

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Resistencia a compresión hormigón-caucho:
Aplicación de un I-Optimal Design para la optimización de
formulaciones
Proyecto de investigación**

Mauricio Andrés Larrea Molinari

Ingeniería Industrial

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Industrial

Quito, 10 de diciembre de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Resistencia a compresión hormigón-caucho:
Aplicación de una I-Optimal Design para la optimización de formulaciones**

Mauricio Andrés Larrea Molinari

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Danny Navarrete, MSc.

Firma del profesor

Quito, 10 de diciembre de 2017

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Mauricio Andrés Larrea Molinari

Código: 00111292

Cédula de Identidad: 1716209745

Lugar y fecha: Quito, 10 de diciembre de 2017

Agradecimientos

A Dios por darme la oportunidad de lograr mis metas.

A mi novia María José Mucarsel, mis padres Mauricio Larrea y Sandra Molinari, mis hermanas y familia por el apoyo, comprensión, consejos y valores que me permitieron ser lo que he llegado ser y me impulsan a superarme constantemente en lo personal como en lo profesional.

A Danny Navarrete por su dedicación y apoyo incondicional como amigo y profesor.

A mis profesores por transmitirme su conocimiento para crecer profesionalmente cada día más.

A la empresa SOLING Cía. Ltda. por permitirme realizar este proyecto, en especial al Ingeniero Alfredo Mucarsel por la disposición y apoyo total en todas las etapas del proyecto.

Dedicado a
Giacomo Molinari y Oswaldo Larrea

Resumen

La Consultora Suelos e Ingeniería “SOLING Cía. Ltda.” busca una solución amigable al medio ambiente al introducir caucho de llanta usada en hormigón no estructural. Se desarrolló un experimento de viabilidad que consistió en un diseño factorial 2^4 completo. Se analizó las interacciones entre hormigones no estructurales con aplicabilidad de 180 kg/cm² y 210 kg/cm², volúmenes de caucho de 5 y 15%, tamaños de partícula de caucho (<0.850mm) y (>1.18mm, <2mm), y el curado. Los resultados mostraron una ausencia de interacción entre los factores y la viabilidad de introducir caucho de llanta usada en hormigón no estructural, razón por la que se realizó un experimento de optimización basado en un I-Optimal Design. Se mantuvo el agua y cemento como un solo componente al permanecer constante la relación agua/cemento de 0.65. Se varió las proporciones del componente agua y cemento del 20 al 30%, agregado del 60 al 80%, y caucho del 0 al 20%. Los resultados se ajustaron a un modelo de regresión lineal con una falta de ajuste de 0.7203 y un R-cuadrado Predictivo de 0.9296, que permite realizar estimaciones aptas sobre la resistencia a compresión de una formulación. En base a los criterios de SOLING Cía. Ltda., mediante optimización numérica se formula un hormigón-caucho con aplicación de 180 kg/cm² cuyas proporciones son agua y cemento (26.356%), agregado (63.644%), y caucho (10%). Un I-Optimal Design es un excelente enfoque para obtener una predicción sobre la resistencia a compresión del hormigón en base a la proporción de sus componentes.

Palabras clave: Resistencia a compresión, caucho de llanta usada, I-Optimal Design, diseño factorial, falta de ajuste, R-cuadrado Predictivo, optimización.

Abstract

The company Consultora Suelos e Ingeniería “SOLING Cía. Ltda.” searches for an eco-friendly solution by introducing waste tire rubber in non-structural concrete. A feasibility experiment was developed consisting in a 2^4 complete factorial design in which interactions between non-structural concrete mixtures with applicability of 180 kg/cm² and 210 kg/cm², rubber volumes of 5 and 15%, rubber particle sizes of (<0.850mm) and (>1.18mm, <2mm), and curing were analyzed. The results showed an absence of interactions between factors and the feasibility of introducing waste tire rubber in non-structural concrete, reason why an optimization experiment consisting in an I-Optimal Design was carried out. Water and cement were considered as a whole component because the water/cement ratio was held at 0.65. Proportions of the component water and cement were varied from 20 to 30%, aggregate from 60 to 80%, and rubber from 0 to 20%. The results fitted to a linear regression model with lack of fit of 0.7203 and Predictive R-square of 0.9296, which allows to make proper estimations about the compressive strength of a formulation. Based on SOLING Cía. Ltda.’s criteria, a formulation with an applicability of 180 kg/cm² is obtained through numerical optimization and its components are water and cement (26.356%), aggregate (63.644%), and rubber (10%). An I-Optimal Design is an excellent approach for predicting the compressive strength based in the proportions of the components.

Key words: Compressive strength, waste tire rubber, I-Optimal Design, factorial design, lack of fit, Predictive R-square, optimization.

Tabla de contenidos

1.	Introducción	11
2.	Estudios Previos	13
3.	Metodología	15
	3.1. Diseño Experimental para experimento de viabilidad	15
	3.2. Significancia y descripción de los factores a estudiar	15
	3.2.1. Tipo de hormigón	15
	3.2.2. Volumen de caucho.....	16
	3.2.3. Tipo de partícula de caucho	16
	3.2.4. Curado	17
	3.3. Medición de la variable de respuesta (ASTM C39).....	17
	3.4. Diseño de Mezclas para experimento de optimización.....	18
4.	Experimento de Viabilidad.....	19
	4.1. Desarrollo de dosificaciones por metro cúbico hormigón	19
	4.2. Desarrollo de dosificaciones por cilindro hormigón	20
	4.3. Matriz de diseño	22
	4.4. Diseños de cilindros con adición de caucho en sustitución de proporción	25
	4.5. Diseño del experimento en Minitab versión 17	29
	4.6. Plan de fundición por orden de fundición por réplica.....	32
	4.7. Fundición y rotura de cilindros	34
	4.8. Análisis de resultados.....	34
5.	Experimento de Optimización.....	41
	5.1. Componentes, proporciones y zona de experimentación	41
	5.2. Modelado de Experimento en software Design Expert versión 10.....	43
	5.3. Matriz de diseño	45
	5.4. Diseño de cilindros.....	46
	5.5. Fundición y rotura de cilindros	47
	5.6. Análisis de resultados	48
6.	Conclusiones	57
7.	Recomendaciones y pasos a seguir	59
8.	Referencias	60

Índice de Tablas

Tabla 1: Factores y niveles del experimento de viabilidad.....	15
Tabla 2: Clases y usos de hormigón según su resistencia a compresión	16
Tabla 3: Diseño 216 kg/cm ² para 1 metro cúbico	19
Tabla 4: Diseño 252 kg/cm ² para 1 metro cúbico	20
Tabla 5: Dimensiones de los cilindros	20
Tabla 6: Diseño 216 kg/cm ² para un cilindro.....	21
Tabla 7: Diseño 252 kg/cm ² para un cilindro.....	21
Tabla 8: Matriz de diseño factorial de cuatro factores con dos niveles	22
Tabla 9: Matriz de diseño aplicada al experimento de viabilidad.....	23
Tabla 10: Matriz de diseño aplicada con codificación por colores.....	24
Tabla 11: Matriz de diseño aplicada con codificación por colores y letras	25
Tabla 12: Pesos de las proporciones de un cilindro de caucho según su tipo.....	26
Tabla 13: Características de un cilindro tipo A.....	26
Tabla 14: Dosificación inicial de un cilindro tipo A.....	26
Tabla 15: Dosificación de un cilindro tipo A.....	27
Tabla 16: Dosificación de un cilindro tipo B.....	27
Tabla 17: Dosificación de un cilindro tipo C.....	27
Tabla 18: Dosificación de un cilindro tipo D.....	28
Tabla 19: Dosificación de un cilindro tipo E.....	28
Tabla 20: Dosificación de un cilindro tipo F	28
Tabla 21: Dosificación de un cilindro tipo G.....	29
Tabla 22: Dosificación de un cilindro tipo H.....	29
Tabla 23: Codificación en software Minitab	30
Tabla 24: Corridas aleatorizadas propuestas por software Minitab.....	30
Tabla 25: Bloques de corridas con codificación por letras	32
Tabla 26: Proporción en volumen de agua y cemento en total del cilindro.....	41
Tabla 27: Proporción en volumen de agua y cemento según sacos de cemento.....	41
Tabla 28: Composición y sub-composición de agregados.....	42
Tabla 29: Restricciones de componentes.....	43
Tabla 30: Matriz de diseño para I-Optimal Design	45
Tabla 31: Peso de un metro cúbico de cada componente o sub-componente.....	46
Tabla 32: Dosificación de un cilindro del punto central.....	47

Índice de Figuras

Figura 1: Proporción por peso del diseño 216 kg/cm ² para 1 metro cúbico	19
Figura 2: Proporción por peso del diseño 252 kg/cm ² para 1 metro cúbico	20
Figura 3: Proporción por peso del diseño 216 kg/cm ² para 1 cilindro.....	21
Figura 4: Proporción por peso del diseño 252 kg/cm ² para 1 cilindro.....	22
Figura 5: Residual Plots for Resistencia a compresión	35
Figura 6: Model Summary.....	36
Figura 7: Análisis de varianza	37
Figura 8: Pareto Chart of the Standardized Effects	38
Figura 9: Interaction Plot for Resistencia a compresión.....	38
Figura 10: Cube Plot for Resistencia a compresión.....	39
Figura 11: Main Effects Plot for Resistencia a compresión	39
Figura 12: Proporción en volumen de agua y cemento según sacos de cemento	41
Figura 13: Composición y sub-composición de agregados	42
Figura 14: Zona de experimentación	43
Figura 15: Modelo de regresión lineal.....	44
Figura 16: Modelo de regresión cuadrático.....	44
Figura 17: Modelo de regresión cúbico.....	44
Figura 18: Modelo de regresión cúbico especial.....	44
Figura 19: Dosificación de un cilindro del punto central	47
Figura 20: Ajuste de resultados según el modelo de regresión.....	48
Figura 21: Modelo cuadrático para experimento de optimización	48
Figura 22: Análisis de residuales para experimento de optimización.....	49
Figura 23: Análisis de varianza para experimento de optimización	50
Figura 24: Superficies de respuesta del experimento de optimización.....	51
Figura 25: Nuevo ajuste de resultados según el modelo de regresión.....	52
Figura 26: Modelo lineal para experimento de optimización.....	52
Figura 27: Análisis de residuales para experimento reducido de optimización.....	53
Figura 28: Análisis de varianza para experimento reducido de optimización.....	54
Figura 29: Superficies de respuesta del experimento reducido de optimización.....	55
Figura 30: Restricciones y solución óptima.....	56
Figura 31: Representación de solución óptima en superficie de respuesta	56

1. Introducción

El mundo de hoy en día se ve directamente influenciado por el desmesurado crecimiento poblacional, y hay que considerar que otra consecuencia importante del crecimiento poblacional es la acumulación de desperdicios. En una publicación por Hoornweg, Bhada-Tata & Kennedy (2013) se establece que en los últimos años la población mundial ha tenido una tendencia hacia la urbanización y para el año 2100 los desperdicios sólidos a nivel global superarán los 11 millones de toneladas por día, triplicando el total de desperdicios por día del año 2013.

En el libro titulado *WHAT A WASTE A Global Review of Solid Waste Management* por Daniel Hoornweg & Perinaz Bhada-Tata (2012) se muestra una tabla con una proyección de la generación de desperdicios urbanos para el año 2025 en comparación a la generación de desperdicios urbanos actual según los datos disponibles, y se observa que el valor de toneladas de desperdicio urbano por día en el año 2025 estará próximo a duplicar a aquel valor actual.

La Consultora Suelos e Ingeniería “SOLING Cía. Ltda.” busca desarrollar estudios que permitan innovar acerca de nuevos métodos de construcción que busquen solucionar los problemas presentados por la acumulación de desperdicios.

La hipótesis que se plantea es que al fusionar en determinadas proporciones hormigón con caucho de llanta usada, la interacción entre factores no será significativa. El estudio tiene como objetivo encontrar una combinación óptima de sus factores mediante el análisis de sus interacciones para optimizar la resistencia a compresión del hormigón en base a otro experimento que consiste en un Diseño de Mezcla I-Optimal Design. En estudios futuros, se podría determinar si el material se podría aplicar a proyectos de construcción y tener un impacto en el medio ambiente.

En una publicación por El Universo en el año 2015, se menciona que en Ecuador el 40% de llantas son fabricadas a nivel nacional y que en el año 2014 se vendió un total de 1,1 millones de llantas fabricadas nacionalmente, lo que implica que la demanda de llantas a nivel nacional se aproximaría a los 2.75 millones de unidades. En el libro titulado *WHAT A WASTE A Global Review of Solid Waste Management* por Daniel Hoornweg & Perinaz Bhada-Tata (2012), en una tabla en la cual se clasifican los desperdicios por región y por su tipo, se observa que el 0.7% de desperdicios en América del Sur son de caucho y/o cuero.

A diferencia de la mayoría de los estudios previos, en los cuales se realizaban pruebas con caucho como sustituto de los agregados del hormigón, el experimento de viabilidad realizará pruebas manteniendo constante las proporciones de los agregados del hormigón y se introducirá caucho

como un sustituto de volumen. El hormigón será tomado en cuenta como un factor en general y los especímenes a probar serán una fusión entre hormigón y caucho de llanta usada. El motivo de seleccionar como la variable de respuesta a la resistencia a compresión del hormigón, se fundamenta en que es la propiedad mecánica que está directamente relacionada con la calidad del mismo. (Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Concreto & Asociación de Productores de Hormigón Premezclado del Ecuador, 2007)

Para cuantificar los resultados en base a la resistencia a compresión se aplicarán modelos estadísticos cuantificables, siendo el primero un modelo de Diseño Factorial que permita analizar la interacción de los factores (Montgomery, 2013) para posteriormente construir un modelo de regresión basado en un I-Optimal Design que permitirá optimizar la variable de respuesta. (Bezerra et al. (2008), Myers et al. (2016)) Para el I-Optimal Design, 3 componentes (agua y cemento, agregado, caucho) variarán sus proporciones para obtener estimaciones de su resistencia a compresión de acuerdo a la composición total del cilindro.

Para la medición de la variable de respuesta se aplicará el Estándar ASTM C39 el cual es el Método de Prueba Estándar para la Resistencia a Compresión de Probetas Cilíndricas de Hormigón. La ASTM es una organización internacional que tiene como objetivo establecer estándares de métodos de prueba para mejorar el producto o material en varios aspectos como calidad, salud, seguridad, acceso al mercado, comercio, etc. Existen más de 12.000 estándares establecidos por la ASTM a través de más de 140 comités técnicos de normalización de escritura y sirven a varios campos de acción como metales, construcción, petróleo, entre otros. (ASTM International, 2017)

2. Estudios Previos

En el estudio realizado por Garín, L., Santilli, A. & Pejoja, E. (2012) se presenta una comprobación experimental sobre el curado y la interacción del mismo con diferentes dosificaciones de hormigón y cómo esto influye en la resistencia a compresión. Las condiciones de curado fueron de 50% y 100% y las relaciones agua/cemento fueron de 0.33, 0.5 y 0.7. El análisis de resultados implica que independientemente de la relación agua/cemento, el curado es significativo y mientras mayor sea la relación, mayor será el aumento de la resistencia a compresión al curar.

En un estudio por A. K. Abdel-Gawad (2010), se reemplazó por porcentajes al agregado grueso y al agregado fino del hormigón utilizando caucho de llanta usada. Dos tipos de partículas de caucho fueron utilizados, caucho picado (chipped rubber) y caucho molido (crumb rubber). El primero fue utilizado para reemplazar en su totalidad al agregado grueso, mientras que el segundo fue utilizado para reemplazar en un 50% y 100% al agregado fino. La resistencia a compresión decayó significativamente y no se presentó un incremento significativo dependiendo del volumen de caucho molido como reemplazo del agregado fino.

