

Mejora en la flexión del concreto hidráulico utilizando el diseño de experimentos con mezclas

Mirna Judith Gómez Payan, Roberto Romero López, Manuel Iván Rodríguez Borbón y Alejandro Alvarado Iniesta

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Correo: mjudg03@gmail.com

Resumen: El presente estudio, pretende determinar las proporciones optimas de los componentes del concreto, tomando como variable de respuesta la resistencia a la flexión, por medio de vigas de concreto, creadas en base a cinco componentes básicos, los cuales son: agua, cemento, agregado grueso y agregado fino, de los cuales el agua se tomara como constante y las tres restantes como variables. Se llevó a cabo aplicando un diseño experimental de mezclas en el cual se ensayaron 26 mezclas experimentales con diversas proporciones de los tres componentes: cemento, agregado grueso y agregado fino. En las vigas se evaluó la resistencia, sometiéndolas a la prueba de flexión en una maquina universal, para posteriormente determinar la mezcla optima a través del análisis de superficie de respuesta, mediante los resultados.

Palabras claves: Diseño de vértices extremos, diseño de experimentos por mezclas, vigas de concreto, resistencia a la flexión.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es una mezcla de cemento, agregados gruesos, agregados finos y agua, es un material que ha sido utilizado y estudiado por cientos de años en virtud de sus propiedades para ser moldeado en estado fresco y por su resistencia en estado endurecido. Su aparición se dio cuando los constructores griegos y romanos descubrieron que ciertos depósitos volcamos, mezclados con caliza y arena producían un mortero de gran fuerza capaz de resistir la acción del agua, dulce o salada. La versatilidad de aplicación del concreto ha permitido su uso en diferentes tipos de estructuras tales como edificios, calles, avenidas, carreteras, presas y canales, fabricas, casas, obras más cómodas y seguras para los seres humanos (Parra Maya & Bautista Moros, 2010).

En los primeros años de la década de los 90's se usaba un único tipo de concreto que cumplía con las características deseables tanto para placas como muros, sin embargo es claro que el uso de un único tipo de mezcla de concreto no garantiza un adecuado aprovechamiento de las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas.

En las últimas dos décadas, mucho esfuerzo científico y tecnológico se ha dedicado al desarrollo para la construcción de carreteras ya que las especificaciones de estas son cada día más estrictas. Ya que para el concreto usado en placas, banquetas, lozas se debe tener en cuenta los esfuerzos de tensión por flexión, evitando fisuras en las placas causadas por el peso de las formaletas así como la evaluación del personal que trabaja sobre las placas en las primeras horas después de vaciado el concreto (Diaz, Bautista , Sanchez, & Ruiz, 2010).

Así como el concreto, dentro de la industria, existe una variedad de productos elaborados a partir de la mezcla de dos o más ingredientes, en los cuales las características de calidad dependen de la formulación de sus componentes, por lo cual es importante encontrar la mejor mezcla de los ingredientes utilizados.

1.1 Diseño de mezclas

En el campo de la industria es una práctica común hacer experimentos o pruebas con la intención de que al mover o hacer algunos cambios en los materiales, métodos o condiciones de operación de un proceso se puedan detectar, resolver o minimizar los problemas de calidad (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2004, pag. 4).

Es común que estas pruebas o experimentos se hagan sobre la marcha a prueba y error, apelando a la experiencia y a la intuición; en lugar de seguir un plan experimental adecuado que garantice una buena respuesta a las interrogantes planteadas (E. Box, Hunter, & G. Hunter, 2008). En muchas situaciones no es suficiente aplicar experimentación a prueba y error, por lo que siempre es mejor proceder de una forma eficaz que garantice la obtención de las respuestas a las interrogantes planteadas, en un lapso corto de tiempo y utilizando pocos recursos (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2004, pag.4). Es aquí donde el diseño de experimentos es utilizado debido a que es la forma mas eficaz de hacer pruebas proporcionar tecnicas y la estrategia necesaria para llevar los procesos a mejores condiciones de operación.

En el diseño de mezclas se trabaja con factores experimentales, los cuales son productos o ingredientes con un determinado número de componentes, la variable de respuesta o propiedad

típica depende de la composición final que alcance la mezcla resultantes dada por el aporte relativo o proporciones relativas de cada uno de los productos que han participado en la mezcla y no de la cantidad absoluta (Fernandez Rodriguez & Ruilova Cueva, 2013).

