

Resistencia vs. relación A/C del concreto a tres edades y con dos tipos de cemento (UG y MP- AR)



Abstract

This study presents an analysis of behavior of the resistance of the W/C relations for the concrete (Type UG and MP-AR), using two national brands (A and B), with two types of fine aggregate, sand and stone dust, at the ages of 7, 28 and 56 days. This research was conducted between the Instituto Costarricense del Cemento y Concreto (ICCYC) and the Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO).

To do this work, the materials used in concretes have been characterized, also, the mix designs to use have been recommended, for their later use in performing the tests of compressive strength at three different ages. With the data obtained, a statistical analysis has been done for the different groups (treatments) of data generated with the purpose of establishing a relation between obtained results.

The behavior generated in the graph of resistance vs. W/C relation was the expected, evidencing the close relationship between these variables, being the W/C relation the most determinant element in the last resistance of the hardened concrete.

As supplementary information, the behavior of the development of concrete resistances with age has been graphed; which exhibited the change generated actually in this behavior. With the sample data analyzed, there was an increase of resistance to 20% at age 56 days instead of 10%, which is the one defined in the theory.

Keywords: Concrete, cement, resistance, W/C relation.

Resumen

El presente estudio muestra un análisis del comportamiento de la resistencia con respecto a las relaciones A/C para concretos, al usar cementos tipo UG y MP-AR, con dos marcas nacionales (A y B) y utilizar dos tipos de agregado fino, arena y polvo piedra, a las edades de 7, 28 y 56 días. Esta investigación fue realizada entre el Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto (ICCYC) y el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO).

Para ello, se caracterizaron los materiales utilizados en los concretos y se recomendó los diseños de mezcla a emplear, para posteriormente realizar los ensayos de la resistencia a la compresión a las tres distintas edades. Con los datos obtenidos se realizó un análisis estadístico para los diferentes grupos (tratamientos) de datos generados con el propósito de establecer relaciones entre los resultados obtenidos.

El comportamiento generado en las gráficas de resistencia vs. relación A/C era el esperado, y se comprobó la fuerza de relación entre estas variables. La relación A/C es el elemento más determinante en la resistencia última del concreto endurecido.

Como información suplementaria, se graficó el comportamiento del desarrollo de resistencia del concreto con la edad, lo cual expuso el cambio generado actualmente en este comportamiento. Esto debido a que para los datos muestrales analizados, se dio un aumento de resistencia promedio de hasta el 20% a la edad de 56 días, en lugar de 10% que es el que define la teoría.

Palabras clave: Concreto, cemento, resistencia, relación A/C.

Resistencia vs. relación A/C del concreto a tres edades y con dos tipos de cemento (UG y MP-AR)

GEIDEL ORLANDA ELIZONDO VALVERDE

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

Setiembre del 2013

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

| | |
|--------------------------------------|----|
| Prefacio..... | 1 |
| Resumen ejecutivo..... | 2 |
| Introducción | 3 |
| Limitaciones | 4 |
| Marco Conceptual | 5 |
| Metodología | 23 |
| Resultados | 39 |
| Análisis de los resultados | 66 |
| Conclusiones y Recomendaciones | 72 |
| Referencias..... | 74 |
| Apéndices | 76 |
| Anexos..... | 77 |

Prefacio

El Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto (ICCYC) realiza investigaciones y recopilaciones de información, que pone a disposición tanto de los profesionales y encargados de la construcción como del público en general, con el propósito de aportar conocimiento técnico que promocióne y estimule el buen diseño y construcción de obras.

Es en esta búsqueda donde se encuentra la carencia de información de referencia nacional, concerniente al comportamiento de la resistencia con respecto a la relación A/C, ya que en otros países sí se cuenta con esa información, obtenida a partir de investigaciones formales.

Si se tiene en cuenta que el factor más determinante en la resistencia del concreto es la relación A/C y que en obra es común que los obreros aumenten la trabajabilidad mediante la dosificación de más agua de la conveniente, se hace imprescindible contar con la información práctica y clara de las consecuencias asociadas.

Aunque, si bien es cierto conforme se agrega agua la plasticidad de la mezcla aumenta y por lo tanto se facilita su manipulación, también de manera simultánea se afecta negativamente la resistencia final de la mezcla, debido al mayor volumen de vacíos creados por el agua que se evapora durante el fraguado y endurecimiento del concreto.

Por lo tanto, surge la importancia de generar un análisis del comportamiento de la resistencia con respecto a las relaciones A/C, tanto para diferentes edades como para distintos tipos de cemento nacional. Esto debido a que aunque se cuenten con información teórica de tendencia, es necesario representarlo para las condiciones nacionales, utilizando agregados y cementos propios de nuestro país.

El desarrollo de las pruebas respectivas se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), ubicadas en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, donde se contó con el apoyo y la

colaboración del personal administrativo, técnicos y asistentes de laboratorio, entre otros.

Agradecimientos

Al Divino Niño Jesús, por escuchar mis oraciones, iluminarme y ayudarme a culminar una de mis metas.

A mis padres, Orlando Elizondo y Alicia Valverde, por su incondicional apoyo, confianza y amor a lo largo de mis estudios.

Asimismo, se les agradece tanto a los representantes del Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto (ICCYC), especialmente al ingeniero Jorge Solano, como a todas las personas involucradas del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), que con los aportes realizados permitieron alcanzar los objetivos planteados.

A los profesores Maikel Méndez y Andrés Araya, por los conocimientos estadísticos transferidos.

A mi profesor guía, Mauricio Araya Rodríguez, por su guía, su orientación y trasmisión de conocimientos, durante la elaboración de este trabajo.

Geidel Orlanda Elizondo Valverde

Resumen ejecutivo

Si se tiene en consideración que el factor más determinante en la resistencia última del concreto endurecido es la relación A/C, y que en obra es común que los obreros aumenten la trabajabilidad mediante la dosificación de más agua de la conveniente, se hace imprescindible contar con la información práctica y clara de las consecuencias asociadas.

Debido a la falta de información de referencia nacional relacionada con el tema, es que el Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto (ICCYC), en busca de aportar conocimiento técnico que promocióne y estimule el buen diseño y construcción de obras, plantea este estudio.

Su objetivo primordial fue analizar el comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C para tres edades de concreto y con dos tipos de cemento nacional (UG y MP-AR). Para ello, se caracterizaron los materiales que se utilizaron en los concretos y se recomendó los diseños de mezcla usados, además se realizaron los ensayos de la resistencia a la compresión a tres diferentes edades (7, 28 y 56 días). Por último se hizo un análisis estadístico para los diferentes grupos (tratamientos) de datos generados con el propósito de establecer relaciones entre los resultados obtenidos.

El desarrollo de las pruebas respectivas se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), ubicadas en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Para la fabricación de las mezclas de concreto, se trabajó con los agregados finos arena y polvo piedra y con una mezcla de agregado grueso que correspondió a 40% cuartilla y 60% cuarta.

Con respecto a los ensayos de caracterización realizados, así como la elaboración de las mezclas de concreto y fabricación de los cilindros, se utilizó como marco metodológico las normas ASTM (American Society of Testing Materials). Por otra parte, para la sección de estadística se usó el módulo de

análisis estadístico del programa Microsoft Excel 2007, así como las herramientas EasyFitXL y XL Toolbox habilitadas como complementos del mismo, en conjunto con el programa Minitab 16.

Los ensayos de caracterización comprobaron que los agregados eran de buena calidad, lo que permitió generar un buen parámetro a través del diseño de mezcla, y se obtuvieron resultados alrededor de los 200 kg/cm² de resistencia a la compresión.

Con los resultados obtenidos por medio de la falla a la compresión de los cilindros de concreto se graficó el comportamiento de la resistencia con respecto a la relación A/C, y se demostró la fuerza de relación entre estas variables. Sin importar los materiales utilizados, conforme aumenta la relación A/C, disminuye la resistencia a la compresión debido a que la calidad de la pasta disminuye, y por ende la del concreto.

Como información suplementaria se graficó el comportamiento del desarrollo de la resistencia con la edad, lo cual determinó que los cementos actuales fraguan más lento, debido al aumento en la cantidad de puzolanas con las que se fabrican, ya que estas actúan como retardantes. Esto influye directamente en el desarrollo de resistencia del concreto con la edad, y se presenta para los datos muestrales analizados un aumento de resistencia de hasta el 20% a la edad de 56 días, en lugar de 10% que es el porcentaje de resistencia mayor esperado con respecto a la edad de 28 días que define la teoría¹.

Concretos con cementos que fraguan más lento generan menos fisuras, lo que conlleva a que sean más densos. Esto mejora la resistencia, pero a mediano y largo plazo.

¹ (Kosmatka et al., 2004).

Introducción

Este estudio muestra los resultados correspondientes al análisis del comportamiento de la resistencia con respecto a la relación A/C para concretos, al usar cementos nacionales tipo UG y MP-AR, y utilizar dos tipos de agregado fino, arena y polvo piedra, a las edades de 7, 28 y 56 días. Se trabajó con las relaciones A/C de: 0,55; 0,65; 0,75; 0,85 debido por las limitaciones de trabajabilidad. Puesto que no se usaron aditivos bajo estas condiciones, es imposible compactar mezclas con una relación A/C menor a 0,55 correctamente, y por otra parte, mezclas con relación A/C mayor a 0,85 se vuelven muy fluidas, lo que trae como consecuencia que se filtre la mezcla en los moldes.

Debido a que en obra es común que los obreros aumenten la trabajabilidad mediante la dosificación de más agua de la conveniente, es importante poseer información práctica y clara de las consecuencias asociadas, representada para las condiciones nacionales, utilizando cementos y agregados propios de nuestro país. Esto ya que, si bien es cierto conforme se agrega agua la plasticidad de la mezcla aumenta y por lo tanto se facilita su manipulación, también simultáneamente se afecta negativamente la resistencia final del concreto, debido a que se genera mayor cantidad de vacíos por el agua que se evapora en el proceso de fraguado.

Se utilizaron agregados nacionales, que una vez realizados los ensayos de caracterización demostraron que tuvieron las características necesarias para realizar mezclas de concreto de calidad.

Posteriormente se realizaron los ensayos de la resistencia a la compresión a las tres distintas edades; con los resultados obtenidos se realizó un análisis estadístico para los diferentes grupos (tratamientos) de datos generados.

Primero se comprobó la normalidad por medio de la prueba Kolmogorov- Smirnov, que demostró que los valores de resistencia para cada tratamiento siguieron una distribución

normal, lo cual permitió realizar las pruebas paramétricas con libertad.

Posteriormente, se aplicó la prueba de análisis de varianza de uno y dos factores (ANOVA) para determinar si existieron o no diferencias significativas entre los promedios de los tratamientos estudiados.

La prueba Tukey permitió determinar entre cuáles combinaciones de tratamientos no existieron diferencias significativas entre los promedios.

Luego por medio de la prueba F se logró realizar un análisis de varianzas de dos muestras entre cada combinación analizada, en donde se comparó las varianzas de los tratamientos estudiados, con el fin de determinar si existían o no diferencias significativas entre las mismas.

Posteriormente se graficó el comportamiento de la resistencia con respecto a la relación A/C, en donde se presentan los promedios y no valores individuales de resistencia.

Además se graficó el comportamiento del desarrollo de la resistencia con la edad, consecuencia de la unión de los promedios de resistencia a las distintas edades analizadas (7, 28, 56 días).

Lo anterior con el fin último de cumplir con el objetivo general planteado para este estudio, el cual fue analizar las tendencias de comportamiento de resistencia vs. relación A/C para tres edades de concreto y con dos tipos de cemento nacional (Tipo UG y MP-AR).

Como objetivos específicos se propuso los siguientes:

- ✓ Caracterizar los materiales que se utilizaron en los concretos y recomendar los diseños de mezcla que se usaron.
- ✓ Realizar los ensayos de la resistencia a la compresión a tres diferentes edades.
- ✓ Realizar un análisis estadístico para los diferentes grupos de datos generados, con el propósito de establecer relaciones entre los resultados obtenidos.

Limitaciones

Para el diseño de mezcla y la fabricación de cilindros se contó con las siguientes limitaciones:

- ✓ Se realizaron fallas a tres edades (7, 28 y 56 días). Debido al factor del tiempo no se pudo prolongar la edad de falla para analizar el comportamiento de la resistencia a mayor edad.
- ✓ Se realizaron mezclas para cuatro distintas relaciones A/C (0,55; 0,65; 0,75, 0,85), con un tamaño de muestra ($n=6$). No se pudo efectuar más por el elemento del tiempo y la disponibilidad de equipo en el laboratorio.
- ✓ Se trabajó con este rango de relaciones A/C por las limitaciones de trabajabilidad. Debido a que no se usaron aditivos, bajo estas condiciones, mezclas con una relación A/C menor a 0,55 es imposible compactarlas correctamente, y por otra parte, mezclas con relación A/C mayor a 0,85 se vuelven muy fluidas, lo que trae como consecuencia que se filtre la mezcla en los moldes.
- ✓ Solo se consideró un tamaño máximo de agregado.

El análisis estadístico de los resultados se basa en lo estipulado por la norma ACI 214R-02, en las pruebas hechas por el módulo de análisis estadístico del programa Excel 2007 y el programa Minitab 16. Estas fuentes mostraron las siguientes deficiencias en los tamaños de las muestras:

- ✓ Para este proyecto se contó con 6 datos de resistencia por muestra, sin embargo la norma indica que se debe contar con por lo menos 30 para determinar la desviación estándar y el coeficiente de variación

(CV), o bien 15 pero se debe aumentar en un 15% la desviación estándar calculada.

- ✓ Con respecto a la variación inherente a la prueba se contaban con 6 datos de resistencia de cilindros compañeros, no obstante, la norma señala que son necesarios por lo menos 10 cilindros compañeros para determinar valores confiables de \bar{R} , necesario para el cálculo de la desviación estándar inherente a la prueba.
- ✓ En lo referente a la normalidad, debido a que los tamaños de las muestras son menores que 15 ($n=6$), se deben interpretar los valores de la prueba con precaución, según lo estipulado por el programa Minitab 16.
- ✓ En relación con el modelo de regresión lineal simple aplicado, se demostró a través del programa Minitab 16 que estadísticamente es significativa su correlación, pero el tamaño de la muestra es pequeña ($n=24$). Las muestras pequeñas no proveen un estimado muy preciso de la fuerza de la relación (R^2), para obtener un estimado preciso, se deben utilizar muestras más grandes (comúnmente 40 o más).

No obstante, a la luz de las limitaciones y en relación con lo establecido por la propia norma, es posible utilizar un muestreo menor, y se aspira a su vez a aumentar paulatinamente el tamaño de la muestra. Lo anterior, siempre y cuando se sea consistente en la composición y preparación de las mezclas.

Marco Conceptual

Fundamentos del concreto

Definición

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava, y se crea una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua².

Componentes

Las siguientes definiciones se fundamentan en la norma ASTM C-125³ y en el informe del comité ACI 116⁴.

Agregado

Es el material granular, tal como la arena, la grava, la piedra triturada o la escoria de acero de alto horno, la cual puede ser utilizada con un medio cementante para formar concreto o mortero de cemento hidráulico.

Agregado grueso

Se refiere a las partículas de agregado mayores de 4,75mm (Malla N°4).

Agregado fino

Se refiere a las partículas de agregado menores de 4,75mm (Malla N°4) pero mayores de 75µm (Malla N°200).

Grava

Es el agregado grueso que resulta de la desintegración natural y de la abrasión de la roca o del procesamiento de conglomerado de adherencia débil.

Arena

Es comúnmente utilizado para el agregado fino que resulta de la desintegración natural y de la abrasión de la roca o del procesado de la piedra caliza deleznable.

Piedra triturada

Es el producto que resulta del triturado industrial de piedras bola, de rocas, o de grandes pedruscos.

Polvo piedra

También llamado arena manufacturada, es producto de la fragmentación de roca por trituración o por impacto. Los tamaños corresponden a la fracción que pasa la malla de 4,75 mm (N°4) y se retienen en la de 75 µm (N°200).

Cemento

Es un material finamente pulverizado que no es en sí mismo conglomerante, sino que desarrolla

² (Kosmatka et al., 2004)

³ (ASTM C-125;1982)

⁴ (ACI 116;1982)

esta propiedad como resultado de la hidratación, es decir, por las reacciones químicas entre los minerales del cemento y el agua. Un cemento es llamado hidráulico cuando los productos de hidratación son estables en un medio acuoso. El cemento hidráulico más comúnmente usado para hacer concreto es el cemento portland.

Tipos de cemento⁵

Cemento Portland (tipo I-RTCR)

Cumple con las especificaciones físicas de la norma ASTM C-150, corresponde al cemento hidráulico producido al pulverizar clinker y una o más formas de sulfato de calcio como adición de molienda.

Cemento hidráulico modificado con puzolana (tipo MP-RTCR)

Cemento hidráulico que consiste en una mezcla homogénea de clinker, yeso y puzolana (y otros componentes minoritarios), producido por molienda conjunta o separada.

Cemento hidráulico modificado con escoria (tipo MS-RTCR)

Cemento hidráulico que consiste en una mezcla homogénea de clinker, yeso y escoria granulada de alto horno (y otros componentes minoritarios), producido por molienda conjunta o separada.

Cemento hidráulico de uso general (tipo UG-RTCR)

Cemento hidráulico que consiste en una mezcla homogénea de clinker, yeso y otros componentes minerales, producido por molienda conjunta o separada.

Modificaciones

Estos cementos pueden incluir las siguientes modificaciones:

- ✓ **A:** Cemento hidráulico con resistencia al congelamiento (mediante dispersión de burbujas de aire en el concreto producido).

- ✓ **AR:** Cemento hidráulico de alta resistencia inicial.
- ✓ **AS:** Cemento hidráulico de alta resistencia a los sulfatos.
- ✓ **BL:** Cemento blanco.
- ✓ **BH:** Cemento hidráulico de bajo calor de hidratación.
- ✓ **BR:** Cemento hidráulico de baja reactividad a los agregados reactivos, a los álcalis.
- ✓ **MH:** Cemento hidráulico de moderado calor de hidratación.
- ✓ **MS:** Cemento hidráulico de resistencia moderada a los sulfatos.

Cemento de albañilería, cemento para mortero

Usado principalmente en albañilería o en preparación de mortero, el cual consiste en una mezcla de cemento hidráulico o tipo Portland y un material que le otorga plasticidad (como caliza, cal hidráulica o hidratada) junto a otros materiales introducidos para aumentar una o más propiedades, tales como el tiempo de fraguado, trabajabilidad, retención de agua y durabilidad. Este cemento debe cumplir con la norma ASTM C-91 (cemento de albañilería) y ASTM C-1329 (cemento para mortero) en su última versión.

En el cuadro 1 se muestran los requerimientos físicos y las cantidades de los componentes principales para los diferentes tipos de cemento, y en el cuadro 2 se muestran los usos recomendados por cada tipo de cemento. Ambos cuadros de acuerdo con el reglamento técnico de cementos hidráulicos⁶.

⁵ (RTCR 383; 2004).

⁶ (RTCR 383; 2004).

CUADRO 1. REQUERIMIENTOS FÍSICOS Y COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS DISTINTOS TIPOS DE CEMENTO

| Requerimientos físicos | | | | | | | |
|---|-----------------------|---------|---------|---------|-------------|---------------|-------------|
| Tipo de cemento | Prueba ASTM aplicable | MP-RTCR | UG-RTCR | MS-RTCR | TIPO I-RTCR | TIPO -RTCR/AR | MP -RTCR/AR |
| Superficie específica, m ² /kg. (min.) | C204 | 1 | 1 | 1 | 280 | - | 1 |
| Finura pasante en malla 0.045 m/m (325) min. % | C430 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Cambio de longitud-Autoclave, máx. % | C151 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 |
| Tiempo de fragua, Prueba Vicat (2) | C191 | | | | | | |
| Inicial no menor del min. | | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Final no mayor del máximo. | | 420 | 420 | 420 | 375 | 375 | 420 |
| Resistencia a la compresión, min. MPa | C109 | | | | | | |
| 1 día | | - | - | - | - | 12 | 10 |
| 3 días | | 13 | 10 | 10 | 12 | 24 | 17 |
| 7 días | | 20 | 17 | 17 | 19 | - | - |
| 28 días | | 25 | 28(4) | 28(4) | 28(4) | | |
| Componentes principales de los cementos % en masa | | | | | | | |
| Clinker + yeso | | 50-90 | 50-95 | 20-34 | 95-100 | 95-100 | 50-90 |
| Caliza | | - | 6-350 | - | - | - | - |
| | | 6- | 6-350 | - | - | - | - |
| Minerales puzolánicos | | 500 | | | | | |
| Escoria granulada de alto horno | | - | 6-350 | 66-80 | - | - | - |
| Humo de sílice | | - | 0-10 | - | - | - | - |
| Otros | | 0-5 | 0-5 | 0-5 | 0-5 | 0-5 | 0-5 |

(1) Reportar los resultados del análisis de Blaine.
 Donde: **MP**= Modificado con puzolana **UG**=Uso general **MS**=Modificado con escoria **AR**= Alta resistencia inicial

CUADRO 2. PRINCIPALES APLICACIONES RECOMENDADAS

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

La pasta del concreto (materiales cementantes, agua y aire atrapado o aire incluido intencionalmente) constituye aproximadamente del 25 al 40% del volumen total del concreto.

Por otra parte, los agregados conforman aproximadamente del 60 al 75% del volumen total del concreto, de ahí radica la gran importancia de su selección. Estos deben poseer propiedades de resistencia mecánica adecuada, resistencia a la exposición y deben estar libres de cualquier material que pueda causar deterioro al concreto. También juega un papel importante la granulometría, entre más graduada sea esta, mayor acomodo de las partículas que conforman el concreto, lo que disminuye la cantidad de espacios vacíos en la mezcla, y aumenta el uso eficiente de la pasta.

La calidad del concreto depende de la calidad de sus componentes y la unión entre ellos. La figura 1 muestra un concreto fabricado adecuadamente, donde los agregados están rodeados completamente con la pasta. Se llena de esta manera los espacios vacíos.

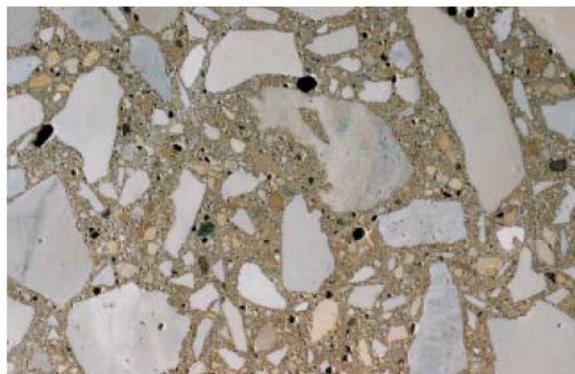


Figura 1. Sección transversal del concreto endurecido.⁷

El agua en el concreto

La cantidad de agua usada con relación con la cantidad de cemento (A/C) para la fabricación de mezclas de concreto, es sin duda el elemento más determinante en la resistencia última del concreto endurecido, sin importar el grupo de materiales y condiciones de curado.

Cuando se utiliza más agua de la necesaria, la calidad de la pasta disminuye, y por

ende la del concreto. De acuerdo con lo expuesto en la PCA⁸, las ventajas de la disminución de la cantidad de agua son:

- ✓ Aumento de la resistencia a la compresión y de la resistencia a flexión.
- ✓ Disminución de la permeabilidad y por ende disminución de la absorción, lo que provoca un aumento de la estanquidad (hermeticidad).
- ✓ Aumento de la resistencia a la intemperie.
- ✓ Mejor unión entre concreto y armadura.
- ✓ Reducción de la contracción (retracción, encogimiento) y de la fisuración (agrietamiento, fisuramiento).
- ✓ Menores cambios de volumen causado por el humedecimiento y el secado.

Estas ventajas son obtenidas únicamente si la mezcla se puede compactar adecuadamente, lo que permite que el aire atrapado sea expulsado y que no queden vacíos en la mezcla. Así se logra un concreto más denso, resistente y durable.

Tipos de concreto

Con base en lo expuesto por el libro del IMCYC⁹, el concreto se clasifica de acuerdo con su peso unitario y con base en su resistencia a la compresión en tres categorías.

| CUADRO 3. CLASIFICACIÓN CON BASE EN SU PESO UNITARIO | |
|--|---|
| Clasificación | Descripción |
| Concreto de peso normal | Contiene arena natural y grava o agregados de roca triturada, pesa aproximadamente 2400 kg/m ³ , es el más comúnmente utilizado para propósitos estructurales. |
| Concreto ligero | Para aplicaciones en donde se desea una relación más alta de resistencia contra peso, esto es posible usando ciertos agregados naturales que tienen una densidad de masa más baja, pesa menos de 1800 kg/m ³ . |
| Concreto pesado | Se utiliza, por ejemplo, para escudos contra radiación, es producido con agregados de alta densidad y pesa en general más de 3200 kg/m ³ . |

⁷ (Kosmatka et al., 2004).

⁸ (Kosmatka et al., 2004).

⁹ (Mehta y Monteiro, 1998).

CUADRO 4. CLASIFICACIÓN POR RESISTENCIA

| Clasificación | Descripción |
|----------------------------------|---|
| De baja resistencia | Menos de 20 MPa (204 kg/cm ²) de resistencia a la compresión. |
| Concreto de resistencia moderada | De 20 a 40 MPa (204 a 408 kg/cm ²) de resistencia a la compresión, es un concreto ordinario o normal, que se utiliza en la mayor parte de los trabajos estructurales. |
| Concreto de alta resistencia | Más de 40 MPa (408 kg/cm ²) de resistencia a la compresión, es utilizado para aplicaciones especiales. |

Concreto recién mezclado

El concreto recién mezclado debe ser plástico, flexible, con una consistencia capaz de ser moldeada con la mano.

En una mezcla plástica todas las partículas de los agregados se encuentran rodeadas de la pasta, para evitar la segregación.

Cuando se trabaja con relaciones A/C bajas, se debe tener cuidado de no perder esta propiedad, ya que es la que va a permitir que el concreto tome la forma de la formaleta que lo contiene y que una vez endurecido tenga la apariencia homogénea buscada no solo estéticamente sino estructuralmente, ya que evidencia la buena compactación del mismo.

Trabajabilidad

Cuando un concreto es fácil de colocar y compactar sin tener problemas de segregación, y se obtienen resultados adecuados en el acabado una vez endurecido, se habla de la propiedad de trabajabilidad en el concreto.

Según lo establecido en la PCA¹⁰, los factores que influyen en la trabajabilidad del concreto son:

¹⁰ (Kosmatka et al., 2004).

- ✓ El método y la duración del transporte.
- ✓ Cantidad y características de los materiales cementantes.
- ✓ Consistencia del concreto (asentamiento en cono de Abrams o revenimiento).
- ✓ Tamaño, forma y textura superficial de los agregados finos y gruesos.
- ✓ Aire incluido (aire incorporado).
- ✓ Cantidad de agua.
- ✓ Temperatura del concreto y del aire.
- ✓ Aditivos.

Como se mencionó anteriormente, la segregación, consistencia, movilidad y facilidad de acabado son propiedades relacionadas con la trabajabilidad de la mezcla de concreto. La consistencia es considerada una indicación de la trabajabilidad.

El revenimiento, medido por medio del asentamiento en el cono de Abrams, determina la consistencia de la mezcla. Un concreto de bajo revenimiento es una mezcla con consistencia rígida y seca, que puede presentar dificultades en la colocación y compactación, además de segregación de las partículas de agregado grueso. Esto no debe sugerir que un concreto con una consistencia muy húmeda sea muy trabajable, ya que se pueden generar vacíos y ocurrir segregación al quedar el agregado grueso en el fondo del molde o formaleta aún después de la compactación.

Es por estos motivos que la consistencia debe ser lo más seca posible para permitir la adecuada compactación.



Figura 2. Concreto con consistencia rígida (bajo revenimiento) en cono Abrams.¹¹

¹¹ (Kosmatka et al., 2004).

Compactación

La vibración mueve las partículas del concreto en estado plástico, recién mezclado, lo que permite el uso de mezclas más densas y rígidas, con mayor contenido de agregado grueso que de agregado fino.

