

UNIVERSIDAD DE CUENCA



**Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil**

Determinación del módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del hormigón en función de la variabilidad y caracterización de los agregados.

**Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero Civil**

Autores:

José David Serpa Bojorque

CI: 0105813745

Diana Carolina Vázquez Maita

CI: 0302910161

Director:

Ing. Juan Fernando Zalamea León PhD.

CI: 0102059326

Cuenca-Ecuador
2018



RESUMEN

El módulo de elasticidad del hormigón está asociado con deformaciones estructurales que deben mantenerse dentro de los límites establecidos, para evitar deformaciones excesivas que causan grietas y otras fallas en las estructuras de hormigón. Para la estimación de este parámetro han surgido enfoques empíricos normativos, basados en la resistencia a compresión del hormigón, en Ecuador la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS) ha adoptado la ecuación empírica propuesta por el código ACI, la cual ha presentado variabilidad importante en diferentes partes del mundo, siendo el principal factor los agregados pues corresponden al 70 % del volumen del hormigón. El objetivo de esta investigación es determinar el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del hormigón en función de la variabilidad y caracterización de los agregados. El método se basa en realizar 12 tipos de hormigón en función del agregado más utilizado por las hormigoneras de Cuenca, relación agua-cemento y relación agregado fino-agregado grueso. Los datos son procesados mediante un análisis de varianzas para determinar si los factores ejercen efectos sobre las variables dependientes. Se validó la ecuación del ACI 318 adoptada por la NEC-SE-DS, para los hormigones diseñados con áridos utilizados por las hormigoneras de la ciudad de Cuenca, pues se encuentran dentro del rango establecido por la norma. Se estableció que tanto para el método ASTM C-469 como ultrasonido, la relación agua-cemento es el factor que representa de mejor manera la variabilidad de los valores de módulos de elasticidad y resistencia a compresión simple. La relación agregado fino-agregado grueso a pesar de que influyó significativamente en el módulo de elasticidad representó una menor influencia que la relación agua-cemento en este parámetro. Por otro lado, la resistencia a compresión no se vio afectada por la relación agregado fino-agregado grueso.

Palabras Clave: Materiales de construcción, Caracterización de agregados, Diseño experimental, Variables, Módulo de elasticidad.



ABSTRACT

The modulus of elasticity of concrete is associated with structural deformations that must be kept within the established limits, to avoid excessive deformations that cause cracks and other failures in concrete structures. To estimate this parameter, normative empirical approaches have emerged, based on the compressive strength of concrete, in Ecuador the Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS) has adopted the empirical equation proposed by the ACI code, which has presented significant variability in different parts of the world, the main factor being the aggregates since they correspond to 70% of the volume of the concrete. The objective of this research is to determine the modulus of elasticity and the compressive strength of concrete according to the variability and characterization of the aggregates. The method is based on making 12 types of concretes based on the aggregate most used by Cuenca concrete mixers, water-cement ratio and fine aggregate-coarse aggregate ratio. The data are processed through a variance analysis to determine if the factors exert effects on the dependent variables. The equation of the ACI 318 adopted by the NEC-SE-DS was validated for the concretes designed with aggregates used by concrete mixers of the city of Cuenca, since they are within the range established by the standard. It was established that for both the ASTM C-469 method and ultrasound, the water-cement ratio is the factor that best represents the variability of the values of modulus of elasticity and resistance to simple compression. The fine aggregate-coarse aggregate ratio, although it had a significant influence on the modulus of elasticity, represented a lower influence than the water-cement ratio in this parameter. On the other hand, the compressive strength was not affected by the fine aggregate-coarse aggregate ratio.

Keywords: Construction materials, Characterization of aggregates, Experimental design, Variables, Modulus of elasticity.



CONTENIDO

1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	15
1.1 ANTECEDENTES	15
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	16
1.3 JUSTIFICACIÓN	17
1.4 HIPÓTESIS.....	18
1.5 OBJETIVOS.....	18
1.5.1 Objetivo General.....	18
1.5.2 Objetivos Específicos	18
1.6 METODOLOGÍA	19
2. CAPÍTULO 2: DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS.....	21
2.1 VARIABLES	21
2.2 NIVELES Y TRATAMIENTOS.....	23
2.3 RÉPLICAS.....	23
2.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS EMPLEADOS.....	24
3. CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1 MATERIALES.....	26
3.2 MÉTODOS	28
3.2.1 Propiedades Mecánicas del árido grueso y fino	28
3.2.1.1 Muestreo.....	29
3.2.1.2 Granulometría del árido fino y grueso.....	29
3.2.1.3 Combinación de Agregados.....	31
3.2.1.4 Resistencia a la abrasión	32
3.2.1.5 Humedad	33
3.2.1.6 Gravedad Especifica	33
3.2.1.7 Absorción.....	37
3.2.1.8 Peso Unitario	37
3.2.1.9 Forma y textura superficial de las partículas	39
3.2.2 Hormigón en fresco y endurecido	39
3.2.2.1 Criterios de Diseño de mezclas	40
3.2.2.2 Proceso de Mezclado.....	43
3.2.2.3 Moldeo y curado de especímenes de hormigón.....	44
3.2.2.4 Revenimiento del Hormigón.....	45
3.2.2.5 Peso Unitario del Hormigón en fresco	46
3.2.2.6 Resistencia a compresión	47
3.2.2.7 Módulo de elasticidad (ASTM C- 469).....	49
3.2.2.8 Módulo de elasticidad por ultrasonido	51
4. CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO	54
4.1.1 Análisis granulométrico.....	54
4.1.2 Abrasión del árido grueso.....	58
4.1.3 Gravedad específica y absorción	59
4.1.4 Peso unitario	60
4.1.5 Forma y textura.....	62
4.2 HORMIGÓN EN FRESCO	63
4.2.1 Dosificación de mezclas	63
4.2.2 Revenimiento	63
4.2.3 Peso unitario del hormigón en fresco.....	64
4.3 HORMIGÓN ENDURECIDO.....	64



4.3.1 Resistencia a la compresión.....	65
4.3.2 Módulo de Elasticidad ASTM C-469	65
4.3.3 Módulo de Elasticidad Ultrasonido	66
4.3.4 Análisis comparativo de resultados de módulo de elasticidad con ecuación NEC-15 (ACI-318)	67
4.3.4.1 Análisis del error relativo entre módulos de elasticidad con el método ASTM C-469 y ecuación ACI-318-14S	68
4.3.4.2 Análisis del error relativo entre módulos de elasticidad con el método ASTM C-469 y ultrasonido	69
5. CAPÍTULO 5: ANÁLISIS ESTADÍSTICO	71
5.1.1.1 Análisis del módulo de elasticidad con el método ASTM C-469.....	71
5.1.1.2 Análisis del módulo de elasticidad con el método del ultrasonido	75
5.1.1.3 Análisis de resistencia a compresión	79
6. CONCLUSIONES	83
7. RECOMENDACIONES.....	86
8. BIBLIOGRAFÍA	87
9. ANEXOS	90
9.1 ANEXO 1	90
9.2 ANEXO 2	91
9.3 ANEXO 3	92
9.4 ANEXO 4	93
9.5 ANEXO 5	94
9.6 ANEXO 6	143

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Niveles y tratamientos.....	23
Tabla 2 Resultados del análisis granulométrico arena Jubones.....	54
Tabla 3 Resultados del análisis granulométrico arena Paute	55
Tabla 4 Resultados del análisis granulométrico grava Jubones	56
Tabla 5 Resultados del análisis granulométrico triturado Paute	57
Tabla 6 Resultados del análisis granulométrico árido grueso combinado.....	58
Tabla 7 Resumen de valores de gravedad específica y absorción.....	59
Tabla 8 Valores de pesos unitarios.....	60
Tabla 9 Resumen de resultados de peso unitario óptimo de A1	61
Tabla 10 Resumen de resultados de peso unitario óptimo de A2	62
Tabla 11 Dosificaciones en peso para un m ³ de hormigón.....	63



Tabla 12 Resultados de revenimientos.....	64
Tabla 13 Peso unitario de hormigón en fresco [Kg/m ³].....	64
Tabla 14 Resistencia a la compresión de los hormigones diseñados	65
Tabla 15 Módulo de elasticidad realizados a 4 especímenes de cada diseño por método ASTM C469	66
Tabla 16 Módulo de elasticidad realizados a 6 especímenes de cada diseño por método ultrasonido	67
Tabla 17 Análisis error relativo de módulos de elasticidad con el método ASTM C-469 con respecto al ecuación ACI-318-14S	68
Tabla 18 Análisis error relativo de módulos de elasticidad con el método ASTM C-469 con respecto al método ultrasonido	69
Tabla 19 Número de observaciones según el factor en la prueba de elasticidad con el método ASTM C-469.....	71
Tabla 20 Prueba de igualdad de Levene de varianzas de error para prueba de elasticidad con el método de la ASTM C-469	71
Tabla 21 Pruebas de efectos inter-sujetos para la prueba elasticidad con el método	72
Tabla 22 Comparación de los niveles de la relación agregado fino-agregado grueso al aplicar el método ASTM C-469	73
Tabla 23 Subconjuntos encontrados en los niveles de la relación agregado fino-agregado grueso al aplicar el método ASTM C-469	74
Tabla 24 Comparación de los niveles de la relación agua-cemento al aplicar el método ASTM C-469.....	74
Tabla 25 Número de observaciones según el factor en la prueba con el ultrasonido	75
Tabla 26 Pruebas de efectos inter-sujetos para la prueba elasticidad con el método de ultrasonido	75
Tabla 27 Comparación de los niveles del tipo de agregado al aplicar el método de ultrasonido	77
Tabla 28 Contraste de igualdad entre los niveles del tipo de agregado al aplicar el método de ultrasonido	77
Tabla 29 Medidas de asociación entre el módulo de elasticidad y el tipo de agregado.....	77



Tabla 30 Comparación de los niveles de la relación agregado fino-agregado grueso al aplicar el método de ultrasonido78

Tabla 31 Subconjuntos encontrados en los niveles de la relación agregado fino-agregado grueso al aplicar el método de ultrasonido78

Tabla 32 Comparación de los niveles de la relación agua-cemento al aplicar el método de ultrasonido.79

Tabla 33 Número de observaciones según el factor en la prueba de resistencia79

Tabla 34 Pruebas de efectos inter-sujetos para la prueba de resistencia80

Tabla 35 Comparación de los niveles de la relación agua-cemento respecto a la resistencia del hormigón.....81

Tabla 36 Medidas de asociación entre resistencia y la relación agua-cemento.....81

Tabla 37 Clasificación de los agregados según su forma, INEN 872 (Tabla 6)90

Tabla 38 Clasificación de los agregados según su textura, INEN 872 (Tabla 7)91

Tabla 39 Rangos de revenimientos y consistencia, Jimenez Montoya, García Meseguer, & Morán Cabre (2000), (Tabla 3.6)92

Tabla 40 Resumen de Ec obtenidos del ensayo ASTM C46993

Tabla 41 Velocidad de Onda obtenida con Ultrasonido y resultados de Módulo de elasticidad Dinámico y Estático, Poisson=0.2 143

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva esfuerzo deformación - Fuente: (Steven H. Kosmatka, 2004).....49

Figura 2 Método de cuerda o secante, curva Esfuerzo – Deformación.....51

Figura 3 Curva granulométrica de arenas de río Jubones y Paute.....55

Figura 4 Curva granulométrica de agregados gruesos58

Figura 5 Curva de Peso unitario óptimo del agregado A161

Figura 6 Curva de peso unitario óptimo del agregado A162

Figura 7 Comparación de resultados de módulo de elasticidad con método ASTM C-469 y ultrasonido con ecuación NEC-15.....70



Figura 8 Medias marginales del módulo de elasticidad por relación agua-cemento según la relación agregado fino-agregado grueso y el tipo de agregado con el método ASTM C-46973

Figura 9 Medias marginales del módulo de elasticidad por relación agua-cemento según la relación agregado fino-agregado grueso y el tipo de agregado con el método de ultrasonido76

Figura 10 Medias marginales de la resistencia a compresión por relación agua-cemento según la relación agregado fino-agregado grueso y el tipo de agregado.....80

Figura 11 Módulo de elasticidad según los métodos de medición ASTM C-469, por ultrasonido y ecuación NEC-15.....82

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Variables de un proceso al diseñar un experimento.....22

Ilustración 2 Árido grueso del río Jubones (grava)26

Ilustración 3 Árido grueso río Paute (triturado).....26

Ilustración 4 Árido fino del río Jubones.....27

Ilustración 5 Árido fino río Paute27

Ilustración 6 Cemento Holcim Premium HE28

Ilustración 7 Homogenización del material – Reducción de muestra por cuarteo mecánico29

Ilustración 8 Serie de tamices para agregado grueso – Ensayo de granulometría.....31

Ilustración 9 Ensayo de abrasión realizado a agregado grueso combinado33

Ilustración 10 Ensayo de gravedad específica a agregado fino.....36

Ilustración 11 Ensayo de peso unitario compactado a agregado grueso y agregado combinado.39

Ilustración 12 Proceso de Mezclado – Mezcla de hormigón en fresco.....44

Ilustración 13 Moldeo de probetas de hormigón45

Ilustración 14 Ensayo de revenimiento realizado a mezcla de hormigón.....46

Ilustración 15 Realización del ensayo de peso unitario a una de las mezclas de hormigón47



Ilustración 16 Espécimen en un ensayo a compresión	48
Ilustración 17 Colocación de espécimen para ensayo de módulo de elasticidad – sensores longitudinales.....	50
Ilustración 18 Equipo PROCEQ TICO utilizado en la determinación de la velocidad ultrasónica en probetas de hormigón.....	52
Ilustración 19 Ensayo de ultrasonido realizado a uno de los especímenes	52



Cláusula de Propiedad Intelectual

José David Serpa Bojorque, autor del trabajo de titulación "Determinación del módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del hormigón en función de la variabilidad y caracterización de los agregados", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, octubre del 2018

José David Serpa Bojorque

C.I: 0105813745



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

José David Serpa Bojorque en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Determinación del módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del hormigón en función de la variabilidad y caracterización de los agregados", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre del 2018.

José David Serpa Bojorque

C.I: 0105813745



Cláusula de Propiedad Intelectual

Diana Carolina Vázquez Maita, autora del trabajo de titulación "Determinación del módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del hormigón en función de la variabilidad y caracterización de los agregados", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, octubre del 2018

Diana Carolina Vázquez Maita

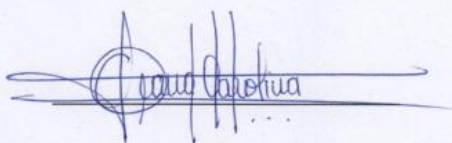
C.I: 0302910161

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Diana Carolina Vázquez Maita en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Determinación del módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del hormigón en función de la variabilidad y caracterización de los agregados", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre del 2018.



Diana Carolina Vázquez Maita

C.I: 0302910161



DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, a la Virgencita del Cisne y a la Dolorosa quienes siempre me han dado fuerza y fe para confiar en mis capacidades para poder culminar este trabajo.

Mis padres Luz María y Eduardo, que siempre han estado a mi lado y han sido un ejemplo para mí y mis hermanos.

Y a mis hermanos Eduardo, Mateo y Pablo, y a mi enamorada Diana por acompañarme en el proceso de formación, brindándome su fuerza y apoyo incondicional.

José David.

Dedico a Dios y a la Virgencita del Cisne, por siempre estar conmigo dando la fuerza que necesaria y la fe durante mi vida universitaria y para la culminación de este trabajo.

También a mis papitos Eduardo y Estrella por siempre ser mi apoyo incondicional de lucha y amor.

A mis hermanitos Gaby, Feny y Andrés, por siempre darme fuerzas y apoyarme con palabras de aliento.

A mi enamorado José David, por el amor, el apoyo y por siempre estar a mi lado.

Diana Carolina.



AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios y a la Virgencita María por guiarnos y brindarnos la sabiduría y confianza para la realización de este trabajo.

A nuestras familias por el apoyo incondicional en nuestras vidas, por enseñarnos a no darse por vencidos y luchar en momentos difíciles, por darnos su amor incondicional y guiarnos con sabiduría y sobre todo con amor.

A nuestro querido director de trabajo de titulación y amigo Ing. Fernando Zalamea León, por su apoyo incondicional, dedicación y conocimiento impartido para poder alcanzar los objetivos y poder culminar con este trabajo.

A los Ingenieros, Daniel Mogrovejo, Alfredo Vázquez, por habernos ayudado con sus conocimientos para resolver las dificultades que tuvimos durante la realización de este trabajo.

A los Ingenieros Pablo Orbe, María Isabel Chiriboga, Sixto González por proporcionarnos los recursos necesarios para la realización de este proyecto.

Al laboratorista Sandro Verdugo Cordero, por ayudarnos con la operación de los equipos e instrumentos para la elaboración de las tesis.

A nuestros profesores que durante la vida universitaria nos compartieron sus conocimientos y valores enseñándonos la ética y responsabilidad profesional de un ingeniero civil.



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El módulo de elasticidad es una de las propiedades más importantes del hormigón, y varía de acuerdo a factores tales como: edad del hormigón, resistencia a la compresión, características y cantidad de agregados y cemento. La magnitud del módulo de elasticidad se ve afectada por la definición del mismo es decir inicial, tangente o secante (Pauw, 1960). Según Gomez & Gatica (1981) el módulo de elasticidad del hormigón (E_c) interviene en el cálculo de flechas y deformaciones en vigas y elementos estructurales, en el cálculo de rigideces en marcos múltiples y estructuras estáticas e hiperestáticas en general.

Hormigones de igual composición y semejante resistencia a la compresión presentan valores de módulo de elasticidad de 24132 MPa con áridos de piedra caliza, de 32406 MPa con áridos de arenisca y de 44127 MPa con pedernal, lo anterior muestra la marcada influencia de los áridos sobre el módulo de elasticidad lo cual previene sobre la relevancia de considerarlo en el diseño del hormigón armado (Noble, 1931).

Según Camposano Luque (2009), estudios realizados en el Centro Técnico del Hormigón de Guayaquil, demuestran que módulos de elasticidad de hormigones preparados con diferentes clases de agregados y determinados mediante la norma ASTM C469, difieren notablemente de la ecuación ACI-318. Además, se demostró que el módulo de elasticidad del hormigón depende del módulo de elasticidad del agregado utilizado, por lo que determinaron una ecuación en función de la ecuación del ACI 318. Esta ecuación considera un factor de corrección F que está en función de la raíz cúbica del módulo de elasticidad del agregado, de la siguiente manera:

$$E_c = 1.15 * E_a^{0.333} * \sqrt{f'c}$$

donde E_c y E_a en GPa, $f'c$ es la resistencia a compresión del hormigón MPa.

Por otro lado, también se demostró que la ecuación del ACI-318 no tiene distorsiones cuando el módulo de elasticidad del agregado es del orden de 70 GPa.



Resultados obtenidos por la Escuela Politécnica Nacional (Quito), utilizando agregados de la región, concluyen que los valores de módulo de elasticidad del hormigón, obtenidos experimentalmente, son menores que los valores calculados en base al Código ACI y representan el 82.43% del valor propuesto por el Comité 318 (Alejandro, 2014).

En Bogotá estudios realizados sobre un total de 1300 muestras demostraron que las ecuaciones del código colombiano NSR-98, sobreestima el valor de E_c en los hormigones de la capital (Ruiz et al, 2007). Determinaciones del E_c para la ciudad de Bucaramanga en un total de 70 muestras de tres distribuidores de hormigón arrojaron valores sobreestimados de este parámetro para materiales metamórficos y subestimados para materiales sedimentarios (Hernández, 2005). Ruiz, Borrero, León, & Vacca (2012), proponen modificar la fórmula de E_c de la NSR-10 (Norma colombiana Sismo resistente) para hacer una estimación más segura y confiable de las deformaciones de entrepiso sísmicas, pues determinaron que en promedio 67 de cada 100 edificaciones de cinco pisos diseñadas en Bogotá con la NSR-10 tendrían deformaciones de entrepiso mayores a 1% de su altura.

En Minnesota, Huo, Al-Omaishi, & Tadros (2001) calculó valores del módulo de elasticidad utilizando las ecuaciones del ACI 318 (1989) y ACI 318 (2014) las cuales sobreestimaban las medidas experimentales de E_c del hormigón. Sin embargo, estudios en la Universidad de Texas en Austin, demostraron que las mismas ecuaciones subestimaban la gran mayoría de los módulos de elasticidad que se midieron experimentalmente.

1.2 Descripción del Problema

La norma ecuatoriana de la construcción NEC-SE-DS, cataloga a todo el territorio ecuatoriano con una amenaza sísmica alta, por lo que establece procedimientos de diseño para producir sistemas estructurales, que tengan la rigidez, la resistencia y la capacidad de deformación necesarias, para resistir eventos sísmicos. Ruiz, Borrero, León, & Vacca (2012) establecen al módulo de elasticidad del hormigón como una de las variables fundamentales en la asignación de la rigidez y por ende, en el tamaño de las secciones de los elementos estructurales. Para la estimación



de este parámetro han surgido enfoques empíricos normativos, basados en la resistencia a compresión del hormigón. La NEC-SE-DS, para los modelos elásticos de estructuras que se diseñan para acciones sísmicas, ha adoptado la ecuación propuesta por el American Concrete Institute presentada en el código Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (2014), en el cual se indica que el módulo de elasticidad de un hormigón de peso normal se calcula con: $E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c}$ donde E_c está en MPa, f'_c es la resistencia última a compresión del hormigón en MPa. Además, define al módulo de elasticidad como la pendiente de la línea trazada desde un esfuerzo en la 50 millonésima de deformación hasta un esfuerzo de compresión de $0.40 f'_c$, e indica que el módulo de elasticidad es sensible al módulo de elasticidad del agregado y a la dosificación de la mezcla de hormigón. Por otro lado, establece que los valores medidos del módulo de elasticidad pueden variar entre el 80% y 120% de los valores calculados.

Esta ecuación ha presentado variabilidad importante en diferentes partes del mundo como lo explican varios investigadores: Noble (1931), Camposano Luque (2009), Alejandro (2014), Ruiz et al (2007), Hernández (2005), Ruiz, Borrero, León, & Vacca (2012) y Huo, Al-Omaishi, & Tadros (2001).

El módulo de elasticidad influye directamente en las deformaciones de las estructuras, estos problemas son más notables en deformaciones de entrepiso, pues provocan deformaciones excesivas y con sigo grietas y otras fallas en las estructuras.

Dado que la ecuación de módulo de elasticidad propuesta por la NEC, depende únicamente de la resistencia a compresión simple del hormigón (f'_c), se requiere analizar la influencia de otros factores como el tipo y cantidad de agregado.

1.3 Justificación

El alto grado de incertidumbre en el cálculo de E_c encontrado en los distintos estudios internacionales y locales muestran la necesidad de validar la fórmula empírica adoptada por la NEC-15, para las condiciones propias de la ciudad de Cuenca. Además, a parte de la resistencia a compresión, identificar cuáles son los factores que influyen en la determinación del módulo elasticidad del hormigón.

1.4 Hipótesis

- ✚ Debido a que los áridos representan aproximadamente al 70% del volumen del hormigón, como hipótesis se establece que la combinación entre agregado fino y agregado grueso influye en el módulo de elasticidad del hormigón, puesto que dicha relación determina el grado de acomodamiento de las partículas dentro de la mezcla.
- ✚ Cada tipo de agregado tendrá sus propias características de forma, peso, resistencia y módulo de elasticidad, estas características harán que el parámetro de módulo de elasticidad del hormigón cambie aun cuando la composición y la resistencia de los hormigones sean las mismas.
- ✚ La relación agua-cemento en los hormigones influye en el módulo elástico y la resistencia a compresión simple.
- ✚ La ecuación adoptada por la NEC-SE-DS, es válida para hormigones de peso normal con los agregados utilizados por las hormigoneras de Cuenca.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Determinar el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del hormigón en función de la variabilidad y caracterización de los agregados.

1.5.2 Objetivos Específicos

- ✚ Caracterizar los agregados fino y grueso para la elaboración del hormigón procedentes del río Jubones y Paute según su dureza, absorción, gravedad específica, peso unitario, tamaño, forma y granulometría.
- ✚ Determinar la peso unitario de las combinaciones de agregado fino y grueso propuestos, utilizando la norma NTE INEN 858, y obtener las curvas de peso unitario vs relación agregado fino-agregado grueso.
- ✚ Diseñar mezclas de hormigón utilizando diferentes relaciones agua-cemento y distintas relaciones agregado fino-agregado grueso de cada tipo de agregado.
- ✚ Determinar el módulo de elasticidad y resistencia a compresión para las diferentes dosificaciones empleando la norma ASTM C-469 y ASTM C-39 (NTE INEN 3124) respectivamente.

- ✚ Analizar y proponer coeficientes de modificación de la ecuación de módulo de elasticidad del hormigón propuesto por la NEC-SE-DS, que se ajuste a los datos experimentales.

1.6 Metodología

El estudio a realizar es de tipo cuasi-experimental, cuantitativo y transversal, en el cual se determina el módulo de elasticidad del hormigón. Para alcanzar los objetivos de la investigación se propone elaborar especímenes de hormigón de diferentes características, modificando factores que pueden influir en este parámetro, como: la relación agua-cemento, relación agregado fino-agregado grueso y el tipo de agregado.

Se identifica inicialmente el tipo de agregado, donde de acuerdo a consultas realizadas a las principales hormigoneras se concluyó que los materiales pétreos más utilizados en la construcción en la ciudad de Cuenca son los extraídos del río Jubones y Paute. Una vez seleccionados los agregados son sometidos a cuarteo en laboratorio según la norma NTE-INEN-2566 y caracterizados según su dureza, absorción, gravedad específica, peso unitario, tamaño, forma y granulometría. Posteriormente se forma dos tipos de agregados, los cuales están constituidos por un mismo agregado grueso y distinto tipo de arena. El agregado grueso es una combinación de grava del río Jubones y de triturado del río Paute, esta combinación se la realiza para obtener un agregado que cumpla con los requisitos de límites granulométricos dados en la INEN 696. Para formar los dos tipos de agregado se toma la combinación de agregado grueso y se lo combina tanto con arena del río Paute (A1), y arena del río Jubones (A2).

Se conoce que la ecuación $E = 4700 \sqrt{f'_c}$, es aplicable para hormigones de densidad normal y resistencia a compresión (f'_c), entre 210 y 360 kg/cm² o 20 y 35 MPa. Por lo cual mediante pruebas en laboratorio se determina que las relaciones agua-cemento de 0.50 y 0.60 con los tipos de agregados A1 y A2 producen hormigones con resistencias en el rango especificado.

Por otro lado, los valores de relación agregado fino-agregado grueso se determinan definiendo una curva de masa unitaria vs diferentes proporciones de fino-grueso de cada tipo de agregado, esto con el objetivo de obtener tres relaciones que estarán de acuerdo al punto de masa unitaria óptima y un punto antes y después de ésta,



de acuerdo con las curvas obtenidas se establece relaciones agregado fino-agregado grueso de 0.45,0.60,0.80.

Una vez definidas las variables de estudio, se fabrican 12 tipos de hormigón distintos con seis réplicas por tipo, de los cuales dos especímenes seleccionados aleatoriamente son ensayados a compresión según la norma NTE-INEN 1573, los 4 sobrantes son ensayados según la norma ASTM C-469 para determinar el módulo de elasticidad experimental.

Además, previamente al proceso detallado, las 72 probetas de hormigón son ensayadas de acuerdo a la norma ASTM C-597 para determinar el módulo de elasticidad por un método alternativo no destructivo o de ultrasonido.

Los datos obtenidos son procesados mediante un análisis de varianza para determinar si los factores ejercen efectos sobre el módulo de elasticidad y resistencia, y se verifica si la ecuación del ACI 318 adoptada por la NEC-15 es aplicable para hormigones propios de la zona. Con lo que se responde a las hipótesis planteadas.



CAPÍTULO 2: DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS

En el campo de la ingeniería civil es necesario realizar experimentos con el objetivo de solucionar un problema o comprobar una idea (hipótesis), con el fin de verificar si con algunas variaciones en los materiales, métodos, operación de un proceso, etc., se obtiene mejoras.

Es común que muchos de los experimentos sean realizados en base de prueba y error, apelando a la experiencia y demandando mayor cantidad de tiempo y recursos. Es así que emplear el diseño experimental es la forma eficaz de realizar pruebas, pues permite determinar que pruebas deben realizarse y de qué manera, para obtener resultados, que al ser analizados estadísticamente, proporcionen respuestas objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, para resolver un problema o alcanzar los objetivos planteados (Pulido Gutiérrez & de la Vara Salazar, 2008).

Pulido Gutiérrez & de la Vara Salazar (2008) definen al diseño de experimentos estadístico como: “la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender de mejor manera situaciones complejas de relación causa-efecto”.

2.1 Variables

En todo proceso experimental, intervienen distintos tipos de variables o factores que mediante procesos permiten conocer el efecto o el resultado de las pruebas experimentales. Las variables de entrada son aquellas que influyen en el desempeño de un proceso y se clasifican en factores controlables y no controlables. Por otro lado, las variables de salida son el resultado o el efecto de la prueba experimental y demuestran características de calidad de un producto o el desempeño del proceso.

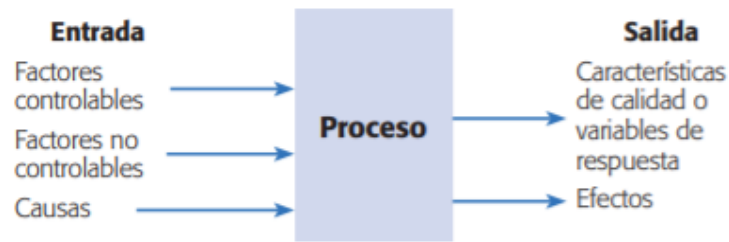

















Ilustración 1 Variables de un proceso al diseñar un experimento

Fuente: (Pulido Gutiérrez & de la Vara Salazar, 2008)






Factores controlables:

Son variables de proceso o características de los materiales experimentales cuyos niveles pueden ser ajustados por el experimentador. En el experimento desarrollado se tienen en cuenta los siguientes factores controlables:

-  Cantidad de árido grueso
-  Cantidad de árido fino
-  Cantidad de aditivo
-  Cantidad de agua
-  Cantidad de cemento
-  Calidad de cemento
-  Tipo de aditivo
-  Calidad de agua
-  Tiempo de mezclado
-  Proceso de mezclado
-  Tiempo de curado
-  Procesos de curado
-  Proceso de llenado y desencofrado de especímenes.
-  Humedad de los áridos.
-  Tipo de maquinaria y herramientas utilizadas en la fabricación.

Factores no controlables:

Son variables de los materiales y métodos que no se pueden controlar durante el experimento. Los factores no controlables del experimento desarrollado son:

-  Temperatura del ambiente
-  Temperatura del agua utilizada en la mezcla
-  Temperatura del agua en las piscinas de curado
-  Humedad del ambiente
-  Habilidades de los operadores

✚ Factores estudiados:

Son las variables que se investigan en el experimento, respecto de cómo influyen o afectan a la variable de respuesta.

- ✚ Relación agua-cemento (a/c)
- ✚ Relación agregado fino-agregado grueso (A_{fP}/A_{gP})
- ✚ Tipo de Agregado

✚ Variables de Respuesta:

Son el resultado obtenido de realizar el experimento. Las variables consideradas son:

- ✚ Resistencia a compresión
- ✚ Módulo de elasticidad
- ✚ Velocidad de onda

2.2 Niveles y tratamientos

Los niveles son los valores que se asignan a cada factor estudiado del diseño experimental. La combinación de niveles de todos los factores estudiados se llama tratamiento.

Tabla 1 Niveles y tratamientos

Nivel: Tipo de Agregado	Nivel: a/c	Nivel: A_{fP}/A_{gP}	Tratamiento
A1	0.60	0.45	D1
A1	0.60	0.60	D2
A1	0.60	0.80	D3
A1	0.50	0.45	D4
A1	0.50	0.60	D5
A1	0.50	0.80	D6
A2	0.60	0.45	D7
A2	0.60	0.60	D8
A2	0.60	0.80	D9
A2	0.50	0.45	D10
A2	0.50	0.60	D11
A2	0.50	0.80	D12

2.3 Réplicas

Es repetir más de una vez un tratamiento. Las réplicas son importantes pues permiten obtener el error experimental, con el cual se determina si las diferencias observadas en los datos son o no estadísticamente diferentes.



En el estudio una réplica corresponde a una probeta cilíndrica de hormigón de 100x200 mm.

El número de réplicas asumido para la prueba de resistencia a la compresión de cada tratamiento, es de dos (2), según recomendaciones dadas en National Ready Mixed Concrete Association (2014). Por otro lado según el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (2011), recomienda preparar dos o más especímenes para cada edad y para cada condición de prueba, por lo que se decidió utilizar 4 réplicas para determinar el parámetro de Módulo de elasticidad.

2.4 Métodos de análisis empleados

Dado que el enfoque de la investigación es cuantitativo, se realizó el análisis estadístico descriptivo de las variables resultado o dependientes (módulo de elasticidad y resistencia a la compresión), así como también el análisis de varianzas para determinar si los factores ejercen efectos sobre las variables dependientes.

Las estadísticas descriptivas son útiles para describir las características básicas de los datos, por ejemplo, las estadísticas de resumen de las variables de escala y las medidas de las variables respuesta. El diseño experimental es evaluado mediante el análisis de las varianzas producidas por las observaciones de la variable dependiente o variable respuesta, lo cual es conocido como ANOVA. Es un método estadístico que permite analizar la varianza de dos o más factores para un variable dependiente cuantitativa sobre la cual se espera la existencia de efectos de las variables independientes o factores que son controlados por el experimentador. El objetivo del método es contrastar la hipótesis de que las medias de cada uno de los tratamientos que existen en un estudio son similares o no. Permite comprobar la variabilidad que existe asociada a las condiciones de cada uno de los grupos (varianza del modelo) y la variabilidad debida a las condiciones intrínsecas de cada sujeto del estudio (varianza residual). Los supuestos que se deben cumplir en el análisis ANOVA son:

- ✚ Homogeneidad de varianzas: La varianza de cada uno de los grupos debe ser similares, se comprueba mediante el Test de Levene.

- Independencia: Las puntuaciones de los sujetos de cada grupo no están influenciados por las puntuaciones de los sujetos de otros grupos.

Así mismo, se realizó el cálculo de los intervalos de confianza, los cuales son estimaciones por rango para el valor poblacional de la media; en el caso del presente estudio, se refiere a la media poblacional del módulo de elasticidad por una parte y, por la otra, a la resistencia a compresión. En el presente estudio se utiliza una significancia del 5%, es decir, un nivel de confianza del 95%.

$$IC_{95\%} = \bar{X} \pm Z_{1-\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

En donde:

$$\alpha = 0,05$$

$$1 - \alpha/2 = 0,975$$

$$Z_{1-\alpha/2} = Z_{0,975} = 1,96$$

\bar{X} = Media aritmética de la variable dependiente

S = Desviación Estándar de la variable dependiente

n = tamaño de la muestra para el nivel del factor

Para el registro de datos y la construcción de tablas se utilizaron hojas de cálculo de MS-Excel 2016, mientras que, el análisis estadístico apropiado para el diseño experimental se realizó mediante el software estadístico SPSS versión 23.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

El hormigón es una mezcla de cemento hidráulico, agregados y agua, con o sin aditivos, fibras u otros materiales cementantes, en donde los agregados son los componentes principales del hormigón. Estos son materiales granulares como: arena, grava, piedra triturada, hormigón de cemento hidráulico triturado o escoria de hierro de alto horno (American Concrete Institute, 2016).

El agregado grueso es la porción retenida en el tamiz de 4.75 mm (N° 4). Para el estudio se ha tomado árido grueso del río Jubones (grava) y río Paute (triturado), utilizados por las hormigoneras Holcim y Hormicenter, los cuales han sido sometidos a un proceso de lavado previo.



Ilustración 2 Árido grueso del río Jubones (grava)



Ilustración 3 Árido grueso río Paute (triturado)

El agregado fino es la porción que pasa el tamiz de 4.75 mm (N° 4) y se retiene en el tamiz de 75 μ m (N° 200). El agregado fino es procedente del río Jubones y río Paute, de igual manera son áridos utilizados por las hormigoneras antes mencionadas. El agregado fino también tiene un lavado previo.



Ilustración 4 Árido fino del río Jubones



Ilustración 5 Árido fino río Paute

Para realizar las mezclas de hormigón se formó dos tipos de agregados, los cuales están compuestos por el mismo agregado grueso variando el tipo de arena. El agregado grueso es la combinación de la grava proveniente del río Jubones y el triturado del Río Paute, esta combinación se la realizó para obtener un agregado que cumpla con los requisitos de límites de granulometría dados en la INEN 872. Para formar cada tipo de agregado se tomó la combinación de agregado grueso descrita anteriormente y se la combinó con arena del río Paute (A1), mientras que para el segundo tipo de agregado se la combinó con arena del río Jubones (A2).

El cemento seleccionado para la elaboración del hormigón es cemento Holcim Premium HE (“high early-strength” - alta resistencia temprana) que cumple con la

norma NTE INEN 2380, 2015 equivalente a la Norma ASTM C1157. Este cemento está compuesto de clínker de cemento portland, yeso y adiciones de puzolanas naturales.



Ilustración 6 Cemento Holcim Premium HE

Se utilizó el aditivo Sika Plastiment TM-250, que es un aditivo químico de doble efecto, reductor de agua y retardador del fraguado, el cual cumple con la Norma ASTM-C494 Tipo D, y tiene una densidad de 1.175 kg/m^3 .

El agua corresponde al suministro público de la empresa ETAPA EP, misma que cumple con parámetros de consumo y uso industrial, cumpliendo con la norma INEN 1108-11.

3.2 Métodos

3.2.1 Propiedades Mecánicas del árido grueso y fino

Las propiedades del agregado y su gradación afectan significativamente la trabajabilidad, y las propiedades del hormigón endurecido, incluida la resistencia a la compresión, la durabilidad y la resistencia a la abrasión (American Concrete Institute, 2016).

Las propiedades de los áridos dependen de las características de las partículas individuales como del material combinado. La caracterización física de los agregados es importante para definir si la fuente de donde provienen es conveniente y cumplen con los requisitos para el diseño de mezclas de hormigón.

Con los áridos de las canteras antes descritas se desarrolla los ensayos de caracterización.

3.2.1.1 Muestreo

El muestreo se realizó en los centros de acopio de las hormigoneras Holcim y Hormicenter, el proceso se lo realizó según la norma INEN 0695. En el laboratorio de Materiales de la Universidad de Cuenca se realizó la homogenización por remezclado de todo el material, colocándolo sobre una lona y mezclando con la ayuda de palas, luego de este proceso se redujo la muestra en sacos de 25 Kg por cuarteo mecánico para su posterior almacenamiento.



Ilustración 7 Homogenización del material – Reducción de muestra por cuarteo mecánico

3.2.1.2 Granulometría del árido fino y grueso

La gradación y el contenido de agregados afecta propiedades como el acabado, la trabajabilidad, la bombeabilidad, la resistencia, la permeabilidad y la contracción del hormigón. Los agregados que tienen una curva granulométrica uniforme sin ninguna deficiencia ni exceso de cualquier tamaño de partícula producirán mezclas con menos contenido de vacíos. (American Concrete Institute, 2016)



Cualquier cambio en la granulometría que incremente los vacíos entre partículas del agregado grueso, requerirá una disminución o incremento en la fracción de mortero de hormigón (American Concrete Institute, 2016). Debido a que los materiales cementosos son más caros que los agregados, es deseable mantener el contenido de vacíos tan bajo como sea posible (American Concrete Institute, 2001).

