Revista Tecnológica ESPOL, Vol. Xx, N. xx, pp-pp, (Enero, 2009)

CORRELACIONES ENTRE ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA CON AGREGADOS CALCÁREOS

Natividad L. García Troncoso, Karla P. Crespo León, Ing. Hugo Egüez Álava
Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
Escuela Superior Politécnica del Litoral
Km. 30.5 vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador
nlgarcia@espol.edu.ec, kcrespo@espol.edu.ec, heguez@espol.edu.ec

Resumen

En el presente trabajo de investigación se expone información sobre el comportamiento mecánico de hormigones de alta resistencia para lo cual hemos obtenido información de laboratorio en el que se desarrollaron hormigones utilizando cemento Portland, microsílice y aditivos superfluidificantes. Posteriormente se realizaron diversos tipos de ensayos destructivos y no destructivos que están normalizados según las Normas ASTM, para evaluar la resistencia del hormigón y luego poder correlacionarlos entre si. El hormigón de Alta Resistencia se utiliza donde es importante reducir dimensiones de los elementos estructurales por razones de diseño, lo que disminuye la cantidad de acero y así la carga total permanente disminuyendo muchas veces el costo total de la estructura. Este estudio puede ser tomado como un documento técnico de referencia para que compañías e instituciones relacionadas con la actividad de ingeniería civil apliquen hormigones de alta resistencia en las diferentes estructuras que ameriten usarlo, utilizando materiales locales. El presente trabajo tiene su campo de acción en elementos prefabricados de hormigón, en la construcción de edificios de gran altura, puentes, estructuras donde se requiera un desencofrado prematuro, para satisfacer necesidades específicas de aplicaciones especiales como por ejemplo durabilidad, módulo de elasticidad y resistencia a la flexión.

Palabras claves: Agregados, aditivos, hormigón de alta resistencia.

Abstract

In the present research we obtained information about the mechanical behavior of concretes of high resistance analyzing laboratory information. We developed concretes using Portland cement, silica fume and additives High-Range Water Reducer. Later diverse types of destructive and not destructive tests were realized according to the ASTM Procedure, to evaluate the resistance of the concrete and then to be able to correlate them. It is known that the concrete of high Resistance is used where it is important to reduce dimensions for the structural elements for design reasons, which also reduces also the quantity of steel and in this manner the permanent dead-weight capacity which diminishes often the total cost of the structure. This study can be taken as a technical document of reference in order that companies and institutions related to the civil engineering activity can apply concretes of high resistance in the different structures using local materials. The present work has its field of action in prefabricated units of concrete, in the construction of superstructures as buildings of great height, bridges, in constructions where a premature remove of formwork is needed, to satisfy specific needs of special applications as for example permanence, module of elasticity and resistance to the flexion.

Key Words: *aggregates, additive, concrete of high Resistance.*

1. Introducción

Las propiedades del concreto son una función del tiempo y de la humedad del ambiente, y esta es la razón de que tengan que realizarse pruebas al concreto en condiciones especificadas o conocidas. Se han utilizado diferentes métodos y técnicas de prueba. Puesto que muchas de estas se realizan en trabajo de laboratorio, y especialmente en investigación, tiene importancia el conocimiento de la influencia de los métodos de prueba sobre la propiedad medida. Por supuesto, es esencial distinguir entre los efectos de las condiciones de prueba y las diferencias intrínsecas de los concretos que se están investigando.

El tipo de hormigón que se ha usado en el desarrollo de esta investigación es un concreto de alta resistencia el cual lo define el ACI como el que tiene una resistencia a compresión especificada f´c. de 420 kg/cm2 o mayor. En nuestra tesis nos hemos planteado como meta llegar a una resistencia mayor a la mencionada anteriormente como un rango práctico de trabajo, aunque pueden obtenerse resistencias más grandes.