En el estudio realizado por Yung, W., Yung, L., & Hua, L. (2013) se reemplaza al agregado fino del hormigón en diferentes volúmenes (5%, 10%, 15%, 20%) por partículas de caucho filtradas por tamices de especificación 30 y 50. Los resultados en base a resistencia a compresión mostraron que a los 91 días de fabricado, el hormigón con características de reemplazo de agregado fino por caucho en 5% por partículas filtradas por el tamiz # 50 presentó un aumento en su resistencia a compresión comparándolo con la medida de control.

En el estudio por Balcikanli, M., Turker, H., Ozbay, E., Karahan, O. & Atis, C. (2017) se aplica un Diseño Central Compuesto para determinar el comportamiento abrasivo de hormigones tipo AAC (Alkali Activated Concretes) y se muestra su optimización para maximizar diferentes propiedades entre ellas la resistencia a compresión.

En el estudio por Zhang, H., Gou, M., Liu, X., & Guan, X. (2014), se estudia el efecto de la modificación de las partículas de caucho cuando estas se fusionan con el hormigón. El estudio concluye que el ángulo de contacto entre las partículas de caucho y el agua disminuye. Comparando con un hormigón con partículas de caucho sin modificar, la resistencia a compresión del hormigón con partículas de caucho modificado presentó un incremento en su resistencia a compresión.

En el estudio realizado por Ataei, H. (2015), se realizaron pruebas de resistencia a compresión y resistencia dinámica a más de 55 cilindros de hormigón. Se reemplazaron en porcentajes (25%,

50%, 75%, 100%) al agregado grueso y fino con caucho picado y caucho molido respectivamente. En el estudio se presentaron reducciones significativas en la resistencia a compresión de los cilindros, sin embargo, se concluyó que las reducciones fueron menores en los especímenes cuyo agregado fino fue reemplazado por caucho molido.

El estudio por Aslani, F. (2016) tiene como objetivo explorar el efecto de las partículas de caucho de llanta en las propiedades del hormigón mediante el análisis respecto a la introducción de tres diferentes tipos de caucho que son molido, picado, y la combinación de los dos. Para este estudio con respecto a resistencia a compresión se analizaron 298 mezclas de hormigón.

En el estudio por Eldin, N. & Senouci, A. (1993), se analiza la factibilidad de introducir partículas de caucho picado y caucho molido provenientes de llanta. Se reemplazaron los agregados grueso y fino en porcentajes (25%, 50%, 75%, 100%) y se utilizó una sola dosificación de hormigón como base. Cada mezcla fue replicada 3 veces. Se concluye que la resistencia a compresión tuvo reducciones de hasta 85%, sin embargo, una reducción de 65% se observó cuando la sustitución fue en agregado fino por caucho molido.

En el estudio por Jingfu, K., Chuncui, H., & Zhenli, Z. (2008), se presenta al caucho como un aditivo y no como un agregado. En el estudio se mantiene constante la resistencia a compresión del hormigón en 40 Megapascuales y se fusiona el caucho como aditivo por volumen y sus cantidades fueron de 50, 80, 100 y 120 kg/m³. El estudio muestra cómo se ven favorecidas ciertas propiedades del hormigón como la resistencia de tensión, que incrementó su valor en un 5% cuando el contenido de caucho fue de 50 y 100 kg/m³ y de 19% cuando el contenido de caucho fue de 120 kg/m³.

3. Metodología

3.1. Diseño Experimental para experimento de viabilidad

“Un diseño experimental es un conjunto específico de experimentos definidos por una matriz compuesta por las combinaciones de niveles de los factores estudiados” (Bezerra et al., 2008)

Como se analizarán 4 factores y cada uno de ellos con dos niveles, se aplicará un diseño factorial 2⁴ completo. El experimento consiste de 16 posibles combinaciones que serán replicadas en tres ocasiones para obtener una media que provea un resultado más real y válido para cada combinación. (Secretaría Gestión de Riesgos et al., 2016)

Según Douglas Montgomery (2013), los diseños factoriales son modelos experimentales que son ampliamente utilizados cuando el experimento se basa en las condiciones anteriormente estipuladas y cuando se basa en investigación porque forman la base de otros diseños importantes a la contribución de conclusiones válidas. Los niveles de los factores pueden ser cuantitativos o cualitativos, y en algunos casos uno de los niveles de ese factor puede ser la ausencia del mismo. Los niveles altos y bajos de los factores definirán el campo experimental a estudiar. (Bezerra et al., 2008) La denominación de los factores y sus niveles a estudiar se presentan en la tabla 1.

Tabla 1: Factores y niveles del experimento de viabilidad

Factor	Nivel Bajo	Nivel Alto
Tipo de hormigón	216 kg/cm ²	252 kg/cm ²
Volumen de caucho	5 %	15 %
Tipo de caucho	Fino (<0.850mm)	Grueso (>1.18mm, <2mm)
Curado	Sin curado	Con curado

3.2. Significancia y descripción de los factores a estudiar

3.2.1. Tipo de hormigón

Parte de la hipótesis de este estudio es que de los dos componentes principales se destaca al hormigón como el de mayor importancia. Se utilizará dos tipos de hormigón de acuerdo a sus especificaciones por resistencia a compresión. De acuerdo a las especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes, desarrolladas por el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador (2002), las características de un hormigón en base a su resistencia a compresión y su aplicación se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Clases y usos de hormigón según su resistencia a compresión

Tipo de hormigón	Resist. Especif. a Compresión f'c Mpa	Uso General
Estructural	Entre 21 y 28	Losas, vigas, viguetas, columnas, nervaduras de acero, alcantarillas de cajón, estribos, muros, zapatas armadas.
No Estructural	Entre 14 y 18	Zapatas sin armar, replantillos, bordillos, contrapisos.

De acuerdo a la empresa SOLING Cía. Ltda. y su experiencia con hormigones y su aplicación vial, y por las aplicaciones que se planea dar al material como muros o bordillos, y se considera estudiar hormigones con resistencia a compresión de 210 kg/cm² y de 180 kg/cm². De entrada se puede asumir que dicho factor podría ser significativo dado que su resistencia a compresión especificada es diferente, sin embargo, se lo considerará como un factor a estudiar para determinar la significancia de su interacción con los otros factores del experimento.

SOLING Cía. Ltda. en base a su experiencia, fórmula dosificaciones con un 20% de margen de seguridad respecto a resistencia a compresión, por lo tanto, dado que el experimento plantea analizar hormigones de 210 kg/cm² y de 180 kg/cm² la verdadera resistencia a compresión de las dosificaciones calculadas para un hormigón con dichas aplicaciones serán de 252 kg/cm² y de 216 kg/cm² respectivamente.

3.2.2. *Volumen de caucho*

En un estudio previo por A.K. Abdel-Gawad. (2010), se menciona que en futuros estudios se debe tomar en cuenta la variación de volumen de caucho entre el 10% y 25%, valores que serán tomados en cuenta para el estudio a realizar. Sin embargo, por el estudio realizado por W. Yung, L. Yung, y L. Hua (2013) y su resultado a los 91 días de la resistencia a compresión de hormigón con partículas de caucho filtradas por un tamiz #50 y en reemplazo de 5% de agregado fino, además de pruebas piloto realizadas en SOLING Cía. Ltda., los niveles de este factor serán de 5% a 15%.

3.2.3. *Tipo de partícula de caucho*

El caucho a utilizar en este estudio pertenece a llantas usadas de automóviles, las cuales deben pasar por un proceso que las muela entorno a las especificaciones requeridas. Los estudios previos mostraron que mientras más grande es la partícula de caucho, menor será la resistencia a compresión. Esta idea surge del estudio realizado por Yung, W., Yung, L., & Hua, L. (2013), en el cual su tipo de caucho varió entre los tamices #30 y #50 de 0.6mm y 0.3mm respectivamente. Los tamaños de las partículas de caucho serán de un rango amplio que permita observar de mejor

manera su comportamiento. Para este experimento, se decide mantener un caucho con dimensiones pequeñas, por lo cual, los niveles de este factor se definirán por grupos denominados Grueso ($>1.18\text{mm}$, $<2\text{mm}$) y Fino ($<0.850\text{mm}$).

3.2.4. Curado

Tanto en estudios previos como el realizado por Garín, L., Santilli, A. & Pejoja, E. (2012) como en manuales como el de Pepe Hormigón, se concluye que el curado es significativo en la resistencia a compresión del hormigón. Sin embargo, para este estudio se vuelve a considerar este factor para analizar el nivel de significancia que tendrá en la variable de respuesta una vez que se haya fusionado hormigón con caucho. SOLING Cía. Ltda. destaca que se debe considerar que el curado del hormigón en un laboratorio es muy diferente al curado del hormigón en obra por el volumen de hormigón con el cual se trabaja. Además, al introducir caucho se desconoce la interacción del curado en el mismo y la afectación que tiene en base a resistencia a compresión. Los niveles de este factor serán de 28 días sin curado a 28 días de curado dado que, en teoría, el hormigón alcanza su resistencia máxima al transcurrir ese periodo. (Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Concreto & Asociación de Productores de Hormigón Premezclado del Ecuador, 2007)

3.3. Medición de la variable de respuesta (ASTM C39)

El objetivo de utilización de este estándar es minimizar la variabilidad que puede existir en las pruebas por distintos factores perturbadores. El método de prueba consiste en aplicar una carga de compresión axial, a una velocidad determinada dentro de un rango, hasta que ocurra una falla en el cilindro de hormigón. La resistencia a compresión se calcula al dividir la carga máxima alcanzada durante la prueba, por el área de sección transversal del cilindro. (ASTM International, 2012)

Se debe tener cuidado con la interpretación de los resultados dado que la resistencia a compresión dependerá de varios factores propios y ajenos al hormigón en sí. Los resultados de este método de prueba se utilizarán como una base para la determinación de varios aspectos de la calidad del hormigón como su dosificación. (ASTM International, 2012) Sin embargo, se estudiará ciertos hormigones con características definidas y se los tomará como factores independientes, por lo cual las conclusiones del estudio se basarán en la significancia de los factores a utilizar y su interacción.

Las medidas de los cilindros de hormigón serán de 40mm de diámetro y 80mm de alto. Después del moldeo en las probetas, las muestras reposarán por 24 horas a temperaturas entre 16 a 27 grados centígrados. Posteriormente, entre las 24 y 48 horas de la fabricación de los cilindros, se desmoldarán y se colocarán en agua saturada con cal a 23 grados centígrados con error tolerable de

2 grados centígrados. Los cilindros no deben ser probados si existe un error mayor al 2% respecto al diámetro establecido. La relación de carga aplicada por la máquina será de 0.25 ± 0.05 Megapascales por segundo y se mantendrá constante. Todos los cilindros serán ensayados al cumplirse 28 días de su fabricación mientras estén húmedos aquellos que fueron curados. (ASTM International, (2012), Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Concreto & Asociación de Productores de Hormigón Premezclado del Ecuador, (2007))

3.4. Diseño de Mezclas para experimento de optimización

La optimización de procesos analíticos se lleva a cabo mediante la aplicación de Metodologías de Superficie de Respuesta o *Response Surface Methodology* (RSM). El objetivo de estas metodologías es optimizar los niveles de los factores estudiados para obtener el mejor rendimiento del sistema. (Bezerra et al., 2008) Las RSM pueden definirse como “un grupo de métodos estadísticos y matemáticos basados en el ajuste de modelos empíricos a datos experimentales obtenidos en relación a un diseño experimental” (Bezerra et al., 2008)

Dentro de estas Metodologías de Superficie de Respuesta se encuentran los Experimentos con Mezclas a los cuales se los define como un tipo de experimento especial de superficie de respuesta en los cuales los ingredientes o componentes de la mezcla son los factores y la variable de respuesta es una función de la proporción de los factores. (Myers et al., 2016)

Cuando existe la presencia de restricciones de componentes en límites tanto inferiores como superiores, utilizan modelos computacionales para estimar la variable de respuesta dentro de la región de solución. Generalmente, los modelos más utilizados son los D-Optimal e I-Optimal Designs, pero para este experimento y su aplicabilidad, se escoge un modelo computacional I-Optimal Design dado que minimiza la varianza promedio entre las respuestas de una región de experimentación específica. (Jeraini et al., 2012)

El objetivo de este experimento es construir un modelo de regresión de acuerdo a la resistencia a compresión del material, para calcular de acuerdo a los requerimientos de la empresa las combinaciones ideales de los diseños de hormigón a utilizar, todo de acuerdo a proporciones.

4. Experimento de Viabilidad

El objetivo principal de este experimento en específico es determinar la influencia del caucho y la presencia de interacciones del mismo en dos diferentes diseños de hormigón con aplicaciones particulares. La empresa SOLING Cía. Ltda. desarrolló las dosificaciones de hormigón para que cumplan con los requisitos de aplicación de 180 kg/cm² y 210 kg/cm². Cabe destacar que se aplica el concepto de dar una seguridad de 20% al diseño, por lo cual los diseños son para 216 kg/cm² y 252 kg/cm² respectivamente; además, está presente la corrección por la absorción de agua particular de cada agregado.

4.1. Desarrollo de dosificaciones por metro cúbico hormigón

En esta sección se presentan las dosificaciones de hormigón para un metro cúbico en conjunto con un gráfico que muestra las proporciones del peso de cada componente respecto al peso total del metro cúbico.

Tabla 3: Diseño 216 kg/cm² para 1 metro cúbico

Componente	Peso en gramos
Agua	211.686,6
Cemento	240.000
Agregado Grueso	924.584,4
Arena San Antonio	662.710,3
Arena Pifo	284.018,7
Aditivo VF-55	1.680
Aditivo TM-42	480
TOTAL	2.323.000

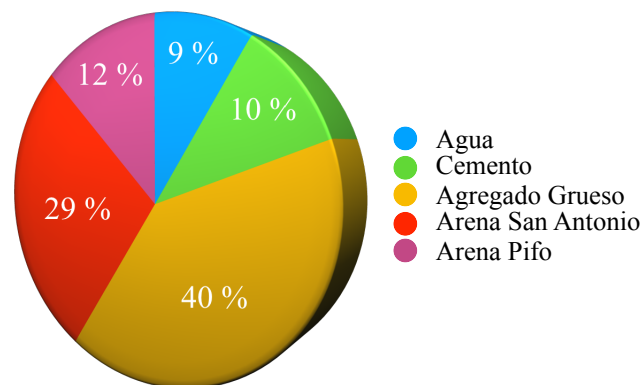
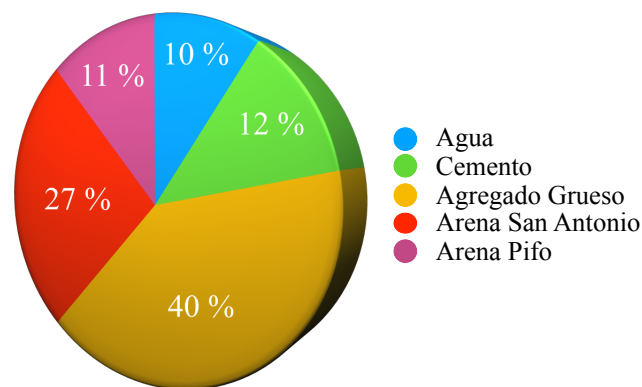


Figura 1: Proporción por peso del diseño 216 kg/cm² para 1 metro cúbico

Tabla 4: Diseño 252 kg/cm² para 1 metro cúbico

Componente	Peso en gramos
Agua	225.742,6
Cemento	275.000
Agregado Grueso	924.584,4
Arena San Antonio	613.671,1
Arena Pifo	263.001,9
Aditivo VF-55	1.510
Aditivo TM-42	550
TOTAL	2.302.000

**Figura 2:** Proporción por peso del diseño 252 kg/cm² para 1 metro cúbico

4.2. Desarrollo de dosificaciones por cilindro hormigón

Por las características de los agregados se decide utilizar cilindros con dimensión de 4 pulgadas de diámetro y 8 pulgadas de alto. Se estiman sus dimensiones en centímetros para calcular el volumen del cilindro (mismo que cuenta con una seguridad de 10% para evitar una falta de material) y poder hacer una regla de tres con el objetivo de determinar la cantidad de cada componente por cilindro.