Por ello, se determina la granulometría tanto del árido grueso como fino y se verifica si son áridos aptos o no para la fabricación de hormigones, debiendo cumplir con la norma NTE INEN 696-15, que establece el procedimiento de ensayo para el análisis granulométrico de los áridos. Para el árido fino se toma la serie de tamices (N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y N° 200). El tamaño de tamices a utilizar para el árido grueso es 1", 3/4", 1/2", 3/8", y N° 4 (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

El agregado fino debe controlarse para minimizar variaciones de granulometría y contenido de humedad. La relación de agregado fino a grueso al proporcionarse en la mezcla de hormigón está gobernada por el módulo de finura del agregado fino y la variación excesiva de las cantidades de tamaños menores a 75 μm (N° 200); el agregado fino tiene un efecto importante en el requerimiento de agua de mezclado, velocidad de pérdida de revenimiento, la resistencia y la contracción por secado (American Concrete Institute, 2001).

El módulo de finura es una medida característica del agregado fino, se emplea principalmente en el diseño de mezclas de hormigón, también es empleado como control de calidad en la producción de hormigón. El módulo de finura se calcula mediante la sumatoria de los porcentajes totales de material que es más grueso que cada uno de los tamices (porcentaje retenidos acumulados) y se divide para 100: N° 100, N° 50, N° 30, N° 16, N° 8, N° 4.

Mediante el análisis granulométrico del agregado grueso, se determina el tamaño máximo nominal (TMN), mismo que interviene en los requisitos de pasta, en la granulometría óptima y afecta en el asentamiento, segregación y exudación del hormigón (Carrasco, 2013). De acuerdo con (Mamlouk & Zaniewski, 2009), el tamaño máximo nominal del agregado es la abertura de tamiz de mayor tamaño que retiene parte de las partículas del árido, pero generalmente no más del 10%.



Ilustración 8 Serie de tamices para agregado grueso – Ensayo de granulometría

3.2.1.3 Combinación de Agregados

La combinación de agregados es utilizada para mejorar un agregado con uno de mejor calidad de modo que el agregado combinado resulte aceptable, o para corregir las deficiencias en la gradación que puedan tener (Quiroz Crespo & Salamanca Osuna, 2006).

Este proceso determina en qué proporción mezclar la grava del río Jubones con el triturado el río Paute para cumplir la gradación establecida por la norma NTE INEN 872 (Áridos para hormigón - Requisitos).

Se utiliza el método numérico de mínimos cuadrados presentado a continuación.

$$\begin{bmatrix} \sum A^2 & \sum A * B \\ \sum B * A & \sum B^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum A * N \\ \sum B * N \end{bmatrix} \quad (2)$$

En donde:

A: Porcentaje pasante de cada tamiz de la curva granulometría del agregado A

B: Porcentaje pasante de cada tamiz de la curva granulometría del agregado B

a': Porcentaje de agregado A ha combinar

b': Porcentaje agregado B a combinar

N: Valor medio de los límites superior e inferior del porcentaje pasante de cada tamiz de la gradación establecida por la norma NTE INEN 872.

3.2.1.4 Resistencia a la abrasión

La resistencia de los áridos a la abrasión, al impacto y al efecto dañino de cargas, se relaciona con la dureza de las partículas del árido y se describe mediante la tenacidad o también llamada resistencia a la abrasión. El árido debe ser capaz de resistir la trituración, la degradación y la desintegración cuando se almacena formando montones, o cuando es mezclado para obtener hormigón (Mamlouk & Zaniewski, 2009). Además los requerimientos de agua en la mezcla de hormigón pueden incrementarse al degradarse el árido, pues existe un incremento de finos en la mezcladora (American Concrete Institute, 2001).

El valor de degradación del árido grueso se lo determina mediante la pérdida de masa por desgaste e impacto empleando la máquina de los Ángeles. La norma que describe el proceso para la determinación de la degradación de árido grueso es la NTE INEN 860-15. Esta prueba combina los efectos del impacto y la abrasión al hacer girar una cantidad especificada de agregado con 11 bolas de acero de 46.8 mm de diámetro y de 395 gramos, dentro de un tambor. La muestra de agregado y la carga abrasiva se hacen girar 500 revoluciones a una velocidad de 30 a 33 rpm. El agregado se tamiza por la malla de 1.70 mm (No. 12), la masa que se retiene, es lavada y secada al horno para determinar la masa final. El porcentaje de abrasión se obtiene al restar la masa de muestra inicial menos la masa final de la muestra, dividido para la masa inicial.

Las especificaciones de la NTE INEN 872-15 establece un límite superior permisible para el porcentaje de pérdida de masa, "Áridos para hormigón - Requisitos", especifica una pérdida de masa máxima del 50% para grava, grava triturada o piedra triturada. Las comparaciones de los resultados de las pruebas de abrasión agregada con las de la resistencia a la abrasión del hormigón generalmente no muestran una correlación directa. La resistencia a la abrasión del hormigón

generalmente está relacionada con la resistencia a la compresión (American Concrete Institute, 2016).



Ilustración 9 Ensayo de abrasión realizado a agregado grueso combinado

3.2.1.5 Humedad

La cantidad de humedad de los áridos afecta considerablemente en el diseño de mezclas de hormigón y su determinación permite realizar correcciones de agua en el diseño. Para la determinación del contenido de humedad se emplea la norma NTE INEN 862-15. Se toma una cantidad especificada de agregado (fino o grueso), el material es colocado en bandejas y depositado en un horno normalizado, cuya temperatura esta entre 110 ± 5 °C, se deja durante 24 ± 4 horas. Para la comprobación de que el material está libre de agua, se coloca sobre éste un vidrio y se verifica que no se empañe.

$$P = \frac{W - D}{D} \quad (3)$$

Donde:

W= Masa inicial de la muestra

D= Masa de la muestra seca

3.2.1.6 Gravedad Especifica

La gravedad específica de los agregados se emplea en los cálculos de proporciones de mezcla de hormigón, sirve para determinar el volumen absoluto que una masa

de material ocupa en la mezcla. El volumen absoluto de un agregado hace referencia al volumen de materia sólida y los poros internos y no incluyen los huecos entre las partículas del agregado. Sustituir un agregado por otro de diferente gravedad específica en un hormigón, hará que el rendimiento o el volumen de hormigón aumente o disminuya, aún si las masas de los lotes permanecen constantes. Si bien la gravedad específica del agregado no es una medida de calidad, una variación de ésta puede indicar un cambio en las características del agregado (American Concrete Institute, 2016).

Cada partícula de agregado está compuesta de materia sólida y vacíos que pueden o no contener agua. Debido a que la masa del agregado varía con su contenido de humedad, la gravedad específica se determina a un contenido de humedad constante. Por lo que se definen cuatro condiciones de humedad para los agregados, mismas que dependen de la cantidad de agua contenida en los poros o en la superficie de las partículas.

- a) Agregado húmedo en el que los poros conectados a la superficie se llenan con agua y con agua libre también en la superficie.
- b) Secado superficial saturado (SSS): agregado en el que los poros conectados a la superficie se llenan con agua, pero sin agua libre en la superficie.
- c) Agregado seco al aire que tiene una superficie seca, pero contiene un poco de agua en los poros.
- d) Agregado seco al horno (SH) no contiene agua en los poros o en la superficie.

Para cada estado antes mencionado, se definen cuatro tipos de gravedad específica, pero tres son los más importantes en el diseño de mezclas: gravedad específica seco al horno, gravedad específica en estado saturado superficialmente seco y gravedad específica aparente, donde:

- ✚ Gravedad específica (SH) es la relación entre la densidad (SH) de los áridos y la densidad del agua destilada a una temperatura determinada.



- ✚ Gravedad específica (SSS) es la relación entre la densidad (SSS) de los áridos y la densidad del agua destilada a una temperatura determinada.
- ✚ Gravedad específica aparente es la relación entre la densidad aparente del árido y la densidad del agua destilada a una temperatura determinada.

Para determinar la gravedad específica tanto del árido grueso como fino se emplea la norma NTE INEN 857-15 y NTE INEN 856-15 respectivamente.

La determinación de la gravedad específica de los áridos finos, se basa en la norma NTE INEN 856-15, donde indica que una cantidad representativa de árido es sumergida en agua durante 24 horas y se vuelve a secar hasta alcanzar la condición SSS. Se coloca una muestra de 500 gramos del material en SSS dentro de un picnómetro de volumen constante; después se añade agua a la marca del picnómetro y se vuelve a determinar el peso. A continuación, la muestra se seca y se pesa. La gravedad específica queda determinada por las fórmulas siguientes:
Ecuaciones para agregado fino

$$\text{Gravedad Específica (SH)} = \frac{A}{B + S - C} \quad (4)$$

$$\text{Gravedad Específica (SSS)} = \frac{S}{B + S - C} \quad (5)$$

$$\text{Gravedad Específica Aparente (SSS)} = \frac{A}{B + A - C} \quad (6)$$

Donde:

A= masa de la muestra seca

B= masa del picnómetro lleno con agua

C= masa del picnómetro lleno con muestra y agua

S= masa de la muestra saturada superficialmente seca

En la determinación de la gravedad específica de los áridos gruesos, se emplea la norma NTE INEN 857-15, para lo cual se toma una cantidad de muestra saturada durante 24 horas, y se pesa mientras está sumergida en agua. A continuación, se seca hasta la condición SSS y vuelve a pesarse. Por último, la muestra es secada hasta el peso original.

Ecuaciones para agregado grueso

$$\text{Gravedad de Específica (SH)} = \frac{A}{B - C} \quad (7)$$

$$\text{Gravedad de Específica (SSS)} = \frac{B}{B - C} \quad (8)$$

$$\text{Gravedad Específica Aparente (SSS)} = \frac{A}{A - C} \quad (9)$$

Donde:

A= masa de la muestra seca

B= masa de la muestra saturada superficialmente seca

C= masa aparente en agua de la muestra saturada



Ilustración 10 Ensayo de gravedad específica a agregado fino.

3.2.1.7 Absorción

Es importante determinar el porcentaje de absorción de los agregados pues de este valor depende el cálculo de la cantidad de agua en el diseño de la mezcla, para una correcta hidratación del cemento y absorción de los áridos; puesto que representa el máximo peso de agua que el agregado puede absorber en el mezclado (Carrasco, 2013). Para la determinación de la absorción se emplearán las normas NTE INEN 856-15 y NTE INEN 857-15, determinación de la absorción de árido fino y grueso respectivamente. Además, estas normas incluyen la determinación de la densidad y gravedad específica.

Para determinar la absorción de los agregados, se toma una masa de árido fino, que es secada totalmente, posterior se sumerge bajo agua durante 24 horas, para dejarle en estado saturado. Para verificar el estado (SSS), se debe colocar el material en el cono de ensayo, y compactarlo con 25 golpes desde una altura de caída de 5mm, se retira el cono hacia arriba, si el material se desmorona ligeramente habrá llegado al estado (SSS), y se registra el peso.

Para la determinación de la absorción del árido grueso, se toma una masa la cual es secada completamente, luego es sumergida en agua durante 24 horas. Para conseguir el estado superficialmente seco se seca con una toalla absorbente la muestra eliminando la lámina de agua visible (brillo) y se determina la masa.

$$\text{Absorción, (\%)} = \frac{S - A}{A} * 100 \quad (10)$$

Donde:

S= Masa de la muestra en estado superficialmente seca (SSS)

A= Masa seca al horno

3.2.1.8 Peso Unitario

El peso unitario se define como el peso de un volumen de agregado y es importante para establecer las proporciones de las mezclas de hormigón. Además, el peso



unitario se usa para estimar cantidades de agregados en pilas de almacenamiento o depósitos.

La norma NTE-INEN 0858-15 indica los procedimientos para la determinación del peso unitario en estado seco. El ensayo consiste en llenar un recipiente normalizado en forma estandarizada; el llenado se realiza en tres capas, apisonando cada capa con 25 golpes. La masa unitaria se determina con la siguiente ecuación:

$$M = \frac{G - T}{V} \quad (11)$$

Donde:

M= masa unitaria del árido, Kg/m³

G= masa del árido más el molde, Kg

T= masa del molde, Kg

V= volumen del molde, m³

Para determinar el contenido de vacíos, se hace uso del valor de peso unitario empleando la siguiente ecuación:

$$Vacios, \% = \frac{[(S \times M) - Da]}{(S - Da)} \times 100 \quad (12)$$

Donde:

M= masa unitaria del árido, Kg/m³

S= gravedad específica en condición seca (NTE INEN 856-NTE INEN 857)

Da= densidad del agua, 998 kg/m³

Con el objetivo de obtener la curva Peso unitario vs Relación árido fino-grueso (Af_P/Ag_P) para A1 y A2, se determinó el peso unitario de mezclas de árido fino y grueso en diferentes proporciones. Mediante esta curva se obtuvo tres relaciones (Af_P/Ag_P) de acuerdo al punto de peso unitario óptimo y un punto antes y después

de éste, mismos que fueron utilizados en el diseño y dosificación de las mezclas de hormigón.



Ilustración 11 Ensayo de peso unitario compactado a agregado grueso y agregado combinado.

3.2.1.9 Forma y textura superficial de las partículas

La forma de los agregados influye en la trabajabilidad y resistencia del hormigón, pues dependiendo de la forma (angular o redondeadas) de las partículas de los áridos permite conocer cómo estos se conglomeran para obtener una estructura densa, así como la movilidad de las partículas en el proceso de mezclado. Por lo tanto, hay que verificar que las partículas del agregado a utilizar tengan cantidades bajas de partículas planas y alargadas para que la trabajabilidad de hormigón y su resistencia no se vean afectadas (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

Por otro lado, la textura del agregado sea esta rugosa o lisa, influye en la capacidad de aglomeración y la fricción entre partículas, por lo que la textura es un factor que afecta la resistencia de las mezclas de hormigón.

3.2.2 Hormigón en fresco y endurecido

La calidad del hormigón está determinada por varios factores sean estos la composición química y los procesos de hidratación del cemento, características mecánicas-físicas de los áridos, y adición de aditivos y adiciones. (Mamlouk & Zaniewski, 2009)

Según (Mamlouk & Zaniewski, 2009), los factores que influyen en la vida útil del hormigón son los métodos de mezclado, transporte, colocación y curado del hormigón, estos factores intervienen directamente en la calidad del hormigón.

3.2.2.1 Criterios de Diseño de mezclas

Propiedades del hormigón varían en función del proporcionamiento de la mezcla y de la forma en la que se coloca y se cura en obra.

El proporcionamiento de la mezcla hace referencia al proceso en el cual se determinan las cantidades de los materiales que formarán el hormigón.

- ✚ Relación agua-cemento: Según (Steven H. Kosmatka, 2004), la ecuación $E = 4700 \sqrt{f'_c}$, es aplicable para hormigones de densidad normal y resistencia a compresión (f'_c), entre 210 y 360 kg/cm² o 20 y 35 MPa. Por lo cual mediante experimentos previos realizados en laboratorio se determinó que las relaciones agua-cemento de 0.50 y 0.60 con los áridos A1 y A2 producen hormigones con resistencias en el rango especificado.
- ✚ Cantidad de cemento: Mediante ensayos previos basados en el procedimiento de diseño del ACI 211.1, se estableció la cantidad de 327.18 Kg de cemento para un metro cúbico de hormigón, cuya cantidad se mantuvo constante en todos los diseños.

$$C = \frac{c}{G_{cemento} * \rho_{agua}} \quad (13)$$

Donde:

C= volumen de cemento para un m³ de hormigón [m³]

c= masa de cemento [327.18 kg]

$G_{cemento}$ = gravedad específica del cemento

ρ_{agua} = densidad del agua [Kg/m³]

- ✚ Cantidad de agua: La cantidad de agua se determinó en base a la relación agua-cemento de 0.50 y 0.60 y la cantidad de cemento de 327.18 kg para todos los diseños, consiguiendo revenimientos entre 2.50 a 15 cm, considerando la influencia del aditivo Sika Plastiment MT-250. La cantidad de agua se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{c * \left(\frac{a}{c}\right)}{G_{agua} * \rho_{agua}} \quad (14)$$

Donde:

A= volumen de agua para un m³ de hormigón [m³]

c= masa de cemento [327.18 kg]

a/c= relación agua-cemento [0.50 o 0.60]

G_{agua} = gravedad específica del agua

ρ_{agua} = densidad del agua [Kg/m³]

- ✚ Cantidad de aire (F): Se consideró 1.2% de contenido de aire en la mezcla, este valor fue recomendado por el laboratorio de control y calidad de la empresa Holcim – Cuenca.
- ✚ Cantidad de árido grueso y fino: De la curva peso unitario óptimo, se obtuvo las relaciones agregado fino-agregado grueso (A_{fp}/A_{gp}), en base al peso de los áridos (0.45 - 0.60 - 0.80). Con estas relaciones y la gravedad específica en estado seco se obtuvieron la cantidad de agregado fino y grueso para cada diseño.

$$Ag = 1 - A - C - F \quad (15)$$

Donde:

Ag= volumen de agregado para un m³ de hormigón [m³]

A= volumen de agua para un m³ de hormigón [m³]

C= volumen de cemento para un m³ de hormigón [m³]

F= volumen de aire para un m³ de hormigón [m³]

El volumen A_g se divide en base a las relaciones agregado fino-agregado grueso en base al volumen de los áridos, por lo que se transformó las relaciones (A_{fv}/A_{gv}) a sus equivalentes en volumen.

$$A_{g_g} = A_g * (A_{fv}/A_{gv}) \quad (16)$$

$$A_{g_f} = A_g - A_{g_g} \quad (17)$$

Donde:

A_{g_g} = volumen de agregado grueso para un m³ de hormigón [m³]

A_g = volumen de agregado total para un m³ de hormigón [m³]

A_{g_f} = volumen de agregado fino para un m³ de hormigón [m³]

A_{fv}/A_{gv} = relación agregado fino-agregado grueso en volumen

- ✚ Cantidad de aditivo: La cantidad de aditivo se estableció en base a las relaciones agua-cemento y a la ficha de especificación técnica del producto. Para los diseños con relaciones de agua-cemento de 0.60 no se requirió colocar aditivo para que las mezclas lleguen al revenimiento en el rango planteado, por otro lado, para la relación agua-cemento de 0.50 se colocó un porcentaje máximo de aditivo especificado en la ficha técnica que es de 0.90% de la masa del cemento.
- ✚ Proporcionamiento de las mezclas: A los volúmenes de cada material de la mezcla de hormigón se los calcula de la siguiente manera, para tener la dosificación por peso de los materiales.

$$P_{mat} = V_{mat} * G_{mat} * \rho_{agua} \quad (18)$$

Donde:

P_{mat} = Peso de material (arena, grava, ripio, cemento, agua, aditivo) [Kg]

V_{mat} = Volumen del material (arena, grava, ripio, cemento, agua, aditivo)
[m³]

G_{mat} = Gravedad específica seca al horno

ρ_{agua} = Densidad del agua [1000 Kg/m³]

- ✚ Ajuste por humedad del agregado: Debido a que los agregados se pesaron en estado húmedo su peso seco está incrementado por un porcentaje de agua absorbida y superficial. Por lo tanto, el agua de mezclado (a) se redujo en una cantidad igual a la humedad superficial menos absorción contribuida por cada agregado.

3.2.2.2 Proceso de Mezclado

La adecuada dosificación, el correcto mezclado y manipulación del hormigón fresco son factores importantes para conseguir estructuras fuertes y duraderas. Por lo que se deben seguir pasos básicos y tomar precauciones a la hora de mezclar y manejar el hormigón fresco (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

El proceso de mezclado se realizó según la norma ASTM C 192. La cual establece el siguiente proceso:

- ✚ Añadir el agregado grueso, parte del agua de mezclado y la solución de aditivos, e iniciar la operación de mezclado, por un minuto.
- ✚ Agregar el árido fino, el cemento y el agua y mezclar por tres minutos.
- ✚ Detener la mezcladora por un tiempo de tres minutos, tiempo en el cual el operador deberá limpiar las paredes de la olla. Durante el descanso, tapar la boca de la mezcladora con un paño húmedo para evitar la evaporación.
- ✚ Continuar con otro período de mezclado de dos minutos.
- ✚ Depositar el hormigón mezclado en una bandeja limpia y húmeda.

El proceso de dosificación consiste en medir e introducir los ingredientes del hormigón en la mezcladora, cuyas proporciones fueron dosificadas por peso.

Cabe mencionar que el proceso de mezclado permite la intervención de dos operarios, y se ha adaptado para que cada uno tenga actividades específicas dentro del proceso de mezclado.



Ilustración 12 Proceso de Mezclado – Mezcla de hormigón en fresco

3.2.2.3 Moldeo y curado de especímenes de hormigón

Para el proceso de moldeo y curado de los especímenes se emplea la norma NTE-INEN 1576, donde una vez seleccionado el tamaño de los moldes de los especímenes (200x100 mm), se procede a la colocación y llenado del molde, compactando en capas. El número de capas es de dos, cada capa aproximadamente de igual espesor, compactadas con 25 golpes cada una. Después de compactar cada capa se debe golpear ligeramente las paredes del molde con un mazo de goma para eliminar las oquedades producto del varillado. Al final de la compactación, se termina la superficie superior enrasándola con una llana metálica.

Una vez elaboradas las probetas de hormigón, se procede al curado, proceso que permite mantener un grado de humedad y temperatura satisfactorios durante un período de tiempo determinado, logrando una correcta hidratación del hormigón y

consecuentemente una ganancia continua de la resistencia (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

Una vez removidas las muestras fraguadas de los moldes, se las sumerge en una piscina de agua durante 28 días, manteniendo la temperatura del agua entre $16\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Para el curado de los especímenes fabricados se adaptó el proceso de curado especificado en la normativa, para ello se utilizó una piscina de curado en reemplazo de la cámara húmeda, esto es debido a que el laboratorio no cuenta con una cámara de curado normada.



Ilustración 13 Moldeo de probetas de hormigón

3.2.2.4 Revenimiento del Hormigón

La trabajabilidad es la facilidad de colocación, consolidación y acabado del hormigón en fresco, asegurando que el hormigón no exude ni segregue excesivamente (Mamlouk & Zaniewski, 2009). El revenimiento del hormigón en estado plástico es una medida indirecta de la consistencia del hormigón y para su determinación sigue lo especificado en la norma ASTM C-143.

La prueba consiste en llenar un cono truncado en tres capas, compactando cada una de ellas con 25 golpes distribuidos uniformemente con la ayuda de una varilla metálica de cabeza redondeada. Una vez concluido el llenado, se enrasa la superficie y se levanta el cono verticalmente en un tiempo de 5 segundos aproximadamente. Luego se invierte el cono vacío junto al hormigón y se mide la

distancia vertical desde la parte superior del molde al centro del hormigón asentado con la ayuda de un flexómetro de precisión 5 mm. Para el ensayo se debe verificar que la superficie donde se ejecutará la prueba este completamente horizontal y nivelada.

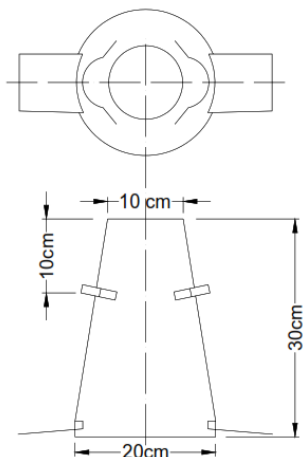


Ilustración 14 Ensayo de revenimiento realizado a mezcla de hormigón

3.2.2.5 Peso Unitario del Hormigón en fresco

El peso unitario (densidad, peso volumétrico o peso específico), depende de la cantidad y densidad de los agregados, de la cantidad de aire atrapado o incluido y de las cantidades de agua y cemento. Su determinación es importante pues permite conocer la calidad del hormigón en estado fresco. Una vez que se ha establecido el proporcionamiento de los materiales en la mezcla, un cambio en la masa volumétrica indicará una variación de uno o más de los requisitos del desempeño del hormigón. Una masa volumétrica baja puede indicar, que los materiales han cambiado, hay mayor porcentaje de aire, cantidad de agua mayor, cambio en las proporciones de los materiales y/o un contenido menor de cemento en la mezcla (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2007).

El método estándar de ensayo para determinar el peso unitario y rendimiento del hormigón emplea la norma ASTM C-138, este método de prueba cubre la determinación del peso unitario o densidad de una mezcla de hormigón fresco y proporciona las fórmulas para calcular el rendimiento.

El ensayo consiste en colocar hormigón recién mezclado en un recipiente de 7 litros en tres capas cada una, deberá ser compactado uniformemente con la ayuda de una varilla metálica de punta redondeada, y se deberá golpear la superficie del molde con un mazo de goma 15 veces, para cerrar los agujeros dejados por el varillado. Una vez terminada la tercera capa, emplear una placa plana para enrasar la superficie superior del hormigón, a fin de que el recipiente esté lleno y con acabado plano y liso, comenzando desde los dos tercios del recipiente hacia afuera y hacia adentro con movimientos de aserrado, hasta dejar una superficie completamente enrasada. Limpiar la superficie del recipiente y determinar la masa del conjunto (recipiente más hormigón).

Para determinar el peso unitario y el rendimiento del hormigón se hace uso de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Peso Unitario} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = \frac{\text{Peso neto del concreto} [\text{kg}]}{\text{Volumen del recipiente} [\text{m}^3]} \quad (19)$$

$$\text{Rendimiento} [\text{m}^3] = \frac{\text{Peso de materiales mezclados} [\text{kg}]}{\text{Peso unitario} [\text{m}^3]} \quad (20)$$



Ilustración 15 Realización del ensayo de peso unitario a una de las mezclas de hormigón

3.2.2.6 Resistencia a compresión

La resistencia a la compresión es uno de los principales requisitos del diseño estructural para garantizar que la estructura sea capaz de soportar la carga pretendida. La resistencia a compresión es una de las propiedades más importantes del hormigón, permite tener un conocimiento general de la calidad del hormigón,

pues se relaciona directamente con la pasta de cemento endurecida (Carrasco, 2013).

Algunos parámetros influyen en la resistencia del hormigón, entre ellos están: la relación agua-cemento, características del agregado grueso, edad del hormigón, influencia del curado y la resistencia del cemento. Al incrementar la relación agua-cemento, se reducen tanto la resistencia como la rigidez del hormigón.

La norma a seguir para la determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de hormigón, es la NTE-INEN 1573. Inicialmente, antes de efectuar el ensayo las dos bases de las probetas se tapan para garantizar que sus superficies sean paralelas, se emplea un cabeceado con azufre, de acuerdo a la norma ASTM C-617. Utilizando una máquina de ensayo (prensa hidráulica), las probetas se prueban aplicando una carga axial a una velocidad especificada, hasta que llegue a la fractura.

La resistencia a la compresión de la probeta se obtiene dividiendo la carga máxima soportada por la probeta durante el ensayo entre el área media de la sección transversal del testigo.

El número de probetas ensayadas para la prueba de compresión fue de dos por cada diseño, se tomaron indistintamente del conjunto de seis especímenes. La edad del hormigón para la prueba fue de 28 días.



Ilustración 16 Espécimen en un ensayo a compresión

3.2.2.7 Módulo de elasticidad (ASTM C- 469)

El módulo de elasticidad definido como la relación entre esfuerzo y deformación unitaria en el rango elástico de la curva esfuerzo-deformación del hormigón (Fig.1), es una medida de la rigidez de este material y su magnitud depende de la resistencia a compresión del hormigón y de la cantidad, tipo y gradación de los agregados (Steven H. Kosmatka, 2004).

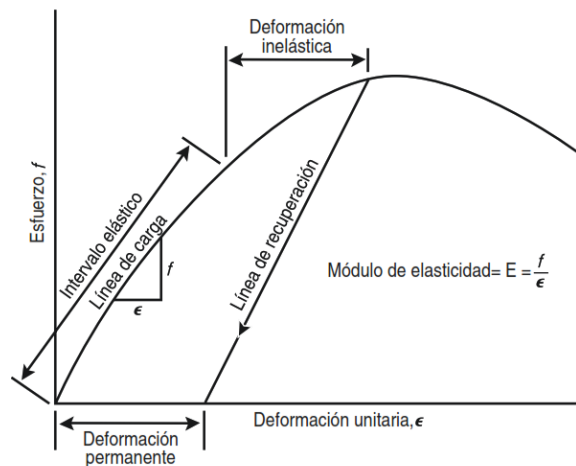


Figura 1. **Curva esfuerzo deformación - Fuente:** (Steven H. Kosmatka, 2004)

El hormigón no es un material verdaderamente elástico, pero endurecido por completo y cargado en forma moderada tiene una curva de esfuerzo de compresión - deformación que, en esencia, es una recta dentro del rango de los esfuerzos usuales de trabajo (Quiroz Crespo & Salamanca Osuna, 2006).

El módulo de elasticidad experimental se determina a partir de pruebas de compresión a cilindros de hormigón. Los diferentes valores que pueden determinarse a partir de una prueba incluyen el módulo tangente inicial, el módulo secante y el módulo cuerda.

Módulo tangente: Su valor es variable en cada punto y viene medido por la inclinación de la tangente a la curva en dicho punto de la curva y cuando se toma en el punto 0 se denomina *módulo tangente inicial* o *módulo inicial*. Es válido para un nivel de esfuerzos pequeños.

Módulo secante o cuerda: Su valor es variable en cada punto y viene medido por la inclinación de la recta que une el origen con dicho punto. El módulo secante y de

cuerda representan valores de módulo “promedios” para rangos de esfuerzo. Su magnitud se determina de acuerdo a la norma ASTM C-469.

En hormigones con agregados de densidad normal y resistencia a compresión (f'_c), entre 210 y 360 kg/cm² o 20 y 35 MPa, el módulo de elasticidad se puede estimar como $4700 \sqrt{f'_c}$ (Steven H. Kosmatka, 2004), en donde E_c se encuentra en MPa. Esta ecuación se encuentra referenciada en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DS, para los modelos elásticos de estructuras que se diseñan para acciones sísmicas.

Una vez determinada la resistencia a la compresión de los especímenes, a las muestras se les coloca un compresómetro digital, el cual cuenta con dos sensores diametralmente opuestos el uno del otro, que registran la deformación longitudinal del espécimen. Cada espécimen es ensayado a compresión hasta recibir una carga de $0.50f'_c$, registrando 10 datos por segundo de carga y deformación. El ensayo se repite 3 veces haciendo un proceso de carga y descarga de la prensa, descartando los datos del primer ensayo, los cálculos se basarán en los promedios de los dos ensayos subsecuentes.

Con los valores tomados por el equipo se encuentran los valores de módulo de elasticidad experimentales mediante la pendiente de la línea trazada desde el esfuerzo nulo hasta un esfuerzo de compresión de $0.40 f'_c$ de la curva esfuerzo deformación.



Ilustración 17 Colocación de espécimen para ensayo de módulo de elasticidad – sensores longitudinales

Del proceso descrito por la norma ASTM C-469, se obtiene la pendiente a la cuerda de la curva Esfuerzo – Deformación, según lo especificado a continuación.

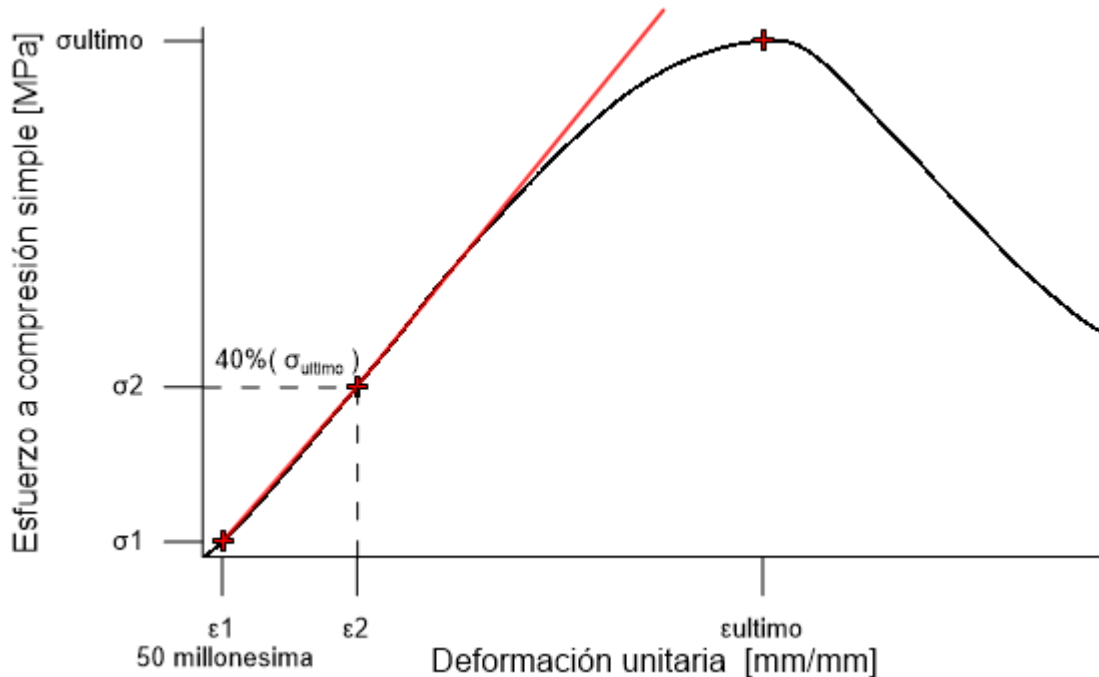


Figura 2 Método de cuerda o secante, curva Esfuerzo – Deformación

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.00005} \quad (21)$$

Donde:

E_c = Módulo de elasticidad de cuerda [Mpa]

S_2 = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última

S_1 = Esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal ϵ_1 de 5 millonésimas [Mpa]

ϵ_2 = Deformación longitudinal producida por el esfuerzo σ_2

3.2.2.8 Módulo de elasticidad por ultrasonido

La prueba de velocidad de pulsos ultrasónicos mide la velocidad de onda ultrasónica que atraviesa el hormigón. En donde la distancia entre los transductores es dividida para el tiempo que tarda en desplazarse la onda entre ellos, obteniéndose

la velocidad media de propagación de la onda (Mamlouk & Zaniewski, 2009). Este procedimiento es un ensayo indirecto y no destructivo que se realiza al hormigón para obtener información de uniformidad, calidad, presencia de grietas en el hormigón, y permite además determinar de forma indirecta valores de módulo de elasticidad dinámico (Diógenes, Cossolino, Pereira, El Debs, & El Debs, 2011).

La norma ASTM C-597, describe el procedimiento para la realización del ensayo, donde inicialmente se debe colocar en cada transductor y en la superficie de la probeta una cantidad considerable de gel, esto con el fin de evitar atrapar aire entre el transductor y la superficie del hormigón. Posterior presionar los transductores sobre las caras de las probetas, asegurando un buen contacto entre las dos superficies. Presionar START en el equipo PROCEQ TICO, y registrar las lecturas de velocidad y tiempo de recorrido de onda que se muestran en la pantalla.



Ilustración 18 Equipo PROCEQ TICO utilizado en la determinación de la velocidad ultrasónica en probetas de hormigón



Ilustración 19 Ensayo de ultrasonido realizado a uno de los especímenes

Según Casali, y otros (2007), el módulo de elasticidad dinámico se determina a partir de velocidad de onda ultrasónica y viene dado por:

$$E_d = V_p^2 * \frac{\gamma}{g} * \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (22)$$

Donde:

E_d = Módulo de elasticidad dinámico [Kg/m²]

V_p = Velocidad longitudinal de onda ultrasónica [m/s]

γ = Densidad del Hormigón [Kg/m³]

g = Aceleración de gravedad [m/s²]

ν = Coeficiente de Poisson

Para determinar el valor de módulo de elasticidad dinámico, se asumió un valor de coeficiente de Poisson de 0.2 (Steven H. Kosmatka, 2004). Por otro lado (Diógenes, Cossolino, Pereira, El Debs, & El Debs, 2011) determinaron que el módulo de elasticidad estático para hormigones con contenido de cemento menor que 500 Kg/cm³, está en función del módulo de elasticidad dinámico y viene dado por la siguiente ecuación:

$$E_c = 1.25 * E_d - 19 \quad (23)$$

Donde:

E_c = Módulo de elasticidad estático [GPa]

E_d =Módulo de elasticidad dinámico [GPa]

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización del agregado

Para la caracterización de los agregados se realizó los ensayos establecidos en las normas de calidad del Servicio Ecuatoriano de Normalización (NTE INEN) y del American Society for Testing and Materials (ASTM). Respecto a los resultados de los ensayos se observó que los agregados cumplen con la norma NTE INEN 0872, que define los requisitos que deben cumplir los áridos para ser empleados en la elaboración de hormigones. Cada una de las propiedades determinadas de los áridos, se muestran en los siguientes apartados de este capítulo.

