,81	1,71	2,73	2,84	0,13	0,02
7'	7 días	BL7V-ED	1,71	2,73	1,81	2,89	1,86	2,98	2,87	0,13	0,02
	28 días		2,17	3,47	2,91	3,06	1,71	2,73	3,09	0,37	0,14
8'	7 días	BL8V-ED	1,71	2,73	1,4	2,23	1,86	2,98	2,65	0,38	0,14
	28 días		1,91	3,06	1,71	2,73	1,65	2,65	2,81	0,22	0,05

Fuente: elaboración propia

**Apéndice 15. Proceso de descarte de briquetas sin adición de GP a tensión según parámetros de desviación de resultados respecto a su valor promedio y valor promedio final reportado**

Bloque #	Edad	Descarte			Briqueta 1	Briqueta 2	Briqueta 3	Generando Des Promedio 2	Segunda Revisión de Descarte			Revisión Final	Valor Reportado	
		Valor mín	Promedio	Valor Max					Valor mín	Promedio	Valor Max			
1	7 días	2,37	2,78	3,20	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,78	Mpa
	28 días	2,79	3,28	3,77	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	3,28	Mpa
2	7 días	2,27	2,67	3,08	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,67	Mpa
	28 días	2,51	2,95	3,39	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,95	Mpa
3	7 días	2,72	3,20	3,68	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	3,20	Mpa
	28 días	2,46	2,89	3,33	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,89	Mpa
4	7 días	2,23	2,62	3,01	Cumple	No Cumple	Cumple	2,89	2,46	2,89	3,33	Cumple	2,89	Mpa
	28 días	2,55	3,00	3,46	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	3,00	Mpa
5	7 días	2,58	3,03	3,49	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	3,03	Mpa
	28 días	2,27	2,67	3,08	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,67	Mpa
6	7 días	1,73	2,04	2,35	No Cumple	Cumple	Cumple	2,23	1,90	2,23	2,57	Cumple	2,23	Mpa
	28 días	1,87	2,21	2,54	Cumple	No Cumple	Cumple	2,03	1,72	2,03	2,33	Cumple	2,03	Mpa
7	7 días	2,13	2,51	2,88	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,51	Mpa
	28 días	2,44	2,87	3,30	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,87	Mpa
8	7 días	2,09	2,45	2,82	No Cumple	Cumple	Cumple	2,65	2,25	2,65	3,04	Cumple	2,65	Mpa
	28 días	2,30	2,70	3,11	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,70	Mpa

Fuente: elaboración propia

**Apéndice 16. Proceso de descarte de briquetas con adición de GP a tensión según parámetros de desviación de resultados respecto a su valor promedio y valor promedio final reportado**

Bloque #	Edad	Descarte			Briqueta 1	Briqueta 2	Briqueta 3	Generando Des Promedio 2	Segunda Revisión de Descarte			Revisión Final	Valor Reportado	
		Valor mín	Promedio	Valor Max					Valor mín	Promedio	Valor Max			
1'	7 días	2,27	2,67	3,08	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,67	Mpa
	28 días	2,39	2,81	3,23	No Cumple	Cumple	Cumple	3,10	2,64	3,10	3,57	Cumple	3,10	Mpa
2'	7 días	1,85	2,18	2,50	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,18	Mpa
	28 días	2,48	2,92	3,36	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,92	Mpa
3'	7 días	2,27	2,67	3,08	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,67	Mpa
	28 días	2,67	3,14	3,61	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	3,14	Mpa
4'	7 días	2,46	2,89	3,33	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,89	Mpa
	28 días	2,44	2,87	3,30	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,87	Mpa
5'	7 días	2,23	2,62	3,01	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,62	Mpa
	28 días	2,37	2,78	3,20	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,78	Mpa
6'	7 días	2,16	2,54	2,92	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,54	Mpa
	28 días	2,41	2,84	3,27	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,84	Mpa
7'	7 días	2,44	2,87	3,30	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,87	Mpa
	28 días	2,62	3,09	3,55	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	3,09	Mpa
8'	7 días	2,25	2,65	3,04	Cumple	No Cumple	Cumple	2,85	2,43	2,85	3,28	Cumple	2,85	Mpa
	28 días	2,39	2,81	3,23	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	-	-	2,81	Mpa

Fuente: elaboración propia



# Referencias

- Becker, I. E. (25 de Abril de 2017). *Loma Negra*. Obtenido de <http://www.fceia.unr.edu.ar/~fermar/Bibliografia/REACCI%D3N%20%C1L CALI-S%CDLICE.pdf>
- Hobhe, D., & Gutteridge, W. (1979). Influencia del Tamaño de las Partículas sobre la Expansión causada por la Reacción Sílice-Alcali. *Magazine of Concrete Research*, 235.
- Montgomery, D. (2008). *Diseño y Análisis de Experimentos*. Limusa Wiley.
- Omran, A., Morin, E., & Tagnit-Hamou, A. (2015). Performance of Glass-Powder Concrete in Field Sites.
- Portland Cement Association (PCA). (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*.
- Statgraphics. (2006). *Diseños de Mezclas*.
- VICESA. (16 de Diciembre de 2015). *Los Enormes Beneficios de Reciclar Vidrio*. Obtenido de <http://www.grupovical.com/reciclaje/noticias.html>
- Zidol, Pavoine, & Tagnit-Hamou. (2012). *Effect of Glass Powder on Concrete Durability. International Congress on durability of Concrete*.
- Zidol, Tohoue-Tognonvi, & Tagnit-Hamou. (2012). Effect of Glass Powder on Concrete Sustainability. En *1st International Conference on Concrete Sustainability (ICCS13)*.
- Zúñiga, R. V. (2015). *Caracterización física, mecánica y de desempeño de aglutinante hidráulico con aditivo compuesto de nanofibras de poliestireno*.