Las pruebas que se realizan al hormigón pueden clasificarse de manera general en mecánicas destructivas y no destructivas las cuales pueden evaluar simultáneamente al mismo espécimen y de esa manera hacen posible un estudio del cambio en las propiedades con el tiempo. Los ensayos no destructivos también permiten evaluaciones del concreto en una estructura real. Diferentes trabajos con respecto al uso del esclerómetro y el ultrasonido se han presentado, muchos de ellos con resultados satisfactorios.

Se han logrado determinar curvas para diferentes tipos de mezclas, expuestas a diferentes ambientes, pudiendo así estimar con precisión resistencias y propiedades del hormigón.

El trabajo se realiza, tratando de relacionar por medio de ensayos no destructivos tres tipos de ensayos destructivos, obteniendo por medio de la esclerometría y ultrasonido correlaciones que nos permiten interpretar de manera acertada las resistencias del hormigón.

En nuestra ciudad son muy usados los agregados que hemos empleado en éste trabajo, el cual tiene como objetivo correlacionar ensayos destructivos y no destructivos, como sabemos el martillo de rebote y el ultrasonido son los ensayos no destructivos de uso más generalizados en el hormigón. Estos métodos se aplican generalmente en estructuras construidas para evaluar la resistencia del hormigón, cuando se dispone de curvas de correlación. Por medio de diversas pruebas se puede correlacionar las diferentes resistencias del hormigón con los Ensayos No Destructivos (END) para así tener una idea de que relación existe entre ellas.

Por lo que se ha realizado ambos ensayos para demostrar la alta relación que existe entre las mismas

2. Descripción del hormigón de alta resistencia

La producción efectiva de concreto de alta resistencia se logra seleccionando, controlando, y proporcionando cuidadosamente todos los materiales. A fin de lograr concretos de alta resistencia, se debe seleccionar las proporciones óptimas, considerando las características del cemento, micro sílice, la calidad del agregado, la proporción de la pasta, la interacción agregado-pasta, el tipo de aditivo y la forma de dosificación, y el mezclado.

Al evaluar el cemento, micro sílice, el aditivo químico y el agregado, procedente de varias fuentes potenciales en proporciones variables, se podrá indicar la combinación óptima de los materiales.

Puesto que la mayoría de las mezclas de concreto de alta resistencia contiene otros materiales cementantes, debe considerarse una relación agua material cementante w/(c+p) en lugar de la tradicional relación agua cemento (w/c), que generalmente varían desde 0.20 hasta 0.50.

Los concretos de alta resistencia deben ser colocados con el revenimiento más bajo que permita al concreto ser apropiadamente manejado y consolidado en la obra. Un revenimiento de 5 a 10 cm. proporciona la trabajabilidad requerida para la mayoría de las aplicaciones. Debido a los altos contenidos de agregado grueso y materiales cementantes y una baja relación w/(c+p), los concretos de alta resistencia pueden ser difíciles de colocar. Sin embargo, los concretos de alta resistencia pueden ser colocados a revenimientos muy altos con superplastificante sin problemas de segregación.

Los concretos de alta resistencia pueden ganar resistencia considerable después de la edad normalmente especificada de 28 días debido a su alto contenido de material cementante.

Se deben considerar los criterios para Autocompatibilidad en Hormigón de Alta Resistencia, un hormigón autocompactante (HAC) se puede definir como aquel hormigón que es capaz de fluir en el interior del encofrado, rellenando de forma natural el volumen del mismo pasando entre las barras de armadura y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso sin compactación interna o externa (Okamura, 1997).