La buena graduación de los componentes del concreto provoca que se requiera una menor cantidad de pasta (cemento y agua) necesaria para llenar los espacios vacíos de los agregados, ya que menor es el área superficial para ser cubierta por la misma.

El concreto con una adecuada granulometría ayuda a la facilidad de colocación y compactación, que a la larga se ve reflejada en durabilidad, calidad y economía. Por otra parte, la mala compactación induce concretos débiles, porosos y poco durables, que también pueden resultar en la corrosión temprana del refuerzo y baja resistencia a la compresión.



Figura 3. Concreto con buena compactación (superior) concreto con compactación pobre (inferior).¹²

¹² (Kosmatka et al., 2004).

Hidratación, tiempo de fraguado y endurecimiento

Las reacciones químicas entre los componentes de la pasta de concreto son conocidas con el nombre de hidratación, estas son las causantes de la calidad de la unión o adherencia de la pasta.

Los compuestos principales que desempeñan un papel importante en el proceso de hidratación son: silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y ferroatuminato tetracálcico, al igual que muchos otros compuestos.

Cuando el concreto se encuentra en estado endurecido, contiene poros llenos de agua y aire que no aportan resistencia alguna. La resistencia es aportada por las partes sólidas de la pasta, sobre todo en el silicato de calcio hidratado y en los compuestos cristalinos.

En las mezclas de concreto no debe usarse más agua que la necesaria para lograr una trabajabilidad adecuada (plasticidad), debido a que entre menos porosa sea la pasta de cemento, mayor será la resistencia en el concreto. Según (Kosmatka et al., 2004)¹³ incluso, la cantidad de agua usada es normalmente mayor que la necesaria para la hidratación completa del cemento. Aproximadamente se necesitan 0.4 gramos de agua por gramo de cemento para la hidratación completa del cemento. Sin embargo, la hidratación completa es rara en los concretos de las obras, debido a una falta de humedad y al largo periodo de tiempo (décadas) que se requiere para obtener la hidratación total.

Es ventajoso tener conocimiento de la cantidad de calor liberado por la hidratación del cemento, para tomar decisiones de acuerdo con el clima.

Lo que determina el tiempo de fraguado y endurecimiento es la velocidad de reacción entre el cemento y el agua (hidratación). Para lograr transportar y colocar el concreto correctamente, la reacción inicial debe ser lo suficientemente lenta.

El yeso presente en el cemento actúa como un regulador del fraguado inicial.

¹³ (Kosmatka et al., 2004).

Los factores que influyen en la velocidad de hidratación son los siguientes:¹⁴

- ✓ La finura del cemento.
- ✓ Aditivos.
- ✓ Cantidad de agua adicionada y temperatura de los materiales en el momento de la mezcla.

Concreto endurecido

Curado

El curado corresponde a la manutención de la temperatura y del contenido de humedad apropiados desde el momento de la colocación y el acabado del concreto, para que se permita el desarrollo de las propiedades ingenieriles deseadas en el concreto.

Este tiene una influencia inmediata sobre las propiedades del concreto endurecido, ya que un curado adecuado proporciona al concreto las propiedades de durabilidad, resistencia, impermeabilidad, resistencia al desgaste y estabilidad, entre otros.

De acuerdo con lo determinado por la PCA¹⁵, el aumento de la resistencia con la edad continúa siempre y cuando:

- ✓ El cemento no hidratado aún esté presente.
- ✓ El concreto permanezca húmedo o la humedad relativa del aire esté arriba de aproximadamente 80% (Powers, 1948).¹⁶
- ✓ La temperatura del concreto permanezca favorable.
- ✓ Haya suficiente espacio para la formación de los productos de hidratación.

Si la humedad relativa es inferior al 80%, o bien, el caso que no ocurre en nuestro país de que la temperatura del concreto baja a menos de 0°C, el concreto deja de ganar resistencia ya que la hidratación es interrumpida.

Como se muestra en la figura 4, la resistencia del concreto aumenta con la edad, siempre y cuando haya adecuada humedad y temperatura favorable para la hidratación del cemento.

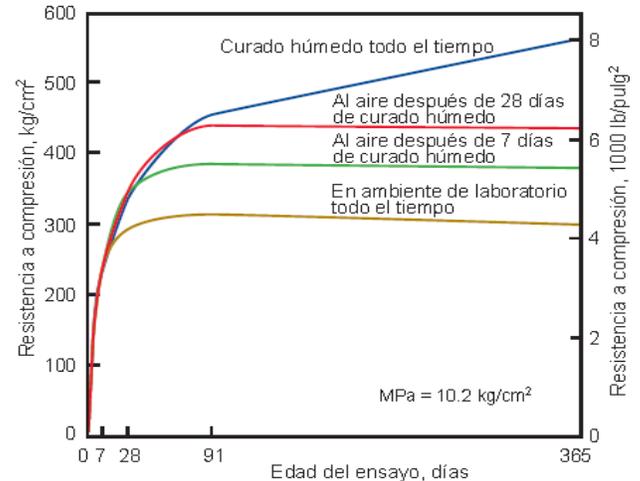


Figura 4. Relación entre el incremento de resistencia y curado¹⁷

Si después de un periodo de secado se vuelve a saturar el concreto, la hidratación comienza nuevamente, y aumenta por ende la resistencia de nuevo.

Sin embargo, lo preferible es que el proceso de curado sea continuo hasta que el concreto haya alcanzado la resistencia deseada, ya que una vez que el concreto se seca completamente es muy difícil volver a saturarlo. Máxime en los concretos usados en las estructuras internas, donde se secan completamente después del curado y no continúan desarrollando resistencia por la exposición al aire libre en un periodo largo de tiempo.

Velocidad de secado en el concreto

El hecho de que el concreto se seque no debe sugerir que ha alcanzado las propiedades físicas deseables, ya que cuando se seca deja de aumentar la resistencia. Es por medio de la hidratación que el concreto, o más específicamente el cemento en él, se endurece.

Para entender las propiedades físicas del concreto es útil el conocimiento de la velocidad de desecación, ya que si bien es cierto los concretos recién colados generalmente tienen abundancia de agua, a medida de que el secado progresa de la superficie al interior de la estructura, la hidratación y por tanto el

¹⁴ (Kosmatka et al., 2004).

¹⁵ (Kosmatka et al., 2004).

¹⁶ (Powers, 1948).

¹⁷ (Gonnerman y Shuman, 1928).

endurecimiento se efectúa únicamente hasta la profundidad donde la humedad del concreto sea superior al 80%.

La contracción por secado es la causa principal de fisuramiento, y el ancho de estas fisuras es función del grado de desecación.

Según (Hedenblad, 1998)¹⁸, la cantidad de humedad en el concreto depende de sus componentes, cantidad original de agua, condiciones de secado y el tamaño de la estructura de concreto.

En la velocidad de secado, el tamaño y la forma de los miembros juegan un papel importante, ya que por ejemplo las estructuras con área superficial grande en comparación con su volumen (pisos, por ejemplo) se secan con mayor rapidez, mientras que aquellas con gran volumen y pequeña área superficial (estribos de los puentes, por ejemplo).

Con base en lo expuesto por la PCA¹⁹, muchas otras propiedades del concreto endurecido también son afectadas por la cantidad de humedad, tales como:

- ✓ Elasticidad.
- ✓ Fluencia (flujo plástico, deformación deferida).
- ✓ Valor de aislamiento.
- ✓ Resistencia al fuego.
- ✓ Resistencia a abrasión.
- ✓ Conductividad eléctrica.
- ✓ Resistencia al congelamiento (congelación).
- ✓ Resistencia al descascaramiento y desmoronamiento.
- ✓ Resistencia a reactividad álcali-agregado.

Naturaleza de la resistencia del concreto

A la medida máxima de resistencia a carga axial de un espécimen de concreto se le conoce con el nombre de resistencia. Es expresada normalmente en medidas de (kg/cm²), mega pascales (MPa) o libras por pulgadas cuadradas (lb/pulg² o psi) a una edad de 28 días.

La resistencia a los 7 días normalmente se estima como 75% de la resistencia a los 28 días, y las resistencias a los 56 y 90 días son

aproximadamente 10% y 15% mayores que la resistencia a los 28 días.²⁰

La resistencia a la compresión requerida se designa con el símbolo f'_{cr} y la resistencia a compresión real f_c del concreto debe excederla.

La PCA establece que la resistencia a la compresión que el concreto logra (f_c) es función de:

- ✓ La relación A/C (o relación agua-materiales cementantes).
- ✓ De cuánto la hidratación ha progresado.
- ✓ Del curado y las condiciones ambientales.
- ✓ La edad del concreto.

La correspondencia entre resistencia y la relación A/C ha sido estudiada desde el final del siglo XIX y principio del siglo XX.²¹

En la siguiente figura tomada de la PCA muestra las resistencias a la compresión para una gran variedad de mezclas de concreto y relaciones A/C a los 28 días de edad.

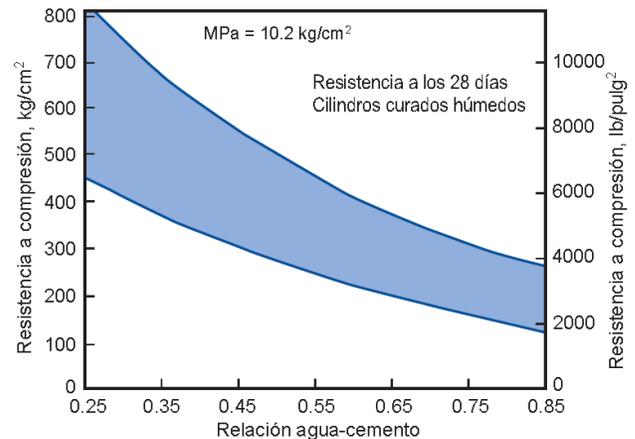


Figura 5. Variación de resistencias típicas para relaciones agua-cemento de concreto de cemento portland basadas en más de 100 diferentes mezclas de concreto moldeadas entre 1985 y 1999.²²

Como se puede observar, conforme aumenta la relación A/C disminuye la resistencia a la compresión, lo que afecta también a la resistencia a la flexión, tracción y la adherencia entre el concreto y el acero.

La determinación de la resistencia a la compresión es efectuada por medio de ensayos a la compresión de cilindros de concreto de 150

¹⁸ (Hedenblad, 1998).

¹⁹ (Kosmatka et al., 2004).

²⁰ (Kosmatka et al., 2004).

²¹ (Feret; 1897) y (Abrams, 1918).

²² (Kosmatka et al., 2004).

mm (6 pulg) de diámetro 300 mm (12 pulg) de altura.

Durabilidad

La propiedad que tiene el concreto de resistir a la acción del medio ambiente, al ataque químico a la abrasión, manteniendo sus propiedades ingenieriles, es llamada durabilidad.

Los factores que determinan la durabilidad y la vida útil en el concreto son²³:

- ✓ Los componentes del concreto y su proporción.
- ✓ Interacción entre los componentes del concreto.
- ✓ Los métodos de colocación.
- ✓ Curado.

Fundamentos de estadística

Parámetros y estadísticos²⁴

Estadística

Es la ciencia de reunir, organizar, resumir, analizar y hacer inferencias de datos.

Estadística Descriptiva

Incluye reunir, organizar, resumir, analizar y presentar los datos.

Estadística Inferencial

Incluye hacer inferencias, pruebas de hipótesis, determinar relaciones y hacer predicciones, con el fin de inferir propiedades o características de una población a partir de una muestra significativa.

| CUADRO 5. DEFINICIONES DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL | | |
|---|--|--|
| | Población | Muestra |
| Definición | Colección de elementos considerados | Parte o porción de la población seleccionada para su estudio |
| Características | Parámetros | Estadísticos |
| Símbolos | Tamaño de la población = N | Tamaño de la muestra = n |
| | Media de la población = μ | Media de la muestra = \bar{X} |
| | Desviación estándar de la población = σ | Desviación estándar de la muestra = S |

| CUADRO 6. PARÁMETROS POBLACIONALES Y ESTADÍSTICOS MUESTRALES | |
|--|-----------------------------|
| Población (Parámetros) | Muestra (Estadísticos) |
| Media (μ) | Promedio (\bar{X}) |
| Varianza (σ^2) | Varianza muestral (S^2) |
| Desv. Est. (σ) | Desv. Est. Muestral (S) |

Las ecuaciones de los parámetros y estadísticos son las siguientes:

Tendencia central

Media (μ):

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad \text{Ec(1)}$$

Promedio (\bar{X}):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \text{Ec(2)}$$

²³ (Kosmatka et al., 2004).

²⁴ (Villon, 1993).

Dispersión

Varianza (σ^2):

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N} \quad \text{Ec(3)}$$

Varianza Muestral (S^2):

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad \text{Ec(4)}$$

Desviación estándar (σ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N}} \quad \text{Ec(5)}$$

Desviación estándar muestral (S):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad \text{Ec(6)}$$

Coefficiente de variación (CV):

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \quad \text{Ec(7)}$$

Estimación Puntual

Estadístico calculado a partir de la información obtenida de la muestra y que se usa para estimar el parámetro poblacional

Pruebas o Estadísticos Paramétricos

Tienen mayor capacidad para detectar una relación real o verdadera entre dos variables, si es que la misma existe.

Variable numérica

Las variables de estudio (dependientes) deben ser medidas en una escala numérica.

Normalidad

Que los valores de la variable dependiente sigan una distribución normal.

Homocedasticidad

Que las varianzas de la variable dependiente en los grupos que se comparan sean aproximadamente iguales (homogeneidad de las varianzas).

Cuando los datos cumplen con los requerimientos, las pruebas estadísticas paramétricas exhiben su máximo poder.

Cuando estas pruebas se aplican a datos que no cumplen al menos uno de los requisitos señalados, pierden parte de su poder.

Si se puede utilizar una prueba paramétrica y se usa una no paramétrica, hay una pérdida de información.

Variable aleatoria

- ✓ Una variable aleatoria (X) es aquella cuyos valores no pueden predecirse con certeza antes de ocurrir el evento, dado que ocurren al azar.
- ✓ También se le conoce como variable estocástica.
- ✓ Pueden ser Continuas o Discretas.
- ✓ Su comportamiento se rige mediante la ley de probabilidades, la cual se basa en funciones de distribución probabilística.

Probabilidad y distribuciones²⁵

La probabilidad P(A) de un evento A, en un experimento aleatorio que tiene N_S resultados igualmente posibles, y de los cuales N_A son resultados favorables, está dada por:

$$P(A) = \frac{N_A}{N_S} \quad \text{Ec(8)}$$

Distribuciones

El comportamiento de una variable aleatoria se describe mediante su ley de probabilidades, que a su vez, se puede caracterizar mediante una función de probabilidad.

²⁵ (Villon, 1993).

Función de densidad

Permite determinar la probabilidad de que la variable aleatoria X tome un determinado valor de x_i dentro del rango definido en una variable discreta.

✓ Para una variable discreta:

$$0 \leq f(x_i) = P(X = x_i) \leq 1 \quad \text{Ec(9)}$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} f(x_i) = 1 \quad \text{Ec(10)}$$

$$P(a \leq x \leq b) = \sum_{i=a}^b f(x_i) \quad \text{Ec(11)}$$

✓ Para una variable continua:

$$0 \leq f(x_i) = P(X = x_i) \leq 1 \quad \text{Ec(12)}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad \text{Ec(13)}$$

$$P(a \leq x \leq b) = \int_b^a f(x)dx \quad \text{Ec(14)}$$

En donde: “ X ” variable aleatoria de la función; “ x ” valor particular que toma la variable aleatoria; “ $f(x)$ ” función de densidad (de probabilidad); “ $F(X)$ ” función acumulada (de distribución).

Función acumulada

Para el caso de una variable continua, $F(X)$ se representa por medio de la siguiente fórmula:

$$F(X) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx \quad \text{Ec(15)}$$

Donde: “ X ” variable aleatoria de la función; “ x ” valor particular que toma la variable aleatoria; “ $f(x)$ ” función de densidad (de probabilidad); “ $F(X)$ ” función acumulada (de distribución).

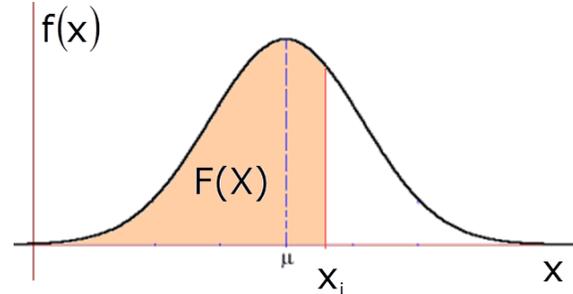


Figura 6. Representación gráfica de la función acumulada en el caso de una variable continua.

Además:

$$P(a < x \leq b) = F(b) - F(a) = \int_b^a f(x)dx \quad \text{Ec(16)}$$

Esto significa que la probabilidad del evento $a < x \leq b$ es igual al área bajo la curva de la función $f(x)$ entre $x=a$ y $x=b$.

De la misma forma, $P(x=a) = 0$, o sea, el área bajo la curva $f(x)$ de un punto es igual a cero.

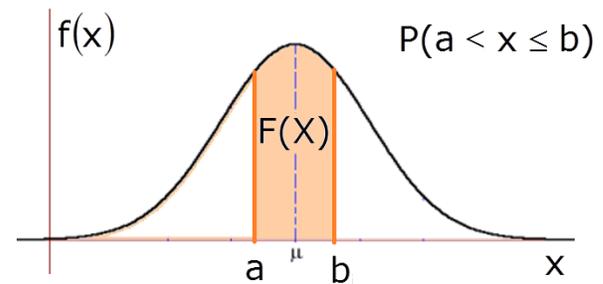


Figura 7. Representación gráfica de la función acumulada para un evento $a < x \leq b$.

Distribución normal²⁶

Es una de las distribuciones de probabilidad más utilizadas y que corresponde a una variable continua. También se la llama distribución Gaussiana.

En esta distribución no es posible calcular la probabilidad de un valor exacto, siempre se trabaja con rangos.

²⁶ (Devore, 2005).

En la práctica, muchas variables que se observan tienen distribuciones que solo se aproximan a la normal.

Esto es, las variables tienen propiedades que solo se acercan a las propiedades teóricas de la distribución normal.

Función de distribución

CUADRO 7. CARACTERÍSTICAS DE LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN

Dominio $(-\infty, +\infty)$.

Hay más probabilidad para los valores cercanos a la media μ .

Conforme se separa de μ , la probabilidad va decreciendo de igual forma a derecha e izquierda (es simétrica).

Conforme se separa de μ , la probabilidad va decreciendo dependiendo la desviación típica σ .

Función de densidad normal

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{Ec(17)}$$

En donde: “ π ” 3,14; “ e ” 2.71828; “ μ ” media de la población; “ σ ” desviación estándar de la población.

Función acumulada normal

$$F(X) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{Ec(18)}$$

Donde: “ π ” pi; “ e ” 2.71828; “ μ ” media de la población; “ σ ” desviación estándar de la población.

Propiedades

- ✓ El área bajo la curva aproximada de la media μ a una desviación estándar (1σ) es de aprox. 0.68; con 2σ es de aprox. 0.95 y con 3σ es de aprox. 0.99.

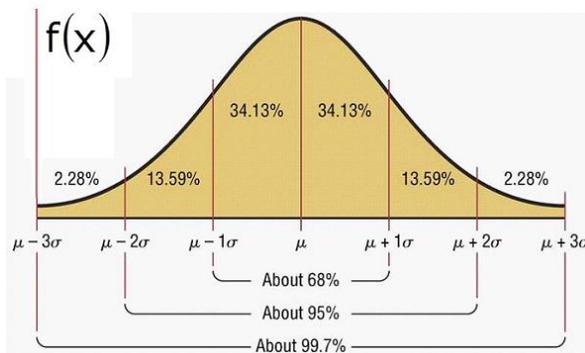


Figura 8. Representación gráfica del área aproximada bajo la curva de la media μ a distintas desviaciones estándar.

- ✓ La forma de la campana depende de los parámetros μ y σ .
- ✓ Tiene una única moda que coincide con su media y su mediana.
- ✓ La curva normal es asintótica al eje de X.
- ✓ Es simétrica con respecto a su media μ , por lo que existe una probabilidad de 50% de observar un dato mayor que la media, y 50% de observar uno menor.

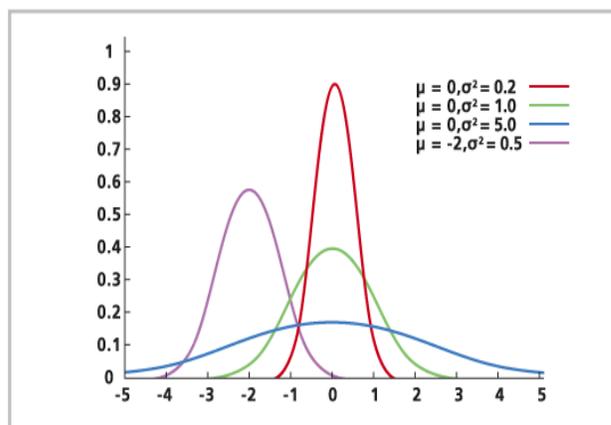


Figura 9. Distribuciones normales con igual μ y diferente σ .

Intervalos de confianza²⁷

Un intervalo de confianza es un conjunto de valores formado a partir de una muestra de datos, de forma que exista la posibilidad de que el parámetro poblacional ocurra dentro de dicho conjunto con una probabilidad específica. La

²⁷ (Moya, 1995).

probabilidad específica recibe el nombre de nivel de confianza.

Los factores que determinan el ancho del intervalo de confianza son:

- ✓ El tamaño de la muestra n .
- ✓ La varianza de la población, usualmente σ es estimada por s .
- ✓ El nivel de confianza deseado.

Interpretación de los ICs

Para un intervalo de confianza alrededor del 95%, se puede esperar que alrededor de 95% de estos intervalos de confianza contenga la media de la población.

Además, el 95% de las medias de las muestras para una muestra específica de tamaño dado estarán dentro de 1.96 desviaciones estándar de la población hipotética (Distribución Z).

Distribuciones t y Z²⁸

Similar a la Distribución Z, es una distribución continua, simétrica acampanada.

La distribución t es más achatada que la distribución normal. Conforme se incrementa el tamaño de la muestra, la distribución t se aproxima a la distribución normal estándar, pues los errores que se cometen al utilizar s para estimar σ disminuyen con muestras más grandes.

ICs para la media

Distribución Z

Si la desviación estándar es conocida o la muestra es mayor que 30 (100 actualmente).

$$\bar{X} \pm Z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec(19)}$$

Distribución t

Si la desviación estándar no es conocida y la muestra es menor que 30 (100 actualmente).

$$\bar{X} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec(20)}$$

²⁸ (Moya, 1995).

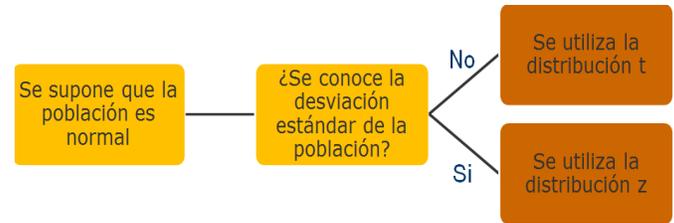


Figura 10. Digrama de escogencia de distribución.

Pruebas de hipótesis²⁹

Una hipótesis es una afirmación sobre una población, que puede someterse a pruebas al extraer una muestra aleatoria.

Se debe seleccionar el nivel de significancia (generalmente del 5% al 1%).

Tipos de pruebas

Paramétricas

Método donde la distribución de muestreo es conocida (generalmente Normal).

No paramétrica

Método que no requiere conocimiento de la distribución del muestreo estadístico (poco robustas en comparación con las paramétricas).

Hipótesis nula H_0

Afirmación acerca del valor de un parámetro poblacional.

$$H_0: \mu = \mu_0 \quad \text{Ec(21)}$$

$$H_0: \mu > \mu_0 \quad \text{Ec(22)}$$

Hipótesis alterna H_1

Afirmación que se aceptará si los datos muestrales aseguran que es falsa H_0 .

$$H_0: \mu \neq \mu_0 \quad \text{Ec(23)}$$

²⁹ (Moya, 1995).

$$H_0: \mu < \mu_0 \quad \text{Ec(24)}$$

Prueba de normalidad³⁰

Las menos conservativas son: Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling. La hipótesis planteada es la siguiente:

H_0 : Los datos del muestreo se ajustan a una distribución determinada.

H_1 : Los datos del muestreo NO se ajustan a esa distribución determinada.

Kolmogorov-Smirnov

Estadístico de contraste:

$$D = \sup_{1 \leq i \leq n} |F_n(x_i) - F_0(x_i)| \quad \text{Ec(25)}$$

Si $D \leq D_a \rightarrow$ Aceptar H_0 .

Si $D > D_a \rightarrow$ Rechazar H_0 .

Donde: " X_i " es el i -ésimo valor observado en la muestra (cuyos valores se han ordenado previamente de menor a mayor); " $F_n(x_i)$ " un estimador de la probabilidad de observar valores menores o iguales que x_i ; " $F_0(x)$ " la probabilidad de observar valores menores o iguales que x_i cuando H_0 es cierta.

Análisis de varianza de un factor (ANOVA)

Compara las medias de una variable continua en muestras para determinar si la diferencia entre las dos medias es significativa o no. Existen dos posibles fuentes de variación:

- ✓ El error aleatorio en la medida (no controlado).
- ✓ Factor controlado (tipo de método, diferentes condiciones, analista o laboratorio).

Una de las herramientas estadísticas más utilizadas que permite la separación de las diversas fuentes de variación es el análisis de la varianza (ANOVA)³¹. Este también puede utilizarse en situaciones donde ambas fuentes de variación son aleatorias.

³⁰ (Moya, 1995).

³¹ (Massart, 1997).

Cuando tengamos un factor, controlado o aleatorio, aparte del error propio de la medida, hablaremos del ANOVA de un factor.

Requerimientos

- ✓ Cada conjunto de datos debe ser independiente del resto.
- ✓ Los resultados obtenidos para cada conjunto deben seguir una distribución normal.
- ✓ Las varianzas de cada conjunto de datos no deben diferir de forma significativa.

Objetivo

Comparar los diversos valores medios para determinar si alguno de ellos difiere significativamente del resto.

Hipótesis

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n \quad \text{Ec(26)}$$

H_1 : Por lo menos dos de las μ son \neq .

Ecuaciones

Suma de cuadrados

$$SS_L = \sum_{k=1}^k n_k (\bar{x}_k - \bar{x})^2 \quad \text{Ec(27)}$$

$$SS_R = \sum_{k=1}^k \sum_{j=1}^{n_k} (x_{kj} - \bar{x}_k)^2 \quad \text{Ec(28)}$$

$$SS_T = \sum_{k=1}^k \sum_{j=1}^{n_k} (x_{kj} - \bar{x})^2 \quad \text{Ec(29)}$$

Varianza

$$MS_L = \frac{SS_L}{k-1} \quad \text{Ec(30)}$$

$$MS_R = \frac{SS_R}{N-k} \quad \text{Ec(31)}$$

$$MS_T = \frac{SS_T}{N-1} \quad \text{Ec(32)}$$

$$F = \frac{MS_L}{MS_R} \quad \text{Ec (33)}$$

Donde: “ SS_T ” suma de las diferencias al cuadrado de cada resultado individual respecto a la media de todos los resultados; “ SS_R ” mide las desviaciones entre los resultados individuales (x_{kj}) (donde j indica el número de repetición); “ SS_L ” mide las desviaciones entre los resultados medios de los lotes t el resultado medio global; “ MS ” cuadrado medio; “ k ” número de lotes; “ F ” prueba de hipótesis.

Prueba de Tukey

Cuando el interés fundamental es comparar promedios entre muestras y son múltiples las comparaciones que se necesitan, la prueba de Tukey es la más utilizada.