Generalmente en el diseño de mezclas con el objetivo de la investigación o en trabajos prácticos cotidianos se trabaja con factores experimentales los cuales pueden ser productos o ingredientes con un determinado número de componentes. La variable respuesta o propiedad típica depende de la composición final que alcance la mezcla resultante dada por el aporte relativo o proporciones relativas de cada uno de los productos que han participado en la mezcla y no de la cantidad absoluta. Las proporciones deben sumar 1 o 100 en forma de porciento, los factores no pueden variar independientemente sobre algún otro. (Fernandez Rodriguez & Ruilova Cueva, 2013)

Los diseños experimentales de mezclas más frecuentes utilizados son el llamado de red simple (*simplex-lattice*), el centrado simple (*simplex-centroid*), vértices extremo (M. Guish, D. Pavioni, & Kessler, 2011).

Diseño simplex reticular

Considera q componentes y permite ajustar un modelo de orden m. Los tratamientos se obtienen con todas las mezclas que pueden formarse dado que los componentes toman los valores $X_i = 0, 1/m, 2/m, \dots, m/m$, incluye básicamente puntos en la frontera.

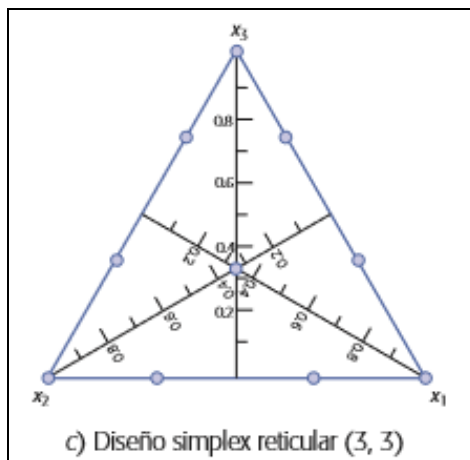


Fig. 1 Diseño simplex reticular (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2004)

Diseño simplex con centroide

Este tipo de diseño es un diseño en el sistema de coordenadas simplex que se compone de mezclas que contienen 1, 2, 3... o k componentes en proporciones iguales. Consiste en 2^{q-1} puntos definidos de la siguiente forma las 9 mezclas puras, todos los puntos medios de las aristas definidas por cada dos vértices del simplex y así hasta obtener el simplex con centroide (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2004).

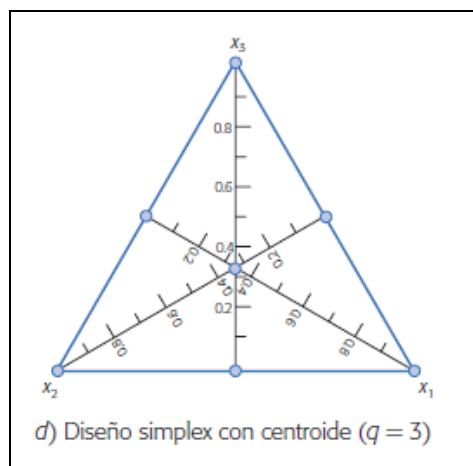


Fig. 2 Diseño simplex centroide (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2004)

Diseño de vértices extremos

Se aplica en experimentos de mezclas con restricciones donde la región experimental es un polígono irregular. Se usan los vértices de la región restringida como la base del diseño, junto con puntos entre el centroide global y el centroide de la región experimental (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2004).

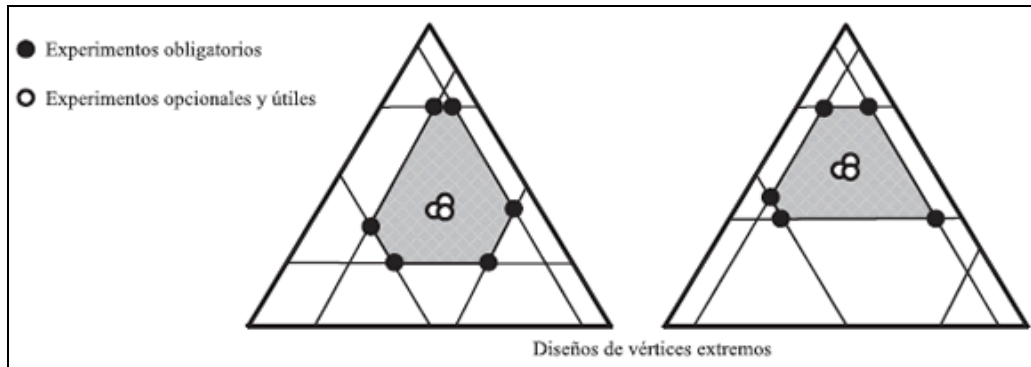


Fig. 3 Diseño vértices extremos (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2004)