El ACI 237R (Hormigón Autocompactante) en la tabla 2.1 resume los parámetros para el proporcionamiento de mezclas de pruebas para el diseño del hormigón Autocompactante que se muestran a continuación:

Volumen absoluto del agregado grueso en la mezcla	28-32%
Fracción de pasta(calculada del volumen total de la mezcla)	34-40%
Fracción de mortero calculada del volumen total de la mezcla)	68-72%
Relación agua / material cementante	0.32 a 0.45
Cantidad de cemento	386 a 475 kg/m3

Tabla 2.1 Parámetros para un Hormigón Autocompacactante

3. Propiedades del hormigón en estado fresco

Existen ensayos generales que se realizan en todo tipo de Hormigón como son la determinación de la densidad. (ASTM C138) y contenido de aire incluido (ASTM C138) pero también existen otros ensayos para medir propiedades especiales del hormigón como su fluidez en el caso de hormigones autocompactantes.

Figura 3.1 Olla de Washington para determinar densidad y contenido de aire.

Entre las pruebas para medir las características de Autocompactibilidad (ACI 237) podemos encontrara el Cono de Abrams que es el ensayo de extensión de flujo y consiste en verter el hormigón en el cono de Abrams sin compactar, y levantar lentamente el cono de modo que el hormigón se extienda formando casi un círculo. Los requisitos para la extensión de flujo son un diámetro final de 60-75 cm y un tiempo de 5±2 segundos para alcanzar un diámetro de 50 cm (denominado como T50).

Figura 3.2 Cono de Abrams

El ensayo del Embudo V: El ensayo del embudo-V consiste en medir el tiempo en que un cierto volumen (aproximadamente 10 litros) de hormigón tarda en fluir a través de un embudo que se conecta a un canal de salida o descarga.

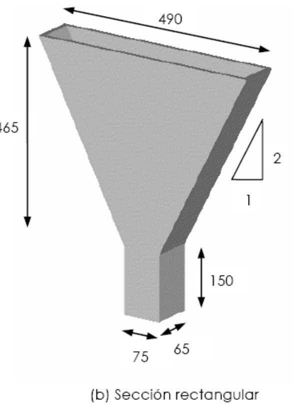

Figura 3.3 Embudo V

Anillo de barras es un instrumento que se utiliza en combinación con otros ensayos, como son el de extensión de flujo o embudo-V, a efectos de evaluar conjuntamente las habilidades de fluir y de pasar entre barras de armadura.

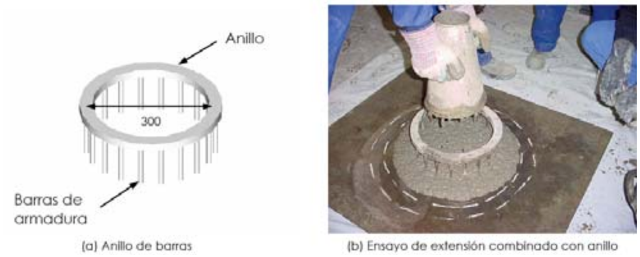

Figura 3.4 Anillo de barras

4. Características mecánicas del hormigón

Los ensayos que evalúan las características mecánicas del hormigón vienen regularizados por las normas ASTM:

- Ensayo de resistencia a la compresión (ASTM C39/C39M-03).
- Ensayo de resistencia a la flexión (ASTM C78-02).
- Ensayo de resistencia a la tracción por compresión diametral (ASTM C496).
- Ensayo de módulo de elasticidad (ASTM 469-02).

5. Descripción de los métodos no destructivos

Entre los métodos no destructivos encontramos el de Rebote esclerométrico que se encuentra en la norma ASTM C 805 (Método de prueba estándar para el número de rebote en un hormigón endurecido).

Figura 3.5 Rebote Esclerometrico

El otro método destructivo usado es el ultrasonido ASTM C 597 (Método de prueba estándar para la velocidad de propagación de pulso a través del hormigón)

Figura 3.6 Ultrasonido

6. Procedimiento experimental

En el presente trabajo investigativo, se utilizó el Cemento Portland Tipo I, el cual es un Cemento Hidráulico Compuesto, que reacciona y se endurece por interacción química con el agua.