Se requiere que el número de repeticiones sea constante en todas las muestras de datos que se analicen.

$$W = q_{(t, glee, \alpha)} * \sqrt{\frac{CME}{r}} \quad \text{Ec (34)}$$

Donde: “ W ” diferencia mínima significativa a un cierto nivel de significancia (α); “ q ” amplitud total estudentizada, valor encontrado en tablas y que está en función de α ; “ t ” número de muestras de datos; “ g/lee ” grados de libertad del error experimental; “ CME ” promedio de los cuadrados del error experimental; “ r ” número de repeticiones de las medias de las muestras de datos a ser comparadas.

Prueba Fisher (F)

Compara las varianzas de una variable continua en muestras para determinar si la diferencia entre las dos varianzas es significativa o no.

En caso de dos distribuciones normales e independientes con varianzas iguales pero desconocidas podemos usar el estadístico F para contrastar la hipótesis de que las distribuciones tienen las mismas medias.³²

³² (Lipschutz y Schiller, 2000).

Hipótesis

$$H_0: \sigma_1 = \sigma_2 \quad \text{Ec (35)}$$

$$H_1: \sigma_1 \neq \sigma_2 \quad \text{Ec (36)}$$

Ecuación para la inversa de la transformación Fisher

$$X = \frac{e^{2y} - 1}{e^{2y} + 1} \quad \text{Ec (37)}$$

Correlación y regresión³³

Método que indica una relación matemática entre una variable dependiente y una o más variables independientes.

- ✓ Denota fuerza de relación entre variables y varía entre -1 y 1.
- ✓ Una correlación mayor que 0.75 o menor que -0.75 es considerada aceptable.
- ✓ Una correlación que cae entre -0.3 y 0.3 es considerada baja.

CUADRO 8. EVALUACIÓN DE LA REGRESIÓN

| Paramétrica | No paramétrica |
|--|-------------------------------|
| Coefficiente de correlación de Pearson | Rank de Spearman rank |
| Variables continuas Relación lineal | Ambas variables son continuas |

Coefficiente de correlación

Llamado también coeficiente de correlación de Pearson, se representa por r y es una medida que representa el grado de asociación entre dos variables cuantitativas X e Y .

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} \quad \text{Ec (38)}$$

³³ (Baird, 1991).

Donde:

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \text{Ec(39)}$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \text{Ec(40)}$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \text{Ec(41)}$$

Coeficiente de determinación

Es una medida de la bondad de ajuste del modelo de regresión hallado.

- ✓ El coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación.
- ✓ R^2 indica qué porcentaje de la variabilidad de la variable de respuesta Y es explicada por su relación lineal con X.

Regresión lineal simple

Se trata de predecir el comportamiento de Y usando X, entonces el modelo de regresión lineal simple es de la forma:

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon \quad \text{Ec(42)}$$

Donde: "Y" es la variable de respuesta o dependiente; "X" es la variable predictora o independiente; "α" es el intercepto de la línea con el eje Y; "β" es la pendiente de la línea de regresión; "ε" es un error aleatorio, con media 0 y varianza constante σ^2 .

Gráficas de residuos³⁴

Gráfica de Probabilidad Normal

Permite cotejar normalidad. Si los puntos están cerca de la línea recta, se concluye que existe normalidad.

Histograma de Residuos

También permite cotejar normalidad. Cuando el histograma es simétrico, con un único pico en el centro, se concluye que hay normalidad.

³⁴ (Manual usuario de Minitab 16, 2010).

Plot de residuales vs. valores ajustados

Se usa para detectar si hay datos anormales (alejados) tanto en la vertical como en la horizontal. También permite detectar si la varianza de los errores es constante con respecto a la variable de respuesta.

Plot de residuales vs. orden de observación

Es más específico para detectar qué observación es un dato anormal. Si se usan residuales estandarizados, entonces un dato con residual más allá de 2 o -2 es considerado un "outlier" en el sentido vertical.

Evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia del concreto³⁵

La magnitud de las variaciones en la resistencia de las muestras de prueba del concreto depende de lo adecuado del control de los materiales, de la fabricación del concreto y de la realización de las pruebas. Se puede encontrar el origen de las diferencias en la resistencia en dos fuentes fundamentalmente distintas, tal como se muestra en el cuadro 9:

- ✓ Las variaciones en las propiedades de la mezcla de concreto y de sus componentes.
- ✓ Las diferencias aparentes en la resistencia ocasionadas por las variaciones inherentes a la prueba.

³⁵ (ACI 214R-77; 1997).

CUADRO 9. PRINCIPALES FUENTES DE VARIACIÓN EN LA RESISTENCIA

| Variaciones en las propiedades del concreto | Discrepancias en los métodos de prueba |
|---|---|
| Cambios en la relación A/C: Deficiente control de agua. Excesiva variación de humedad en el agregado. Retemplado. | Procedimientos incorrectos en el muestreo. |
| Variaciones en el requerimiento de agua: Granulometría del agregado, forma de la partícula. Propiedades del cemento y del aditivo. Contenido de aire. Tiempo de entrega y temperatura. | Variaciones debidas a las técnicas de fabricación: Manejo y curado de cilindros recién fabricados. Moldes de calidad deficientes. |
| Variaciones en las características y proporciones de los ingredientes: Agregados Cemento Puzolanas Aditivos | Cambios en el curado: Variaciones en la T°. Humedad variable. Retrasos en el acarreo de los cilindros al laboratorio. |
| Variaciones en la transportación, colocación y compactación. | Deficientes procedimientos de prueba: Cabeceado de los cilindros. |
| Variaciones en la temperatura y en el curado. | Pruebas de compresión |

Variaciones en la resistencia

Variación inherente a la prueba

La variación en la resistencia del concreto dentro de una prueba única se obtiene al calcular la variación de un grupo de cilindros elaborados de una muestra de concreto tomada de una mezcla determinada. Es razonable suponer que una

mezcla de prueba de concreto es homogénea y que cualquier variación entre dos cilindros compañeros, elaborados de una muestra determinada, es ocasionada por las variaciones en la fabricación, el curado y la prueba.

CUADRO 10. FACTORES PARA CALCULAR LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR INHERENTE A LA PRUEBA

| Número de cilindros | d_2 | $1/d_2$ |
|---------------------|-------|---------|
| 2 | 1,128 | 0,8865 |
| 3 | 1,693 | 0,5907 |
| 4 | 2,059 | 0,4857 |

Adaptada de (Manual sobre el control de calidad de los materiales, ASTM).

No obstante, una única mezcla de prueba de concreto no proporciona los datos suficientes para el análisis estadístico y se requieren cilindros compañeros de, por lo menos, diez muestras de concreto a fin de establecer valores confiables para \bar{R} . La desviación estándar dentro de la prueba y el coeficiente de variación se calculan así:

El intervalo R se obtiene restando el menor de un conjunto de números del más alto del grupo. El intervalo dentro de la prueba se obtiene restando la menor de las resistencias del conjunto de cilindros promediada para formar una prueba a partir de la más alta del grupo.

$$S_1 = \frac{1}{d_2} * \bar{R} \quad \text{Ec(43)}$$

$$V_1 = \frac{S_1}{\bar{X}} * 100 \quad \text{Ec(44)}$$

Donde: “ S_1 ” desviación estándar dentro de la prueba; “ $1/d_2$ ” una constante dependiente de la cantidad de cilindros promedio para producir una prueba; “ \bar{R} ” intervalo promedio dentro de grupos de cilindros compañeros; “ V_1 ” coeficiente de variación dentro de la prueba; “ \bar{X} ” resistencia promedio.

Variaciones de mezcla a mezcla

Estas variaciones reflejan diferencias en la resistencia, que se pueden atribuir a variaciones en:

- ✓ Las características y las propiedades de los componentes.
- ✓ La dosificación, el mezclado y el muestreo.
- ✓ Las pruebas cuyo resultado no se ha deducido de cilindros compañeros.

Las fuentes de variación de mezcla a mezcla y dentro de la prueba están relacionadas con la variación total por la expresión siguiente:

$$S^2 = S_1^2 + S_2^2 \quad \text{Ec (45)}$$

Donde: "S" desviación estándar total; "S₁" desviación estándar dentro de la prueba; "S₂" desviación estándar de mezcla a mezcla.

Normas de control

El siguiente cuadro adaptado de ACI 214R-02,1997 muestra la variabilidad que puede esperarse de las pruebas de resistencia a la compresión en proyectos sujetos a diferentes grados de control.

| CUADRO 11. COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA DIFERENTES NORMAS DE CONTROL (%) | | | | | |
|--|-----------------|-----------|----------|-----------|-------------|
| Clase de operación | Excelente | Muy bueno | Bueno | Aceptable | Pobre |
| Pruebas de control en el campo | por debajo de 3 | de 3 a 4 | de 4 a 5 | de 5 a 6 | arriba de 6 |
| Mezclas de prueba de laboratorio | por debajo de 2 | de 2 a 3 | de 3 a 4 | de 4 a 5 | arriba de 5 |

Metodología

El siguiente proyecto de graduación se basa en los datos obtenidos experimentalmente por medio de los ensayos de caracterización, diseño de mezcla y falla a compresión de cilindros, desarrollados en el CIVCO, así como el análisis estadístico generado con el propósito de establecer relaciones entre los diferentes grupos de datos. Con respecto a los ensayos realizados,

se utilizó como marco metodológico las normas ASTM (American Society of Testing Materials). Por otra parte, para la sección de estadística se usó el módulo de análisis estadístico del programa Microsoft Excel 2007, así como las herramientas EasyFitXL y XL Toolbox habilitadas como complementos del mismo, en conjunto con el programa Minitab 16.

Diseño experimental

A continuación se presenta la matriz de ensayos que sirvió como cronograma para la fabricación de las mezclas de concreto.

Cemento tipo UG

| Edad: | 7 Días | | | |
|---------------------|----------|-------------|-------------|-----|
| Diseño 1 (Arena) | Cemento: | Marca A | Marca B | Día |
| | A/C=0,55 | 6 cilindros | 6 cilindros | L |
| | A/C=0,65 | 6 cilindros | 6 cilindros | K |
| | A/C=0,75 | 6 cilindros | 6 cilindros | M |
| | A/C=0,85 | 6 cilindros | 6 cilindros | J |
| Edad: | 28 Días | | | |
| Diseño 1 (Arena) | Cemento: | Marca A | Marca B | Día |
| | A/C=0,55 | 6 cilindros | 6 cilindros | L |
| | A/C=0,65 | 6 cilindros | 6 cilindros | K |
| | A/C=0,75 | 6 cilindros | 6 cilindros | M |
| | A/C=0,85 | 6 cilindros | 6 cilindros | J |
| Edad: | 56 Días | | | |
| Diseño 1 (Arena) | Cemento: | Marca A | Marca B | Día |
| | A/C=0,55 | 6 cilindros | 6 cilindros | L |
| | A/C=0,65 | 6 cilindros | 6 cilindros | K |
| | A/C=0,75 | 6 cilindros | 6 cilindros | M |
| | A/C=0,85 | 6 cilindros | 6 cilindros | J |

} 1 semana

Figura 11. Matriz utilizada para la fabricación de cilindros, durante la primera semana, usando cemento tipo UG.

| Edad: | 7 Días | | | |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-----|
| Diseño 2 (Polvo Piedra) | Cemento: | Marca A | Marca B | Día |
| | A/C=0,55 | 6 cilindros | 6 cilindros | L |
| | A/C=0,65 | 6 cilindros | 6 cilindros | K |
| | A/C=0,75 | 6 cilindros | 6 cilindros | M |
| A/C=0,85 | 6 cilindros | 6 cilindros | J | |
| Edad: | 28 Días | | | |
| Diseño 2 (Polvo Piedra) | Cemento: | Marca A | Marca B | Día |
| | A/C=0,55 | 6 cilindros | 6 cilindros | L |
| | A/C=0,65 | 6 cilindros | 6 cilindros | K |
| | A/C=0,75 | 6 cilindros | 6 cilindros | M |
| A/C=0,85 | 6 cilindros | 6 cilindros | J | |
| Edad: | 56 Días | | | |
| Diseño 2 (Polvo Piedra) | Cemento: | Marca A | Marca B | Día |
| | A/C=0,55 | 6 cilindros | 6 cilindros | L |
| | A/C=0,65 | 6 cilindros | 6 cilindros | K |
| | A/C=0,75 | 6 cilindros | 6 cilindros | M |
| A/C=0,85 | 6 cilindros | 6 cilindros | J | |

} 2 semana

Figura 12. Matriz utilizada para la fabricación de cilindros durante la segunda semana, usando cemento tipo UG.

Cemento tipo MP-AR

| Edad: | 7 Días | | | |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-----|
| Diseño 1 (Arena) | Cemento: | Marca A | Marca B | Día |
| | A/C=0,55 | 6 cilindros | 6 cilindros | L |
| | A/C=0,65 | 6 cilindros | 6 cilindros | K |
| | A/C=0,75 | 6 cilindros | 6 cilindros | M |
| A/C=0,85 | 6 cilindros | 6 cilindros | J | |
| Edad: | 28 Días | | | |
| Diseño 1 (Arena) | Cemento: | Marca A | Marca B | Día |
| | A/C=0,55 | 6 cilindros | 6 cilindros | L |
| | A/C=0,65 | 6 cilindros | 6 cilindros | K |
| | A/C=0,75 | 6 cilindros | 6 cilindros | M |
| A/C=0,85 | 6 cilindros | 6 cilindros | J | |
| Edad: | 56 Días | | | |
| Diseño 1 (Arena) | Cemento: | Marca A | Marca B | Día |
| | A/C=0,55 | 6 cilindros | 6 cilindros | L |
| | A/C=0,65 | 6 cilindros | 6 cilindros | K |
| | A/C=0,75 | 6 cilindros | 6 cilindros | M |
| A/C=0,85 | 6 cilindros | 6 cilindros | J | |

} 3 semana

Figura 13. Matriz utilizada para la fabricación de cilindros, durante la tercera semana, usando cemento tipo MP-AR.

| Edad: | 7 Días | | | |
|-------------------------------|----------|-------------|-------------|-----|
| Diseño 2 (Polvo Piedra) | Cemento: | Marca A | Marca B | Día |
| | A/C=0,55 | 6 cilindros | 6 cilindros | L |
| | A/C=0,65 | 6 cilindros | 6 cilindros | K |
| | A/C=0,75 | 6 cilindros | 6 cilindros | M |
| | A/C=0,85 | 6 cilindros | 6 cilindros | J |
| Edad: | 28 Días | | | |
| Diseño 2 (Polvo Piedra) | Cemento: | Marca A | Marca B | Día |
| | A/C=0,55 | 6 cilindros | 6 cilindros | L |
| | A/C=0,65 | 6 cilindros | 6 cilindros | K |
| | A/C=0,75 | 6 cilindros | 6 cilindros | M |
| | A/C=0,85 | 6 cilindros | 6 cilindros | J |
| Edad: | 56 Días | | | |
| Diseño 2 (Polvo Piedra) | Cemento: | Marca A | Marca B | Día |
| | A/C=0,55 | 6 cilindros | 6 cilindros | L |
| | A/C=0,65 | 6 cilindros | 6 cilindros | K |
| | A/C=0,75 | 6 cilindros | 6 cilindros | M |
| | A/C=0,85 | 6 cilindros | 6 cilindros | J |

4 semana

Figura 14. Matriz utilizada para la fabricación de cilindros, durante la cuarta semana, usando cemento tipo MP-AR.

Caracterización

Se caracterizaron los agregados gruesos cuarta y cuartilla y los finos arena y polvo piedra, para los diseños de mezcla y concretos utilizados, y se siguieron los siguientes procedimientos:

Reducción de muestras³⁶

Las muestras de agregados gruesos y finos se redujeron con el método de divisor mecánico:

- ✓ Se colocó la muestra en la bandeja distribuida uniformemente, de manera que pasaba aproximadamente la misma cantidad de material por cada abertura del divisor.
- ✓ La velocidad a la cual la muestra se introdujo fue la necesaria para que permitiera un flujo libre a través de las aberturas hasta los recipientes que se encontraban debajo.
- ✓ Se volvió a introducir la porción de la muestra de uno de los recipientes, las veces que fue necesario para reducir la

muestra hasta el tamaño adecuado para la realización de cada ensayo.



Figura 15. Reducción de muestra por método de divisor mecánico.

³⁶ (ASTM C-702; 2003).

Impurezas orgánicas en finos³⁷

- ✓ Se llenó la botella de vidrio con el agregado fino hasta la marca de 130 ml (4,5 onzas).
- ✓ Se agregó la solución de hidróxido de sodio hasta que el volumen de agregado y líquido alcanzó casi 200 ml (7 onzas).
- ✓ Se tapó la botella y agitó vigorosamente (un minuto es suficiente) y luego se dejó en reposo por 24 h.
- ✓ Se comparó el color del líquido sobre la muestra de agregado con el color patrón (N°3) de la tabla de colores Gardner, y se registró si es más clara, más oscura o igual al color de referencia.

En la siguiente figura se muestra la comparación de la muestra de agregado fino con el color patrón N°3.



Figura 16. Ensayo de impurezas orgánicas en agregados finos.

Materiales más finos malla N°200³⁸

Se determinó por lavado los materiales más finos que la malla N°200.

- ✓ Se secó la muestra a 110±5 °C hasta masa constante.

- ✓ Se determinó la masa lo más cercano a 0,1% de la masa.
- ✓ Se colocó el espécimen en un recipiente y se agregó la suficiente agua para cubrirlo.
- ✓ Se agitó vigorosamente para separar las partículas más finas que la malla N°200 de las partículas gruesas y para poner todo el material fino en suspensión.
- ✓ Se vertió el agua de lavado que contenía los sólidos suspendidos sobre las mallas anidadas.
- ✓ Se tuvo cuidado en evitar la decantación de partículas gruesas.
- ✓ Se agregó una segunda carga de agua al agregado en el recipiente.
- ✓ Se agitó y decantó como antes.
- ✓ Se repitió esta operación hasta que el agua de lavado fue clara.
- ✓ Se retornó el material retenido en las mallas anidadas.
- ✓ Se secó el agregado lavado en el horno para masa constante a una temperatura de 110±5 °C.
- ✓ Se determinó la masa lo más cercano a 0,1% de la masa original.
- ✓ Cantidad de material pasando la malla N°200:

$$\left(\frac{W_s - (W_{s, \text{lav}} - W_{\text{ret ch}})}{W_s} \right) * 100$$

Ec (46)

Donde: " W_s " peso seco (g); " $W_{s, \text{lav}}$ " peso seco lavado espécimen (g); " $W_{\text{ret ch}}$ " peso retenido en charola (g).

Análisis granulométrico³⁹

- ✓ Se secó la muestra a 110±5 °C hasta masa constante.
- ✓ Se seleccionó las mallas con las aberturas adecuadas para obtener la información requerida.
- ✓ Se colocaron las mallas en orden decreciente por tamaño de abertura de arriba abajo, como se muestra en la siguiente figura:

³⁷ (ASTM C-40; 2004).

³⁸ (ASTM C-117; 2004).

³⁹ (ASTM C-136; 2005).



Figura 17. Equipo utilizado en el ensayo de granulometría.

- ✓ Se coloraron las muestras en la malla superior.
- ✓ Se agitó las mallas manualmente en el caso de la granulometría para agregado grueso y para el agregado fino por medio de una tamizadora eléctrica, así como de manera manual.



Figura 18. Ensayo de granulometría, agitación de mallas manual.



Figura 19. Ensayo de granulometría, agitación de mallas por medio de tamizadora eléctrica.

- ✓ Se limitó la cantidad de material en una malla para que todas las partículas tengan contacto con las aberturas de la malla.
- ✓ Se continuó con el tamizado hasta cumplir la suficiencia de tamizado.
- ✓ Se verificó que la masa total del material después del tamizado no difiriera más de un 0,3% de la masa original seca, para cumplir con la aceptación de las especificaciones⁴⁰:

$$\%E = \frac{W_{seco} - \sum Ret}{W_{seco}} \quad Ec (47)$$

Donde: " W_{seco} " peso seco (g); " $\sum Ret$ " sumatoria de pesos retenidos en las mallas (g).

- ✓ Se calculó el porcentaje retenido, porcentaje retenido acumulado y porcentaje pasando lo más cercano a 0,1%.
- ✓ En el caso del agregado fino se incluyó la masa del material más fino que la malla N°200 por lavado en los cálculos para el análisis granulométrico, y se usó la masa total del espécimen seco antes del lavado como la base para calcular todos los porcentajes.

⁴⁰ (ASTM C-136; 2005).

- ✓ Se calculó en el caso del agregado fino el módulo de finura, sumando los porcentajes totales de material en la muestra que sea más grueso que cada una de las siguientes mallas (porcentaje retenido acumulado), y dividida la suma por 100. Mallas: 150mm (N°100), 300mm (N°50), 60mm (N°30), 1,18mm (N°16), 2,36mm (N°8), 4,75mm (N°8), 9,5mm (3/8”).

Pesos unitarios y vacíos⁴¹

Suelto

- ✓ Se llenó el recipiente por encima de su capacidad, al utilizar una cuchara de pulpero y descargar el agregado desde una altura máxima de 50mm con respecto al borde superior del recipiente.



Figura 20. Llenado de recipiente, ensayo peso unitario suelto.

- ✓ Se tomaron precauciones para prevenir la segregación de partículas.
- ✓ Se niveló la superficie con los dedos y con la ayuda de un enrasador de manera que se compensaron las salientes de las partículas de agregados con los vacíos que quedaron entre los mismos con respecto al borde superior del recipiente.



Figura 21. Nivelación de superficie con enrasador, ensayo peso unitario suelto.

- ✓ Se pesó el molde y su contenido y se registró el peso neto del material.



Figura 22. Pesado de molde con agregado fino, ensayo peso unitario suelto.

- ✓ El peso neto del material dividido entre el volumen del molde da como resultado el peso unitario suelto del agregado:

$$P_{\text{unitario suelto}} = \frac{W_{\text{material}}}{V_{\text{molde}}} \quad \text{Ec (48)}$$

Donde: “ W_{material} ” peso neto del material (kg); “ V_{molde} ” volumen del molde (m^3).

⁴¹ (ASTM C-29; 1997).

Compactado

- ✓ Se llenó el recipiente hasta un tercio de su capacidad y se niveló el agregado con los dedos.
- ✓ Se compactó la capa con 25 golpes uniformemente distribuidos sobre la superficie.
- ✓ Se llenó el recipiente hasta dos tercios de su capacidad, y se niveló y compactó como en el paso anterior.



Figura 23. Compactación de agregado grueso, ensayo peso unitario compactado.

- ✓ Se colocó una tercera capa en el recipiente, a más de su capacidad, se niveló y compactó.
- ✓ Se emparejó la superficie con los dedos y con la misma varilla, de manera que se compensaron los salientes de las partículas de agregado con los vacíos que quedaron entre los mismos con respecto al borde superior del recipiente.



Figura 24. Nivelación de superficie con varilla, ensayo peso unitario compactado.

- ✓ Al compactar la primera capa no se permitió que la varilla golpeará fuertemente el fondo del recipiente. Para la segunda y tercera capa se usó únicamente la fuerza necesaria para que la varilla pasara hasta la capa anterior del agregado.
- ✓ Se pesó el molde y su contenido, y se registró el peso neto del material.



Figura 25. Pesado de molde con agregado grueso, ensayo peso unitario compactado.

- ✓ El peso neto del material dividido entre el volumen del molde da como resultado el peso unitario compactado con barra de acero del agregado:

$$P_{\text{unitario compactado}} = \frac{W_{\text{material}}}{V_{\text{molde}}} \text{Ec(49)}$$

Donde: “ W_{material} ” peso neto del material (kg); “ V_{molde} ” volumen del molde (m^3).

Contenido de vacíos

El porcentaje de vacíos se determinó con la siguiente ecuación:

$$\% \text{vacíos} = \frac{(A*W) - B}{A*W} * 100 \quad \text{Ec (50)}$$

Donde: “ A ” gravedad específica bruta del agregado; “ B ” peso unitario del agregado en (kg/m^3); “ W ” densidad del agua en (kg/m^3).

Ensayo de abrasión⁴²

Se determinó la resistencia a la degradación del agregado grueso por abrasión e impacto en la máquina Los Ángeles:

- ✓ Se escogió el tipo de graduación a ensayar de acuerdo con la granulometría del agregado, ya que debe ser la que más represente al material.
- ✓ Se lavó y secó la muestra al horno a $110 \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$.
- ✓ Se colocó la masa de la muestra y la carga correspondiente en la Máquina de los Ángeles.



Figura 26. Masa de muestra y carga, ensayo de abrasión.

⁴² (ASTM C-131; 2003).

- ✓ Se rotó la máquina a una velocidad de 30 a 33 rev/min por 500 revoluciones.



Figura 27. Máquina Los Ángeles, ensayo de abrasión.

- ✓ Después de las revoluciones, se descargó el material.



Figura 28. Descarga de material, ensayo de abrasión.

- ✓ Se realizó una separación preliminar del material por la malla N°12.
- ✓ Se lavó el material grueso en la malla N°12.
- ✓ Se secó el material en el horno a $110 \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ hasta masa constante.
- ✓ Se determinó la masa seca lo más cercano a 1,0 g.
- ✓ Se determinó el porcentaje de abrasión o desgaste:

$$\% \text{ desgaste} = \left(\frac{W_{\text{inicial}} - W_{\text{final}}}{W_{\text{inicial}}} * \right) 100 \text{ Ec (51)}$$

Donde: “ $W_{inicial}$ ” peso inicial de la muestra (g); “ W_{final} ” peso final de la muestra (g).

Gravedad específica y absorción

Agregado grueso⁴³

- ✓ Se secó la muestra en un recipiente adecuado hasta masa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C.
- ✓ Se dejó enfriar hasta que pudo ser manipulada, se cubrió con agua y se dejó reposar de 24 ± 4 horas.
- ✓ Se removió la muestra del agua y se rodó el material en una tela larga y absorbente hasta que el agua visible (brillo) se eliminó. Las partículas grandes fueron secadas individualmente.



Figura 29. Condición saturada superficie seca, ensayo de gravedad específica agregado grueso.

- ✓ Se determinó la masa de la muestra en la condición saturada superficie seca al 0,05% más cercano.
- ✓ Inmediatamente después de determinar la masa, se colocó la muestra en condición saturada superficie seca en un recipiente y se determinó su masa sumergida en agua a 23 ± 2 °C al 0,05% más cercano.

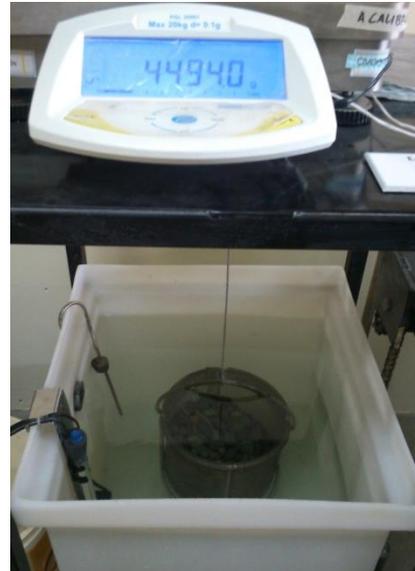


Figura 30. Masa sumergida en agua a 23 ± 2 °C, ensayo de gravedad específica agregado grueso.

- ✓ Se tuvo cuidado de remover todo el aire atrapado al sacudir el recipiente antes de pesar.
- ✓ Se secó la muestra a 110 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante, se dejó enfriar a temperatura ambiente de 1 a 3 horas hasta que el agregado pudo ser manipulado sin dificultad y se determinó su masa al 0,05% más cercano.
- ✓ Se determinó la gravedad específica bruta, la gravedad específica saturada superficie seca y la gravedad específica aparente, así como el porcentaje de absorción con la siguientes fórmulas:

$$G_{bs} = \frac{A}{(B-C)} \quad \text{Ec (52)}$$

Donde: “ G_{bs} ” gravedad específica bruta; “ A ” peso seco de la muestra (g); “ B ” peso saturado superficie seca (g); “ C ” peso de la muestra sumergida en agua (g).

$$G_{sss} = \frac{B}{(B-C)} \quad \text{Ec (53)}$$

Donde: “ G_{sss} ” gravedad específica bruta saturada superficie seca “ B ” peso saturado superficie seca (g); “ C ” peso de la muestra sumergida en agua (g).