1.2 Caso de aplicación

Los pisos industriales son por lo general estructuras en concreto, las cuales tienen unas características especiales, como su alta planicidad, resistencia mecánica, resistencia química, resistencia al impacto; al igual deben ser durables y tener un equilibrio entre costos y funcionalidad. En el sector de la construcción, se ha tratado de dar solución a la complejidad que abarca la construcción de pisos industriales, atacando las variables mencionadas anteriormente, implementando nuevas tecnologías como lo son entre otras, los pisos industriales potenciados adicionalmente a la mano de obra calificada que se necesita (Gracia Alarcon & Quesada Bolanos, 2012).

El esfuerzo que el concreto puede resistir como material compuesto, está determinado principalmente por las proporciones de los agregados gruesos, del cemento y de la interface entre estos. La necesidad de contar con un concreto de calidad hace indispensable conocer a detalle sus componentes, ya que tanto la resistencia como la durabilidad dependen de las proporciones de cada uno dentro de la mezcla.

Los agregados constituyen un factor determinante en la economía, durabilidad y estabilidad en las obras civiles, pues ocupan allí un volumen muy importante. Por ejemplo el volumen de los agregados en el concreto hidráulico es de un 65% a 85%, en el concreto asfáltico

es del 92% al 96% y en los pavimentos del 75% al 90% (Gutierrez de Lopez, El concreto y otros materiales para la construccion, 2003).

Por lo anterior, nace la necesidad de aplicar y dar a conocer la herramienta de diseño de experimentos por mezclas, proponiendo una nueva metodología en el área de la construcción encontrando las proporciones exactas de cada componente.

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este proyecto de investigación está basado en las pautas generales para diseñar experimentos (Montgomery, 2011). En la figura 4 se muestran las etapas de esta:

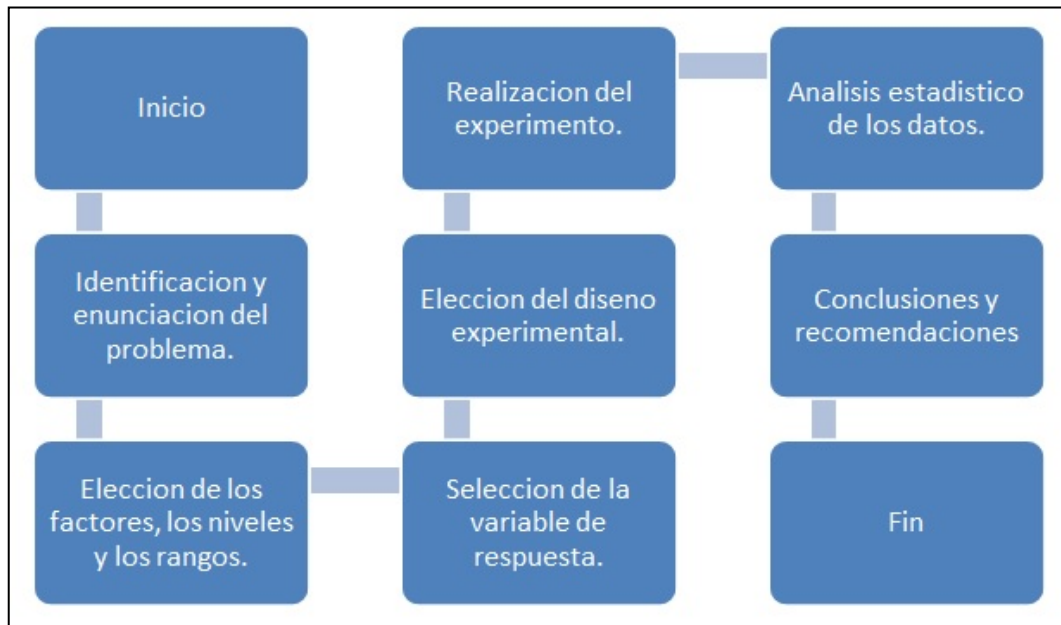


Figura 4 Pautas generales para diseñar experimentos

A continuación se describe a detalle cada uno de los pasos del diseño experimental:

3.2.1 Identificación y enunciación del problema

Es necesario desarrollar todas las ideas acerca de los objetivos del experimento. En la mayoría de los casos es conveniente hacer una lista de los problemas o las preguntas específicas que van a abordarse en el experimento.

3.2.2 Elección de los factores, los niveles y los rangos

Cuando se consideran los factores, que pueden influir en el desempeño de un proceso o sistema, el experimentador suele descubrir que estos factores pueden clasificarse como **factores potenciales del diseño** o bien como **factores perturbadores**. Los factores potenciales del diseño son aquellos que él experimentador posiblemente quiera hacer varían en el experimento. Es frecuente encontrar que hay muchos factores potenciales del diseño, por lo que es conveniente contar con alguna clasificación adicional de los mismos. Algunas clasificaciones útiles son **factores del diseño, factores que se mantienen constantes y factores a los que se permite variar**. Los factores del diseño son los que se seleccionan realmente para estudiarlos en el experimento. Los factores que se mantienen constantes son variables que pueden tener cierto efecto sobre la respuesta, pero que para los fines del experimento en curso no son de interés, por lo que mantendrán fijos en un nivel específico.

3.2.3 Selección de la variable de respuesta

Para seleccionar la variable de respuesta, el experimentador deberá tener la certeza de que esta variable proporciona en realidad información útil acerca del proceso bajo estudio.

3.2.4 Elección del diseño Experimental

La elección del diseño, implica la consideración del tamaño de la muestra (número de réplicas), la selección de un orden de corridas adecuado para los ensayos experimentales...

3.2.5 Realización del experimento

Cuando se lleva a cabo el experimento es vital monitorear con atención el proceso a fin de asegurarse de que todo se esté haciendo conforme a la planeación. Antes de llevar a cabo el experimento, es conveniente en muchas ocasiones realizar algunas corridas piloto o de prueba.

3.2.6 Análisis estadísticos de los datos

Deberán usarse métodos estadísticos para analizar los datos a fin de que los resultados y las conclusiones sean objetivos y no de carácter apreciativo.

3.2.7 Conclusiones y recomendaciones

Una vez que se han analizado los datos, el experimentador debe sacar conclusiones prácticas acerca de

4. RESULTADOS

Se creó la matriz utilizando el diseño de experimentos con mezclas, en específico el diseño de vértices extremos, ya que los tres componentes deben estar presentes en todas las corridas a lo largo del experimento con su restricción correspondiente, con dos replicas, la matriz se muestra en la tabla 1:

Tabla 1. Matriz de Diseño

| StdOrder | RunOrder | PtType | Blocks | Arena | Cemento | Grava |
|----------|----------|--------|--------|--------|---------|-------|
| 26 | 1 | -1 | 1 | 29.745 | 11.895 | 43.36 |
| 22 | 2 | 0 | 1 | 28.33 | 11.33 | 45.34 |
| 12 | 3 | -1 | 1 | 29.745 | 10.765 | 44.49 |
| 10 | 4 | -1 | 1 | 26.915 | 10.765 | 47.32 |
| 3 | 5 | 1 | 1 | 31.16 | 10.2 | 43.64 |
| 15 | 6 | 1 | 1 | 25.5 | 12.46 | 47.04 |
| 6 | 7 | 2 | 1 | 28.33 | 10.2 | 46.47 |
| 8 | 8 | 2 | 1 | 28.33 | 12.46 | 44.21 |
| 21 | 9 | 2 | 1 | 28.33 | 12.46 | 44.21 |
| 4 | 10 | 1 | 1 | 31.16 | 12.46 | 41.38 |
| 7 | 11 | 2 | 1 | 31.16 | 11.33 | 42.51 |
| 14 | 12 | 1 | 1 | 25.5 | 10.2 | 49.3 |
| 5 | 13 | 2 | 1 | 25.5 | 11.33 | 48.17 |
| 19 | 14 | 2 | 1 | 28.33 | 10.2 | 46.47 |
| 13 | 15 | -1 | 1 | 29.745 | 11.895 | 43.36 |
| 20 | 16 | 2 | 1 | 31.16 | 11.33 | 42.51 |
| 17 | 17 | 1 | 1 | 31.16 | 12.46 | 41.38 |
| 25 | 18 | -1 | 1 | 29.745 | 10.765 | 44.49 |
| 1 | 19 | 1 | 1 | 25.5 | 10.2 | 49.3 |
| 18 | 20 | 2 | 1 | 25.5 | 11.33 | 48.17 |
| 11 | 21 | -1 | 1 | 26.915 | 11.895 | 46.19 |
| 2 | 22 | 1 | 1 | 25.5 | 12.46 | 47.04 |
| 24 | 23 | -1 | 1 | 26.915 | 11.895 | 46.19 |
| 23 | 24 | -1 | 1 | 26.915 | 10.765 | 47.32 |
| 9 | 25 | 0 | 1 | 28.33 | 11.33 | 45.34 |
| 16 | 26 | 1 | 1 | 31.16 | 10.2 | 43.64 |

A partir de la tabla anterior, en la cual se pueden observar los diferentes diseños, se procedió a la elaboración de las vigas.

Para iniciar con la elaboración de las vigas, fue necesario pesar cada uno de los componentes y colocarlos en el piso, primero se pesó la arena, después el cemento, posteriormente la grava y al final el agua, todo se mezclaba hasta obtener la apariencia esperada. Se utilizó una báscula industrial para pesar así como dos botes. En las siguientes imágenes, se aprecia mejor el procedimiento.



Una vez mezclados los componentes y obteniendo la consistencia requerida esta se vaciaba en el molde de la viga, previamente engrasado y siguiendo de la misma forma la norma correspondiente para el vaciado, una vez vaciado se golpean los lados del molde buscando sacar el aire, una vez consolidado, se o enrasa la superficie retirando el exceso de concreto para producir una superficie plana y lisa. El procedimiento se observa a continuación:



Una vez vaciada la mezcla total, en los moldes, esta se dejaba reposar y secar durante 24 horas, para después ser marcada para su identificación, desencofrada y puesta en curado en pilas llenas de agua con cal durante 28 días, buscando evitar la pérdida de humedad de los especímenes.



Una vez pasado el tiempo de curado, las vigas eran sacadas de las pilas unas horas antes de la prueba, permitiendo así su secado.

Posteriormente eran medidas del alto, claro y ancho; marcando los puntos tercios en lo claro de la viga.



Una vez marcadas, eran transportadas a lugar donde se encontraba la maquina universal para la prueba (Forney Universal), se colocaba la viga entre dos personas en el área de la prueba y se procedía a aplicar la fuerza, como se observa en las imágenes siguientes:



La prueba consiste en aplicar fuerza cargada en los puntos tercios, hasta que la viga se fracture, siguiendo la norma ASTM C 78, una vez sucedido, la aguja indica el peso que es capaz de soportar, posteriormente se apaga la máquina y se retira la viga quebrada en dos, se observa el claro en el que se presentó la fractura, comúnmente esta se presenta en el segundo tercio.

Se obtuvo la carga soportada en kilogramos, luego se realizaban los cálculos necesarios para obtener la resistencia soportada en Psi para las diferentes muestras. Los resultados obtenidos en Psi, fueron introducidos a Minitab ® para el análisis, obteniendo lo siguiente:

Tabla 2. Resultado del análisis

| StdOrder | RunOrder | PtType | Blocks | Arena | Cemento | Grava | Resistencia | FITS1 | RESI1 |
|----------|----------|--------|--------|--------|---------|-------|-------------|------------|-------------|
| 26 | 1 | -1 | 1 | 29.745 | 11.895 | 43.36 | 580.9658 | 574.786436 | 6.17936432 |
| 22 | 2 | 0 | 1 | 28.33 | 11.33 | 45.34 | 565.65 | 590.191091 | -24.5410909 |
| 12 | 3 | -1 | 1 | 29.745 | 10.765 | 44.49 | 590.521 | 573.651597 | 16.8694026 |
| 10 | 4 | -1 | 1 | 26.915 | 10.765 | 47.32 | 583.292 | 574.933586 | 8.35841432 |
| 3 | 5 | 1 | 1 | 31.16 | 10.2 | 43.64 | 445.26 | 472.350567 | -27.090567 |
| 15 | 6 | 1 | 1 | 25.5 | 12.46 | 47.04 | 587.009 | 573.900067 | 13.108933 |
| 6 | 7 | 2 | 1 | 28.33 | 10.2 | 46.47 | 445.27 | 423.523317 | 21.7466828 |
| 8 | 8 | 2 | 1 | 28.33 | 12.46 | 44.21 | 642.52 | 663.558317 | -21.0383172 |
| 21 | 9 | 2 | 1 | 28.33 | 12.46 | 44.21 | 722.29 | 663.558317 | 58.7316828 |
| 4 | 10 | 1 | 1 | 31.16 | 12.46 | 41.38 | 587.41 | 605.50697 | -18.09697 |
| 7 | 11 | 2 | 1 | 31.16 | 11.33 | 42.51 | 593.21 | 599.016817 | -5.80681721 |
| 14 | 12 | 1 | 1 | 25.5 | 10.2 | 49.3 | 439.46 | 452.22657 | -12.76657 |
| 5 | 13 | 2 | 1 | 25.5 | 11.33 | 48.17 | 592.159 | 546.275817 | 45.8831828 |
| 19 | 14 | 2 | 1 | 28.33 | 10.2 | 46.47 | 439.47 | 423.523317 | 15.9466828 |
| 13 | 15 | -1 | 1 | 29.745 | 11.895 | 43.36 | 595.3529 | 574.786436 | 20.5664643 |
| 20 | 16 | 2 | 1 | 31.16 | 11.33 | 42.51 | 642.517 | 599.016817 | 43.5001828 |
| 17 | 17 | 1 | 1 | 31.16 | 12.46 | 41.38 | 598.0708 | 605.50697 | -7.43616998 |
| 25 | 18 | -1 | 1 | 29.745 | 10.765 | 44.49 | 531.84 | 573.651597 | -41.8115974 |
| 1 | 19 | 1 | 1 | 25.5 | 10.2 | 49.3 | 439.46 | 452.22657 | -12.76657 |
| 18 | 20 | 2 | 1 | 25.5 | 11.33 | 48.17 | 538.086 | 546.275817 | -8.18981721 |
| 11 | 21 | -1 | 1 | 26.915 | 11.895 | 46.19 | 528.2432 | 573.197697 | -44.9544974 |
| 2 | 22 | 1 | 1 | 25.5 | 12.46 | 47.04 | 548.18 | 573.900067 | -25.720067 |
| 24 | 23 | -1 | 1 | 26.915 | 11.895 | 46.19 | 593.21 | 573.197697 | 20.0123026 |
| 23 | 24 | -1 | 1 | 26.915 | 10.765 | 47.32 | 593.321 | 574.933586 | 18.3874143 |
| 9 | 25 | 0 | 1 | 28.33 | 11.33 | 45.34 | 536.64 | 590.191091 | -53.5510909 |
| 16 | 26 | 1 | 1 | 31.16 | 10.2 | 43.64 | 486.83 | 472.350567 | 14.479433 |

Regression for Mixtures: Resistencia 28 d versus Arena, Cemento, Grava

Estimated Regression Coefficients for Resistencia 28 dias (pseudocomponents)

| Term | Coef | SE Coef | T | P | VIF |
|---------------------|--------|---------|-------|-------|---------|
| Arena | 690 | 173.5 | * | * | 123.0 |
| Cemento | 29594 | 8072.9 | * | * | 42461.4 |
| Grava | 452 | 24.4 | * | * | 4.1 |
| Arena*Cemento | -50917 | 14127.3 | -3.60 | 0.002 | 25941.2 |
| Arena*Grava | -590 | 414.3 | -1.42 | 0.174 | 67.3 |
| Cemento*Grava | -50650 | 14072.0 | -3.60 | 0.002 | 30374.3 |
| Arena*Cemento*Grava | 51909 | 13407.3 | 3.87 | 0.001 | 1112.5 |
| Arena*Cemento*(-) | 23430 | 6525.7 | 3.59 | 0.002 | 880.6 |
| Arena*Grava*(-) | -334 | 416.0 | -0.80 | 0.434 | 7.3 |
| Cemento*Grava*(-) | -24386 | 6534.3 | -3.73 | 0.002 | 1368.3 |

S = 35.3523 PRESS = 50804.8

R-Sq = 84.40% R-Sq(pred) = 60.36% R-Sq(adj) = 75.62%

Analysis of Variance for Resistencia 28 dias (pseudocomponents)

| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
|---------------------|----|--------|----------|---------|-------|-------|
| Regression | 9 | 108175 | 108174.6 | 12019.4 | 9.62 | 0.000 |
| Linear | 2 | 73012 | 17544.5 | 8772.3 | 7.02 | 0.006 |
| Quadratic | 3 | 13969 | 17399.1 | 5799.7 | 4.64 | 0.016 |
| Arena*Cemento | 1 | 70 | 16234.5 | 16234.5 | 12.99 | 0.002 |
| Arena*Grava | 1 | 3507 | 2531.1 | 2531.1 | 2.03 | 0.174 |
| Cemento*Grava | 1 | 10392 | 16191.7 | 16191.7 | 12.96 | 0.002 |
| Special Cubic | 1 | 2934 | 18734.5 | 18734.5 | 14.99 | 0.001 |
| Arena*Cemento*Grava | 1 | 2934 | 18734.5 | 18734.5 | 14.99 | 0.001 |
| Full Cubic | 3 | 18260 | 18260.3 | 6086.8 | 4.87 | 0.014 |
| Arena*Cemento*(-) | 1 | 48 | 16111.1 | 16111.1 | 12.89 | 0.002 |
| Arena*Grava*(-) | 1 | 806 | 805.7 | 805.7 | 0.64 | 0.434 |
| Cemento*Grava*(-) | 1 | 17407 | 17406.5 | 17406.5 | 13.93 | 0.002 |
| Residual Error | 16 | 19997 | 19996.5 | 1249.8 | | |
| Lack-of-Fit | 3 | 8039 | 8039.2 | 2679.7 | 2.91 | 0.074 |
| Pure Error | 13 | 11957 | 11957.3 | 919.8 | | |
| Total | 25 | 128171 | | | | |

Estimated Regression Coefficients for Resistencia 28 dias (component amounts)

| Term | Coef |
|---------------------|-----------|
| Arena | 3408.29 |
| Cemento | 461446 |
| Grava | -1277.27 |
| Arena*Cemento | -9359.25 |
| Arena*Grava | -125.467 |
| Cemento*Grava | -9249.00 |
| Arena*Cemento*Grava | 104.488 |
| Arena*Cemento*(-) | 47.1626 |
| Arena*Grava*(-) | -0.672329 |
| Cemento*Grava*(-) | -49.0867 |

Unusual Observations for Resistencia 28 dias

| Resistencia | | | | | | |
|-------------|----------|---------|---------|--------|----------|----------|
| Obs | StdOrder | 28 dias | Fit | SE Fit | Residual | St Resid |
| 9 | 21 | 722.290 | 663.558 | 22.746 | 58.732 | 2.17R |

Coeficientes de regresión:

$$Y = 690X_1 + 29594X_2 + 452X_3 - 50917X_1X_2 - 590X_1X_3 - 50650X_2X_3 + 51909X_1X_2X_3$$

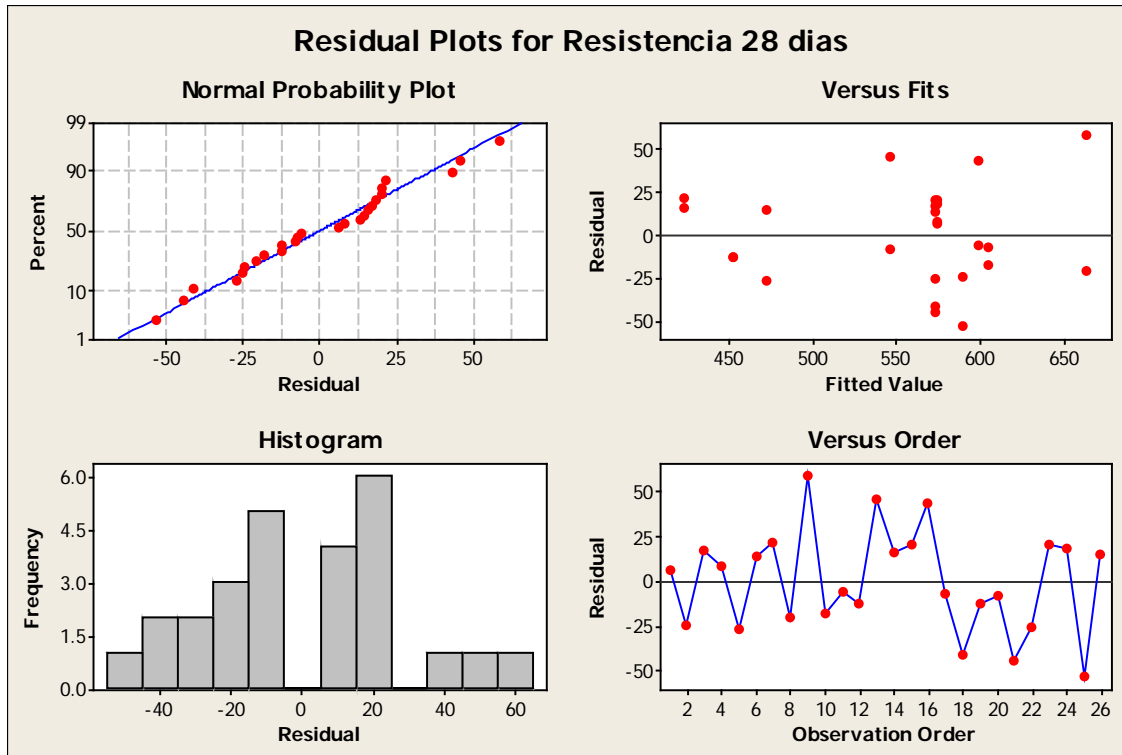


Figura 5 Graficas dde resultados

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al utilizar el diseño de experimentos con mezclas fue posible desarrollar un concreto con un MR de 600 Psi, que era el esperado; así como encontrar proporciones cercanas a las reales. Las reales fueron de 11.33 Lb de cemento, 28.33 lbs de arena y 45.8 lbs de grava; las encontradas bajo el diseño de mezclas se muestran en la tabla 2, en los diseños 8 y 21, utilizando 12.46 lbs de cemento, 28.33 lbs de arena y 44.21 lbs de grava.

Al revisar la tabla ANOVA encontramos que al recurrir al criterio del coeficiente de determinación R^2 , determinamos que es bueno ya que explica el 84.4% de los datos utilizando el modelo de regresión cubico completo. Al igual que al observar el error estándar de la regresión S , es aceptable ya que este representa la dispersión entre las observaciones y el modelo y se encuentra por debajo del 50%.

También se observa en los coeficientes que el cemento > arena > grava, por lo que se concluye que el cemento es el componentes que produce mayor resistencia.

Referencias

1. Diaz, J., Bautista, L., Sanchez, A., & Ruiz, D. (2010). Caracterización de mezclas de concreto utilizadas en sistemas industrializados de construcción de edificaciones. *Universidad de los andes*, 60-74.
2. E. Box, G., Hunter, J., & G. Hunter, W. (2008). *Estadística para investigadores Diseño, innovación y descubrimiento*. Barcelona: Reverte.
3. Fernandez Rodriguez, F., & Ruilova Cueva, M. B. (2013). Programa para el diseño de mezclas de residuos agrícolas para el cultivo del hongo *Pleurotus Ostreatus*. *Tecnología química*, 128-136.
4. Gracia Alarcon, O. A., & Quesada Bolanos, G. (2012). Evaluación de una alternativa para la construcción de pisos industriales de gran formato en Colombia.
5. Gutierrez de Lopez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Colombia.
6. Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2004). *Análisis y Diseño de experimentos*. México: McGraw-Hill.
7. Gutierrez Roa, D. F., Ortega Perez, D. C., Bustamante Rúa, M. O., & Correa Espinal, A. A. (2014). Diseño de mezclas en formulaciones industriales. *DYNA*, 149-157.
8. Lopez Torres, R., Ramirez Guzman, M., Gonzalez Cossio, F., & Martinez Garza, A. (2010). Rene Lopez Torres, Martha Ramirez Guzman, Feliz Gonzalez Cossio, Angel Martinez Garza. *Agrociencia*, 579-592.
9. M. Guish, A., D. Pavioni, O., & Kessler, T. (2011). Aplicación del diseño de mezclas para la determinación del color en pastas comestibles. *Jornadas Nacionales del Color*, 1-78.
10. Montgomery, D. (2011). *Diseño y análisis de experimentos*. Mexico: Limusa Wiley.
11. Parra Maya, K. M., & Bautista Moros, M. A. (2010). Diseño de una mezcla de concreto utilizando residuos industriales y escombros. 1-115.