4.1.1 Análisis granulométrico

Se realizó el análisis granulométrico al árido fino y grueso, donde se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 2 Resultados del análisis granulométrico arena Jubones

Tamiz		Peso retenido [gr]	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
4.75 mm	N 4	5.60	0.93	0.93	99.07
2.36 mm	N 8	33.80	5.63	6.56	93.44
1.18 mm	N 16	86.60	14.42	20.98	79.02
0.60 mm	N 30	132.30	22.03	43.01	56.99
0.30 mm	N 50	168.70	28.09	71.11	28.89
0.15 mm	N 100	122.30	20.37	91.47	8.53
0.075 mm	N 200	40.60	6.76	98.23	1.77
-	Fondo	10.60	1.77	100.00	0.00
Módulo de Finura				2.34	

Tabla 3 Resultados del análisis granulométrico arena Paute

Tamiz		Peso retenido [gr]	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
4.75 mm	N 4	12.2	1.88	1.88	98.12
2.36 mm	N 8	121.7	18.73	20.60	79.40
1.18 mm	N 16	148.7	22.88	43.48	56.52
0.60 mm	N 30	147.8	22.74	66.23	33.77
0.30 mm	N 50	121.3	18.66	84.89	15.11
0.15 mm	N 100	62.5	9.62	94.51	5.49
0.075 mm	N 200	20.3	3.12	97.63	2.37
-	Fondo	15.4	2.37	100.00	0.00
Módulo de Finura				3.12	

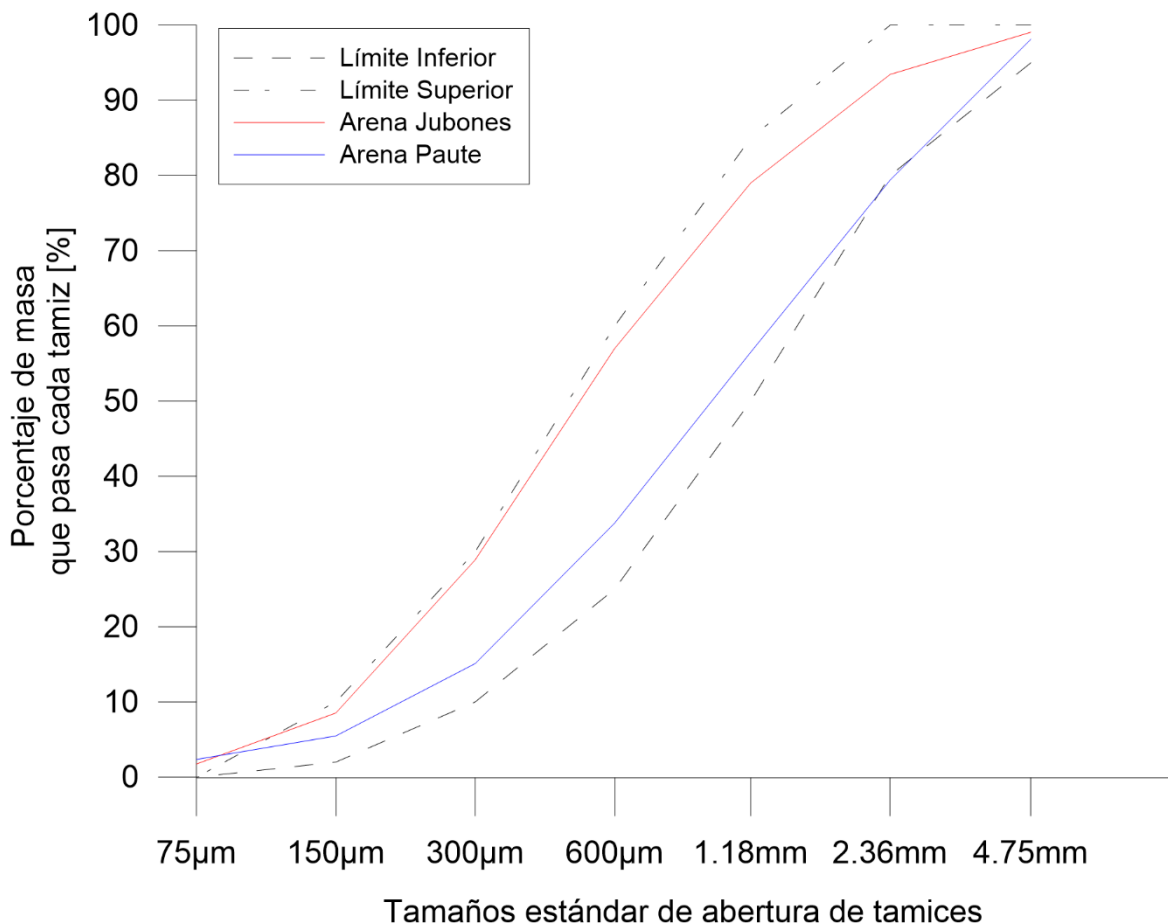


Figura 3 Curva granulométrica de arenas de río Jubones y Paute

De acuerdo con los análisis granulométricos realizados tanto de la arena del río Jubones como la del río Paute, según la Figura 3, los dos agregados finos cumplen con la gradación establecida por la norma NTE INEN 872, produciendo hormigones de buena calidad y económicos; pues según (Steven H. Kosmatka, 2004), una buena gradación disminuye los requerimientos de pasta, mejora la trabajabilidad, e influye en la demanda de agua, porosidad, contracción y durabilidad del hormigón. Los valores de módulo de finura obtenidos fueron de 2.34 y 3.12 para la arena del Jubones y del Paute respectivamente, cuales se encuentran en el rango establecido en la norma NTE INEN 872 (2.3 - 3.1). Adicionalmente se puede clasificar a la arena del Jubones como una arena fina y la del Paute como gruesa, de acuerdo a (2.3 a 2.5 arena fina, 2.5 a 3.0 arena media y 3.0 a 3.1 arena gruesa). Lo que influyó directamente en la trabajabilidad del hormigón, pues hormigones elaborados con arena del río Jubones presentaron mayor trabajabilidad que los hormigones con arena del río Paute.

Tabla 4 Resultados del análisis granulométrico grava Jubones

Tamiz		Peso retenido [gr]	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
25.00 mm	1"	0.00	0.00	0.00	100.00
19.00 mm	3/4"	67.60	1.35	1.35	98.65
12.50 mm	1/2"	835.50	16.70	18.06	81.94
9.50 mm	3/8"	965.50	19.30	37.36	62.64
4.75 mm	N 4	2086.70	41.72	79.08	20.92
2.38 mm	N 8	829.30	16.58	95.66	4.34
-	Fondo	217.20	4.34	100.00	0.00
Tamaño Máximo Nominal				3/4"	

Tabla 5 Resultados del análisis granulométrico triturado Paute

Tamiz		Peso retenido [gr]	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
25.00 mm	1"	0.00	0.00	0.00	100.00
19.00 mm	3/4"	16.20	0.32	0.32	99.68
12.50 mm	1/2"	3246.70	64.93	65.25	34.75
9.50 mm	3/8"	1549.10	30.98	96.23	3.77
4.75 mm	N 4	171.30	3.43	99.66	0.34
2.38 mm	N 8	0.00	0.00	99.66	0.34
-	Fondo	17.00	0.34	100.00	0.00
Tamaño Máximo Nominal				3/4"	

De acuerdo al análisis granulométrico del agregado grueso del río Jubones y Paute (gráfica N° 2), ninguno cumple con la gradación especificada en la normativa NTE INEN 872 para agregado de tamaño máximo nominal de 3/4".

Para cumplir la especificación de gradación se optó por no utilizar estos agregados por separado, sino generar un nuevo agregado combinando la grava y el triturado en diferentes proporciones (a', b'). Para el cálculo de estos porcentajes se determinó los valores de los porcentajes pasantes de cada tamiz de la curva granulométrica de los agregados del río Paute y Jubones respectivamente (A y B) y N valor medio de los límites superior e inferior de los porcentajes pasantes de cada tamiz de la gradación establecida por la NTE INEN 872 para agregado de tamaño máximo nominal de 3/4". La ecuación 24 presenta los valores sustituidos en la ecuación (2) obtenidos del método de mínimos cuadrados descrito en el apartado 3.2.1.3.

$$\begin{bmatrix} 21158.11 & 22755.02 \\ 22755.02 & 28908.60 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 21559.53 \\ 25839.18 \end{bmatrix} \quad (24)$$

De la resolución de la ecuación (24) se determinó que el porcentaje a combinar (a', b') es de 39% y 61% para agregado grueso del río Paute y Jubones respectivamente.

En la Tabla 6 y figura N° 4, se presentan los resultados del análisis granulométrico del agregado grueso combinado, en donde se observa una curva granulométrica continua que cumple con la gradación establecida por la norma.

Tabla 6 Resultados del análisis granulométrico árido grueso combinado

Tamiz		Peso retenido [gr]	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
25.00 mm	1"	0.00	0.00	0.00	100.00
19.00 mm	3/4"	128.30	2.35	2.35	97.65
12.50 mm	1/2"	2096.90	38.47	40.82	59.18
9.50 mm	3/8"	1328.30	24.37	65.19	34.81
4.75 mm	N 4	1573.60	28.87	94.05	5.95
2.38 mm	N 8	297.20	5.45	99.50	0.50
-	Fondo	27.00	0.50	100.00	0.00
Tamaño Máximo Nominal				3/4"	

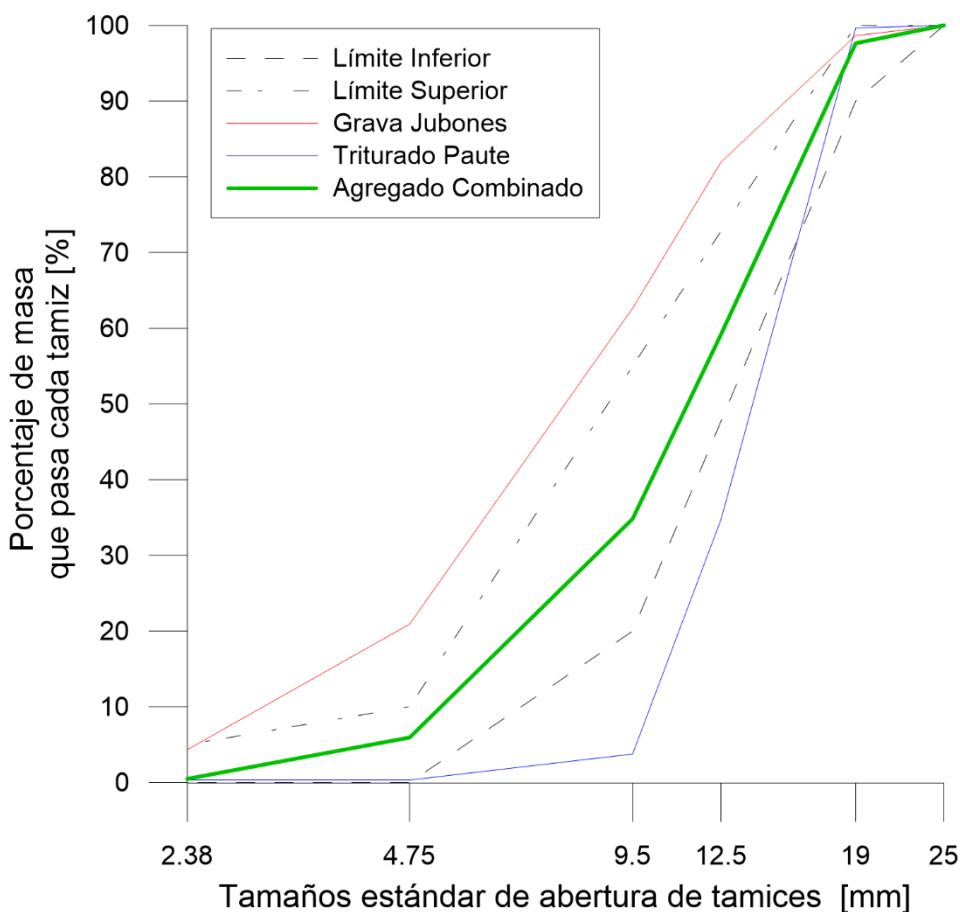


Figura 4 Curva granulométrica de agregados gruesos

4.1.2 Abrasión del árido grueso

El ensayo de abrasión se realizó para el agregado grueso combinado, obteniendo como resultado un porcentaje de pérdida de masa del 11.68%, cumpliendo con los

requerimientos de abrasión dada en la normativa, pues este valor es menor al 50% permitido.

Se comprueba que es un árido de calidad, ya que no se requirió de un incremento de agua en las mezclas de hormigón, pues el agregado grueso no presentó un aumento de finos en el proceso de almacenamiento y mezclado.

4.1.3 Gravedad específica y absorción

Tabla 7 Resumen de valores de gravedad específica y absorción

Propiedad Agregado	Gravedad Específica (SH ^γ)	Gravedad Específica (SSS [□])	Gravedad Específica Aparente (SSS [□])	Absorción
Arena Jubones	2.39	2.49	2.64	4.32
Arena Paute	2.44	2.51	2.63	3.22
Grava Jubones	2.56	2.61	2.69	1.88
Triturado Paute	2.65	2.68	2.73	1.37

^γ Seco al horno

[□] Saturado superficialmente seco

En la Tabla 7 se observa, que los valores de gravedad específica del agregado grueso y fino están dentro del rango 2.40-2.90, según Steven H. Kosmatka (2004) dentro de este rango se encuentra la mayoría de los agregados naturales, los cuales son áridos aceptables para la elaboración de hormigones.

Los valores de gravedad específica se encuentran dentro del rango de 2.50-2.75, los cuales según Quiroz Crespo & Salamanca Osuna (2006) se clasifican como agregados de densidad normal. Por otro lado, valores altos de gravedad específica indica que el material utilizado es poco poroso.

Según Waddell & Dobrowolski (1997) los valores de absorción deben ser menores al 5% y 3% para agregado fino y grueso respectivamente, de acuerdo a los valores de absorción obtenidos (Tabla 7), los agregados empleados están dentro de lo especificado, por lo que se los calificó como agregados de buena calidad.

4.1.4 Peso unitario

Del proceso especificado en el subcapítulo 3.2.1.8 de esta investigación, se encontró los siguientes resultados de peso unitario compactado para cada agregado y su respectivo valor de porcentaje de vacíos.

Tabla 8 Valores de pesos unitarios

Propiedad Agregado	Peso Unitario [Kg/m ³]	% de Vacíos
Arena Jubones	1514.41	37.86
Arena Paute	1569.36	34.21
A. Grueso Combinado	1660.18	35.94

Steven H. Kosmatka (2004), indica valores de peso unitario para áridos de peso normal están entre 1200 a 1750 Kg/m³ y la cantidad de vacíos varían cerca del rango 30% a 45% y cerca del 40% a 50% para agregado grueso y fino respectivamente. En función a la Tabla 8, se verifica los valores de los áridos obtenidos tanto peso unitario como porcentaje de vacíos se encuentran dentro de los rangos propuestos anteriormente.

De igual manera se determinó la curva de peso unitario óptima, para cada una de las combinaciones de agregado (A1 y A2), obteniendo las gráficas N° 3 y N° 4 de donde se obtuvieron las relaciones A_{fP}/A_{gP} con las que se realizó los diseños de mezclas. A partir de un análisis gráfico de las curvas, se observa que la relación A_{fP}/A_{gP} de 0.60 está asociada con el máximo valor de peso unitario para A1 y A2, escogiendo esta relación como la óptima.

Con el objetivo de obtener la afectación de este factor tanto en el módulo de elasticidad como en la resistencia a compresión se estableció relaciones A_{fP}/A_{gP} de 0.45 y 0.80 en base al análisis gráfico de las curvas de peso unitario óptimo y la elaboración de hormigones de prueba.

Tabla 9 Resumen de resultados de peso unitario óptimo de A1

Porcentaje [%]		Relación Af _P /Ag _P	Peso Arena	Peso Grava	Peso Triturado	PU
% Ag	% Af	[-]	[gr]	[gr]	[gr]	[kg/m ³]
75	25	0.333	5075.00	9287.25	5937.75	1808.61
70	30	0.429	6090.00	8668.10	5541.90	1814.82
67	33	0.493	6699.00	8296.61	5304.39	1850.74
63	37	0.587	7511.00	7801.29	4987.71	1897.09
60	40	0.667	8120.00	7429.80	4750.20	1897.39
55	45	0.818	9135.00	6810.65	4354.35	1855.91
50	50	1.000	10150.00	6191.50	3958.50	1839.91

A1=Combinación de Ag. grueso combinado con Arena de Paute

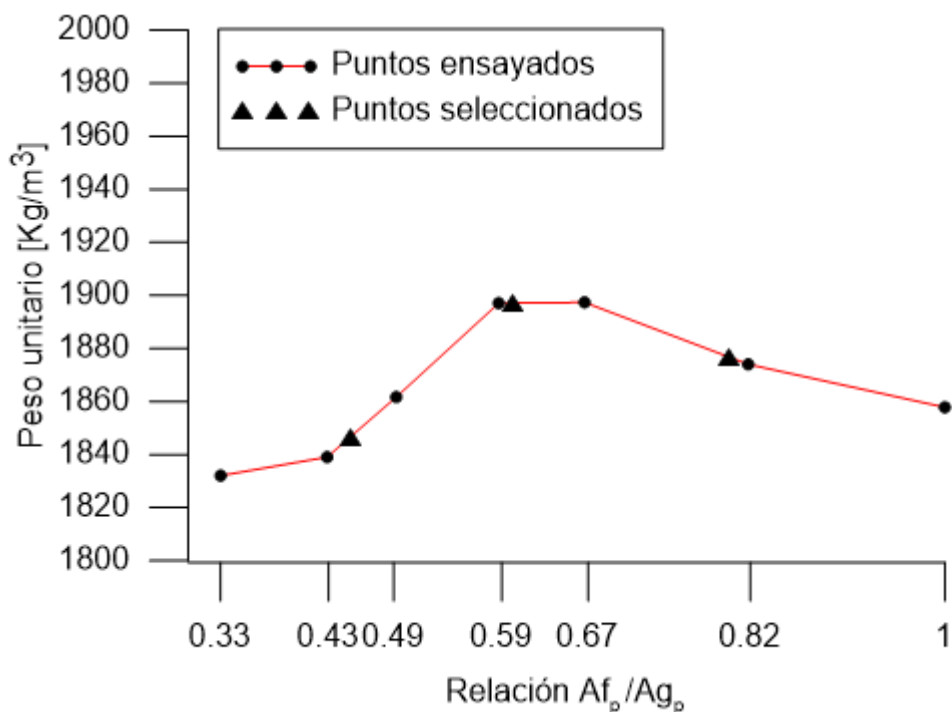


Figura 5 Curva de Peso unitario óptimo del agregado A1

Tabla 10 Resumen de resultados de peso unitario óptimo de A2

Porcentaje [%]		Relación	Peso	Peso	Peso	PU
% Ag	% Af	Af _p /Ag _p	Arena	Grava	Triturado	
		[-]	[gr]	[gr]	[gr]	[kg/m ³]
81	19	0.233	3535.00	9241.50	5908.50	1862.49
77	23	0.300	4242.00	8625.40	5514.60	1883.72
74	26	0.345	4666.20	8255.74	5278.26	1896.50
68	32	0.467	5656.00	7393.20	4726.80	1922.95
64	36	0.573	6363.00	6777.10	4332.90	1928.27
55	45	0.818	9090.00	6777.10	4332.90	1926.25
50	50	1.000	10100.00	6161.00	3939.00	1913.53

A2=Combinación de Ag. grueso combinado con Arena de Jubones

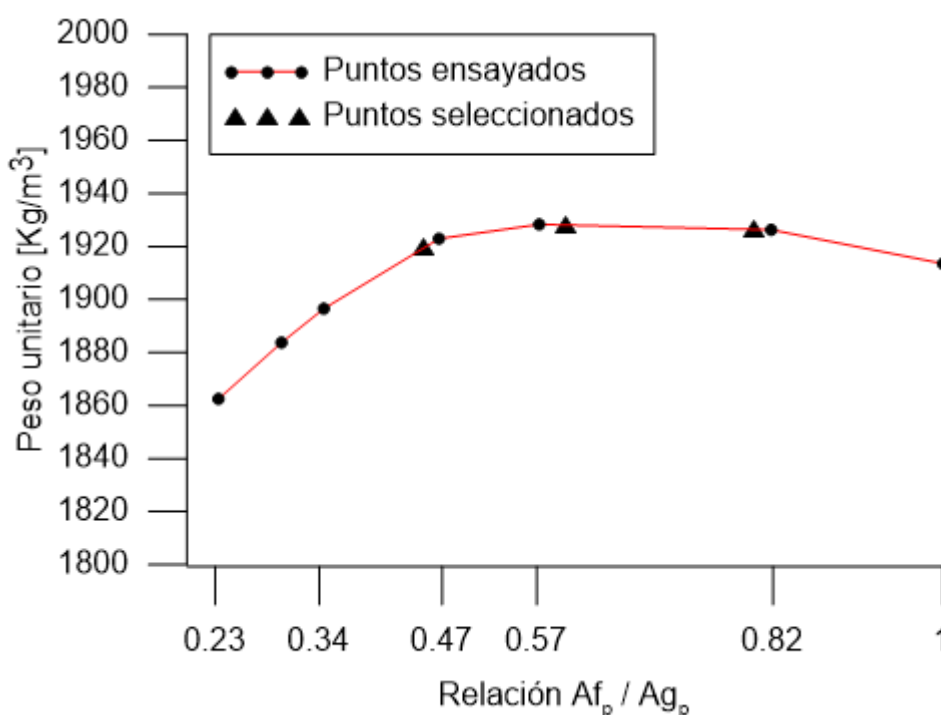


Figura 6 Curva de peso unitario óptimo del agregado A1

4.1.5 Forma y textura

La norma NTE INEN 872 establece los requisitos de agregados para el hormigón, en esta sección la tabla N° 6 (Anexo 35) muestra la clasificación de los agregados de acuerdo a la forma de las partículas. Utilizando esta tabla se clasificó al agregado grueso del río Jubones (grava) y del río Paute (triturado) como redondeado y angular respectivamente.

Por otro lado, los agregados finos de los ríos Paute y Jubones fueron clasificadas como redondeados por ser obtenidas de afluentes.

De la tabla N° 7 (Anexo 36) de la norma NTE INEN 872, califica al agregado grueso del río Jubones y Paute de textura superficial cristalina.

4.2 Hormigón en fresco

4.2.1 Dosificación de mezclas

Se diseñaron doce tipos de hormigones distintos haciendo variar el tipo de agregado (A1, A2), la relación agua-cemento (0.50, 0.60) y la relación agregado fino-agregado grueso A_{fP}/A_{gP} (0.45, 0.60, 0.80).

Mediante el proceso descrito en el subcapítulo 3.2.2.1 de este trabajo, se presenta la Tabla 11 que contiene las dosificaciones de mezcla para elaborar un metro cúbico de hormigón, el diseño se encuentra en condición seca de los materiales.

Tabla 11 Dosificaciones en peso para un m³ de hormigón

Dosificación	Tipo Agregado	A/C	A_{fP}/A_{gP}	Cemento [Kg/m ³]	Agua [Kg/m ³]	Grava [Kg/m ³]	Triturado [Kg/m ³]	Arena [Kg/m ³]	Aditivo [Kg/m ³]
D1	A1	0.50	0.45	327	164	766	490	565	2.94
D2	A1	0.50	0.60	327	164	691	442	680	2.94
D3	A1	0.50	0.80	327	164	612	391	802	2.94
D4	A1	0.60	0.45	327	196	731	467	539	-
D5	A1	0.60	0.60	327	196	660	422	649	-
D6	A1	0.60	0.80	327	196	584	373	766	-
D7	A2	0.50	0.45	327	164	761	486	561	2.94
D8	A2	0.50	0.60	327	164	686	438	674	2.94
D9	A2	0.50	0.80	327	164	606	387	795	2.94
D10	A2	0.60	0.45	327	196	726	464	535	-
D11	A2	0.60	0.60	327	196	654	418	643	-
D12	A2	0.60	0.80	327	196	578	370	758	-

4.2.2 Revenimiento

En la Tabla 12 se observa que revenimientos de hormigones con agregado tipo A1 son menores comparados a los de agregado tipo A2, esto es debido a que la arena de A1 es más gruesa, comparada con A2, por lo que en el proceso de moldeo se verificó cierta dificultad en el terminado.

Por otro lado de acuerdo a la Tabla N° 37 (Anexo 3) tomada de Jimenez Montoya, García Meseguer, & Morán Cabre (2000), se muestra rangos de valores de revenimientos para calificarlo por la consistencia, teniendo consistencias secas para los revenimientos entre 0 a 2 cm, consistencias plásticas para revenimientos entre 3 a 5 cm, consistencia blanda entre 6 a 9 cm y consistencias fluida entre 10 a 15 cm.

Tabla 12 Resultados de revenimientos

A/C	Agregado	Af _P /Ag _P		
		0.45	0.60	0.80
0.6	A1	3.00	5.00	6.00
	A2	7.00	13.00	11.50
0.5	A1	1.50	3.00	3.00
	A2	7.00	7.00	4.00

4.2.3 Peso unitario del hormigón en fresco

Los pesos unitarios en fresco de las dosificaciones elaboradas se muestran en la Tabla 13, el hormigón convencional tiene un peso específico que varía entre 2200 a 2400 Kg/m³ (Steven H. Kosmatka, 2004), los valores distintos de peso unitario de hormigón se debe a que existe una variación de la cantidad y densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado y las cantidades de agua y cemento.

Tabla 13 Peso unitario de hormigón en fresco [Kg/m³]

A/C	Agregado	Af _P /Ag _P		
		0.45	0.60	0.80
0.6	A1	2352.06	2355.76	2344.87
	A2	2371.37	2353.47	2328.67
0.5	A1	2373.73	2375.46	2362.31
	A2	2381.70	2370.69	2342.81

4.3 Hormigón endurecido

En el presente subcapítulo se muestran los resultados obtenidos de acuerdo a la metodología de cada ensayo. El análisis de los mismos se realiza en el Capítulo 5, en donde estos resultados serán discutidos de manera más rigurosa con un análisis

estadístico, por lo que algunos comentarios que se dan en este capítulo son observacionales.

4.3.1 Resistencia a la compresión

La Tabla 14 muestra los resultados de resistencia a compresión realizado a dos probetas de hormigón de cada tipo de diseño propuesto y el promedio resultante. Se observa que para los diseños de relación a/c de 0.60 tanto con agregado tipo A1 y A2 se obtienen resistencias en el rango de 25 MPa, por otro lado, para relaciones 0.50 con los dos tipos de agregados se obtuvieron resistencias en el rango de 37 MPa.

Tabla 14 Resistencia a la compresión de los hormigones diseñados

Dosificación	f'c2 [MPa]	f'c2 [MPa]	f'c prom [MPa]
D1	26.02	25.64	25.83
D2	26.26	27.27	26.76
D3	27.38	27.41	27.40
D4	37.28	37.66	37.47
D5	34.21	35.03	34.62
D6	37.38	37.99	37.69
D7	24.98	22.52	23.75
D8	23.71	23.94	23.83
D9	24.64	25.47	25.05
D10	38.17	38.90	38.53
D11	36.20	37.02	36.61
D12	37.79	38.18	37.99

4.3.2 Módulo de Elasticidad ASTM C-469

En la tabla 15 se muestran valores de módulo de elasticidad promedios obtenidos al ensayar 4 especímenes de cada diseño con dos ciclos de carga y el promedio final de módulo de elasticidad por diseño.

Se observa que valores de relaciones agua-cemento de 0.50 poseen módulos de elasticidad mayores.

Tabla 15 Módulo de elasticidad realizados a 4 especímenes de cada diseño por método ASTM C469

Dosificación	Ec Exp [Mpa]				Promedio
	1	2	3	4	
D1	19975	21893	21994	23009	21718
D2	23147	25037	24154	22653	23748
D3	23858	24036	24232	23872	23999
D4	27122	26915	27995	26787	27205
D5	25937	27234	26369	27178	26680
D6	24459	25844	25214	25546	25266
D7	24636	25291	25116	24358	24850
D8	24744	22396	24489	23834	23866
D9	22090	23881	22793	21834	22649
D10	26916	28340	27368	27871	27624
D11	27200	27030	27855	24651	26684
D12	26061	25915	24792	26401	25792

En base al apartado 9 de la norma ASTM C-469, se determinó la precisión que existe entre los módulos de elasticidad experimentales de cada dosificación, decir que la variación del módulo de elasticidad de cada probeta debe exceder en 4.50% como máximo con respecto al módulo de elasticidad promedio de las 4 probetas.

En el Anexo 4, se observa que el espécimen 2 de (A2-0.60-0.60) y que el espécimen 4 de (A2-0.60-0.50), no cumplen con el límite de precisión especificado por la norma, por lo que estos valores fueron reemplazados por la media de los otros tres restantes.

El Anexo 5 se muestran el procesamiento de los módulos elasticidad y características de cada testigo ensayado.

4.3.3 Módulo de Elasticidad Ultrasonido

En el Anexo 4 se observa las velocidades obtenidas de cada una de los especímenes ensayados con el equipo de ultrasonido, las velocidades han sido procesadas de acuerdo con las ecuaciones 22 y 23 del apartado 3.2.2.8 para la obtención de módulos de elasticidad dinámicos y estáticos.

La tabla 16 se muestra valores de módulo de elasticidad estáticos obtenidos de ensayar 6 especímenes de cada dosificación con el método de ultrasonido descrito

en el punto (3.2.2.8), y el promedio final por diseño. Se observa que valores de relaciones a-c de 0.50 poseen módulos de elasticidad mayores, pero existen ciertos casos donde no ocurre lo mismo, por lo que a los resultados se realizó un análisis estadístico que permita ver de manera más clara la tendencia de los resultados.

Tabla 16 Módulo de elasticidad realizados a 6 especímenes de cada diseño por método ultrasonido

Dosificación	Ec Exp [Mpa]						Promedio
	1	2	3	4	5	6	
D1	25415	26578	27093	26955	39701	26084	28638
D2	26169	26467	25751	25052	26213	24860	25752
D3	24314	25585	23138	20131	22135	22590	22982
D4	27461	29396	27981	25679	27823	28031	27729
D5	28679	27791	28604	28712	26997	28507	28215
D6	25901	27875	25654	27240	24657	26825	26359
D7	22707	22746	24176	25917	26021	27205	24795
D8	23622	23059	24174	22744	24770	23260	23605
D9	19690	22068	21841	22848	20233	20894	21262
D10	27997	28976	29552	29371	29615	26542	28676
D11	26804	27777	27033	26312	33390	26815	28022
D12	24818	23800	27892	29271	21989	21317	24848

4.3.4 Análisis comparativo de resultados de módulo de elasticidad con ecuación NEC-15 (ACI-318)

Steven H. Kosmatka (2004) , indica que en hormigones de peso normal, el módulo de elasticidad varía entre 14000 a 41000 MPa, los resultados obtenidos tanto del ensayo de la ASTM C469 y ultrasonido se encuentran dentro del rango, .

El código ACI 318 establece que “los valores medidos del módulo de elasticidad pueden variar entre el 80% y 120%”. En la figura 7 se observa que los módulos de elasticidad promedio de las 12 dosificaciones se encuentran dentro del rango establecido.

En la Figura 7, se observa que las dosificaciones D1, D7 y D4, D10, tienen el módulo de elasticidad medio más alto, que corresponden a la relación agregado fino-agregado grueso de 0.45 y la relaciones agua-cemento de 0.50 y 0.60 respectivamente. Para las dosificaciones D2, D9, y D6, D12 los valores del módulo

de elasticidad medio resultaron los más bajos, que corresponden a relación agregado fino-agregado grueso de 0.80 y relaciones agua-cemento de 0.50 y 0.60 respectivamente. Las dosificaciones D2, D8 y D5, D11 con la relación agregado fino-agregado grueso de 0.60 y relaciones agua-cemento de 0.50 y 0.60, presentan módulos de elasticidad dentro del intervalo máximos y mínimos establecido por las dosificaciones anteriormente especificadas.

En los ensayos realizados con los métodos ASTM C-469 y Ultrasonido, en la Figura 7, los resultados indican una disminución del módulo de elasticidad conforme va aumentando la relación agregado fino-agregado grueso de 0.45 a 0.80 para las relaciones agua-cemento de 0.50 y 0.60 respectivamente.

4.3.4.1 Análisis del error relativo entre módulos de elasticidad con el método ASTM C-469 y ecuación ACI-318-14S

La tabla 17, indica el error entre los valores medios de módulo de elasticidad obtenidos con el método ASTM C-469 y ecuación ACI-318-14S, estos errores varían en un rango de -7.39% a 4.65% para la relación agua-cemento de 0.60, mientras que para diseños con relaciones agua-cemento de 0.50, el error máximo varia hasta un 14.49% con respecto a la fórmula del ACI-318.

Tabla 17 Análisis error relativo de módulos de elasticidad con el método ASTM C-469 con respecto al ecuación ACI-318-14S

Diseño	f'c [MPa]	Ec. ASTM C-469	Ec. ACI 318	a/c	Tipo	AfP/AgP	Error
D1	25.83	23885.07	24204.61	0.60	A1	0.45	-1.32%
D2	26.76	24311.37	24206.04			0.60	0.44%
D3	27.40	24600.9	23937.52			0.80	2.77%
D7	23.75	22904.89	24733.6		A2	0.45	-7.39%
D8	23.83	22942.54	23774.82			0.60	-3.50%
D9	25.05	23524.55	22478.69			0.80	4.65%
D4	37.47	28769.93	27161.99	0.50	A1	0.45	5.92%
D5	34.62	27655.68	26689.31			0.60	3.62%
D6	37.69	28852.62	25201.99			0.80	14.49%
D10	38.53	29175.1	27473.08		A2	0.45	6.20%
D11	36.61	28438.43	26638.13			0.60	6.76%
D12	37.99	28967.77	25714.96			0.80	12.65%

4.3.4.2 Análisis del error relativo entre módulos de elasticidad con el método ASTM C-469 y ultrasonido

La tabla 18, muestra los resultados de los diferentes diseños de mezclas realizados con los métodos ASTM C-469 y Ultrasonido, donde se observa que los errores varían en un rango entre -5.41% a 9.17% para la relación agua-cemento de 0.60. Para los diseños con relación agua-cemento 0.50, los errores varían en el intervalo de -3.37% a 4.49%, resultando un rango más corto para resistencias a compresión simple más altas.

Tabla 18 Análisis error relativo de módulos de elasticidad con el método ASTM C-469 con respecto al método ultrasonido

Diseño	f'c [MPa]	Ec. ASTM C-469	Ec. Ultrasonido	a/c	Tipo	Af _P /Ag _P	Error
D1	25.83	24204.61	26424.96	0.60	A1	0.45	9.17%
D2	26.76	24206.04	25751.78			0.60	6.39%
D3	27.40	23937.52	22982.20			0.80	-3.99%
D7	23.75	24733.60	24795.22		A2	0.45	0.25%
D8	23.83	23774.82	23604.78			0.60	-0.72%
D9	25.05	22478.69	21262.35			0.80	-5.41%
D4	37.47	27161.99	27728.60	0.50	A1	0.45	2.09%
D5	34.62	26689.31	28214.71			0.60	5.72%
D6	37.69	25201.99	26358.51			0.80	4.59%
D10	38.53	27473.08	28675.62		A2	0.45	4.38%
D11	36.61	26638.13	26948.05			0.60	1.16%
D12	37.99	25714.96	24847.80			0.80	-3.37%

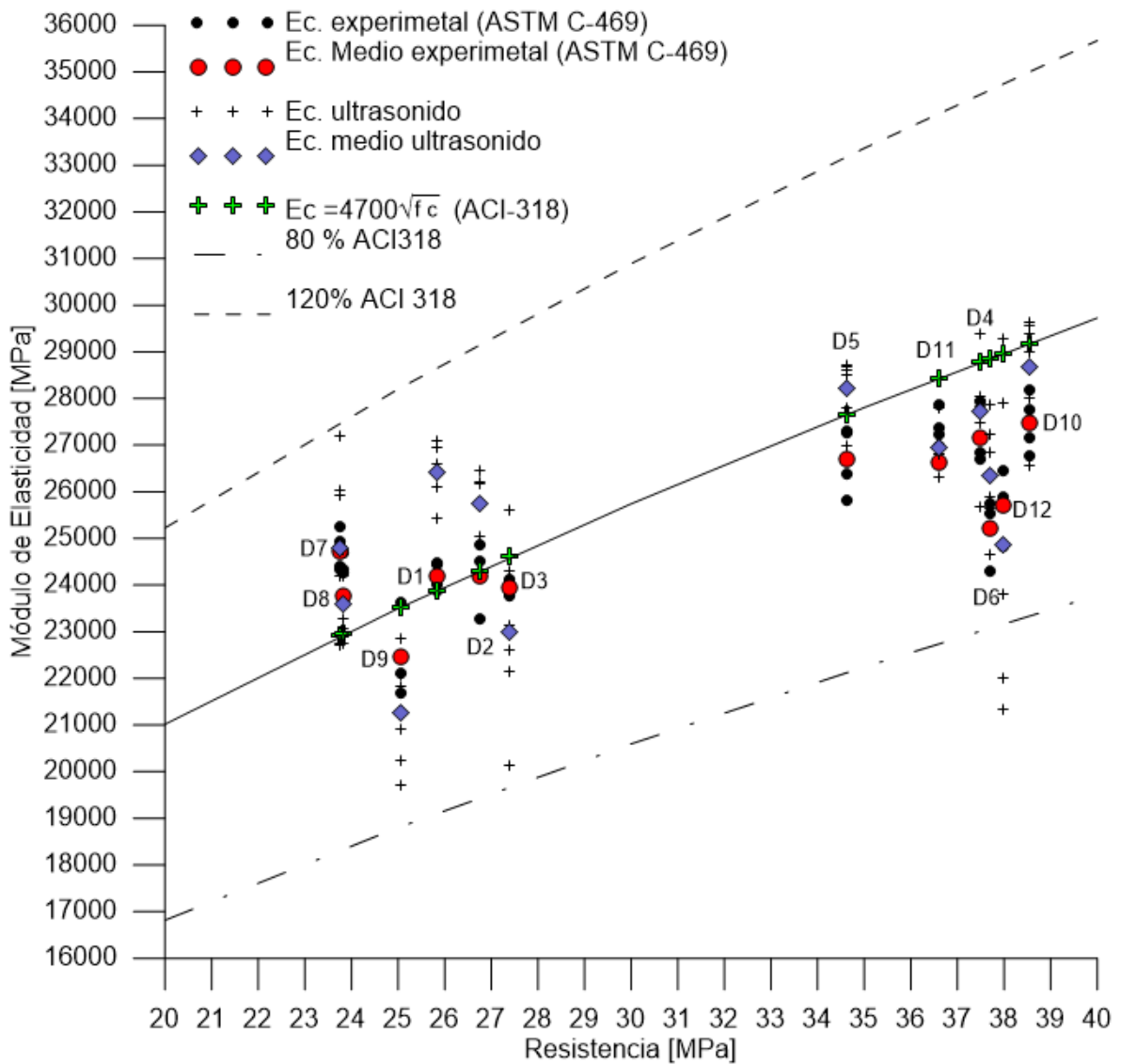


Figura 7 Comparación de resultados de módulo de elasticidad con método ASTM C-469 y ultrasonido con ecuación NEC-15

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS ESTADÍSTICO

5.1.1.1 Análisis del módulo de elasticidad con el método ASTM C-469

A continuación, se presenta el número de observaciones según el factor:

Tabla 19 Número de observaciones según el factor en la prueba de elasticidad con el método ASTM C-469

Factores inter-sujetos		Etiqueta de valor	N
Tipo de Agregado	1	A1	24
	2	A2	24
Relación Af _P /Ag _P	1	0.45	16
	2	0.60	16
	3	0.80	16
Relación a/c	1	0.50	24
	2	0.60	24

La muestra constó de 48 observaciones, 24 para cada tipo de agregado, 16 para cada tipo de relación agregado fino-agregado grueso y 24 al desagregar en los dos niveles de la relación agua-cemento. Dado que uno de los factores se presenta en tres niveles (relación agregado fino-agregado grueso), el método permite evaluar la igualdad de varianzas según la prueba de Levene, la cual se presenta a continuación:

Tabla 20 Prueba de igualdad de Levene de varianzas de error para prueba de elasticidad con el método de la ASTM C-469

F	df1	df2	Sig.
2.002	5	42	0.098

De acuerdo con la prueba de Levene, se acepta la hipótesis de igualdad de varianza en el experimento, ya que el p-valor es de 0.098, mayor que 0.05; por lo cual, no se rechaza la hipótesis nula de igualdad de varianzas. A continuación, se analiza la significancia de los factores en el diseño experimental:

Tabla 21 Pruebas de efectos inter-sujetos para la prueba elasticidad con el método ASTM C-469

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Grado de libertad	Media cuadrática	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado
Modelo corregido	112641167 ^a	11	10240106	31.97	2.79e-15	0.91
Intersección	30691210985	1	30691210985	95819.20	2.92e-63	1.00
Tipo de Agregado	133744	1	133744	0.42	0.522	0.01
Af _P /Ag _P	22344683	2	11172341	34.88	3.76e-9 [□]	0.66
a/c	82969504	1	82969504	259.03	5.05e-18 [□]	0.88
Error	11530921	36	320303			
Total	30815383073	48				
Total corregido	124172089	47				

a. R al cuadrado = 0.907 (R al cuadrado ajustada = 0.879)

□ Diferencia entre medias, estadísticamente significativo

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 22, la relación agua-cemento y la relación agregado fino-agregado grueso son los factores que generan diferencias estadísticamente significativas en el módulo de elasticidad, dado que los p-valores correspondientes son menores que 0.05. El análisis estadístico refleja que la relación agua-cemento es el factor que más afecta el valor del módulo de elasticidad, ya que tiene un valor de etha parcial al cuadrado del 87.8 %. La relación agregado fino-agregado grueso, aunque afecta el módulo de elasticidad, la variabilidad que se explica por este factor es de 66%, representado menor influencia en el módulo de elasticidad. Adicionalmente se determina que el tipo de agregado no produce diferencias estadísticamente significativas, debido a que el p-valor de este factor es mayor a 0.05, esto se justifica ya que según Camposano Luque (2009), el módulo de elasticidad del hormigón depende principalmente del módulo de elasticidad del agregado grueso. Debido a que el agregado grueso proveniente de las diferentes fuentes en la zona de estudio, no cumplió con los límites de gradación especificada por la norma, los componentes de los agregados de tipo A1 y A2 fueron la misma combinación de árido grueso, variando únicamente la arena en cada uno de ellos, por lo que impide establecer una opinión más clara de cómo influye este factor en el módulo de elasticidad.