⁴³ (ASTM C-127; 2004).

$$G_{ba} = \frac{A}{(A-C)} \quad \text{Ec (54)}$$

Donde: “ G_{ba} ” gravedad específica aparente; “ A ” peso seco de la muestra (g); “ C ” peso de la muestra sumergida en agua (g).

$$\%Abs = \left[\left(\frac{B-A}{A} \right) \right] * 100 \quad \text{Ec (55)}$$

Donde: “ $\%Abs$ ” porcentaje de absorción; “ A ” peso seco de la muestra (g); “ B ” peso saturado superficie seca (g).

Agregado fino⁴⁴

- ✓ Se pesó y registró la masa con 0,1 g de precisión.



Figura 31. Determinación del punto saturado superficie seca, ensayo de gravedad específica agregado fino.

- ✓ Se llenó el picnómetro 500±10 g de agregado en condición saturada superficie seca y se llenó el recipiente hasta un 90% de su capacidad.
- ✓ Manualmente se agitó, giró e invirtió el picnómetro con el fin de eliminar las burbujas de aire.



Figura 32. Eliminación de burbujas de aire por medio de agitación, ensayo de gravedad específica agregado fino.

- ✓ Se ajustó la temperatura del agua a 23±2 °C, se terminó de llenar el picnómetro hasta la marca de calibración. Se determinó la masa del picnómetro más el agua y la muestra.



Figura 33. Ajuste de temperatura a 23 °C por medio de baño maría, ensayo de gravedad específica agregado fino.

- ✓ Se usó la punta de una servilleta de papel para eliminar la espuma y las burbujas de aire dentro del picnómetro.
- ✓ Posteriormente se removió el agregado fino del picnómetro, la masa se secó a una temperatura constante de 110±5 °C; luego se dejó enfriar a temperatura ambiente por 1±0.5 h y se pesó la muestra.

⁴⁴ (ASTM C-128; 2004).

- ✓ Se determinó la masa del picnómetro lleno hasta la marca de calibración con agua a 23 ± 2 °C.
- ✓ Se realizaron los siguientes cálculos:

$$G_{bs} = \frac{A}{(B+D-C)} \quad \text{Ec (56)}$$

Donde: “ G_{bs} ” gravedad específica bruta; “ A ” peso seco de la muestra (g); “ B ” peso del picnómetro lleno de agua (g); “ C ” peso del picnómetro, más muestra, más agua (g); “ D ” peso del agregado superficie saturada seca en (g).

$$G_{sss} = \frac{D}{(B+D-C)} \quad \text{Ec (57)}$$

Donde: “ G_{sss} ” gravedad específica bruta saturada superficie seca; “ B ” peso del picnómetro lleno de agua (g); “ C ” peso del picnómetro, más muestra, más agua (g); “ D ” peso del agregado superficie saturada seca en (g).

$$G_{ba} = \frac{A}{(B+A-C)} \quad \text{Ec (58)}$$

Donde: “ G_{ba} ” gravedad específica aparente; “ A ” peso seco de la muestra (g); “ B ” peso del picnómetro lleno de agua (g); “ C ” peso del picnómetro, más muestra, más agua (g).

$$\%Abs = \left[\left(\frac{D-A}{A} \right) \right] * 100 \quad \text{Ec (59)}$$

Donde: “ $\%Abs$ ” porcentaje de absorción; “ A ” peso seco de la muestra (g); “ D ” peso del agregado superficie saturada seca en (g).

Corrección para polvo piedra

Para el agregado fino polvo piedra se hizo una corrección granulométrica en la malla N°4, con el objetivo de eliminar el exceso de material grueso y acercar su granulometría a los límites establecidos por INTE 06-01-02-09.

- ✓ Se determinó un nuevo peso de la muestra, mediante la siguiente fórmula⁴⁵:

$$\%Pas_A * PM = \%Pas_{esp} * NP \quad \text{Ec (60)}$$

Donde: “ $\% Pas_A$ ” porcentaje pasando acumulado; “ PM ” peso de la muestra (g); “ $\% Pas_{esp}$ ” porcentaje pasando especificado; “ NP ” nuevo peso (g).

- ✓ Con el peso retenido modificado y el nuevo peso (NP.), se recalcularon los valores de peso retenido, porcentaje retenido, porcentaje retenido acumulado y % pasando.
- ✓ Se volvió a realizar todas las pruebas de caracterización de materiales anteriormente mencionadas para el agregado polvo de piedra corregido en la malla N°4.

Se mezcló el agregado grueso en una proporción de 40% cuartilla y 60% cuarta con el objetivo de trabajar con un único agregado grueso en el diseño y elaboración de las mezclas de concreto. Para esta mezcla se volvió a realizar todas las pruebas de caracterización de materiales.

Diseño de Mezcla

Se realizó un diseño de mezcla para cada agregado fino, arena y polvo piedra respectivamente, como guía para determinar una proporción. Ya que los resultados obtenidos para cada agregado no variaron significativamente, se estipuló una única proporción, usando una dosificación por peso para mayor control.

El único factor que se alteró para cada mezcla fue la cantidad de agua. Se usaron las relaciones A/C de 0,55; 0,65; 0,75 y 0,85 por motivos de trabajabilidad y moldeabilidad.

Lo anterior con el fin último de obtener las tendencias de comportamiento de la resistencia a la compresión del concreto para las distintas relaciones A/C, con dos tipos de cemento UG y MP-AR, usando dos marcas A y B.

Para realizar los diseños de mezcla se siguieron los siguientes pasos. Todas las tablas a las que se hace mención se encuentran en ACI 211.1-91; 2002⁴⁶.

- ✓ Se determinó el revenimiento a utilizar de acuerdo con la tabla A1.5.3.1.

⁴⁵ (Muñoz, 1998).

⁴⁶ (ACI 211.1-91; 2002).

- ✓ De acuerdo con los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados, se definió el tamaño máximo de agregado.
- ✓ Se realizó la estimación del agua de la mezcla y del contenido de aire con base en el tamaño máximo de agregado y el revenimiento a emplear, según la tabla A1.5.3.3.
- ✓ Se determinó un coeficiente de variación según el tipo de dosificación que se empleó, así como al control de calidad que se llevó en la elaboración de la mezcla.
- ✓ Se estableció el factor de importancia de la obra; este dato junto con el coeficiente de variación determinó el factor de seguridad a usarse para el cálculo de la resistencia a la compresión requerida a los 28 días.

$$F'_{cr} = FS * F'_c \quad \text{Ec (61)}$$

Donde: “ F'_{cr} ” resistencia a la compresión requerida a los 28 días (MPa); “ F'_c ” resistencia a la compresión a los 28 días; “ FS ” factor de seguridad.

- ✓ De acuerdo con la resistencia a la compresión requerida a los 28 días, se determinó la relación A/C con la tabla A1.5.3.4(a).
- ✓ Para la relación agua/cemento, se calculó el peso del cemento y el volumen del mismo, mediante las siguientes fórmulas:

$$P_s = \frac{P_w}{A/C} \quad \text{Ec (62)}$$

Donde: “ P_s ” peso del cemento (kg); “ P_w ” peso del agua (kg); “ A/C ” relación agua/cemento.

$$V_s = \frac{P_s}{G_s * \gamma_w} \quad \text{Ec (63)}$$

Donde: “ P_s ” peso del cemento (kg); “ V_s ” volumen del cemento (m^3); “ γ_w ” densidad del agua (kg/m^3); “ G_s ” del cemento.

- ✓ De acuerdo con los datos de tamaño máximo de agregado, así como el módulo de finura (MF), se determinó el volumen de agregado grueso por unidad de

volumen de concreto interpolado en la tabla A1.5.3.6.

- ✓ Se calculó el peso de agregado grueso y el volumen de este, por medio de las siguientes fórmulas:

$$\gamma_B = \frac{\gamma_T}{1+W} \quad \text{Ec (64)}$$

Donde: “ γ_t ” peso unitario masivo seco envarillado del agregado grueso (kg/m^3); “ w ” humedad del agregado; “ γ_B ” densidad del agregado grueso (kg/m^3).

$$P_s = \gamma_B * V_m \quad \text{Ec (65)}$$

Donde: “ P_s ” peso del agregado grueso (kg); “ γ_B ” densidad del agregado grueso (kg/m^3); “ V_m ” volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto (m^3).

$$V_B = \frac{P_s}{G_{BS} * \gamma_w} \quad \text{Ec (66)}$$

Donde: “ P_s ” peso del agregado grueso (kg); “ V_B ” volumen del agregado grueso (m^3); “ γ_w ” densidad del agua (kg/m^3); “ G_{BS} ” gravedad específica bruta del agregado grueso.

- ✓ Posteriormente se calculó el contenido de agregado fino, usando las siguientes fórmulas:

$$1 - (V_w + V_s + V_{ag. g.} + V_a) = V_{ag. fino} \quad \text{Ec (67)}$$

Donde: “ V_w ” volumen del agua (m^3); “ V_s ” volumen del cemento (m^3); “ $V_{ag. g.}$ ” volumen de agregado grueso (m^3); “ V_a ” volumen de aire (m^3).

$$P_s = V_B * G_{BS} * \gamma_w \quad \text{Ec (68)}$$

Donde: “ P_s ” peso del agregado fino (kg); “ γ_B ” densidad del agregado grueso (kg/m^3); “ V_B ” volumen del agregado fino (m^3); “ γ_w ” densidad del agua (kg/m^3); “ G_{BS} ” gravedad específica bruta del agregado fino.

Fabricación de cilindros⁴⁷

Para la elaboración de la mezcla de concreto por medio de la batidora se siguió el siguiente procedimiento:

- ✓ Se colocó en la batidora el agregado grueso y parte del agua de mezclado.
- ✓ Se comenzó a mezclar y luego se colocó el agregado fino.
- ✓ Después de mezclar los agregados, se adicionó el cemento y se mezcló con cuidado de no perderlo.
- ✓ Luego se agregó el resto del agua y se mezcló por 3 min, se permitió que la mezcla repose durante 3 min y se evitó la evaporación, y luego se mezcló por 2 min más.
- ✓ Se descargó el concreto en un carretillo limpio y ligeramente húmedo, y se mezcló con una pala para asegurar que la mezcla siguiera uniforme.

Para el moldeo de los cilindros de concreto que fueron utilizados para definir la resistencia a la compresión del concreto a las edades de 7,28 y 56 días para las relaciones agua/cemento de 0,55; 0,65; 0,75 y 0,85, se siguieron los siguientes pasos:

- ✓ Se aseguró que los moldes de cilindros estuvieran limpios y que la superficie interior estuviera aceitada.
- ✓ Se colocó el concreto en capas de igual volumen (3 capas).
- ✓ Se compactó con el extremo redondeado de la varilla, 25 golpes.
- ✓ Se distribuyó las penetraciones uniformemente.
- ✓ Se penetró 25 mm (1") la capa anterior (excepto la primera).
- ✓ Se golpeó cada capa ligeramente con el mazo (10 a 15 veces), con el objeto de permitir la salida de las burbujas grandes de aire.



Figura 34. Eliminación de burbujas de aire de 1era capa de concreto usando mazo, llenado de 2da capa de concreto.

- ✓ Se eliminó el exceso de concreto o se agregó si hizo falta durante la compactación de la última capa.
- ✓ Por último se enrasó utilizando la barra compactadora y la llaneta.



Figura 35. Enrasado de 3ra capa de concreto utilizando barra compactadora, técnico de laboratorio.

- ✓ Los cilindros de concreto permanecieron en el mismo lugar durante las 24 h que siguieron a la elaboración de los mismos, se retiraron cuidadosamente de los moldes y fueron transportados directamente a la cámara húmeda.

⁴⁷ (ASTM C-192; 2012).



Figura 36. Cilindros de concreto.



Figura 37. Cámara húmeda.

Análisis estadístico

En el proceso de fabricación del concreto y los cilindros se controlaron las variables de:

- ✓ Relación A/C (0,55; 0,65; 0,75; 0,85).
- ✓ Tipo de agregado fino (arena o polvo piedra).
- ✓ Edad de falla del cilindro (7, 28 y 56 días).
- ✓ Tipo de cemento (UG o MP-AR).
- ✓ Marca de cemento (A o B).

Lo anterior, con el propósito de disminuir las diferencias aparentes en la resistencia, ocasionadas por las variaciones inherentes a la prueba, es decir el error no controlado. Este error se debe a aquellos factores que no se pudieron controlar y que influyeron en el resultado final de la resistencia.

Un tratamiento se define como la resistencia promedio de todos los cilindros de la misma edad elaborados de una muestra tomada de una única mezcla de concreto. Para desarrollar el análisis estadístico se dividieron las variables controladas mencionadas anteriormente en 4 tratamientos, como se muestra en el siguiente cuadro:

CUADRO 12. CLASIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS USADOS EN EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

1. Arena- Cemento marca A
2. Polvo piedra- Cemento marca A
3. Arena- Cemento marca B
4. Polvo piedra- Cemento marca B

Estos para los dos tipos de cemento UG y MP-AR.

Estadística descriptiva

Para los tratamientos definidos se calcularon los siguientes estadísticos:

CUADRO 13. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

| Estadísticos (Variación inherente a la prueba) | Estadísticos convencionales |
|--|-----------------------------|
| S_1 (MPa) | \bar{X} |
| V_1 (%) | S (MPa) |
| | V (%) |

Se realiza con base en la norma ACI 214R-02⁴⁸, con el fin de inferir las propiedades o características de la población a partir de estas muestras de datos.

Las siguientes pruebas paramétricas se realizaron para respaldar los datos, todas fueron efectuadas con un nivel de confianza del 95%.

⁴⁸ (ACI 214R-77; 1997).

Prueba de normalidad

Para cada tratamiento, se comprobó que los valores de la variable dependiente (resistencia) siguieran una distribución normal, por medio de la herramienta EasyFitXL habilitada como complemento del programa Excel 2007. Se utilizó la prueba Kolmogorov – Smirnov, con una muestra de tamaño $n= 6$ y un valor de significancia $\alpha= 0,05$.

ANOVA

Con cada relación A/C a las tres edades de falla se hizo un análisis de varianza de un factor con los 4 tratamientos, para comparar los promedios de la variable dependiente (resistencia) y determinar si existe o no diferencias significativas entre ellos.

Sobre la hipótesis nula $H_0 = \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \bar{X}_3 = \dots = \bar{X}_n$.

| Edad de falla de cilindro | | | |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Relación A/C | | | |
| Tr.1 | Tr.2 | Tr.3 | Tr.4 |
| Repetición 1 | Repetición 1 | Repetición 1 | Repetición 1 |
| Repetición 2 | Repetición 2 | Repetición 2 | Repetición 2 |
| Repetición 3 | Repetición 3 | Repetición 3 | Repetición 3 |
| Repetición 4 | Repetición 4 | Repetición 4 | Repetición 4 |
| Repetición 5 | Repetición 5 | Repetición 5 | Repetición 5 |
| Repetición 6 | Repetición 6 | Repetición 6 | Repetición 6 |

Figura 36. Representación gráfica del formato usado en la prueba de análisis de varianza de un factor (ANOVA).

Además, por medio del ANOVA se obtuvo el porcentaje de error no controlado, ya que este análisis hace la separación de las fuentes de variación.

Se utilizó el módulo de análisis estadístico del programa Excel 2007 para generar esta prueba, y se usó un valor de significancia $\alpha=0,05$.

Por otra parte, por medio de la prueba del análisis de varianza de dos factores con una sola muestra por grupo para cada edad (7, 28 y 56 días), se comparó los promedios de las distintas relaciones A/C y los promedios de los diferentes tratamientos para estas relaciones A/C. Para generar esta prueba también se utilizó el módulo

de análisis estadístico del programa Excel 2007, usando un valor de significancia $\alpha=0,01$.

| Edad de falla de cilindro | | | |
|---------------------------|------|------|------|
| A/C | A/C | A/C | A/C |
| Tr.1 | Tr.1 | Tr.1 | Tr.1 |
| Tr.2 | Tr.2 | Tr.2 | Tr.2 |
| Tr.3 | Tr.3 | Tr.3 | Tr.3 |
| Tr.4 | Tr.4 | Tr.4 | Tr.4 |

Figura 37. Representación gráfica del formato usado en la prueba del análisis de varianza de dos factores.

Prueba Tukey

Al detectarse diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, se aplicó la prueba de comparación múltiple de medias, de acuerdo con el criterio de Tukey, para determinar cuáles combinaciones de promedios de pares de tratamientos son significativamente iguales. Se utilizó la herramienta XL Toolbox, habilitada como complemento del programa Excel 2007.

Prueba F para varianzas de dos muestras

A través del módulo estadístico del programa Excel 2007, para cada par de tratamientos y sus combinaciones se compararon las varianzas de la variable dependiente (resistencia) para determinar si la diferencia entre las mismas era significativa o no. Sobre la hipótesis nula $H_0 = S_1 = S_2$, se usa un valor de significancia $\alpha=0,05$.

CUADRO 14. COMBINACIONES DE TRATAMIENTOS PARA PRUEBA F

Arena-Marca A y Polvo piedra-Marca A
 Arena-Marca B y Polvo piedra-Marca B
 Arena-Marca A y Arena-Marca B
 Polvo piedra-Marca A y Polvo piedra-Marca B

El análisis realizado para la correlación y regresión presentada a continuación, así como los gráficos de regresión lineal y los intervalos de confianza, se plantean bajo los términos que

genera el hecho de no contar con la cantidad ideal de valores de variable independiente. No obstante, este análisis no refleja el comportamiento real y natural de la relación A/C con respecto a la resistencia, llamada popularmente como “la regla de la relación A/C de Abrams”, conocida desde 1918 y descubierta por Duff Abrams. Lo anterior se encuentra en la sección de apéndices.

Correlación y regresión

Se determinó la fuerza de relación entre la resistencia y las distintas relaciones A/C, por medio del programa Minitab 16, usando un modelo de regresión lineal simple calculado por medio del mismo programa, en el cual se comprobó la bondad de ajuste (R^2) del mismo, con el objetivo de evaluar la significancia de esa correlación aparente.

El modelo de regresión lineal, se definió bajo los siguientes criterios:

| CUADRO 15. CRITERIOS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE | |
|---|---|
| Criterio | Descripción |
| Resolución de los valores de variable independiente (relaciones A/C) | Se contaba con 4 valores discretos de relación A/C, ya que para utilizar otro modelo de regresión teórico se necesita mayor resolución de las variables independientes, para poder sugerir otro comportamiento que no sea lineal. |
| Insignificancia en la diferencia del coeficiente de determinación para distintos modelos teóricos de regresión probados | Se evaluó la bondad de ajuste de distintos modelos de regresión, para comprobar que las diferencias entre los mismos son insignificantes, y que por lo tanto por falta de resolución de la variable independiente se aplica la regresión lineal simple. |

Resultados

Caracterización

Arena

Los tamaños corresponden a la fracción que pasa la malla de 9,5 mm (3/8") y se retienen en la de 75um (N°200).



Figura 38. Arena usada en la fabricación de las mezclas.

Granulometría

| CUADRO 16. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (INTE 06-01-02-09) | | | |
|---|-------|----------|----------|
| Malla (mm) | % Pas | Límite | |
| | | Inferior | Superior |
| 9,5 (3/8") | 100 | 100 | 100 |
| 4,75 (N°4) | 98 | 95 | 100 |
| 2,36 (N°8) | 78 | 80 | 100 |
| 1,18 (N°16) | 55 | 50 | 85 |
| 0,6 (N°30) | 34 | 25 | 60 |
| 0,3 (N°50) | 18 | 5 | |
| 0,15(N°100) | 8 | 0 | 10 |

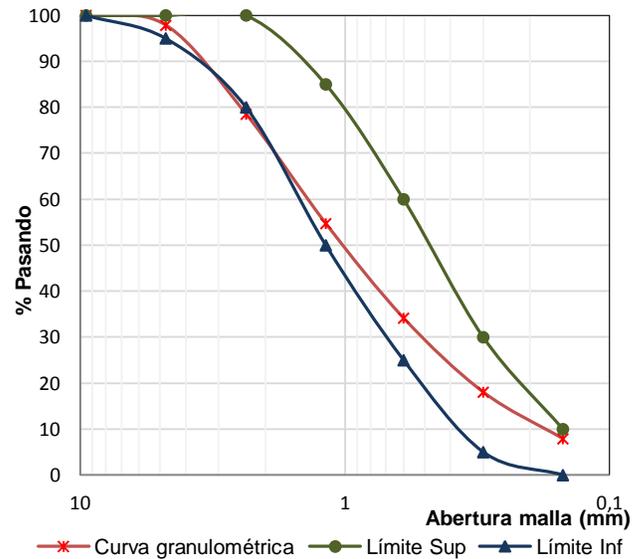


Figura 39. Curva granulométrica para el agregado fino arena.

| CUADRO 17. DESCRIPCIÓN DEL AGREGADO | |
|---|----------------|
| Datos | Valor obtenido |
| Humedad (%) | 5,89 |
| G _{bs} | 2,41 |
| Absorción (%) | 6 |
| Peso unitario suelto (kg/m ³) | 1333 |
| % vacíos | 44,7 |

| CUADRO 18. PARÁMETROS | | | |
|-----------------------|-------------------|----------------|------------------|
| Prueba | Requisito | Valor obtenido | Norma |
| Módulo de Finura | 2,3<MF<3,1 | 3,1 | INTE 06-01-02-09 |
| Lavado en #200 (%) | Máx. 4% | 4,2 | INTE 06-01-02-09 |
| Colorimetría | < Color patrón #3 | Cumple | INTE 06-01-02-09 |

Polvo piedra (original sin corrección)

También llamado arena manufacturada. Los tamaños corresponden a la fracción que pasa la malla de 9,5 mm (3/8") y se retienen en la de 75um (N°200).



Figura 40. Polvo piedra usado en la fabricación de las mezclas.

Granulometría

| CUADRO 19. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (INTE 06-01-02-09) | | | |
|--|-------|----------|----------|
| Malla (mm) | % Pas | Límite | |
| | | Inferior | Superior |
| 9,5 (3/8") | 100 | 100 | 100 |
| 4,75 (N°4) | 71 | 95 | 100 |
| 2,36 (N°8) | 44 | 80 | 100 |
| 1,18 (N°16) | 27 | 50 | 85 |
| 0,6 (N°30) | 18 | 25 | 60 |
| 0,3 (N°50) | 13 | 5 | 30 |
| 0,15(N°100) | 10 | 0 | 10 |

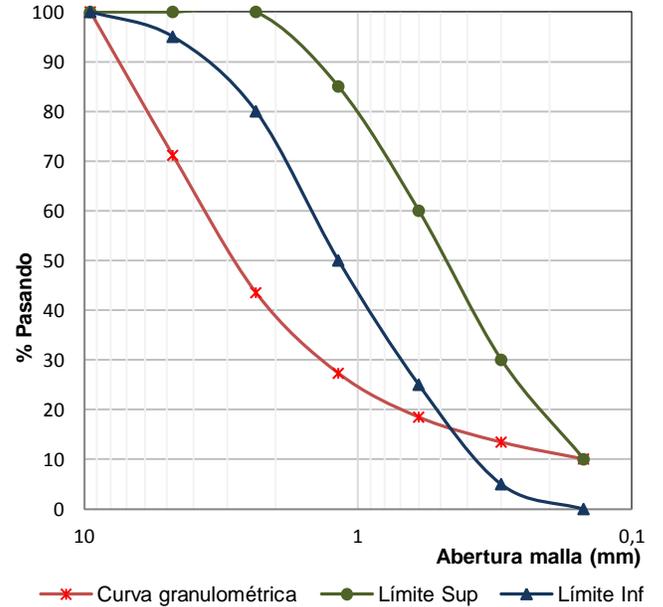


Figura 41. Curva granulométrica para el agregado fino polvo piedra sin corregir.

| CUADRO 20. DESCRIPCIÓN DEL AGREGADO | |
|--|----------------|
| Datos | Valor obtenido |
| Humedad (%) | 4,5 |
| G_{bs} | 2,60 |
| Absorción (%) | 2,7 |
| Peso unitario suelto (kg/m^3) | 1446 |
| % vacíos | 44,5 |

| CUADRO 21. PARÁMETROS | | | |
|------------------------------|---------------------|----------------|------------------|
| Prueba | Requisito | Valor obtenido | Norma |
| Módulo de Finura | de $2,3 < MF < 3,1$ | 4,2 | INTE 06-01-02-09 |
| Lavado en #200 (%) | Máx. 5% | 7,8 | INTE 06-01-02-09 |
| Colorimetría | < Color patrón #3 | Cumple | INTE 06-01-02-09 |

Polvo piedra
(corregido eliminando material retenido en malla N°4)

También llamado arena manufacturada. Los tamaños corresponden a la fracción que pasa la malla de 4,75 mm (N°4) y se retienen en la de 75um (N°200).



Figura 42. Polvo piedra usado en la fabricación de las mezclas.

Granulometría

| CUADRO 22. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (INTE 06-01-02-09) | | | |
|--|-------|----------|----------|
| Malla (mm) | % Pas | Límite | |
| | | Inferior | Superior |
| 9,5 (3/8") | 100 | 100 | 100 |
| 4,75 (N°4) | 100 | 95 | 100 |
| 2,36 (N°8) | 66 | 80 | 100 |
| 1,18 (N°16) | 42 | 50 | 85 |
| 0,6 (N°30) | 28 | 25 | 60 |
| 0,3 (N°50) | 20 | 5 | 30 |
| 0,15(N°100) | 14 | 0 | 10 |

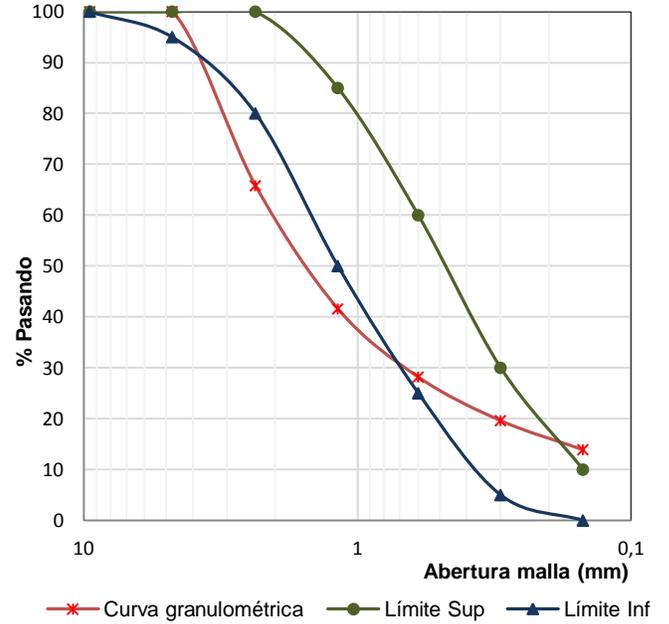


Figura 43. Curva granulométrica para el agregado fino polvo piedra corregido.

| CUADRO 23. DESCRIPCIÓN DEL AGREGADO | |
|--|----------------|
| Datos | Valor obtenido |
| Humedad (%) | 1,63 |
| G _{bs} | 2,49 |
| Absorción (%) | 4,4 |
| Peso unitario suelto (kg/m ³) | 1490 |
| % vacíos | 40,22 |

| CUADRO 24. PARÁMETROS | | | |
|------------------------------|-------------------|----------------|------------------|
| Prueba | Requisito | Valor obtenido | Norma |
| Módulo de Finura | de 2,3 < MF < 3,1 | 3,31 | INTE 06-01-02-09 |
| Lavado en #200 (%) | Máx. 5% | 10,38 | INTE 06-01-02-09 |
| Colorimetría | < Color patrón #3 | Cumple | INTE 06-01-02-09 |

Piedra cuarta

Los tamaños corresponden a la fracción que pasa la malla de 37,5 mm (1 1/2") y se retienen en la de 2,36 mm (N°8).



Figura 44. Agregado grueso (piedra cuarta) usado en la fabricación de las mezclas.

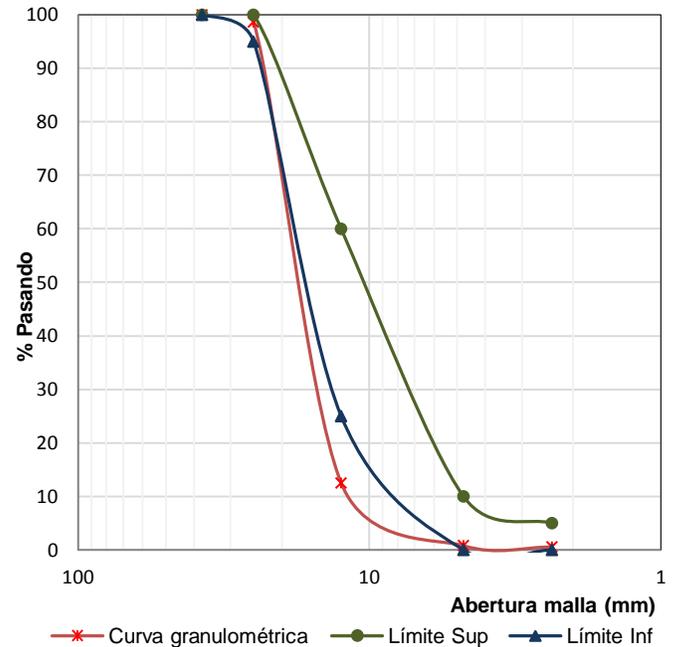


Figura 45. Curva granulométrica para la piedra cuarta.

Granulometría

| CUADRO 25. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (INTE 06-01-02-09) | | | |
|--|-------|----------|----------|
| Malla (mm) | % Pas | Límite | |
| | | Inferior | Superior |
| 37,5 (1 1/2") | 100 | 100 | 100 |
| 25,0 (1") | 99 | 95 | 100 |
| 12,5 (1/2") | 13 | 25 | 60 |
| 4,75 (N°4) | 1 | 0 | 10 |
| 2,36 (N°8) | 1 | 0 | 5 |

| CUADRO 26. DESCRIPCIÓN DEL AGREGADO | |
|--|----------------|
| Datos | Valor obtenido |
| G _{bs} | 2,67 |
| Absorción (%) | 1,4 |
| Peso unitario suelto (kg/m ³) | 1459 |
| % vacíos suelto | 45,3 |
| Peso unitario comp. (kg/m ³) | 1530,7 |
| % vacíos compactado | 42,6 |

| CUADRO 27. PARÁMETROS | | | |
|------------------------------|-----------|----------------|------------------|
| Prueba | Requisito | Valor obtenido | Norma |
| Abrasión (%desgaste) | Máx. 50% | 17,8% | INTE 06-01-02-09 |

Piedra cuartilla

Los tamaños corresponden a la fracción que pasa la malla de 25,0 mm (1") y se retienen en la de 2,36 mm (N°8).



Figura 46. Agregado grueso (piedra cuartilla) usado en la fabricación de las mezclas.

Granulometría

| CUADRO 28. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (INTE 06-01-02-09) | | | |
|--|-------|----------|----------|
| Malla (mm) | % Pas | Límite | |
| | | Inferior | Superior |
| 37,5 (1 1/2") | 100 | 100 | 100 |
| 25,0 (1") | 100 | 95 | 100 |
| 12,5 (1/2") | 78 | 25 | 60 |
| 4,75 (N°4) | 9 | 0 | 10 |
| 2,36 (N°8) | 5 | 0 | 5 |

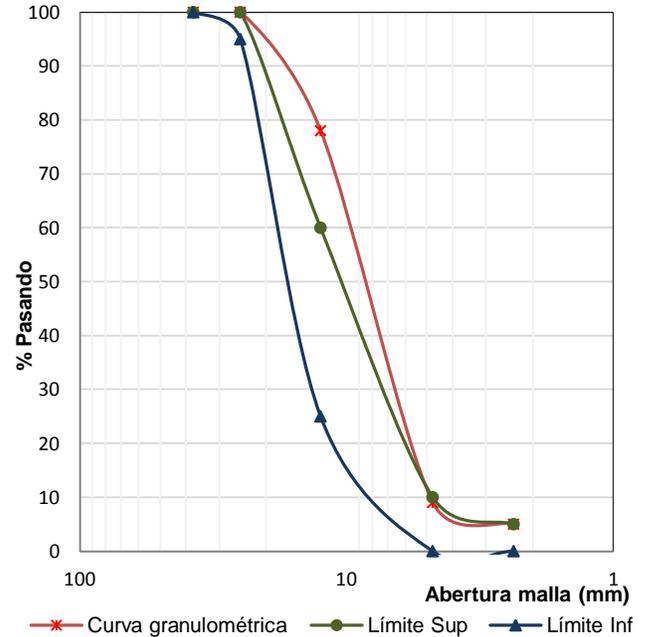


Figura 47. Curva granulométrica para la piedra cuartilla.

| CUADRO 29. DESCRIPCIÓN DEL AGREGADO | |
|--|----------------|
| Datos | Valor obtenido |
| G_{bs} | 2,64 |
| Absorción (%) | 1,9 |
| Peso unitario suelto (kg/m^3) | 1432 |
| % vacíos suelto | 45,8 |
| Peso unitario comp. (kg/m^3) | 1488 |
| % vacíos compactado | 43,7 |

| CUADRO 30. PARÁMETROS | | | |
|------------------------------|-----------|----------------|------------------|
| Prueba | Requisito | Valor obtenido | Norma |
| Abrasión (%desgaste) | Máx. 50% | 23,7% | INTE 06-01-02-09 |

Mezcla agregado grueso (40% cuartilla-60% cuarta)

Los tamaños corresponden a la fracción que pasa la malla de 37,5 mm (1 1/2") y se retienen en la de 2,36 mm (N°8).



Figura 48. Agregado grueso usado en la fabricación de las mezclas.

Granulometría

| CUADRO 31. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (INTE 06-01-02-09) | | | |
|---|-------|----------|----------|
| Malla (mm) | % Pas | Límite | |
| | | Inferior | Superior |
| 37,5 (1 1/2") | 100 | 100 | 100 |
| 25,0 (1") | 98 | 95 | 100 |
| 12,5 (1/2") | 44 | 25 | 60 |
| 4,75 (N°4) | 3 | 0 | 10 |
| 2,36 (N°8) | 2 | 0 | 5 |

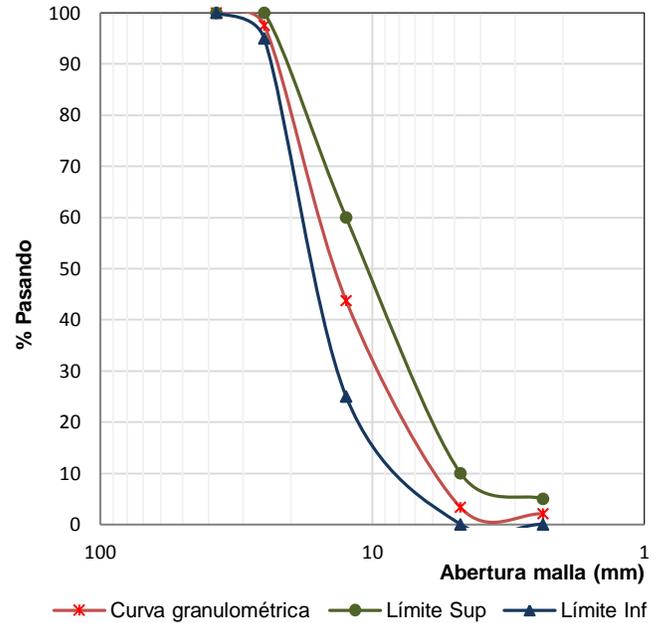


Figura 49. Curva granulométrica para el agregado grueso.

| CUADRO 32. DESCRIPCIÓN DEL AGREGADO | |
|-------------------------------------|----------------|
| Datos | Valor obtenido |
| G_{bs} | 2,68 |
| Absorción (%) | 1,7 |
| Peso unitario suelto (kg/m^3) | 1444 |
| % vacíos suelto | 46,02 |
| Peso unitario comp. (kg/m^3) | 1512 |
| % vacíos compactado | 43,48 |

| CUADRO 33. PARÁMETROS | | | |
|-----------------------|-----------|----------------|------------------|
| Prueba | Requisito | Valor obtenido | Norma |
| Abrasión (%desgaste) | Máx. 50% | 17,74% | INTE 06-01-02-09 |

Para todo el análisis estadístico, y para las pruebas paramétricas realizadas, se va a presentar a manera de ejemplo únicamente los resultados correspondientes al primer tratamiento analizado para el cemento tipo UG a la edad de 7 días, debido a que son repetitivos tanto los cuadros como los gráficos. El resto de los resultados se encuentra en la sección de apéndices titulada “análisis estadístico completo”.

Estadística descriptiva

Se determinaron los estadísticos inherentes a la prueba (S_1 , V_1) además de los convencionales (\bar{X} , S , V) de acuerdo con la norma ACI 214R-02⁴⁹ con el fin de inferir las propiedades o características de la población a partir de estas muestras de datos.

Cemento tipo UG

Edad 7 días

Tratamiento arena-marca A

| CUADRO 34. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA | | | | |
|---|-----------|-----------------------------|---------|-------|
| Estadísticos (Inherentes a la prueba) | | Estadísticos convencionales | | |
| S_1 (MPa) | V_1 (%) | \bar{X} | S (MPa) | V (%) |
| A/C=0,55 | | | | |
| 0,60 | 5,87 | 10,27 | 0,72 | 7,02 |
| A/C=0,65 | | | | |
| 0,09 | 1,22 | 7,25 | 0,29 | 3,95 |
| A/C=0,75 | | | | |
| 0,86 | 15,90 | 5,39 | 0,59 | 10,96 |
| A/C=0,85 | | | | |
| 0,25 | 8,48 | 2,96 | 0,21 | 7,01 |

Normalidad

A continuación se presentan los resultados de la prueba Kolmogorov – Smirnov, que muestran que los valores de resistencia para cada tratamiento siguieron una distribución normal. Esto permitió realizar el análisis estadístico que va a ser presentado posteriormente.

⁴⁹ (ACI 214R-77; 1997).

Cemento tipo UG

| CUADRO 35. PRUEBA DE NORMALIDAD KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA LOS DISTINTOS TRATAMIENTOS A LA EDAD DE 7 DÍAS | | | |
|--|-------------|---------------|---|
| Tratamientos | Resultados | | Observaciones |
| | Estadística | Valor crítico | |
| A/C= 0,55 | | | Se supone que todos los valores de resistencia son normalmente distribuidos. Según la herramienta EasyFit; para Kolmogorov-Smirnov, el Statistic es siempre < al Valor crítico para 0,05 el cual alcanza 0,51926. Lo anterior implica que en efecto los valores de resistencia son NORMALMENTE distribuidos, lo cual faculta poder aplicar las demás pruebas con toda libertad. |
| Arena-marca A | 0,228 | 0,519 | |
| Polvo p.- marca A | 0,244 | 0,519 | |
| Arena-marca B | 0,225 | 0,519 | |
| Polvo p.- marca B | 0,249 | 0,519 | |
| A/C= 0,65 | | | |
| Arena-marca A | 0,181 | 0,519 | |
| Polvo p.- marca A | 0,257 | 0,519 | |
| Arena-marca B | 0,173 | 0,519 | |
| Polvo p.- marca B | 0,367 | 0,519 | |
| A/C= 0,75 | | | |
| Arena-marca A | 0,153 | 0,519 | |
| Polvo p.- marca A | 0,262 | 0,519 | |
| Arena-marca B | 0,284 | 0,519 | |
| Polvo p.- marca B | 0,215 | 0,519 | |
| A/C= 0,85 | | | |
| Arena-marca A | 0,337 | 0,519 | |
| Polvo p.- marca A | 0,170 | 0,519 | |
| Arena-marca B | 0,173 | 0,519 | |
| Polvo p.- marca B | 0,172 | 0,519 | |

Anova de un factor

En esta sección se presentan los resultados del análisis de varianza de un factor, para los tratamientos estudiados en cada relación A/C. Se hace con el propósito de comparar los

promedios de la resistencia de los distintos tratamientos y determinar si son significativamente diferentes unos de otros. Además este análisis otorga los datos necesarios para determinar el porcentaje de error no controlado inherente a la prueba, es decir, dentro de los tratamientos (cuando las unidades son tratadas igual con diferente respuesta) y el rango de banda de este error, mostrado gráficamente a continuación, junto con el promedio de los tratamientos.

Cemento tipo UG

Edad 7 días

| CUADRO 36. ANÁLISIS DE VARIANZA DE UN FACTOR PARA LOS CUATRO TRATAMIENTOS CON UNA RELACIÓN A/C=0,55 | | | | | | |
|---|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------|----------------------|
| Resumen | | | | | | |
| Tratamientos | Promedio | Varianza | Error estándar | Error no controlado | Banda de error | |
| Arena-Marca A | 10,27 | 0,52 | | | | |
| Polvo piedra-Marca A | 9,97 | 2,46 | | | | |
| Arena-Marca B | 13,51 | 0,25 | 0,61 | 40% | 1,28 | |
| Polvo piedra-Marca B | 13,43 | 5,77 | | | | |
| Análisis de varianza | | | | | | |
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre tratamientos | 67,6075 | 3 | 22,5358 | 10,0093 | 0,0003 | 3,0984 |
| Dentro de los tratamientos | 45,0296 | 20 | 2,2515 | | | |
| Total | 112,6372 | 23 | | | | |
| Observaciones | | | | | | |
| Como se observa el valor de la prueba experimental F (10,0093) es mayor que el valor crítico de F (3,0984) proveniente de valores tabulados, lo cual indica que existe una diferencia significativa entre los promedios de los tratamientos. A manera de respaldo, la probabilidad (0,0003) es menor a 0,05 (valor de significancia), esto también demuestra que los promedios son significativamente diferentes. El porcentaje de error no controlado (40%) representa el error asociado a aquellos factores que no se pudieron controlar y que influyeron en el resultado final de la resistencia y el error estándar corresponde al error asociado al promedio de cualquier tratamiento. | | | | | | |

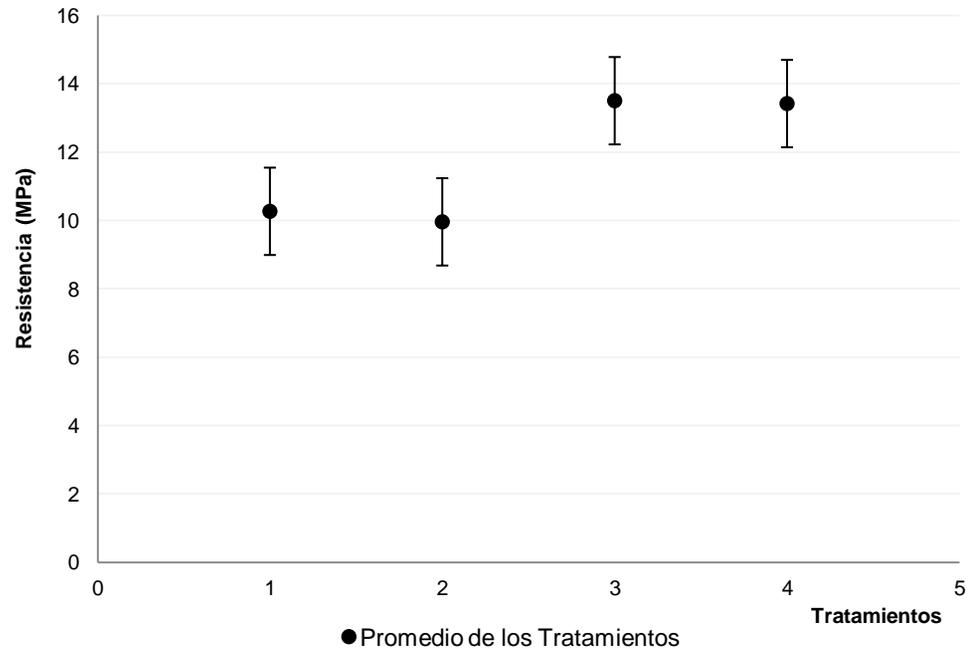


Figura 50. Representación gráfica de los promedios para cada tratamiento (Arena-marca A; Polvo p.-marca A; Arena-marca B; Polvo p.-marca B, simbolizados del 1 al 4 respectivamente) con su respectiva banda de error no controlado. Para la relación A/C = 0,55.

Anova de dos factores

A continuación se presentan los resultados del análisis de

varianza de dos factores con una sola muestra por grupo, para cada edad (7, 28, 56 días). Se analizó los promedios de las distintas relaciones A/C con cada tratamiento, con el propósito de determinar si existen diferencias significativas entre las distintas relaciones A/C y entre los diferentes tratamientos estudiados.

Cemento tipo UG

| CUADRO 37. ANÁLISIS DE VARIANZA DE DOS FACTORES CON UNA SOLA MUESTRA POR GRUPO PARA LAS DISTINTAS RELACIONES A/C Y LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS A LA EDAD DE 7 DÍAS | | | | | | |
|---|-------------------|--------------------|---------------------------|----------|--------------|----------------------|
| Resumen | | | | | | |
| Tratamientos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | | |
| Tratamiento 1 | 4 | 25,87 | 6,47 | 9,51 | | |
| Tratamiento 2 | 4 | 26,06 | 6,51 | 8,52 | | |
| Tratamiento 3 | 4 | 34,87 | 8,72 | 11,39 | | |
| Tratamiento 4 | 4 | 38,56 | 9,64 | 9,65 | | |
| A/C=0,55 | 4 | 47,18 | 11,79 | 3,76 | | |
| A/C=0,65 | 4 | 33,45 | 8,36 | 1,57 | | |
| A/C=0,75 | 4 | 26,83 | 6,71 | 3,47 | | |
| A/C=0,85 | 4 | 17,91 | 4,48 | 2,47 | | |
| Análisis de varianza | | | | | | |
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Filas (Tratamientos) | 30,6149 | 3 | 10,2050 | 28,6825 | 6,15E-05 | 6,9919 |
| Columnas (Relaciones A/C) | 113,9969 | 3 | 37,9990 | 106,8014 | 2,36E-07 | 6,9919 |
| Error | 3,2021 | 9 | 0,3558 | | | |
| Total | 147,8139 | 15 | | | | |
| Observaciones | | | | | | |
| <p>Como se observa el valor de la prueba experimental F (28,6825) para los tratamientos es mayor que el valor crítico de F (6,9919) proveniente de valores tabulados, lo cual indica que existe una diferencia significativa entre los promedios de los tratamientos. Por otra parte, el valor de la prueba experimental F(106,8014) para las relaciones A/C es mayor que el valor crítico de F (6,9919), lo cual indica que también existe una diferencia significativa entre los promedios de las relaciones A/C.</p> | | | | | | |

Prueba Tukey

La prueba de ANOVA (análisis de varianza de un factor) ya

determinó que existían diferencias significativas entre los promedios de los 4 tratamientos para cada relación A/C. Ahora bien, para determinar cuáles son las combinaciones de tratamientos en donde no existe diferencia significativa entre sus promedios, se realizó la prueba de comparación múltiple de promedios según el criterio Tukey.

Cemento tipo UG

7 días

| CUADRO 38. EXTRACTO DE LA PRUEBA DE COMPARACIÓN MÚLTIPLE DE PROMEDIOS (TUKEY) PARA LA RELACIÓN A/C=0,55 | | | | | |
|---|----------------------|----------------|--------------|-------------|--|
| Grupo 1 | Grupo 2 | Error estándar | Probabilidad | Diferentes? | Observaciones |
| Arena-marca B | Polvo piedra-marca A | 0,61 | 2,91E-03 | Sí | Las combinaciones de tratamientos que no muestran diferencias significativas en sus promedios son las marcadas en color gris, esto se respalda debido a que su probabilidad es mayor a 0,05. |
| Arena-marca B | Arena-marca A | 0,61 | 6,58E-03 | Sí | |
| Arena-marca B | Polvo piedra-marca B | 0,61 | 1,00 | No | |
| Polvo piedra-marca B | Polvo piedra-marca A | 0,61 | 3,64E-03 | Sí | |
| Polvo piedra-marca B | Arena-marca A | 0,61 | 8,16E-03 | Sí | |
| Arena-marca A | Polvo piedra-marca A | 0,61 | 0,98 | No | |

Prueba F

A continuación, se presentan los resultados de la prueba F para

varianzas de dos muestras, conferidos por el módulo de análisis estadístico del programa Excel 2007, donde se comparó las varianzas de los tratamientos estudiados, con el propósito de determinar si existen o no diferencias significativas entre las mismas, en las combinaciones expuestas en el cuadro 14 de la sección de metodología.

Cemento tipo UG

7 días

Relación A/C= 0,55

| CUADRO 39. PRUEBA F PARA LA COMBINACIÓN 1 (ARENA - MARCA A Y POLVO P.-MARCA A) | | | |
|--|---------|--------------|--|
| Cemento marca A | | | |
| Ítem | Arena | Polvo piedra | Observaciones |
| Media | 10,2733 | 9,9650 | Para esta combinación de tratamientos se demuestra que no existen estadísticamente diferencias significativas entre sus varianzas. Lo anterior se respalda ya que el valor de P (0,0566) es mayor a 0,05 (valor de significancia). |
| Varianza | 0,5197 | 2,4602 | |
| Observaciones | 6 | 6 | |
| Grados de libertad | 5 | 5 | |
| P(F<=f) | 0,0566 | | |

A manera de resumen, a continuación se presentan la siguiente tabla, que muestra el resultado del análisis de varianzas (prueba F), en dependencia con la edad y la relación A/C para la primera combinación estudiada en esta prueba, con el cemento tipo UG. El resto de los cuadros,

para las demás combinaciones y para el cemento tipo MP-AR, se presentan en la sección de apéndices. En estos cuadros, el color gris oscuro indica que sí existen diferencias significativas entre las varianzas, mientras que el color gris claro indica que no las hay.

Cemento tipo UG

| CUADRO 40. RESUMEN DE LA PRUEBA F PARA LA COMBINACIÓN 1 (ARENA-MARCA A Y POLVO P.- MARCA A) | | | | |
|---|--------------|------|------|------|
| Edad (días) | Relación A/C | | | |
| | 0,55 | 0,65 | 0,75 | 0,85 |
| 7 | | | | |
| 28 | | | | |
| 56 | | | | |

Resistencia vs. relación A/C

A continuación, se presenta los gráficos que muestran el comportamiento de la resistencia con

respecto a la relación A/C para los tipos de cemento (UG Y MP-AR) a las tres edades de falla (7, 28 y 56 días), sin discriminar entre marcas de cemento, ni tipo de agregado fino, con el objetivo de facilitar su aplicación práctica. Es importante recalcar que esta relación es conocida con el nombre de la regla de la relación A/C de Abrams, y que refleja el comportamiento natural del concreto. Esta fue descubierta por Duff Abrams

como resultado de pruebas exhaustivas en el Lewis Institute, University of Illinois, en 1918. En las gráficas se presentan los promedios de las resistencias a las distintas relaciones A/C (0,55; 0,65; 0,75; 0,85), y se extrapoló al utilizar la misma ecuación generada por la tendencia de los datos analizados, para tener una idea del

comportamiento de la resistencia para mezclas que, por la limitante de trabajabilidad y al no utilizar aditivos, no se pudieron fabricar. Es por lo anterior que, para su uso y aplicación práctica, se recomienda tomar en cuenta estas consideraciones, con el fin de no incurrir en un error de interpretación.

Cemento tipo UG

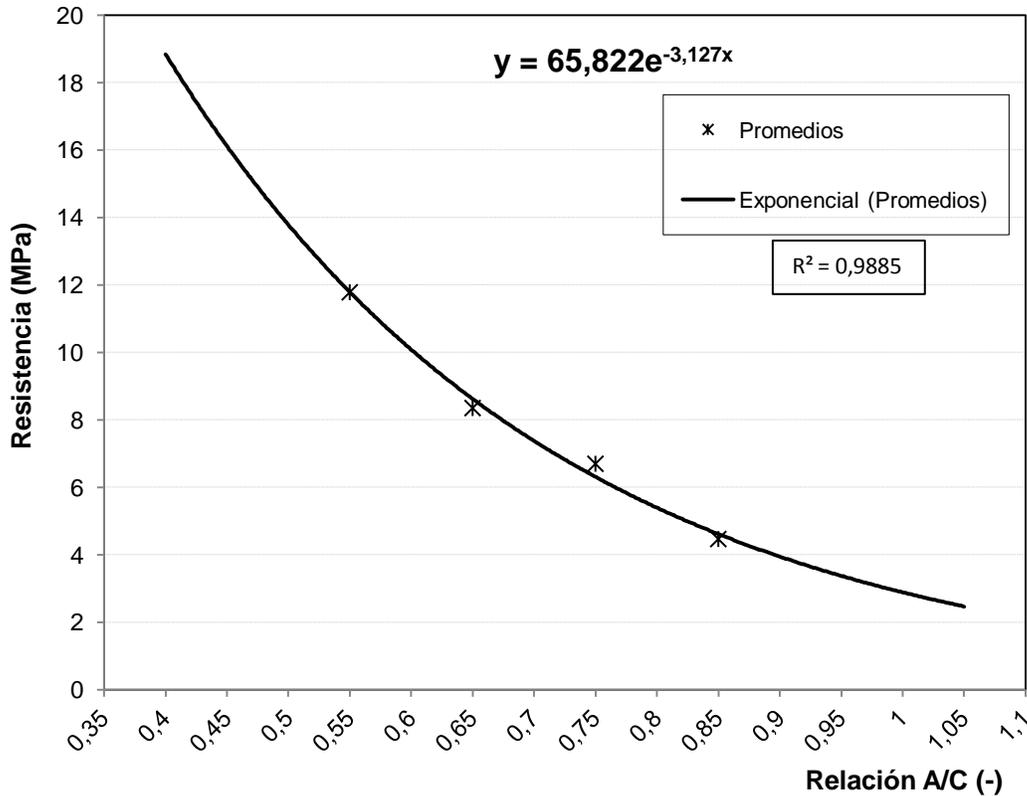


Figura 51. Análisis del comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C para un concreto usando cemento tipo UG a la edad de 7 días.

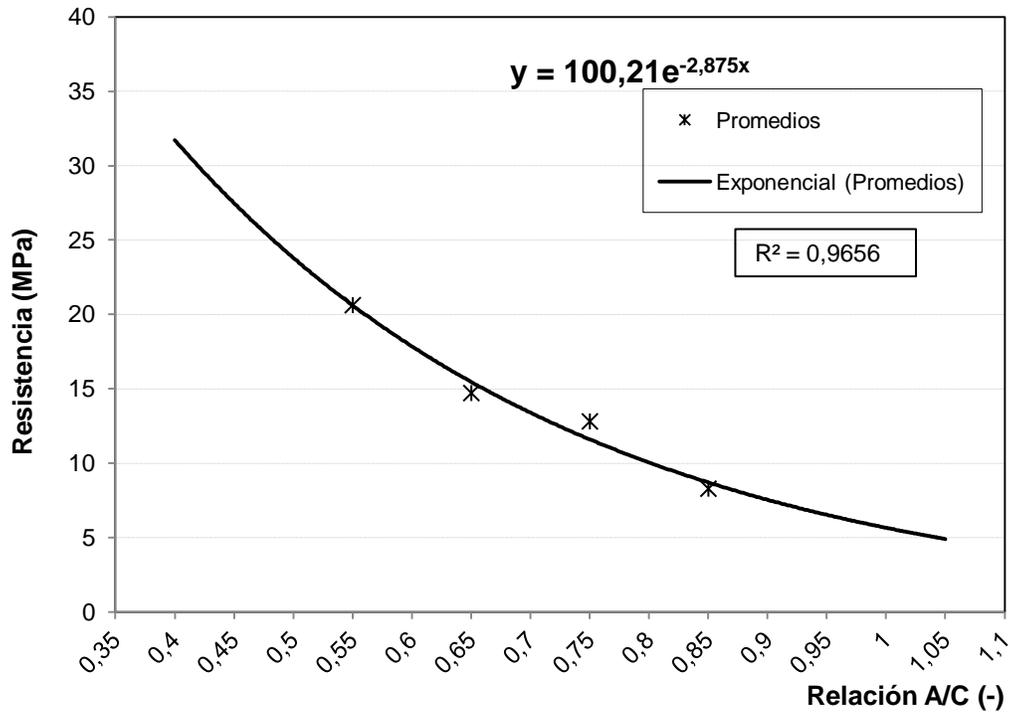


Figura 52. Análisis del comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C para un concreto usando cemento tipo UG a la edad de 28 días.