Este tipo de hormigón se caracteriza por contener adiciones minerales que tienen por objeto incrementar la fluidez, asegurar la cohesión y apropiada viscosidad de las pastas, evitando la segregación de los agregados y reduciendo el rozamiento entre los mismos por lo cual se emplea filler calizo el cual es un material mineral que mejora las propiedades físicas del cemento, como la trabajabilidad y la retención del agua. Además se usó Microsílice (SikaFume), es una adición en polvo fino, color gris, que permite aumentar las resistencias mecánicas y químicas de hormigones y morteros endurecidos. El aditivo utilizado en las dosificaciones es el Sika ViscoCrete 2100, es un aditivo líquido, reductor de agua de alto rango y súper plastificante basado en policarboxilatos.

En lo que respecta a los agregados, como agregado grueso tenemos la piedra caliza.

Uno de los agregados finos usados es una arena muy fina procedente de la cantera San Jorge, Vía Samborondón.

A continuación se presentan las propiedades físicas del agregado grueso y arenas usados en esta investigación con su respectiva simbología y norma utilizada.

Los resultados obtenidos de laboratorio indican que los agregados están aptos para ser utilizados en mezcla de hormigón.

SIMBOLOGIA		NORMA UTILIZADA	
M.F.	Módulo de finura	ASTM C 136	INEN 696
Ds	Densidad seca	ASTM C 127 - 128	INEN 856 - 857
Dsss	Densidad saturada superficialmente seca	ASTM C 127 - 128	INEN 856 - 857
Po	Absorción	ASTM C 127 - 128	INEN 856 - 857
< 75 µm	Partículas menores al tamiz 75 µm	ASTM C 117	INEN 697
	Peso unitario suelto	ASTM C 29	INEN 858
	Peso unitario compactado	ASTM C 29	INEN 858
	Abrasión de Los Angeles	ASTM C 131	INEN 860

Tabla 6.1 Propiedades físicas

ENSAYOS NORMAS ASTM	MATERIAL			
	#78	ARENA DE RIO	ARENA FINA	ARENA TRIT.
Modulo de Finura	5.2	2.6	0.6	4.1
Pasante Tamiz N° 200	5.6%	1.4%	9%	6.1 %
Densidad del Agregado Seco	2606 Kg/m³	2602 Kg/m³	2532 Kg/m³	2511 Kg/m³
Densidad del Agregado Saturado Superficialmente Seco	2639 Kg/m³	2647 Kg/m³	2591 Kg/m³	2576 Kg/m³
Densidad Aparente del Árido	2695 Kg/m³	2724 Kg/m³	2690 Kg/m³	2685 Kg/m³
Absorción	1,.27%	1.73 %	2.31%	2.58%
Masa Unitaria Suelta	1400 Kg/m³	1540 Kg/m³	1188 Kg/m³	1500 Kg/m³
Masa Unitaria Compactada	1550 Kg/m³	1695 Kg/m³	1307 Kg/m³	1695 Kg/m³
Abrasión de los Ángeles	21.3%	-	-	-

Tabla 6.2 Resultados de los Ensayos

En la obtención de los resultados necesarios para este proyecto se elaboraron una serie de dosificaciones de las cuales se exponen algunas en la siguiente tabla:

	DISEÑOS			
	1	2	3	4
Cemento (Kg./m³)	450	450	433	456
Arena de Río(Kg./m³)	181.9	410	606.7	590.5
Arena Triturada (Kg./m³)	468.1	520.7	165.6	227.9
Arena Fina San Jorge (Kg./m³)	160	158	241	259
Piedra ASTM N°78 (Kg./m³)	744	533	530	529
Agua (Kg./m³)	177	178	169	190
Viscocrete 2100(Kg./m³)	13.5	10	12	12
Micorosilice (Kg/m³)	22.50	23	22	23
Filler (Kg./m³)	174	124	111	118

Tabla 6.3 Dosificaciones Propuestas

En cada dosificación se consideraron cilindros de 10 cm. de diámetro por 20. cm de altura, los cuales se ensayaron a Compresión Simple y a Tracción por Compresión Diametral. También se fabricaron vigas de 15 cm. de alto por 15 cm. de ancho y 50 cm. de largo, para romperlas a Tracción por Flexión, para luego extraer núcleos y ensayarlos a Compresión Simple y Tracción por Compresión Diametral. También se hicieron cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura para hacer el ensayo de Modulo Elástico.