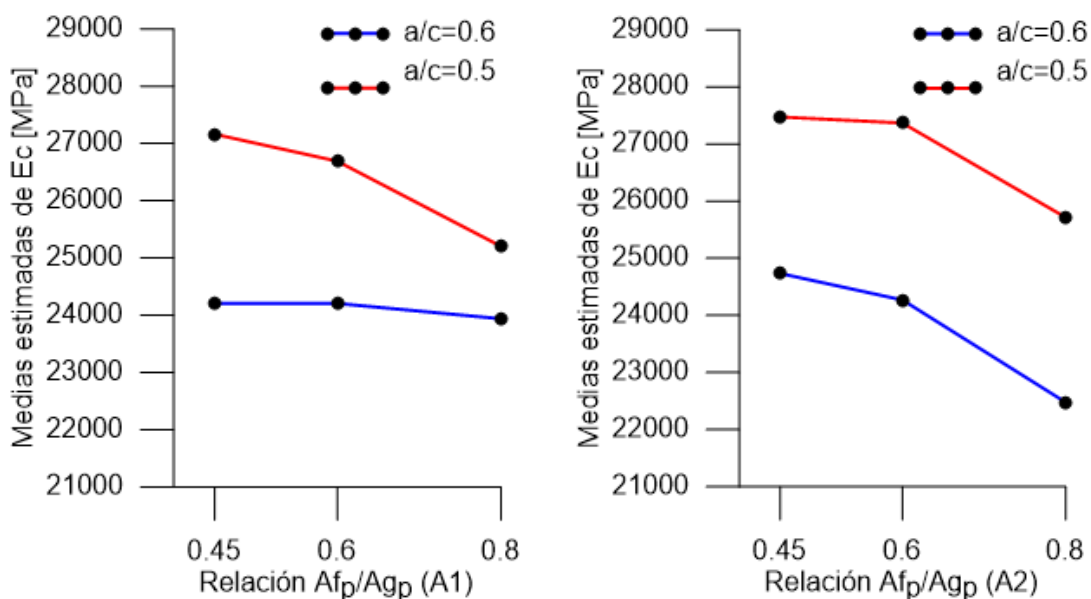


Figura 8 Medias marginales del módulo de elasticidad por relación agua-cemento según la relación agregado fino-agregado grueso y el tipo de agregado con el método ASTM C-469

En el gráfico anterior se puede observar que el nivel 0.50 de la relación agua-cemento está relacionado con niveles de elasticidad más altos que cuando se emplea el nivel 0.60 de la relación agua-cemento. También, el módulo de elasticidad disminuye en la medida en que la relación agregado fino-agregado grueso aumenta, indicando que a mayor cantidad de árido grueso mayor módulo elástico.

Tabla 22 Comparación de los niveles de la relación agregado fino-agregado grueso al aplicar el método ASTM C-469

(I) Af _P /Ag _P	(J) Af _P /Ag _P	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
0.45	0.60	260.838	200.094	0.402	-228.252	749.929
	0.80	1560.029	200.094	1.42e-8	1070.938	2049.121
0.60	0.45	-260.838	200.094	0.402	-749.929	228.252
	0.80	1299.191	200.094	4.59e-7	810.100	1788.282
0.80	0.45	-1560.029	200.094	1.42e-8	-2049.121	-1070.938
	0.60	-1299.191	200.094	4.59e-7	-1788.282	-810.100

□ Diferencia entre medias, estadísticamente significativo

Al comparar dos a dos los niveles de la relación agregado fino-agregado grueso, se puede observar que no existe diferencia significativa entre los niveles 0.45 y 0.60, por lo que se puede suponer igualdad de sus efectos sobre el módulo de elasticidad,

con un nivel de confianza del 95%. Así mismo, se demuestra que el nivel 0.80 es estadísticamente significativo y diferente respecto a los niveles 0.45 y 0.60, dado que el p-valor en cada contraste es inferior a 0.05, por lo que se establece que mezclas con mayor cantidad de arena reducen el módulo de elasticidad.

A continuación, se pueden apreciar los subconjuntos que existen entre los niveles de la relación agregado fino-agregado grueso:

Tabla 23 Subconjuntos encontrados en los niveles de la relación agregado fino-agregado grueso al aplicar el método ASTM C-469

Relación Af _F /Ag _P	N	Subconjunto	
		1	2
0.80	16	24333.290	
0.60	16		25632.481
0.45	16		25893.320
Sig.		1.000	0.402

Se aprecian dos grupos: el primero, formado por el nivel 0.80 que se relaciona con un módulo de elasticidad promedio de 24.333,290 MPa, mientras que el segundo grupo lo constituyen los niveles 0.60 y 0.45, que generan en promedio un módulo de elasticidad de 25.632,481 y 25.893,320 MPa.

Tabla 24 Comparación de los niveles de la relación agua-cemento al aplicar el método ASTM C-469

Relación a/c	Media	Error estándar	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
0.50	26601.101	193.187	26212.236	26989.966
0.60	23907.386	193.187	23582.763	24360.493

Al comparar los dos niveles del factor relación agua-cemento, se tiene que sus intervalos de confianza no se superponen, es decir, que se comprueba la diferencia significativa entre los niveles 0.50 y 0.60. En donde, a menor relación agua-cemento se producen módulos de elasticidad más altos y viceversa.

5.1.1.2 Análisis del módulo de elasticidad con el método del ultrasonido

El estudio también consideró la realización de las mediciones mediante ultrasonido, considerado como una técnica de medición no destructiva, con la cual se puede preservar el espécimen en su estado original e incluso se puede evaluar estructuras existentes sin causarles daño. A continuación, se presenta la distribución de las 72 observaciones muestrales según los factores analizados:

Tabla 25 Número de observaciones según el factor en la prueba con el ultrasonido

Factores inter-sujetos		Etiqueta de valor	N
Tipo de Agregado	1	A1	36
	2	A2	36
Relación Af _P /Ag _P	1	0.45	24
	2	0.60	24
	3	0.80	24
Relación a/c	1	0.50	36
	2	0.60	36

De un total de 72 observaciones, se tienen 36 datos para cada tipo de agregado, 24 para cada nivel del factor relación agregado fino-agregado grueso y 36 para cada nivel de la relación agua-cemento. A continuación, se presentan las observaciones obtenidas con el equipo de ultrasonido respecto al módulo de elasticidad:

Tabla 26 Pruebas de efectos inter-sujetos para la prueba elasticidad con el método de ultrasonido

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Grado de libertad	Media cuadrática	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado
Modelo corregido	328637085.27	11	29876098.66	14.388	4.67e-13	0.725
Intersección	47307215635	1	47307215635	22783	3.92e-79	0.997
Tipo de Agregado	26842097.76	1	26842097.76	12.927	6.56e-4	0.177
Af _P /Ag _P	120037009.9	2	60018504.96	28.905	1.62e-9	0.491
a/c	161137456.8	1	161137456.8	77.603	2.07e-12	0.564
Error	124585658.4	60	2076427.64			
Total	47760438378	72				
Total corregido	453222743.7	71				

a. R al cuadrado = 0.725 (R al cuadrado ajustada = 0.675)

□ Diferencia entre medias, estadísticamente significativo

En la Tabla 27 se observa que en este método los tres factores analizados: el tipo de agregado, la relación agregado fino-agregado grueso y la relación agua-cemento, generan diferencias estadísticamente significativas para el módulo de elasticidad, presentando cada una un p-valor menor que 0.05. De igual manera que en el método ASTM C-469 la relación agua-cemento es la que más afecta al módulo de elasticidad con un valor de η^2 parcial al cuadrado de 56.4%. La relación agregado fino-agregado grueso vuelve a influenciar en menor grado en el módulo elástico. En este método se ve una pequeña influencia del tipo de agregado representando en un 17.7% la variación del valor del módulo de elasticidad, esto es debido a que el agregado grueso utilizado es el mismo en todos los diseños.

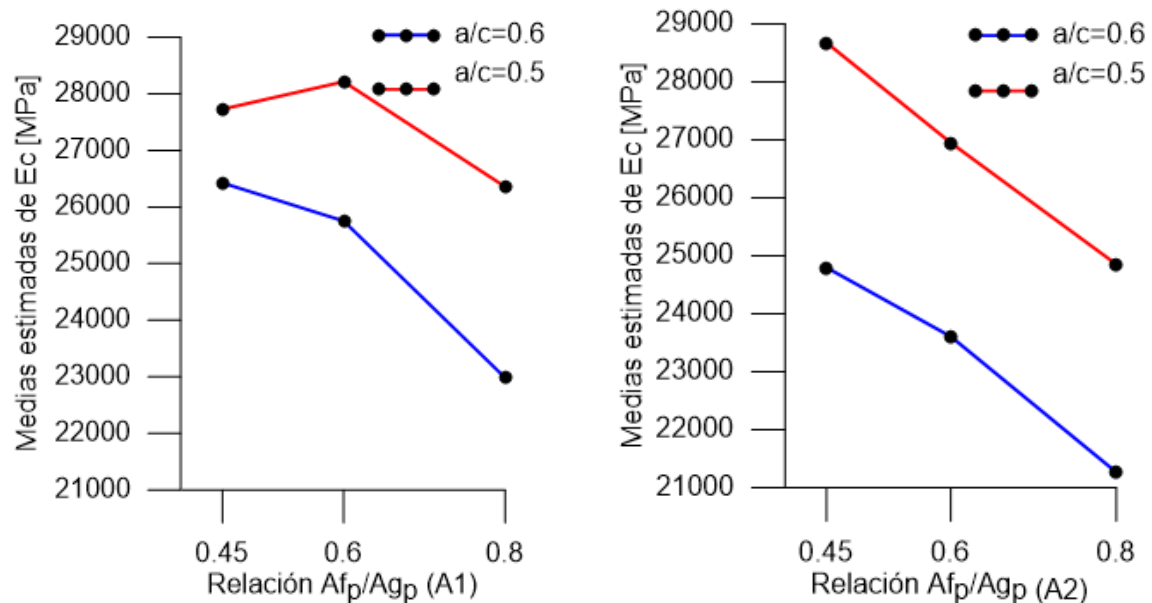


Figura 9 Medias marginales del módulo de elasticidad por relación agua-cemento según la relación agregado fino-agregado grueso y el tipo de agregado con el método de ultrasonido

En la Figura 9 se puede observar que la relación agua-cemento de 0.50 genera mayores niveles del módulo de elasticidad que cuando dicha relación es de 0.60; por otro lado, cuando la relación agregado fino-agregado grueso incrementa el módulo de elasticidad disminuye, de igual manera como ocurre en el método ASTM C-469.

Tabla 27 Comparación de los niveles del tipo de agregado al aplicar el método de ultrasonido

Tipo de Agregado	Media	Error estándar	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
A1	26243.46	333.58	25566.24	26920.68
A2	25022.30	476.56	24054.82	25989.79

Se puede apreciar que el agregado A1 ofrece un mayor módulo de elasticidad en comparación con el agregado A2; sin embargo, los intervalos de confianza para estos dos niveles se encuentran, por lo que es importante realizar el contraste de hipótesis de igualdad de manera independiente, es decir, sin considerar los otros factores.

Tabla 28 Contraste de igualdad entre los niveles del tipo de agregado al aplicar el método de ultrasonido

	Suma de cuadrados	Grados Libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	26842097.760	1	26842097.760	4.407	0.039□
Dentro de grupos	426380645.935	70	6091152.085		
Total	453222743.695	71			

□ Diferencia entre medias

Se puede concluir que, con una confianza del 95%, las medias del módulo de elasticidad según los dos niveles de agregados son diferentes, es decir, generan diferencia significativa sobre el resultado.

Tabla 29 Medidas de asociación entre el módulo de elasticidad y el tipo de agregado

	Eta	Eta cuadrada
Módulo de Elasticidad [MPa] * Tipo de Agregado	0.243	0.059

En la tabla anterior, se puede apreciar que la variabilidad del módulo de elasticidad que puede ser explicada por el tipo de agregado es muy baja, del 5.9%, por lo que

este factor no se considera importante o influyente sobre el módulo de elasticidad, esto es debido a que el agregado grueso es el mismo en los dos tipos de agregados (A1 y A2).

Tabla 30 Comparación de los niveles de la relación agregado fino-agregado grueso al aplicar el método de ultrasonido

(I) Af _P /Ag _P	(J) Af _P /Ag _P	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
0.45	0.60	776.267	415.975	0.157	-223.411	1775.946
	0.80	3043.386*	415.975	7.25e-9□	2043.707	4043.066
0.60	0.45	-776.267	415.975	0.157	-1775.946	223.411
	0.80	2267.119*	415.975	2.96e-6□	1267.440	3266.798
0.80	0.45	-3043.386*	415.975	7.25e-9□	-4043.066	-2043.707
	0.60	-2267.119*	415.975	2.96e-6□	-3266.798	-1267.440

□ Diferencia entre medias, estadísticamente significativo

Al observar el comportamiento de los tres niveles del factor relación agregado fino-agregado grueso, los niveles 0.45 y 0.60 no presentan diferencia significativa entre sí, mientras que el nivel 0.80 se puede considerar diferente a estos en cuanto al efecto que causan sobre el módulo de elasticidad, bajo un nivel de confianza del 95%, reiterando nuevamente que hormigones con mayor cantidad de arena disminuyen el módulo de elasticidad.

Tabla 31 Subconjuntos encontrados en los niveles de la relación agregado fino-agregado grueso al aplicar el método de ultrasonido

Relación Af _P /Ag _P	N	Subconjunto	
		1	2
0.80	24	23862.713	
0.60	24	26398.239	
0.45	24	27459.253	
Sig.		1.000	0.261

En la tabla 32, se pueden observar los grupos de niveles existentes en la relación agregado fino-agregado grueso; el nivel 0.80 se relaciona con un valor promedio del módulo de elasticidad de 23862.713 MPa, menor que el generado por los niveles 0.60 y 0.45, 26398.239 MPa y 27459.253 MPa, respectivamente. Sin embargo, estos dos últimos valores no son significativamente diferentes. Estos resultados corroboran el análisis anterior.

Tabla 32 Comparación de los niveles de la relación agua-cemento al aplicar el método de ultrasonido.

Relación a/c	Media	Error estándar	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
0.50	27128.884	240.164	26648.485	27609.283
0.60	24136.881	240.164	23656.482	24617.280

Se puede apreciar en la tabla anterior que la media del módulo de elasticidad es de 27128.884 MPa cuando la relación agua-cemento es de 0.50, siendo superior al módulo de elasticidad cuando la relación agua-cemento es de 0.60 (24136.881 MPa); además, los intervalos de confianza para estos niveles no se cruzan entre sí, lo que indica diferencia estadística significativa.

5.1.1.3 Análisis de resistencia a compresión

El estudio de la resistencia se hizo mediante la medición de dos (2) probetas por cada dosificación a través del método destructivo.

Tabla 33 Número de observaciones según el factor en la prueba de resistencia

	Etiqueta de valor		N
	1	2	
Tipo de Agregado	1	A1	12
	2	A2	12
Relación A_{fP}/A_{gP}	1	0.45	8
	2	0.60	8
	3	0.80	8
Relación a/c	1	0.50	12
	2	0.60	12

Respecto al tipo de agregado el estudio de la resistencia cuenta con una muestra de 12 elementos para cada nivel (A1 y A2); así mismo, hay 8 observaciones para cada nivel del factor relación agregado fino-agregado grueso y 12 para cada nivel de la relación agua-cemento.

Tabla 34 Pruebas de efectos inter-sujetos para la prueba de resistencia

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Grados Libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	836.245	4	209.061	114.889	4.94e-13
Intersección	23503.299	1	23503.299	12916.219	2.21e-28
Tipo de Agregado	2.672	1	2.672	1.468	0.240
Af/Ag	10.033	2	5.016	2.757	0.089
a/c	823.540	1	823.540	452.576	1.03e-14 <input type="checkbox"/>
Error	34.574	19	1.820		
Total	24374.117	24			
Total corregido	870.818	23			

Diferencia entre medias, estadísticamente significativo

En la Tabla 36 se observa que el factor relación agua-cemento es el que genera diferencias estadísticamente significativas en la resistencia a compresión simple del hormigón. Por otro lado, la relación agregado fino/agregado grueso y el tipo de agregado no influyen en el valor de la resistencia debido a que su p-valor es mayor a 0.05.

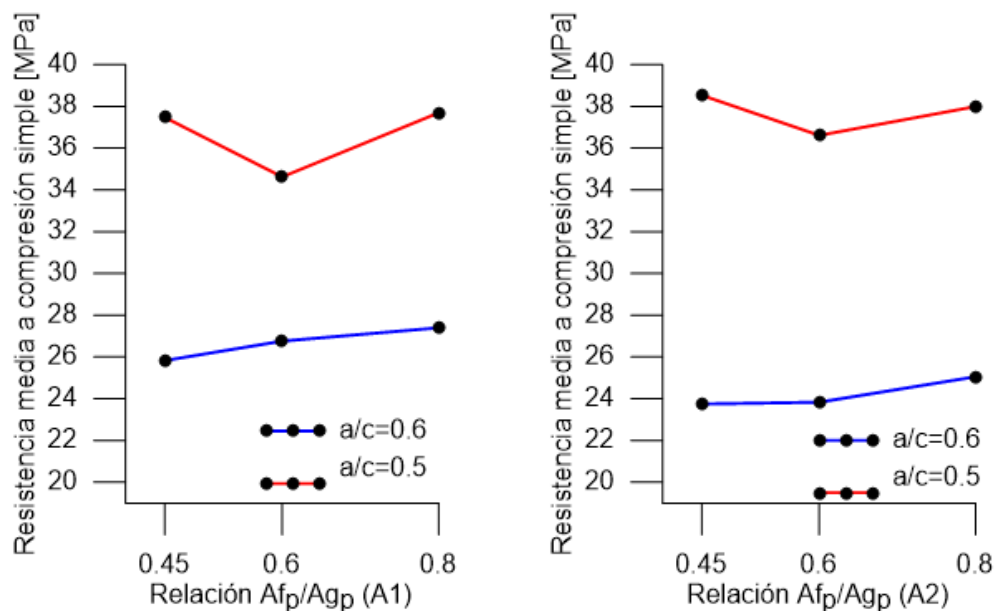


Figura 10 Medias marginales de la resistencia a compresión por relación agua-cemento según la relación agregado fino-agregado grueso y el tipo de agregado

En contra de lo esperado, la relación agregado fino-agregado grueso no presenta mayor influencia sobre la resistencia que alcanza el hormigón. Como se puede observar en la Figura 10, a pesar de que existen ciertas variaciones debidas al tipo de agregado y a la relación agregado fino-agregado grueso, su valor no refleja diferencias estadísticamente significativas, debido a la gran variabilidad que tiene el hormigón.

Tabla 35 Comparación de los niveles de la relación agua-cemento respecto a la resistencia del hormigón

Relación a/c	Media	Error estándar	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
0.50	37.15	0.191	36.735	37.568
0.60	25.44	0.191	25.020	25.852

En la tabla anterior, se puede apreciar que existe una diferencia clara entre los niveles 0.50 y 0.60 de la relación agua-cemento. La aplicación de una relación agua-cemento de 0.50 produce una resistencia promedio de 37.15 MPa; con un 95% de confianza, el valor de la resistencia debe estar entre 36.73 y 37.56 MPa.

En contraposición, cuando se usa una relación agua-cemento de 0.60, la resistencia promedio es de 25.44 MPa, casi 11 unidades por debajo del nivel 0.50; al aplicar una relación agua-cemento de 0.60, se puede esperar que el valor de la resistencia se ubique entre 25.02 y 25.85 MPa.

Tabla 36 Medidas de asociación entre resistencia y la relación agua-cemento

	Eta	Eta cuadrada
Resistencia * Relación a/c	0.972	0.946

El factor relación agua cemento explica la variabilidad de resistencia en un 94.60%.

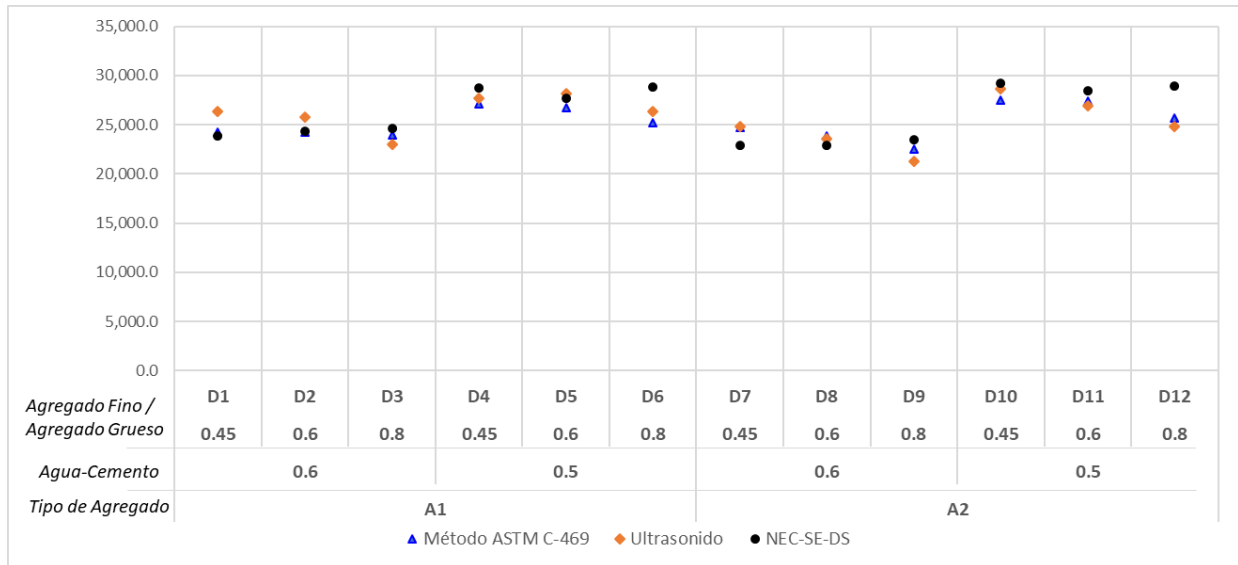


Figura 11 Módulo de elasticidad según los métodos de medición ASTM C-469, por ultrasonido y ecuación NEC-15

De acuerdo con la Figura 11 los diseños D2, D5, D8 y D11, que corresponden a la relación agregado fino-agregado grueso 0.60, son los que presentan menor variabilidad de las medias de módulo de elasticidad determinados con los diferentes métodos. Adicionalmente los diseños D3, D6, D9 y D12, presentan mayores diferencias, verificando además que para estas dosificaciones las medias del módulo de elasticidad por el método ASTM C-469 y ultrasonido son subestimados referente a los determinados con la ecuación del ACI 318.



CONCLUSIONES

Se concluye en cuanto a la caracterización de los agregados:

En base a los módulos de finura obtenidos en este estudio, la arena del río Jubones es más fina que la arena del río Paute, los dos cumplen con la gradación establecida en la NTE INEN 872, y afectan directamente en la calidad y economía de las mezclas, debido a que disminuye el requerimiento de pasta y produce un menor porcentaje de vacíos en el hormigón.

Debido a que el análisis granulométrico de los agregados gruesos de los ríos Paute y Jubones no cumple con la norma NTE INEN 872, se hizo una combinación de estos en determinado porcentaje para que cumplan con este parámetro, influyendo en el módulo elástico del hormigón.

Los agregados gruesos combinados presentaron un porcentaje de degradación del 11.8 %, que cumple con el requerimiento establecido por la norma e indica que son de calidad, ya que poseen alta resistencia al desgaste lo cual influye en su almacenamiento y mezclado.

El cambio en la relación agregado fino- agregado grueso (A_{fP}/A_{gP}), a pesar de presentar variabilidad en los valores de peso unitario del agregado combinado, no influyó en forma importante en el peso unitario del hormigón en fresco, manteniendo un rango 2300 – 2400 kg/m³ y clasificándose como hormigones de peso normal.

El revenimiento de los hormigones con la arena del río Paute, da mayor dificultad en el moldeo y encofrado del hormigón, debido a que es más gruesa que la del río Jubones.

En cuanto a los tres factores que influyen en el módulo de elasticidad del hormigón tenemos:

Los factores relación agua-cemento y agregado fino-agregado grueso (A_{fP}/A_{gP}), fueron estadísticamente significativos ($P < 0.05$) tanto en el método ASTM C496 y ultrasonido, en comparación con el tipo de agregado que no fue estadísticamente significativo.



Mediante el parámetro etha cuadrado parcial vemos que la relación agua-cemento es más influyente que la relación agregado fino-agregado grueso (A_{fP}/A_{gP}), presentando valores de 87.8% y 56.4% en los métodos de la ASTM C496 y ultrasonido respectivamente, mientras que la relación agregado fino-agregado grueso dio 66% y 49.1% con los métodos de la ASTM C-496 y ultrasonido.

En el factor relación agregado fino-agregado grueso (A_{fP}/A_{gP}), los niveles de 0.45 y 0.60 no presentan diferencias significativas, por lo que se considera que sus efectos sobre el módulo de elasticidad son iguales entre ellos, pero diferentes respecto al nivel 0.80. Indicando que hormigones con mayor contenido de arena poseen módulos de elasticidad menores.

Los errores relativos del módulo de elasticidad con la ecuación ACI 318 respecto al método ASTM C-469 varían en un rango entre -7.39% a 4.65%, para la relación agua cemento 0.60. Diseños con relaciones agua-cemento de 0.50 presentan errores que varían hasta un máximo de 14.49% con respecto a la fórmula del ACI. Validando la aplicabilidad de esta ecuación, ya que la dispersión de los errores es menor al $\pm 20\%$ establecido por el código Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318S-14.

Los errores relativos del módulo de elasticidad con el método ASTM C-469 con respecto al ultrasonido, varían en un rango -5.41% a 9.17% para la relación agua-cemento de 0.60. Para diseños con relaciones agua-cemento de 0.50 los errores varían en un intervalo de -3.37% a 4.49%. Del análisis de error relativo se observa que el error entre los dos métodos no supera el 10%, por lo que módulos de elasticidad determinados con ultrasonido se aproximan a los módulos de elasticidad experimentales, resultando la medición del módulo de elasticidad por ultrasonido eficaz.

De acuerdo a los resultados obtenidos de módulo de elasticidad con el ensayo ASTM C-469 se concluye que no es necesario establecer coeficientes de modificación de la ecuación propuesto por la NEC-SE-DS para hormigones de peso normal, con agregados que cumplan con las especificaciones presentadas en la INEN 872.



Conforme al análisis estadístico realizado, con respecto a la resistencia del hormigón a compresión simple, se concluye que el único factor que influye significativamente es la relación agua-cemento, a diferencia con la relación agregado fino-agregado grueso que no presento mayor influencia.



RECOMENDACIONES

Debido a que la variación del agregado fino no influyó en el módulo de elasticidad del hormigón, se recomienda variar únicamente el tipo de agregado grueso en las dosificaciones, para poder establecer una opinión más clara de cómo influye este factor en el módulo de elasticidad.

Se recomienda la aplicación de métodos indirectos, pues mediante estos se puede obtener información de forma rápida de las características del hormigón como el módulo de elasticidad, ya sea de especímenes elaborados o de estructuras existentes sin causarles daño.

Así mismo, en otras experimentaciones se recomienda no utilizar variaciones de la relación agregado fino-agregado grueso distinta de 0.60 o 0.45, ya que no son estadísticamente diferentes, sino más bien, dirigir la atención a las variaciones en la relación agua-cemento,

Se recomienda la inclusión de otros factores no considerados en la presente investigación, como el tipo de cemento. Cada tipo de cemento tendrá distintas características, lo que influirá en la relación agua-cemento para cada diseño.



BIBLIOGRAFÍA

- American Concrete Institute. (2001). *Guide for Use of Normal Weight and Heavyweight Aggregates in Concrete*. Michigan: Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- Akijje, I. (2016). Effects of Using 0.5, 0.55 and 0.6 Water Cement Ratio Separately With a Nigerian Grade 42.5R Portland Cemen. *International Journal of Science, Technology and Society*, 4(6), 80-88. doi:10.11648/j.ijsts.20160406.11
- Alejandro, H. (2014). *Módulo de elasticidad de hormigones de peso normal empleados en el Ecuador 21, 24, 28, 35 MPa*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.
- American Concrete Institute. (2014). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-14)*. Michigan: Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- American Concrete Institute. (2016). *Aggregates for Concrete*. Farmington Hills: Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- American Society of Testing Materials. (2016). *Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo en Laboratorio*. Filadelfia: American Society of Testing Materials.
- Bakis, A., Özdemir, M., Isik, E., & Akilli, A. (2016). The Impact of Concrete Strength on the Structure Performance under Repeated Loads. *Bitlis Eren Univ J Sci & Technol*, 6(2), 85-91.
- Camposano Luque, J. (2009). *Hormigón Armado - Hormigón Preesforzado*. Guayaquil.
- Carrasco, M. F. (2013). Unidad 3. Rocas y agregados para Hormigones. En C. María Fernanda, *Tecnología del Hormigón - Ingeniería Civil* (págs. 1-25). Santa Fé: Universidad Tecnológica Nacional.
- Carrasco, M. F. (2013). Unidad 7. Propiedades de hormigón endurecido. En M. F. Carrasco, *Tecnología del Hormigón - Ingeniería Civil* (págs. 1-25). Santa Fé: Universidad Tecnológica Nacional.
- Casali, R. A., Carava, M. A., Acevedo, C., Miño, J. C., Bizzoto, M., & Torra, R. (2007). Predicción de la Resistencia a la Compresión y Determinación de



Propiedades Estructurales a partir de Ensayos no Destructivos . *Asociación Argentina de Ensayos No Destructivos y Estructurales*.

- Diógenes, H., Cossolino, L., Pereira, A., El Debs, M., & El Debs, A. (2011). Determination of Modulus of Elasticity of Concrete from the Acoustic Response. *Revista IBRACON de Estructuras e Materiais*, 792-813.
- Dos Santos, A. C., de Arruda, A. M., da Silva, T. J., de Carvalho Palma Vitor, P., & Mouta Trautwein, L. (enero-marzo de 2017). Influence of coarse aggregate on concrete's elasticity modulus. *Acta Scientiarum Technology*, 39(1), 17-25. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/3032/303249921003.pdf>
- Gomez, E., & Gatica, M. S. (1981). Módulo de elasticidad de hormigones. *IDEM*, 24-38.
- Huo., X., Al-Omaishi, N., & Tadros, M. K. (2001). Creep, shrinkage, and modulus of elasticity of high-performance concrete. *ACI Materials Journal*, 440-449.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2007). Determinación de la masa unitaria. *Problemas, causas y soluciones. (Pruebas al concreto fresco)*, 18-21.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2011). Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio. *Concreto en la Obra*, 68.
- Jimenez Montoya, P., García Meseguer, Á., & Morán Cabre, F. (2000). *Hormigón Armado*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Madhavi, T. C., & Ram Kumar, P. K. (May de 2016). Effects of Temperature on Concrete. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(9), 5990-5992. Obtenido de http://www.arnpjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_0516_4218.pdf
- Mamlouk, M., & Zaniewski, J. (2009). *Materiales para Ingeniería Civil*. Virginia: Pearson Prentice Hall.
- National Ready Mixed Concrete Association . (2014). *Preparación de los Cilindros de Concreto en Campo*. Silver Spring: NRMCA.
- Noble, P. (1931). The effect of aggregates and other variables on the elastic properties of concrete. *Proceedings ASTM*, 399-426.
- Pauw, A. (1960). Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density. *Materials Journal*, 57, 432-442.



- Pulido Gutiérrez, H., & de la Vara Salazar, R. (2008). *Ánalisis y Diseños de experimentos*. Mexico, D.F.: McGraw-Hill.
- Quiroz Crespo, M. V., & Salamanca Osuna, L. E. (2006). *Apoyo para la enseñanza y aprendizaje en la asignatura de "Tecnología del Hormigón"*. Bolivia - Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón.
- Ruiz, D., Borrero, M., León, M., & Vacca, H. (2012). Estimación de la incertidumbre aleatoria de la distorción sísmica de entrepiso de pórticos de concreto reforzado considerando la variabilidad del módulo elástico del concreto de Bogotá. *Pontificia Universidad Javeriana.*, 95-106.
- Serrano, M., & Pérez, D. (2007). Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto. *Concreto y cemento - Investigación y desarrollo*, 17-30.
- Steven H. Kosmatka, B. K. (2004). *Diseño y Control de mezclas de concreto*. E.E.U.U: Portland Cement Association PCA.
- Waddell, J., & Dobrowolski, J. (1997). *Manual de la construcción con Concreto*. Mexico: McGraw Hill.

ANEXOS**9.1 Anexo 1****Tabla 37** Clasificación de los agregados según su forma, INEN 872 (Tabla 6)

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
Redondeada	Formadas completamente por desgaste	Gravas de río, mar, desierto, arenas de mar o transportadas por el viento
Irregular o parcialmente redondeada	Formadas parcialmente por desgaste, tienen algunos bordes redondeados. Irregulares por naturaleza.	Grava y arenas de canteras tierra y pedernal de pozos excavados.
Angular	Poseen bordes bien definidos, formados en la intersección de caras planas ásperas	Rocas trituradas de todos los tipos, pedregullo.
Laminar	Partículas en las cuales el espesor es relativamente pequeño comparado con el ancho y/o longitud.	Rocas laminadas.
Alargada	Partículas usualmente angulares en las cuales la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones.	
Laminar y alargada	Partículas que tienen la longitud considerablemente mayor que el ancho, y	

	éste considerablemente mayor que el espesor.	
--	--	--

9.2 Anexo 2

Tabla 38 Clasificación de los agregados según su textura, INEN 872 (Tabla 7)

GRUPO	TEXTURA SUPERFICIAL	CARACTERISTICAS	EJEMPLO
1	Vítrea	Fractura concoidea	Pedernal negro
2	Suave	Lisura, debida a la fractura de rocas laminares o de grano fino.	Horsteno, pizarra, mármol, alguna riolita.
3	Granular	Fractura que presenta granos redondeados más o menos uniformes.	Arenisca, oolitas
4	Cristalina	Contiene constituyentes cristalinos fácilmente visibles.	<p>Fina: basalto, traquita, queratófiro.</p> <p>Media: dolerita, granofiro, granulita, microgranito, algunas calizas, muchas dolomitas.</p> <p>Gruesa: gabro, gneis, granito, granodiorita, sienita</p>



5	Panaloide y porosa	Con poros y cavidades visibles.	Escoria, piedra pómes, trass.
---	--------------------	---------------------------------	-------------------------------

9.3 Anexo 3

Tabla 39 Rangos de revenimientos y consistencia, Jimenez Montoya, García Meseguer, & Morán Cabre (2000), (Tabla 3.6)

Consistencias	Asiento en cono de Abrams [cm]
Seca	0 a 2
Plástica	3 a 5
Blanda	6 a 9
Fluida	10 a 15
Líquida	≥16

9.4 Anexo 4


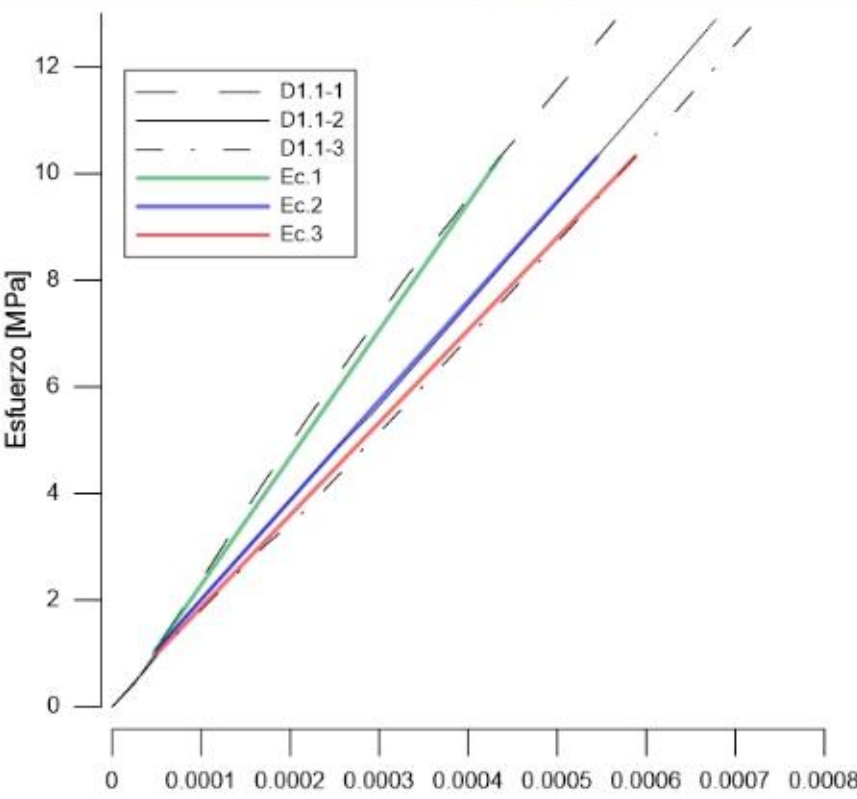
Tabla 40 Resumen de Ec obtenidos del ensayo ASTM C469


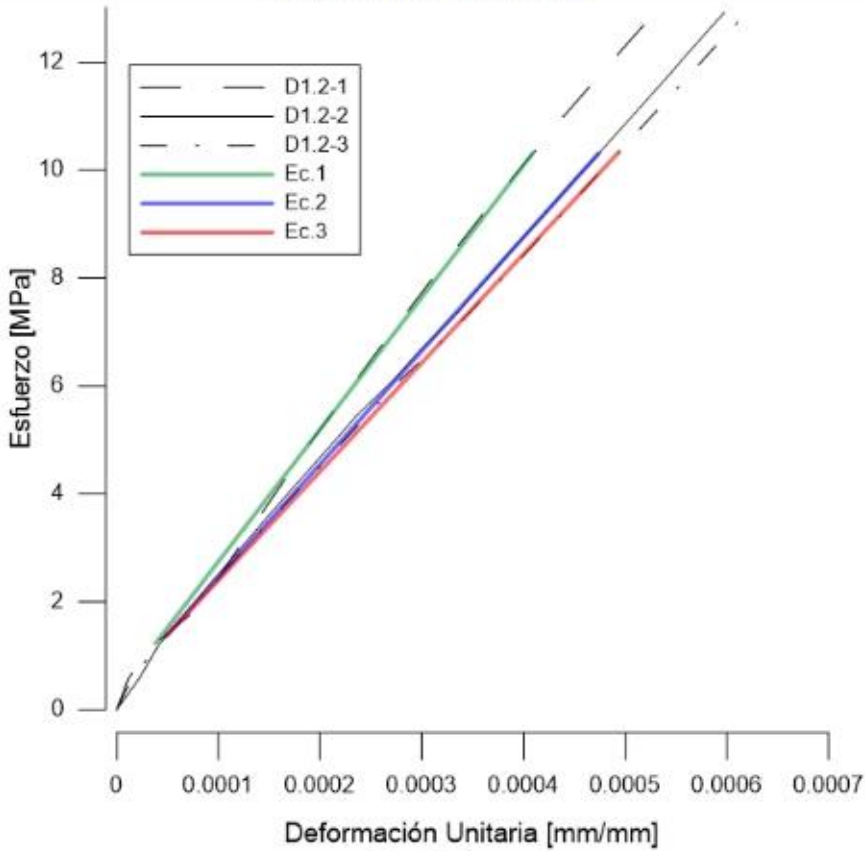
Tipo	Af _p /Ag _p	a/c	Ec				Ec Promedio	Ec Promedio*4.5%	Precisión
			Esp. 3	Esp. 4	Esp. 5	Esp. 6			
A1	0.45	0.6	23770.59	24430.26	24505.18	24396.36	24204.61	1089.21	320.30
			23564.03	24762.40	24204.61	23802.31			-278.89
			24204.61	24204.62	24648.32	24246.02			-221.85
PROMEDIO			23884.32	24483.51	24426.47	24024.17		180.45	
A1	0.60	0.6	24126.98	25376.25	24059.17	21089.96	24206.04	1089.27	-292.78
			24276.98	25005.16	24203.04	21254.96			-661.98
			24720.68	24730.89	24200.56	25256.08			4.24
PROMEDIO			24498.83	24868.03	24201.80	23255.52		950.52	
A1	0.80	0.6	24067.25	23869.18	24579.80	23975.56	23937.52	1077.19	184.55
			23916.92	24239.96	24189.38	23933.48			-181.62
			23589.03	23998.33	23927.10	23705.99			-120.72
			23752.97	24119.14	24058.24	23819.74		117.79	
A1	0.45	0.5	27069.26	27044.25	28108.46	26937.17	27161.99	1222.29	13.74
			27313.23	27011.11	28155.93	26780.77			312.23
			26983.27	26688.42	27719.86	26643.35			-775.90
0.5			27148.25	26849.76	27937.89	26712.06		449.93	
A1	0.60	0.5	26170.97	27198.61	26319.59	26951.89	26689.31	1201.02	869.19
			25617.92	27479.14	26469.02	27483.84			-562.51
			26022.31	27024.50	26319.42	27098.33			295.09
PROMEDIO			25820.11	27251.82	26394.22	27291.08		-601.77	
A1	0.80	0.5	24777.23	26004.95	25224.37	25569.93	25201.99	1134.09	901.96
			24538.65	25923.56	25304.82	25713.51			-562.18
			24061.42	25604.77	25113.75	25355.45			-7.29
PROMEDIO			24300.03	25764.17	25209.28	25534.48		-332.49	
A2	0.45	0.6	25256.30	25342.04	25455.70	24281.92	24733.60	24869.44	407.53
			24370.26	25361.42	25276.45	24666.94			-532.30
			24281.88	25170.39	24614.95	24126.51			-212.10
0.6			24326.07	25265.90	24945.70	24396.73		336.87	
A2	0.60	0.6	24872.26	22604.52	24778.13	23883.19	23774.82	1069.87	-905.00
			24653.13	22792.95	24607.53	23783.86			1483.44
			24706.52	21789.82	24080.93				-569.41
PROMEDIO			24679.82	22291.38	24344.23	23783.86		-9.03	
A2	0.80	0.6	22054.23	24405.86	23377.32	22124.63	22478.69	1011.54	371.44
			22239.49	23733.25	22514.13	21798.36			-1140.56
			21975.00	23505.24	22486.07	21577.93			-21.41
PROMEDIO			22107.25	23619.25	22500.10	21688.15		790.54	
A2	0.45	0.5	27233.55	28637.51	27756.64	28074.32	27473.08	1236.29	715.83
			26820.05	28202.98	27336.64	27931.32			-718.28


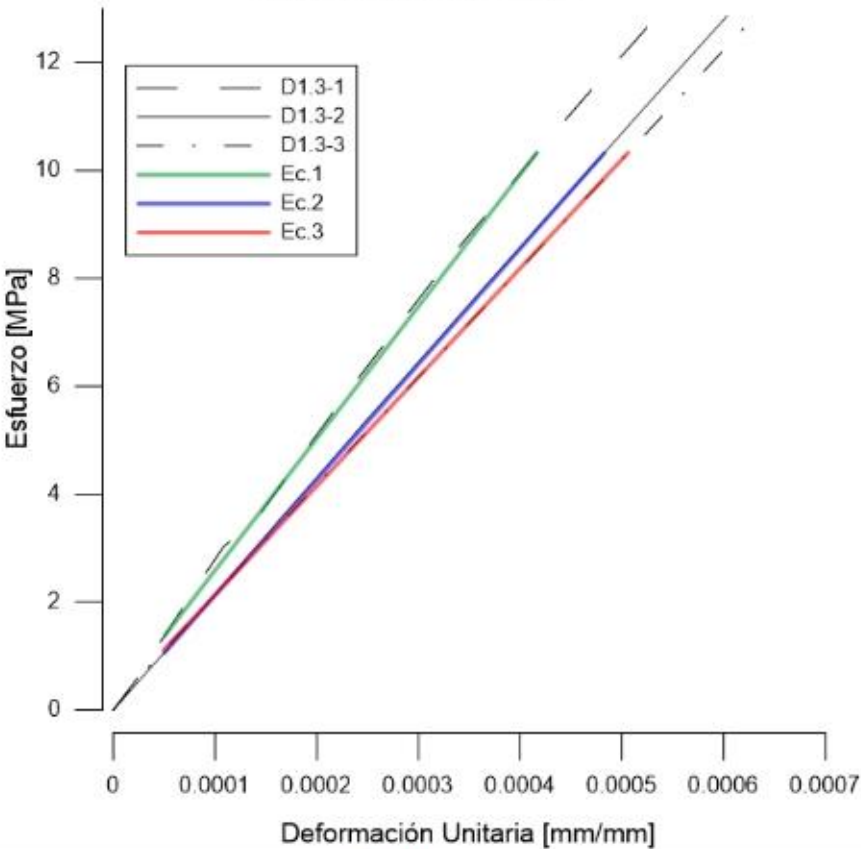



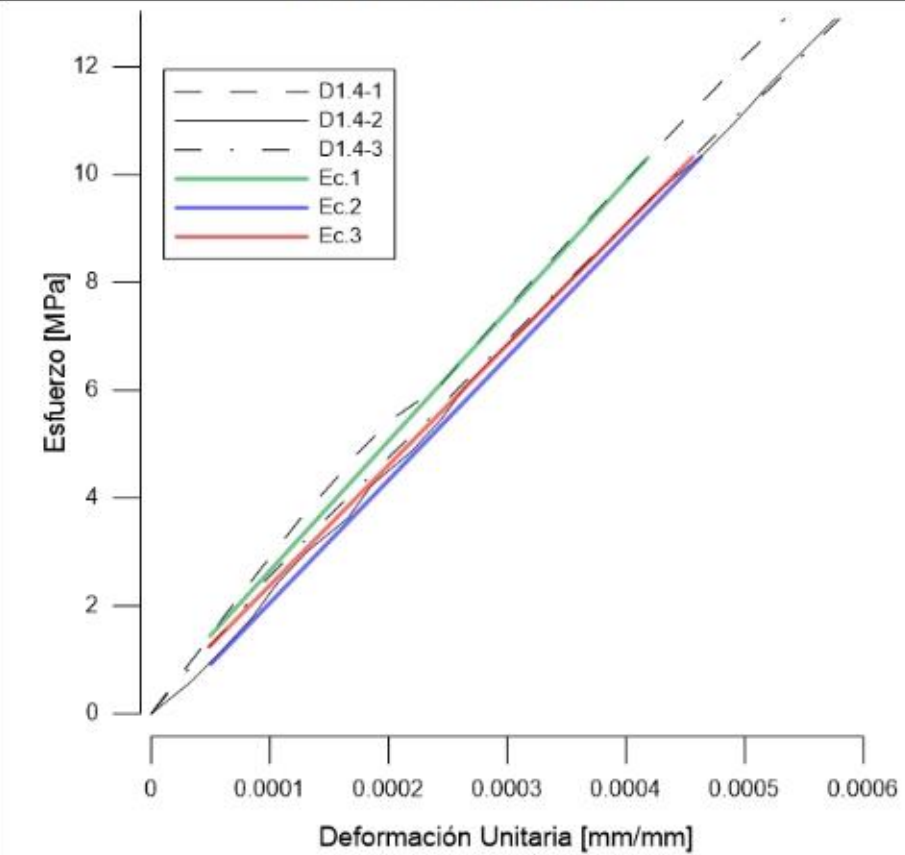
			26694.45	28179.74	27011.54	27607.91			298.99
0.5			26757.25	28191.36	27174.09	27769.62			-296.54
A2	0.60	0.5	27129.59	27122.26	27809.60	25038.20	26638.13	1198.72	-596.41
			27373.35	27013.25	28132.81	24641.47			-345.24
			27095.73	26953.50	27622.98	24271.97			-1239.76
PROMEDIO			27234.54	26983.38	27877.90	24456.72			2181.41
A2	0.80	0.5	26409.20	26300.98	24753.89	26362.88	25714.96	1157.17	-172.36
			26039.85	25858.54	24998.79	26438.28			-7.71
			25734.80	25586.81	24624.36				903.39
PROMEDIO			25887.32	25722.68	24811.57	26438.28			-723.31


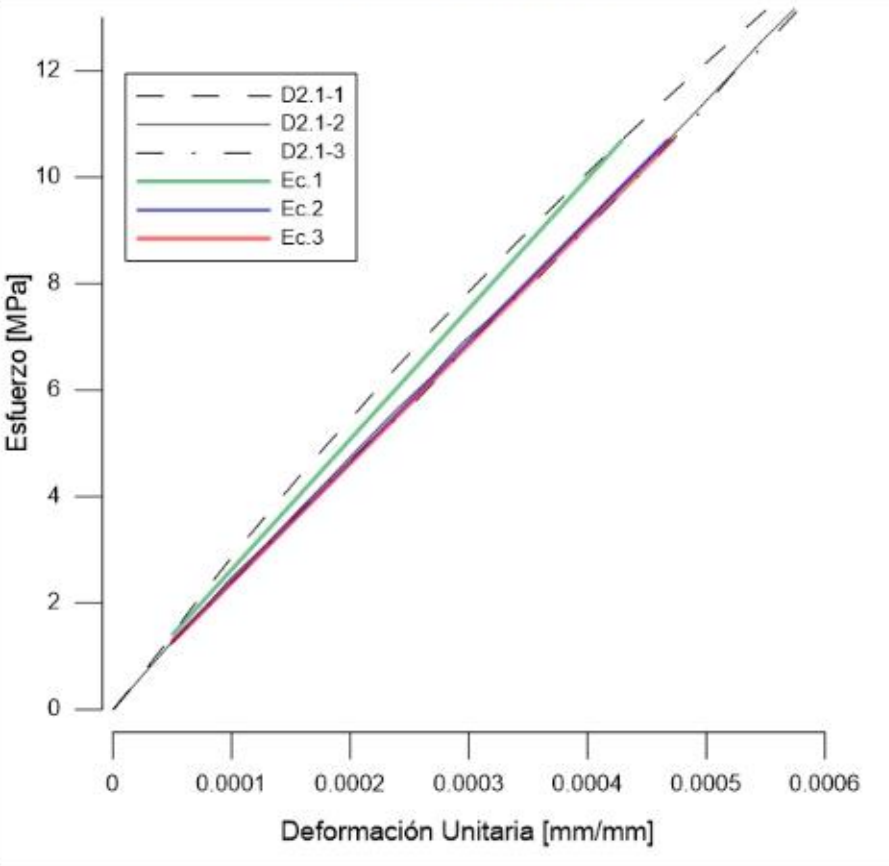
9.5 Anexo 5


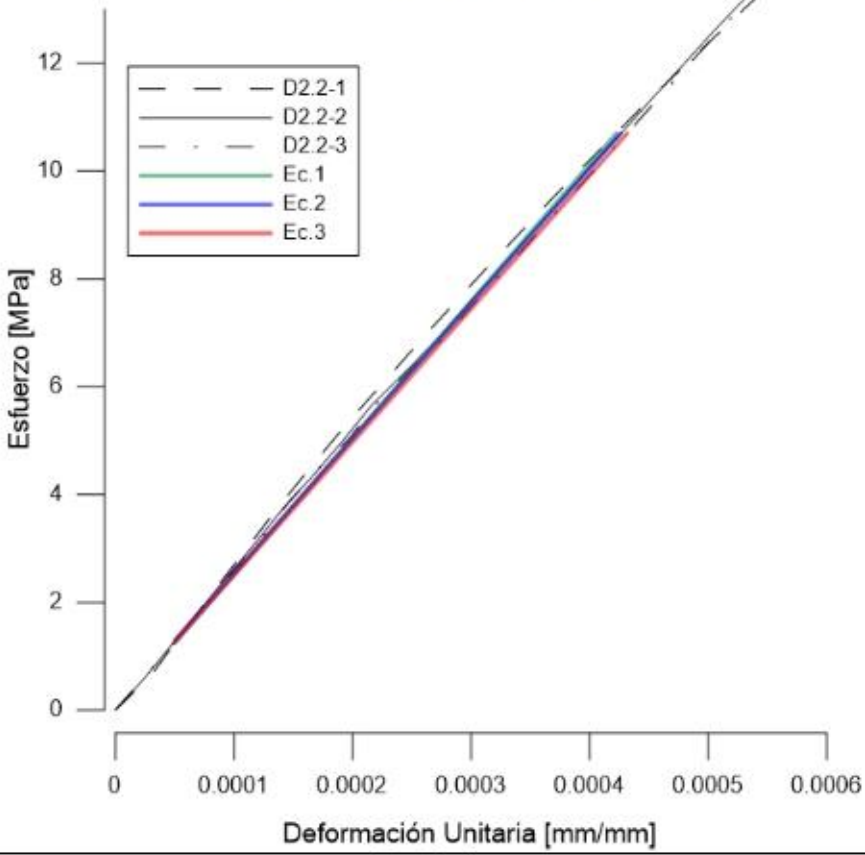
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.02	cm	Carga Máxima	203.50	KN		
Altura Probeta:	20.05	cm		Resistencia Máx.	25.83	MPa	
Área Probeta:	78.85	cm ²		Resistencia Máx.	263.53	Kgf/cm ²	
Longitud Inicial	10.00	cm		Densidad del Ho.	2374.90	Kgf/m ³	
ID:	D1.1	-		N° de Ensayos	3	-	
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.004	S2 [MPa]	10.319	ξ_2	0.000442	Ec1 [MPa]	23770.59
	1.068		10.316		0.000442	Ec2 [MPa]	23564.03
	0.999		10.303		0.000434	Ec3 [MPa]	24204.61
						Ec Prom [MPa]	23884.32

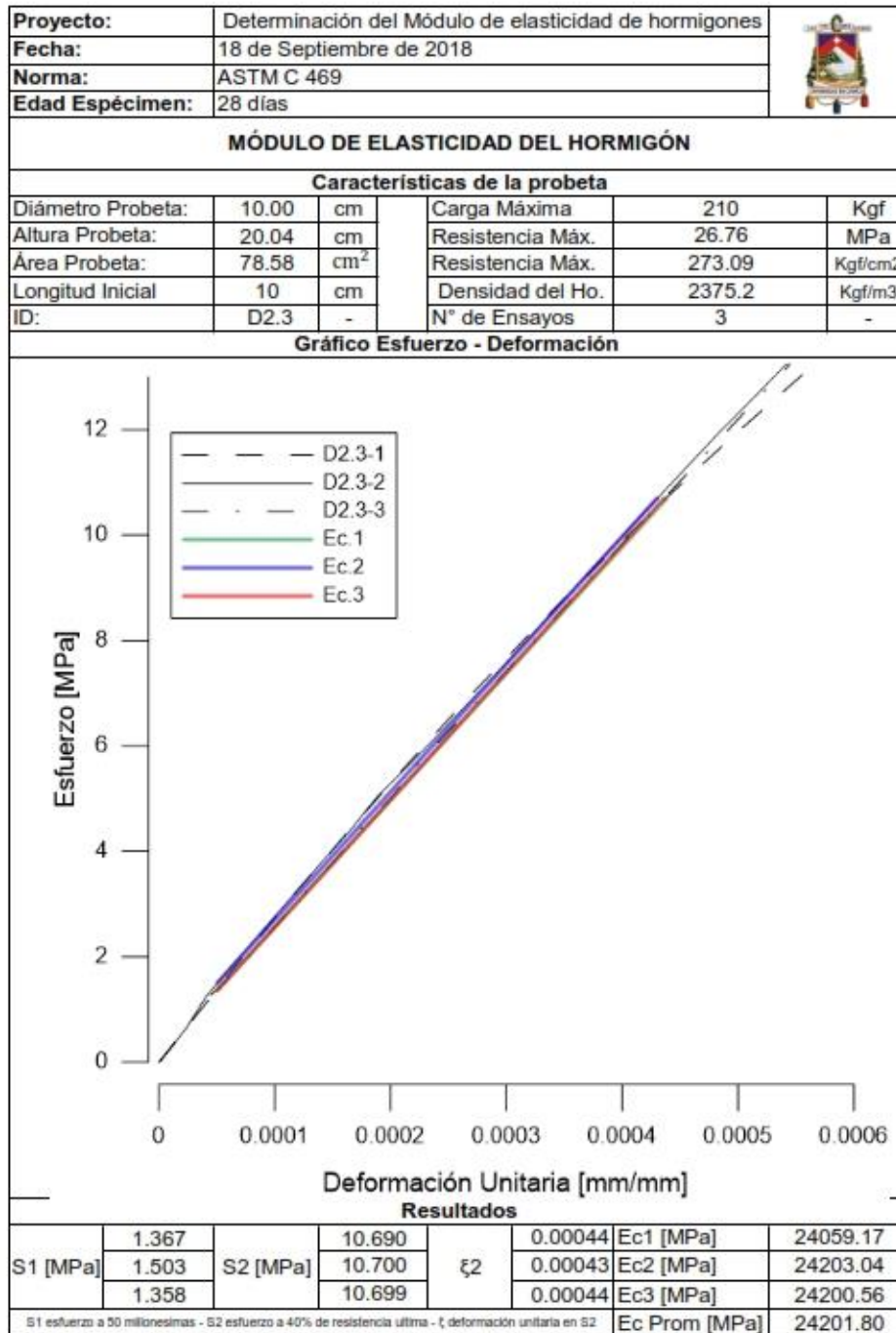
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.00	cm	Carga Máxima	203.50	KN		
Altura Probeta:	20.02	cm	Resistencia Máx.	25.83	MPa		
Área Probeta:	78.54	cm ²	Resistencia Máx.	263.53	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2387.1	Kgf/m ³		
ID:	D1.2	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.230	S2 [MPa]	10.313	ξ2	0.000422	Ec1 [MPa]	24430.26
	1.386		10.313		0.000411	Ec2 [MPa]	24762.40
	1.384		10.307		0.000419	Ec3 [MPa]	24204.62
						Ec Prom [MPa]	24483.51


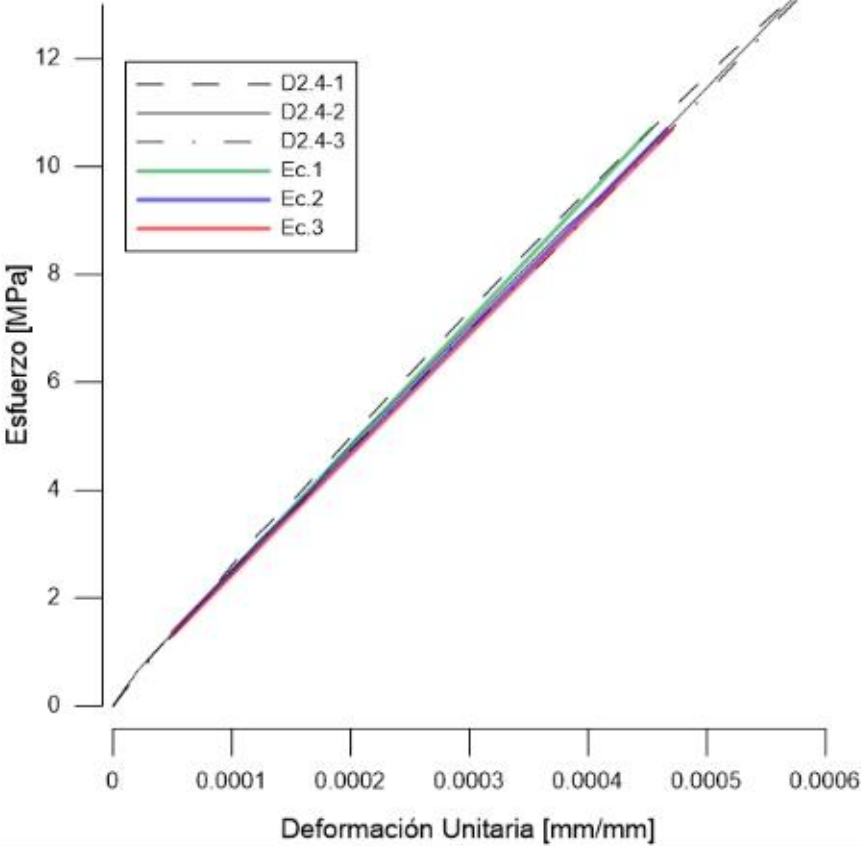
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.03	cm	Carga Máxima	203.50	KN		
Altura Probeta:	20.04	cm	Resistencia Máx.	25.83	MPa		
Área Probeta:	79.01	cm ²	Resistencia Máx.	263.53	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2375.50	Kgf/m ³		
ID:	D1.3	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.365	S2 [MPa]	10.317	ξ_2	0.000415	Ec1 [MPa]	24505.18
	1.055		10.308		0.000432	Ec2 [MPa]	24204.61
	1.112		10.316		0.000423	Ec3 [MPa]	24648.32
						Ec Prom [MPa]	24426.47


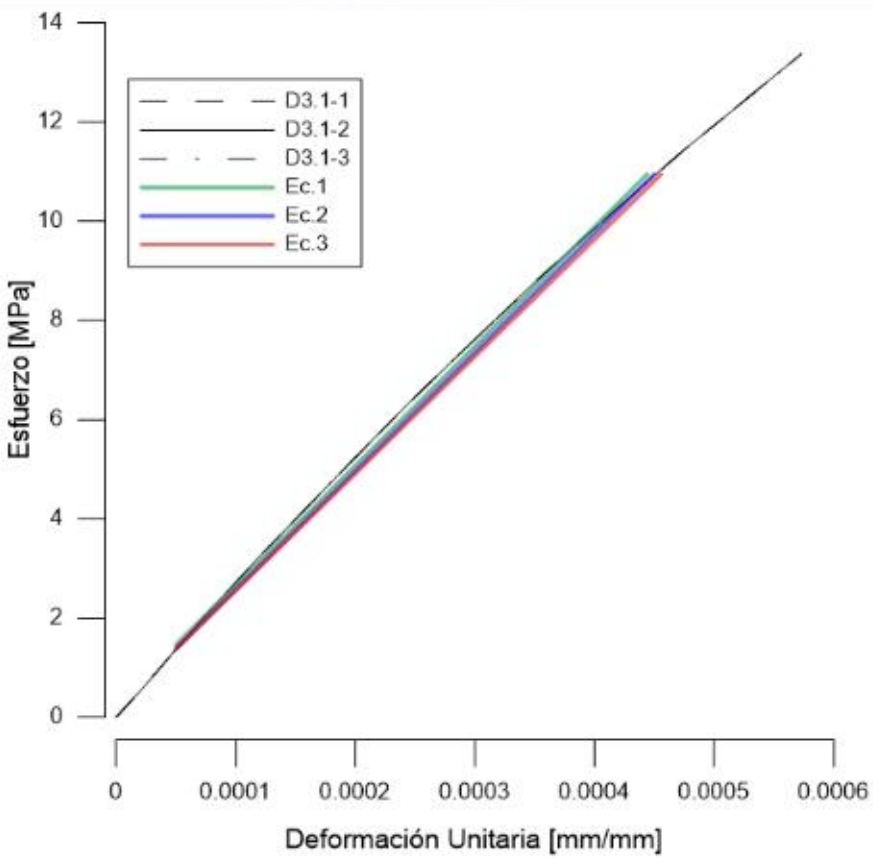
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10	cm	Carga Máxima	203.50	KN		
Altura Probeta:	20	cm	Resistencia Máx.	25.83	MPa		
Área Probeta:	200	cm ²	Resistencia Máx.	263.53	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2370.8	Kgf/m ³		
ID:	D1.4	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.439	S2 [MPa]	10.304	ξ2	0.000413	Ec1 [MPa]	24396.36
	0.918		10.312		0.000445	Ec2 [MPa]	23802.31
	1.247		10.317		0.000424	Ec3 [MPa]	24246.02
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ2 deformación unitaria en S2					Ec Prom [MPa]		24024.17


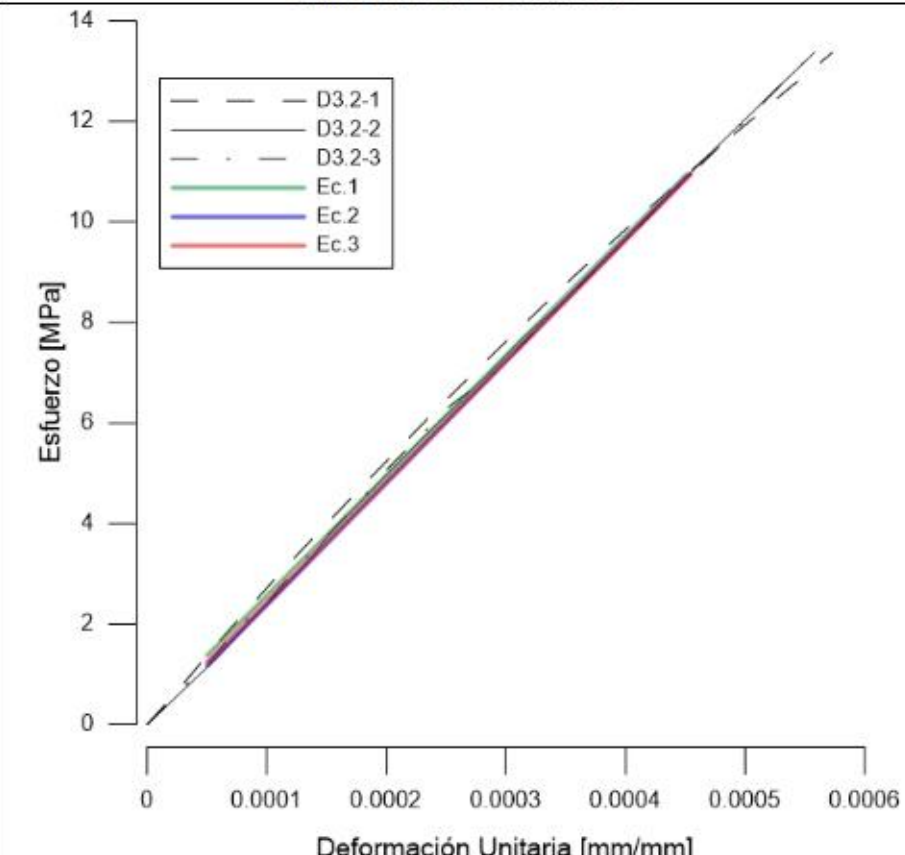
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.04	cm	Carga Máxima	210	KN		
Altura Probeta:	20.01	cm	Resistencia Máx.	26.76	MPa		
Área Probeta:	79.17	cm ²	Resistencia Máx.	273.09	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2350.3	Kgf/m ³		
ID:	D2.1	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.410	S2 [MPa]	10.695	ξ2	0.00043	Ec1 [MPa]	24126.98
	0.914		10.188		0.00043	Ec2 [MPa]	24276.98
	1.275		10.697		0.00043	Ec3 [MPa]	24720.68
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ deformación unitaria en S2					Ec Prom [MPa]	24498.83	


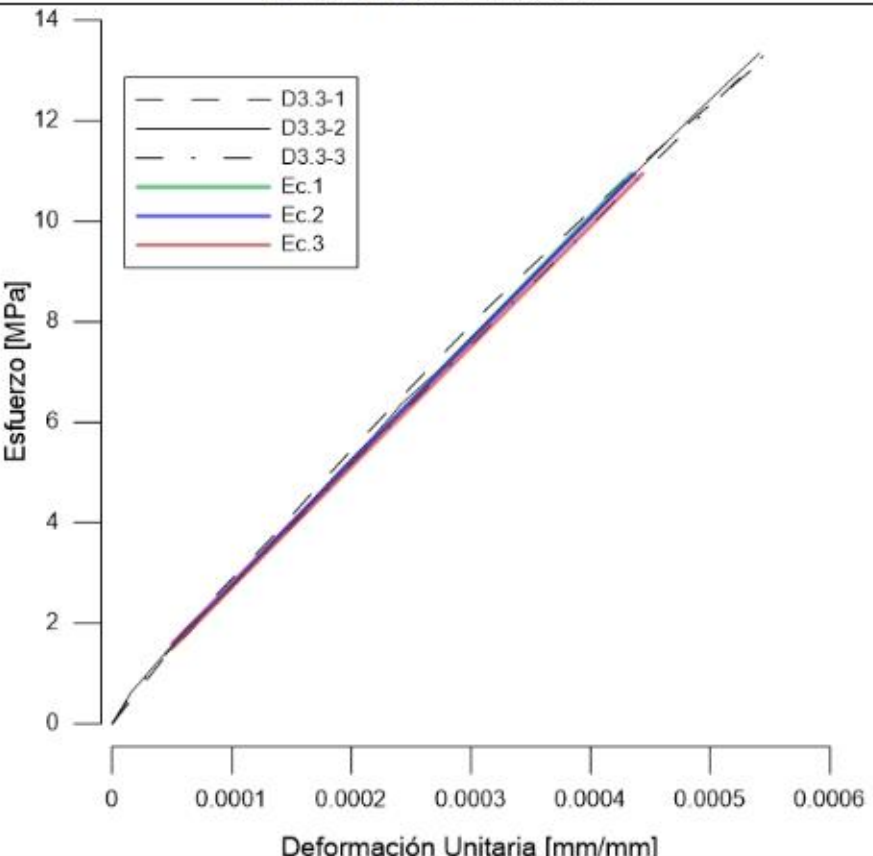
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.02	cm	Carga Máxima	210	Kgf		
Altura Probeta:	20.00	cm	Resistencia Máx.	26.76	MPa		
Área Probeta:	78.85	cm ²	Resistencia Máx.	273.09	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2363.6	Kgf/m ³		
ID:	D2.2	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.245	S2 [MPa]	10.698	ξ2	0.00042	Ec1 [MPa]	25376.25
	1.294		10.696		0.00043	Ec2 [MPa]	25005.16
	1.262		10.697		0.00043	Ec3 [MPa]	24730.89
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ deformación unitaria en S2					Ec Prom [MPa]	24868.03	



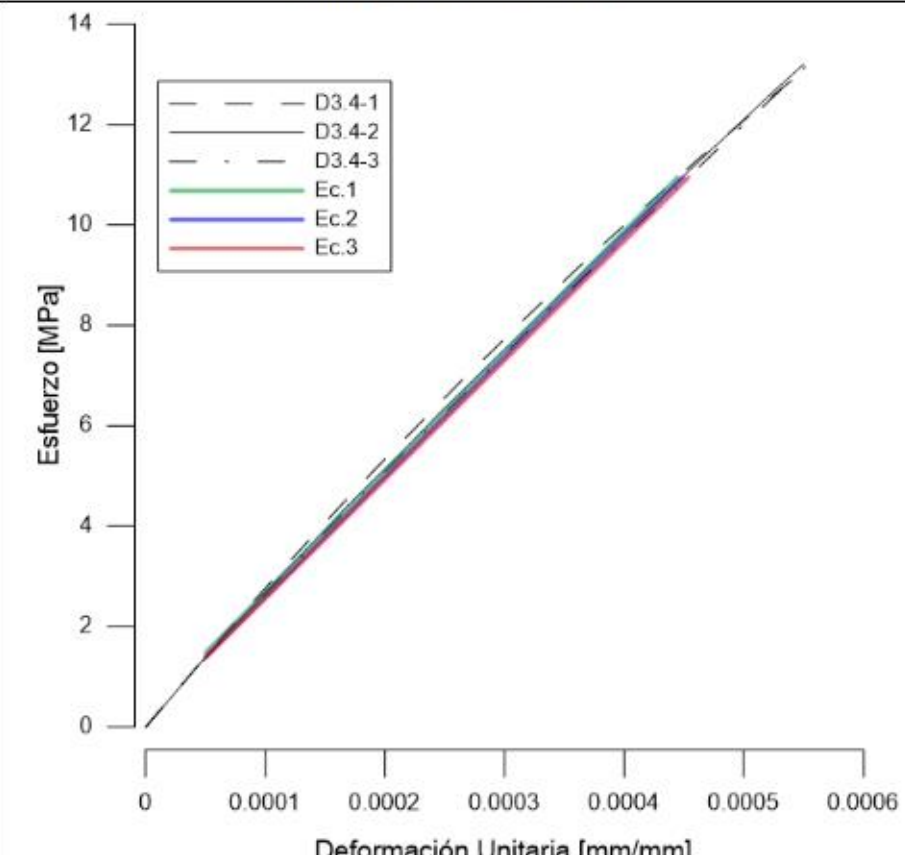



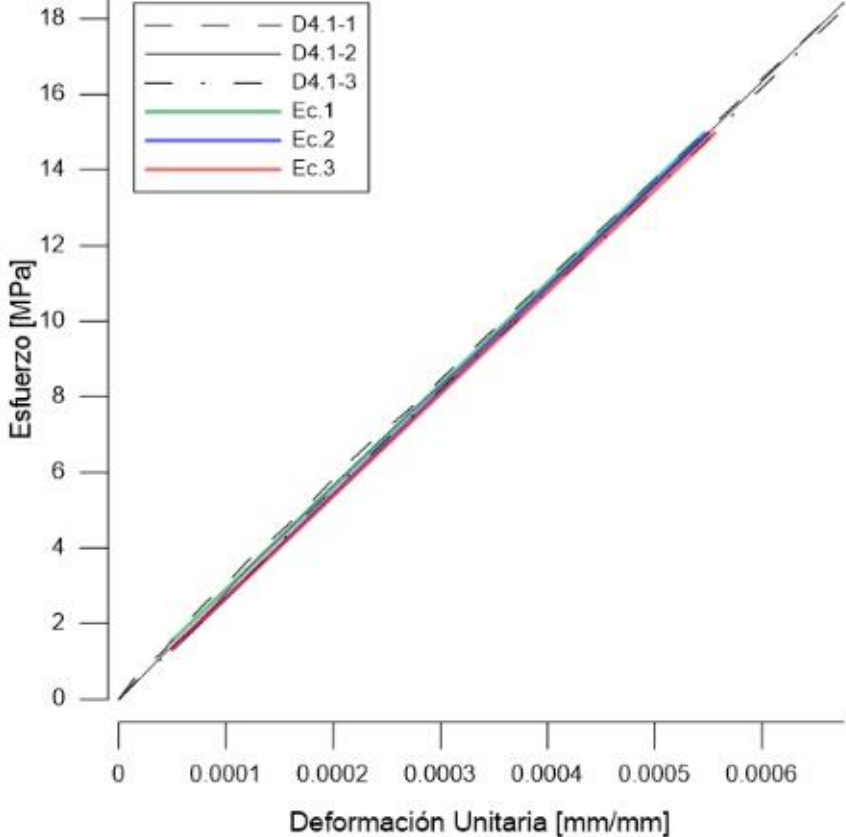
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.00	cm		Carga Máxima	210	Kgf	
Altura Probeta:	20.03	cm		Resistencia Máx.	26.76	MPa	
Área Probeta:	78.50	cm ²		Resistencia Máx.		Kgf/cm ²	
Longitud Inicial	10	cm		Densidad del Ho.	2383.4	Kgf/m ³	
ID:	D2.4	-		N° de Ensayos	3	-	
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.315	S2 [MPa]	10.698	ξ2	0.00049	Ec1 [MPa]	21089.96
	1.366		10.698		0.00049	Ec2 [MPa]	21254.96
	1.310		10.697		0.00042	Ec3 [MPa]	25256.08
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ deformación unitaria en S2					Ec Prom [MPa]		23255.52


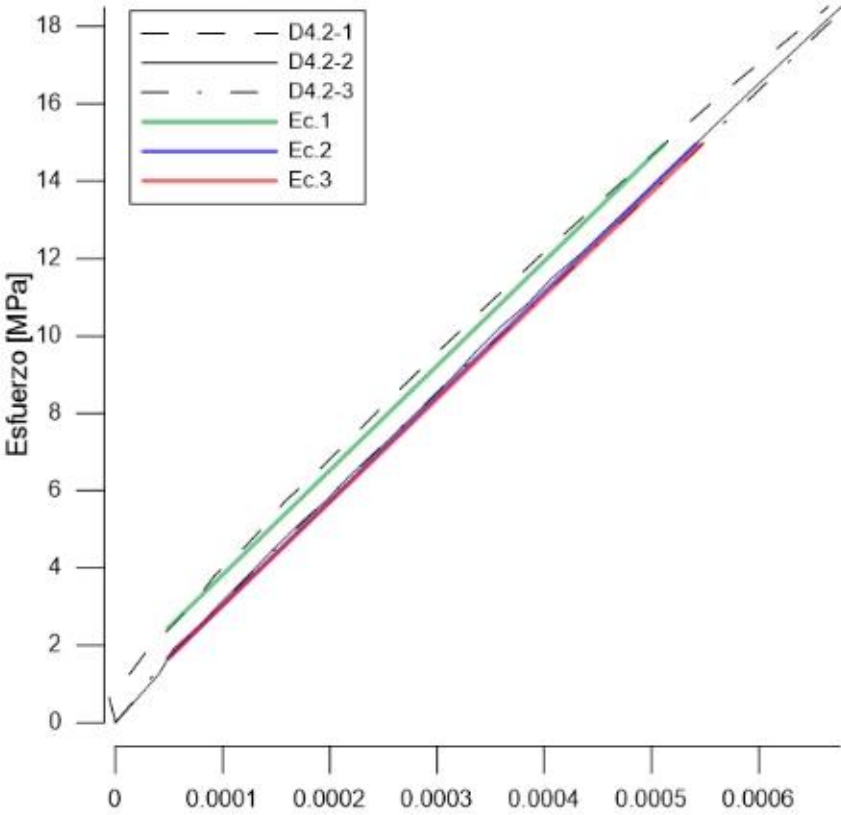
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.00	cm	Carga Máxima	216.00	Kgf		
Altura Probeta:	19.99	cm	Resistencia Máx.	27.40	MPa		
Área Probeta:	78.46	cm ²	Resistencia Máx.	279.56	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2365.00	Kgf/m ³		
ID:	D3.1	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.463	S2 [MPa]	10.945	ξ2	0.000444	Ec1 [MPa]	24067.25
	1.378		10.945		0.000450	Ec2 [MPa]	23916.92
	1.379		10.944		0.000456	Ec3 [MPa]	23589.03
S1 esfuerzo a 50 millonestimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia ultima - ζ deformación unitaria en S2						Ec Prom [MPa]	23752.97