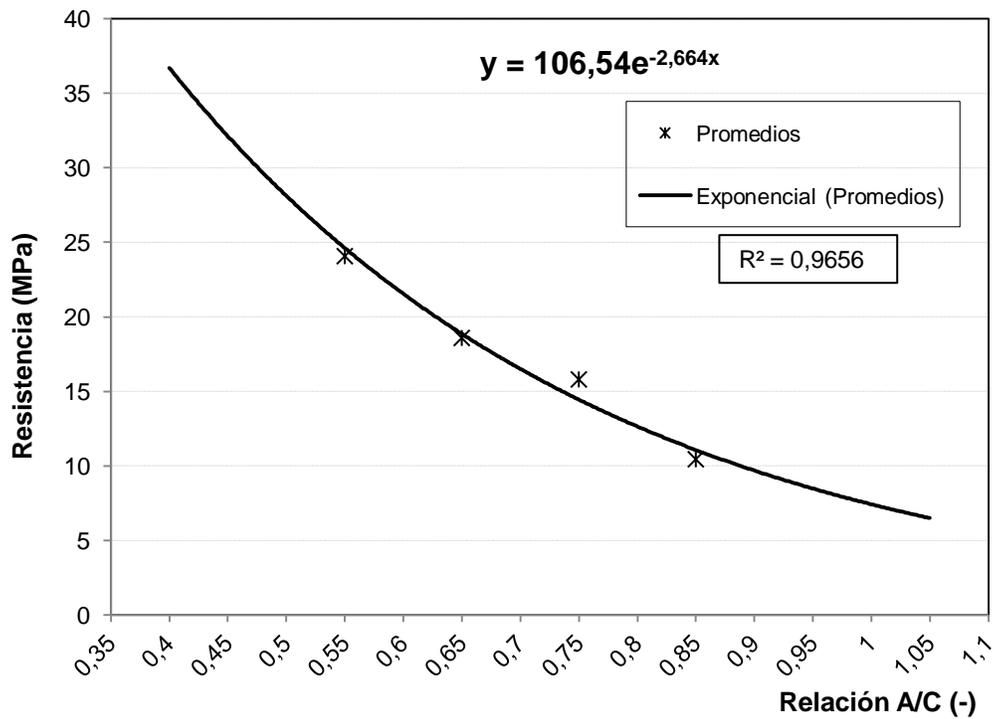


Figura 53. Análisis del comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C para un concreto usando cemento tipo UG a la edad de 56 días.

Cemento tipo MP-AR

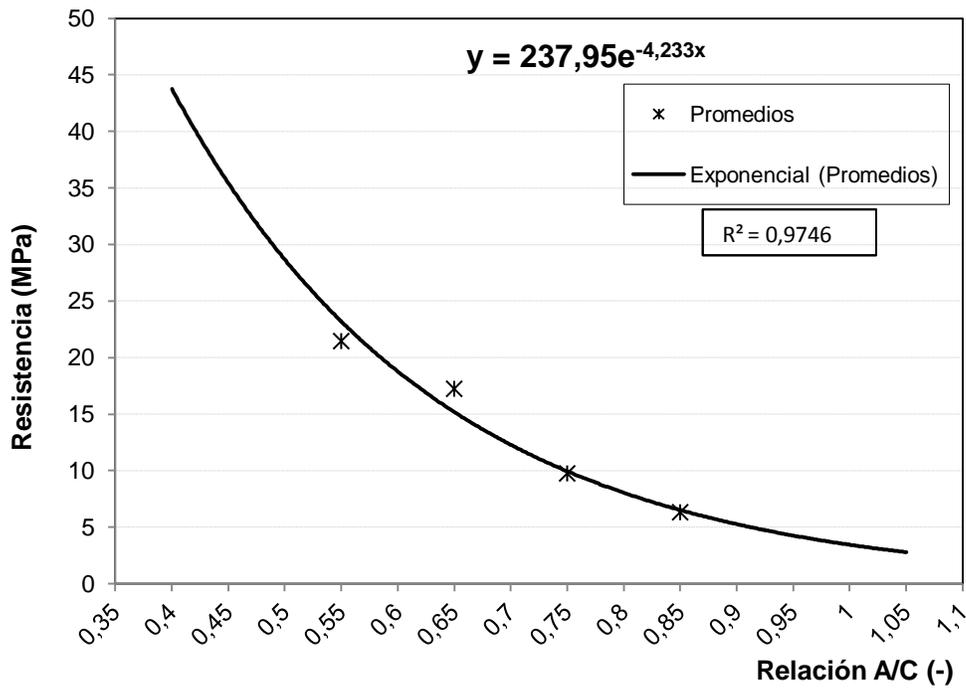


Figura 54. Análisis del comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C para un concreto usando cemento tipo MP-AR a la edad de 7 días.

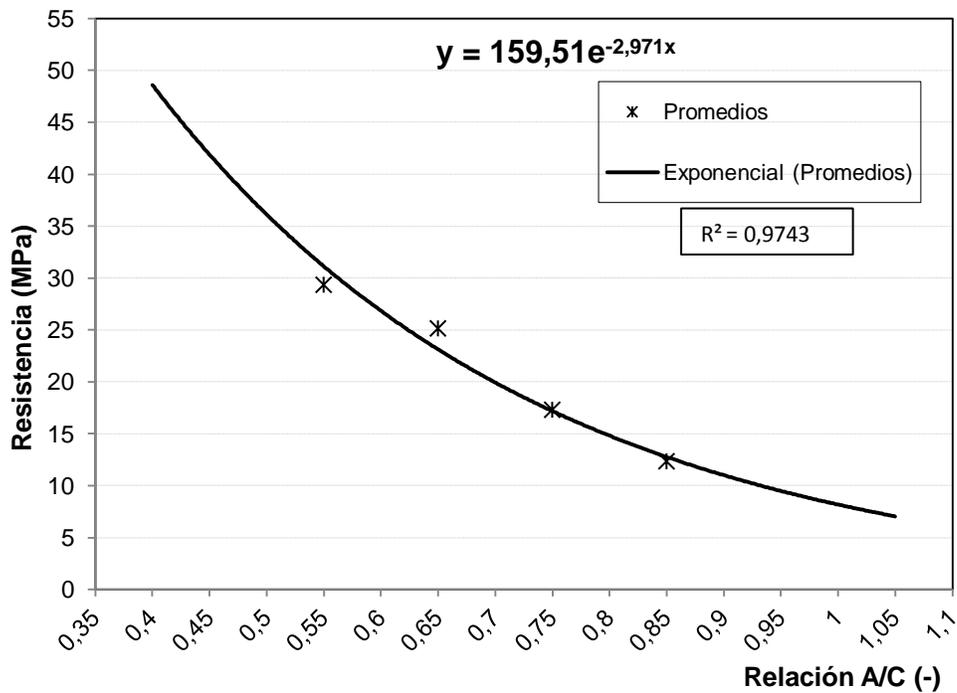


Figura 55. Análisis del comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C para un concreto usando cemento tipo MP-AR a la edad de 28 días.

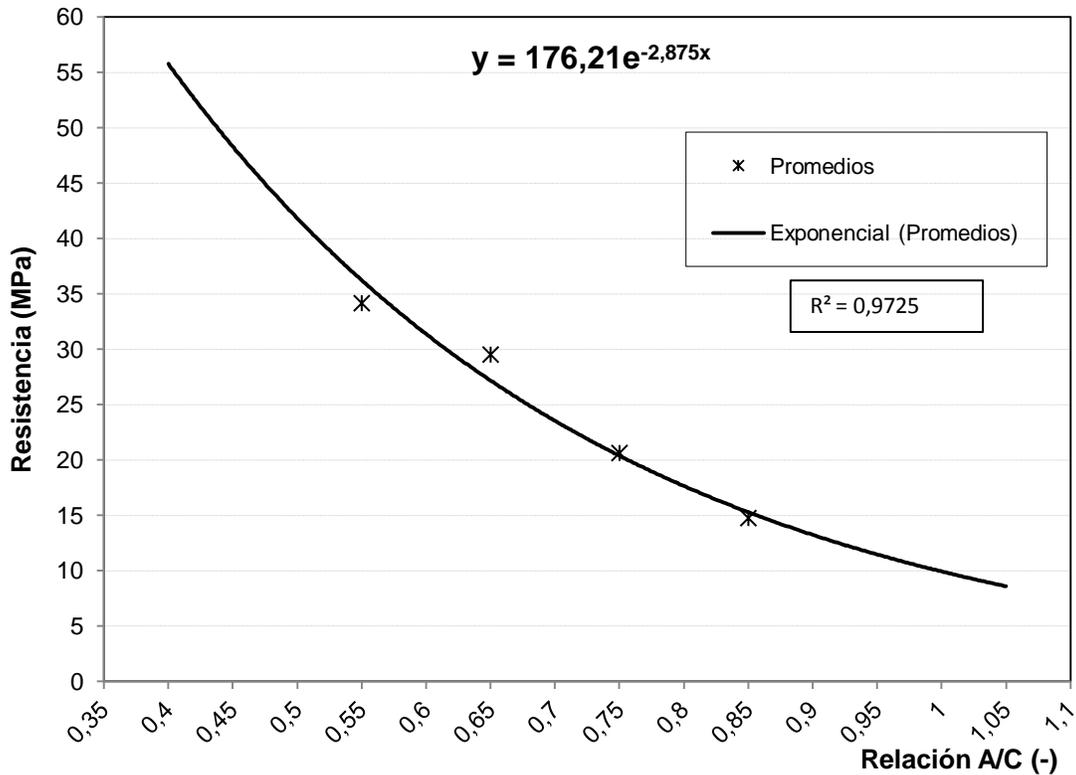


Figura 56. Análisis del comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C para un concreto usando cemento tipo MP-AR a la edad de 56 días.

Para resumir la información contenida en los anteriores gráficos, se presentan los siguientes, en donde se analiza el comportamiento de la resistencia con respecto a la relación A/C para concretos, al usar los tipos de cemento UG y MP-AR, a las edades de 28 y 56 días.

Es importante recalcar que para hacerlos, se realizó un diseño de mezcla en donde se utilizó agregados de calidad, cuyas características se presentaron en la sección titulada "caracterización" en el capítulo de resultados.

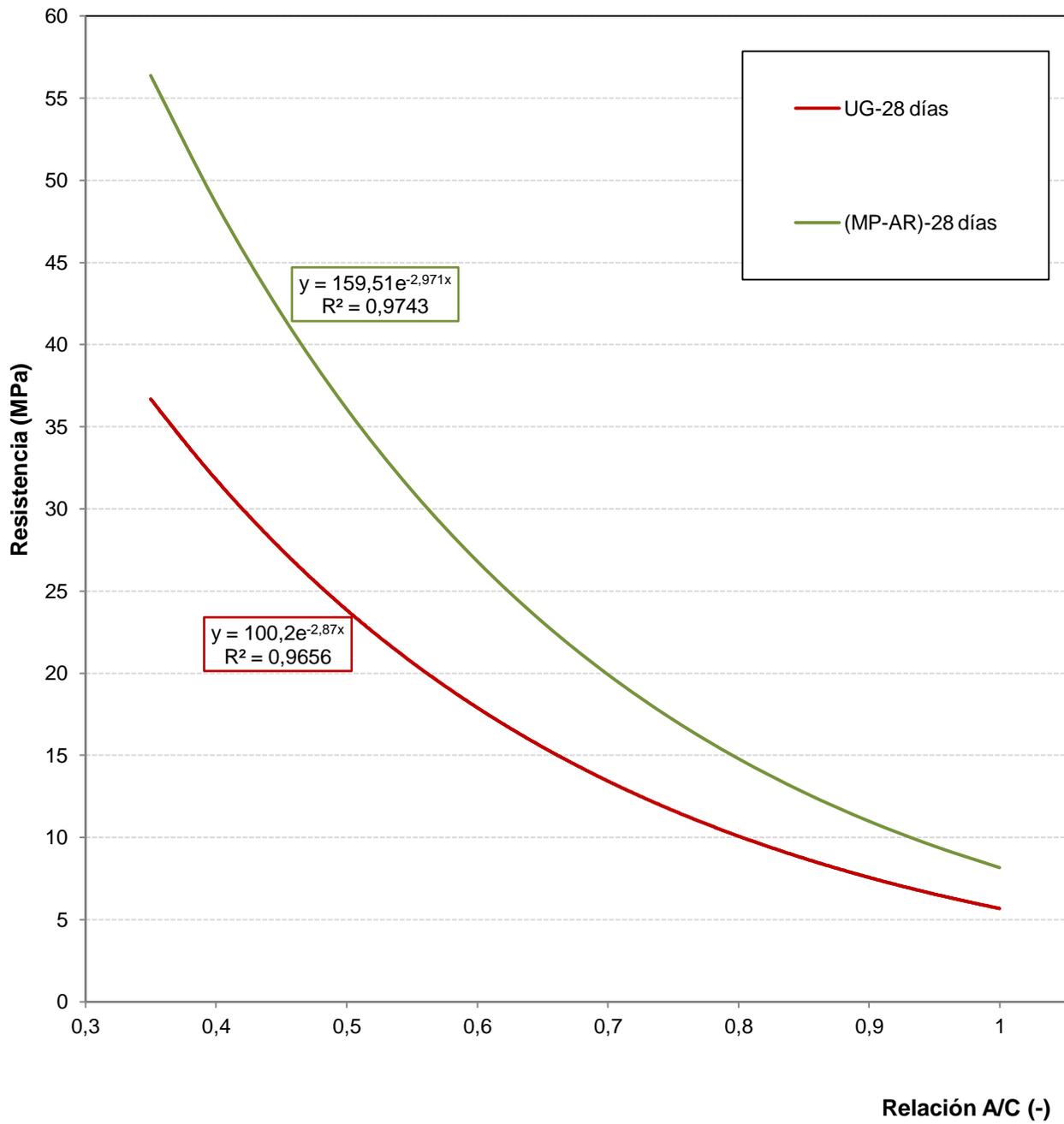


Figura 57. Análisis del comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C para concretos, usando los cementos tipo UG y MP-AR a la edad de 28 días.

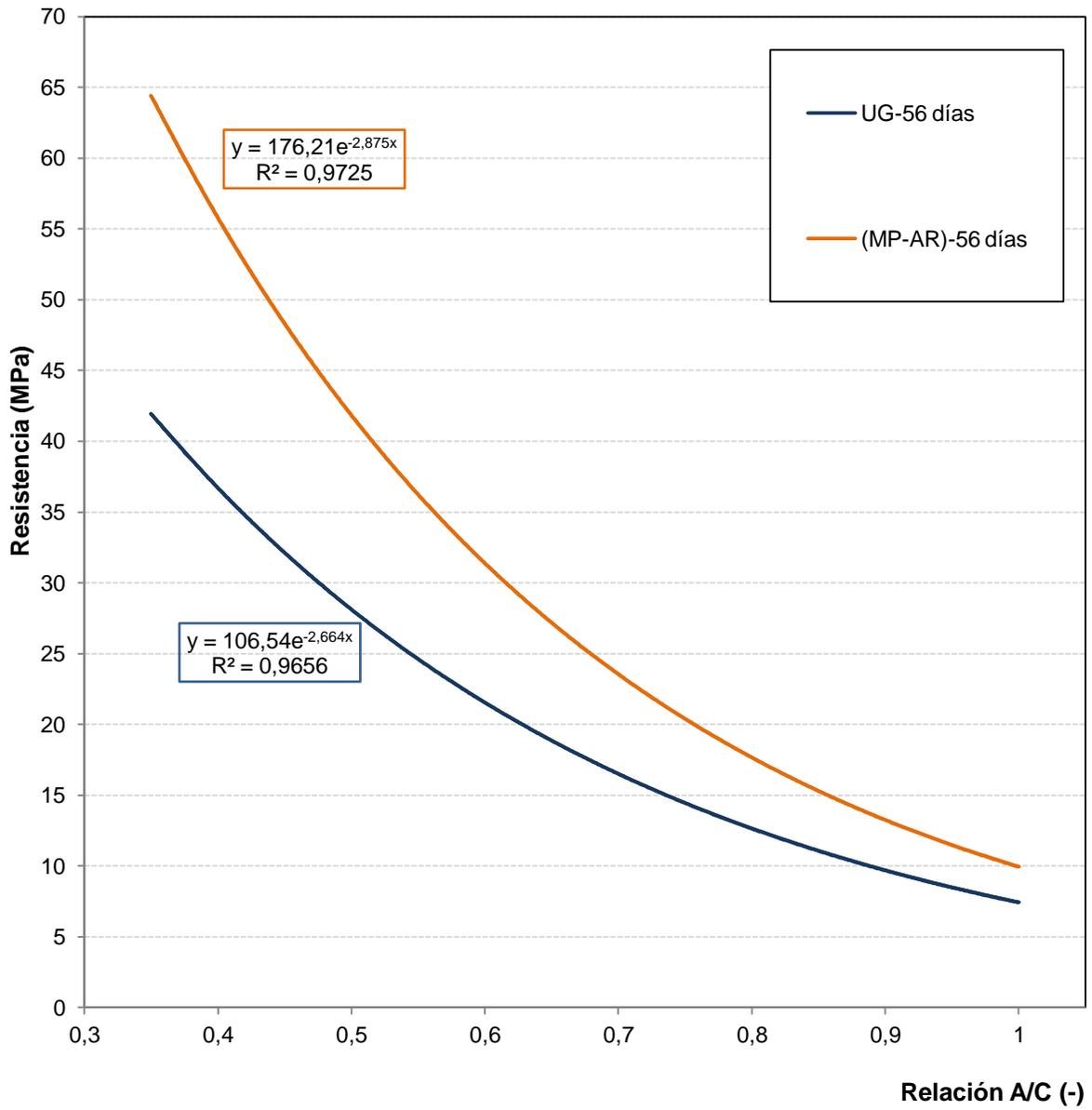


Figura 58. Análisis del comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C para concretos, usando los cementos tipo UG y MP-AR a la edad de 56 días.

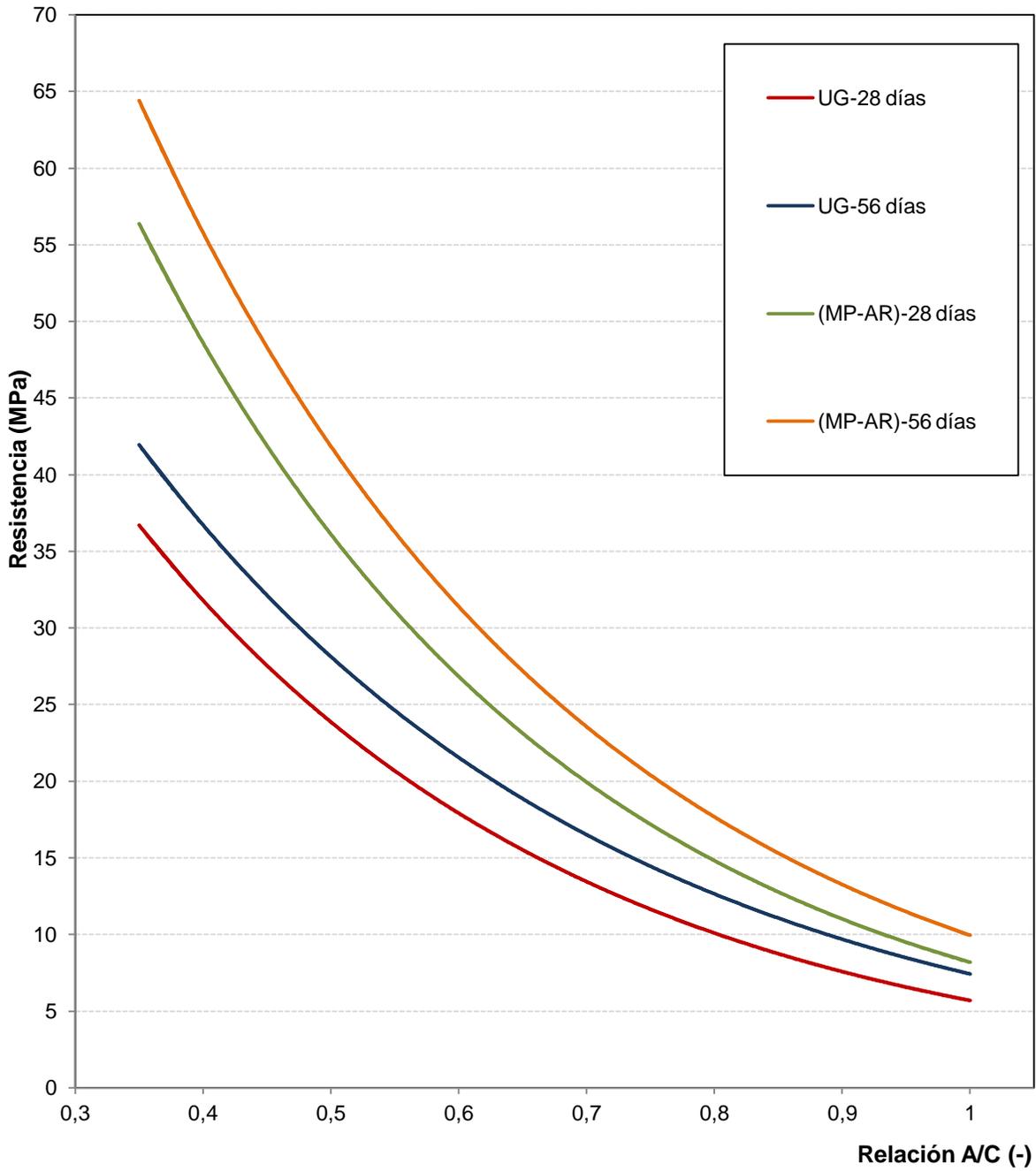


Figura 59. Análisis del comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C para concretos, usando los cementos tipo UG y MP-AR a las edades de 28 y 56 días.

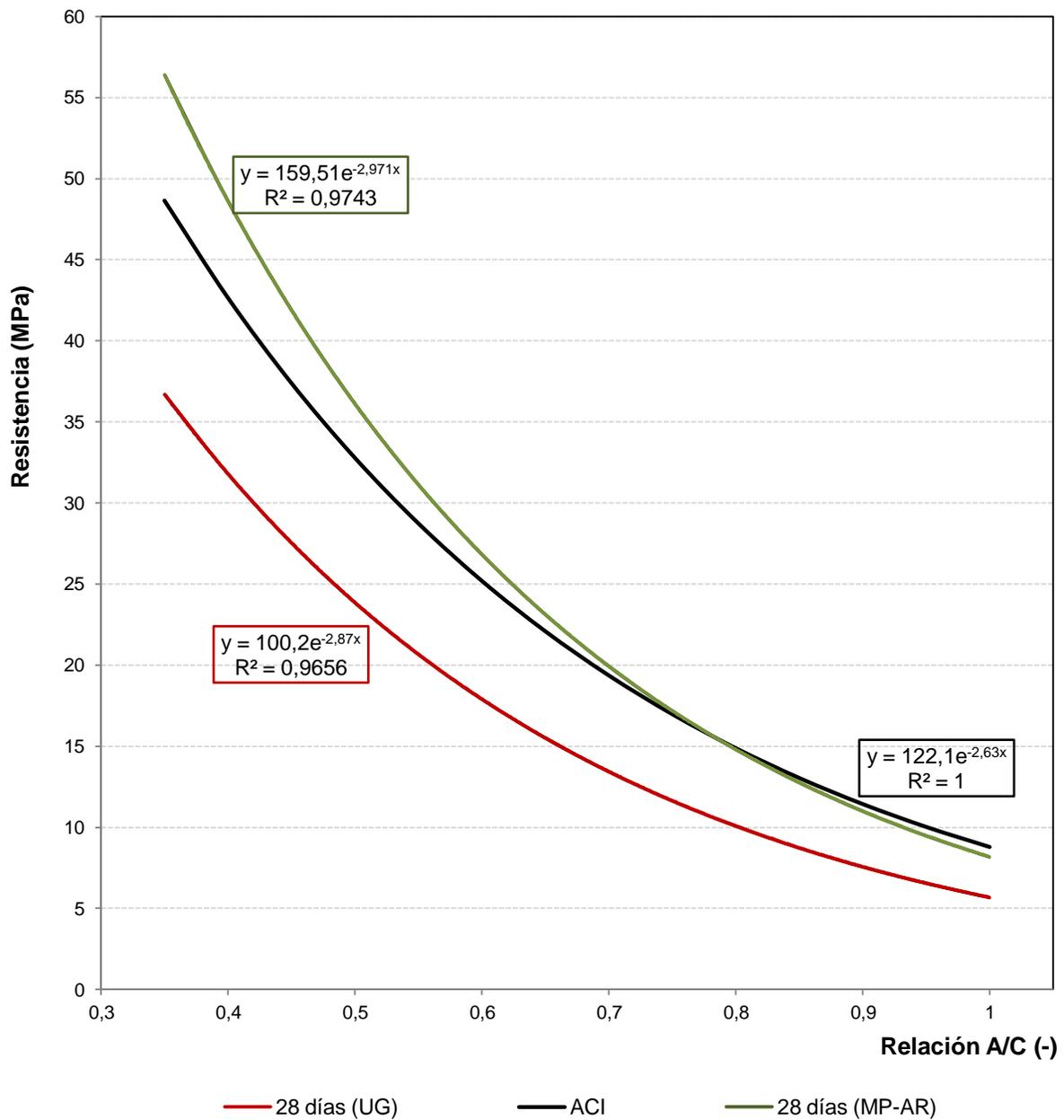


Figura 60. Comparación del comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C para concretos, usando los cementos tipo UG, MP-AR y según ACI, a la edad de los 28 días.

El siguiente gráfico corresponde a una comparación del comportamiento de la resistencia con respecto a la relación A/C para concreto, usando cemento tipo UG de Costa Rica y UG de El Salvador, aunado a la curva típica del

ACI. Esta información fue obtenida a través de un estudio académico para optar por el título de ingeniero civil del estudiante Gustavo Cáder de la Universidad de El Salvador en coordinación con el ISCYC.

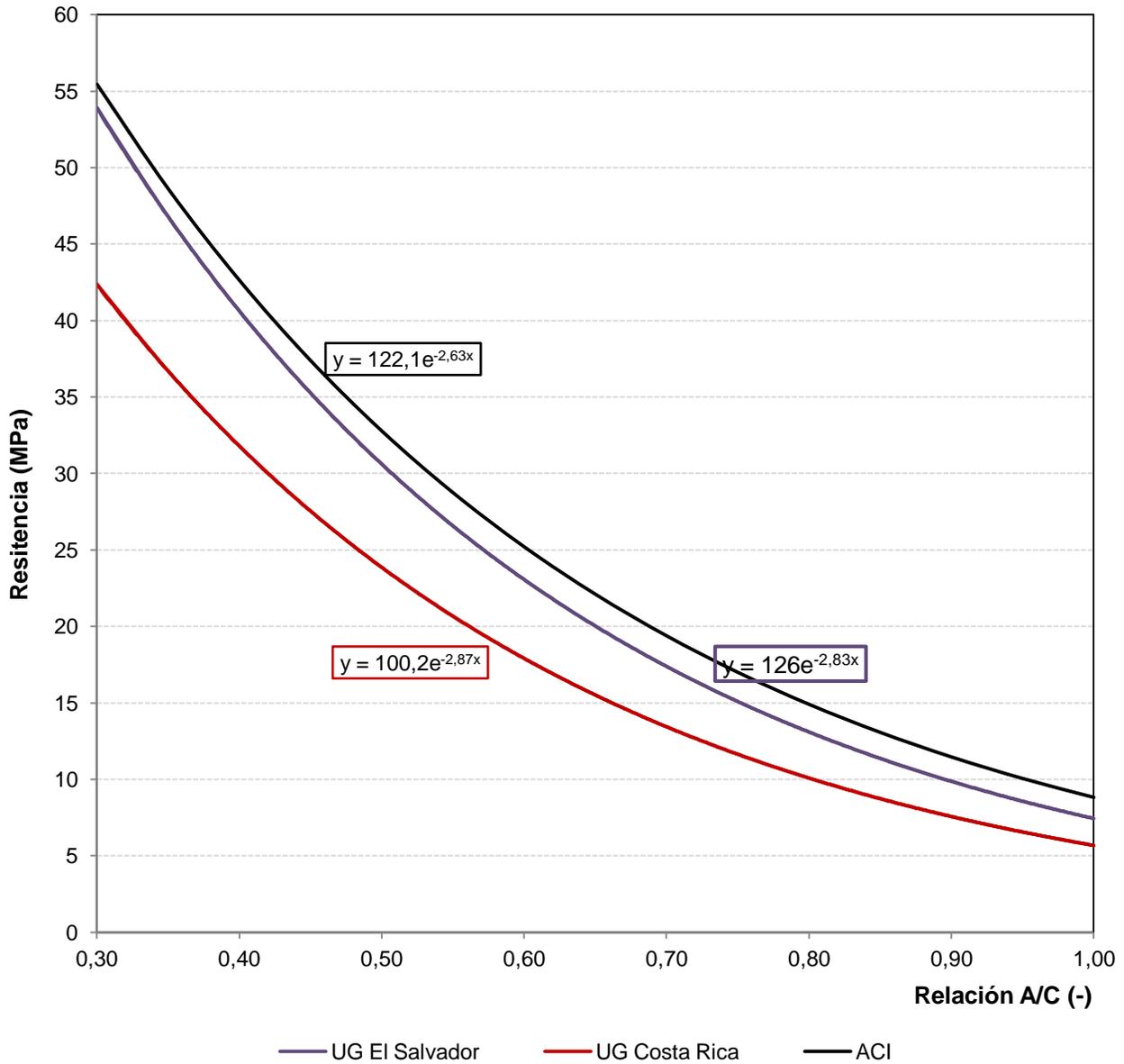


Figura 61. Comparación del comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C para concreto, usando cemento tipo UG de Costa Rica y UG El Salvador, aunado con ACI, a la edad de los 28 días.

Por medio del programa Minitab 16 se realizó la siguiente gráfica, que muestra para cada edad y las distintas relaciones A/C un análisis de los valores individuales de resistencia (MPa), donde se visualiza la línea de conexión de los promedios de cada tratamiento y la barra del

intervalo de variación asociada a los mismos. También exhibe el respectivo coeficiente de variación (CV) para cada uno de los tratamientos estudiados. Las gráficas para el resto de edades y sus respectivas relaciones A/C se encuentran en la sección de apéndices.

Cemento tipo UG

7 días

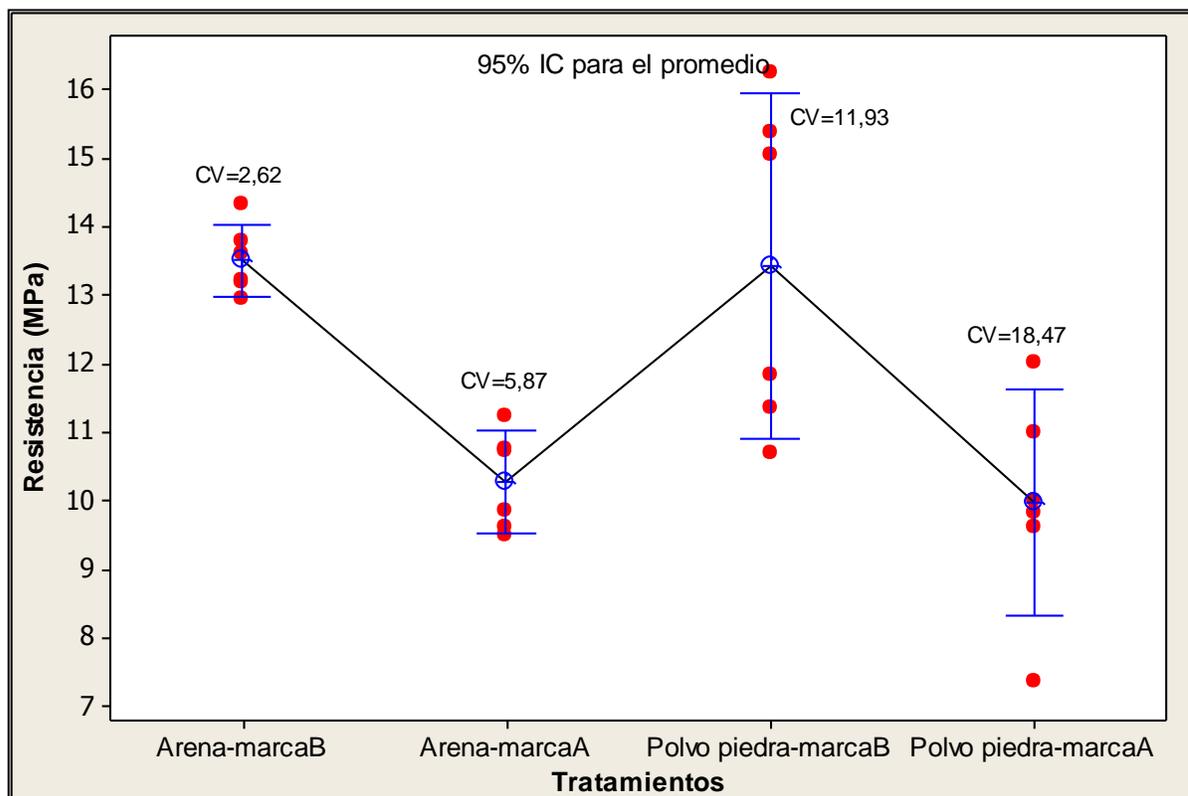


Figura 62. Análisis de los valores individuales de resistencia para los tratamientos estudiados con una relación A/C=0,55 y a la edad de 7 días.

Desarrollo de resistencia

A continuación, se presentan los gráficos que exponen el comportamiento del desarrollo de la

resistencia para los tratamientos que fueron estudiados, con ambos tipos de cemento (UG y MP-AR). Es importante recalcar que no se siguió ningún modelo de regresión teórica para realizarlos, sino que representan el comportamiento natural de los datos, consecuencia de la unión de los promedios de resistencia a las distintas edades analizadas (7, 28 y 56 días) por medio de un gráfico de

dispersión. Es por lo anterior que, para su uso y aplicación práctica, se recomienda tomar en

cuenta estas consideraciones, con el fin de no incurrir en un error de interpretación.

Cemento tipo UG

Tratamiento 1 (Arena- marca A)

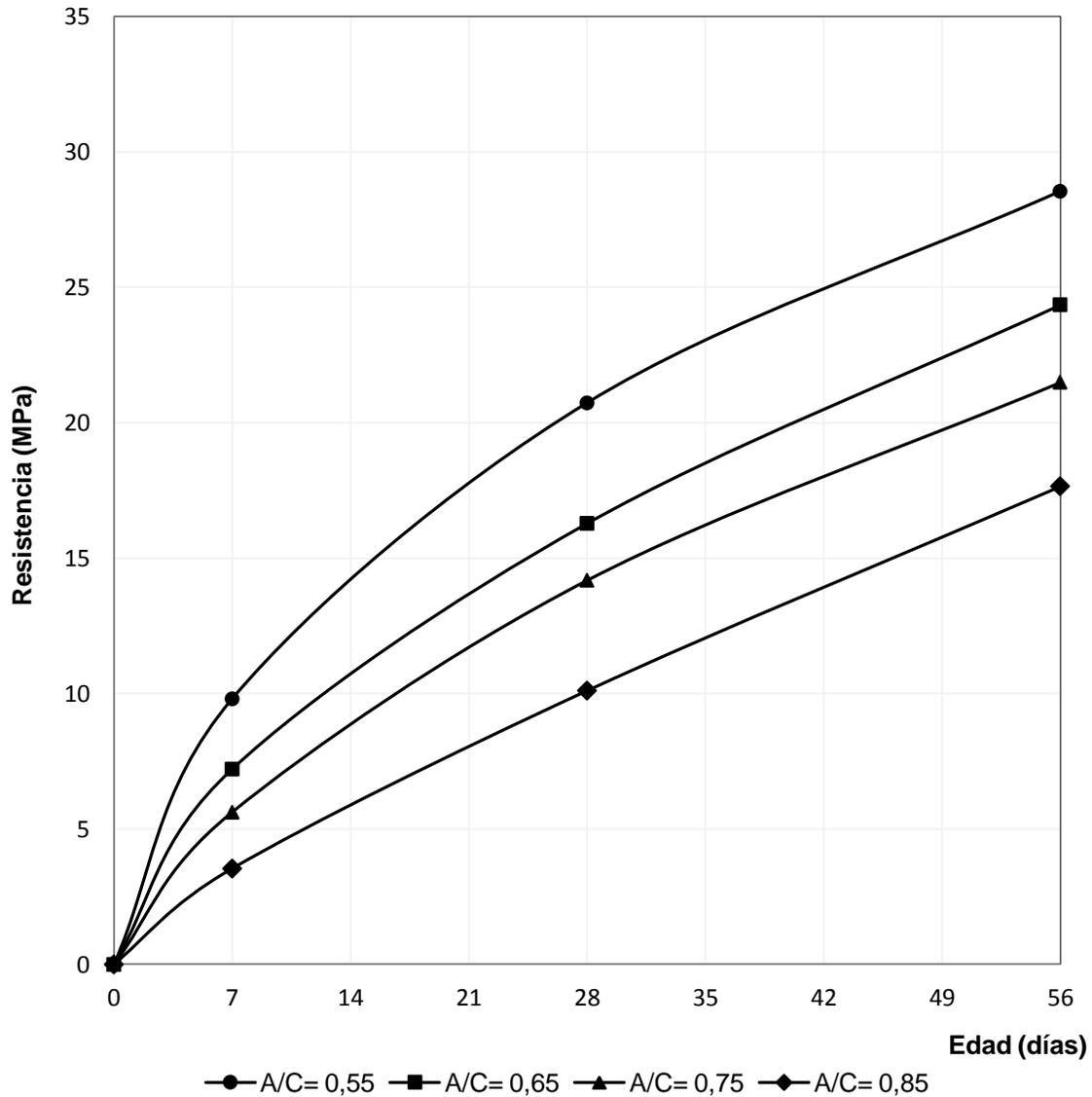


Figura 63. Comportamiento del desarrollo de la resistencia para cemento tipo UG, con marca A, usando agregado fino arena a distintas relaciones A/C.

Cemento tipo MP-AR

Tratamiento 1 (Arena- marca A)

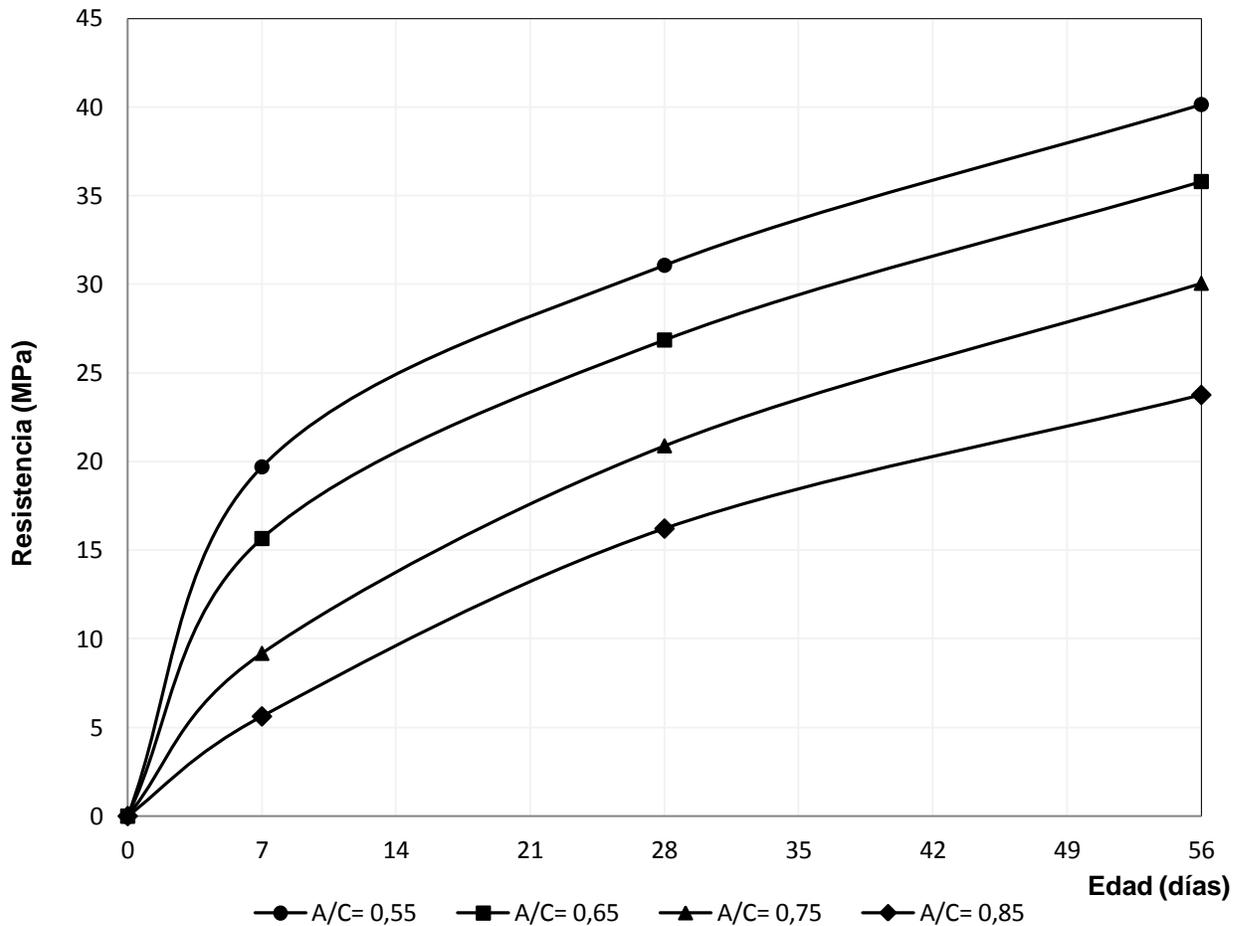


Figura 64. Comportamiento del desarrollo de la resistencia para cemento tipo MP-AR, con marca A, usando agregado fino arena a distintas relaciones A/C.

Aplicación práctica del gráfico de resistencia vs. relación A/C en los gráficos de desarrollo de resistencia

A continuación se expone una aplicación práctica de los gráficos que analizan el comportamiento de la resistencia con respecto a la relación A/C, en los gráficos de desarrollo de resistencia.

Para realizarla, primero se proyectó en el gráfico mostrado en las Figuras 63 y 64 la relación A/C requerida para obtener una resistencia aproximada de 210 kg/cm^2 , con ambos tipos de

cemento UG y MP-AR. Posteriormente se interpoló en los gráficos mostrados en las Figuras 65 y 66 los distintos valores de resistencia obtenidos con esa relación A/C requerida para el $f'c$ de 210 kg/cm^2 ; por último se graficaron estos valores. De esta manera se obtuvo un gráfico teórico del desarrollo de la resistencia para un concreto con $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

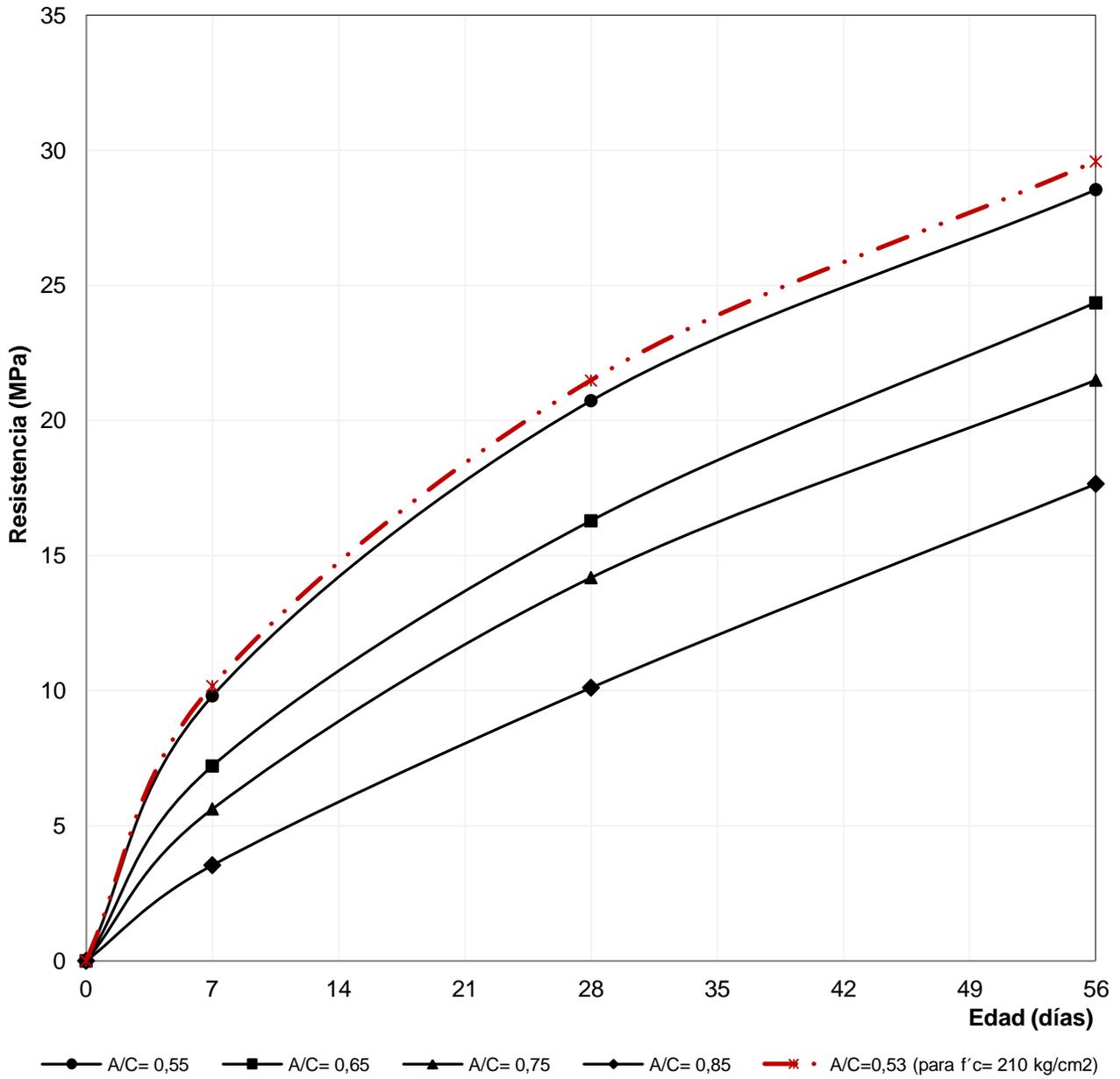


Figura 65. Gráfica teórica de desarrollo de resistencia para un concreto con $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con un cemento tipo UG.

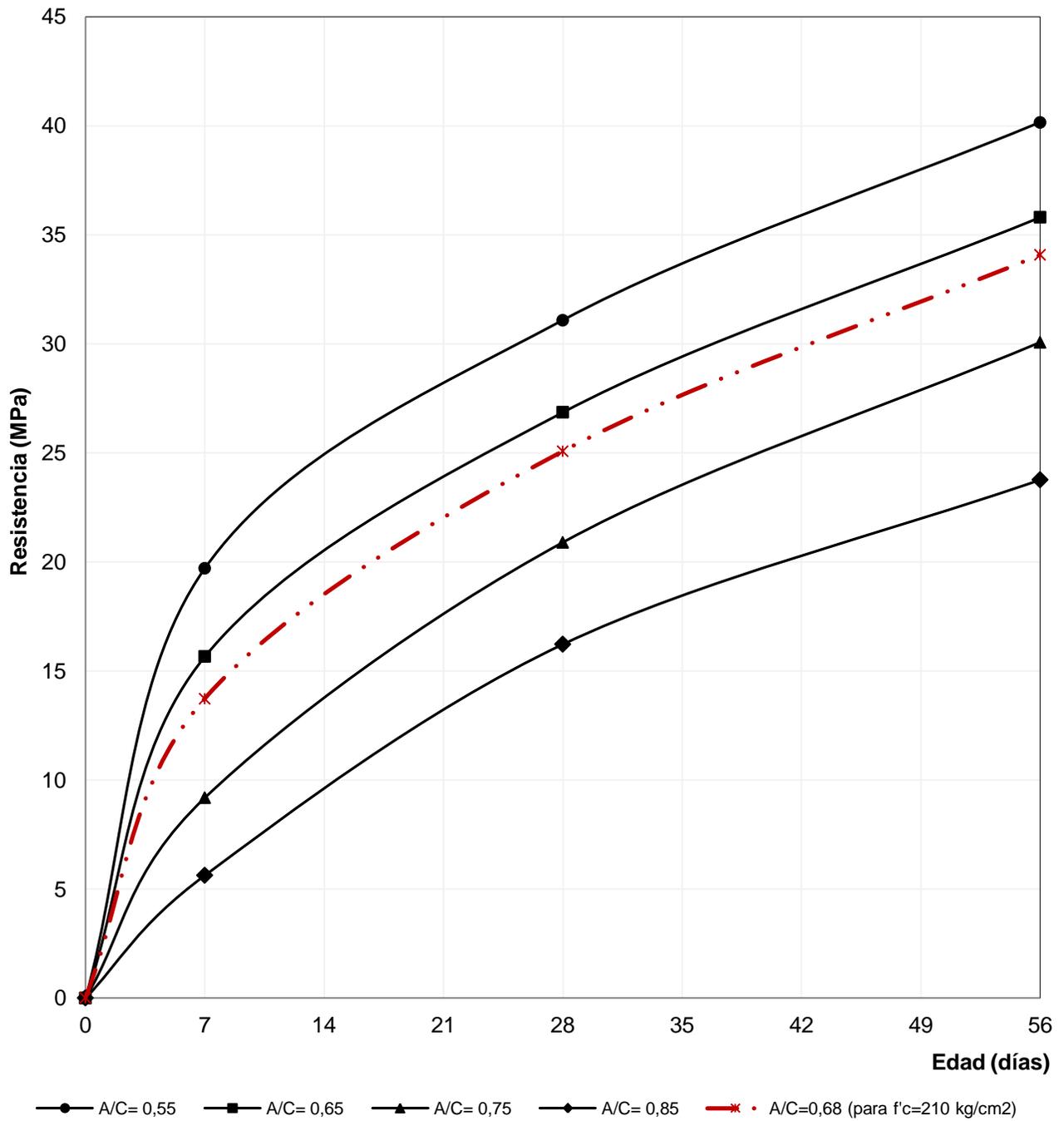


Figura 66. Gráfica teórica de desarrollo de resistencia para un concreto con $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ con un cemento tipo MP-AR.

Análisis de los resultados

Caracterización de agregados

Con el propósito de comprobar la calidad de los agregados utilizados en la fabricación de todas las mezclas, se realizaron los ensayos de caracterización de los materiales. Con base en los resultados obtenidos se confirmó que se trabajó con agregados de buena calidad, que cumplen con parámetros satisfactorios en el campo.

Para las mezclas se controló el contenido de humedad presente en los agregados y se realizó la correspondiente corrección por humedad, con el fin de conocer el contenido de agua real requerido durante la dosificación.

El ensayo de granulometría, realizado de acuerdo con la especificación (INTE-06-01-02-09) y la norma (ASTM C-136), se ejecutó con el objetivo de conocer entre otras propiedades la distribución de las partículas de agregado y si estas se encuentran dentro de los límites especificados por estos entes, el tamaño máximo de agregado y el módulo de este. Estos resultados se observan en los cuadros 16, 19, 22, 25, 28 y 31.

- ✓ Según el cuadro 16 y en su representación gráfica, por medio de la figura 39, para el agregado fino arena, la mayoría de los porcentajes pasando cumplen con la especificación anteriormente mencionada. Por lo tanto, la arena es de buena calidad y se puede utilizar para realizar mezclas de concreto, sin que afecte las propiedades de la misma. Únicamente en el tamiz N°8 no se cumple con la especificación, debido a que el porcentaje pasando es de 78% y la normativa indica que este valor se debe encontrar dentro del rango de 80-100%. No obstante, este dato se encuentra dentro de la extensión máxima permitida del 5%, por lo tanto la arena se acepta

como material para la elaboración de cilindros de concreto.

- ✓ Para el agregado fino polvo de piedra (sin corregir), como se puede observar en el cuadro 19 y gráficamente en la figura 41, la granulometría no cumple con las especificaciones, por este motivo se le hizo una corrección en la malla N°4 con el objetivo de eliminar el exceso de material grueso y acercar su granulometría a los límites establecidos por INTE 06-01-02-09. Esto se evidencia en el cuadro 22 y la figura 43, ya que la curva granulométrica se acerca más a las teóricas.
- ✓ Para los agregados gruesos de piedra cuarta y cuartilla en los cuadros 25 y 28 y en sus respectivas figuras 45 y 47, se observa que la granulometría de la cuarta se encuentra apenas por debajo del límite inferior, mientras que la cuartilla está por encima del límite superior. Con el fin de trabajar con un único agregado grueso en el diseño y elaboración de las mezclas de concreto, además de buscar que la curva granulométrica del agregado grueso esté dentro de los límites de las especificaciones, es que se mezcla estos agregados con una proporción de 40% cuartilla y 60% cuarta. En el cuadro 31, y en la figura 49 se expone los resultados de la granulometría producto de la combinación de estos porcentajes; como se observa, esta se encuentra dentro de los límites superior e inferior de la normativa, lo que da como resultado un agregado bien graduado.

La adecuada graduación consintió realizar concreto de calidad, debido a que esta permite un mejor acomodo de las partículas que conforman el concreto, lo que disminuye la cantidad de espacios vacíos en la mezcla, y aumenta el uso eficiente de la pasta.

Con respecto a los valores de peso unitario (suelto y compactado) en el caso de los

agregados gruesos, y suelto para los finos, se dedujo que corresponden a valores buenos, que presentan las características normales de los materiales utilizados en la práctica de la construcción. Es importante mencionar que los materiales utilizados fueron secados al horno antes de la ejecución de la prueba, con el propósito de eliminar la humedad interna y obtener el peso unitario masivo seco requerido en el diseño de mezcla.

El ensayo de colorimetría aplicado a los agregados finos arena y polvo piedra, ratificó que no hay presencia de contaminación ni compuestos orgánicos en los agregados finos. Esto es importante ya que, para la elaboración de concreto de calidad, los agregados deben estar libres de cualquier material que pueda causar deterioro del mismo.

El agregado fino arena presentó un módulo finura de 3,1 que se acepta dentro de la normativa, por otra parte, el polvo piedra presentó un módulo de finura de 3.31. Esta condición se permite a pesar de que el mayor valor aceptado es de 3.1, debido a que a nivel nacional la mayor parte de las arenas presentan las mismas características.

Con estas afirmaciones, se confirmó que los agregados, tanto finos como gruesos, poseen las características necesarias para realizar mezclas de concreto de calidad.

Estadística descriptiva

Al comparar los resultados obtenidos del coeficiente de variación inherente a la prueba (V_1), con base en el cuadro 11⁵⁰ del marco conceptual, que muestra una clasificación según la norma de control, en este caso, mezclas hechas en laboratorio para los diferentes rangos de V_1 . Se deduce de los resultados que hay una gran variedad en la clasificación, ya que estas van desde excelentes, muy buenas, buenas, aceptables y pobres en su mayoría. Aquí se obtuvo un 35% en las primeras cuatro categorías, mientras que un 65% en el condición de pobre, lo anterior al analizar los tratamientos de estudio para todas las edades con ambos tipos de cemento (UG y MP-AR) que se encuentran presentadas de manera completa en la sección de apéndices. Es importante recalcar que estos

rangos de clasificación obedecen a condiciones muy estrictas.