7. Metodología estadística empleada

Las correlaciones son relaciones establecidas entre variables aleatorias obtenidas en situaciones experimentales. Se aplico la correlación simple y correlación múltiple, los principios fundamentales implicados en los problemas de correlación múltiple son análogos a los de la correlación simple por eso usamos dichas correlaciones, su valor de correlación (r^2) oscila entre 0 y 1. Y cuando su valor está más próximo a 1.0 la correlación es más precisa. [1]

8. Resultados obtenidos

Los gráficos que se muestran a continuación son de las Correlaciones Simple de Ensayos Mecánicos, hemos escogido los más representativos.

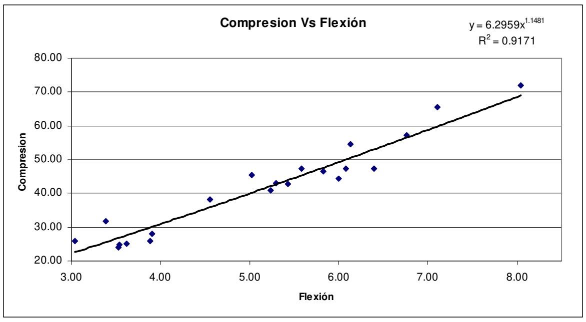

Figura 8.1 Resistencia a la Compresión vs. Resistencia a la Flexión

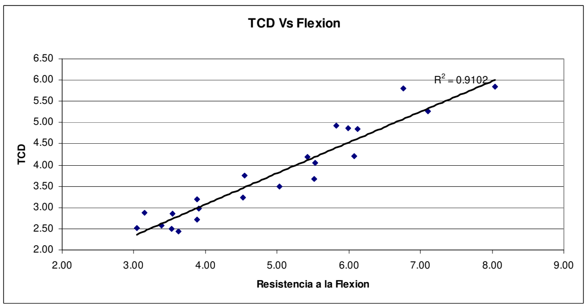

Figura 8.2 Tracción por Compresión Diametral vs. Resistencia a la Flexión

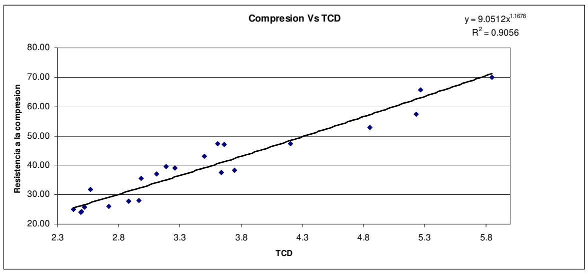

Figura 8.3 Tracción por Compresión Diametral vs. Resistencia a la Flexión

Los siguientes gráficos son de la correlación Múltiple de Ensayos Mecánicos, y necesitamos saber que f'c = Resistencia a la compresión, T = Tracción por Compresión Diametral, F = Flexión, R = Rebote, y U = Ultrasonido.