El objetivo de desarrollar el experimento cilindro por cilindro se lleva a cabo para minimizar la variabilidad y controlar de mejor manera la composición real del cilindro componente por componente. A continuación se presenta en la tabla 5 los cálculos realizados:

Tabla 5: Dimensiones de los cilindros

Radio en cm	Alto en cm	Vol. Cilindro en cm ³	Vol. Cilindro en m ³
5,08	20,32	1.812,15	0,00181215

Una vez calculado el volumen del cilindro en metros cúbicos, se procede a realizar la regla de tres para determinar el peso de cada componente en el cilindro, expresado en las tablas 6 y 7.

Tabla 6: Diseño 216 kg/cm² para un cilindro

Componente	Peso en gramos
Agua	383,61
Cemento	434,92
Agregado Grueso	1.675,48
Arena San Antonio	1.200,93
Arena Pifo	514,68
Aditivo VF-55	3,04
Aditivo TM-42	0,87
TOTAL	4.209,62

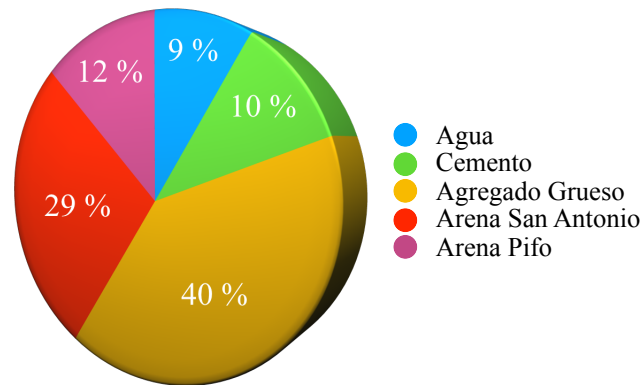


Figura 3: Proporción por peso del diseño 216 kg/cm² para 1 cilindro

Tabla 7: Diseño 252 kg/cm² para un cilindro

Componente	Peso en gramos
Agua	409,08
Cemento	498,34
Agregado Grueso	1.675,48
Arena San Antonio	1.112,06
Arena Pifo	476,60
Aditivo VF-55	2,74
Aditivo TM-42	1,00
TOTAL	4.209,62

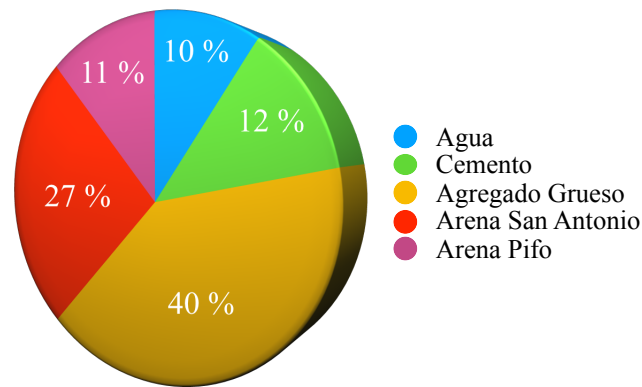


Figura 4: Proporción por peso del diseño 252 kg/cm² para 1 cilindro

Como se puede observar en las figuras 3 y 4, las proporciones de los componentes coinciden para cada dosificación de hormigón por metro cúbico, representadas en las figuras 1 y 2. Una vez establecidos los patrones de hormigón a utilizar, se procede con los siguientes pasos:

1. Análisis de la matriz de diseño.
2. Diseños de cilindros con adición de caucho en sustitución de proporción.
3. Diseño del experimento en Minitab.
4. Plan de fundición por orden de fundición por réplica.
5. Fundición de cilindros.
6. Rotura de cilindros.
7. Análisis de resultados.

4.3. Matriz de diseño

La matriz de diseño representa todas las posibles combinaciones entre los niveles de los factores. El símbolo (-) representa el nivel bajo del factor mientras que el símbolo (+) representa el nivel alto. Como lo establece Montgomery (2013), la matriz de diseño para un factorial de cuatro factores cada uno con dos niveles se muestra en la tabla 8. Al replicarse el modelo tres veces, la matriz de diseño aplicada al experimento de viabilidad se muestra en la tabla 9.

Tabla 8: Matriz de diseño factorial de cuatro factores con dos niveles

Corrida	Factor A	Factor B	Factor C	Factor D
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-

Corrida	Factor A	Factor B	Factor C	Factor D
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

Tabla 9: Matriz de diseño aplicada al experimento de viabilidad

	Corrida		Tipo de hormigón	Volumen de caucho	Tipo de caucho	Curado
1	17	33	-	-	-	-
2	18	34	+	-	-	-
3	19	35	-	+	-	-
4	20	36	+	+	-	-
5	21	37	-	-	+	-
6	22	38	+	-	+	-
7	23	39	-	+	+	-
8	24	40	+	+	+	-
9	25	41	-	-	-	+
10	26	42	+	-	-	+
11	27	43	-	+	-	+
12	28	44	+	+	-	+
13	29	45	-	-	+	+
14	30	46	+	-	+	+

	Corrida		Tipo de hormigón	Volumen de caucho	Tipo de caucho	Curado
15	31	47	-	+	+	+
16	32	48	+	+	+	+

Dada la matriz de experimento para el diseño factorial a aplicar, es importante tomar en cuenta que existen cilindros cuya composición será exactamente igual, a diferencia de si serán curados o no. Esos grupos de cilindros son los siguientes y se pueden observar resaltados en la tabla 10.

Tabla 10: Matriz de diseño aplicada con codificación por colores

	Corrida		Tipo de hormigón	Volumen de caucho	Tipo de caucho	Curado
1	17	33	-	-	-	-
2	18	34	+	-	-	-
3	19	35	-	+	-	-
4	20	36	+	+	-	-
5	21	37	-	-	+	-
6	22	38	+	-	+	-
7	23	39	-	+	+	-
8	24	40	+	+	+	-
9	25	41	-	-	-	+
10	26	42	+	-	-	+
11	27	43	-	+	-	+
12	28	44	+	+	-	+
13	29	45	-	-	+	+
14	30	46	+	-	+	+
15	31	47	-	+	+	+
16	32	48	+	+	+	+

Es por esa razón que para facilidad en la referencia de que tipo cilindro se debe fundir, se decide aplicar una codificación a cada pareja mencionada anteriormente dado que su fundición será exactamente igual en cuanto a proporción y peso de componentes. La codificación se muestra en la tabla 11.

Tabla 11: Matriz de diseño aplicada con codificación por colores y letras

	Corrida		Codificación	Curado
1	17	33	A	-
2	18	34	B	-
3	19	35	C	-
4	20	36	D	-
5	21	37	E	-
6	22	38	F	-
7	23	39	G	-
8	24	40	H	-
9	25	41	A	+
10	26	42	B	+
11	27	43	C	+
12	28	44	D	+
13	29	45	E	+
14	30	46	F	+
15	31	47	G	+
16	32	48	H	+

4.4. Diseños de cilindros con adición de caucho en sustitución de proporción

Una vez establecida la codificación, se procede a calcular el peso de cada componente en cada cilindro de acuerdo a las características propias de cada uno.

Para determinar el peso de un cilindro de caucho fino y otro de caucho grueso fue necesario hacer un análisis de pesos, que consiste en un promedio del peso de cada uno siendo el 100% de composición del cilindro. El peso de un cilindro cuya composición es 100% caucho fino fue de 690 gramos, mientras de caucho grueso fue de 745 gramos. Sin embargo, cabe recalcar que los diseños por cilindro de hormigón fueron con un 10% de seguridad en el peso de cada componente, por lo cual se realiza lo mismo con el caucho y se obtiene como resultado que un total de caucho fino pesa 759 gramos y un total de caucho grueso 819.5 gramos. Con los datos obtenidos, se puede determinar el peso de caucho de cada tipo que corresponderá a cada cilindro dependiendo de las características del mismo. La tabla 12 lo explica de una manera simple.

Tabla 12: Pesos de las proporciones de un cilindro de caucho según su tipo

Tipo de caucho	Peso en gramos 100% del cilindro	Peso en gramos 5% del cilindro	Peso en gramos 15% del cilindro
Grueso (1.18mm - 2mm)	819,5	40,975	122,925
Fino (< 0.85mm)	759	37,95	113,85

Una vez establecidos los pesos de caucho en la tabla anterior, se tomará como ejemplo a un cilindro tipo A para mostrar como se realizó la adición de caucho. En la tabla 13 se muestran las características de un cilindro tipo A.

Tabla 13: Características de un cilindro tipo A

Cilindro tipo A	Tipo de hormigón	Volumen de caucho	Tipo de caucho
Corridas 1, 9, 17, 25, 33 y 41	216	5 %	Fino

Por lo tanto, el diseño de hormigón a utilizar será el de 216 kg/cm² con la particularidad de diseñarlo para un 95% de su totalidad dado que el 5% restante debe ser caucho fino. Su dosificación se muestra en la tabla 14.

Tabla 14: Dosificación inicial de un cilindro tipo A

Cilindro tipo A	Peso en gramos sin caucho	Peso en gramos con caucho
Agua	383,61	364,43
Cemento	434,92	413,17
Agregado Grueso	1.675,48	1.591,71
Arena San Antonio	1.200,93	1.140,88
Arena Pifo	514,68	488,95
Aditivo VF-55	3,04	2,89
Aditivo TM-42	0,87	0,83
Caucho	0,00	37,95

Por solicitud de la gerencia de SOLING Cía. Ltda. se decide dar nuevamente un 5% de seguridad en cantidad de los componentes. Todas las dosificaciones finales se muestran a continuación:

Tabla 15: Dosificación de un cilindro tipo A

Cilindro tipo A	Peso en gramos sin caucho	Peso en gramos con caucho
Agua	383,61	382,65
Cemento	434,92	433,83
Agregado Grueso	1.675,48	1.671,30
Arena San Antonio	1.200,93	1.197,93
Arena Pifo	514,68	513,40
Aditivo VF-55	3,04	3,04
Aditivo TM-42	0,87	0,87
Caucho	0,00	39,85

Tabla 16: Dosificación de un cilindro tipo B

Cilindro tipo B	Peso en gramos sin caucho	Peso en gramos con caucho
Agua	409,08	408,06
Cemento	498,34	497,09
Agregado Grueso	1.675,48	1.671,30
Arena San Antonio	1.112,06	1.109,28
Arena Pifo	476,60	475,41
Aditivo VF-55	2,74	2,73
Aditivo TM-42	1,00	0,99
Caucho	0,00	39,85

Tabla 17: Dosificación de un cilindro tipo C

Cilindro tipo C	Peso en gramos sin caucho	Peso en gramos con caucho
Agua	383,61	342,37
Cemento	434,92	388,16
Agregado Grueso	1.675,48	1.495,37
Arena San Antonio	1.200,93	1.071,83
Arena Pifo	514,68	459,36
Aditivo VF-55	3,04	2,72
Aditivo TM-42	0,87	0,78
Caucho	0,00	119,54

Tabla 18: Dosificación de un cilindro tipo D

Cilindro tipo D	Peso en gramos sin caucho	Peso en gramos con caucho
Agua	409,08	365,10
Cemento	498,34	444,77
Agregado Grueso	1.675,48	1.495,37
Arena San Antonio	1.112,06	992,52
Arena Pifo	476,60	425,36
Aditivo VF-55	2,74	2,44
Aditivo TM-42	1,00	0,89
Caucho	0,00	119,54

Tabla 19: Dosificación de un cilindro tipo E

Cilindro tipo E	Peso en gramos sin caucho	Peso en gramos con caucho
Agua	383,61	382,65
Cemento	434,92	433,83
Agregado Grueso	1.675,48	1.671,30
Arena San Antonio	1.200,93	1.197,93
Arena Pifo	514,68	513,40
Aditivo VF-55	3,04	3,04
Aditivo TM-42	0,87	0,87
Caucho	0,00	43,02

Tabla 20: Dosificación de un cilindro tipo F

Cilindro tipo F	Peso en gramos sin caucho	Peso en gramos con caucho
Agua	409,08	408,06
Cemento	498,34	497,09
Agregado Grueso	1.675,48	1.671,30
Arena San Antonio	1.112,06	1.109,28
Arena Pifo	476,60	475,41
Aditivo VF-55	2,74	2,73
Aditivo TM-42	1,00	0,99
Caucho	0,00	43,02

Tabla 21: Dosificación de un cilindro tipo G

Cilindro tipo G	Peso en gramos sin caucho	Peso en gramos con caucho
Agua	383,61	342,37
Cemento	434,92	388,16
Agregado Grueso	1.675,48	1.495,37
Arena San Antonio	1.200,93	1.071,83
Arena Pifo	514,68	459,36
Aditivo VF-55	3,04	2,72
Aditivo TM-42	0,87	0,78
Caucho	0,00	129,07

Tabla 22: Dosificación de un cilindro tipo H

Cilindro tipo H	Peso en gramos sin caucho	Peso en gramos con caucho
Agua	409,08	365,10
Cemento	498,34	444,77
Agregado Grueso	1.675,48	1.495,37
Arena San Antonio	1.112,06	992,52
Arena Pifo	476,60	425,36
Aditivo VF-55	2,74	2,44
Aditivo TM-42	1,00	0,89
Caucho	0,00	129,07

4.5. Diseño del experimento en Minitab versión 17

En el software Minitab se modela el diseño factorial ²⁴. Los factores se definieron de la manera mostrada en la tabla 23. Se especifica el número de réplicas que son 3, el software da el output con el orden que se llevará a cabo el experimento. Este se muestra en la tabla 24. StdOrder se refiere a el orden estándar de corridas, como aquel mostrado anteriormente en la matriz de diseño. RunOrder es el orden en el cual se lleva a cabo los experimentos o corridas, para cumplir con la aleatoriedad que demanda el experimento. Blocks se refiere al número de bloque o réplica; en un diseño factorial es importante comprender que cada réplica se debe llevar a cabo bajo las mismas condiciones, por lo tanto, se observa que las corridas del bloque 1 son del StdOrder 1 a 16, bloque 2 StdOrder 17 a 32, y bloque 3 StdOrder 33 a 48.

Tabla 23: Codificación en software Minitab

Factor	Nivel bajo	Nivel alto	Factor codificado	Nivel bajo codificado	Nivel alto codificado
Tipo de hormigón	216 kg/cm ²	252 kg/cm ²	A	-1	1
Volumen de caucho	5 %	15 %	B	-1	1
Tipo de caucho	<1.18mm	1.18mm - 2mm	C	-1	1
Curado	Sin curar	Con curar	D	-1	1

Tabla 24: Corridas aleatorizadas propuestas por software Minitab

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Tipo de hormigón	Volumen de caucho	Tipo de caucho	Curado
11	1	1	1	-1	1	-1	1
12	2	1	1	1	1	-1	1
9	3	1	1	-1	-1	-1	1
8	4	1	1	1	1	1	-1
6	5	1	1	1	-1	1	-1
7	6	1	1	-1	1	1	-1
2	7	1	1	1	-1	-1	-1
15	8	1	1	-1	1	1	1
3	9	1	1	-1	1	-1	-1
16	10	1	1	1	1	1	1
4	11	1	1	1	1	-1	-1
1	12	1	1	-1	-1	-1	-1
5	13	1	1	-1	-1	1	-1
13	14	1	1	-1	-1	1	1
14	15	1	1	1	-1	1	1
10	16	1	1	1	-1	-1	1
21	17	1	2	-1	-1	1	-1
20	18	1	2	1	1	-1	-1
27	19	1	2	-1	1	-1	1
31	20	1	2	-1	1	1	1

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Tipo de hormigón	Volumen de caucho	Tipo de caucho	Curado
32	21	1	2	1	1	1	1
23	22	1	2	-1	1	1	-1
17	23	1	2	-1	-1	-1	-1
30	24	1	2	1	-1	1	1
26	25	1	2	1	-1	-1	1
22	26	1	2	1	-1	1	-1
29	27	1	2	-1	-1	1	1
18	28	1	2	1	-1	-1	-1
24	29	1	2	1	1	1	-1
19	30	1	2	-1	1	-1	-1
28	31	1	2	1	1	-1	1
25	32	1	2	-1	-1	-1	1
43	33	1	3	-1	1	-1	1
34	34	1	3	1	-1	-1	-1
38	35	1	3	1	-1	1	-1
41	36	1	3	-1	-1	-1	1
48	37	1	3	1	1	1	1
46	38	1	3	1	-1	1	1
47	39	1	3	-1	1	1	1
39	40	1	3	-1	1	1	-1
42	41	1	3	1	-1	-1	1
36	42	1	3	1	1	-1	-1
35	43	1	3	-1	1	-1	-1
40	44	1	3	1	1	1	-1
45	45	1	3	-1	-1	1	1
44	46	1	3	1	1	-1	1
33	47	1	3	-1	-1	-1	-1
37	48	1	3	-1	-1	1	-1

4.6. Plan de fundición por orden de fundición por réplica

Una vez establecido el modelo en Minitab, se debe tomar en cuenta los siguientes puntos sobre la fundición de los cilindros para mitigar cualquier tipo de variabilidad que pueda presentarse en el experimento. Los bloques se correrán en días distintos y estos se muestran en la tabla 25.

Cada bloque o réplica se correrá bajo las mismas condiciones y según su codificación:

- Hora del día.
- Moldes de cilindros.
- Metodología.
- Lugar de fundición.
- Lugar de curado.
- Instrumentos o herramientas.
- Maquinaria.
- Laboratoristas.

Tabla 25: Bloques de corridas con codificación por letras

Día	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Cilindro	Curado
Día 1	11	1	1	1	C	1
Día 1	12	2	1	1	D	1
Día 1	9	3	1	1	A	1
Día 1	8	4	1	1	I	-1
Día 1	6	5	1	1	F	-1
Día 1	7	6	1	1	H	-1
Día 1	2	7	1	1	B	-1
Día 1	15	8	1	1	G	1
Día 1	3	9	1	1	C	-1
Día 1	16	10	1	1	H	1
Día 1	4	11	1	1	D	-1
Día 1	1	12	1	1	A	-1
Día 1	5	13	1	1	E	-1
Día 1	13	14	1	1	E	1

Día	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Cilindro	Curado
Día 1	14	15	1	1	F	1
Día 1	10	16	1	1	B	1
Día 2	21	17	1	2	E	-1
Día 2	20	18	1	2	D	-1
Día 2	27	19	1	2	C	1
Día 2	31	20	1	2	G	1
Día 2	32	21	1	2	H	1
Día 2	23	22	1	2	G	-1
Día 2	17	23	1	2	A	-1
Día 2	30	24	1	2	F	1
Día 2	26	25	1	2	B	1
Día 2	22	26	1	2	F	-1
Día 2	29	27	1	2	E	1
Día 2	18	28	1	2	B	-1
Día 2	24	29	1	2	H	-1
Día 2	19	30	1	2	C	-1
Día 2	28	31	1	2	D	1
Día 2	25	32	1	2	A	1
Día 3	43	33	1	3	C	1
Día 3	34	34	1	3	B	-1
Día 3	38	35	1	3	F	-1
Día 3	41	36	1	3	A	1
Día 3	48	37	1	3	H	1
Día 3	46	38	1	3	F	1
Día 3	47	39	1	3	G	1
Día 3	39	40	1	3	G	-1
Día 3	42	41	1	3	B	1
Día 3	36	42	1	3	D	-1
Día 3	35	43	1	3	C	-1
Día 3	40	44	1	3	H	-1
Día 3	45	45	1	3	E	1

Día	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Cilindro	Curado
Día 3	44	46	1	3	D	1
Día 3	33	47	1	3	A	-1
Día 3	37	48	1	3	E	-1

4.7. Fundición y rotura de cilindros

Las fundiciones de los cilindros se llevaron a cabo los días 15, 20 y 21 de junio a las 11 de la mañana para los bloques 1, 2 y 3 respectivamente. Su desmoldado se realizó 24 horas después de su fundición, los que debían ser curados fueron introducidos en la piscina mientras que los que no debían ser curados permanecieron al aire libre en una zona sin riesgo de lluvia. La rotura de los cilindros se llevó a cabo 28 días después de su fundición, por lo cual se la realizó los días 13, 18 y 19 de julio.

El orden de desmoldado y de rotura de los cilindros es igual al orden de fundición, con el objetivo de mantener la aleatoriedad del experimento.

4.8. Análisis de resultados

Todos los resultados fueron obtenidos mediante el software Minitab versión 17.

Antes de sacar conclusiones del experimento es imprescindible determinar su validez, por lo tanto, a continuación se presenta la figura 5 de Residual Plots for Resistencia a compresión que tiene que ver con el cumplimiento de supuestos de un análisis de varianza para que sus resultados sean validos. Los supuestos son los siguientes:

A. Datos normales

El Normal Probability Plot y el Histograma muestran la tendencia de los datos a seguir una distribución normal, por lo tanto se cumple el primer supuesto.

B. Igualdad de Varianzas

El Versus Fits nos muestra que no existe un patrón o simetría entre los residuales, por lo tanto, se cumple el segundo supuesto.

C. Independencia de Datos

El Versus Order nos muestra que no existe un patrón o tendencia entre los residuales, lo que determina que no existe dependencia de una respuesta respecto a la anterior y se cumple el tercer supuesto.

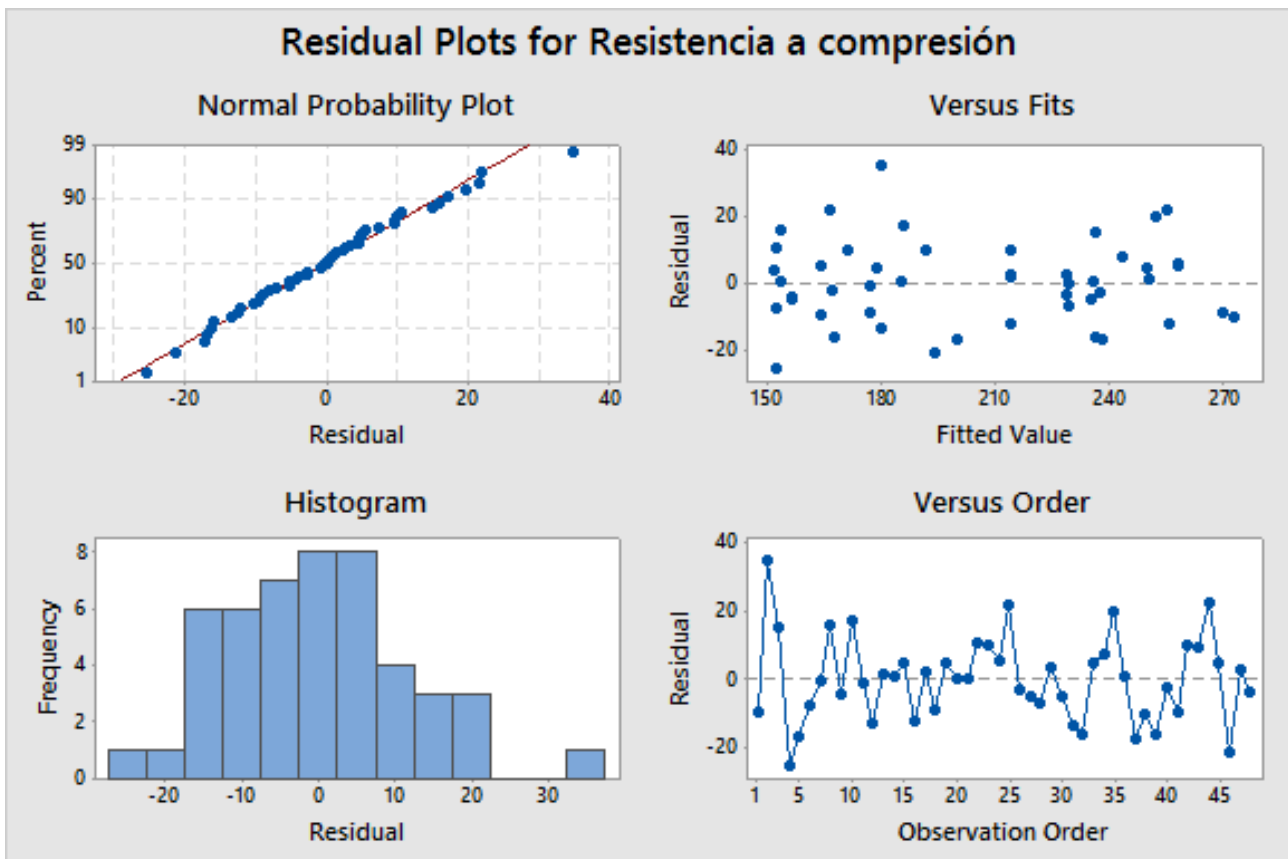


Figura 5: Residual Plots for Resistencia a compresión

Algo importante a destacar en la gráfica es la presencia de un outlier. Por experiencia previa en las roturas de cilindros de hormigón dependiendo de su resistencia a compresión, existen casos puntuales en los cuales se dispara su resistencia ya sea por uno o varios factores ajenos al experimento. En este caso, al analizar el experimento con los laboratoristas y la gerencia de SOLING Cía. Ltda. y al determinar que no existen casos similares con ninguna réplica de este punto, se decide tomar en cuenta este outlier para los análisis respectivos y validar el cumplimiento de los supuestos.

Dado que se cumplen los supuestos, se puede concluir que el análisis de varianza es una herramienta ideal para sacar conclusiones respecto al experimento.

También, algo muy importante a analizar es el resumen del modelo (Model Summary) mostrado en la figura 6 en el cual se presenta un R-cuadrado ajustado del 85.50%, un excelente valor si se toma en cuenta la variabilidad potencial que tienen este tipo de pruebas. El R-sq(adj) muestra que tanto se ajustan o se explican tus factores de acuerdo al modelo planteado. Por lo tanto, el modelo se ajusta a la ecuación de regresión resultante del mismo, lo que valida nuevamente el análisis del output de Minitab respecto a la significancia de los factores estudiados y sus interacciones.

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
15,5260	90,74%	85,50%	76,30%

Figura 6: Model Summary

Lo que podemos observar en la figura 7 es el análisis de varianza correspondiente al diseño factorial utilizado en el experimento. Existen varios puntos importantes a analizar:

- A. Los valores P (P-Value) son aquellos que determinan la significancia de cada término en el modelo en base al criterio de rechazo respecto al alfa. El alfa utilizado fue de 0.05.
 $P - Value \leq \alpha$, el término en el modelo es significativo
 $P - Value > \alpha$, el término en el modelo no es significativo
- B. El tipo de hormigón, el volumen de caucho y el curado son términos significativos en el modelo, es decir, que son significativos en la variable de respuesta.
- C. El término de los bloques es significativo, por lo cual se puede concluir que existen factores ajenos al experimento que tienen una incidencia en la variable de respuesta. Estos pueden ser clima, humedad, etc.
- D. Ninguna interacción es significativa en base al criterio de rechazo, por lo cual se puede analizar la significancia de los factores de manera independiente.
- E. El componente del error en la suma de cuadrados (Adj SS) es bastante bajo respecto al total, por lo que se puede concluir que la variabilidad fue bastante controlada.

Lo que podemos observar en la figura 8 de Pareto Chart of the Standardized Effects es la contribución de cada término del modelo a la variable de respuesta. Aquí podemos observar que tanto afectan o contribuyen cada término (significativo o no) a la variable de respuesta, concluyendo que en este experimento el factor B (Volumen de caucho) tiene la mayor contribución, seguido del factor A (Tipo de hormigón), y el factor D (Curado). El resto de términos del modelo como el factor C (Tipo de caucho) y las interacciones no contribuyen a la variable de respuesta, relacionados directamente a la conclusión sobre su significancia al analizar el análisis de varianza.

Factorial Regression: Resistencia versus Blocks. Tipo de horm. Volumen de c. ...

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Model	17	70886,2	4169,8	17,30
Blocks	2	2232,3	1116,2	4,63
Linear	4	66730,2	16682,5	69,21
Tipo de hormigón	1	4171,0	4171,0	17,30
Volumen de caucho	1	58991,0	58991,0	244,72
Tipo de caucho	1	105,2	105,2	0,44
Curado	1	3463,0	3463,0	14,37
2-Way Interactions	6	1044,7	174,1	0,72
Tipo de hormigón*Volumen de caucho	1	32,4	32,4	0,13
Tipo de hormigón*Tipo de caucho	1	10,8	10,8	0,04
Tipo de hormigón*Curado	1	181,3	181,3	0,75
Volumen de caucho*Tipo de caucho	1	375,9	375,9	1,56
Volumen de caucho*Curado	1	388,6	388,6	1,61
Tipo de caucho*Curado	1	55,7	55,7	0,23
3-Way Interactions	4	538,2	134,6	0,56
Tipo de hormigón*Volumen de caucho*Tipo de caucho	1	52,1	52,1	0,22
Tipo de hormigón*Volumen de caucho*Curado	1	113,0	113,0	0,47
Tipo de hormigón*Tipo de caucho*Curado	1	194,7	194,7	0,81
Volumen de caucho*Tipo de caucho*Curado	1	178,4	178,4	0,74
4-Way Interactions	1	340,7	340,7	1,41
Tipo de hormigón*Volumen de caucho*Tipo de caucho*Curado	1	340,7	340,7	1,41
Error	30	7231,7	241,1	
Total	47	78117,8		

Source	P-Value
Model	0,000
Blocks	0,018
Linear	0,000
Tipo de hormigón	0,000
Volumen de caucho	0,000
Tipo de caucho	0,514
Curado	0,001
2-Way Interactions	0,635
Tipo de hormigón*Volumen de caucho	0,716
Tipo de hormigón*Tipo de caucho	0,834
Tipo de hormigón*Curado	0,393
Volumen de caucho*Tipo de caucho	0,221
Volumen de caucho*Curado	0,214
Tipo de caucho*Curado	0,634
3-Way Interactions	0,695
Tipo de hormigón*Volumen de caucho*Tipo de caucho	0,645
Tipo de hormigón*Volumen de caucho*Curado	0,499
Tipo de hormigón*Tipo de caucho*Curado	0,376
Volumen de caucho*Tipo de caucho*Curado	0,396
4-Way Interactions	0,244
Tipo de hormigón*Volumen de caucho*Tipo de caucho*Curado	0,244

Figura 7: Análisis de varianza

El Interaction Plot for Resistencia a compresión mostrado en la figura 9 muestra las interacciones entre dos factores. Para que exista una interacción entre dos factores es necesario que las rectas se crucen entre sí, y dado que dentro de la región experimental no se presenta ningún caso, se ratifica la ausencia de interacciones. Esto permite analizar a cada factor de manera independiente por lo cual se analizarán los Cube Plot y el Main Effects Plot for Resistencia a compresión mostrados en las figuras 10 y 11.

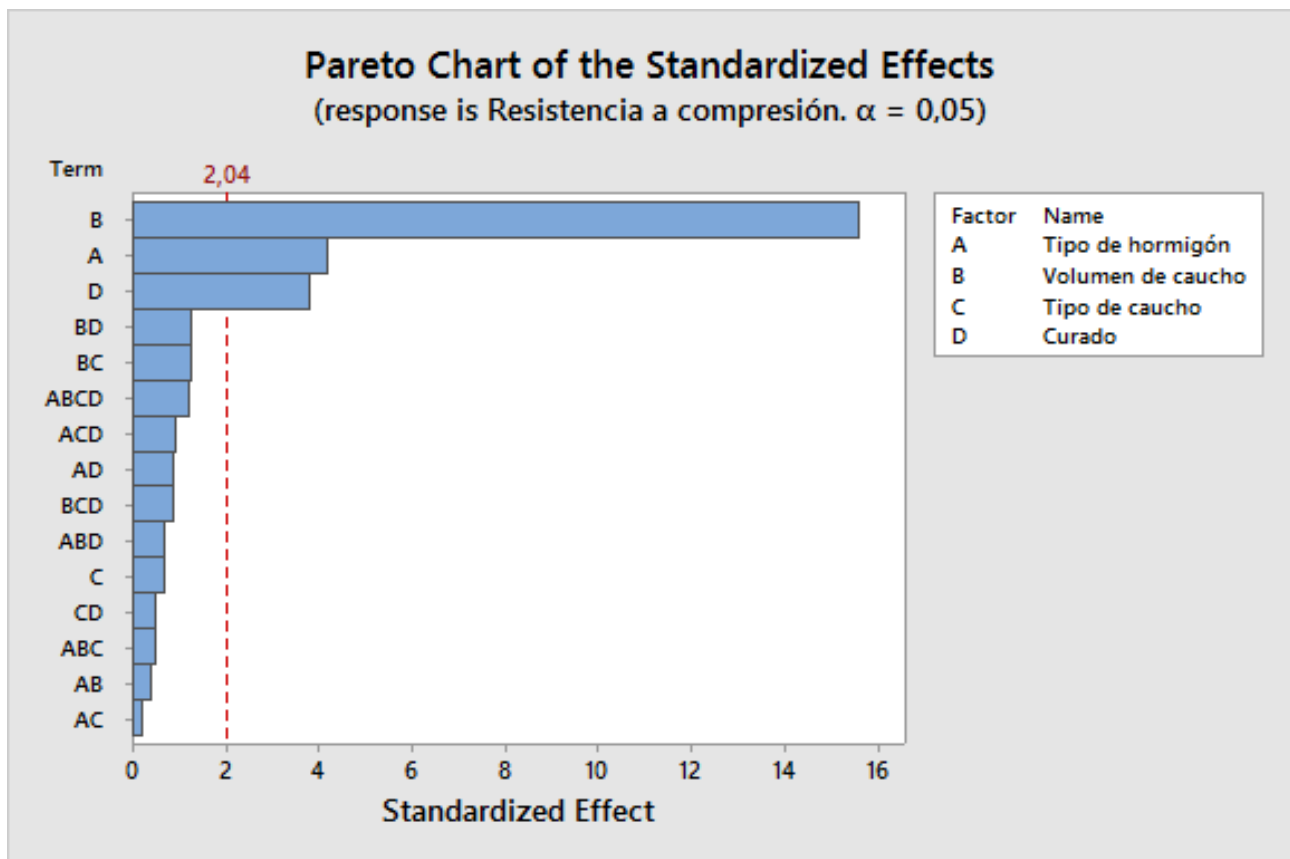


Figura 8: Pareto Chart of the Standardized Effects

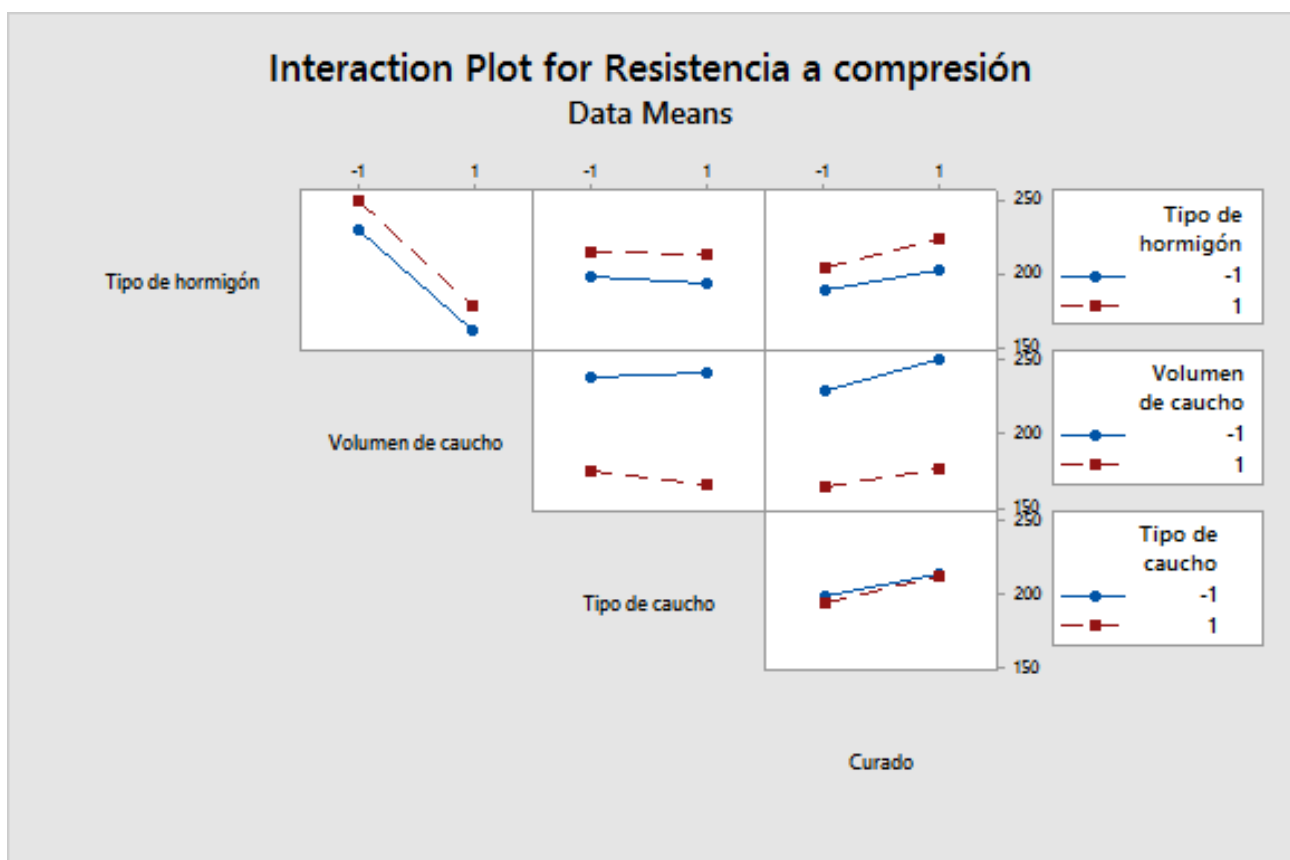


Figura 9: Interaction Plot for Resistencia a compresión

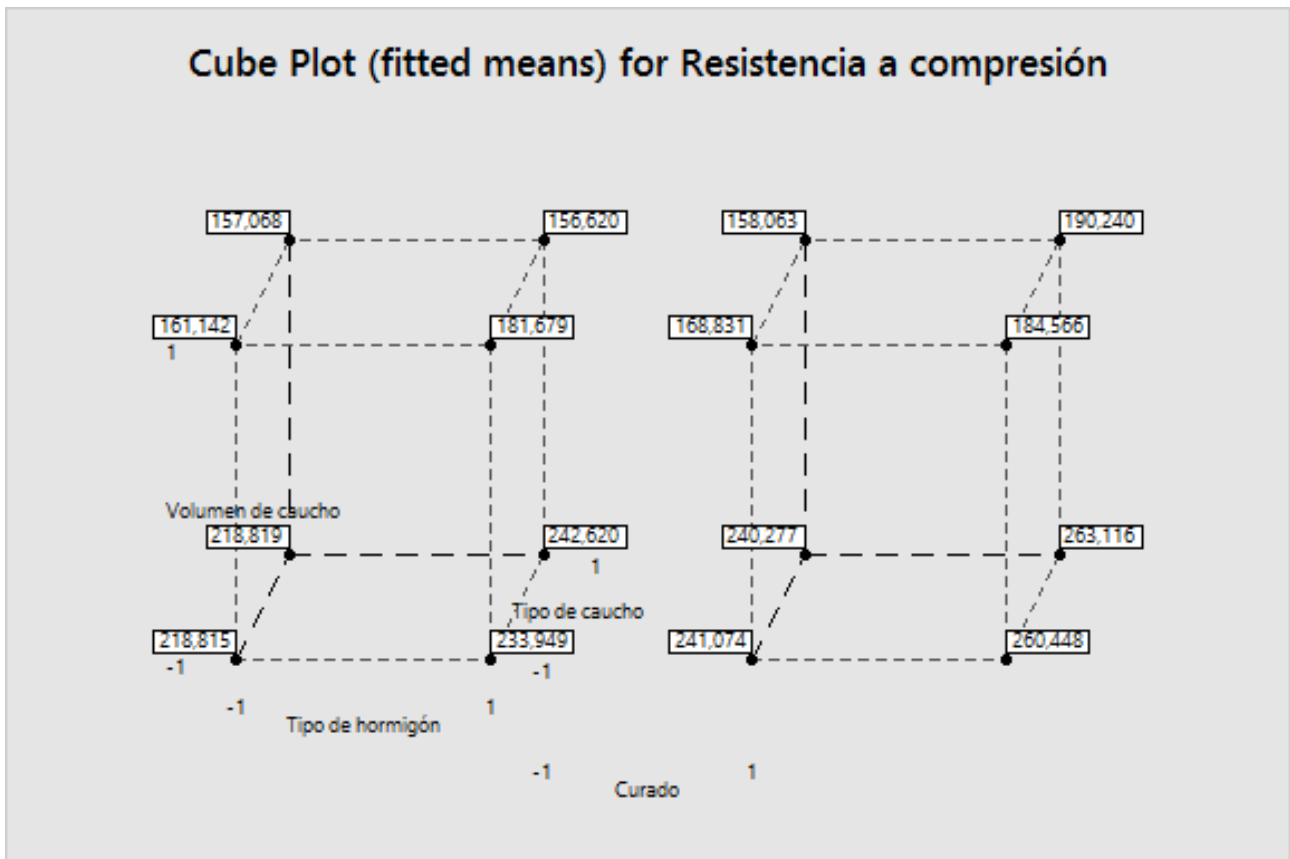


Figura 10: Cube Plot for Resistencia a compresión

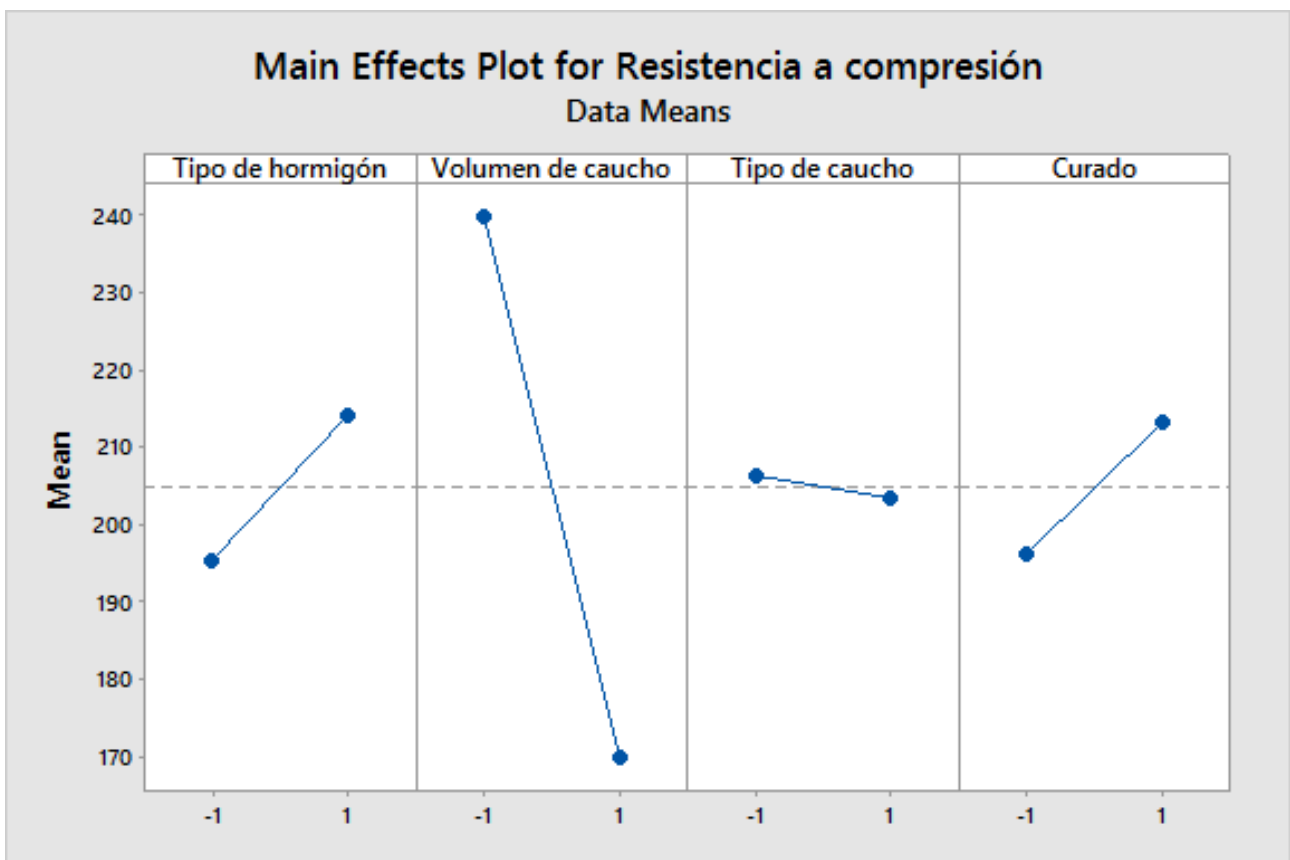


Figura 11: Main Effects Plot for Resistencia a compresión

El Cube Plot y el Main Effects Plot for Resistencia a compresión tienen el objetivo de mostrar la viabilidad de introducir caucho en hormigón no estructural dado que muestra las medias para cada factor en cada nivel y para cada posible combinación de hormigón - caucho. En el Cube Plot mostrado en la figura 10 se observa la media estimada para cada combinación de factores, que varían entre 263 kg/cm² y 156 kg/cm². El Main Effects Plot muestra la variación de la resistencia a compresión para cada nivel de los factores. Como se puede observar, el factor C (Tipo de Caucho) no presenta una pendiente pronunciada por lo cual se ratifica nuevamente que este factor no es significativo.

5. Experimento de Optimización

5.1. Componentes, proporciones y zona de experimentación

Al analizar hormigones de características no estructurales, se aplica una relación agua/cemento de 0.65 para todo el estudio como requerimiento de SOLING Cía. Ltda.. Además, el estudio plantea analizar una varianza en proporción del cemento desde 4 sacos de cemento a 6 sacos de cemento manteniendo la misma relación. Por lo tanto, agua y cemento se tomarán como un solo componente al mantener constante la relación agua/cemento en la mezcla. A continuación se presentan las proporciones respectivas en la tabla 26.

Tabla 26: Proporción en volumen de agua y cemento en total del cilindro

Sacos de Cemento	Cemento en gramos	Relación a/c	Agua en gramos	dm ³ de Cemento	dm ³ de Agua	% Volumen
4	200.000	0,650	130.000	66,89	130	20 %
6	300.000	0,650	195.000	100,33	195	30 %

Una vez definidas las proporciones, es importante definir la proporción independiente de agua y de cemento como se muestra en la tabla 27.

Tabla 27: Proporción en volumen de agua y cemento según sacos de cemento

Sacos de cemento	Total agua y cemento en dm ³	Cemento en dm ³	Agua en dm ³	Proporción Cemento	Proporción Agua
4	196,89	66,89	130	33,97 %	66,03 %
6	295,33	100,33	195	33,97 %	66,03 %

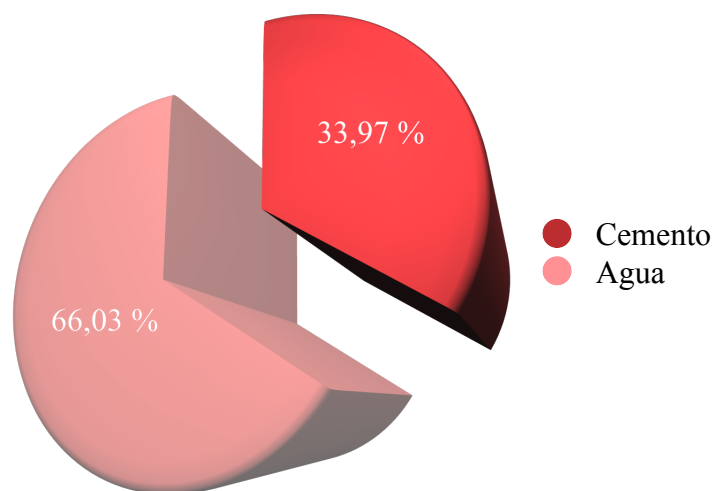


Figura 12: Proporción en volumen de agua y cemento según sacos de cemento

En base a lo establecido por Neville (2012), la resistencia a compresión tiene mejores resultados cuando la presencia de los agregados en la mezcla varía entre 40 y 80%. Como los agregados se componen tanto de agregados gruesos y finos, la sub-composición de los mismos se basará en concordancia con su granulometría analizada por SOLING Cía. Ltda. Esta composición se muestra en la tabla 28.

Tabla 28: Composición y sub-composición de agregados

Agregado	Composición Agregado	Arena	Composición Arena
Fino	50 %	Arena San Antonino	70 %
		Arena Pifo	30 %
Grueso	50 %		

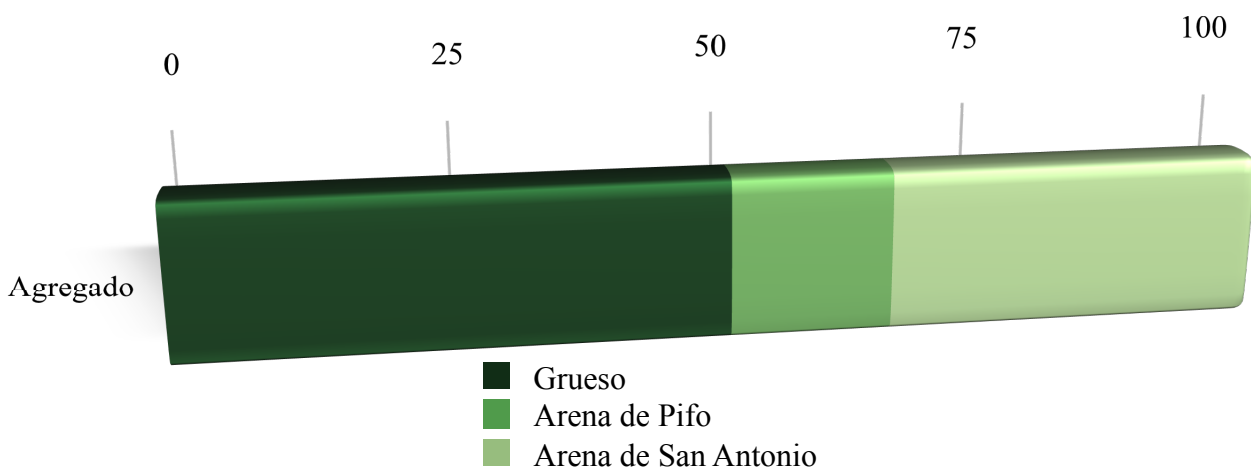


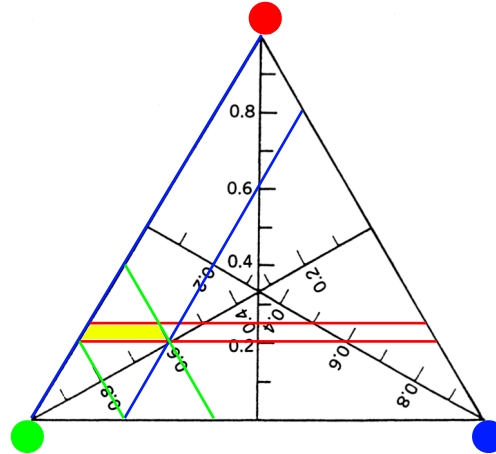
Figura 13: Composición y sub-composición de agregados

Tomando en cuenta las conclusiones del experimento de viabilidad, se decide definir las proporciones del componente principal del estudio que es el caucho de llanta usada en 0 y 20%. El principal objetivo es analizar estadísticamente mediante modelos de regresión lo que sucede con las proporciones en la ausencia y maximización.

La zona de experimentación se definirá por los límites establecidos anteriormente y que se muestran en la tabla 29. Es importante considerar que al enfocarse en un hormigón no estructural, SOLING Cía. Ltda. requerirá una presencia de agregados del 60 al 80%. La zona de experimentación se muestra en la figura 14. El componente agua y cemento se muestra delimitado por barras de color rojo, el componente de agregado por barras de color verde, y el componente de caucho por barras de color azul. Como resultado, la zona de experimentación se resalta en color amarillo.

Tabla 29: Restricciones de componentes

Componente	Mínimo	Máximo
Agua y Cemento	20 %	30 %
Agregado	60 %	80 %
Caucho	0 %	20 %

**Figura 14:** Zona de experimentación

5.2. Modelado de Experimento en software Design Expert versión 10

Para modelar el experimento se siguió la guía incorporada por el mismo en la cual destacaban los siguientes pasos:

1. Selección de experimento.
2. Selección de tipo de experimento.
3. Selección de número de factores.
4. Configuración de las proporciones de los componentes del experimento y la restricción del total.
5. Selección de puntos de mezcla.
6. Configuración de variables de respuesta.
7. Cálculo de corridas.

Los modelos de regresión son modelos de Scheffé. Estos se obtienen del libro *Response Surface Methodology* de Myers et al. (2016) donde $E(y)$ es la variable de respuesta, en este caso la resistencia a compresión, los coeficientes beta muestran la respuesta esperada para la mezcla, y las x

representan los componentes de la mezcla que en este experimento serán agua y cemento, agregado, y caucho. Los modelos son presentados a continuación:

1. Lineal:

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i$$

Figura 15: Modelo de regresión lineal

2. Cuadrático:

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j=2}^q \sum \beta_{ij} x_i x_j$$

Figura 16: Modelo de regresión cuadrático

3. Cúbico:

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j=2}^q \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j=2}^q \sum \delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) \\ + \sum_{i<j<k=3}^q \sum \sum \beta_{ijk} x_i x_j x_k$$

Figura 17: Modelo de regresión cúbico

4. Cúbico Especial:

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j=2}^q \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j<k=3}^q \sum \sum \beta_{ijk} x_i x_j x_k$$

Figura 18: Modelo de regresión cúbico especial

Al ingresar el número de factores al software, este recomienda un modelo matemático Cúbico Especial con 17 corridas. Sin embargo, conforme se ajusten los datos a los modelos antes mencionados se seleccionará el modelo que se ajuste de una mejor manera siguiendo los criterios de falta de ajuste y R-cuadrado Predictivo. Mientras más se aproximen a 1, mejor será el ajuste. (Montgomery (2013), Myers et al. (2016))

Para minimizar el error estándar se tomó la decisión de aumentar réplicas, aumento de puntos centrales, y aumento de puntos del modelo para un total de 32 corridas. Es necesario recalcar que en

SOLING Cía. Ltda. hay una disponibilidad máxima de 24 cilindros, por lo cual, se programó el experimento para correr en dos bloques de 16 corridas cada uno.

5.3. Matriz de diseño

Tabla 30: Matriz de diseño para I-Optimal Design

Corrida	Agua/Cemento	Agregado	Caucho
1	30 %	60 %	10 %
2	20 %	69,51 %	10,49 %
3	30 %	64,29 %	5,71 %
4	20 %	69,51 %	10,49 %
5	20 %	64,31 %	15,69 %
6	20 %	80 %	0 %
7	23,67 %	64,52 %	11,81 %
8	30 %	64,29 %	5,71 %
9	25,1 %	74,9 %	0 %
10	25 %	67,5 %	7,5 %
11	23,3 %	60 %	16,7 %
12	30 %	60 %	10 %
13	25,1 %	74,9 %	0 %
14	25 %	67,5 %	7,5 %
15	25,45 %	71,02 %	3,53 %
16	25,1 %	74,9 %	0 %
17	25 %	67,5 %	7,5 %
18	25 %	67,5 %	7,5 %
19	30 %	70 %	0 %
20	30 %	70 %	0 %
21	20 %	80 %	0 %
22	21,21 %	76,21 %	2,58 %
23	20 %	70,1 %	9,9 %
24	21,1 %	72,83 %	6,07 %
25	25,22 %	60 %	14,78 %
26	20 %	60 %	20 %

Corrida	Agua/Cemento	Agregado	Caucho
27	25,22 %	60 %	14,78 %
28	20 %	60 %	20 %
29	25 %	67,5 %	7,5 %
30	20 %	60 %	20 %
31	25 %	67,5 %	7,5 %
32	20 %	80 %	0 %

5.4. Diseño de cilindros

Es importante analizar las características de todos los componentes que conforman el material que se va a analizar, sin embargo, dado que es un experimento que se basa en las proporciones de los componentes, SOLING Cía. Ltda. calculó el peso de un metro cúbico de cada componente para reducirlo a la proporción especificada en cada combinación de la matriz de diseño.

Cabe destacar que, al igual que en el experimento de viabilidad, los cilindros cuentan con una seguridad que en este caso será del 15% y el cálculo se muestra en la tabla 31.

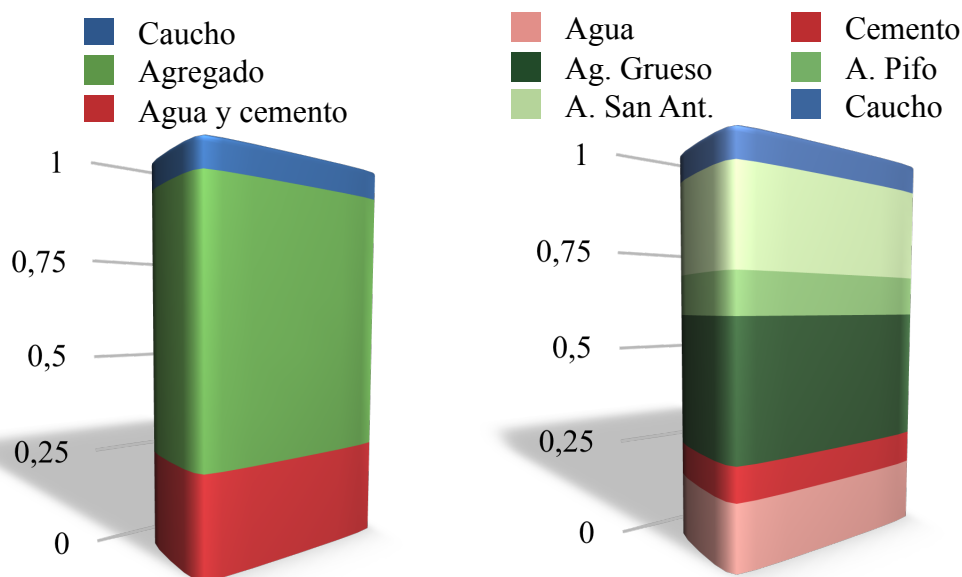
Tabla 31: Peso de un metro cúbico de cada componente o sub-componente

Componente	Peso en kilogramos metro cúbico completo	Peso en gramos metro cúbico completo	Peso en gramos de cilindro completo	Peso en gramos de cilindro completo + 15% de seguridad
Cemento	2.990,11	2.990.105,47	4.925,93	5.664,82
Agua	1.000	1.000.000,00	1.647,41	1.894,52
Ag Fino	2.596,99	2.596.990,83	4.278,31	4.920,05
Ag Grueso	2.624,00	2.624.003,54	4.322,81	4.971,23
Caucho	495,32	495.322,96	816,00	938,40

Una vez establecidos los pesos en la tabla anterior, se tomará como ejemplo a un cilindro del punto central para mostrar como se realizó la dosificación de los cilindros. El ejemplo se muestra en la tabla 32.

Tabla 32: Dosificación de un cilindro del punto central

Componentes	Proporciones por agregado	Proporción para corrida	Peso en gramos cilindro	Peso final corregido
A/C	100,00 %	25,00 %	793,85	877,94
Agua	66,03 %	16,51 %	312,73	396,82
Cemento	33,97 %	8,49 %	481,12	481,12
Agregado	100,00 %	67,50 %	3338,31	3254,21
Grueso	50,00 %	33,75 %	1677,79	1637,35
Fino (Pifo)	15,00 %	10,13 %	498,16	485,06
Fino (S. Ant.)	35,00 %	23,63 %	1162,36	1131,80
Caucho	100,00 %	7,50 %	70,38	70,38
TOTAL		100,00 %	4202,53	4202,53

**Figura 19:** Dosificación de un cilindro del punto central

5.5. Fundición y rotura de cilindros

Las fundiciones de los cilindros se llevaron a cabo los días lunes 18 de septiembre de 2017 y viernes 22 de septiembre de 2017 a las 11 de la mañana. Para su rotura, se curaron durante 28 días por lo cual las fechas de rotura para cada bloque fueron el lunes 16 de octubre de 2017 y el viernes 21 de octubre de 2017. Para su fundición, se mantuvieron los mismos procesos y consideraciones que llevaron al éxito al experimento de viabilidad en cuanto a solidez de resultados.

Su desmoldado se realizó 24 horas después de su fundición, y para curarse fueron introducidos a la piscina. El orden de desmoldado y de rotura de los cilindros es igual al orden de fundición, con el objetivo de mantener la aleatoriedad del experimento.

5.6. Análisis de resultados

Todos los resultados fueron obtenidos mediante el software Design Expert versión 10.

Antes de sacar conclusiones del experimento es imprescindible determinar su validez, por lo tanto, a continuación se presenta el ajuste obtenido y un análisis de residuales.

Summary (detailed tables shown below)

	Sequential	Lack of Fit	Adjusted	Predicted	
Source	p-value	p-value	R-Squared	R-Squared	
Linear	0.0005	0.4728	0.3732	0.2427	
<u>Quadratic</u>	<u>0.0320</u>	<u>0.8282</u>	<u>0.5031</u>	<u>0.3569</u>	<u>Suggested</u>
Special Cubic	0.9560	0.7748	0.4825	0.3065	
Cubic	0.3052	0.8629	0.5003	0.2226	

Figura 20: Ajuste de resultados según el modelo de regresión

El modelo que más se ajusta a los resultados obtenidos es un modelo cuadrático que se define por la ecuación que se muestra en la figura 21.

Final Equation in Terms of Real Components:

$$\begin{aligned}
 \text{R.COMP.} = & \\
 & +4343.70822 * \text{AGUA Y CEMENTO} \\
 & +384.92496 * \text{AGREGADO} \\
 & +3796.67317 * \text{CAUCHO} \\
 & -5969.22028 * \text{AGUA Y CEMENTO} * \text{AGREGADO} \\
 & -13875.88804 * \text{AGUA Y CEMENTO} * \text{CAUCHO} \\
 & -3367.36119 * \text{AGREGADO} * \text{CAUCHO}
 \end{aligned}$$

Figura 21: Modelo cuadrático para experimento de optimización

Un análisis de residuales tiene que ver con el cumplimiento de supuestos de un análisis de varianza para que sus resultados sean válidos. Este se presenta a continuación y sus conclusiones son obtenidas según la figura 22.

A. Datos normales

El Normal Plot of Residuals muestra la tendencia de los datos a seguir una distribución normal, por lo tanto se cumple el primer supuesto.

B. Igualdad de varianzas

El Residuals vs. Predicted nos muestra que no existe un patrón o simetría entre los residuales, por lo tanto, se cumple el segundo supuesto.

C. Independencia de datos

El Residuals vs. Run nos muestra que no existe un patrón o tendencia entre los residuales, lo que determina que no existe dependencia de una respuesta respecto a la anterior y se cumple el tercer supuesto.

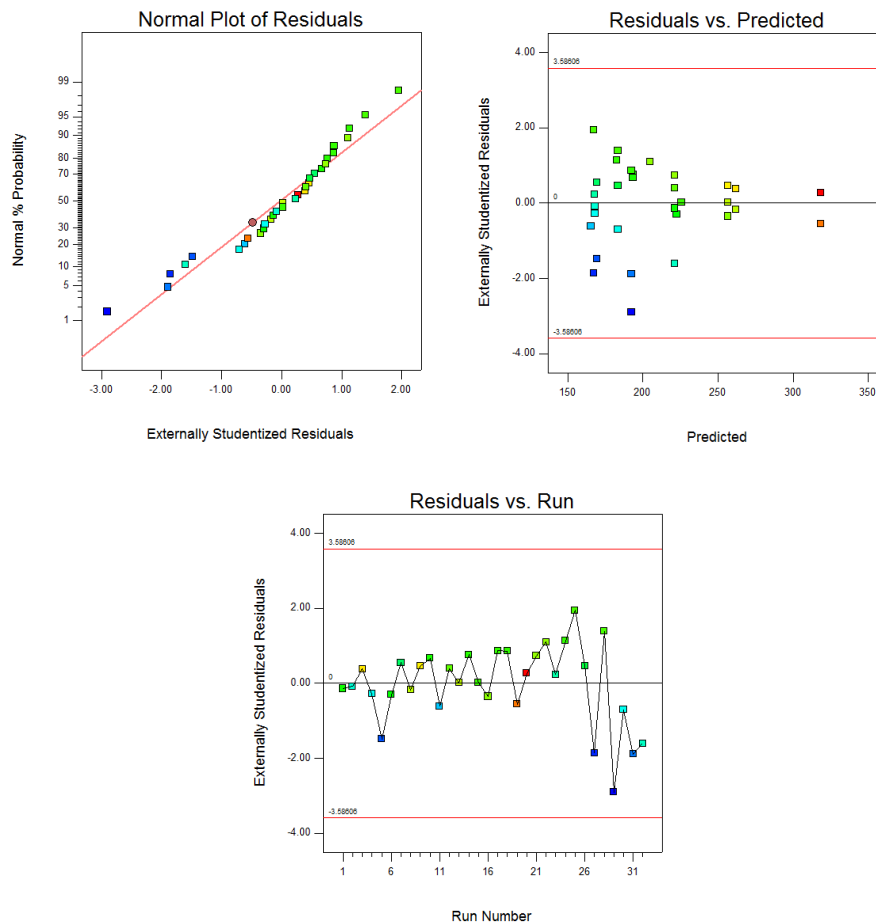


Figura 22: Análisis de residuales para experimento de optimización

Debido al análisis de los residuales, se concluye que el modelo es apto para producir estimaciones respecto a los factores estudiados y su interacción al cumplir con los supuestos. Se puede concluir que el análisis de varianza es una herramienta ideal para sacar conclusiones respecto al experimento. El análisis de varianza se muestra en la figura 23.

Lo que se puede analizar y concluir en el análisis de varianza con un 95% de confianza es lo siguiente:

- A. Los valores P (P-Value) son aquellos que determinan la significancia de cada término en el modelo en base al criterio de rechazo respecto al alfa. El alfa utilizado fue de 0.05.
 $P - Value \leq \alpha$, el término en el modelo es significativo
 $P - Value > \alpha$, el término en el modelo no es significativo
- B. Los componentes lineales de la mezcla son significativos.
- C. La interacción entre el componente de agua/cemento con el caucho es significativa.
- D. El lack of fit o falta de ajuste no es significativo.

Response	1	R.COMP.			
ANOVA for Quadratic Mixture model					
*** Mixture Component Coding is L_Pseudo. ***					
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Block	462.88	1	462.88		
Model	54556.84	5	10911.37	7.07	0.0003
1 Linear Mixtu	38643.53	2	19321.76	12.53	0.0002
AB	1433.78	1	1433.78	0.93	0.3442
AC	7597.17	1	7597.17	4.93	0.0358
BC	3727.80	1	3727.80	2.42	0.1326
Residual	38557.85	25	1542.31		
Lack of Fit	11828.50	11	1075.32	0.56	0.8282
Pure Error	26729.35	14	1909.24		
Cor Total	93577.56	31			

Figura 23: Análisis de varianza para experimento de optimización

Es de suma importancia analizar dos conceptos fundamentales para el cumplimiento de los objetivos del experimento que es falta de ajuste y el R-cuadrado Predictivo que se muestran en la figura 20. El output de Design Expert muestra que la falta de ajuste del experimento es de 0.8282 y que el R-cuadrado Predictivo es de 0.3569, lo que permite concluir que existe una relación funcional entre los componentes estudiados y la resistencia a compresión, sin embargo, el modelo de regresión construido a partir de las observaciones no permitirá predecir con aproximación cualquier valor óptimo que el experimentador desee.

Los planos o superficies de respuesta se muestran en la figura 24.

Al analizar los datos mediante un modelo cuadrático, es importante destacar la presencia de interacciones. Se observa claramente el cambio en la pendiente en el plano de resistencia a compresión, mostrando la interacción significativa entre los componentes de agua y cemento con el caucho. Sin embargo, se detectó una inconsistencia en los cilindros 25 a 32 cuando se buscaron

causas asignables a la alta variabilidad del experimento que se detectó en el valor del R-cuadrado Predictivo.

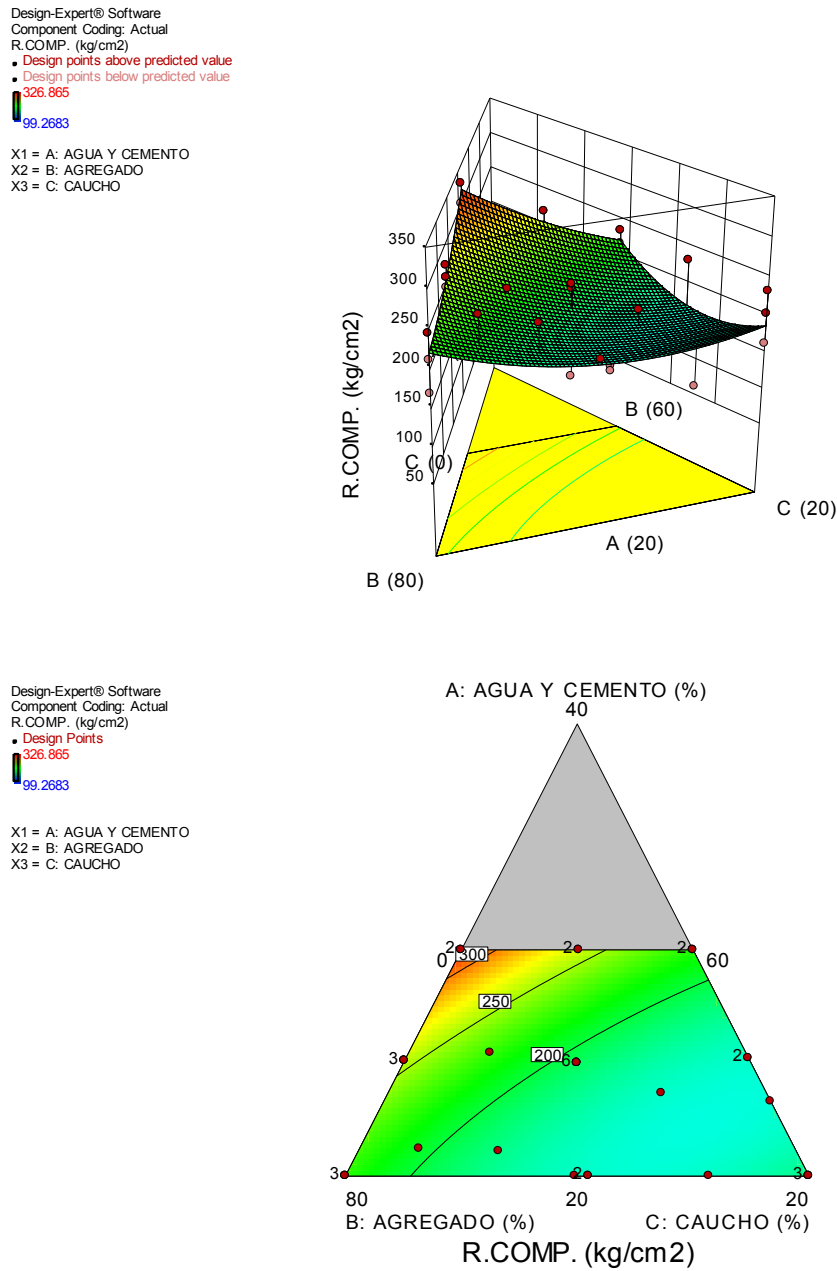


Figura 24: Superficies de respuesta del experimento de optimización

Se analizó en primera instancia el estado de los cilindros en cuanto a su composición y se detectó una inconsistencia en la proporción de caucho y su consistencia tendía a ser arenosa, detectando una falla en la proporción de los agregados finos. Al realizar un análisis causa-raíz se concluye que la causa de la mala proporción de agregados puede ser atribuida con mayor probabilidad a un error humano al tarar la balanza en el proceso de pesaje de los componentes para su fundición. Como decisión experimental, se analiza la causa de las inconsistencias presentadas en 8 de los 32 cilindros

y se concluye que al existir una causa asignable estos pueden ser extraídos del análisis estadístico al obtener suficientes datos válidos para estimar el modelo de regresión.

Sin embargo, antes de sacar conclusiones del experimento reducido de optimización es imprescindible determinar su validez, por lo tanto, a continuación se presenta el ajuste obtenido y un análisis de residuales.

Summary (detailed tables shown below)

	Sequential	Lack of Fit	Adjusted	Predicted	
Source	p-value	p-value	R-Squared	R-Squared	
<u>Linear</u>	<u>≤ 0.0001</u>	<u>0.7203</u>	<u>0.9469</u>	<u>0.9298</u>	<u>Suggested</u>
Quadratic	0.9154	0.5755	0.9393	0.9051	
Special Cubic	0.8493	0.5065	0.9357	0.8924	
Cubic	0.1324	0.7706	0.9478	0.8882	

Figura 25: Nuevo ajuste de resultados según el modelo de regresión

El modelo que más se ajusta a los resultados obtenidos es un modelo lineal que se define por la ecuación que se muestra en la figura 26.

Final Equation in Terms of Real Components:

$$\begin{aligned}
 \text{R.COMP.} &= \\
 &+783.26463 * \text{AGUA Y CEMENTO} \\
 &+96.47193 * \text{AGREGADO} \\
 &-518.32807 * \text{CAUCHO}
 \end{aligned}$$

Figura 26: Modelo lineal para experimento de optimización

Un análisis de residuales tiene que ver con el cumplimiento de supuestos de un análisis de varianza para que sus resultados sean válidos. Este se presenta a continuación y sus conclusiones son obtenidas según la figura 27.

A. Datos normales

El Normal Plot of Residuals muestra la tendencia de los datos a seguir una distribución normal, por lo tanto se cumple el primer supuesto.

B. Igualdad de varianzas

El Residuals vs. Predicted nos muestra que no existe un patrón o simetría entre los residuales, por lo tanto, se cumple el segundo supuesto.

C. Independencia de datos

El Residuals vs. Run nos muestra que no existe un patrón o tendencia entre los

residuales, lo que determina que no existe dependencia de una respuesta respecto a la anterior y se cumple el tercer supuesto.

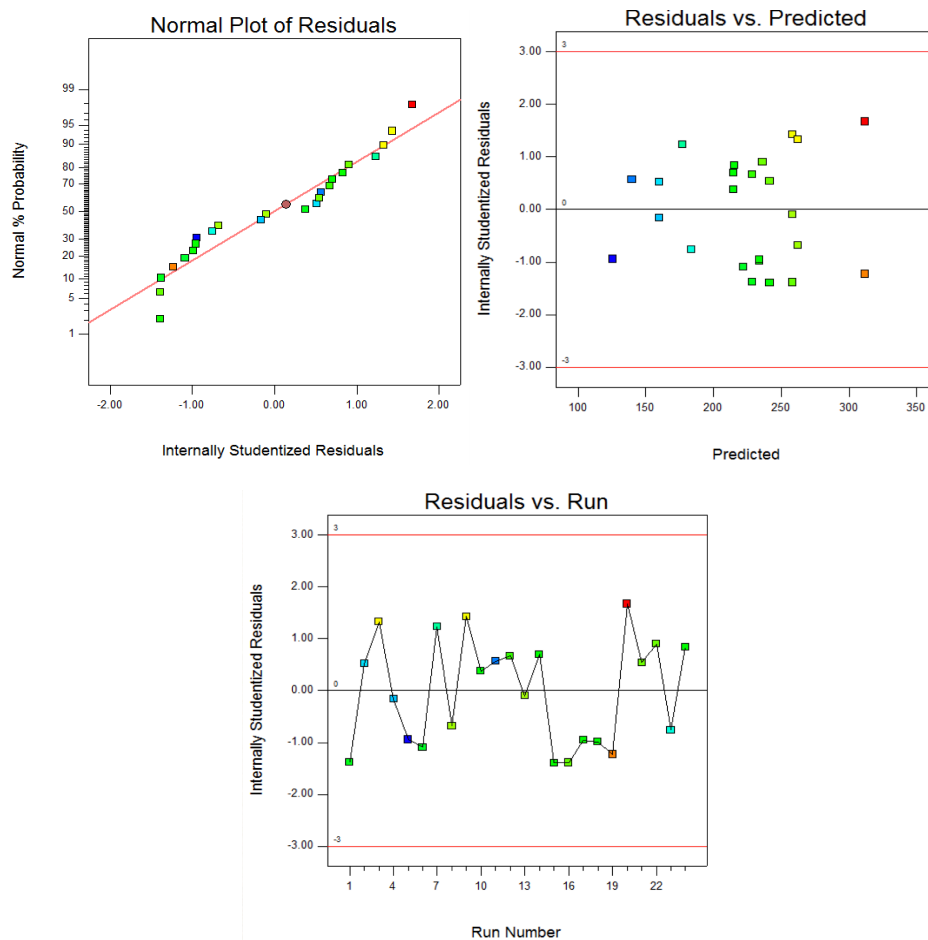


Figura 27: Análisis de residuales para experimento reducido de optimización

Debido al análisis de los residuales, se concluye que el modelo es apto para producir estimaciones respecto a los factores estudiados y su interacción al cumplir con los supuestos. Se puede concluir que el análisis de varianza es una herramienta ideal para sacar conclusiones respecto al experimento. El análisis de varianza se muestra en la figura 28.

Lo que se puede analizar y concluir en el análisis de varianza con una 95% de confianza es lo siguiente:

- A. Los valores P (P-Value) son aquellos que determinan la significancia de cada término en el modelo en base al criterio de rechazo respecto al alfa. El alfa utilizado fue de 0.05.
 $P - Value \leq \alpha$, el término en el modelo es significativo
 $P - Value > \alpha$, el término en el modelo no es significativo
- B. Los componentes lineales de la mezcla son significativos.
- C. El Lack of fit o falta de ajuste no es significativo.

- D. El componente del error en la suma de cuadrados es bastante bajo respecto al total, por lo que se puede concluir que la variabilidad fue bastante controlada.

Response 1 R.COMP.
 These rows were ignored for this analysis.
 32, 29, 31, 27, 25, 26, 28, 30

ANOVA for Linear Mixture model
 *** Mixture Component Coding is L_Pseudo. ***
 Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Block	5739.10	1	5739.10		
Model	46007.48	2	23003.74	197.11	< 0.0001
1 Linear Mixtu	46007.48	2	23003.74	197.11	< 0.0001
Residual	2334.12	20	116.71		
Lack of Fit	1196.94	12	99.74	0.70	0.7203
Pure Error	1137.18	8	142.15		
Cor Total	54080.71	23			

Figura 28: Análisis de varianza para experimento reducido de optimización

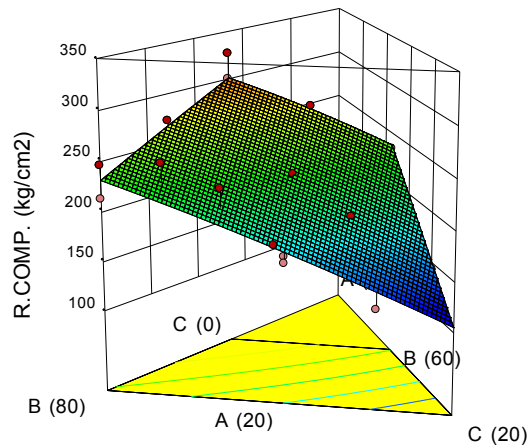
Ahora es de suma importancia analizar dos conceptos fundamentales para el cumplimiento de los objetivos del experimento que es falta de ajuste y el R-cuadrado Predictivo. El output de Design Expert muestra que la falta de ajuste del experimento es de 0.7203 y que el R-cuadrado Predictivo es de 0.9296, lo que permite concluir que existe una relación funcional entre los componentes estudiados y que el modelo de regresión construido a partir de las observaciones permitirá predecir con gran aproximación cualquier valor óptimo que el experimentador desee.

Los planos o superficies de respuesta se muestran en la figura 29.

Al analizar los datos mediante un modelo lineal, es importante destacar la ausencia de interacciones. La tendencia lineal de la resistencia a compresión presenta características de aumentar mientras la presencia de agua y cemento sea mayor, y de disminuir mientras la presencia de agregado y caucho sea mayor. Sin embargo, es importante destacar la ausencia de sinergia y antagonismo entre factores.

Una vez establecido el modelo matemático y construido el plano o superficie de respuesta, mediante la utilización de la función de optimización numérica se procederá a calcular las proporciones ideales de los componentes y sub-componentes o materiales, de acuerdo a los requerimientos del experimentador SOLING Cía. Ltda.

Design-Expert® Software
 Component Coding: Actual
 R.COMP. (kg/cm²)
 • Design points above predicted value
 • Design points below predicted value
 326.865
 117.955



Design-Expert® Software
 Component Coding: Actual
 R.COMP. (kg/cm²)
 • Design Points
 326.865
 117.955

X1 = A: AGUA Y CEMENTO
 X2 = B: AGREGADO
 X3 = C: CAUCHO

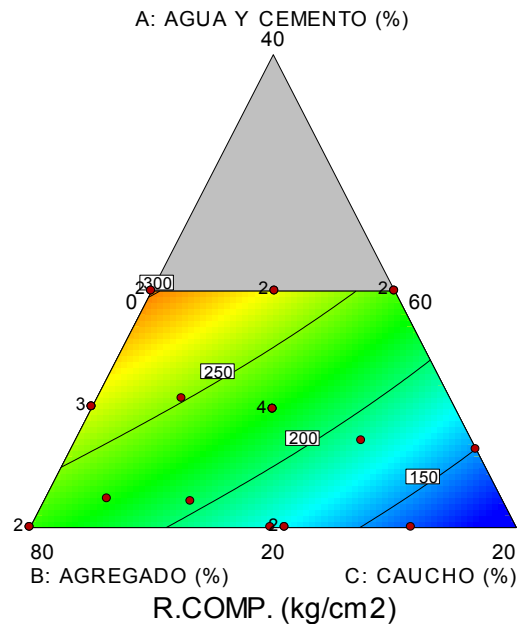


Figura 29: Superficies de respuesta del experimento reducido de optimización

La solución óptima estará enfocada en la que tenga como resultado una mayor deseabilidad. Según lo establecido por Myers et. al. (2016), la función de deseabilidad permite analizar y escoger la solución óptima de acuerdo al cumplimiento de la solución respecto a los estándares del experimentador. Mientras mayor sea la deseabilidad, más óptima es la solución.

SOLING Cía. Ltda. plantea la fabricación de un hormigón de 216 kg/cm² para que este tenga una aplicabilidad de 180 kg/cm². Las restricciones y solución óptima se muestran en la figura 30.

Constraints						
Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A:AGUA Y CEMENTO	is target = 20	20	30	1	1	3
B:AGREGADO	is in range	60	80	1	1	3
C:CAUCHO	maximize	5	10	10	1	3
R.COMP.	is target = 216	210	222	10	10	5

Solutions						
Number	AGUA Y CEMENTO	AGREGADO	CAUCHO	R.COMP.	Desirability	
1	<u>26.356</u>	<u>63.644</u>	<u>10.000</u>	<u>216.000</u>	<u>0.759</u>	<u>Selected</u>

1 Solutions found

Figura 30: Restricciones y solución óptima

Como se puede observar, la solución óptima tiene una deseabilidad de 0.759 debido a que la proporción del componente agua y cemento no cumple con el Target especificado, sin embargo, se encuentra dentro del rango establecido.

La representación de la solución óptima en el plano o superficie de respuesta se muestra en la figura 31.

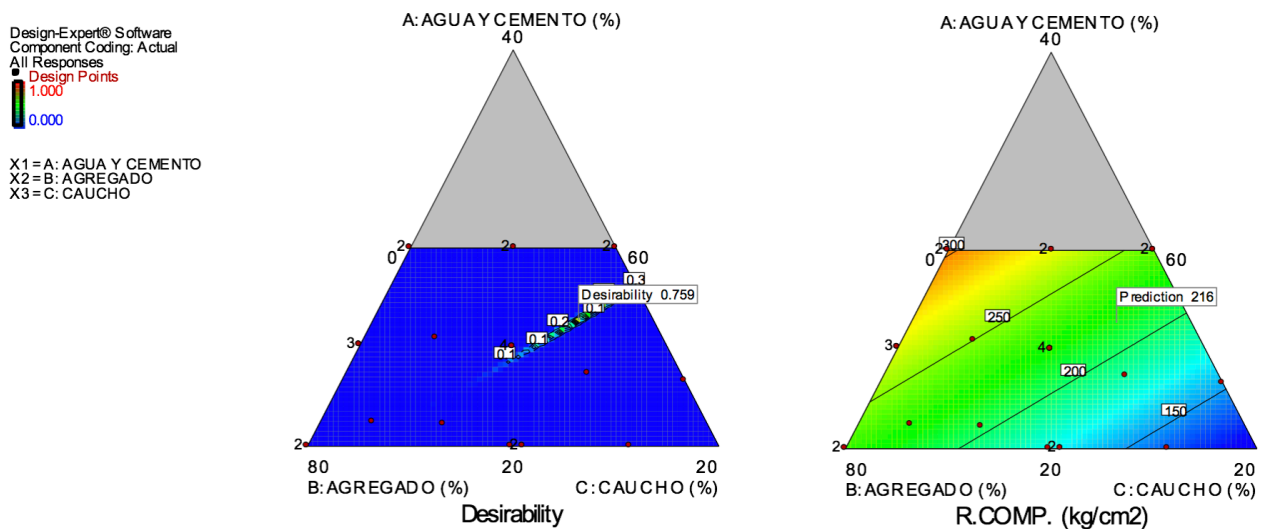


Figura 31: Representación de solución óptima en superficie de respuesta

6. Conclusiones

- Los objetivos del proyecto se cumplieron exitosamente al presentar un modelo predictivo válido para estimar la resistencia a compresión del hormigón-caucho basado en el criterio de un I-Optimal Design.
- Siguiendo la estructura de los experimentos realizados en este estudio, el experimento de viabilidad permite concluir sobre la viabilidad de introducir caucho de llanta usada a un hormigón de característica no estructural.
- El análisis de residuales del experimento de viabilidad permitió concluir sobre los resultados del análisis de varianza. Además, el resumen del modelo muestra que la variación en la resistencia a compresión es explicada óptimamente por el modelo.
- El término de los bloques es significativo, por lo cual se puede concluir que existen factores ajenos al experimento que tienen una incidencia en la resistencia a compresión. Estos pueden ser clima o humedad.
- La Hipótesis Nula del experimento de viabilidad consiste en la ausencia de interacciones entre factores, por lo tanto, no existe evidencia para rechazar la Hipótesis Nula y se concluye con un 95% de confianza que las interacciones de los factores en el experimento no son significativas.
- Los factores significativos en el experimento de viabilidad son, en orden de contribución, el factor B (Volumen de caucho), factor A (Tipo de hormigón), y factor D (Curado).
- El Main Effects Plot muestra la variación de la resistencia a compresión para cada nivel de los factores. Como se puede observar, el factor C (Tipo de Caucho) no presenta una pendiente pronunciada por lo cual se ratifica nuevamente que este factor no es significativo.
- En el Cube Plot se observa la media estimada para cada combinación de factores, concluyendo que es viable introducir caucho de llanta usada en hormigones de característica no estructural. Sin embargo, es importante optimizar la mezcla para obtener los resultados deseados.
- La conclusión anterior permitió al experimentador analizar de manera independiente a cada factor y planificar un experimento de optimización con mayor libertad en la proporción de los componentes.
- El análisis de residuales del experimento de optimización permitió concluir sobre los resultados del análisis de varianza.

- Los componentes lineales del modelo son significativos. Por esa razón, la tendencia de la resistencia a compresión es aumentar mientras la presencia de agua y cemento sea mayor, y de disminuir mientras la presencia de agregado y caucho sea mayor.
- Al ser un modelo que presenta una falta de ajuste de 0.7203 y un R-cuadrado Predictivo de 0.9296 se concluye que es apto para producir estimaciones óptimas de formulaciones en conformidad con los requerimientos de SOLING Cía. Ltda.
- La utilización de la función de optimización numérica proveerá al experimentador de una, varias, o ninguna solución óptima. Sin embargo, de las soluciones que provea el experimentador podrá maximizar su aproximación o igualar sus criterios establecidos sobre la formulación.
- La formulación óptima respecto a los requerimientos de SOLING Cía. Ltda. es de un 26.356% de agua y cemento, 63.644% de agregado, y un 10% de caucho de llanta usada.
- Un I-Optimal Design es un excelente enfoque para obtener una predicción sobre la resistencia a compresión del hormigón en base a la proporción de sus componentes.

7. Recomendaciones y pasos a seguir

En conformidad con los pasos a seguir, se recomienda lo siguiente para futuras investigaciones:

- Es importante enfocarse en la resistencia a flexión del hormigón-caucho y su densidad como variables de respuesta. Se recomienda realizar un estudio en paralelo con la resistencia a compresión para la determinación de formulaciones óptimas que puedan ser aplicadas en proyectos.
- Se recomienda mantener una proporción inferior o igual al 20% de caucho para que las propiedades de resistencia del hormigón no se vean afectadas significativamente.
- La variabilidad que puede presentarse en el experimento por diversos factores puede causar un sesgo significativo en los resultados. Se recomienda minimizar los riesgos al estandarizar el proceso de fundición y análisis de los cilindros, y maximizar en lo posible las réplicas de cada punto de la zona de experimentación.
- Para el proceso de fundición de los cilindros, se recomienda mantener un estándar de fundición individual. Es decir, pesar y fundir de cilindro en cilindro para minimizar la variabilidad del experimento.
- Se recomienda realizar una evaluación ambiental del impacto de introducir caucho de llanta usada en hormigón de característica no estructural.
- El uso de material reciclado en hormigones podría ser una solución viable para aquellos desechos cuyo proceso de reciclado siga emitiendo desperdicios contaminantes del medio ambiente. Se recomienda innovar en nuevos estudios de introducción de desperdicios en hormigón de característica no estructural aplicando un I-Optimal Design para optimizar las formulaciones.

8. Referencias

- A.K. Abdel-Gawad. (2010). A compressive strength of concrete utilizing waste tire rubber. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, 1(1), pp.96-99.
- ASTM International. (2017). *Descripción Detallada*. Recuperado el 25 de marzo de 2017 desde: https://www.astm.org/ABOUT/full_overview.html
- ASTM C39 / C39M-12a, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- Aslani, F. (2016). Mechanical Properties of Waste Tire Rubber Concrete. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 28(3), 04015152. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001429](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001429)
- Ataei, H. (2015). Experimental study of rubber tire aggregates effect on compressive and dynamic load-bearing properties of cylindrical concrete specimens. *Journal Of Material Cycles And Waste Management*, 18(4), 665-676. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-015-0362-2>
- Balcikanli, M., Turker, H., Ozbay, E., Karahan, O. & Atis, C. (2017). Identifying the bond and abrasion behavior of alkali activated concretes by central composite design method. *Construction and Building Materials*, 132, pp.196-209.
- Bezerra, M., Santelli, R., Oliveira, E., Villar, L. & Escalera, L. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), pp. 965-977.
- Eldin, N. & Senouci, A. (1993). Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 5(4), 478-496. [http://dx.doi.org/10.1061\(asce\)0899-1561\(1993\)5:4\(478\)](http://dx.doi.org/10.1061(asce)0899-1561(1993)5:4(478))
- El Universo. (2015). *Cuatro de cada 10 llantas que hay en el país son nacionales*. Recuperado el 16 de abril de 2017 desde: <http://www.eluniverso.com/noticias/2015/03/23/nota/4682771/cuatro-cada-10-llantas-que-hay-pais-son-nacionales>

- Garín, L., Santilli, A. & Pejoja, E. (2012). Influencia del curado en la resistencia a compresión del hormigón: estudio experimental. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, 10, pp.109-114.
- Hoornweg, D., Bhada-Tata, P. & Kennedy, C. (2013). Environment: Waste production must peak this century. *Nature*, 502(7473), pp.615-617.
- Hoornweg, D. & Bhada-Tata, P. (2012). *WHAT A WASTE A Global Review of Solid Waste Management*. Washington DC: World Bank.
- Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Concreto & Asociación de Productores de Hormigón Premezclado del Ecuador. (2007). *El Manual de Pepe Hormigón*. Quito.
- Jeirani, Z., Mohamed Jan, B., Si Ali, B., Mohd. Noor, I., Chun Hwa, S. & Saphanuchart, W. (2012). The optimal mixture design of experiments: Alternative method in optimizing the aqueous phase composition of a microemulsion. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 112, pp.1-7.
- Jingfu, K., Chuncui, H., & Zhenli, Z. (2008). Strength and shrinkage behaviors of roller-compacted concrete with rubber additives. *Materials And Structures*, 42(8), 1117-1124.
<http://dx.doi.org/10.1617/s11527-008-9447-x>
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2002). *ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y PUENTES* [archivo PDF]. Recuperado el 17 de abril de 2017 desde: http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf
- Montgomery, D. (2013). *Design and Analysis of Experiments* (8th ed.). Hoboken: John Wiley and Sons, Inc.

Myers, R. et al. (2016). *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY* (4th ed.). Hoboken: John Wiley and Sons, Inc.

Mucarsel, A. (2017). *SOLING Cía. Ltda.*. Entrevista Personal.

Neville, A. (2012). *Properties of Concrete* (5th ed.). Harlow: Pearson.

Secretaría Gestión de Riesgos et al. (2016). *Guía práctica para el diseño de estructuras de hormigón armado de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015*. Quito: Imprenta Activa

Yung, W., Yung, L., & Hua, L. (2013). A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. *Construction And Building Materials*, 41, 665-672. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.019>

Zhang, H., Gou, M., Liu, X., & Guan, X. (2014). Effect of rubber particle modification on properties of rubberized concrete. *Journal Of Wuhan University Of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 29(4), 763-768. <http://dx.doi.org/10.1007/s11595-014-0993-5>

Zheng, L., Huo, X., & Yuan, Y. (2008). Strength, Modulus of Elasticity, and Brittleness Index of Rubberized Concrete. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 20(11), 692-699. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2008\)20:11\(692\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:11(692))