Normalidad

Para realizar el análisis estadístico y aplicar las pruebas paramétricas que se mostraron en la sección de resultados, y de manera completa en el apéndice 1, fue importante comprobar que los valores de resistencia para las muestras de datos analizadas siguieran una distribución normal. Esto fue posible por medio de la prueba de normalidad Kolmogorov- Smirnov; a través de la misma se constató que incluso sin importar el nivel de significancia, los datos muestrales para los diferentes tratamientos estudiados, reflejan que tienen propiedades que solo se acercan a las propiedades teóricas de la distribución normal.

Es importante que cuando se aplican las pruebas paramétricas se cumpla con este requerimiento de normalidad, además de que las variables de estudio (resistencia) sean medidas en una escala numérica y que presenten la propiedad de homocedasticidad. Es decir, que las varianzas de la variable dependiente (resistencia) en los tratamientos comparados sean aproximadamente iguales (verificado por medio de la prueba F, que se analizará posteriormente), ya que cuando los datos cumplen con los anteriores requerimientos, las pruebas paramétricas exhiben su máximo poder.

ANOVA (un factor)

Como ya se mencionó anteriormente, el análisis de varianza de un factor permitió determinar si existían diferencias significativas entre los promedios de los distintos tratamientos estudiados para cada relación A/C a las tres edades. Sin embargo, esta información va a ser analizada de manera global, por edad, en el ANOVA de dos factores, examinado posteriormente. La información más relevante que otorga esta prueba es la medida del error no controlado, la cual se visualiza gráficamente en la siguiente figura 68, que va a ser analizada en comparación con la figura 67, la cual expone un análisis de los valores individuales de resistencia.

⁵⁰ (ACI 214R-77;1997)

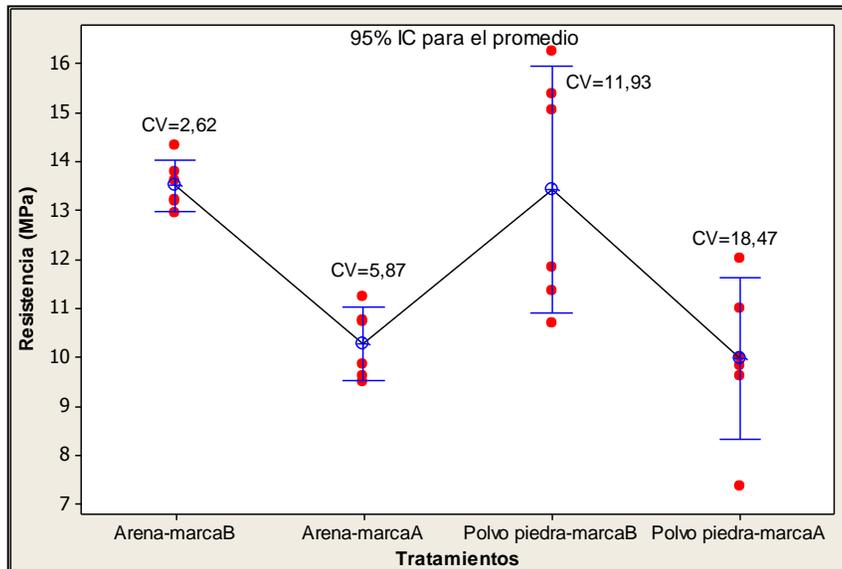


Figura 67. Análisis de los valores individuales de resistencia para los tratamientos estudiados con una relación A/C=0,55 y a la edad de 7 días.

En el gráfico 67 se visualiza la línea de conexión de los promedios de cada tratamiento y la barra de variación asociada a los mismos con su respectivo coeficiente de variación (CV).

Como se puede observar en el gráfico, en este caso específico los datos muestrales para cada tratamiento sugieren que no existen diferencias significativas entre los promedios de la arena-marca B y el polvo piedra B, y por otra parte, tampoco las hay entre la arena-marca A y el polvo piedra –marca A. Dicho de otra manera, para una misma marca de cemento no hay diferencias sin importar el agregado fino que se utilice. Esta deducción visual se comprobó por medio de la prueba de comparación múltiple de promedios Tukey, mostrada de manera completa en el apéndice 1.5.

Además, como se aprecia en el gráfico, para esta muestra de datos, la variación asociada al concreto en donde se

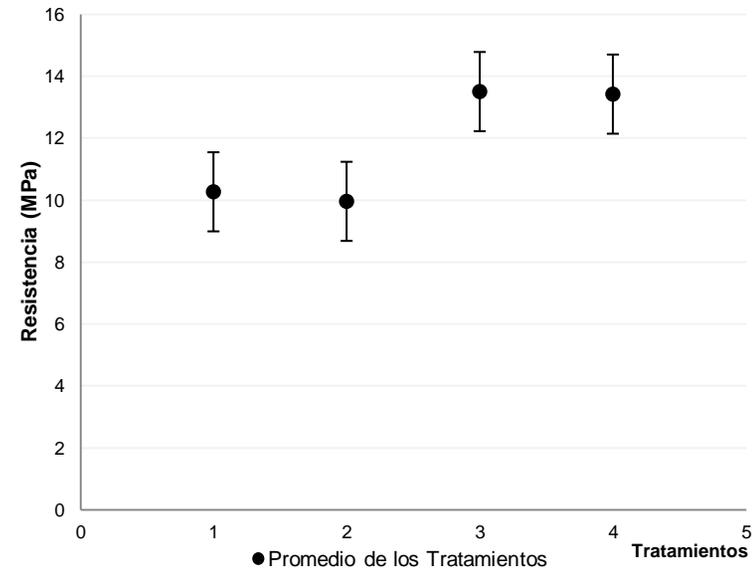


Figura 68. Representación gráfica de los promedios para cada tratamiento (Arena-marca A; Polvo p.-marca A; Arena-marca B; Polvo p.-marca B, simbolizados del 1 al 4 respectivamente) con su respectiva banda de error no controlado. Para la relación A/C = 0,55.

utilizó el agregado fino polvo piedra es mucho mayor a la obtenida usando arena como agregado fino. Esto se pudo deber a que con arena se obtienen mezclas más trabajables, lo que conlleva a concretos más densos, en donde los espacios vacíos fueron cubiertos por la pasta, y se fabricaron cilindros más homogéneos. El uso de agregado fino polvo piedra pudo influir por ser una mezcla con relación A/C baja, usualmente seca al no utilizarse aditivos, en donde el concreto presentó problemas de hormigueros por mostrar mayores dificultades al compactarse que al utilizar arena, lo cual aumentó la heterogeneidad de los cilindros y por ende su variación.

Lo anterior aplica para este caso particular, debido a que si se analizan todos los resultados completos presentados en el apéndice 1, se puede deducir que no es constante, en todas las edades ni en todas las relaciones, este comportamiento en

los tratamientos de estudio, ya que en un 47% se presentó mayor variación en el agregado polvo piedra, mientras que en un 53% lo presentó la arena.

Como se mencionó en la sección del marco conceptual, el origen de las diferencias en la resistencia se puede encontrar en dos fuentes fundamentalmente distintas. Las variaciones analizadas anteriormente y reflejadas en el gráfico de la figura 67 corresponde al primer tipo, nombradas, variaciones en las propiedades de la mezcla de concreto y de sus ingredientes.

Por otra parte, la segunda fuente corresponde a las diferencias aparentes en la resistencia, ocasionadas por las variaciones inherentes a la prueba, las cuales se encuentran reflejadas en el otro gráfico (figura 68).

Fue por medio del análisis del ANOVA, que se logró hacer la separación de estas fuentes de variación, ya que el mismo otorga los datos necesarios para determinar el porcentaje de error no controlado, el cual es reflejado en las bandas mostradas en la figura 68. Este error, como se indicó, se debe a aquellos factores que no se pudieron controlar y que influyeron en el resultado final de la resistencia, entre ellos se puede citar las variaciones en las técnicas de fabricación, ya que en la práctica, fue imposible que una sola persona moldeara todos los cilindros, así como posibles diferencias en los procedimientos de prueba a la compresión, entre otros. Para este caso particular, el error no controlado corresponde al 40%, y es importante recalcar que, al analizar la totalidad de los resultados, se deduce que en un 83% este error es menor a lo controlado, es decir, fue mayor el porcentaje de lo que se logró controlar (relación A/C, tipo de agregado fino, edad de falla, tipo de cemento, marca de cemento), que aquello que no.

Para sintetizar, la resistencia está regida en gran medida por la relación A/C, por lo tanto, el primer criterio a considerar para fabricar un concreto de resistencia constante, es una relación A/C constante. La dificultad de mantener una relación A/C constante es, esencialmente, el de corregir la cantidad variable de humedad libre en los agregados, en este proyecto se logró por medio de una corrección por humedad antes de realizar las mezclas de concreto.

La homogeneidad del concreto está influida por la variabilidad de los agregados y del

cemento, debido a que estos contribuirán a las variaciones en la resistencia del concreto. Las prácticas de construcción pueden ocasionar variaciones en la resistencia debido a diferencias en el mezclado o en la compactación, que se van a reflejar en la resistencia alcanzada por el concreto.

ANOVA (dos factores)

Por medio de esta prueba, se logró hacer un análisis global por edad (7, 28 y 56 días) para cada tipo de cemento UG y MP-AR, en el cual se compararon los promedios de los tratamientos para cada relación A/C. Es decir, se analizó si existían diferencias significativas entre los promedios, desde el punto de vista de las relaciones A/C y de acuerdo con los distintos tratamientos.

Los resultados exhibieron que, como era de esperarse, al considerar las relaciones A/C, sí existían diferencias significativas entre los promedios para una misma edad en todos los casos. Sin embargo, al comparar los diferentes tratamientos, para un 70% de los resultados no existieron diferencias significativas entre los promedios utilizando un nivel de significancia $\alpha = 0,01$ y en solo 2 de la pruebas (30%) sí las hubieron.

Los casos en donde se presentaron diferencias significativas entre los promedios de los tratamientos corresponden a el cemento UG a la edad de 7 días, para el mismo hasta un nivel de significancia $\alpha = 0,005\%$ se logró que no hubieran diferencias. El otro caso corresponde a el cemento MP-AR a la edad de 56 días, para este con un $\alpha = 0,03\%$ se consiguió que no se presentaran diferencias significativas, entre los promedios de los tratamientos.

Estos resultados permitieron realizar el análisis del comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C gráficamente, de manera general tanto para el cemento UG, como MP-AR, sin discriminar entre los tipos de agregado fino o marcas de cemento.

Prueba F

Esta prueba permitió comparar las varianzas asociadas con los datos muestrales de los

tratamientos analizados, con lo cual se logró comprobar la homocedasticidad de los datos de resistencia, o dicho de otra manera, que las varianzas de la variable dependiente (resistencia) son aproximadamente iguales.

Al analizar la totalidad de los resultados dados por la prueba F, se deduce que, para las pruebas realizadas, en un 75% de ellas no se obtuvieron diferencias significativas entre las varianzas de sus datos, fue solo en un 25% en donde sí se encontraron. Esto da libertad de realizar las pruebas paramétricas, al cumplirse este requerimiento.

Resistencia vs. relación A/C

El comportamiento mostrado en las gráficas de resistencia vs. relación A/C era el esperado, ya que la cantidad de agua usada con relación con la cantidad de cemento (relación A/C), para la fabricación de mezclas de concreto es, sin duda, el elemento más determinante en la resistencia última del concreto endurecido, sin importar el grupo de materiales.

Lo anterior comprobó esa fuerza de relación entre la resistencia y las distintas relaciones A/C, en donde, como se puede observar en el gráfico resumen mostrado en la figura 59, conforme aumenta la relación A/C disminuye la resistencia a la compresión, fenómeno que también afecta a la resistencia a la flexión, tracción y la adherencia entre el concreto y el acero.

Es importante tener presente que la disminución de la cantidad de agua provoca ventajas como: aumento de la resistencia a la compresión, disminución de la permeabilidad y por ende disminución de la absorción, aumento de la resistencia a la intemperie, mejor unión entre el concreto y la armadura en el caso de concretos reforzados, reducción de la contracción y fisuramiento, entre otras. Estas ventajas son obtenidas únicamente si la mezcla se puede compactar adecuadamente, y se permite que el aire atrapado sea expulsado y que no queden vacíos en la mezcla; se logra así un concreto más denso, resistente y durable.

Como se observa en la figura 57, que compara el comportamiento de la resistencia vs. la relación A/C para concretos con los dos tipos de cemento UG y MP-AR a la edad de 28 días, los promedios de los datos muestrales obtenidos

sugieren un comportamiento similar. Como era de esperarse el concreto con cemento tipo MP-AR reflejó mayores resistencias en relación con el concreto usando cemento tipo UG.

En la figura 60, se mostró una comparación del comportamiento de la resistencia vs. relación A/C para concretos, usando UG, MP-AR y según ACI, a la edad de 28 días. Como se observa, es el concreto con cemento MP-AR el que se encuentra más cerca de la tendencia teórica expuesta por ACI.

Para el gráfico representado en la figura 61, se expuso la comparación del comportamiento de la resistencia vs. A/C para concreto, usando cemento tipo UG de C.R y UG de El Salvador, aunado con la curva típica de ACI, a la edad de 28 días. Como se visualiza, el concreto con cemento UG- El Salvador se acerca más a la curva teórica del ACI.

Desarrollo de resistencia

El desarrollo de la resistencia, o bien, la resistencia a la compresión que el concreto logra, está en función primordialmente de: la relación A/C como ya fue mencionado, además de cuánta hidratación (reacción entre el cemento y la pasta) ha progresado, del curado y las condiciones ambientales, y por último de la edad del concreto.

Según la PCA⁵¹, la resistencia a los 56 y 90 días es aproximadamente 10% y 15% mayor que la resistencia a los 28 días.

De los datos muestrales, reflejados en los gráficos de desarrollo de resistencia, expuestos en el capítulo de resultados, se obtuvo la información que establece que, para los concretos con cementos tipo UG y MP-AR, se presentó aproximadamente un aumento de resistencia del 20% a la edad de 56 días con respecto a la de 28 días.

Tiempo atrás, no se presentaba un incremento tan drástico de 28 a 56 días, a partir de la edad de 28 días el comportamiento se mantenía constante y la curva era más horizontal. Un incremento del 15 al 20% se daba al final del primer año. Este cambio en el comportamiento es debido al aumento en la cantidad de puzolanas con las que se fabrica el cemento actualmente, ya que estas provocan un retardo en el desarrollo

⁵¹ (Kosmatka et al., 2004).

de la resistencia en el tiempo, es decir, actúan como un retardante.

Al fraguar más lento se generan menos fisuras, y se fabrican concretos más densos que mejoran la resistencia, pero a mediano y largo plazo.

Del mismo modo se analizó en los gráficos de desarrollo de la resistencia con respecto a la edad, el aumento en la resistencia a una misma edad al variar el tipo de cemento utilizado. En estos, los datos muestrales sugieren

una diferencia de hasta un 37% en la resistencia del cemento MP-AR con respecto al UG a la edad de 28 días. Esta información es sumamente práctica, ya que para las condiciones especiales de construcción de elementos de concreto, donde se requiera un desarrollo de resistencia temprano, va a ser útil contar con la misma. Por otra parte, al hacer este mismo análisis, pero a la edad de 56 días, se obtuvo una diferencia en la resistencia de hasta el 28% del cemento tipo MP-AR con respecto al cemento UG.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- ✓ Se generó un buen parámetro a través del diseño de mezcla, se obtuvo buenos resultados alrededor de (200 kg/cm^2) gracias a que los agregados eran de buena calidad.
- ✓ La magnitud de las variaciones en la resistencia de los cilindros de prueba de concreto depende del apropiado control de los materiales, de la fabricación del concreto y de la realización de las pruebas de falla a la compresión.
- ✓ Las tablas publicadas en el ACI 211.1-91⁵² para la selección de la relación A/C, no reflejan las relaciones A/C que se manejan con cementos nacionales, debido a que las propuestas en esta norma no siempre aseguran una buena trabajabilidad, sobre todo las más bajas.
- ✓ La relación A/C para la fabricación de mezclas de concreto es, sin duda, el elemento más determinante en la resistencia última del concreto endurecido, ya que cuando se utiliza más agua de la necesaria, la calidad de la pasta disminuye y por ende la del concreto.
- ✓ El comportamiento mostrado en las gráficas de resistencia vs. relación A/C era el esperado, lo cual comprobó la fuerza de relación entre estas variables. Conforme se aumenta la relación A/C, disminuye la resistencia a la compresión.
- ✓ Los cementos actuales fraguan más lento, debido al aumento en la cantidad de puzolanas con las que se fabrican, ya que estas actúan como retardantes. Esto influye directamente en el desarrollo de resistencia del concreto con la edad, y se presenta, para los datos muestrales analizados, un aumento promedio de resistencia del 20% a la edad de 56 días con respecto a la de 28 días. Es importante tomar en cuenta que, anteriormente para obtener un aumento de resistencia del 20% tenía que pasar alrededor de un año.
- ✓ Es necesario estar realizando pruebas de verificación debido a que en casos específicos, dependiendo de las características de los agregados, se puede llegar a un aumento de resistencia de hasta el 38% durante el primer mes, posterior a la edad de 28 días, comportamiento percibido en algunos casos puntuales de los datos muestrales analizados en este trabajo.
- ✓ Concretos con cementos que fraguan más lento generan menos fisuras, lo que conlleva a que sean más densos, y se mejora la resistencia, pero a mediano y largo plazo.
- ✓ En el análisis y comprobación de la normalidad de los datos, no existe suficiente evidencia en la información que acarrear las series muestrales como para rechazar la hipótesis nula, la cual originalmente plantea que todos los valores de resistencia son normalmente distribuidos. Esto faculta haber realizado el análisis estadístico a través de las pruebas paramétricas expuestas en el cuerpo del trabajo.
- ✓ La muestra estadística de los diferentes tratamientos no cumple con los criterios estadísticos convencionales, ni con las normas que rigen la mecánica de dichos ensayos⁵³; lo anterior no debería sugerir que no existan tendencias o que dichas tendencias sean inválidas dentro del espacio muestral.

⁵² (ACI 211.1-91; 2002).

⁵³ (Manual de usuarios Minitab 16).

- ✓ En el análisis de varianza de dos factores, a la edad de los 28 días, no existe suficiente evidencia en la información que acarrear las series muestrales como para rechazar la hipótesis nula, la cual originalmente plantea que no existen diferencias significativas entre los promedios de los tratamientos, y que por lo tanto, pueden considerarse muestras de

una misma población infinita.

- ✓ Finalmente, el estudio realizado en el presente trabajo permite brindarles a las personas relacionadas con la Industria de la Construcción una guía del comportamiento de la resistencia con respecto a la relación A/C y cómo afecta la misma a la resistencia última del concreto endurecido.

Recomendaciones

- ✓ Se recomienda para aquellos casos en donde se requiere un control mayor al de campo, hacer una corrección por humedad antes de realizar las mezclas, para no sobresaturar la mezcla; o por el contrario, dependiendo de la sequedad de los agregados, se trabaje con un contenido de agua menor al requerido, debido a que la cantidad de agua adicionada afecta la relación A/C y por ende la resistencia final del concreto.
- ✓ Cuando se dispone realizar un estudio similar al presentado, es recomendable ejecutar pruebas previas de trabajabilidad, capacidad de carga de la batidora, así como probar los equipos que van a utilizarse, para generar un parámetro de arranque e iniciar con la certeza de que no se van a generar imprevistos que van acarrear pérdida de tiempo y errores implícitos, no siempre detectables, y que afectan el resultado final.
- ✓ Para estudios académicos y en aquellas obras donde por su grado de importancia requieran de estricto control, es recomendable realizar una dosificación por peso en la fabricación de las mezclas de concreto, con el fin de obtener un mayor control.
- ✓ Se propone realizar más pruebas en el concreto fresco con el propósito de conocer más de sus propiedades. Uno de los ensayos recomendados es la medición de la temperatura en el concreto recién mezclado (Norma ASTM C-1064).
- ✓ Con el propósito de explorar dichas relaciones A/C con mayor profundidad, se sugiere no solo aumentar la densidad de muestreo, sino también garantizar la aleatoriedad de la escogencia de las

muestras, en apego a los criterios estadísticamente válidos. Se aspira a tener mayor entendimiento de los procesos físicos que ocurren puntualmente en cada combinación de edad y relación A/C.

- ✓ Por otro lado, es igualmente deseable aumentar la resolución de las relaciones A/C, además de incrementar el estudio hacia los extremos de las que ya fueron analizadas, y al mismo tiempo la edad de falla de cilindros.
- ✓ Para aumentar el campo de estudio, es recomendable incluir otros tipos de cemento utilizados en Costa Rica.
- ✓ Para efectos de disminuir el error no controlado, y por ende las diferencias aparentes en la resistencia, ocasionadas por las variaciones inherentes a la prueba, se recomienda que para ensayos futuros se controle que la compactación de los cilindros esté sujeta a una única persona, así como la falla a la compresión de los cilindros.
- ✓ Para medir la variabilidad de la resistencia debida a las variaciones en el proceso de compactación, se recomienda determinar la densidad del concreto en todos los cilindros fabricados.
- ✓ Se recomienda revisar las fórmulas de diseño estructural y adoptar el método ACI 211.1-91 a las condiciones reales de nuestro país. Esto porque muchas de estas fórmulas se basan en el $f'c$, lo cual hace de los diseños muy conservadores, debido a que dejan por fuera cualquier remanente en resistencia adicional, obtenido por la edad, que por los resultados obtenidos en el presente estudio claramente se da, con los cementos nacionales a la edad de 56 días en relación con la de 28 días.

Referencias

- ✓ ASTM C-29. 1997. **MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD APARENTE O PESO UNITARIO Y PORCENTAJE DE VACÍOS EN LOS AGREGADOS.**
- ✓ ASTM C-39. 2002. **MÉTODO ESTÁNDAR DE PRUEBA PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE ELEMENTOS CILÍNDRICOS DE CONCRETO.**
- ✓ ASTM C-40. 2004. **MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA LA DETECCIÓN DE IMPUREZAS ORGÁNICAS EN EL AGREGADO FINO PARA EL CONCRETO.**
- ✓ ASTM C-125. 2003. **DEFINICIÓN ESTÁNDAR DE TÉRMINOS RELACIONADOS CON EL CONCRETO Y AGREGADOS DEL CONCRETO.**
- ✓ ASTM C-127. 2004. **MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD, LA DENSIDAD RELATIVA O GRAVEDAD ESPECÍFICA, Y LA ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS.**
- ✓ ASTM C-128. 2004. **MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD, LA DENSIDAD RELATIVA O GRAVEDAD ESPECÍFICA, Y LA ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS.**
- ✓ ASTM C-131. 2003. **MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DEL AGREGADO POR ABRASIÓN EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.**
- ✓ ASTM C-136. 2005. **MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA LA DETERMINACIÓN GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS FINOS Y GRUESOS.**
- ✓ ASTM C-117. 2004. **DETERMINACIÓN DEL MATERIAL MÁS FINO QUE LA MALLA N°200 EN AGREGADOS MINERALES MEDIANTE LAVADO.**
- ✓ ASTM C-192. 2012. **PRÁCTICA NORMALIZADA PARA PREPARACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO PARA ENSAYO EN LABORATORIO.**
- ✓ ASTM C-702. 2003. **PRÁCTICA ESTÁNDAR PARA REDUCCIÓN DE LAS MUESTRAS DE AGREGADO A TAMAÑOS DE PRUEBA.**
- ✓ ACI-211.1-91. 2002. **PRÁCTICA ESTÁNDAR PARA LA SELECCIÓN DE LAS PROPORCIONES DE CONCRETO NORMAL, PESADO Y MASIVO.**
- ✓ ACI 214R-02. 1997. **EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA DEL CONCRETO.**
- ✓ RTCR 383. 2004. **REGLAMENTO TÉCNICO DE CEMENTOS HIDRÁULICOS.**
- ✓ Informe del Comité ACI 116. 1982. **UN GLOSARIO DE TÉRMINOS EN EL CAMPO DE LA TECNOLOGÍA DEL CEMENTO Y CONCRETO.**
- ✓ Muñoz, F. 1998. **COMPONENTES PRINCIPALES DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO.** 1 ed. Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- ✓ Cáder, G. 2012. **ADAPTACIÓN DEL MÉTODO DE DISEÑO DE MEZCLAS DE**

- CONCRETO SEGÚN ACI 211.1 UTILIZANDO LOS TIPOS DE CEMENTO ASTM C-1157 TIPO UG Y ASTM C-1157 TIPO HE.** Universidad de El Salvador. El Salvador.
- ✓ Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto. 1977. **PRÁCTICA RECOMENDABLE PARA LA EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA DEL CONCRETO.** 1 ed. México: Editorial Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto A.C.
 - ✓ Kosmatka et al. 2004. **DISEÑO Y CONTROL DE MEZCLAS DE CONCRETO.** 1 ed. EE.UU: Portland Cement Association.
 - ✓ Mehta, K & Monteiro, P. 1998. **CONCRETO.** 1ed. México: Editorial Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
 - ✓ Powers, T. 1948. **UNA DISCUSIÓN SOBRE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO EN RELACIÓN AL CURADO DEL CONCRETO.** Portland Cement Association.
 - ✓ Gonneman, H & Shuman, E. 1928. **ENSAYOS DE FLEXIÓN Y TENSIÓN DEL CONCRETO SIMPLE.** Portland Cement Association.
 - ✓ Hedenblad, G. 1997. **SECADO DEL AGUA DE CONSTRUCCIÓN EN EL CONCRETO.** Portland Cement Association.
 - ✓ Hedenblad, G. 1998. **TIEMPO DE SECADO DEL CONCRETO.** Portland Cement Association.
 - ✓ Abrams, D. 1918. **DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO.** Institute Structural Materials.
 - ✓ Feret, R. 1897. **ESTUDIOS SOBRE LA CONSTITUCIÓN ÍNTIMA DE LOS MORTEROS HIDRÁULICOS.** Bulletin de la Societe d'Encouragement Pour Industrie Nationale.
 - ✓ Moya, M. 1995. **PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA UN ENFOQUE TEÓRICO-PRÁCTICO.** 1 ed. Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
 - ✓ Baird, D. 1991. **EXPERIMENTACIÓN, UNA INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE MEDICIONES Y AL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.** 2 ed. México: Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
 - ✓ Villon, M. 1993. **HIDROLOGÍA ESTADÍSTICA.** 1 ed. Perú: Ediciones Villon.
 - ✓ Devore, J. 2005. **PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA PARA INGENIERÍA Y CIENCIAS.** 6 ed. México: Editorial International Thomson Editores, S.A. de C.V.
 - ✓ Massart, D. 1997. **ANALYSIS OF VARIANCE.** Amsterdam: Editorial Elsevier.
 - ✓ Manual de Usuarios Minitab 16. 2010. **MEET MINITAB 16.** Versión 16.1.0. Editorial: Minitab, Inc.
 - ✓ Arce, E. 2011. Procedimientos de laboratorio. Cartago, CIVCO- ITCR. Comunicación personal.
 - ✓ Méndez, M. 2011. Análisis estadístico de resultados. Cartago, CIVCO- ITCR. Comunicación personal.

Apéndices

1. Análisis estadístico completo

- 1.1. Estadística descriptiva.
- 1.2. Normalidad.
- 1.3. Anova de un factor.
- 1.4. Anova de dos factores.
- 1.5. Prueba Tukey.
- 1.6. Prueba F.
- 1.7. Resistencia vs. relación A/C (modelo de regresión lineal).
- 1.8. Desarrollo de resistencia.

2. Memoria de cálculo Diseños de mezcla

- 2.1. Para agregado fino arena.
- 2.2. Para agregado fino polvo piedra.

3. Cronograma de fabricación y falla de cilindros

- 3.1. Cemento tipo UG.
- 3.2. Cemento tipo MP-AR.

Anexos

- 1. RTCR 383:2004 Cementos hidráulicos. Especificaciones.**
- 2. Ficha técnica cementos tipo UG y MP-AR.**