La ecuación para la correlación entre Resistencia a la Flexión, Tracción por Compresión Diametral y la Resistencia a la Compresión es f'c = -4.08 + 1.57 T +7.63 F

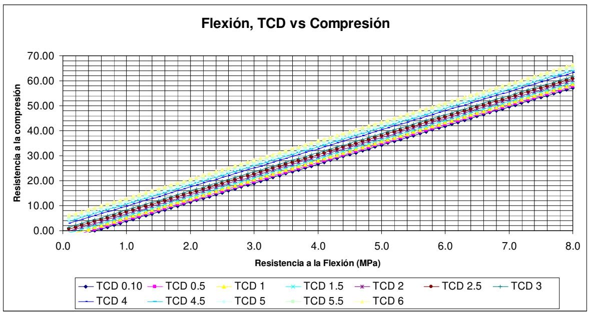

Figura 8.4 Resistencia a la Flexión, Tracción por Compresión Diametral vs. Resistencia a la Compresión

La ecuación para la correlación entre Tracción por Compresión Diametral, Ultrasonido y la Resistencia a la Compresión es f'c=-69.52+ 6.48 T + 1.94 R.

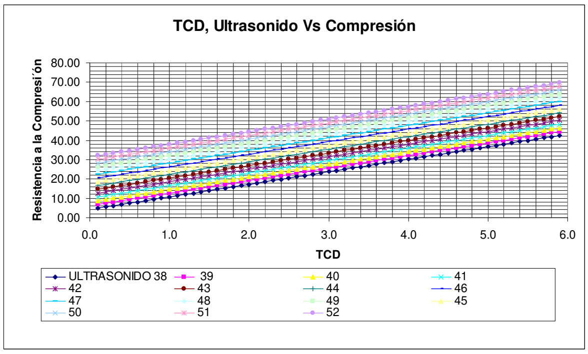

Figura 8.5 Tracción por Compresión Diametral, Ultrasonido vs. Resistencia a la Compresión

La ecuación para la correlación entre Tracción por Compresión Diametral, Rebote Esclerométrico y la Resistencia a la Compresión es f'c=-17.59+ 5.73 T + 1.05 R.

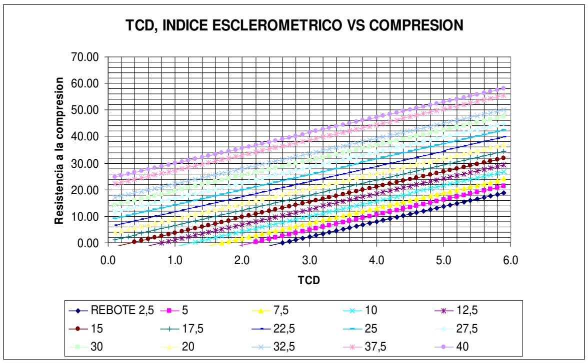

Figura 8.6 Tracción por Compresión Diametral, Rebote Esclerométrico vs. Resistencia a la Compresión

9. Análisis de resultados obtenidos

El análisis de las correlaciones efectuadas nos indica que en correlación simple los coeficientes son menores que en correlación múltiple. En la correlación simple el coeficiente más bajo nos da un valor de $r^2 = 0.9037$ y el valor más alto de $r^2 = 0.9324$. Teniendo en la correlación múltiple resultados que van desde $0.97418 < r^2 < 0.99060$, representando las correlaciones entre Índice Esclerometrico/ Ultrasonido Vs. Tracción por Compresión Diametral y Flexión, Tracción por Compresión Diametral vs. Compresión. Analizando las correlaciones simples se determina que todas las gráficas presentan una línea de tendencia Potencial., en las gráficas el factor de correlación en algunas es bajo, esto significa que los datos están un poco dispersos. Obteniendo:

Ensayos Destructivos y No destructivos	r^2
Compresión vs. Flexión	0.9164
Compresión vs. Tracción por Compresión Diametral	0.9303
Flexión vs. Tracción por Compresión Diametral	0.9253
Rebote vs. Compresión	0.9324
Rebote vs. Flexión	0.9229
Rebote vs. Tracción por Compresión Diametral	0.9160
Ultrasonido vs. Compresión	0.9052
Ultrasonido vs. Flexión	0.9163
Ultrasonido vs. Tracción por Compresión Diametral	0.9081
Compresión vs. Modulo de Elasticidad	0.9037

Tabla 9.2 Valores de Correlación

Analizando las correlaciones múltiples, no se considera la dispersión de los puntos envista de que las gráficas no son representadas por líneas de tendencia.