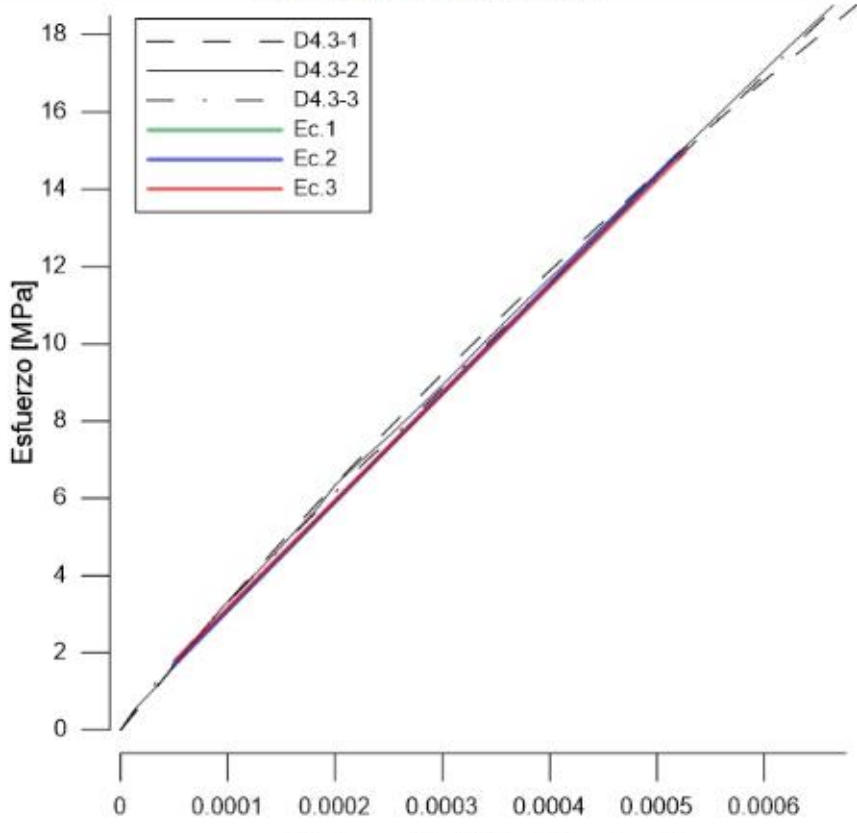
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.00	cm	Carga Máxima	216.00	Kgf		
Altura Probeta:	20.00	cm		Resistencia Máx.	27.40	MPa	
Área Probeta:	78.50	cm ²		Resistencia Máx.	279.56	Kgf/cm ²	
Longitud Inicial	10.00	cm		Densidad del Ho.	2365.00	Kgf/m ³	
ID:	D3.2	-		N° de Ensayos	3	-	
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.374	S2 [MPa]	10.945	ξ2	0.000451	Ec1 [MPa]	23869.18
	1.165		10.945		0.000454	Ec2 [MPa]	24239.96
	1.238		10.946		0.000455	Ec3 [MPa]	23998.33
					Ec Prom [MPa]		24119.14


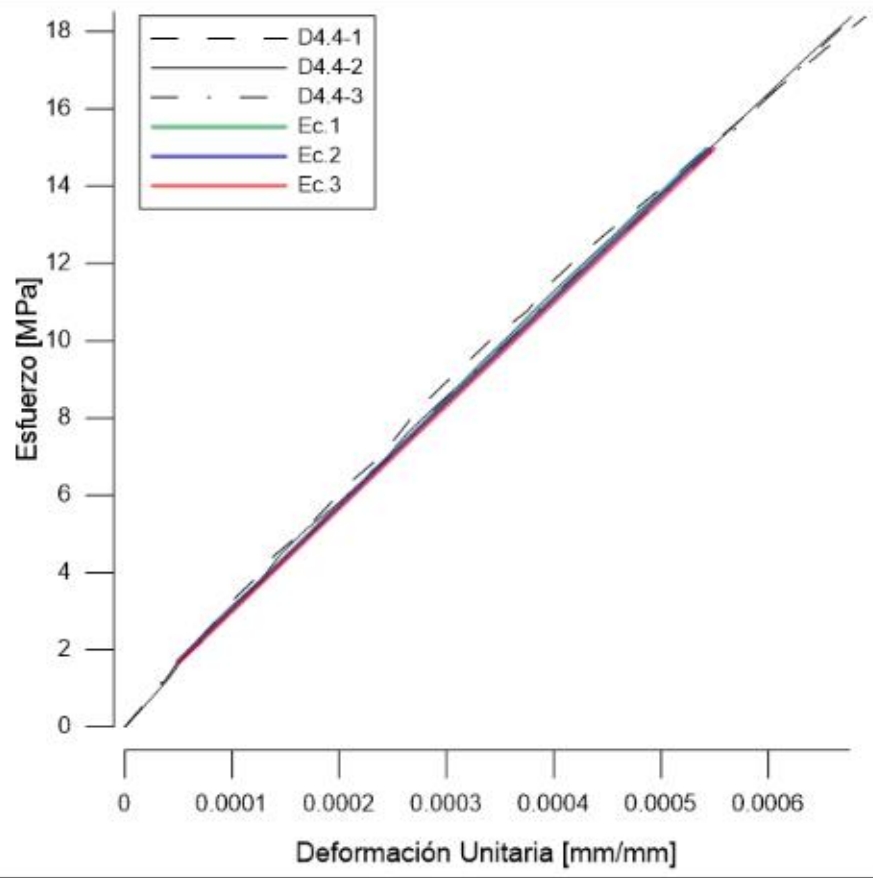
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.01	cm	Carga Máxima	216.00	Kgf		
Altura Probeta:	20.00	cm	Resistencia Máx.	27.40	MPa		
Área Probeta:	78.62	cm ²	Resistencia Máx.	279.56	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2365.00	Kgf/m ³		
ID:	D3.3	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.506	S2 [MPa]	10.945	ξ_2	0.000434	Ec1 [MPa]	24579.80
	1.585		10.946		0.000437	Ec2 [MPa]	24189.38
	1.530		10.946		0.000444	Ec3 [MPa]	23927.10
S1 esfuerzo a 50 millonestimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia ultima - ξ_2 deformación unitaria en S2					Ec Prom [MPa]		24058.24


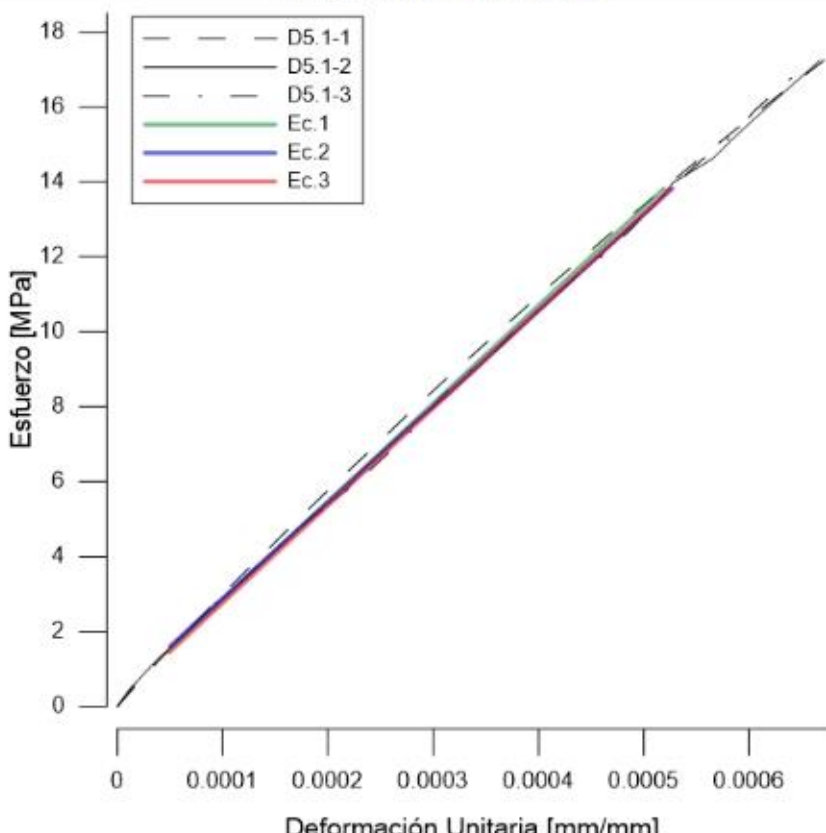
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.06	cm		Carga Máxima	216.00	Kgf	
Altura Probeta:	20.05	cm		Resistencia Máx.	27.40	MPa	
Área Probeta:	79.52	cm ²		Resistencia Máx.	279.56	Kgf/cm ²	
Longitud Inicial	10.00	cm		Densidad del Ho.	2365.00	Kgf/m ³	
ID:	D3.4	-		N° de Ensayos	3	-	
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.487	S2 [MPa]	10.945	ξ_2	0.000445	Ec1 [MPa]	23975.56
	1.394		10.944		0.000449	Ec2 [MPa]	23933.48
	1.379		10.945		0.000454	Ec3 [MPa]	23705.99
						Ec Prom [MPa]	23819.74


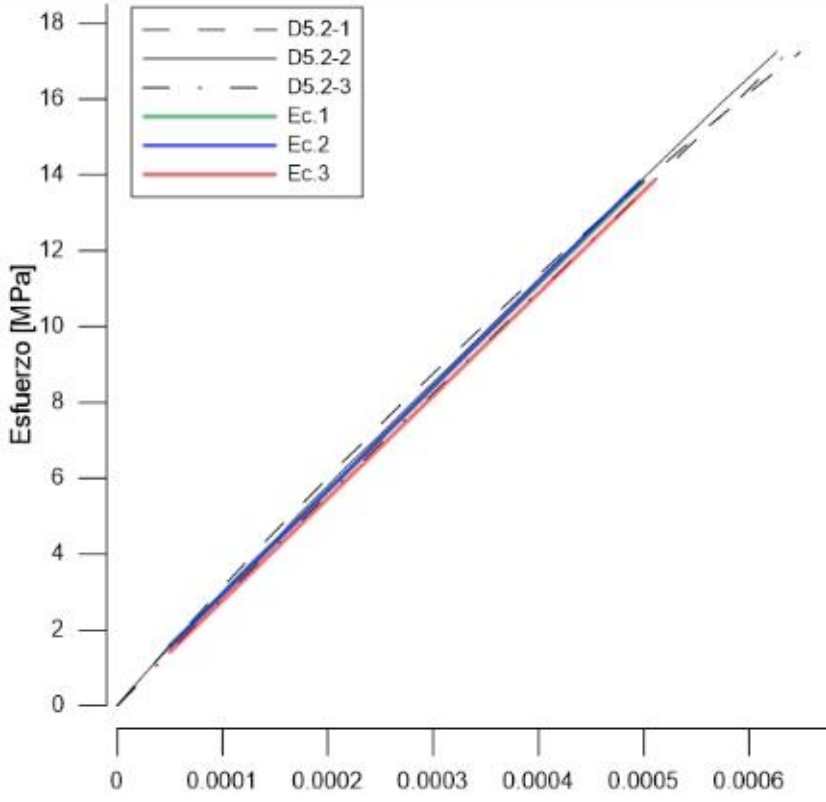
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.01	cm	Carga Máxima	293.50	KN		
Altura Probeta:	19.98	cm	Resistencia Máx.	37.47	MPa		
Área Probeta:	78.70	cm ²	Resistencia Máx.	382.35	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2403.1	Kgf/m ³		
ID:	D4.1	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.535	S2 [MPa]	14.975	ξ2	0.000546	Ec1 [MPa]	27069.2628
	1.332		14.975		0.000550	Ec2 [MPa]	27313.2288
	1.322		14.975		0.000556	Ec3 [MPa]	26983.2734
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ deformación unitaria en S1						Ec Prom [MPa]	27148.2511



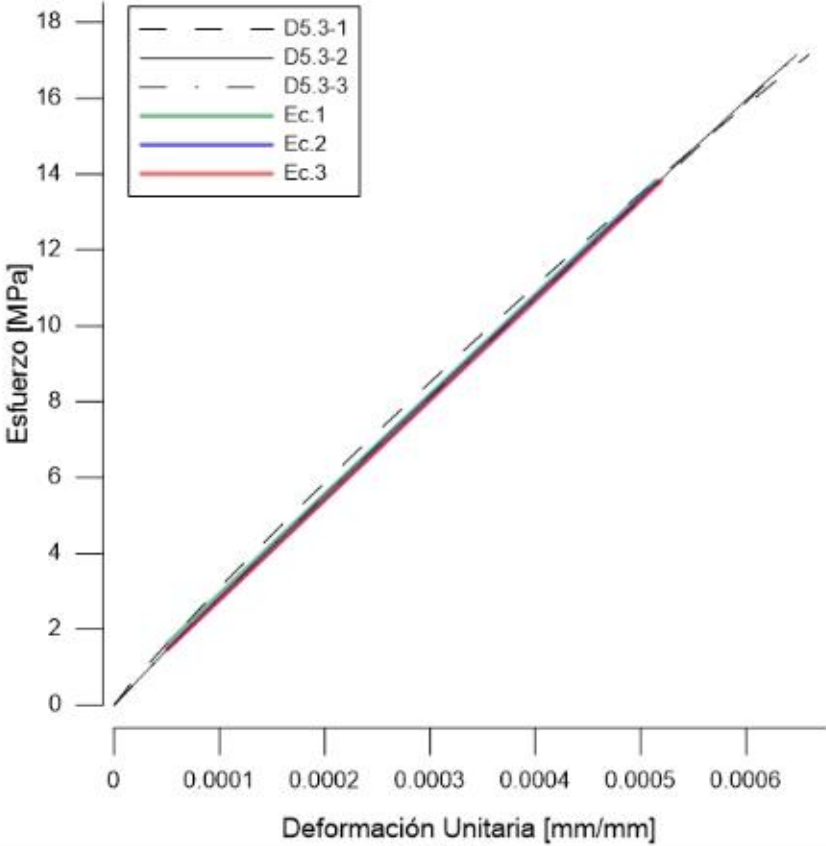
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.00	cm		Carga Máxima	293.50	KN	
Altura Probeta:	20.07	cm		Resistencia Máx.	37.47	MPa	
Área Probeta:	78.46	cm ²		Resistencia Máx.	382.35	Kgf/cm ²	
Longitud Inicial	10.00	cm		Densidad del Ho.	2403.1	Kgf/m ³	
ID:	D4.2	-		N° de Ensayos	3	-	
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	2.443	S2 [MPa]	14.978	ξ_2	0.000513	Ec1 [MPa]	27044.2487
	1.656		14.973		0.000542	Ec2 [MPa]	27011.1095
	1.700		14.977		0.000548	Ec3 [MPa]	26688.4201
						Ec Prom [MPa]	26849.7648


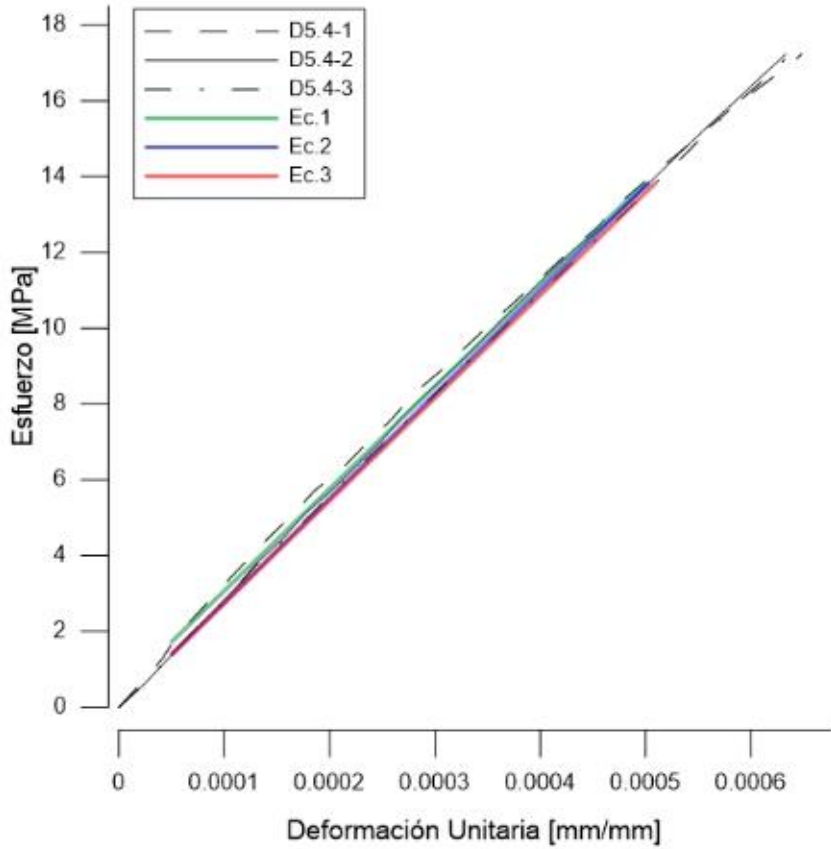
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.00	cm	Carga Máxima	293.50	KN		
Altura Probeta:	20.07	cm	Resistencia Máx.	37.47	MPa		
Área Probeta:	78.46	cm ²	Resistencia Máx.	382.35	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2403.1	Kgf/m ³		
ID:	D4.3	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.694	S2 [MPa]	14.976	ξ2	0.000523	Ec1 [MPa]	28108.4639
	1.671		14.974		0.000522	Ec2 [MPa]	28155.9286
	1.780		14.975		0.000526	Ec3 [MPa]	27719.8582
					Ec Prom [MPa]		27937.8934


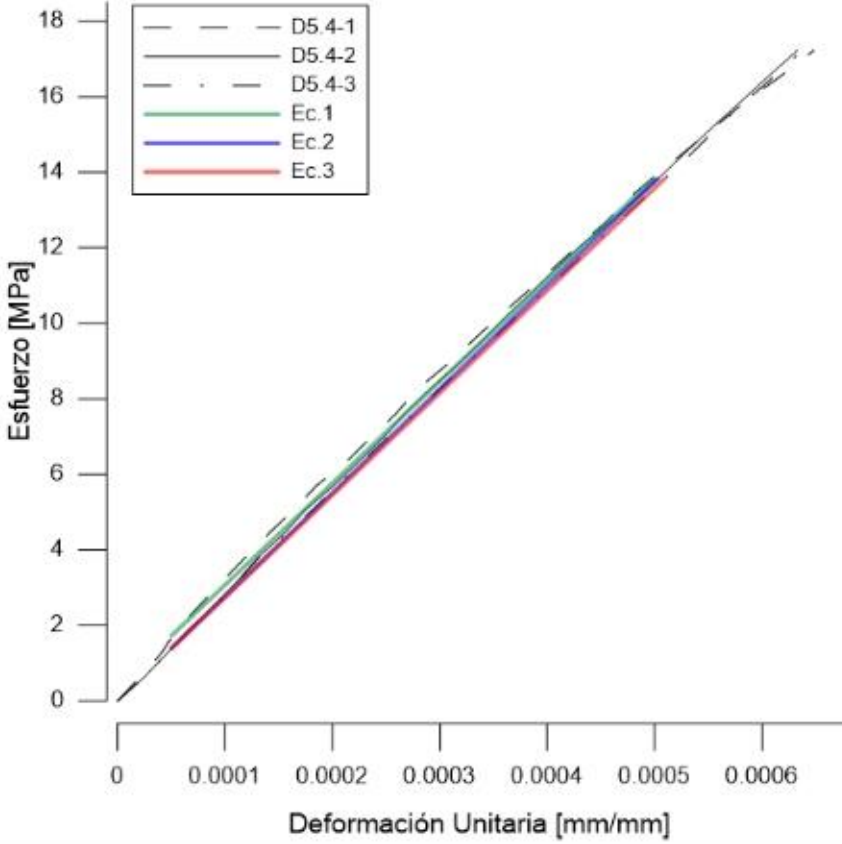
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10	cm	Carga Máxima	293.50	KN		
Altura Probeta:	20	cm	Resistencia Máx.	37.47	MPa		
Área Probeta:	200	cm ²	Resistencia Máx.	382.35	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2403.1	Kgf/m ³		
ID:	D4.4	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.708	S2 [MPa]	14.975	ξ2	0.000542	Ec1 [MPa]	26937.165
	1.691		14.975		0.000546	Ec2 [MPa]	26780.7676
	1.656		14.977		0.000550	Ec3 [MPa]	26643.3549
S1 esfuerzo a 50 milionesimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia ultima - ξ deformación unitaria en S1						Ec Prom [MPa]	26712.0612


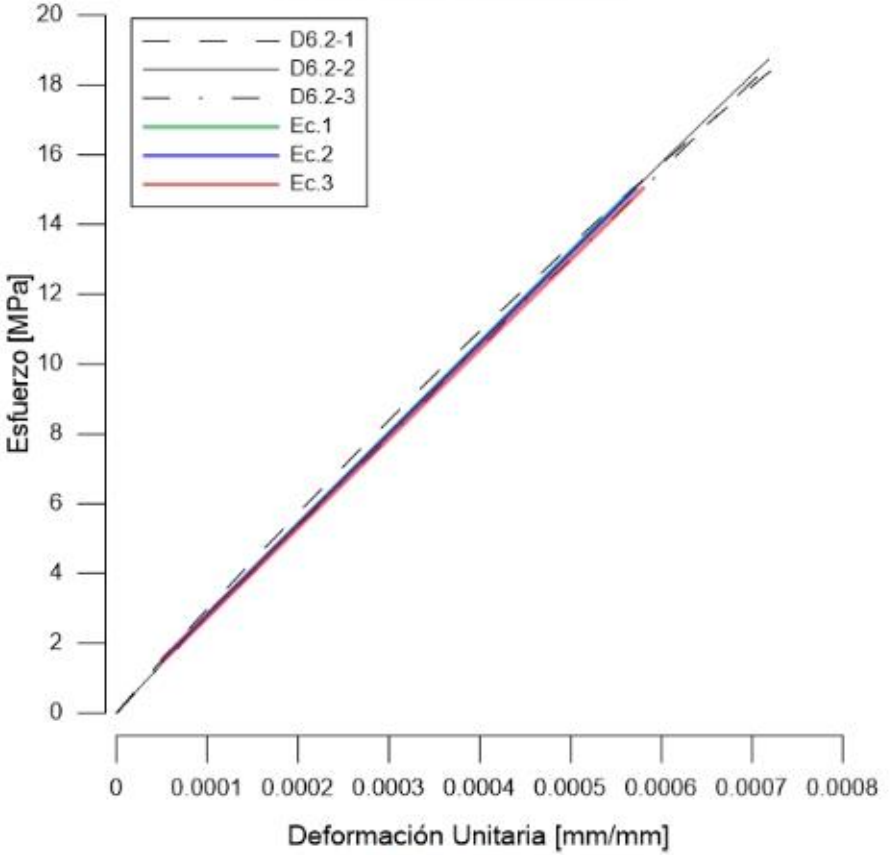
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.00	cm	Carga Máxima	271.00	KN		
Altura Probeta:	19.93	cm	Resistencia Máx.	34.62	MPa		
Área Probeta:	78.54	cm ²	Resistencia Máx.	353.30	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2404.7	Kgf/m ³		
ID:	D5.1	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.553	S2 [MPa]	13.827	ξ2	0.000519	Ec1 [MPa]	26170.97
	1.608		13.828		0.000527	Ec2 [MPa]	25617.92
	1.439		13.826		0.000525	Ec3 [MPa]	26022.31
S1 esfuerzo a 50 milionesimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ, deformación unitaria en S1					Ec Prom [MPa]		25820.11


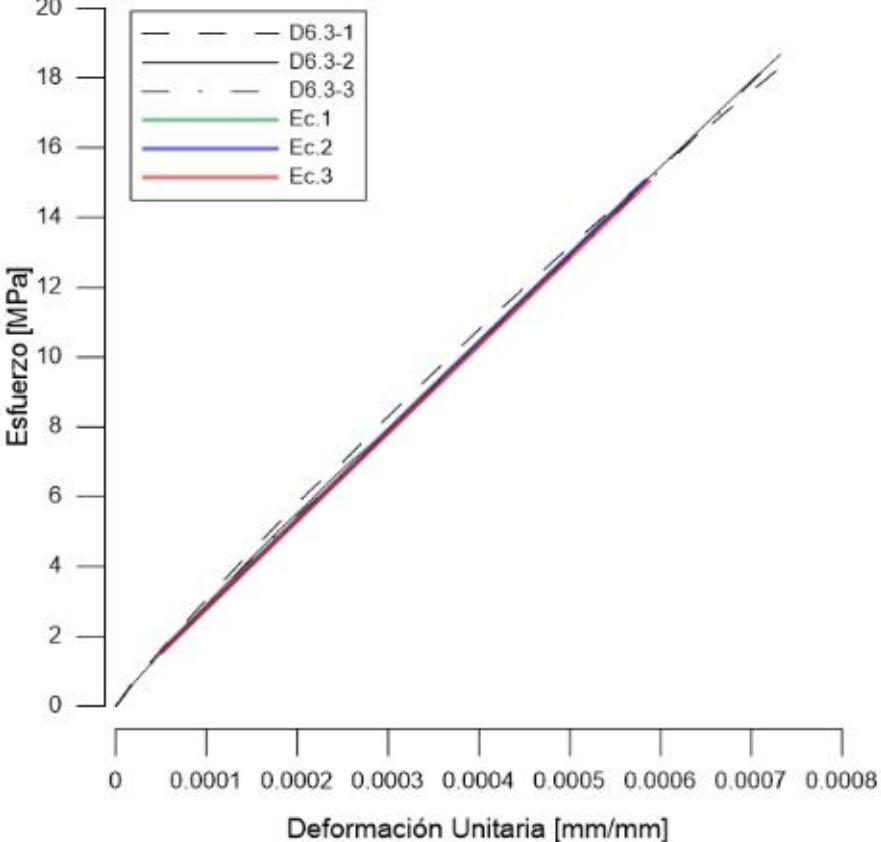
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.00	cm	Carga Máxima	271.00	Kgf		
Altura Probeta:	20.05	cm	Resistencia Máx.	34.62	MPa		
Área Probeta:	78.50	cm ²	Resistencia Máx.	353.30	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2407.1	Kgf/m ³		
ID:	D5.2	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.600	S2 [MPa]	13.826	ξ2	0.000500	Ec1 [MPa]	27198.61
	1.558		13.827		0.000497	Ec2 [MPa]	27479.14
	1.425		13.829		0.000509	Ec3 [MPa]	27024.50
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ deformación unitaria en S1					Ec Prom [MPa]		27251.82


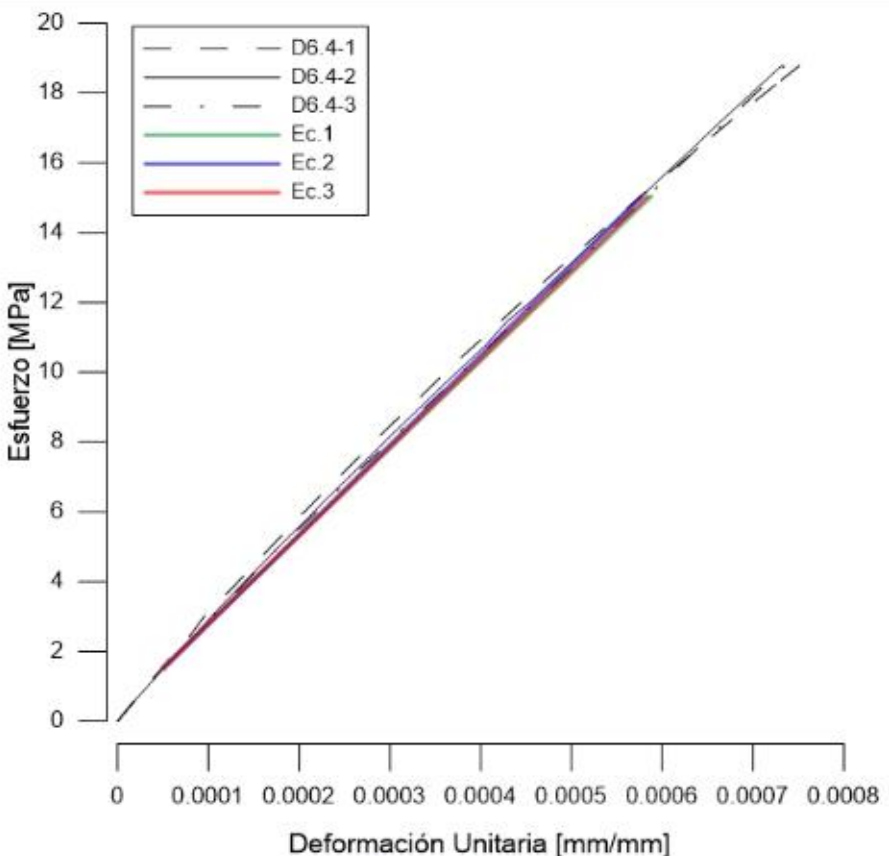
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.03	cm		Carga Máxima	271.00	Kgf	
Altura Probeta:	20.01	cm		Resistencia Máx.	34.62	MPa	
Área Probeta:	79.01	cm ²		Resistencia Máx.	353.30	Kgf/cm ²	
Longitud Inicial	10.00	cm		Densidad del Ho.	2373.1	Kgf/m ³	
ID:	D5.3	-		N° de Ensayos	3	-	
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.616	S2 [MPa]	13.829	ξ 2	0.000514	Ec1 [MPa]	26319.59
	1.464		13.825		0.000517	Ec2 [MPa]	26469.02
	1.458		13.828		0.000520	Ec3 [MPa]	26319.42
					Ec Prom [MPa]		26394.22
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ deformación unitaria en S1							


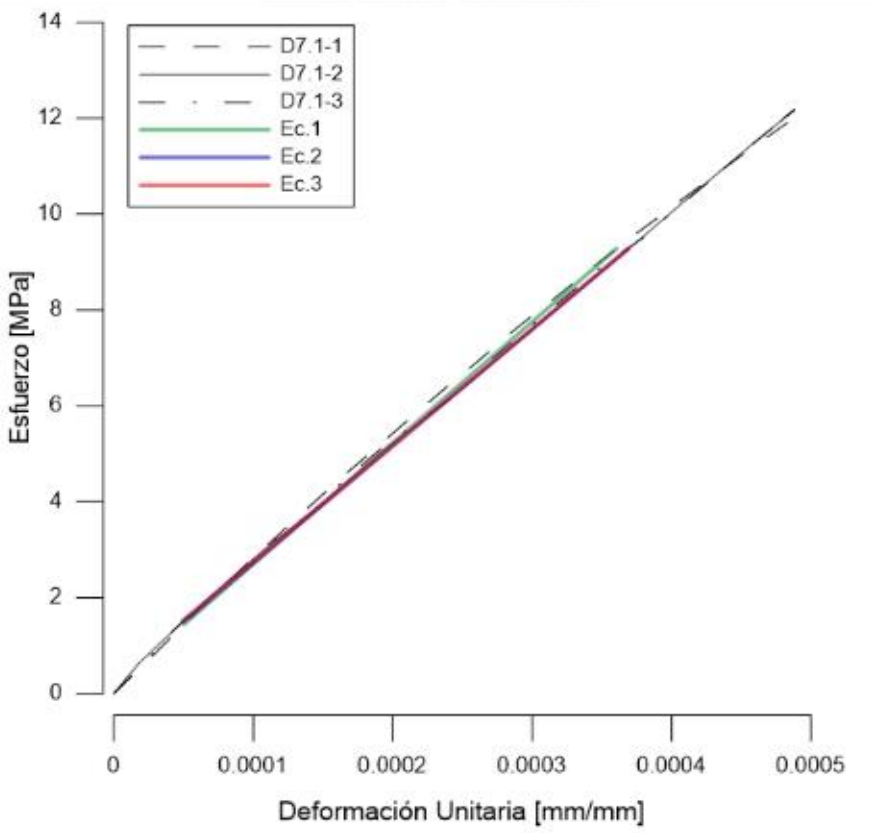
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.01	cm	Carga Máxima	271.00	Kgf		
Altura Probeta:	20.02	cm	Resistencia Máx.	34.62	MPa		
Área Probeta:	78.62	cm ²	Resistencia Máx.	353.30	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2403	Kgf/m ³		
ID:	D5.4	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.726	S2 [MPa]	13.828	ξ2	0.000499	Ec1 [MPa]	26951.89
	1.392		13.828		0.000503	Ec2 [MPa]	27483.84
	1.389		13.827		0.000509	Ec3 [MPa]	27098.33
					Ec Prom [MPa]		27291.08


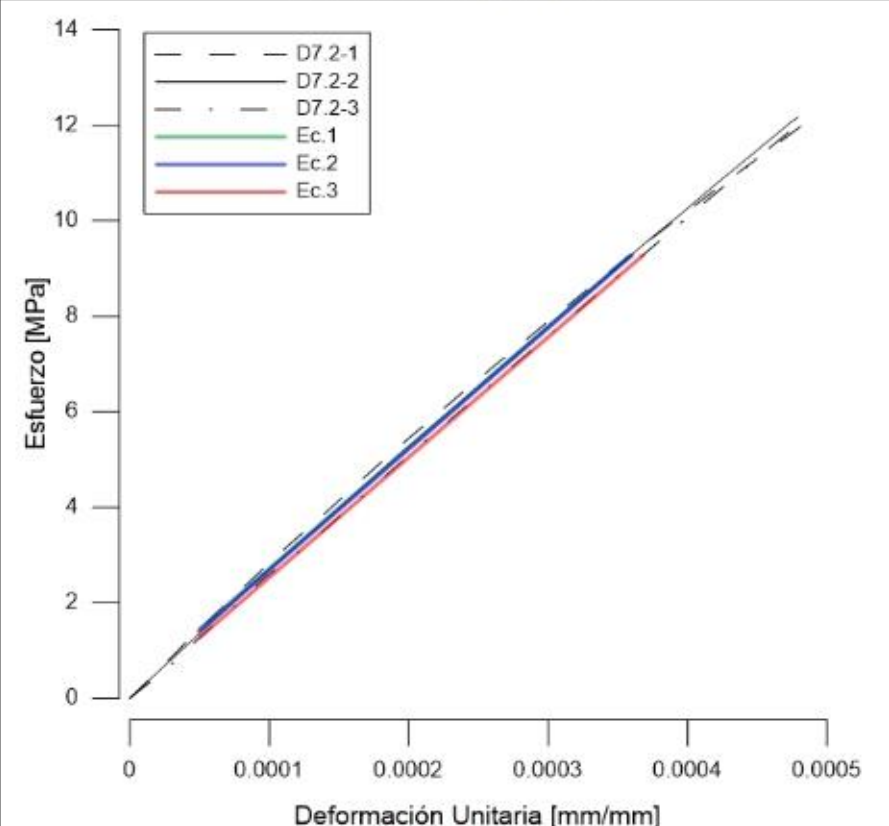
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	9.99	cm	Carga Máxima	296.00	KN		
Altura Probeta:	19.87	cm	Resistencia Máx.	37.69	MPa		
Área Probeta:	78.38	cm ²	Resistencia Máx.	384.55	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2377.2	Kgf/m ³		
ID:	D6.1	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.528	S2 [MPa]	15.044	ξ2	0.000596	Ec1 [MPa]	24777.23
	1.508		15.041		0.000601	Ec2 [MPa]	24538.65
	1.577		15.040		0.000610	Ec3 [MPa]	24061.42
S1 esfuerzo a 50 milionesimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ2 deformación unitaria en S2						Ec Prom [MPa]	24300.03


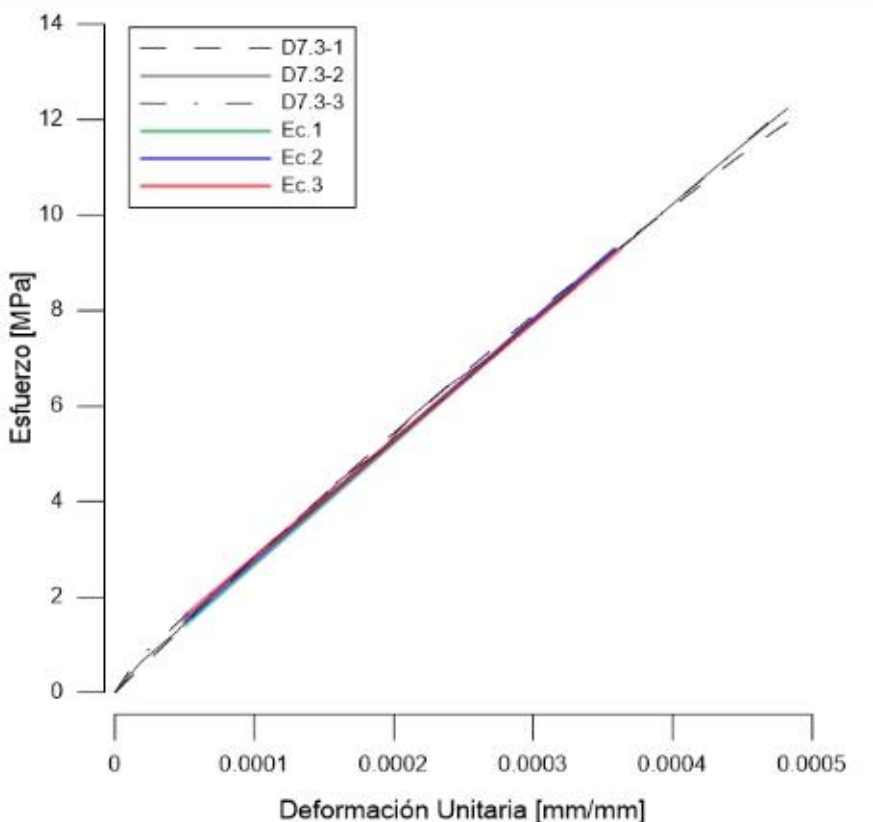
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.01	cm	Carga Máxima	296.00	Kgf		
Altura Probeta:	20.05	cm	Resistencia Máx.	37.69	MPa		
Área Probeta:	78.74	cm ²	Resistencia Máx.	384.55	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2380.6	Kgf/m ³		
ID:	D6.2	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.531	S2 [MPa]	15.041	ξ_2	0.000570	Ec1 [MPa]	26004.95
	1.512		15.044		0.000572	Ec2 [MPa]	25923.56
	1.474		15.044		0.000580	Ec3 [MPa]	25604.77
					Ec Prom [MPa]		25764.17


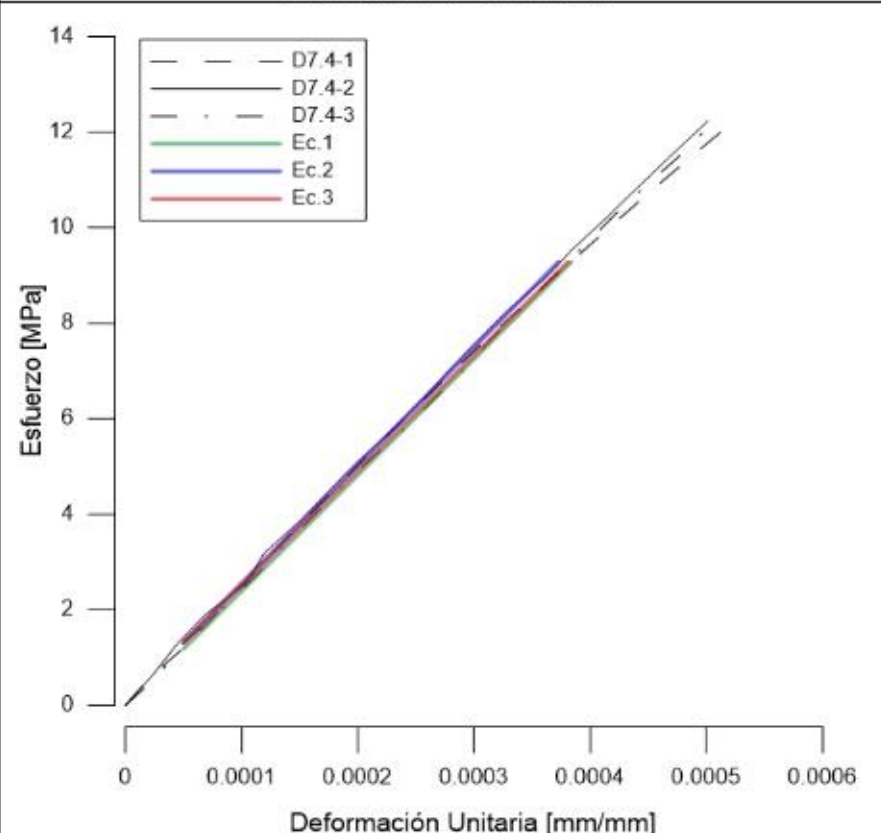
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.03	cm	Carga Máxima	296.00	Kgf		
Altura Probeta:	20.03	cm	Resistencia Máx.	37.69	MPa		
Área Probeta:	79.01	cm ²	Resistencia Máx.	384.55	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2366.6	Kgf/m ³		
ID:	D6.3	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.611	S2 [MPa]	15.043	ξ_2	0.000583	Ec1 [MPa]	25224.37
	1.544		15.044		0.000584	Ec2 [MPa]	25304.82
	1.546		15.045		0.000588	Ec3 [MPa]	25113.75
						Ec Prom [MPa]	25209.28
S1 esfuerzo a 50 milonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ_2 deformación unitaria en S2							


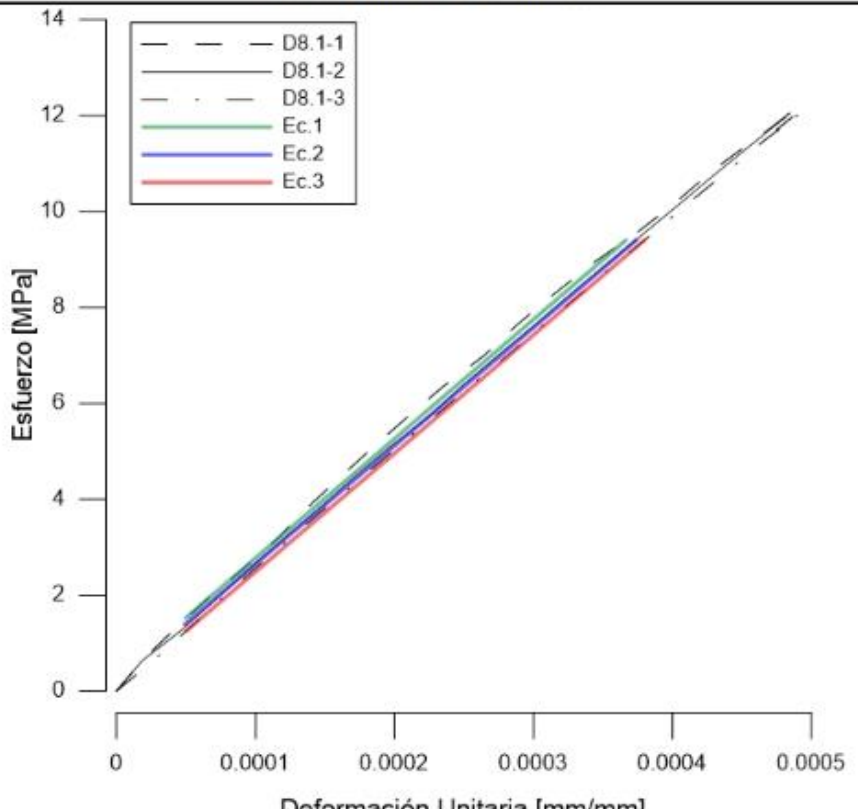
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.00	cm	Carga Máxima	296.00	Kgf		
Altura Probeta:	20.09	cm	Resistencia Máx.	37.69	MPa		
Área Probeta:	78.54	cm ²	Resistencia Máx.	384.55	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2379.4	Kgf/m ³		
ID:	D6.4	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.590	S2 [MPa]	15.040	ξ_2	0.000576	Ec1 [MPa]	25569.93
	1.493		15.044		0.000577	Ec2 [MPa]	25713.51
	1.517		15.044		0.000584	Ec3 [MPa]	25355.45
						Ec Prom [MPa]	25534.48


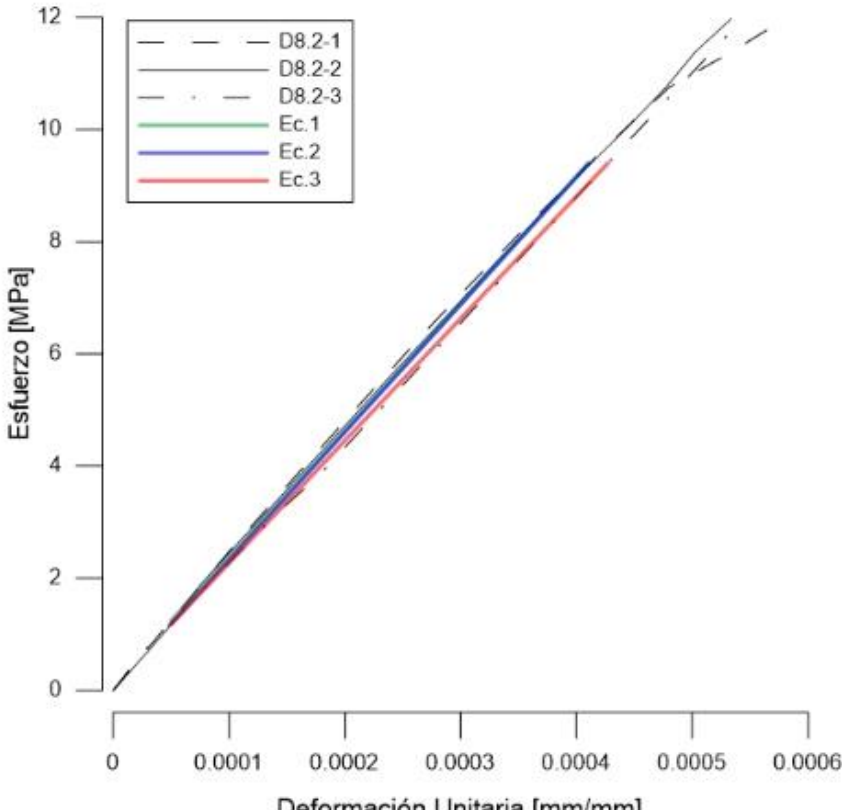
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.04	cm	Carga Máxima	191.50	KN		
Altura Probeta:	20.04	cm	Resistencia Máx.	23.75	MPa		
Área Probeta:	79.17	cm ²	Resistencia Máx.	242.35	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10.00	cm	Densidad del Ho.	2368.6	Kgf/m ³		
ID:	D7.1	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.437	S2 [MPa]	9.279	ξ2	0.00036	Ec1 [MPa]	25256.302
	1.495		9.281		0.00037	Ec2 [MPa]	24370.256
	1.521		9.279		0.00037	Ec3 [MPa]	24281.880
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ deformación unitaria en S2						Ec Prom [MPa]	24326.068



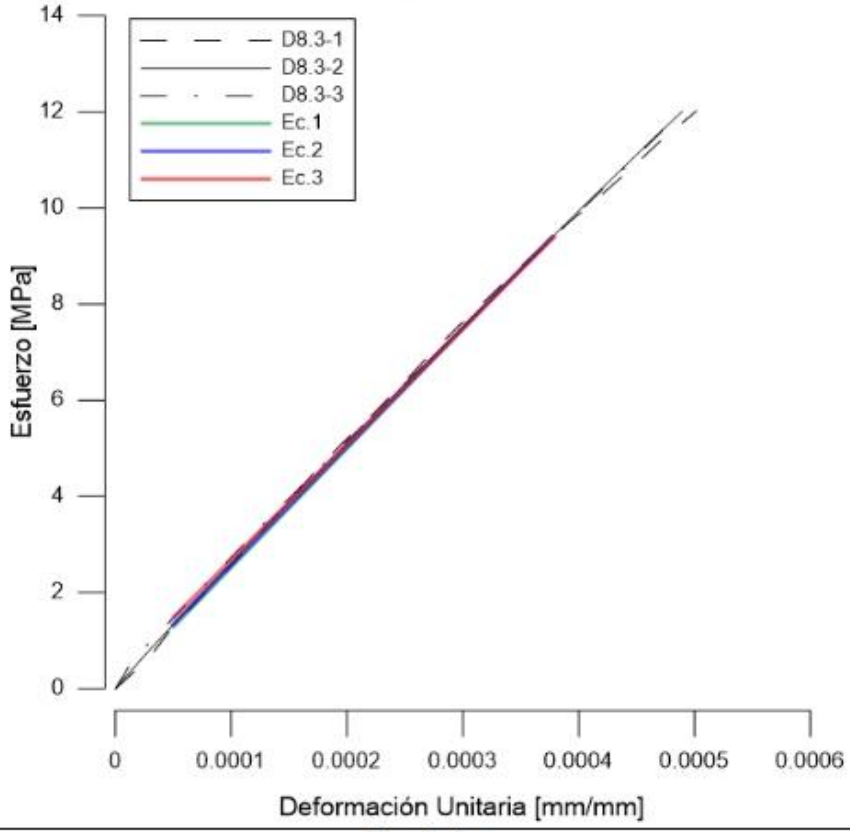
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10	cm	Carga Máxima	191.50	KN		
Altura Probeta:	20	cm	Resistencia Máx.	23.75	MPa		
Área Probeta:	200	cm ²	Resistencia Máx.	242.35	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2369.2	Kgf/m ³		
ID:	D7.2	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.450	S2 [MPa]	9.281	ξ2	0.00036	Ec1 [MPa]	25342.038
	1.403		9.278		0.00036	Ec2 [MPa]	25361.420
	1.275		9.279		0.00037	Ec3 [MPa]	25170.387
S1 esfuerzo a 90 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ deformación unitaria en S2					Ec Prom [MPa]	25265.903	


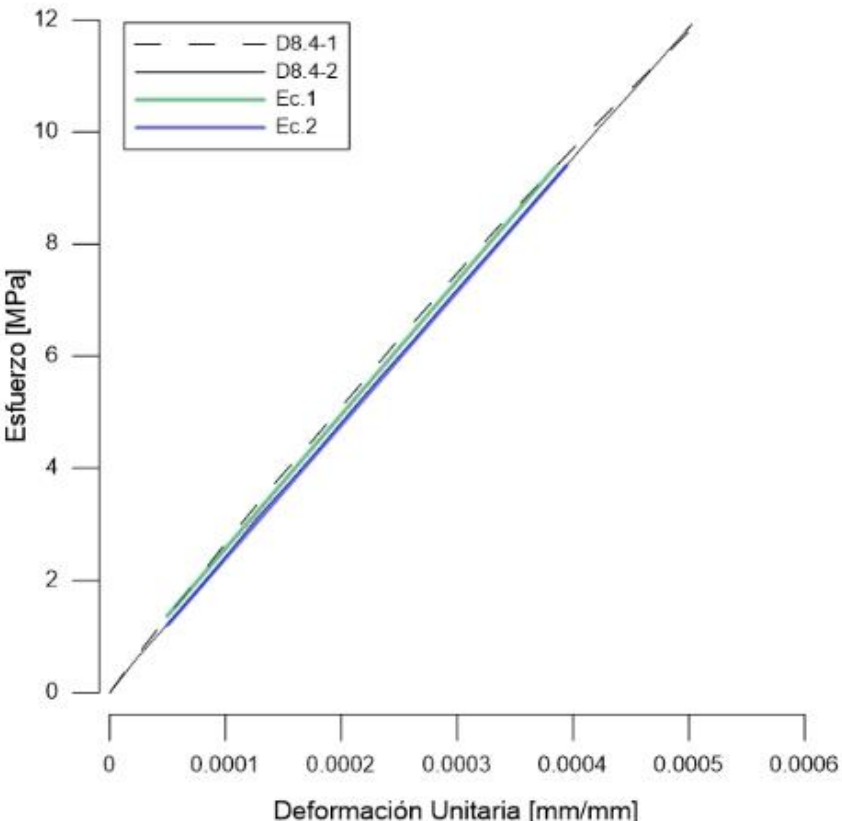
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10	cm	Carga Máxima	191.50	KN		
Altura Probeta:	20	cm	Resistencia Máx.	23.75	MPa		
Área Probeta:	200	cm ²	Resistencia Máx.	242.35	Kgf/cm2		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2331.5	Kgf/m3		
ID:	D7.3	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.414	S2 [MPa]	9.279	ξ_2	0.000359	Ec1 [MPa]	25455.698
	1.498		9.283		0.000358	Ec2 [MPa]	25276.446
	1.602		9.282		0.000362	Ec3 [MPa]	24614.951
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ_2 deformación unitaria en S2						Ec Prom [MPa]	24945.698

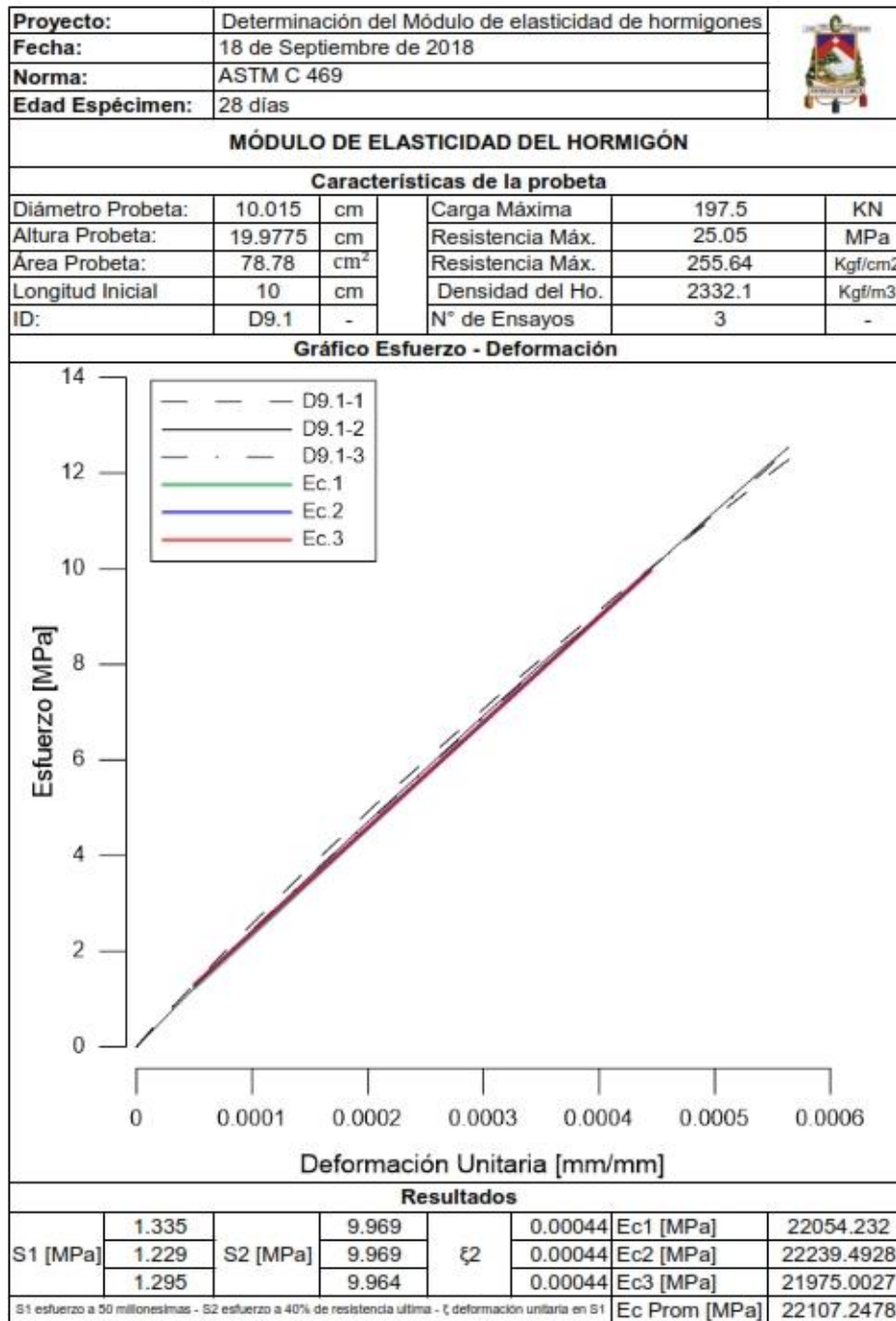
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10	cm	Carga Máxima	191.50	KN		
Altura Probeta:	20	cm	Resistencia Máx.	23.75	MPa		
Área Probeta:	200	cm ²	Resistencia Máx.	242.35	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2366.5	Kgf/m ³		
ID:	D7.4	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.182	S2 [MPa]	9.280	ξ2	0.000384	Ec1 [MPa]	24281.916
	1.328		9.283		0.000373	Ec2 [MPa]	24666.940
	1.306		9.279		0.000381	Ec3 [MPa]	24126.514
S1 esfuerzo a 90 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ deformación unitaria en S2					Ec Prom [MPa]	24396.727	


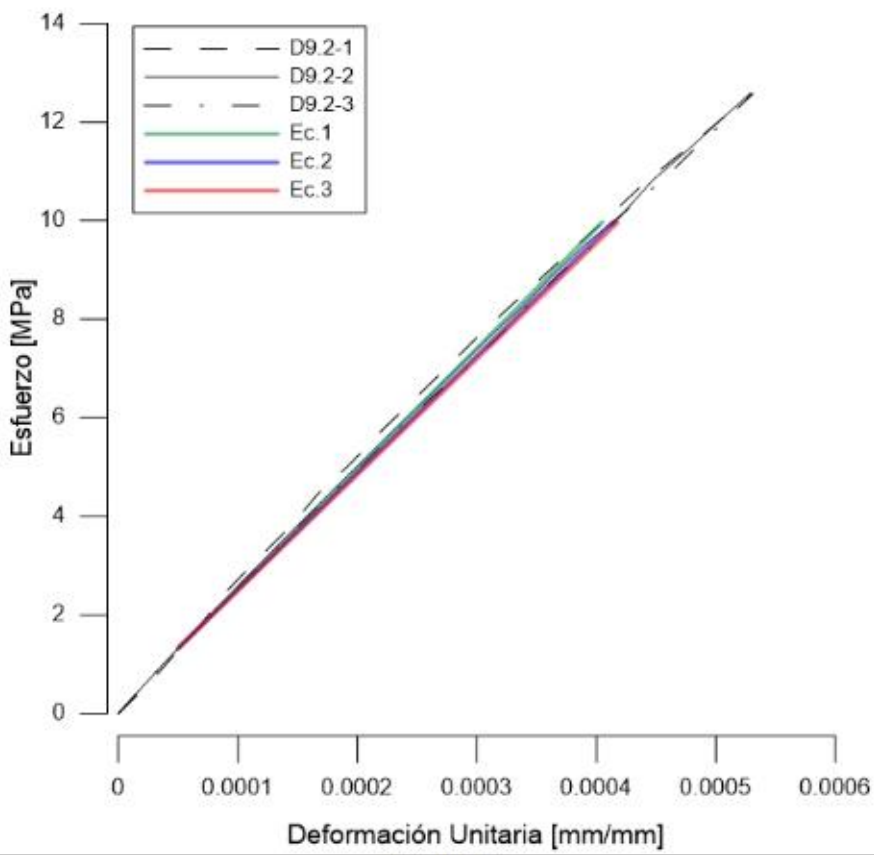
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	9.998	cm	Carga Máxima	189.5	KN		
Altura Probeta:	19.974	cm		Resistencia Máx.	23.83	MPa	
Área Probeta:	78.50	cm ²		Resistencia Máx.	243.14	Kgf/cm ²	
Longitud Inicial	10	cm		Densidad del Ho.	2356.7	Kgf/m ³	
ID:	D8.1	-		N° de Ensayos	3	-	
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.529	S2 [MPa]	9.401	ξ2	0.00037	Ec1 [MPa]	24872.2617
	1.391		9.404		0.00037	Ec2 [MPa]	24653.1262
	1.250		9.403		0.00038	Ec3 [MPa]	24706.5163
						Ec Prom [MPa]	24679.8212


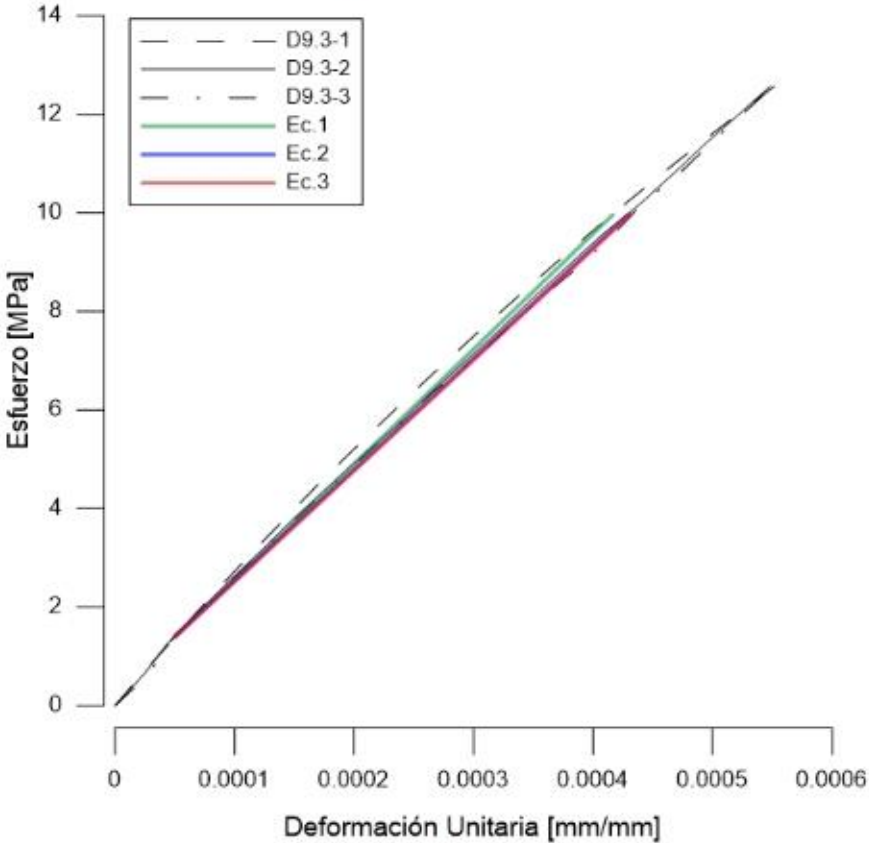
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.025	cm	Carga Máxima	189.5	KN		
Altura Probeta:	19.925	cm	Resistencia Máx.	23.83	MPa		
Área Probeta:	78.93	cm ²	Resistencia Máx.	243.14	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2343.7	Kgf/m ³		
ID:	D8.2	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.243	S2 [MPa]	9.403	ξ_2	0.00041	Ec1 [MPa]	22604.521
	1.185		9.402		0.00041	Ec2 [MPa]	22792.945
	1.187		9.401		0.00043	Ec3 [MPa]	21789.8226
						Ec Prom [MPa]	22291.3838


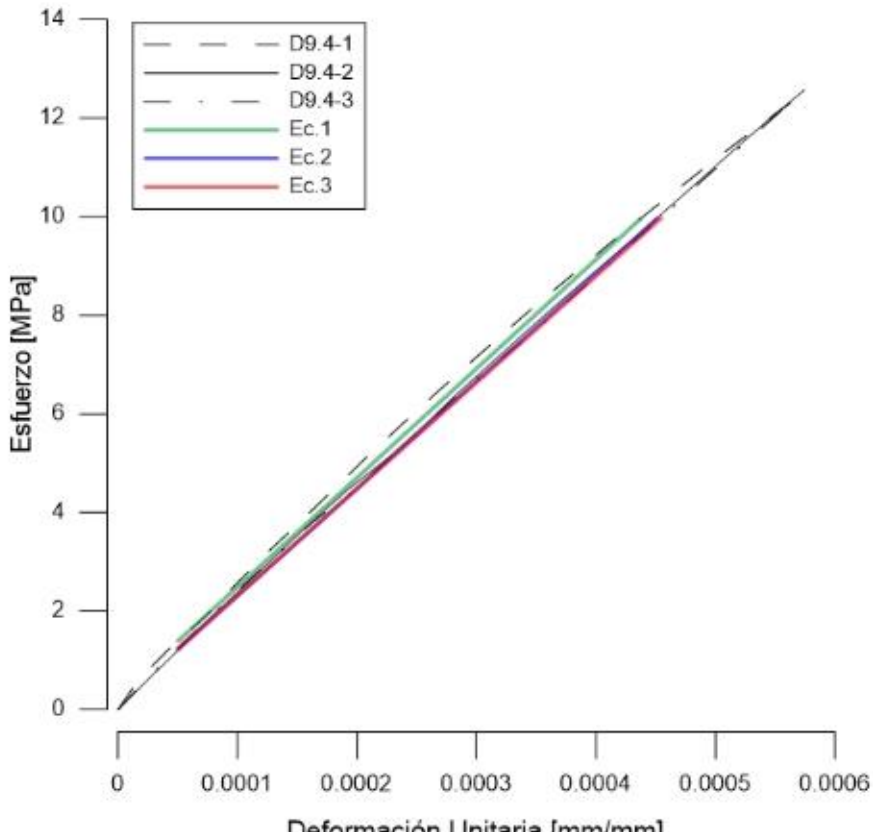
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.0075	cm		Carga Máxima	189.5	KN	
Altura Probeta:	20.0425	cm		Resistencia Máx.	23.83	MPa	
Área Probeta:	78.66	cm ²		Resistencia Máx.	243.14	Kgf/cm ²	
Longitud Inicial	10	cm		Densidad del Ho.	2358.6	Kgf/m ³	
ID:	D8.3	-		N° de Ensayos	3	-	
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.289	S2 [MPa]	9.403	ξ_2	0.00038	Ec1 [MPa]	24778.1293
	1.329		9.401		0.00038	Ec2 [MPa]	24607.5346
	1.481		9.404		0.00038	Ec3 [MPa]	24080.93
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ_2 deformación unitaria en S1						Ec Prom [MPa]	24344.2323

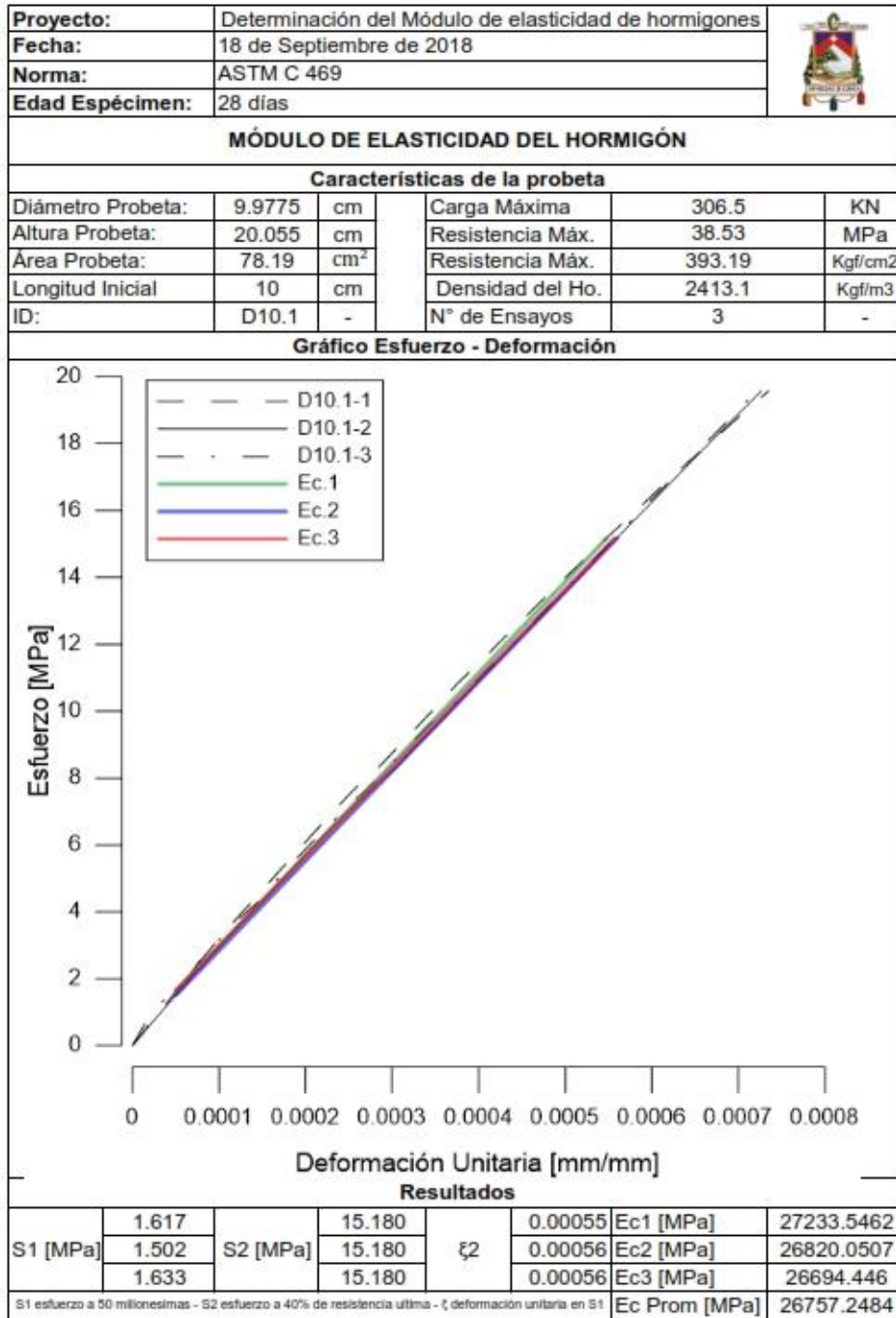
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.05	cm	Carga Máxima	189.5	KN		
Altura Probeta:	19.9475	cm	Resistencia Máx.	23.83	MPa		
Área Probeta:	79.33	cm ²	Resistencia Máx.	243.14	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2333.9	Kgf/m ³		
ID:	D8.4	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.366	S2 [MPa]	9.403	ξ_2	0.00039	Ec1 [MPa]	23883.1859
	1.208		9.402		0.00039	Ec2 [MPa]	23783.859
	1.208		9.402		0.00039	Ec3 [MPa]	-
						Ec Prom [MPa]	23783.859


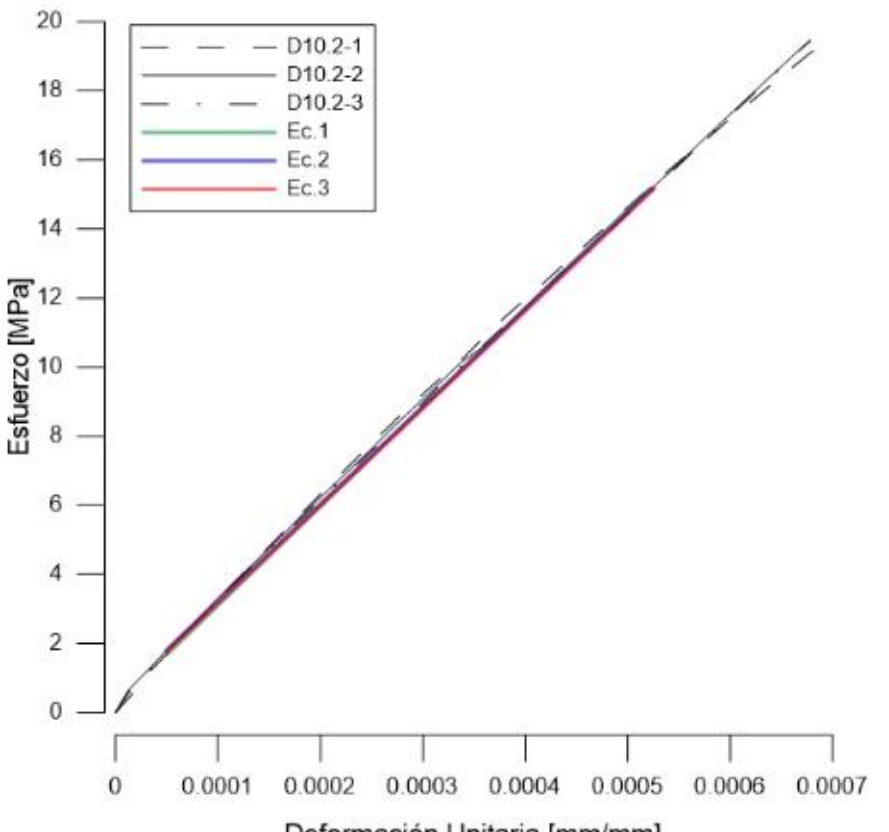



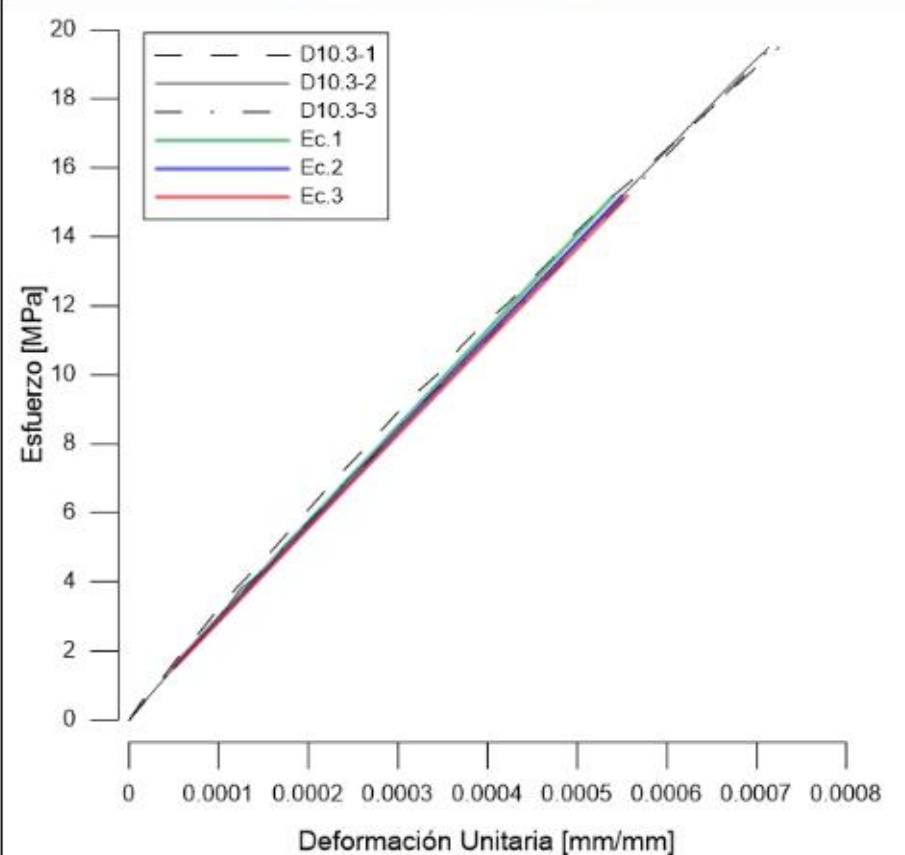
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10	cm	Carga Máxima	197.5	KN		
Altura Probeta:	20.0225	cm	Resistencia Máx.	25.05	MPa		
Área Probeta:	78.54	cm ²	Resistencia Máx.	255.64	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2340.7	Kgf/m ³		
ID:	D9.2	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.309	S2 [MPa]	9.973	ξ_2	0.00041	Ec1 [MPa]	24405.8609
	1.331		9.970		0.00041	Ec2 [MPa]	23733.2516
	1.324		9.963		0.00042	Ec3 [MPa]	23505.2423
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ deformación unitaria en S1					Ec Prom [MPa]		23619.2469


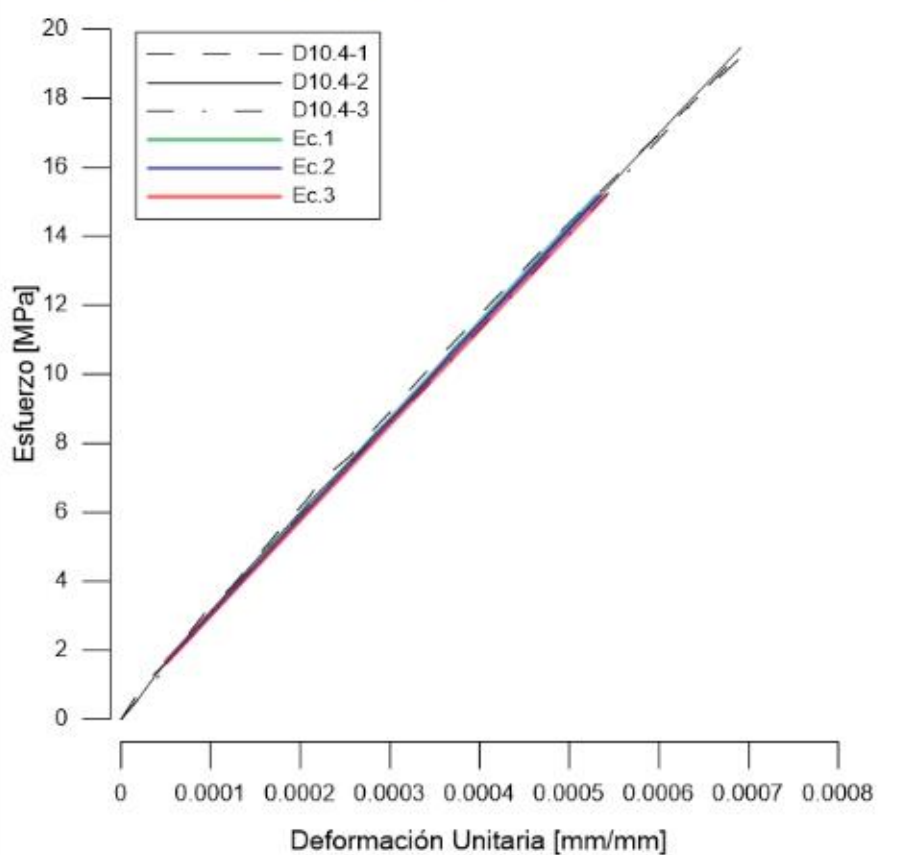
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10	cm	Carga Máxima	197.5	KN		
Altura Probeta:	19.963	cm	Resistencia Máx.	25.05	MPa		
Área Probeta:	78.54	cm ²	Resistencia Máx.	255.64	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2329.1	Kgf/m ³		
ID:	D9.3	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.393	S2 [MPa]	9.960	ξ2	0.00042	Ec1 [MPa]	23377.3242
	1.417		9.961		0.00043	Ec2 [MPa]	22514.1262
	1.394		9.972		0.00043	Ec3 [MPa]	22486.0678
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ deformación unitaria en S1					Ec Prom [MPa]		22500.097

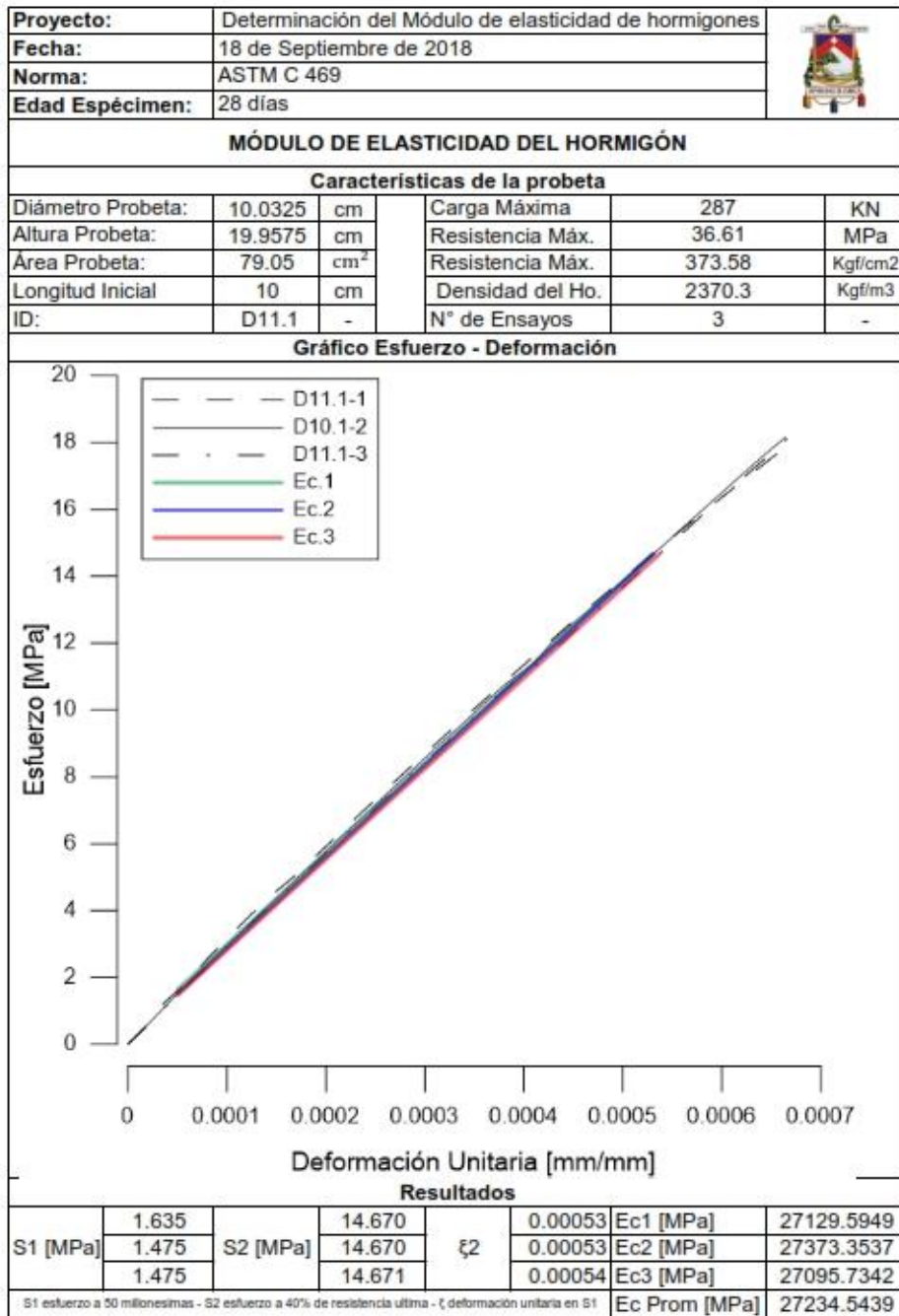
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10	cm	Carga Máxima	197.5	KN		
Altura Probeta:	19.96	cm	Resistencia Máx.	25.05	MPa		
Área Probeta:	78.54	cm ²	Resistencia Máx.	255.64	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2333.7	Kgf/m ³		
ID:	D9.4	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.387	S2 [MPa]	9.961	ξ_2	0.00044	Ec1 [MPa]	22124.6285
	1.219		9.960		0.00045	Ec2 [MPa]	21798.3649
	1.243		9.971		0.00045	Ec3 [MPa]	21577.9324
S1 esfuerzo a 50 millonestmas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia ultima - ξ deformación unitaria en S1					Ec Prom [MPa]		21688.1487

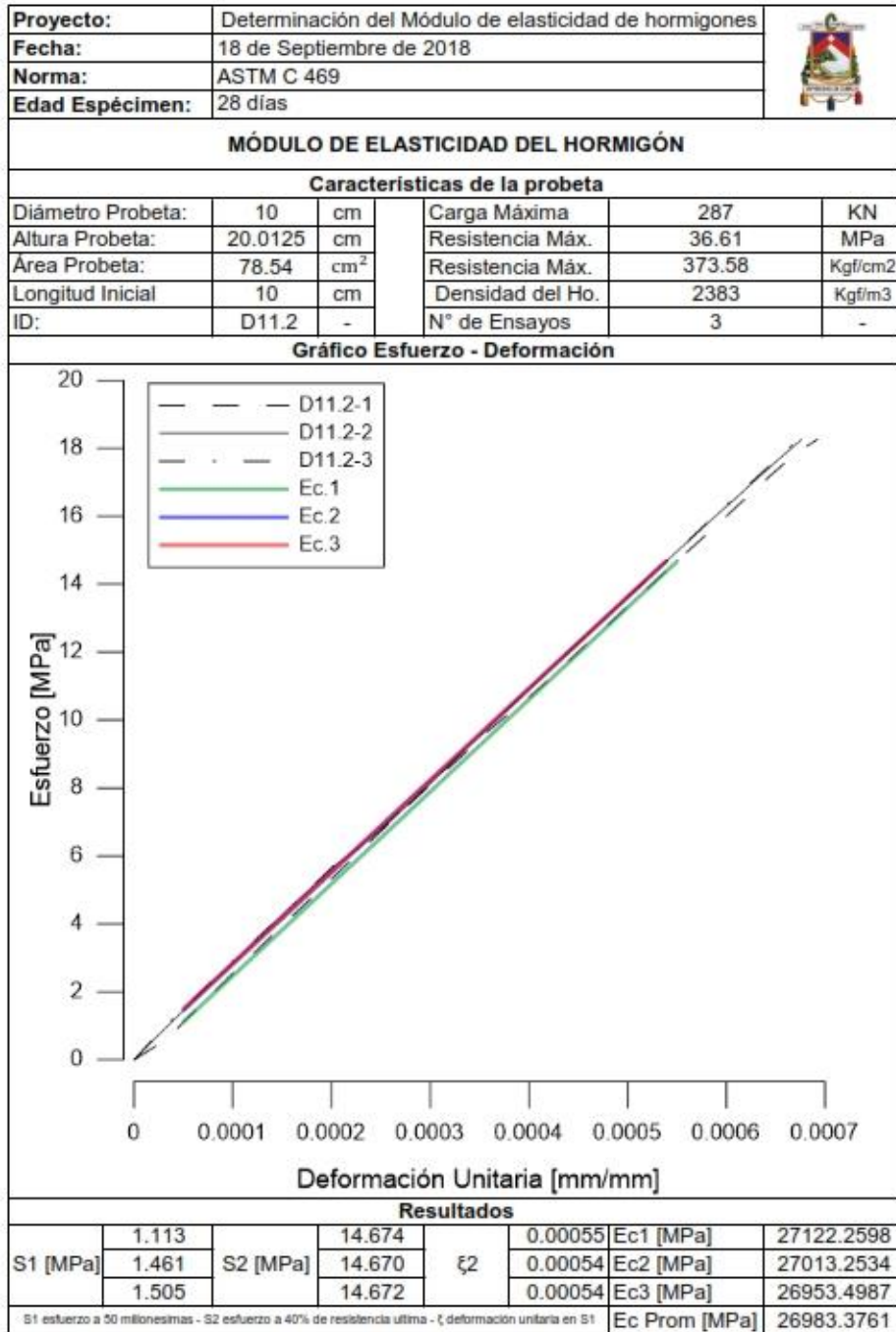


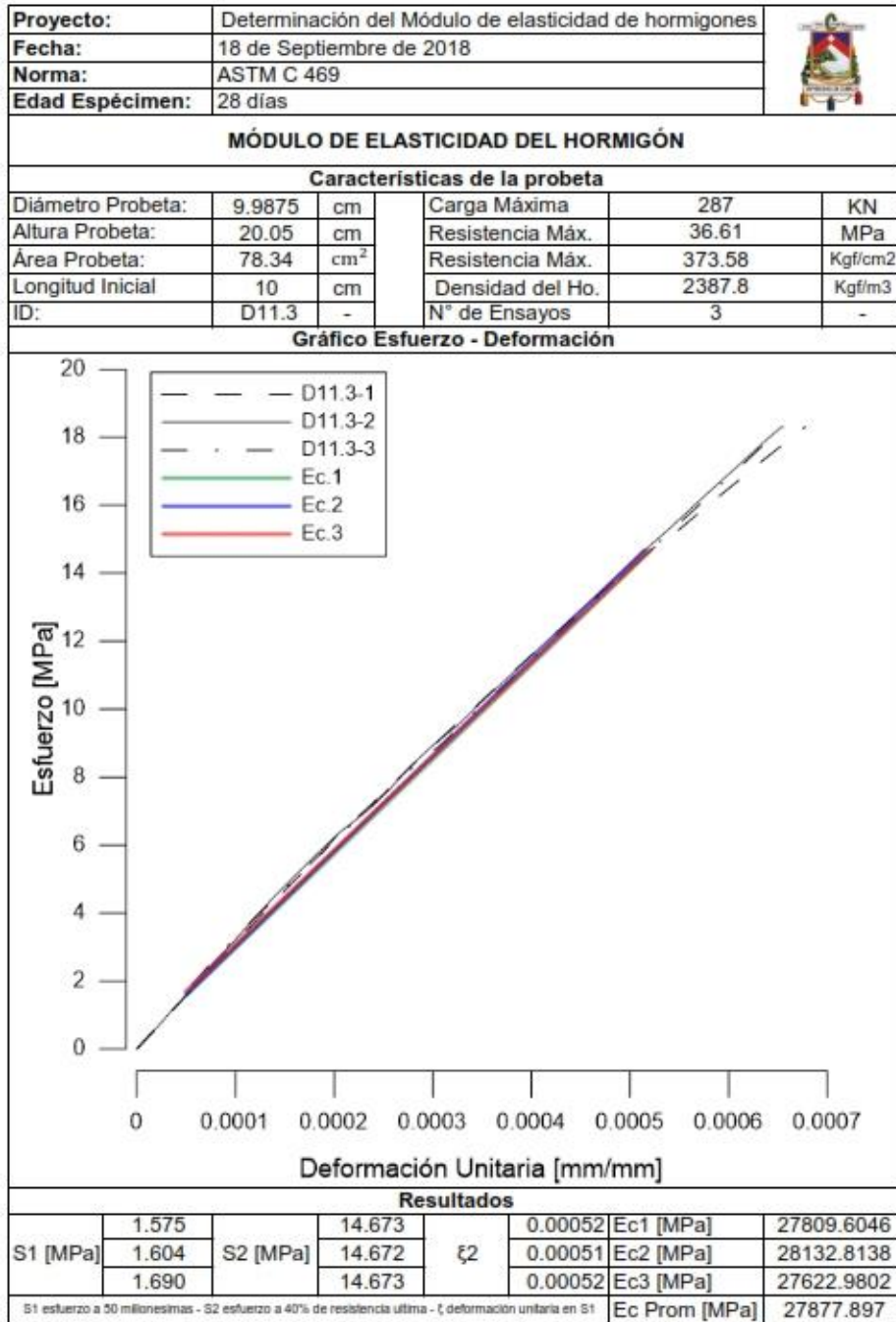
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.0125	cm	Carga Máxima	306.5	KN		
Altura Probeta:	20.04	cm	Resistencia Máx.	38.53	MPa		
Área Probeta:	78.74	cm ²	Resistencia Máx.	393.19	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2405.1	Kgf/m ³		
ID:	D10.2	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.676	S2 [MPa]	15.178	ξ_2	0.00052	Ec1 [MPa]	28637.5099
	1.798		15.180		0.00052	Ec2 [MPa]	28202.9763
	1.768		15.181		0.00053	Ec3 [MPa]	28179.7364
					Ec Prom [MPa]		28191.3563

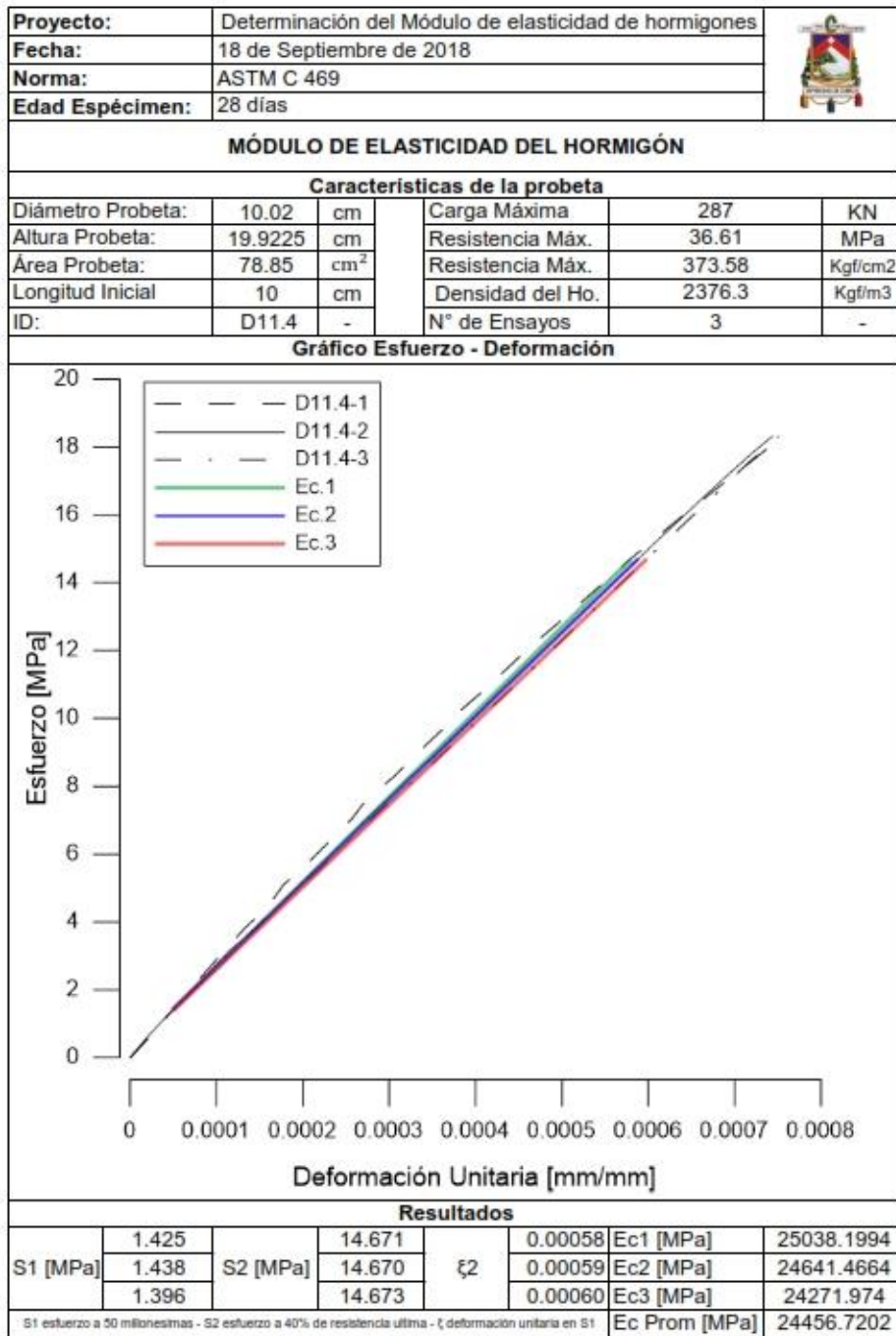
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.005	cm	Carga Máxima	306.5	KN		
Altura Probeta:	20.0075	cm	Resistencia Máx.	38.53	MPa		
Área Probeta:	78.62	cm ²	Resistencia Máx.	393.19	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2395.2	Kgf/m ³		
ID:	D10.3	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.581	S2 [MPa]	15.181	ξ2	0.00054	Ec1 [MPa]	27756.6439
	1.526		15.180		0.00055	Ec2 [MPa]	27336.6365
	1.526		15.180		0.00056	Ec3 [MPa]	27011.537
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ2 deformación unitaria en S1						Ec Prom [MPa]	27174.0867


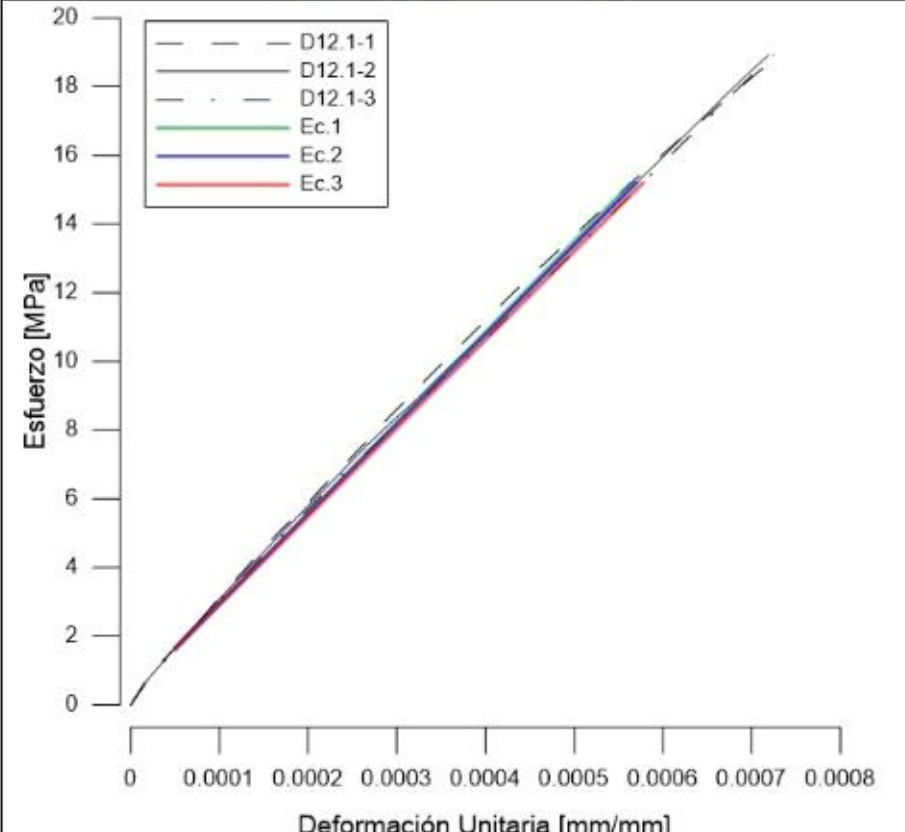
Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.015	cm	Carga Máxima	306.5	KN		
Altura Probeta:	20.01	cm	Resistencia Máx.	38.53	MPa		
Área Probeta:	78.78	cm ²	Resistencia Máx.	393.19	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2395.4	Kgf/m ³		
ID:	D10.4	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.690	S2 [MPa]	15.180	ξ_2	0.00053	Ec1 [MPa]	28074.3222
	1.649		15.181		0.00053	Ec2 [MPa]	27931.3236
	1.635		15.176		0.00054	Ec3 [MPa]	27607.9119
						Ec Prom [MPa]	27769.6177


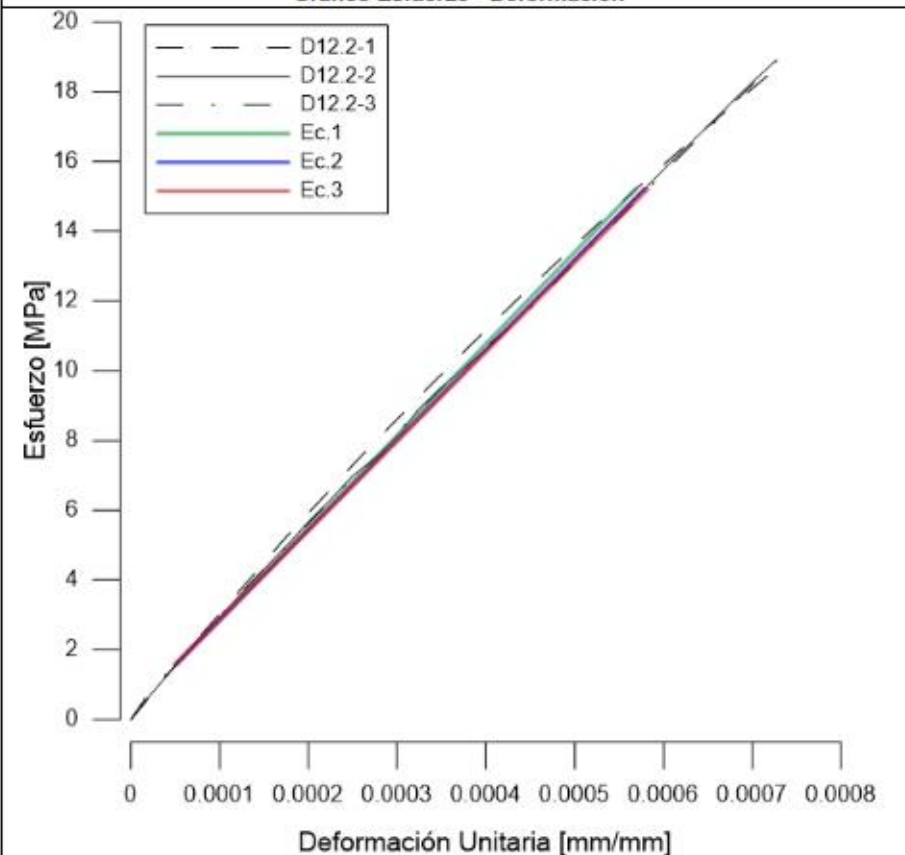



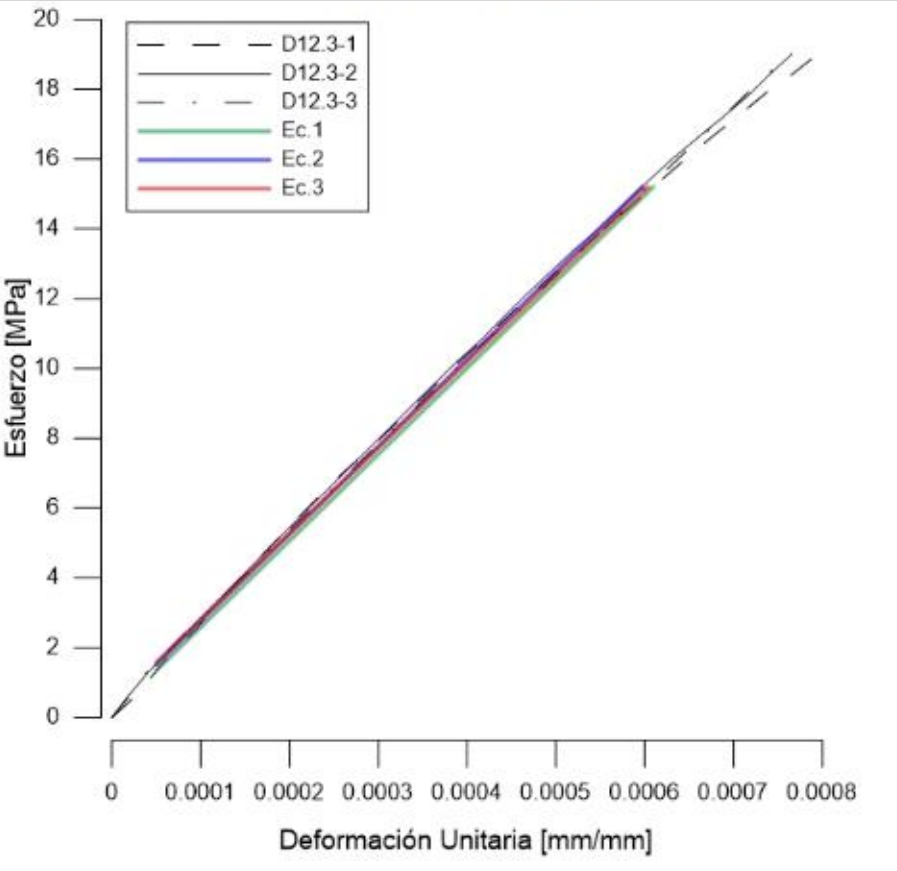



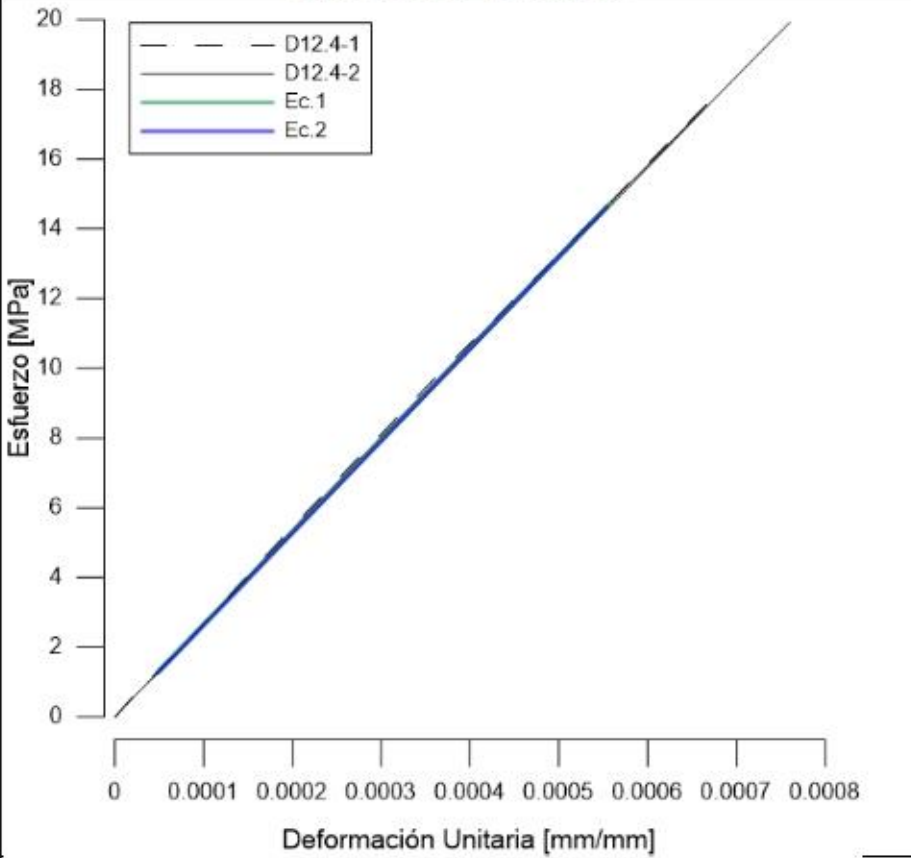




Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.0125	cm	Carga Máxima	298	KN		
Altura Probeta:	20.0775	cm	Resistencia Máx.	37.99	MPa		
Área Probeta:	78.74	cm ²	Resistencia Máx.	387.62	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2356.6	Kgf/m ³		
ID:	D12.1	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.602	S2 [MPa]	15.203	ξ_2	0.00056	Ec1 [MPa]	26409.19674
	1.652		15.206		0.00057	Ec2 [MPa]	26039.84919
	1.617		15.205		0.00058	Ec3 [MPa]	26300.98163
					Ec Prom [MPa]		26250.00919

Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	10.02	cm	Carga Máxima	298	KN		
Altura Probeta:	20.02	cm	Resistencia Máx.	37.99	MPa		
Área Probeta:	78.85	cm ²	Resistencia Máx.	387.62	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2358.8	Kgf/m ³		
ID:	D12.2	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.566	S2 [MPa]	15.203	ξ2	0.00057	Ec1 [MPa]	26300.98163
	1.550		15.203		0.00058	Ec2 [MPa]	25858.53775
	1.595		15.207		0.00058	Ec3 [MPa]	25586.81438
					Ec Prom [MPa]		25722.67607

Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	9.99	cm	Carga Máxima	298	KN		
Altura Probeta:	19.9775	cm	Resistencia Máx.	37.99	MPa		
Área Probeta:	78.38	cm ²	Resistencia Máx.	387.62	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2365.2	Kgf/m ³		
ID:	D12.3	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.355	S2 [MPa]	15.205	ξ_2	0.00061	Ec1 [MPa]	24753.88704
	1.507		15.206		0.00060	Ec2 [MPa]	24998.79268
	1.574		15.203		0.00060	Ec3 [MPa]	24624.35546
S1 esfuerzo a 50 millonésimas - S2 esfuerzo a 40% de resistencia última - ξ deformación unitaria en S1						Ec Prom [MPa]	24811.57407

Proyecto:	Determinación del Módulo de elasticidad de hormigones						
Fecha:	18 de Septiembre de 2018						
Norma:	ASTM C 469						
Edad Espécimen:	28 días						
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN							
Características de la probeta							
Diámetro Probeta:	9.9925	cm	Carga Máxima	298	KN		
Altura Probeta:	20.04	cm	Resistencia Máx.	37.99	MPa		
Área Probeta:	78.42	cm ²	Resistencia Máx.	387.62	Kgf/cm ²		
Longitud Inicial	10	cm	Densidad del Ho.	2358.6	Kgf/m ³		
ID:	D12.4	-	N° de Ensayos	3	-		
Gráfico Esfuerzo - Deformación							
							
Resultados							
S1 [MPa]	1.319	S2 [MPa]	14.738	ξ2	0.00056	Ec1 [MPa]	26362.88157
	1.264		14.629		0.00055	Ec2 [MPa]	26438.27795
	-		-		-	Ec3 [MPa]	-
						Ec Prom [MPa]	26438.27795

9.6 Anexo 6

Tabla 41 Velocidad de Onda obtenida con Ultrasonido y resultados de Módulo de elasticidad Dinámico y Estático, Poisson=0.2

Dosificación	Espécimen	Densidad [Kg/m ³]	Vp [m/s]			Ec _{dinámico} [MPa]			Ec _{dinámico Prom} [MPa]	Ec _{estático} [MPa]	Ec _{estático prom} [MPa]
			1	2	3	1	2	3			
D1	1.1	2375.5	4090	4090	4050	35763.84	35763.84	35067.72	35531.80	25414.75	26424.96
	1.2	2363.6	4130	4140	4140	36466.80	36460.04	36460.04	36462.29	26577.87	
	1.3	2374.9	4130	4180	4150	36466.80	37345.68	36811.54	36874.68	27093.34	
	1.4	2387.1	4120	4150	4150	36290.42	37000.65	37000.65	36763.90	26954.88	
	1.5	2375.5	4700	4700	4660	47227.32	47227.32	46426.87	46960.50	26424.96	
	1.6	2370.8	4090	4110	4130	35763.84	36043.01	36394.65	36067.17	26083.96	
D2	2.1	2377.5	4100	4120	4110	35938.94	36320.97	36144.87	36134.93	26168.66	25751.78
	2.2	2372.1	4120	4130	4130	36290.42	36414.61	36414.61	36373.21	26466.51	
	2.3	2350.3	4100	4110	4110	35938.94	35731.35	35731.35	35800.55	25750.69	
	2.4	2363.6	4090	4090	4020	35763.84	35584.68	34377.05	35241.86	25052.32	
	2.5	2375.2	4100	4120	4120	35938.94	36285.84	36285.84	36170.20	26212.75	
	2.6	2383.4	4040	4050	4050	34894.76	35184.35	35184.35	35087.82	24859.77	
D3	3.1	2356.1	3950	4080	4080	33357.36	35298.52	35298.52	34651.47	24314.34	22982.20
	3.2	2360.2	4080	4090	4110	35589.17	35533.50	35881.86	35668.18	25585.22	
	3.3	2365	3980	3990	3960	33865.98	33885.93	33378.29	33710.07	23137.58	
	3.4	2362.2	3880	3770	3850	32185.55	30216.34	31512.34	31304.74	20130.93	
	3.5	2357.3	3940	3930	3930	33188.68	32767.44	32767.44	32907.85	22134.81	
	3.6	2319.3	3930	4010	3990	33020.42	33565.12	33231.14	33272.23	22590.28	
D4	4.1	2414.7	4130	4130	4180	36466.80	37068.57	37971.54	37168.97	27461.21	27728.60
	4.2	2418.6	4230	4230	4230	38254.13	38948.19	38948.19	38716.84	29396.04	
	4.3	2403.1	4170	4180	4180	37176.60	37789.13	37789.13	37584.95	27981.19	
	4.4	2402.3	4040	4090	4090	34894.76	36167.32	36167.32	35743.14	25678.92	
	4.5	2408.1	4150	4170	4180	36820.84	37686.79	37867.76	37458.46	27823.08	
	4.6	2395.5	4180	4180	4190	37355.12	37669.62	37850.07	37624.94	28031.17	
D5	5.1	2398.9	4200	4210	4220	37713.44	38266.51	38448.51	38142.82	28678.53	28214.71
	5.2	2394.3	4170	4180	4170	37176.60	37650.75	37470.82	37432.72	27790.90	
	5.3	2404.7	4200	4210	4200	37713.44	38359.03	38177.02	38083.16	28603.95	
	5.4	2407.1	4200	4210	4210	37713.44	38397.31	38397.31	38169.35	28711.69	
	5.5	2373.1	4180	4130	4140	37355.12	36429.96	36606.59	36797.22	26996.53	
	5.6	2403	4190	4210	4200	37534.06	38331.91	38150.03	38005.33	28506.67	
D6	6.1	2384.7	4030	4120	4130	34722.23	36430.97	36608.03	35920.41	25900.51	26358.51
	6.2	2389.3	4180	4180	4180	37355.12	37572.12	37572.12	37499.79	27874.74	
	6.3	2377.2	4100	4090	4070	35938.94	35789.44	35440.27	35722.88	25653.60	
	6.4	2380.6	4160	4150	4160	36998.51	36899.90	37077.94	36992.11	27240.14	
	6.5	2366.6	4070	4000	4070	35414.93	34079.04	35282.24	34925.40	24656.75	
	6.6	2379.4	4130	4146	4140	36466.80	36810.23	36703.77	36660.27	26825.33	
D7	7.1	2259.2	4010	4020	4020	34378.45	32858.62	32858.62	33365.23	22706.54	24795.22
	7.2	2373.7	3940	3960	3960	33188.68	33501.07	33501.07	33396.94	22746.18	
	7.3	2368.6	4020	4020	4030	34550.13	34449.77	34621.38	34540.42	24175.53	
	7.4	2369.2	4100	4100	4110	35938.94	35843.63	36018.69	35933.75	25917.19	
	7.5	2331.5	4130	4130	4130	36466.80	35791.35	35791.35	36016.50	26020.62	
	7.6	2366.5	4160	4160	4170	36998.51	36858.33	37035.75	36964.20	27205.25	
D8	8.1	2294.1	4040	4040	4040	34894.76	33699.04	33699.04	34097.62	23622.02	23604.78
	8.2	2352.3	4000	3970	3970	34207.20	33366.93	33366.93	33647.02	23058.77	
	8.3	2356.7	4020	4020	4050	34550.13	34276.69	34790.19	34539.00	24173.76	
	8.4	2343.7	3970	3970	3970	33696.02	33244.94	33244.94	33395.30	22744.12	
	8.5	2358.6	4050	4060	4060	35067.72	34990.40	34990.40	35016.17	24770.22	
	8.6	2333.9	4000	4000	4000	34207.20	33608.16	33608.16	33807.84	23259.80	



D9	9.1	2311	3820	3840	3860	31197.82	30669.37	30989.68	30952.29	19690.36	21262.35
	9.2	2345.6	3930	3940	3940	33020.42	32770.94	32770.94	32854.10	22067.63	
	9.3	2332.1	3920	3930	3950	32852.59	32417.15	32747.93	32672.56	21840.70	
	9.4	2340.7	3970	3970	3990	33696.02	33202.38	33537.76	33478.72	22848.40	
	9.5	2329.1	3810	3830	3930	31034.70	30748.80	32375.44	31386.31	20232.89	
	9.6	2333.7	3850	3900	3910	31689.76	31946.02	32110.06	31915.28	20894.10	
D10	10.1	2342	4220	4220	4200	38073.47	37536.55	37181.59	37597.20	27996.50	28675.62
	10.2	2404.2	4210	4220	4230	37893.24	38533.46	38716.30	38381.00	28976.25	
	10.3	2413.1	4230	4250	4240	38254.13	39227.96	39043.57	38841.88	29552.36	
	10.4	2405.1	4210	4230	4270	37893.24	38730.79	39466.75	38696.93	29371.16	
	10.5	2395.2	4240	4260	4260	38435.21	39120.42	39120.42	38892.02	29615.02	
	10.6	2395.4	4120	4110	4120	36290.42	36417.00	36594.43	36433.95	26542.44	
D11	11.1	2381.2	4130	4140	4140	36466.80	36731.53	36731.53	36643.29	26804.11	26948.05
	11.2	2381.8	4180	4180	4180	37355.12	37454.19	37454.19	37421.16	27776.45	
	11.3	2370.3	4160	4160	4140	36998.51	36917.52	36563.39	36826.47	27033.09	
	11.4	2383	4110	4120	4110	36114.47	36405.00	36228.49	36249.32	26311.64	
	11.5	2387.8	4430	4420	4410	41957.05	41984.11	41794.36	41911.84	26948.05	
	11.6	2376.3	4140	4130	4150	36643.61	36479.08	36833.24	36651.98	26814.97	
D12	12.1	2356.7	4040	4070	4070	34894.76	35134.65	35134.65	35054.69	24818.36	24847.80
	12.2	2367	4020	4000	4000	34550.13	34084.80	34084.80	34239.91	23799.89	
	12.3	2356.6	4200	4200	4200	37713.44	37413.38	37413.38	37513.40	27891.75	
	12.4	2358.8	4220	4280	4280	38073.47	38888.50	38888.50	38616.82	29271.03	
	12.5	2365.2	3920	3936	3910	32852.59	32977.71	32543.47	32791.26	21989.08	
	12.6	2358.6	3890	3890	3900	32351.67	32121.51	32286.88	32253.35	21316.69	