Las gráficas más representativas son las que establecen diferentes resistencias por medio de la variación de la velocidad ultrasónica. Debido a que las pruebas fueron realizadas en distintas edades se logró establecer que, entre la velocidad de pulsación y las respectivas resistencias, existe una relación directa que involucra a métodos destructivos y no destructivos.

En las demás gráficas se ha tratado de encontrar una relación lógica entre tres variables, para conseguir que sus datos nos den una aproximación más real de las resistencias requeridas dependiendo de los datos con los que se cuente. Por ejemplo en la correlación Tracción por Compresión Diametral /Rebote Esclerométrico vs. Resistencia a la Compresión, se trata de obtener un valor de resistencia a la compresión por medio de valores de resistencia a la Compresión Diametral y de Rebote Esclerométrico, para esto podemos hacer uso de las ecuaciones que hemos obtenido de los gráficos.

El valor de modulo de elasticidad en los hormigones, está influenciado por el Módulo de Elasticidad de los agregados, contenido de agregados en la mezcla, resistencia de la pasta de cemento, adherencia entre los agregados y la pasta de cemento y respecto a la correlación entre las resistencia a la compresión del hormigón y su respectivo modulo de elasticidad

10. Conclusiones y recomendaciones

Las correlaciones entre ensayos destructivos y no destructivos nos dan una idea muy precisa de que ellos están perfectamente ligados entre si, y que muchas de sus propiedades son influencias por las mismos factores como, curado, compactación, densidad, etc.

La correlación entre las resistencia a la compresión del hormigón y su respectivo modulo de elasticidad para agregados locales nos da una ecuación similar a la que propone el ACI 318.

Los resultados obtenidos son confiables tomando en cuenta sus altos coeficientes de correlación, tanto para las correlaciones simples como las correlaciones múltiples.

11. Agradecimiento

A Dios, a nuestro director de tesis el Ing. Hugo Egüez Álava Jefe del Centro Técnico del Hormigón, a nuestros padres y hermanos y a todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en el desarrollo de este trabajo.

12. Referencias

[1] Ronald Walpole, Raymond Myers, Sharon Myers., “Probabilidad y Estadística para Ingenieros”, Sexta Edición, pp. 394 – 416.

- INEN 695 Áridos para Hormigón. Muestreo
- INEN 696 Áridos para hormigón. Determinación de la Granulometría.
- INEN 697 Áridos para hormigón. Determinación de los Materiales mas finos que 75um.
- INEN 862 Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad.
- INEN 856 Árido fino para hormigón. Determinación de la densidad y absorción del agua.
- INEN 1578 Hormigones. Determinación del Asentamiento
- INEN 857 Árido grueso para hormigón. Determinación de la densidad y absorción del agua.
- INEN 858 Áridos para hormigón. Determinación de la Masa Unitaria y del Porcentaje de Huecos.
- ACI 237 Self-Consolidating Concrete
- ASTM C 33 – 03 Standard Specification for Concrete Aggregates.
- ASTM C 136 – 06 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- ASTM C 117 – 04 Standard Test Method for Materials Finer than 75-µm (N□. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing.
- ASTM C 127 – 07 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregates.
- ASTM C 128 – 07a Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates.
- ASTM C 29/C 29M – 07 Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate.
- ASTM C 131 – 06 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- ASTM D 4318- 05 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- ASTM C 494 / C 494M – 08a Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.
- ASTM C 39 – 01 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM C617 - 98(2003) Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM C496 / C496M - 04e1 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM C78 - 08 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).
- ASTM C 469 – 94 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson`s Ratio of Concrete in Compression.
- ASTM C157 / C157M - 08 Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete.
- ASTM C 642 – 97 Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete.
- ASTM C 805 Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete