



UNIVERSIDAD DE CUENCA.

Facultad de Ingeniería.

Carrera de Ingeniería Civil

“Diseño de una mezcla de hormigón de alta resistencia y su comportamiento en una viga de hormigón armado sometida a cargas de flexión”

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

Autores:

Álvaro Román Bacuilima Muñoz
C.I: 0106909807

Wilson Paul Guillén Chima
C.I: 0106968134

Director:

Ing. Benigno Alfredo Vázquez López
C.I: 0101815892

Cuenca-Ecuador
15/04/2019



RESUMEN.

El hormigón es el material más utilizado en el campo de la construcción y en el caso de construcciones que necesiten resistir grandes cargas los hormigones de resistencia normal no son suficientes. Por ello han incrementado la resistencia de los hormigones conforme avanzan los años, sin embargo, los hormigones de alta resistencia pueden resultar costosos debido al tipo de materiales que normalmente incluyen. El objetivo de esta investigación es realizar el diseño de un hormigón con una resistencia de 1000 kg/cm² sin la incorporación de materiales de granulometría controlada ni fibras. Para alcanzar esta resistencia a compresión, se emplea el método ACI 211.4R como punto de partida para desarrollar hormigones de mayor resistencia ya que el método tiene valores de referencia para una resistencia máxima de 843 kg/cm². Luego de tener el diseño para una resistencia de 843 kg/cm² se debe realizar variaciones de la relación a/c, la cantidad de aditivo, entre otros, para alcanzar la resistencia requerida. Además, se realizaron ensayos no destructivos y destructivos en el hormigón endurecido. Los resultados obtenidos de estos ensayos en el hormigón de alta resistencia superan en gran medida las características de un hormigón de resistencia normal. Por otra parte, se realizaron vigas de hormigón armado con un $f'c$ de 1000 kg/cm², utilizando el mismo refuerzo de acero y las mismas dimensiones que de una viga con un $f'c$ de 450 kg/cm² realizada en una materia de decimo semestre. El comportamiento del hormigón de resistencia de 1000 kg/cm² en vigas de hormigón armado resultó más adecuado, ya que las vigas con hormigón de 1000 kg/cm² presentaron falla dúctil mientras que las vigas con hormigón de 450 kg/cm² presentaron falla frágil.

Palabras Clave: Hormigones de alta resistencia. Índice esclerométrico. Velocidad de pulso.



ABSTRACT.

Concrete is the most widely used material in the field of construction, but in the case of constructions that need to support great pressures, the concretes of normal strength are not enough. For this reason, the concrete strength has been increased over the years; however, high strength concrete can be expensive due to the type of materials that usually include. The objective of this research project is to develop a design of concrete with a strength of 1000 kg / cm² without incorporating of materials of controlled granulometry or fibers. The method employed to obtain this compression strength, is the ACI 211.4R. This method is used as a starting point to develop higher strength concretes, since the method has reference values for a maximum resistance of 843 kg/cm². After having the design completed with a strength of 843 kg/cm², some variations of the a/c ratio must be made, as well as the amount of additive, among others to achieve the required resistance. Additionally, non-destructive and destructive tests were performed on the hardened concrete. The results obtained from the tests performed on high strength concrete substantially exceed the characteristics of a normal strength concrete. Moreover, some reinforced concrete beams were made with a f'c of 1000 kg/cm² using the same steel reinforcement and the same dimensions as a beam with a f'c of 450 kg/cm² made for a subject of tenth semester. The behavior of the concrete of strength of 1000 kg/cm² in reinforced concrete beams was more appropriate than the concrete of 450 kg/cm². Since, the beams with concrete of 1000 kg/cm² had ductile failure while the beams with concrete of 450 kg/cm² had fragile failure.

Key Words: High-strength concrete. Sclerometric index. Pulse velocity.



INDICE GENERAL

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
INDICE GENERAL.....	4
INDICE DE TABLAS.....	6
INDICE DE GRÁFICAS.....	7
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	8
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Antecedentes.....	15
1.2 Descripción del Problema.....	18
1.3 Justificación.....	18
1.4 Objetivos.....	18
1.4.1 Objetivo general.....	18
1.4.2 Objetivos específicos.....	18
1.5 Alcance.....	19
CAPITULO 2: MATERIALES Y CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.....	20
2.1 Agregados.....	20
2.1.1 Análisis granulométrico en los agregados, fino y grueso.....	21
2.1.2 Determinación de la densidad y absorción del agregado fino.....	23
2.1.3 Determinación de la densidad, y absorción del agregado grueso.....	25
2.1.4 Determinación de la masa unitaria y el porcentaje de vacíos del agregado fino y del agregado grueso.....	27
2.1.5 Determinación del valor de la degradación del agregado grueso.....	30
2.2 Material cementante.....	31
2.3 Agua.....	31
2.4 Reductor de agua.....	31
2.5 Varillas corrugadas de acero.....	32
CAPITULO 3: METODOLOGIA DE DISEÑO DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA.....	33
3.1 Método ACI 211-4R.....	33
3.2 Diseño del HAR superior a 1000 kg/cm ²	37
CAPITULO 4: RESULTADOS EN EL HORMIGÓN SIMPLE.....	39
4.1 Densidad.....	39



4.2	Índice esclerométrico del hormigón.....	39
4.2.1	Verificación del crecimiento del índice esclerométrico en el tiempo.	42
4.2.2	Índice esclerométrico a los 21 días en probetas cilíndricas.	43
4.2.3	Índice esclerométrico a los 21 días en vigas simples (sin refuerzo de acero). 43	
4.3	Velocidad de pulso ultrasónico.....	44
4.3.1	Verificación del crecimiento del módulo dinámico de elasticidad en el tiempo. 47	
4.3.2	Módulo dinámico de elasticidad a los 21 días en probetas cilíndricas.....	48
4.3.3	Velocidad del pulso a los 21 días en vigas simples (sin refuerzo de acero)...	48
4.4	Resistencia a la compresión.....	49
4.4.1	Cambio en el tiempo de la resistencia a compresión.....	50
4.4.2	Resistencia a compresión a los 21 días.....	50
4.4.3	Curva esfuerzo-deformación.....	51
4.5	Módulo de elasticidad.	51
4.5.1	Resultados de módulo de elasticidad obtenida a los 21 días.....	53
4.6	Resistencia a la tracción indirecta.	55
4.6.1	Resultados resistencia a tracción indirecta a los 21 días.....	56
4.7	Resistencia a flexión (Módulo De ruptura).	57
4.7.1	Resultados de Módulo de ruptura.	59
CAPITULO 5: DISEÑO Y ANÁLISIS DE VIGAS DE HORMIGON ARMADO.....		61
5.1	Diseño de una viga de hormigón armado.....	61
5.1.1	Diseño del refuerzo de acero a flexión.....	61
5.1.2	Diseño del refuerzo de acero a cortante (Refuerzo transversal).	63
5.2	Índice esclerométrico a los 21 días en las vigas de hormigón armado.....	66
5.3	Resultados ensayo a flexión.	67
CAPITULO 6: CORRELACION ENTRE ENSAYOS.		71
6.1	Correlación simple.	71
6.1.1	Coefficiente de correlación de Pearson.....	74
6.1.2	Correlación entre la resistencia a compresión y el índice esclerométrico....	76
6.1.3	Correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso.....	78
6.1.4	Correlación entre el índice esclerométrico y velocidad de pulso.....	79
6.1.5	Correlación entre los resultados de las vigas y de las probetas de los ensayos no destructivos.....	80
6.2	Correlación múltiple.	81



6.2.1	Estimación de coeficiente.....	81
6.2.2	Correlación múltiple entre Numero de rebotes, Velocidad de pulso y Resistencia a compresión.....	82
CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		86
7.1	Conclusiones.....	86
7.2	Recomendaciones.....	89
BIBLIOGRAFÍA.....		90
ANEXOS.....		93
Anexo 1: Tablas.....		93
Anexo 2: Plano viga de hormigón armado.....		98

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1	Granulometría del agregado fino.....	22
Tabla 2	Límites para granulometría del agregado fino.....	22
Tabla 3	Datos de masas para calcular la densidad del agregado fino.....	24
Tabla 4	Datos de masas para calcular la densidad y absorción del agregado grueso.....	26
Tabla 5	Datos para calcular la masa unitaria y absorción del agregado fino.....	28
Tabla 6	Datos para calcular la masa unitaria y absorción del agregado grueso.....	29
Tabla 7	Masas para ensayo de degradación del agregado.....	30
Tabla 8	Revenimiento recomendado. Fuente: comité 211.4r-08 del ACI.....	33
Tabla 9	Tamaño máximo nominal del agregado grueso. Fuente: comité 211.4r-08 del ACI.....	33
Tabla 10	Volumen fraccional del agregado grueso. Fuente: comité 211.4r-08 del ACI.....	34
Tabla 11	Contenido de agua por metro cúbico. Fuente: comité 211.4r-08 del ACI.....	34
Tabla 12	Relación agua/cemento. Fuente: comité 211.4r-08 del ACI.....	35
Tabla 13	Volumen de los materiales.....	36
Tabla 14	Proporción de materiales para 1m ³	37
Tabla 15	Variaciones a partir del diseño del método ACI.....	38
Tabla 16	Dosificación para f'c = 1000 kg/cm ²	38
Tabla 17	Densidad del HAR endurecido.....	39
Tabla 18	Resistencia a compresión de los cilindros de hormigón a partir del índice esclerométrico. Fuente: Manual esclerómetro α Hammer.....	41
Tabla 19	Índice esclerométrico y resistencia asociada a R, en las vigas simples.....	44
Tabla 20	Fuerza y Esfuerzo a tracción.....	57
Tabla 21	Módulo de ruptura en las vigas simples.....	59
Tabla 22	Resultados de diseño a cortante.....	64
Tabla 23	Espaciamiento en la zona de confinamiento.....	65
Tabla 24	Corrección de rebotes. Fuente: Manual esclerómetro.....	66



Tabla 25 Resistencia del hormigón utilizado en las vigas con acero de refuerzo, a partir del # de rebotes.	67
Tabla 26 Promedio de la carga máxima en las vigas con $f'c$ de 1000 Kg/cm ²	70
Tabla 27 Funciones que describen la relación entre X y Y.	74
Tabla 28 Datos de compresión e índice esclerométrico.	76
Tabla 29 $f'c$ asociado corregido para HAR.	77
Tabla 30 Datos de velocidad de pulso y de compresión.	78
Tabla 31 $f'c$ Asociado a la velocidad de pulso.	79
Tabla 32 Resultado de ensayos destructivos y no destructivos en el tiempo.	82
Tabla 33 Coeficientes de correlación múltiple.	83
Tabla 34 Datos para correlación con software PROCEQ.	84
Tabla 35 Coeficientes obtenidos mediante software PROCEQ.	84
Tabla 36 $f'c$ Asociado al índice esclerométrico y velocidad de pulso.	85
Tabla 37 Costo materiales para HAR de 1000 kg/cm ²	88
Tabla 38 Dimensiones y densidad de las probetas a los 21 días.	93
Tabla 39 Resistencia a partir del Índice esclerométrico en las probetas, en el tiempo. .	94
Tabla 40 Resistencia a partir del Índice esclerométrico en las probetas, a los 21 días. .	95
Tabla 41 Módulo dinámico de elasticidad a partir de la velocidad de pulso en las probetas, en el tiempo.	96
Tabla 42 Módulo dinámico de elasticidad a partir de la velocidad de pulso en las probetas, a los 21 días.	96

INDICE DE GRÁFICAS.

Gráfica 1 Curva granulométrica del agregado fino y límites ASTM C33.	23
Gráfica 2 Resistencia a compresión a partir del # de rebotes a diferentes días.	42
Gráfica 3 Resistencia a compresión a los 21 días, a partir del# de rebotes de 27 probetas.	43
Gráfica 4 Cambio del módulo dinámico de elasticidad en el tiempo.	47
Gráfica 5 Módulo dinámico de elasticidad a partir de la velocidad de pulso en 23 probetas.	48
Gráfica 6 Comportamiento del hormigón en el tiempo.	50
Gráfica 7 Resistencia a compresión a los 21 días de curado.	50
Gráfica 8 Curva esfuerzo-deformación.	51
Gráfica 9 Determinación del módulo de elasticidad.	54
Gráfica 10 Curva esfuerzo- desplazamiento de las probetas ensayadas a tracción.	56
Gráfica 11 Curva fuerza desplazamiento de las vigas con $f'c$ de 1000 Kg/cm ²	69
Gráfica 12 Curvas esfuerzo desplazamiento.	70
Gráfica 13 Correlación entre $f'c$ vs # de rebotes.	77
Gráfica 14 Correlación entre $f'c$ vs velocidad de pulso.	78
Gráfica 15 Correlación entre el Índice esclerométrico vs velocidad de pulso.	80



INDICE DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1 Evolución de resistencias de hormigón en rascacielos de EE.UU. Fuente: Concrete Technology Today, 1994.	15
Ilustración 2 Esclerómetro.....	40
Ilustración 3 Verificación de la calibración del equipo.	40
Ilustración 4 Equipo para pulso ultrasónico.	45
Ilustración 5 Tipos de transmisión de pulso. Fuente: Tesis “Resistencia a la Compresión del concreto a Partir de la Velocidad de Pulsos de Ultrasonido”.	46
Ilustración 6 (a) Estimación de la profundidad de la grieta. (b) Estimación de la dirección de la grieta. Fuente: Tesis Resistencia a la compresión del concreto a partir de la velocidad de pulsos de ultrasonido.	47
Ilustración 7 Ensayo a compresión en la prensa hidráulica.....	49
Ilustración 8 Compresión sin neoprenos.	53
Ilustración 9 Ensayo: Módulo de elasticidad.....	53
Ilustración 10 Ensayo de tracción indirecta.....	55
Ilustración 11 Modo de falla del ensayo a tracción.	57
Ilustración 12 Esquema del ensayo a flexión de una viga simple.	59
Ilustración 13 Dimensiones de la viga en centímetros.	61
Ilustración 14 Detalle del estribo cerrado de confinamiento.	65
Ilustración 15 Ensayo de flexión de la viga de hormigón armado.	67
Ilustración 16 Resultado del ensayo a flexión con hormigón de 1000 Kg/cm ²	68
Ilustración 17 Resultado del ensayo a flexión con hormigón de 450 Kg/cm ²	68
Ilustración 18 Falla a flexión en las vigas con f ^c de 1000 Kg/cm ²	69
Ilustración 19 Relación lineal; β_0 : intersección; β_1 : pendiente. Fuente: Walpole et al., 2012	72
Ilustración 20 Datos (x,y) hipotéticos dispersos alrededor de la verdadera recta de regresión para n = 5. Fuente: Walpole et al., 2012.....	73
Ilustración 21 Calidad de la correlación	76



Universidad de Cuenca.

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Yo, **Álvaro Román Bacuilima Muñoz** en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “**Diseño de una mezcla de hormigón de alta resistencia y su comportamiento en una viga de hormigón armado sometida a cargas de flexión**”, 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, 15 de abril de 2019

Álvaro Román Bacuilima Muñoz

C.I: 0106909807



Universidad de Cuenca.

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Yo, **Wilson Paul Guillén Chima** en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “**Diseño de una mezcla de hormigón de alta resistencia y su comportamiento en una viga de hormigón armado sometida a cargas de flexión**”, 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, 15 de abril de 2019

Wilson Paul Guillén Chima

C.I: 0106968134



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, **Álvaro Román Bacuilima Muñoz**, autor del trabajo de titulación "**Diseño de una mezcla de hormigón de alta resistencia y su comportamiento en una viga de hormigón armado sometida a cargas de flexión**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 15 de abril de 2019

Álvaro Román Bacuilima Muñoz

C.I: 0106909807



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, **Wilson Paul Guillén Chima**, autor del trabajo de titulación "**Diseño de una mezcla de hormigón de alta resistencia y su comportamiento en una viga de hormigón armado sometida a cargas de flexión**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 15 de abril de 2019

Wilson Paul Guillén Chima

C.I: 0106969134



AGRADECIMIENTO.

A mis padres Blanca y José, ya que con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido cumplir una gran etapa de mi vida. A mis hermanos Mónica y Jose Luis por su cariño y que de igual manera siempre han estado apoyándome y aconsejándome. Quiero agradecer también a Holcim, Sika y a la Cantera Vipesa por ser quienes contribuyeron con los materiales para realizar este trabajo de titulación.

Paul Guillén.

A Dios por darme la suerte de estar vivo y brindar a mis padres Blanca y Claudio esta alegría que compartimos con nuestros seres queridos. Es verdad que la vida no se mide en minutos sino en momentos, los cuales disfruté con mis amigos en el transcurso de la universidad. En este punto de mi existencia agradezco la enseñanza de vida que me dejaron mis abuelos, que la perseverancia y el trabajo bien hecho tiene sus frutos. Agradezco a mis hermanos por el apoyo incondicional brindado en todo momento. Finalmente agradezco a las empresas que hicieron posible este trabajo de titulación Holcim, Sika, y Vipesa. No solo no hubiera sido nada sin ustedes sino por toda la gente que estuvo a mi alrededor desde el comienzo, algunos siguen hasta hoy. Gracias totales.

Álvaro Bacuilima.



Universidad de Cuenca.

DEDICATORIA.

Quiero dedicar este trabajo de titulación a mis padres y hermanos por ser el pilar fundamental en todo lo que soy y por haber sido mi apoyo a lo largo de mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida.

Paul Guillén.

Este trabajo de titulación es dedicado a mi apreciada mamá Blanca, por ser un apoyo incondicional en mi vida y un ejemplo de persona ella me ha enseñado que nada es imposible y que siempre se puede volver a empezar para triunfar. A mi papá Claudio por enseñarme a ser paciente y lo más importante, que cada trabajo debe ser bien hecho y amar la profesión que tomemos.

Álvaro Bacuilima.



CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes.

El hormigón es el material más usado en el campo de la construcción en todo el mundo, y la necesidad de llevar a cabo construcciones de alto calibre como grandes edificaciones, puentes, plataformas marinas (e.g Torres Petronas con una resistencia de 890 Kg/cm²) han llevado a incrementar la resistencia del hormigón conforme avanzan los años. De acuerdo al ACI 363.R un hormigón de alta resistencia (HAR) es aquel hormigón que alcanza una resistencia a la compresión superior a 421 Kg/cm². Pero no siempre ha sido esta la definición de un HAR ya que conforme avanzaba los años iba cambiando, es decir en la década de los 50 un hormigón con una resistencia a la compresión de 340 Kg/cm² ya se consideraba de alta resistencia, en los 60 alcanzaron resistencias entre 410 a 520 Kg/cm², a principios de la década de los 70 se produjeron hormigones con resistencia de 620 Kg/cm². Construcciones de grandes edificaciones como el Water Tower Place y 311 South Wacker Drive de Chicago no hubieran sido posible sin el desarrollo de hormigón de alta resistencia (COMITEE 363R-92). Este desarrollo de hormigones de alta resistencia se ha visto ligada al tamaño de los edificios, es decir, conforme aumentaba la resistencia a compresión del hormigón aumentaba el tamaño de los edificios. En la ilustración 1 se muestra la evolución y el uso en edificaciones, de los hormigones de alta resistencia.

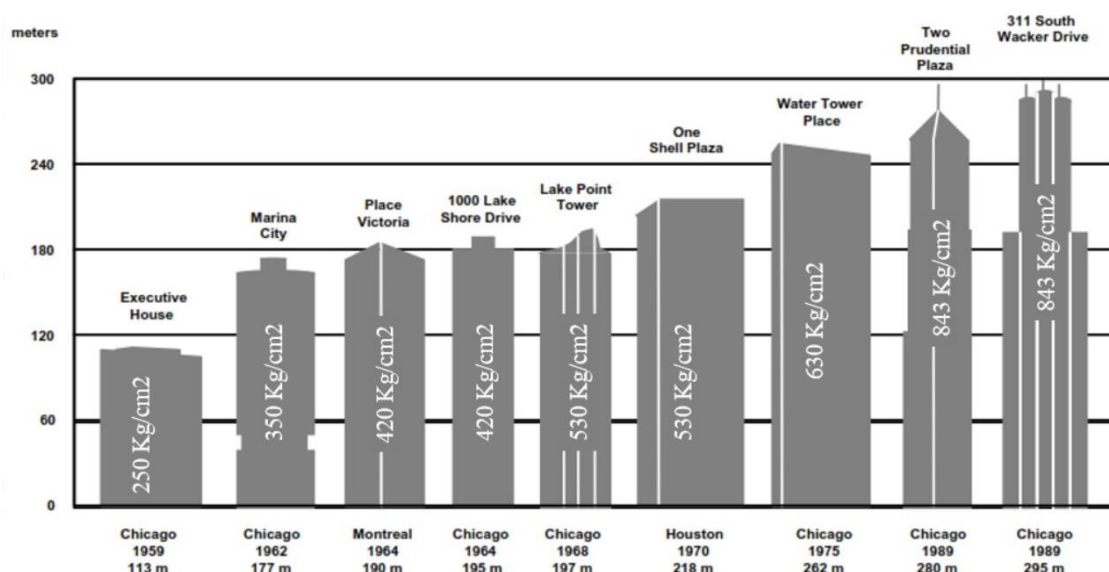


Ilustración 1 Evolución de resistencias de hormigón en rascacielos de EE.UU. Fuente: Concrete Technology Today, 1994.



Para elaborar hormigones de alta resistencia la relación agua/cemento debe ser reducida, con la incorporación de minerales finos como el humo de sílice (Nam Le, 2017). Por lo general, para alcanzar una alta resistencia se utiliza aditivos plastificantes de alto rango en la composición de los HAR (Zabaleta, 1989). La utilización de aditivos superplastificantes es de suma importancia en la elaboración de HAR ya que ayuda a reducir considerablemente la relación agua/cemento, lo que representa un 40 % de reducción de agua en la dosificación. Otros materiales de suma importancia en el desarrollo de este tipo de hormigones son las fibras metálicas y agregado de granulometría controlada como arena de sílice, humo de sílice, ceniza volante, escoria entre otros. Pero el uso de estos materiales incrementaría el costo de manera significativa. Un aspecto importante para conseguir altas resistencias en la elaboración de hormigones se debe realizar una selección exhaustiva de los agregados, en especial el agregado grueso. El agregado grueso debe ser 100% piedra triturada, tener una textura rugosa, limpia, dura, resistente, poco absorbente, además se recomienda evitar partículas elongadas. (Barriga, 2007). Ya que el agregado triturado (ripio) tiene mayor adherencia que un agregado natural (grava).

El hormigón de alta resistencia, no es un hormigón de bajo costo que pueda ser elaborado de una manera sencilla; sin embargo, se ha convertido en un material de alta tecnología para la ingeniería, cuyas propiedades, desempeño y demás características son de gran utilidad en edificios, puentes, plataformas marítimas, etc. Al usar un HAR se reduce el flujo plástico y la retracción, la implementación de estos tipos de hormigones en la construcción de edificios de gran altura aumenta la rigidez de las edificaciones. Además, en construcciones de gran altura ayuda a incrementar la rigidez lateral de la edificación con lo que se reduce el desplazamiento lateral causado por la fuerza del viento y de sismos, incrementando de esta manera la comodidad y seguridad de los ocupantes (Aitcin, 1998). Por ejemplo; los propietarios del Two Union Square en Seattle, Washington decidieron utilizar en la estructura un material más rígido tal como el HAR, en lugar de perfiles de acero, ya que, los edificios altos con pórticos de acero se balancean demasiado con los vientos fuertes y las soluciones para contrarrestar este efecto suelen ser costosas. La estructura de 58 pisos está reforzada con un innovador núcleo compuesto por tubos de acero y rellenos con hormigón de 1325 Kg/cm^2 (Godfrey, 1987). Elaborar el hormigón



de 1325 Kg/cm² a la compresión no fue una tarea fácil, esta resistencia se alcanzó gracias a la disponibilidad de materia prima de alta calidad en la región. En la mezcla utilizaron cemento Pórtland Tipo I/II, que es bajo en álcalis y con una reactividad reológica muy baja en presencia de altas dosis de superplastificante. En este caso, la compatibilidad del superplastificante de naftaleno con el cemento seleccionado se comportó de manera excelente, por lo que se pudo usar una relación agua/cemento de 0,22 (Howard y Leatham 1989).

En Francia el puente Île de Ré usó en su estructura HAR debido a que los propietarios necesitaban un hormigón con alta velocidad de fraguado, ya que el tiempo para la entrega de esta obra era reducido. Los propietarios decidieron usar hormigón de 700 Kg/cm² en lugar de hormigón de 400 Kg/cm², lo cual permitió cumplir con el tiempo de construcción de la obra y además el costo por metro cúbico disminuyó gracias a la velocidad de fraguado del HAR.

En la plataforma marítima Troll en Vats Noruega, que fue diseñada para una profundidad de 300 m en el agua, al incrementar la resistencia a la compresión de 611.8 a 713.8 Kg/cm², se ahorraron 50 000 m³ de hormigón y un ahorro de \$77 millones (dólares estadounidenses). El HAR no solo reduce la carga muerta de las plataformas marítimas, sino que también asegura una buena durabilidad, especialmente en la zona de salpicadura crítica, donde se ve sometida a la más severa exposición, como es el caso de la plataforma Hibernia en Canadá.

En Ecuador también se ha desarrollado hormigones de alta resistencia. En el 2009 un estudiante de la ESPOLE desarrolló un hormigón con una resistencia a la compresión de 1070 kg/cm² utilizando humo de sílice, cuarzo molido, el aditivo reductor de alto rango Glenium 3000 NS y fibras metálicas. En el 2010 un estudiante de la UTPLE desarrolló un hormigón de 524 kg/cm² utilizando únicamente materiales comunes, además realizó un análisis de este hormigón en edificaciones. En la universidad Central del Ecuador, estudiantes desarrollaron hormigones con resistencias entre 600 a 690 kg/cm², incorporando al diseño un aditivo reductor de agua y micro sílice. En el 2013 un grupo de estudiantes de la universidad San Francisco de Quito, desarrollaron un hormigón que alcanzó una resistencia promedio de 1120 kg/cm². Ellos utilizaron además de los materiales comunes, micro sílice y un aditivo reductor de agua. No se encontraron



registros de hormigones de alta resistencia que utilice únicamente arena, ripio, cemento, agua y aditivo reductor de agua. Ni de ensayos a flexión de hormigones de alta resistencia.

1.2 Descripción del Problema.

El material más usado en los diferentes tipos de construcciones es el hormigón, la resistencia a compresión de los hormigones comunes fluctúa entre 210 a 423 kg/cm² (McCormac & Russell, 2011), sin embargo, en el caso de grandes cargas (e.g. estructuras marítimas para buques de alto calado) los hormigones comunes no son suficientes. Además, si bien ya existen hormigones de alta resistencia los elevados costos de fabricación, constituyen un limitante para su implementación puesto que los materiales que se necesitan para producirlos requieren características específicas como aditivos especiales, minerales de dureza y granulometría controlada y fibras de cualquier tipo.

1.3 Justificación.

Se plantea el desarrollo de hormigones con resistencia a la compresión de 1000 kg/cm² con materiales disponibles a nivel local, y sin la utilización de agregados con granulometría controlada, ni de fibras de ningún tipo. Ya que en el desarrollo de HAR es importante conseguir relaciones agua/cemento bajas se utilizará un aditivo reductor de agua de alto rango tipo A y F. El aditivo utilizado cumplirá con los requerimientos de la Norma ASTM C-494. El material cementante a utilizar, será el cemento de tipo HE, el cual es fabricado bajo la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general.

Diseñar un hormigón de alta resistencia a compresión superior a 1000 kg/cm², y analizar su comportamiento en elementos de hormigón armado ante cargas de flexión.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Emplear las normas NTE INEN para determinar las propiedades de los agregados a utilizar en el diseño del hormigón de alta resistencia.
- Realizar los ensayos a compresión según la norma NTE INEN 1573, y recolectar datos de las cargas aplicadas y de las deformaciones producidas por las cargas, para determinar las curvas esfuerzo-deformación.



- Realizar, ensayar y analizar el comportamiento de la viga de hormigón armado.
- Realizar ensayos no destructivos de ultrasonido y con el esclerómetro en los cilindros y en las vigas para determinar su resistencia.
- Determinar si existe correlación entre la resistencia a compresión de los cilindros y de las vigas con los ensayos no destructivos.

1.5 Alcance.

Este proyecto está compuesto de varias etapas, en la primera etapa se realizará la caracterización de los agregados, es decir se determinará las propiedades de los agregados en el laboratorio de la universidad.

En la segunda etapa se realizarán el diseño y mezclado del hormigón de alta resistencia, en la cual se ensayarán 2 probetas de hormigón a 1, 3, 7, 14 y 28 días para verificar que la resistencia sea la requerida.

En la tercera etapa se elaborarán y ensayarán probetas, vigas simples y vigas de hormigón armado. Se realizarán los ensayos no destructivos como índice esclerométrico y velocidad de pulso; y los ensayos destructivos como resistencia a compresión, módulo de elasticidad, resistencia a tracción y módulo de ruptura. Se elaborarán un total de 24 probetas para los ensayos finales, las probetas serán usadas para ensayos destructivos y no destructivos. De este número de 23 probetas se utilizarán para ensayos no destructivos como índice esclerométrico y velocidad de pulso. Luego se utilizarán 18 probetas para ensayos a compresión en la prensa hidráulica, 3 probetas para tracción indirecta y 3 probetas para módulo de elasticidad. Se realizarán 3 vigas de hormigón simple para ensayos de módulo de ruptura y 4 vigas de hormigón armado para ensayo a flexión.

Los nombres de los especímenes serán elegidos al azar utilizando letras del alfabeto y números.

Finalmente, se verificará si existe correlación entre ensayos no destructivos y ensayos destructivos.



CAPITULO 2: MATERIALES Y CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.

Los elementos principales en la elaboración del hormigón son; arena, ripio, cemento y agua. Para la realización de los HAR, se utilizó los materiales antes mencionados y se incorporó un aditivo reductor de agua de alto rango e hiperplastificante. La arena y el ripio provienen de la zona de Paute y fueron proporcionados por la cantera Vipesa. El material cementante que se utilizó, es el cemento Holcim Premium tipo HE, el cual es fabricado bajo la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380 y fue proporcionado por Holcim Cuenca. El aditivo reductor de agua de alto rango e hiperplastificante, SIKA 4100, cumple con los requerimientos de la Norma ASTM C-494, fue proporcionada por representantes de la casa comercial SIKA.

2.1 Agregados.

Los agregados utilizados en este trabajo de titulación son agregados finos y gruesos. El agregado fino más conocido como arena es aquel material que pasa por el tamiz número 4 y es retenido en el tamiz número 200. El agregado grueso es todo el material retenido en el tamiz 4, y es conocido como grava o ripio. En este proyecto de titulación se utilizó ripio debido a que tiene mayor adherencia con el cemento ya que es agregado de trituración (Romo, 2008).

Los agregados son los principales componentes del hormigón, los cuales son derivados del proceso de trituración ya sea de manera natural o artificial, debido a esto tienen diversos tipos de tamaños que van desde partículas casi invisibles hasta pedazos de piedra. Los agregados junto con el agua y el cemento conforman el producto final que lo conocemos como hormigón. En el diseño de un hormigón de alta resistencia, los materiales que ocupan mayor volumen en la composición del hormigón son los agregados y estos influyen en gran medida a la resistencia y en otras propiedades del hormigón, por lo que deben ser considerados especialmente en el diseño de la mezcla. El agregado grueso influye directamente en la resistencia y en las propiedades estructurales del hormigón, razón por la cual este material debe estar libre de fisuras o planos débiles, limpios y libres de impurezas como limos y arcillas. (Kosmatka et al., 2002). Con respecto al agregado grueso, otros autores coinciden con el uso de agregados triturados. Barriga



recomienda el uso de partículas con un perfil angular, es decir el uso de piedra triturada en lugar de la grava redondeada. La granulometría del agregado fino y la forma de las partículas son los principales factores en la producción del hormigón de alta resistencia; además la textura de la superficie del agregado fino puede tener un gran efecto en el requisito de agua en la mezcla y por consecuencia en la resistencia a la compresión del hormigón (Kosmatka et al., 2002).

2.1.1 Análisis granulométrico en los agregados, fino y grueso.

La granulometría o análisis granulométrico es la distribución de los diferentes tamaños del agregado, el cual se expresa en porcentaje con respecto a la masa total del agregado.

El análisis granulométrico nos ayuda a determinar la gradación de los materiales y una buena gradación de los agregados da como resultado hormigones con mejores características y más económicos. Para tener una buena gradación del agregado grueso por lo general se mezclan de manera adecuada al menos dos tipos de agregados (Romo, 2008). En este trabajo de titulación no se ha realizado una combinación de agregados ya que se decidió utilizar únicamente agregado grueso con un tamaño máximo de 3/8 de pulgada, ya que según el comité ACI 211.4R-3 nos dice que para lograr resistencias superiores a 843 kg/cm² se debe utilizar agregado de 1/2 o 3/8 de pulgada. Por otro lado, para realizar el análisis granulométrico del agregado fino se utilizó la norma NTE INEN 696:2011, de la cual se siguió los siguientes pasos:

1. Para realizar el análisis granulométrico del agregado fino se requiere una muestra mínima de 300 gramos, pero para este trabajo de titulación se utilizó 500 gramos, la cual fue preparada para el ensayo, es decir fue secada en el horno a una temperatura de 110 °C por 24 horas.
2. Se seleccionó la serie de tamices para realizar el ensayo, esta serie consta de los siguientes tamices: # 4, # 8, # 16, # 30, # 50, # 100, # 200 y fondo. Y se los ordenó de manera descendente.
3. Se colocó el material sobre los tamices y a la vez los tamices se colocaron en la tamizadora mecánica durante 3 minutos.
4. Finalmente, se determinó la masa retenida en cada tamiz.



Los valores obtenidos en cada tamiz se presentan en la tabla 1 junto con el porcentaje que pasa cada tamiz.

Tabla 1 Granulometría del agregado fino.

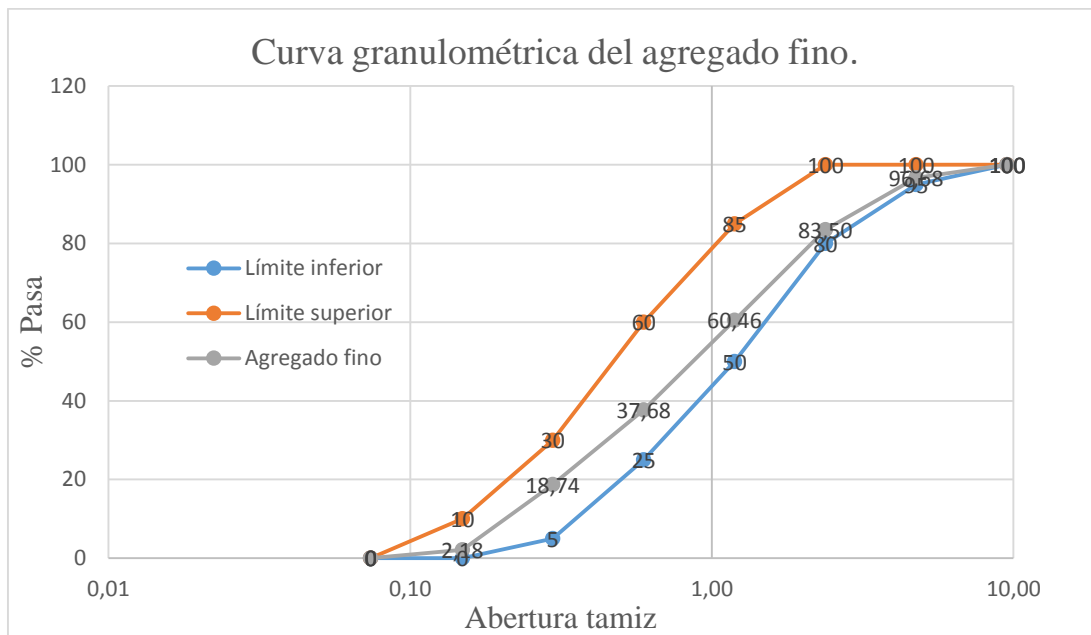
Abertura mm	Tamiz	Peso retenido	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
9,53	3/8	0	0	0	100
4,76	# 4	16,6	3,32	3,32	96,68
2,38	# 8	65,9	13,18	16,50	83,50
1,19	#16	115,2	23,04	39,54	60,46
0,595	# 30	113,9	22,78	62,32	37,68
0,297	# 50	94,7	18,94	81,26	18,74
0,149	# 100	82,8	16,56	97,82	2,18
0,074	# 200	10,9	2,18	100	0
	Fondo	0	0	100	0

Los valores obtenidos de la granulometría del agregado fino fueron comparados con los límites dados por la norma ASTM C33 para verificar si cumple o no con esta norma. En la tabla 2 se muestran los límites dados por la norma.

Tabla 2 Límites para granulometría del agregado fino.

Límites ASTM C33	
Límite inferior	Límite superior
100	100
95	100
80	100
50	85
25	60
10	30
2	10

En la gráfica 1 se muestra la curva granulométrica del agregado fino, la cual cumple con los límites establecidos por la norma.



Gráfica 1 Curva granulométrica del agregado fino y límites ASTM C33

El módulo de finura del agregado es de 3,01; según el ACI 211.4R agregado fino con módulo de finura superiores a 2,5 son recomendados ya que valores menores a este pueden provocar que el hormigón tenga mala trabajabilidad y mayor demanda de agua. Además, este valor se encuentra en el rango especificado por la norma NTE INEN872:2011, la cual especifica que el módulo de finura no debe ser menor a 2,3 ni mayor a 3,1.

2.1.2 Determinación de la densidad y absorción del agregado fino.

Para determinar la densidad y absorción del agregado fino se utilizó la norma NTE INEN 856:2010, en la cual se mencionan dos métodos: el método gravimétrico y el volumétrico. En este proyecto de titulación se realizó el método gravimétrico, el cual consiste en los siguientes pasos.

1. Se preparó la muestra, es decir, se colocó el material en una bandeja y se dejó secar en el horno a una temperatura de 110 grados centígrados por 24 horas.
2. Como menciona la norma se sumergió en agua por 24 horas para llenar los poros con agua. El material debe estar en estado sss (Saturado superficialmente seco), para determinar si el material está en estado sss se vierte material dentro del molde normalizado, el cual está asentado sobre una superficie lisa no absorbente con el



- diámetro mayor hacia abajo. Se llena el molde con el material y se compacta con 25 golpes ligeros.
- Después de verificar que esté en estado sss, se vertió 500 gramos de arena en un matraz (Masa de la arena en estado sss), y se lo lleno de agua hasta la marca indicada del matraz. Se eliminó las burbujas existentes y además se llevó la temperatura del agua a 23 grados centígrados y se registró su masa (Masa del matraz lleno con muestra y agua hasta la marca de calibración). Además, se registró la masa del matraz con agua hasta la marca de calibración.
 - La arena fue secada al horno por 24 horas y se registró su masa (Masa de la muestra seca al horno).

Los datos necesarios para calcular la densidad y la absorción del agregado fino en este ensayo, se presentan en la tabla 3.

Tabla 3 Datos de masas para calcular la densidad del agregado fino.

Masa en aire de la muestra seca al horno (gr)	A	483,
Masa del matraz lleno con agua hasta la marca de calibración (gr)	B	672,1
Masa del matraz lleno con muestra y agua (gr)	C	980,2
Masa de muestra en estado sss (gr)	S	500

Cálculos:

Densidad relativa (Gravedad específica) (SH).

$$Densidad\ relativa\ seca = \frac{A}{B + S - C} \quad [1]$$

$$Densidad\ relativa\ seca = 2,52$$

Densidad relativa (gravedad específica) (SSS).

$$Densidad\ relativa\ SSS = \frac{S}{B + S - C} \quad [2]$$

$$Densidad\ relativa\ SSS = 2,61$$

Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente).



$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{B + A - C} \quad [3]$$

$$\text{Densidad relativa aparente} = 2,76$$

Densidad seca.

$$\text{Densidad seca} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{997,5 * A}{B + S - C} \quad [4]$$

$$\text{Densidad seca} (kg/m^3) = 2512,20$$

Densidad SSS.

$$\text{Densidad SSS} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{997,5 * S}{B + S - C} \quad [5]$$

$$\text{Densidad SSS} (kg/m^3) = 2599,01$$

Densidad aparente SSS.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{997,5 * A}{B + A - C} \quad [6]$$

$$\text{Densidad aparente} = 2751,67$$

Absorción.

$$\text{Absorción} (\%) = \frac{S-A}{A} * 100 \quad [7]$$

$$\text{Absorción} (\%) = 3,46$$

El agregado fino es de origen natural ya que estos tienen gravedades específicas entre 2.4 a 2.9 con densidades correspondientes entre 2400 a 2900 kg/m³.

2.1.3 Determinación de la densidad, y absorción del agregado grueso.

Para determinar la densidad y absorción del agregado grueso se utilizó la norma NTE INEN 857:2010. Los pasos realizados para el agregado grueso se describen a continuación:



1. En función del tamaño máximo nominal se eligió la cantidad de material y se sumergió el material por 24 horas.
2. Se la colocó sobre un paño absorbente para eliminar el agua superficial del material.
3. Se determinó la masa en el aire del agregado, luego determinar la masa aparente en agua.
4. Finalmente, se colocó el material en el horno por 24 horas y se determinó su masa seca al horno.

Los datos para calcular la densidad y la absorción del agregado grueso, se presentan en la tabla 4.

Tabla 4 Datos de masas para calcular la densidad y absorción del agregado grueso

Masa en aire de la muestra seca al horno	A	1984,9
Masa en aire de la muestra en estado sss	B	2027,6
Masa aparente en agua de la muestra saturada	C	1260,6

Cálculos:

Densidad relativa (Gravedad específica) (SH)

$$Densidad\ relativa\ seca = \frac{A}{B - C} \quad [8]$$

$$Densidad\ relativa\ seca = 2,59$$

Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)

$$Densidad\ relativa\ SSS = \frac{B}{B - C} \quad [9]$$

$$Densidad\ relativa\ SSS = 2,64$$

Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)

$$Densidad\ relativa\ aparente = \frac{A}{A - C} \quad [10]$$

$$Densidad\ relativa\ aparente = 2,74$$



Densidad SH

$$\text{Densidad seca} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{997,5 * A}{B - C} \quad [11]$$

$$\text{Densidad seca (kg/m}^3\text{)} = 2581,41$$

Densidad SSS

$$\text{Densidad SSS} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{997,5 * B}{B - C} \quad [12]$$

$$\text{Densidad SSS (kg/m}^3\text{)} = 2636,94$$

Densidad aparente

$$\text{Densidad aparente} = \frac{997,5 * A}{B - C} \quad [13]$$

$$\text{Densidad aparente} = 2733,59$$

Absorción

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{B-A}{A} * 100 \quad [14]$$

$$\text{Absorción (\%)} = 2,15$$

De igual manera que el agregado fino, el agregado grueso es de origen natural ya que su gravedad específica y su densidad también se encuentra dentro del rango especificado por el PCA.

2.1.4 Determinación de la masa unitaria y el porcentaje de vacíos del agregado fino y del agregado grueso.

Para determinar la masa unitaria de los agregados se utilizó la norma NTE INEN 858:2010. La cual nos menciona 3 métodos o procedimientos diferentes; el procedimiento por varillado, procedimiento por sacudidas y el procedimiento por paladas. Debido al tamaño del agregado se realizó el procedimiento por varillado. Los pasos del procedimiento se describen a continuación:



1. En base al tamaño del agregado se seleccionó el tamaño del molde, el cual tanto para el agregado fino como para el agregado grueso fue el molde de 2.8 litros de capacidad.
2. Antes de realizar el ensayo se secó los materiales por 24 horas a una temperatura de 110 grados centígrados.
3. Se llenó la tercera parte del molde y se niveló la superficie con los dedos. Y se compactó con 25 golpes de la varilla de compactación los cuales se distribuyó uniformemente. Se repitió los pasos para las siguientes dos capas.
4. Se repitió 3 veces este procedimiento y se determinó un promedio de la masa del agregado.

En la tabla 5 se muestran los valores obtenidos para el agregado fino.

Tabla 5 Datos para calcular la masa unitaria y absorción del agregado fino.

		7,9179
Masa del agregado más el molde	G	7,9165
		7,9377
Promedio (kg)	G	7,9240
Masa del molde (kg)	T	2,8673
Masa del agua, placa de vidrio y molde	W	6,3044
Masa de la placa de vidrio y molde	M	3,3377
Densidad del agua para la temperatura de medición	D	998,86
Gravedad específica del agregado	S	2,52

Para el porcentaje de vacíos D_a es la densidad del agua, igual a 998 kg/m³.

Cálculos:

Volumen del molde.

$$Volumen (m^3) = \frac{W - M}{D} \quad [15]$$

$$Volumen (m^3) = 0.00297$$

Masa unitaria del agregado fino.

$$M = \frac{G - T}{V} \quad [16]$$

$$M (kg/m^3) = 1702.55$$



Porcentaje de vacíos.

$$Vacíos (\%) = (S * M - Da) * \frac{100}{s * Da} \quad [17]$$

$$Vacíos (\%) = 32,26$$

En la tabla 6 se muestran los valores obtenidos para el agregado grueso.

Tabla 6 Datos para calcular la masa unitaria y absorción del agregado grueso.

		7,3712
Masa del agregado más el molde	G	7,3700
		7,3708
Promedio (kg)	G	7,3707
Masa del molde (kg)	T	2,8673
Masa del agua, placa de vidrio y molde	W	6,3044
Masa de la placa de vidrio y molde	M	3,3377
Densidad del agua para la temperatura de medición	D	998,86
Gravedad específica del agregado	S	2.59

Para el porcentaje de vacíos Da es la densidad del agua, igual a 998 kg/m³.

Cálculos:

Para realizar los cálculos para el agregado grueso, de igual manera que para el agregado fino se utilizan las ecuaciones 15, 16 y 17.

Volumen del molde.

$$Volumen (kg) = \frac{W - M}{D}$$

$$Volumen (kg) = 0.00297$$

Masa unitaria del agregado fino.

$$M \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{G - T}{V}$$

$$M (kg/m^3) = 1516.24$$



Porcentaje de vacíos.

$$\text{Vacíos (\%)} = (S * M - Da) * \frac{100}{s * Da}$$

$$\text{Vacíos (\%)} = 41.29$$

Según Kosmatka, et al (2002) la masa unitaria de agregados utilizados comúnmente en concreto de peso normal varía entre 1200 y 1750 kg/m³, por lo que tanto el agregado fino y el agregado grueso de este trabajo de titulación son aptos para realizar hormigones de peso normal. Por otra parte, el contenido de vacíos varía entre 30 a 50% para el agregado utilizados en hormigones de peso normal.

2.1.5 Determinación del valor de la degradación del agregado grueso.

El valor de degradación es un indicador de la calidad del agregado. Para determinar el valor de degradación se utilizó la norma NTN INEN 860:2011 de la cual se siguieron los siguientes pasos:

1. Se determinó la cantidad de agregado necesario para el ensayo, el cual depende del TMN. Entonces, se determinó que la masa total de agregado necesario fue de 5000 gramos, ya que tenía una gradación C.
2. Se secó el material por 24 horas a una temperatura de 110 ° C.
3. Se determinó la carga del ensayo, la cual depende de la gradación del agregado. Para una gradación C la masa de la carga es de 3330 ± 20 gramos, es decir se utilizó 8 esferas.
4. Se colocó el material y las esferas en la máquina de los ángeles hasta que se completaron 500 revoluciones.
5. El material fue tamizado y lavado. Para finalmente secarlo por 24 horas y medir su masa.

En la tabla 7 se presentan los datos necesarios para realizar el cálculo de degradación o desgaste del material.

Tabla 7 Masas para ensayo de degradación del agregado.

Muestra inicial de la muestra de ensayo	B	5000
Masa de la muestra retenida en el tamiz de 1,7 mm	C	4022,3



Calculo:

$$D = \frac{B - C}{B} * 100 \quad [18]$$

$$D = 19.55 \%$$

El porcentaje máximo de degradación especificado por la norma NTE INEN 872:2011 es de 50 %. El valor obtenido de 19,55 % del agregado grueso utilizado en este trabajo de titulación muestra que este material es de buena calidad para la elaboración de hormigones.

2.2 Material cementante.

El cemento Holcim Premiun Tipo HE es un cemento hidráulico el cual brinda altas resistencias iniciales y finales. Cumple con la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380, que equivale a la norma ASTM C1157. Este cemento está compuesto de Clinker de cemento portland, yeso y adiciones de puzolanas naturales. Además, puede ser usado en todo tipo de estructuras que requieran alta resistencia a la compresión, más aun en estructuras que requieran ser puestas en funcionamiento de manera rápida (Holcim Ecuador, 2015).

2.3 Agua.

El agua es uno de los materiales principales para elaborar el hormigón, ya que con este elemento se generan las reacciones químicas con el material cementante. El agua utilizada proviene de Etapa EP que es la empresa encargada de suministrar agua potable a la ciudad. El agua cumple con los requerimientos de la norma ASTM C1606.

2.4 Reductor de agua.

Para este proyecto de titulación se empleó el aditivo Sika Viscocrete 4100, el cual es un reductor de agua de alto rango e hiperplastificante que utiliza tecnología de polímeros de policarboxilato. Además, cumple con los requerimientos de las norma ASTM C-494 tipos A y F y AASHTO M-194 tipos A y F. El uso de este aditivo da al hormigón la propiedad de ser autocompactante y tiene una densidad de 1.1 gr/cc. Se puede llegar a reducir hasta el 45 % del agua con el uso del 0.9 % del peso del cemento. Este aditivo plastifica el



hormigón dando alta fluidez, pero manteniendo la cohesión, evitando así que el agregado se segregue (Sika Viscocrete 4100, 2015).

2.5 Varillas corrugadas de acero.

Para las vigas de hormigón armado se utilizó varillas Novacero, y se determinó el esfuerzo de fluencia de las varillas. Se realizó este ensayo para verificar si las varillas que se utilizaron en el refuerzo principal y de corte de las vigas de hormigón armado tenían un esfuerzo de fluencia mayor o igual a 4200 kg/cm², para esto se utilizó la norma NTE INEN 109:2009 y NTE INEN 102:2011.

Las varillas utilizadas son de 0.6 cm y de 1 cm de diámetro. En donde los esfuerzos de fluencia obtenidos son 5336.99 kg/cm² y 4749.82 kg/cm² respectivamente. Estos valores claramente son mayores al valor especificado por la norma.



CAPITULO 3: METODOLOGIA DE DISEÑO DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA.

3.1 Método ACI 211-4R.

Para diseñar el hormigón se utilizó el método propuesto por el comité 211.4R-08 del ACI, el cual nos permite alcanzar resistencias entre 450 a 843 kg/cm² y es un método aplicable a concretos de peso normal. Los pasos seguidos se describen a continuación:

1. Se seleccionó la resistencia promedio a compresión y el asentamiento que debía tener la mezcla. Utilizando un aditivo reductor de agua de alto rango (HRWRA por sus siglas en ingles); de la tabla 8 se eligió un revenimiento de 3 cm. Este método de diseño tiene como resistencia máxima 843 kg/cm², y cuyo valor se tomó como punto de partida esa resistencia. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el aditivo utilizado además de ser un aditivo reductor de agua de alto rango, es un hiperplastificante. Por lo que el revenimiento marcado en la tabla sirve solo de guía, es decir, este revenimiento no se cumplirá.

Tabla 8 Revenimiento recomendado. Fuente: comité 211.4r-08 del ACI.

Revenimiento recomendado para Hormigón con y sin HRWRA			
Hormigón con HRWRA		Hormigón sin HRWRA	
Revenimiento	2,5 a 5 cm	Revenimiento	5 a 10 cm

2. El tamaño máximo nominal del agregado grueso elegido fue de 3/8 ya que está dentro del rango recomendado por el ACI. En la tabla 9 se puede observar el tamaño máximo del agregado en función de la resistencia requerida.

Tabla 9 Tamaño máximo nominal del agregado grueso. Fuente: comité 211.4r-08 del ACI.

Tamaño máximo sugerido del agregado grueso.	
Resistencia requerida, kg/cm²	TMN sugerido del agregado grueso
< 843	3/4 a 1 in
> 843	3/8 a 1/2 in



3. A partir de las propiedades del agregado grueso como la masa unitaria y en base a la tabla 10, se determinó el volumen fraccional del agregado, el cual es de 0.65 para nuestro agregado.

Tabla 10 Volumen fraccional del agregado grueso. Fuente: comité 211.4r-08 del ACI.

Volumen recomendado de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón.				
Contenido óptimo de agregado grueso para el TMN del agregado a ser usado con agregado fino con un módulo de finura de 2.5 a 3.2				
TMN	3/8	1/2	3/4	1
Fracción de volumen del agregado grueso. (VCA)	0.65	0.68	0.72	0.75

Con la fórmula 19 se calculó la cantidad de agregado por metro cúbico.

$$\text{Masa de ripio} = \text{VCA} * \text{Masa unitaria} \quad [19]$$

$$\text{Masa de ripio} = 0.65 * 1516.24 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masa de ripio} = 985.5 \text{ kg/m}^3$$

4. En función del revenimiento y del tamaño máximo nominal del agregado grueso se realizó un primer cálculo de la cantidad de agua, la cual en base a la tabla 11 fue de 183 kg/m³.

Tabla 11 Contenido de agua por metro cúbico. Fuente: comité 211.4r-08 del ACI.

Primera estimación del agua de mezclado requerida y del contenido de aire.				
Revenimiento, in.	Agua de mezclado, Kg/m ³			
	Tamaño máximo del agregado, in.			
	3/8	1/2	3/4	1
1 a 2	183	175	169	166
2 a 3	189	183	175	172
3 a 4	195	189	180	177
Contenido de aire	3 (2,5*)	2,5 (2*)	2 (1,5*)	1,5 (1*)

* Para mezclas con contenido de Reductores de agua de alto rango.



Luego de tener el primer valor de agua por metro cubico de hormigón se realizó una corrección por el contenido de aire en el agregado fino. El contenido de aire en el agregado fino es de 32.26 %. Entonces con la fórmula 2 se calculó el agua que se agregó.

$$\text{Corrección agua} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = (V - 35) * 4.72 \quad [20]$$

$$\text{Corrección agua} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = (32.26 - 35) * 4.72$$

$$\text{Corrección agua} = -13.0 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{agua total} = 170 \text{ kg/m}^3$$

- De la tabla 12, se seleccionó una relación agua/cemento. La cual depende del TMN. En este caso se seleccionó la menor relación agua/cemento, la cual fue de 0.27 para una resistencia a la compresión de 843 kg/cm².

Tabla 12 Relación agua/cemento. Fuente: comité 211.4r-08 del ACI.

Relación a/c máxima recomendada para hormigones de alta resistencia.									
Resistencia promedio requerido f'cr. Kg/cm²		w/c							
		Tamaño máximo del agregado, in.							
		3/8		1/2		3/4		1	
		Con HRWR A	Sin HRWR A	Con HRWR A	Sin HRWR A	Con HRWR A	Sin HRWR A	Con HRWR A	Sin HRWR A
492	28 días	0,50	0,42	0,48	0,41	0,45	0,40	0,43	0,39
	56 días	0,55	0,46	0,52	0,45	0,48	0,44	0,46	0,43
562	28 días	0,44	0,35	0,42	0,34	0,40	0,33	0,38	0,33
	56 días	0,48	0,38	0,45	0,37	0,42	0,36	0,40	0,35
632	28 días	0,38	0,30	0,36	0,29	0,35	0,29	0,34	0,28
	56 días	0,42	0,33	0,39	0,32	0,37	0,31	0,36	0,30
703	28 días	0,33	0,26	0,32	0,26	0,31	0,25	0,30	0,25
	56 días	0,37	0,29	0,35	0,28	0,33	0,27	0,32	0,26
773	28 días	0,30	-	0,29	-	0,27	-	0,27	-
	56 días	0,33	-	0,31	-	0,29	-	0,29	-
843	28 días	0,27	-	0,26	-	0,25	-	0,25	-
	56 días	0,30	-	0,28	-	0,27	-	0,26	-



6. A partir de la relación agua/cemento seleccionada y de la cantidad de agua calculada. Se determinó la cantidad de cemento.

$$\frac{a}{c} = 0.27 \quad [21]$$

$$cemento = \frac{170 \text{ kg/m}^3}{0.27}$$

$$cemento = 630 \text{ kg/m}^3$$

7. Para determinar la cantidad de arena, se determinó el volumen absoluto de cada material para un metro cubico de mezcla, para esto a cada cantidad en kg/m³ se le dividió para el peso específico del agua por la densidad del material. Luego se sumó el volumen de los materiales y finalmente, la suma se restó de 1 m³. Siendo esta diferencia la cantidad de arena.

Tabla 13 Volumen de los materiales.

Material	Volumen (m³)
Cemento	0,202
Ripio	0,353
Agua	0,170
Aire	0,025

Entonces el volumen de arena para un m³ es de 0.25 m³. Al multiplicar este valor por el peso específico de agua y por su densidad se tuvo la cantidad de arena, la cual resultó ser 688 kg/m³.

8. Se realizó la corrección de agua por absorción y humedad de los agregados. Es decir, para la corrección por absorción se incrementó agua. Y ya que se secó el material en el horno durante 24 horas para obtener una humedad igual a 0, no se consideró la corrección por humedad.

$$\text{Corrección absorción} = \text{Abs fino} * \text{masa fino} + \text{Abs grueso} * \text{masa grueso} [22]$$

$$\text{Corrección absorción} = 0,0346 * 688 + 0,0215 * 985,5$$

$$\text{Corrección absorción} = 45 \text{ kg}$$



De esta manera al agua debido a la corrección por absorción se le sumó el agua antes calculada. Siendo la cantidad de agua igual a 215 kg/m³.

9. Ya que se eligió trabajar con un aditivo reductor de agua de alto rango y superplastificante, y ya que la ficha técnica de este aditivo recomienda utilizar entre un 0,19 a 0,9 % de la masa del cemento, la cantidad de aditivo utilizada fue igual a 0,6% de la masa del cemento. Además, al utilizar este aditivo se puede reducir la cantidad de agua utilizada entre un 10 a 40%, sin embargo, en este diseño se decidió reducir un 20 %.

De esta manera en la tabla 11 se presenta la cantidad de material por metro cubico para una resistencia de 843 kg/m³.

Tabla 14 Proporción de materiales para 1m³.

Relación agua/cemento = 0,27		
Resistencia a compresión = 843 kg/cm²		
Material	Proporción (Kg/m³)	Volumen(m³)
Cemento	633	0,20
Ripio	985	0,35
Arena	688	0,25
Agua	172	0,17
Aditivo	3.8	0,003
Aire	-----	0,025
Total	-----	1,00

3.2 Diseño del HAR superior a 1000 kg/cm².

El método del ACI 211.4R nos dio un diseño de partida ya que la resistencia máxima que se puede alcanzar con este método es de 843 kg/cm² y la resistencia a la que se quería alcanzar era 1000 kg/cm². Para llegar a una resistencia igual o superior a 1000 kg/cm² se modificó de manera experimental la cantidad de cada material, es decir inicialmente se varió el valor de volumen fraccional del agregado grueso considerando valores que no están dentro de la tabla 10. De la misma manera se redujo la relación agua cemento a valores inferiores a los indicados en la tabla 12 y a la vez se fue aumentando la cantidad de aditivo hasta llegar a 0.9% de la masa del cemento. Se utilizó como máximo 0.9% del aditivo ya que es la cantidad máxima recomendada por la ficha técnica de la misma.



De esta manera al ir variando estos parámetros se logró llegar a una resistencia promedio de 1009 kg/cm² a los 28 días de curado. Una desventaja de haber realizado de manera experimental el diseño de hormigón de alta resistencia fue que se tenía que esperar 28 días para conocer la resistencia final del hormigón. En la tabla 15 se muestra las más importantes variaciones de cantidades en los diseños realizados.

Tabla 15 Variaciones a partir del diseño del método ACI.

# de diseño	a/c	% Aditivo	f'c (kg/cm ²)
1	0,27	0,6	852
2	0,26	0,82	864
3	0,25	0,75	903
4	0,25	0,82	946
5	0,24	0,77	968
6	0,23	0,9	1009

En la tabla 16 se muestra la dosificación utilizada para 1 m³, la cual tiene una relación agua/cemento de 0,23.

Tabla 16 Dosificación para f'c = 1000 kg/cm²

Relación agua/cemento = 0,23		
Resistencia a compresión = 1009 kg/cm²		
Material	Proporción (Kg/m³)	Volumen(m³)
Cemento	793	0,25
Ripio	797	0,29
Arena	702	0,25
Agua	189	0,18
Aditivo	7,14	0,006
aire	-----	0,025
Total	-----	1,00



CAPITULO 4: RESULTADOS EN EL HORMIGÓN SIMPLE.

4.1 Densidad.

La densidad del hormigón es la relación de la masa y el volumen ocupado por el elemento. Para determinar la densidad se registró las dimensiones y peso de las probetas de prueba a los días que se realizaron los ensayos no destructivos y el ensayo en la prensa hidráulica. Es decir, se anotaron sus dimensiones y pesos a 1, 3, 7, 14 y 28 días. En la tabla 17 se muestra la densidad húmeda promedio por cada día que se realizaron los ensayos.

Tabla 17 Densidad del HAR endurecido.

Tiempo (Días)	Densidad promedio (kg/m³)
1	2423.55
3	2401.95
7	2397.81
14	2408.76
28	2431.40

Según Romo (2008), la densidad del hormigón endurecido oscila entre 2200 y 2300 kg/m³. Sin embargo, se debe tener en cuenta que esta densidad es para hormigones de resistencias normales. Adicionalmente se registró las medidas de 26 probetas extras, estas probetas tienen una densidad mínima de 2362.63 kg/m³ y una densidad máxima de 2458.65 kg/m³ teniendo como densidad promedio 2404.22 kg/m³. En la tabla 16 se puede observar que los valores obtenidos en diferentes días están dentro del rango de las densidades obtenidas a los 21 días. Se debe tener en cuenta que las variaciones de la densidad entre probetas pueden ser debidas a la compactación de cada una de ellas.

4.2 Índice esclerométrico del hormigón.

Una manera de conocer la resistencia a compresión del hormigón sin la necesidad de romper los cilindros de hormigón, es realizar una prueba no destructiva. Uno de estos métodos no destructivos consiste en determinar el índice esclerométrico en el hormigón el cual se obtiene con la utilización de un martillo de rebote o también llamado esclerómetro. Este ensayo fue desarrollado por el ingeniero suizo Ernest Schmidt en el año 1894, es decir él creó un martillo de prueba para medir la resistencia del hormigón por medio del índice esclerométrico. El esclerómetro consiste de un martillo de acero



cargado con un resorte que al ser liberado golpea un embolo de acero, el cual debe estar en contacto con la superficie de hormigón. Además, el equipo consta de una piedra abrasiva, la cual está compuesta de carburo de silicio y tiene una textura de grano medio. También contiene papel para la impresión de datos y un yunque de verificación, el cual sirve para verificar si el esclerómetro esta calibrado (ASTM C805, 1997). En la ilustración 2 se puede observar el equipo utilizado, junto con el yunque de verificación.

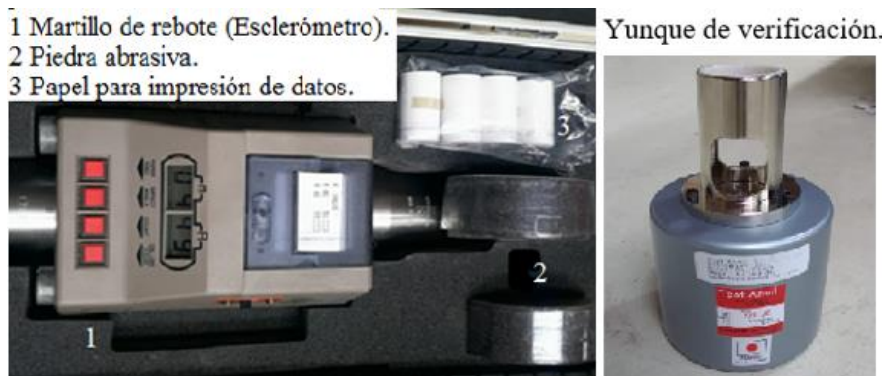


Ilustración 2 Esclerómetro.

Antes de iniciar el ensayo se verificó si el equipo estaba calibrado, para ello se utilizó el yunque de verificación. Es decir, Se realizó el ensayo en el yunque de verificación, en el cual dio como resultado 81 rebotes lo que significa que el equipo esta calibrado ya que el rango esta entre 78 a 82 rebotes. En la ilustración 3 se puede observar el equipo siendo verificada su calibración.



Ilustración 3 Verificación de la calibración del equipo.

Para realizar el ensayo, seguimos el procedimiento descrito por la norma ASTM C 805. Primero se configuró el equipo, ajustando el ángulo a 90°, que fue el ángulo al cual se utilizó el esclerómetro. Sostuvimos firmemente el esclerómetro de manera perpendicular



a la superficie del cilindro de hormigón, luego se incrementó de manera gradual la presión sobre el embolo hasta que el martillo golpeó al hormigón. Luego del golpe se mantuvo la presión sobre el esclerómetro para bloquear el embolo en su posición retraída. Finalmente se tomó 10 lecturas del número de rebote, cada impacto se realizó con una separación mínima de 25 mm. A partir de las lecturas realizadas en cada probeta se realizó el promedio de rebotes para cada probeta y luego se calculó el promedio por probeta. Finalmente se determinó el promedio de todas las probetas y con este promedio se entró en la tabla 18 para obtener su resistencia. Donde R, representa el índice esclerométrico y los ángulos representan las diferentes posiciones en las que se puede utilizar el esclerómetro.

Tabla 18 Resistencia a compresión de los cilindros de hormigón a partir del índice esclerométrico. Fuente: Manual esclerómetro a Hammer.

R	Resistencia asociada al índice esclerométrico (Kgf/cm²)				
	-90°	-45°	0°	+45°	+90°
20	147	135	----	----	----
21	159	147	----	----	----
22	171	159	129	----	----
23	188	171	141	----	----
24	200	188	153	----	----
25	212	200	165	118	----
26	233	218	186	135	----
27	247	235	194	153	124
28	259	247	212	165	141
29	280	259	224	176	162
30	294	280	247	200	171
31	306	294	259	212	188
32	329	312	280	224	200
33	341	329	294	247	224
34	365	341	306	259	235
35	376	365	329	280	256
36	400	376	341	294	271
37	412	400	365	312	288
38	435	412	376	329	306
39	447	435	400	353	329
40	471	447	412	365	347
41	482	471	435	388	365
42	500	488	447	406	382
43	518	506	471	424	400

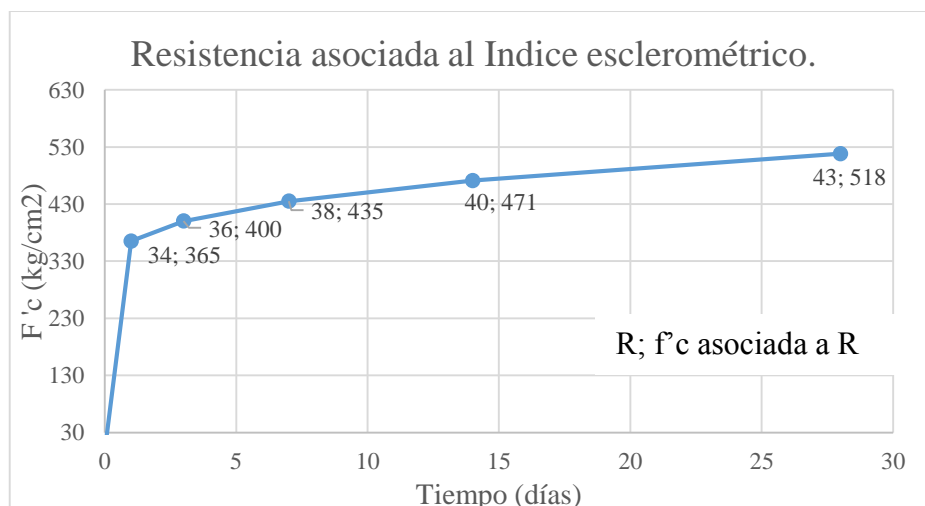


44	541	529	494	447	424
45	553	541	506	465	441
46	576	565	529	482	459
47	588	582	547	506	482
48	612	600	565	524	506
49	635	618	588	541	524
50	647	635	606	565	541
51	671	659	624	588	565
52	682	671	647	606	588
53	706	694	665	624	612
54	706	706	682	647	624
55	706	706	706	671	647

4.2.1 Verificación del crecimiento del índice esclerométrico en el tiempo.

Los ensayos con el esclerómetro, se realizaron inicialmente a 1, 3, 7, 14 y 28 días. Esto con el fin de verificar si existe crecimiento o aumento de rebotes conforme incrementan los días.

En la gráfica 2 se muestra los resultados del índice esclerométrico según el número de días, en la mezcla de hormigón de alta resistencia que se diseñó para un $f'c$ de 1000 kg/cm² a los 28 días.



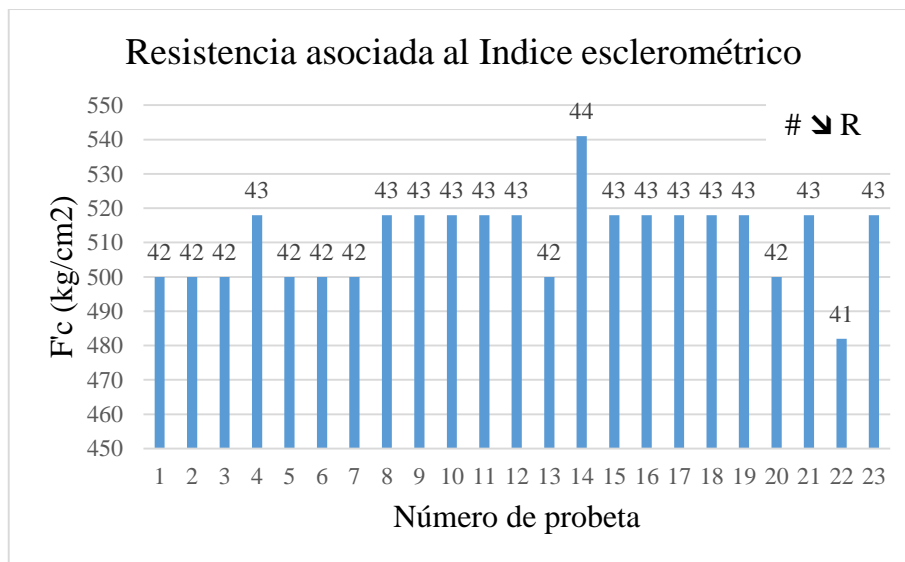
Gráfica 2 Resistencia a compresión a partir del # de rebotes a diferentes días.



En esta grafica se puede ver que la resistencia asociada al índice esclerométrico a los 28 días es de 518 kg/cm² lo cual es un 49 % menor que la resistencia de diseño. Este valor resulta demasiado bajo comparado con la resistencia real del hormigón, sin embargo, se puede observar que existe un crecimiento en la resistencia asociada al índice esclerométrico conforme avanzan los días.

4.2.2 Índice esclerométrico a los 21 días en probetas cilíndricas.

De igual manera se realizó el ensayo en 23 probetas a los 21 días de curado las cuales tienen un promedio de 42 rebotes. Este valor difiere en 1 rebote del valor promedio obtenido a los 28 días. En la gráfica 3 se muestra el índice esclerométrico de cada probeta, junto con su resistencia a compresión.



Gráfica 3 Resistencia a compresión a los 21 días, a partir del# de rebotes de 27 probetas.

De esta manera la resistencia asociada al índice esclerométrico promedio de las probetas ensayadas es de 508.85 kg/cm². Este promedio representa un 98 % de la resistencia asociada al índice esclerométrico obtenida en las probetas ensayadas a los 28 días.

4.2.3 Índice esclerométrico a los 21 días en vigas simples (sin refuerzo de acero).

Se realizó este ensayo en 3 vigas simples, es decir en vigas sin refuerzo de acero. En las cuales el número de rebote promedio fue de 51, 50 y 51. Para estos números de rebotes la resistencia asociada al índice esclerométrico es 671 kg/cm², 647 kg/cm² y 671 kg/cm² respectivamente. De las cuales se tiene una resistencia promedio de 663 kg/cm que es un



28 % mayor a la resistencia obtenida en las probetas ensayadas a los 28 días. En la tabla 19 se observa el índice esclerométrico de cada viga simple.

Tabla 19 Índice esclerométrico y resistencia asociada a R, en las vigas simples.

Vigas simples.	Índice esclerométrico R										R Promedio.	Resistencia asociada a R (kg/cm ²)
Viga Av1	45	49	53	49	46	50	49	48	52	50	51,0	671
	50	50	48	48	56	50	54	52	46	51		
	49	52	57	54	52	53	54	49	50	50		
Viga Bv1	47	54	51	54	51	55	53	52	49	45	50,0	647
	50	46	54	46	48	49	51	46	51	50		
	52	48	54	47	52	53	49	48	52	53		
Viga Bv2	57	50	53	52	50	50	51	52	48	49	51,0	671
	50	51	50	50	49	51	48	48	50	50		
	50	49	51	50	51	52	52	54	53	55		

4.3 Velocidad de pulso ultrasónico.

Al igual que el uso del esclerómetro para determinar el índice esclerométrico, la velocidad de pulso del ultrasonido es un ensayo no destructivo. Este ensayo nos permite determinar la velocidad de pulso ultrasónico a través de pulsos de ondas longitudinales de esfuerzo que son emitidos por un transductor electro-acústico que debe estar en contacto con el elemento de hormigón. Estos pulsos atraviesan la muestra de hormigón y llegan a otro transductor donde son convertidos en energía eléctrica, el tiempo (T) que tarda en llegar el pulso de un transductor a otro se mide de manera electrónica, mientras que la velocidad de pulso se obtiene dividiendo la distancia (L) entre los transductores y el tiempo (T) (ASTM C 597, 2002). La velocidad de pulso (V), de las ondas longitudinales de esfuerzos en el hormigón se relaciona con sus propiedades elásticas y su densidad de acuerdo a la fórmula 24.

$$v = \sqrt{\frac{E(1-u)}{\rho(1+u)(1-2u)}} \quad [24]$$

Donde:

E = Modulo de elasticidad dinámico.

u = Relación de poisson dinámico.



ρ = Densidad.

El procedimiento seguido para determinar la velocidad de pulso ultrasónico es el descrito por la norma ASTM C-597. Esta norma indica que se debe calibrar el equipo, para el cual se debe aplicar un agente de acoplamiento (gel) en los transductores y presionar las caras una contra la otra y se debe tomar el tiempo de tránsito el cual debe ser igual a 0. También se puede utilizar una barra de referencia, en la cual viene marcado un tiempo de tránsito, entonces para calibrar el equipo con la barra de referencia se aplica el agente de acoplamiento en los transductores y se coloca en los extremos de la barra de referencia y en el equipo se ingresa la distancia de la barra. Al tomar el tiempo de tránsito este debe ser igual al valor que viene dado en la barra, si este valor no coincide se debe ir cambiando el factor de corrección del equipo hasta que el tiempo de tránsito sea el marcado en la barra. En nuestro caso el valor indicado en la barra de referencia era de 20.8 us, con este valor el factor de corrección fue modificado de 1 a 1.4. En la ilustración 4 se muestra el equipo utilizado.



Ilustración 4 Equipo para pulso ultrasónico.

Además, la norma ASTM C-597 recomienda que los transductores se localicen en posiciones opuestas (Transmisión directa) para obtener mejores resultados. Sin embargo, debido a que el ancho del haz de vibraciones de pulsos que son emitidos por los transductores es grande, se puede medir el tiempo de tránsito en esquinas opuestas (Transmisión semidirecta) de un elemento o de una estructura de hormigón, pero en este caso se pierde exactitud en los resultados. Por otra parte, mediciones a lo largo de una misma superficie (Transmisión indirecta o superficial) no es recomendado ya que los valores obtenidos pueden ser solo de las capas superficiales. En la ilustración 4 se puede observar los tres tipos de transmisiones del pulso.

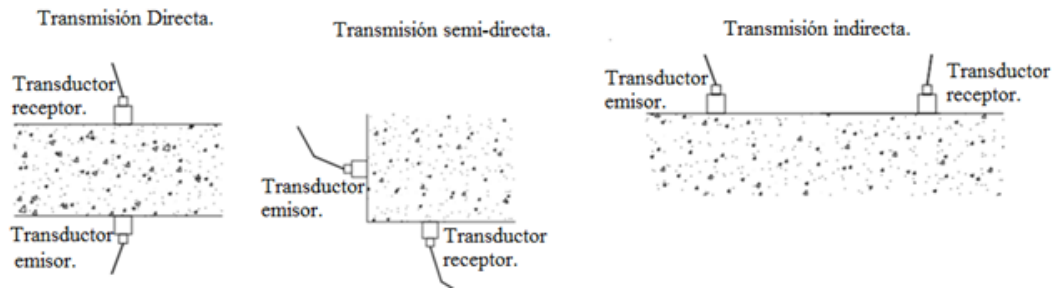


Ilustración 5 Tipos de transmisión de pulso. Fuente: Tesis “Resistencia a la Compresión del concreto a Partir de la Velocidad de Pulsos de Ultrasonido”.

La transmisión indirecta puede llegar a ser un método útil para determinar si el elemento tiene grietas o cavidades y para determinar o estimar la profundidad de una grieta superficial. Para determinar si existen grietas o cavidades se mide los tiempos de transito de los pulsos que pasan entre los transductores y cuando el tiempo de transmisión sea más extremadamente largo quiere decir que ahí puede existir grietas o cavidades. Además, se puede estimar la profundidad de grietas superficiales y si existe inclinación de las mismas. Para estimar la profundidad de grietas superficiales se debe medir el tiempo de tránsito sobre la grieta y a través de la grieta y utilizar la fórmula 25. Mientras que para determinar la dirección de la grieta inclinada se coloca los transductores cerca de la grieta, pero en lados opuestos a la grieta. Luego de tomar el tiempo de transito se debe mover un transductor lejos de la grieta. Si el tiempo de transito disminuye quiere decir que la grieta se inclina hacia la dirección en la cual se movió el transductor (Céspedes, 2003).

$$c = x * \sqrt{\frac{4T1^2 - T2^2}{T2^2 - T1^2}} \quad [25]$$

Donde:

C = Profundidad de la grieta.

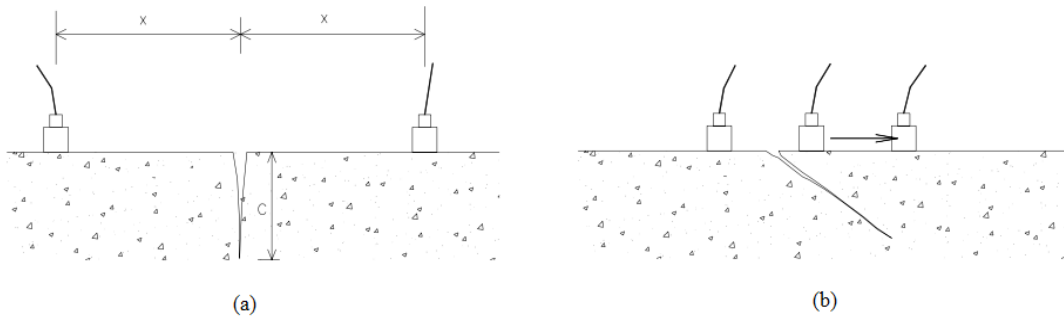
X = Distancia a la grieta.

T1 = Tiempo de transmisión hasta x.

T2 =Tiempo de transmisión hasta 2 veces x.



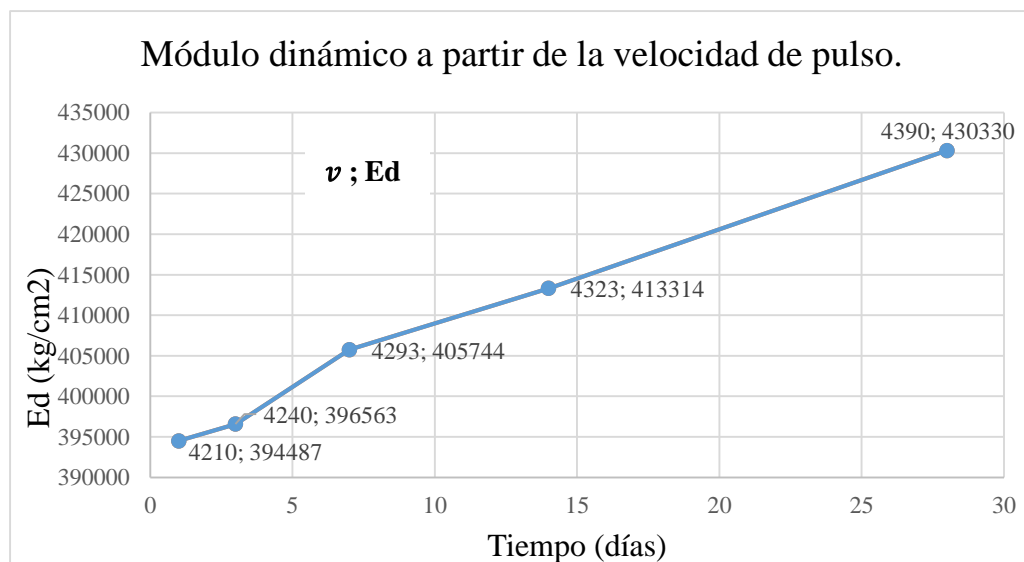
En la ilustración 6 se muestra los dos casos de grietas.



4.3.1 Verificación del crecimiento del módulo dinámico de elasticidad en el tiempo.

De igual manera que con el índice esclerométrico, el ensayo de la velocidad de pulso en un inicio se realizó a 1, 3, 7, 14 y 28 días. Esto con el fin de verificar si existe crecimiento o aumento del módulo dinámico conforme incrementan los días.

En la gráfica 4 se muestra los resultados del módulo dinámico según el número de días de curado. Claramente se observa que el módulo dinámico de elasticidad incrementa conforme avanzan los días: esto se debe a que la velocidad de pulso en las probetas incrementa conforme aumenta la cantidad de días de curado.

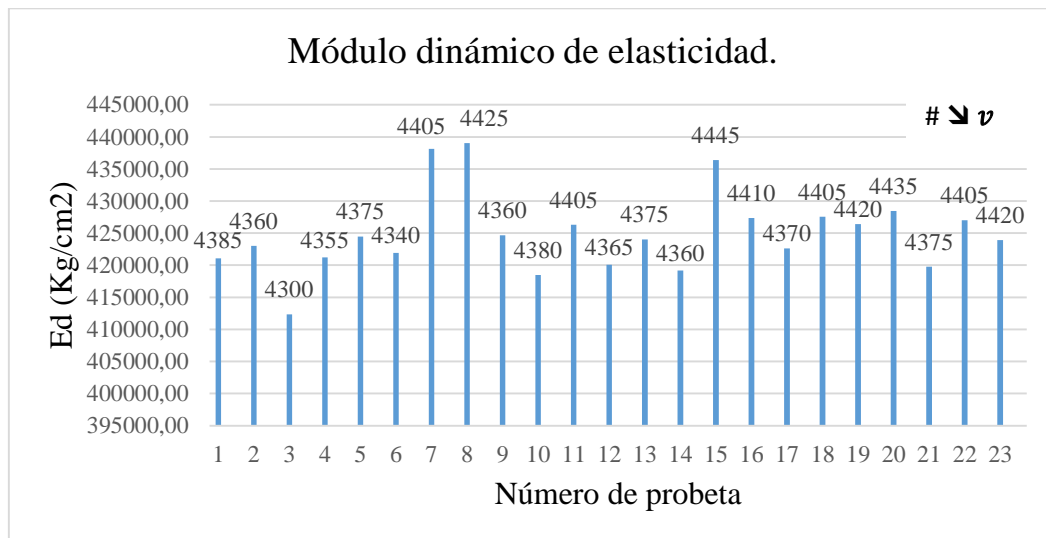


Gráfica 4 Cambio del módulo dinámico de elasticidad en el tiempo.



4.3.2 Módulo dinámico de elasticidad a los 21 días en probetas cilíndricas.

Se registró el tiempo de transmisión y la velocidad de pulso de 23 probetas adicionales para determinar el módulo dinámico de elasticidad. Estas probetas tienen un módulo dinámico de elasticidad promedio de 424931.48 kg/cm². Este valor es 0.7 % mayor que el valor interpolado a los 21 días de la gráfica 4, el cual es 421822.06 kg/cm².



Gráfica 5 Módulo dinámico de elasticidad a partir de la velocidad de pulso en 23 probetas.

4.3.3 Velocidad del pulso a los 21 días en vigas simples (sin refuerzo de acero).

La velocidad de pulso en las vigas simples se midió en la base y altura de la sección las cuales tienen una velocidad promedio de 4393 m/s y 4313 m/s respectivamente. Con la fórmula 25 se obtuvo los módulos de elasticidad dinámico; los cuales son igual a 426166.15 kg/cm² y 4170786.99 kg/cm² respectivamente. Estos valores son similares a los valores obtenidos en las probetas.

Además, se midió la velocidad de pulso en una sola cara de cada viga para verificar si existían grietas, para ello se tomó medidas a cada 10 cm y a cada 20 cm. Cuatro medidas cada 10 cm y 3 medidas cada 20 cm. Se puede decir que las vigas simples no tienen grietas ya que las velocidades obtenidas a cada 10 cm y 20 cm son bastante cercanas respectivamente. Las velocidades a cada 10 cm están entre 3650 m/s y 3790 m/s, mientras que las velocidades a cada 20 cm están entre 2840 m/s y 2910 m/s.



4.4 Resistencia a la compresión.

La resistencia a compresión del hormigón es su propiedad más importante ya que es la medida más utilizada en el diseño de estructuras de hormigón. La resistencia de diseño se logra a los 28 días.

Para evaluar la resistencia a compresión se utilizaron especímenes cilíndricos de 100 x 200 mm². La resistencia a compresión de las probetas de hormigón se midió en la prensa hidráulica, la cual aplica carga sobre la superficie superior del cilindro. Ya que la superficie de las probetas generalmente era áspera y no del todo plana, se optó por utilizar neoprenos en las caras de la probeta. Esto con el fin de evitar que la resistencia real se vea afectada ya que Sánchez de Guzmán (1996) menciona que una falta de planicie de 0,25 mm puede reducir la resistencia a compresión en un tercio de la resistencia real. Se eligió utilizar los neoprenos en las caras de las probetas ya que no se pudo utilizar un compuesto de coronamiento de azufre debido a que la resistencia de este material es menor a la resistencia de las probetas. Según Aiticin (1998) la resistencia de este material es de 408 kg/cm², mientras que las probetas de este trabajo de titulación tienen una resistencia mucho mayor.

En la ilustración 7 se muestra el ensayo a compresión de una probeta.

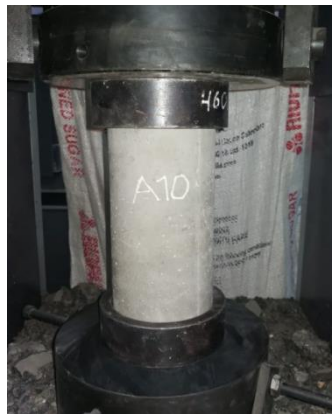


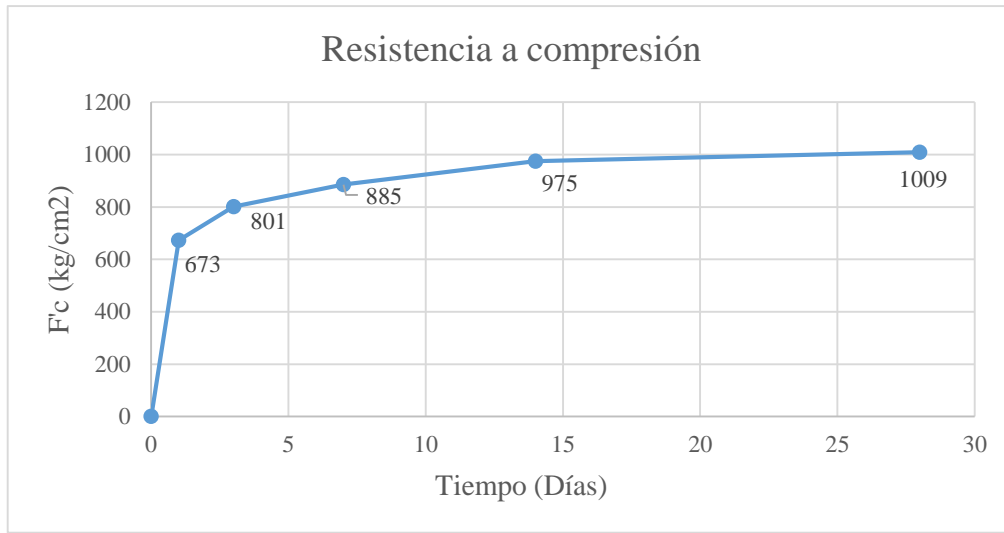
Ilustración 7 Ensayo a compresión en la prensa hidráulica.

Se realizó el ensayo a 1, 3, 7, 14 y 28 días de curado para determinar si el hormigón tenía una resistencia cercana a 1000 kg/cm². Además, se determinó la resistencia a los 21 días de 18 probetas, para comprobar que la resistencia es proporcional a la mezcla de diseño.



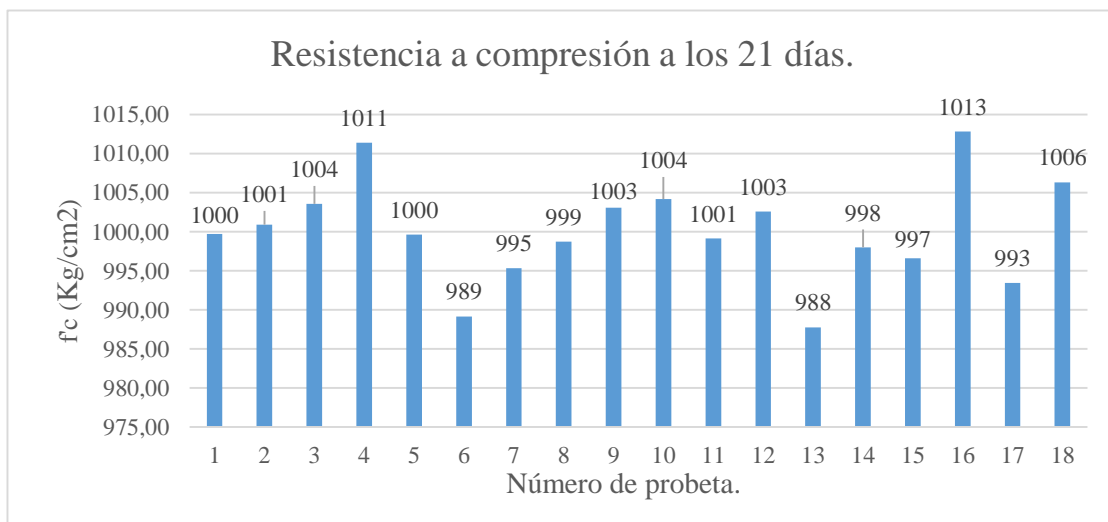
4.4.1 Cambio en el tiempo de la resistencia a compresión.

Al incluir el cemento Holcim Premium Tipo HE, el hormigón alcanza inmediatamente una resistencia del 66.68% de la resistencia final, lo cual equivale a 672.82 kg/cm². Es decir, desde el primer día de curado se le puede considerar como un HAR. En la gráfica 6 se puede observar el comportamiento del hormigón en el tiempo, hasta alcanzar su resistencia máxima a los 28 días de 1009 kg/cm².



Gráfica 6 Comportamiento del hormigón en el tiempo.

4.4.2 Resistencia a compresión a los 21 días.



Gráfica 7 Resistencia a compresión a los 21 días de curado.

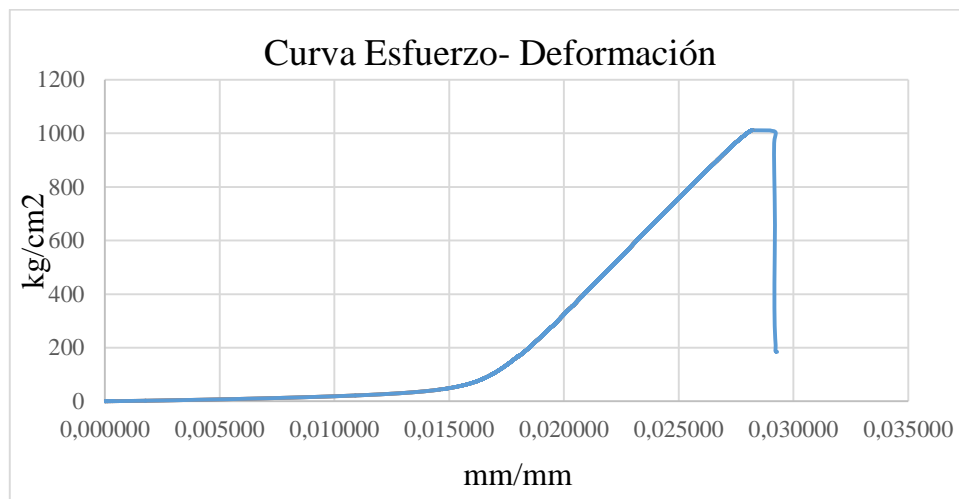
En la gráfica 7 se presentan los valores obtenidos de las probetas ensayadas a los 21 días de curado las cuales tienen una resistencia promedio de 1000 kg/cm² y una desviación



estándar de 6.37 %. La desviación indicada en la norma NTE INEN es de 9 % para dos probetas y de 10.6 % para 3 probetas. Por lo cual el valor obtenido de 6.37 % cumple con lo establecido en esta norma.

4.4.3 Curva esfuerzo-deformación.

Para realizar las curvas esfuerzo-deformación se utilizó los resultados obtenidos en la prensa hidráulica Shimadzu, la cual nos da como resultado la fuerza aplicada y el desplazamiento. Entonces con el área de la probeta se determinó el esfuerzo correspondiente a cada desplazamiento y con la longitud inicial de la probeta se obtuvo la deformación. En la gráfica 8 se presenta la curva esfuerzo-deformación de una probeta.



Gráfica 8 Curva esfuerzo-deformación

4.5 Módulo de elasticidad.

Para la determinación del módulo de elasticidad se hizo uso de la norma ASTM C 469 para cilindros y núcleos de hormigón.

Para determinar el módulo de elasticidad el método proporciona una relación entre el esfuerzo y la deformación, en cambio para la relación de Poisson se establece una relación entre la deformación unitaria transversal y la deformación unitaria longitudinal.

El módulo de elasticidad y la relación de Poisson son aplicables dentro de los rangos de esfuerzo de trabajo comúnmente entre 0 a 40% de la resistencia última del hormigón, son usados para el dimensionamiento de elementos reforzados como no reforzados. Cabe



recaltar que los valores de módulo de elasticidad obtenidos usualmente serán menores a los módulos obtenidos bajo una aplicación rápida de carga.

La norma ASTM C 469 establece que para determinar el módulo de elasticidad se debe hacer uso de un dispositivo sensor que mida con una aproximación de 5 millonésimas, la deformación promedio en dos líneas de base diametralmente opuestas, cada una paralela al eje axial y centrada a la mitad de la altura de la probeta de hormigón o espécimen.

Para determinar el módulo de elasticidad de cilindros de hormigón moldeados, estos deben haber estado en curado de acuerdo a las condiciones de curado normalizado especificadas y ser ensayadas de acuerdo a la edad para la cual se desea la información del módulo de elasticidad. Los especímenes deben ser ensayos luego de una hora de haber sido retirados de la cámara de curado. Los especímenes se deben mantener húmedos en el lapso entre el cual se retiraron de la cámara de curado y la realización del ensayo de módulo de elasticidad.

Finalmente, el procedimiento pide que se ensayen 2 especímenes del mismo lote de mezcla para determinar la resistencia a compresión, previo a la realización del ensayo del módulo de elasticidad.

Para determinar el módulo de elasticidad se utiliza la fórmula 26, la misma que se encuentra en la norma ASTM C469.

$$E = \frac{S2 - S1}{\xi2 - 0.00005} \quad [26]$$

Dónde;

E= Módulo de elasticidad (Kg/cm²),

S2= Esfuerzo correspondiente entre 0% y 40% de la carga última (Kg/cm²)

S1= Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal $\xi1$ de 50 millonésimas (Kg/cm²).

$\xi2$ = Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2.



4.5.1 Resultados de módulo de elasticidad obtenida a los 21 días.



Ilustración 8 Compresión sin neoprenos.

Para desarrollar el ensayo de módulo de elasticidad se realizó previamente un ensayo de compresión simple a 4 especímenes como se indica en la ilustración 8. De acuerdo con el libro de concreto de alto desempeño indica que los especímenes deben ser capeados para desarrollar el ensayo de módulo de elasticidad, sin embargo, el capeo con azufre se debe aplicar a especímenes que sean sometidos hasta una resistencia máxima de 408 Kg/cm^2 . Debido a que la resistencia alcanzada es de 1000 Kg/cm^2 se pulió la superficie de las probetas para que de este modo la carga se distribuya uniformemente en toda la superficie del espécimen como muestra en la ilustración 8. Luego de ensayar los especímenes a compresión se procedió a sacar el promedio de carga el cual fue de 165 KN o 16830 Kg , que representa el 20.94% de la carga máxima, por lo que se encuentra dentro de los límites especificados por la norma ASTM C469 los mismos que son entre 0% y 40% de la carga ultima.



Ilustración 9 Ensayo: Módulo de elasticidad.



Luego de obtener la carga promedio se procedió a realizar el ensayo de módulo de elasticidad. Para obtener los resultados de la máquina Shimadzu se instalaron los equipos necesarios como lo es el extensómetro indicado en la ilustración 9, el mismo que registra el desplazamiento provocado por la carga de compresión en el espécimen. La deformación se registra en los 10cm que tiene de apertura el extensómetro. Cada espécimen fue ensayado 3 veces, es decir hubo 3 ciclos de carga y descarga, para determinar el módulo de elasticidad promedio.

En la gráfica 9, se muestra los resultados obtenidos del espécimen A2. El módulo de elasticidad determinado fue de 534526.23 Kg/cm². Si se haría uso de la fórmula 19.2.2.1 (b) para obtener el módulo de elasticidad de acuerdo al código ACI 318-14 el módulo de elasticidad para un hormigón de resistencia de 1000 Kg/cm² sería de 477504 Kg/cm².

		Ensayo:	Módulo de elasticidad del hormigón.				
		Fecha:	27 de noviembre de 2018				
		Norma:	ASTM C469				
		Edad del espécimen:	21 días				
Módulo de elasticidad del hormigón							
Características del espécimen							
Nombre:	A2	-		Carga Máxima:	80376.94 Kg		
Diametro:	10.11	cm		Resistencia Máx:	1001.24 Kg/cm ²		
Altura:	19.92	cm		Densidad:	2427.90 Kg/m ³		
Área:	80.28	cm ²		N° de ensayos:	3 -		
Longitud inicial:	10	cm					
Gráfica Esfuerzo - Deformación.							
Esfuerzo - Deformación							
Resultados.							
					ME	Kg/cm ²	
S1 Kg/cm ²	29.05	S2 Kg/cm ²	213.53	ξ ₂	0.000395378	ME1	534140.18
	28.85		213.53		0.000395378	ME2	534719.26
	28.85		213.53		0.000395378	ME3	534719.26
						ME PROM	534526.23

Gráfica 9 Determinación del módulo de elasticidad.



4.6 Resistencia a la tracción indirecta.

La norma ASTM C 496 indica el método de ensayo para determinar la resistencia del hormigón a la tracción de especímenes cilíndricos de hormigón, estos pueden ser cilindros moldeados o núcleos extraídos. La resistencia a la flexión del hormigón es una característica mecánica muy importante en el hormigón endurecido, especialmente en estructuras de hormigón simple, como lo es en pavimentos donde adicionalmente aparecen esfuerzos de tracción ocasionado por la flexión de las placas producida por el paso de los vehículos. Se sabe de ante mano que el hormigón posee muy baja resistencia a la tracción por lo cual esta propiedad no se tiene en cuenta en el diseño de estructuras convencionales. La tracción tiene importancia en el agrietamiento del hormigón debido a la restricción de la contracción debida al secado o por la disminución de la temperatura (Sánchez de Guzmán, 1996).

Este método de ensayo consiste en aplicar la carga a compresión diametral a lo largo de la longitud del espécimen cilíndrico de hormigón a una velocidad constante hasta que se produzca la falla, la velocidad de carga se encuentra entre 0.7 a 1.4 MPa/min. En la ilustración 10 se observa la forma en la que se realizó el ensayo.



Ilustración 10 Ensayo de tracción indirecta.

Por último, se calculó el esfuerzo de tracción de acuerdo a la fórmula 27, la misma que se encuentra en la norma ASTM C496.

$$T = \frac{2P}{\pi l d} \quad [27]$$

Dónde;



T = Esfuerzo de tracción (Kg/cm²)

P = Carga máxima aplicada (Kg)

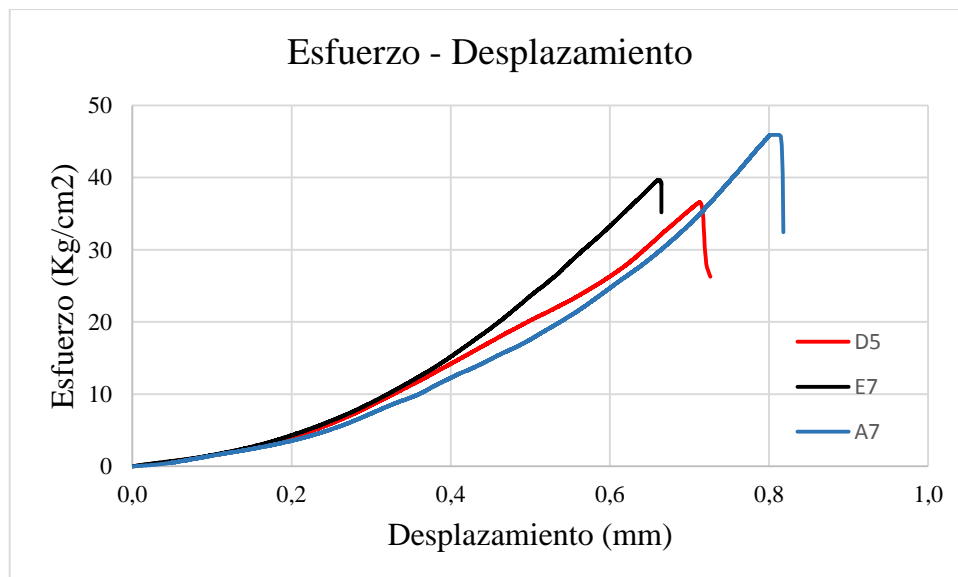
l = Longitud del espécimen (cm)

d = Diámetro del espécimen (cm)

4.6.1 Resultados resistencia a tracción indirecta a los 21 días.

Para el ensayo de esfuerzo de tracción se utilizaron 3 especímenes. En la gráfica 10 y la tabla 20 se presentan los resultados de los ensayos realizados en los especímenes E7, D5 y E6. La fuerza máxima promedio obtenida en este ensayo fue de 12992.73 Kg la cual representa el 15.81% de 82194.21 Kg que se registró como fuerza máxima en el ensayo a compresión.

El ensayo de tracción indirecta permitió observar el comportamiento del HAR. El resultado del esfuerzo a la tracción indirecta fue de 40.71 Kg/cm² en promedio la cual es mayor al esfuerzo a la tracción de un hormigón convencional el cual tiene un esfuerzo entre 20 y 30 Kg/cm².



Gráfica 10 Curva esfuerzo- desplazamiento de las probetas ensayadas a tracción.

Tabla 20 Fuerza y Esfuerzo a tracción

Espécimen	Fuerza (Kg)	Esfuerzo de tracción (Kg/cm ²)
E7	12630.83	39.61
D5	11670.61	36.60
E6	14676.75	45.93
Promedio	12992.73	40.71

En la ilustración 11 se puede observar el resultado del ensayo de tracción indirecta, el cual tiene claramente el plano de falla que se espera de acuerdo a la norma ASTM C469.



Ilustración 11 Modo de falla del ensayo a tracción.

4.7 Resistencia a flexión (Módulo De ruptura).

La norma NTE INEN 2554 indica el ensayo para determinar la resistencia a la flexión del hormigón usando una viga simple apoyada en los extremos, a la cual se le aplica la carga en los tercios de la luz libre. Este ensayo es muy utilizado para pruebas del hormigón, sobre todo para la construcción de losas y pavimentos.

El ensayo se realizó con la viga apoyada libremente en los extremos y luego se aplicó la carga en los tercios de la luz libre hasta que se produzca la rotura del espécimen. La velocidad de carga es constante por último la resistencia a la flexión se determina por medio del módulo de rotura.



El módulo de rotura del hormigón corresponde al esfuerzo máximo de flexión y se calcula en base a la fórmula 28 (Sánchez de Guzmán, 1996).

$$MR = \frac{P L}{b d^2} \quad [28]$$

Dónde;

MR= módulo de rotura del hormigón (Kg/cm²).

P= carga máxima aplicada (Kg).

L= luz libre entre apoyos (cm).

b= ancho de la viga (cm).

d= altura de la viga (cm).

Sin embargo, si la falla se produce fuera del tercio medio de la viga, pero no está separado de él más de una longitud equivalente al 5% de la luz libre entre apoyos, el módulo de rotura se calcula según la fórmula 29. De otro modo, si la falla se produce fuera del tercio medio de la viga, es decir, incumple con lo antes mencionado se descarta el ensayo (Sánchez de Guzmán, 1997).

$$MR = \frac{3P a}{b d^2} \quad [29]$$

Dónde;

a = distancia entre la línea de rotura y el apoyo más próximo, la medida se toma a lo largo del eje longitudinal de la cara inferior de la viga (cm).

En la ilustración 12 se esquematiza el ensayo a flexión de una viga simple.

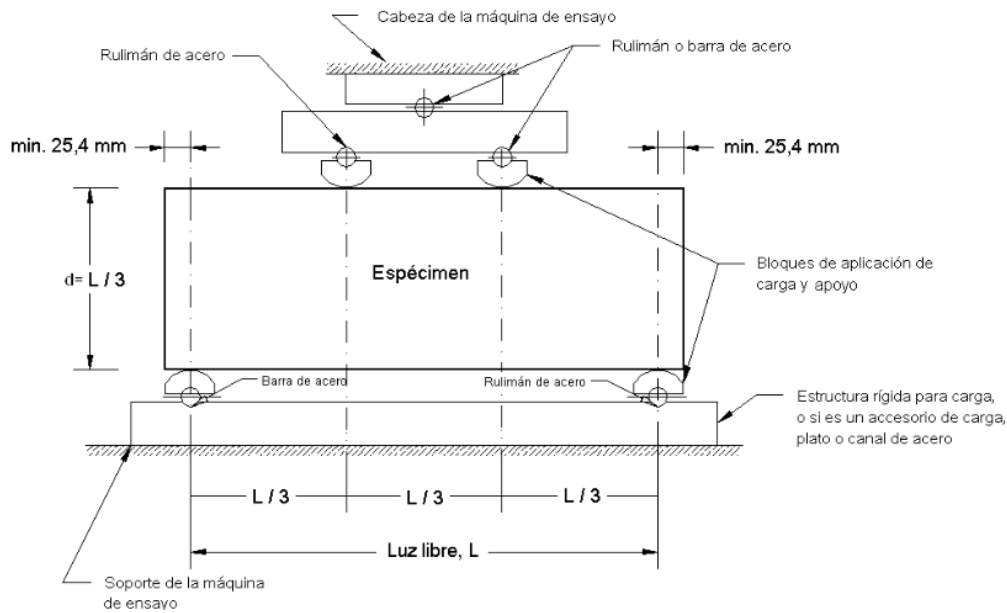


Ilustración 12 Esquema del ensayo a flexión de una viga simple.

4.7.1 Resultados de Módulo de ruptura.

Para este ensayo se realizaron 3 vigas simples, en los 3 casos se utilizó la fórmula 28 ya que la falla se dio en el tercio medio de las vigas. En la tabla 21 se puede observar el módulo de ruptura correspondiente a cada viga.

Tabla 21 Módulo de ruptura en las vigas simples.

Nombre	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	MR (kg/cm ²)
Av1	5631,62	45	15,18	15,1	73,22
Bv1	5465,7	45	15,15	15,18	70,45
Bv2	5464,21	45	15,15	15,24	69,88

El hormigón tiene un MR promedio igual a 71.18 kg/cm².

Sánchez de Guzmán (1996) establece una relación aproximada para determinar el módulo de ruptura a partir de la resistencia a compresión. La fórmula 30 es recomendada por el comité europeo del hormigón.

$$MR = K * \sqrt{f'c} \quad [30]$$

Donde:



Universidad de Cuenca.

$K =$ Valor entre 2 a 2.7 (Comité ACI recomienda 2 y europeo 2.5)

Entonces con el valor recomendado por el ACI se tiene un MR igual a 63.25 Kg/cm², mientras que con el valor recomendado por el comité europeo el MR es igual a 79.06 kg/cm². Estos valores difieren alrededor de 11 % del MR promedio del hormigón ensayado, dando así un coeficiente K de 2.25 con la resistencia de 1000 kg/cm².



CAPITULO 5: DISEÑO Y ANÁLISIS DE VIGAS DE HORMIGON ARMADO.

5.1 Diseño de una viga de hormigón armado.

Para la construcción del elemento de hormigón armado se hizo uso del código ACI-318 14, el cual es apto para elementos estructurales en edificaciones.

La elaboración del elemento viga se realizó en base al capítulo 18 del código ACI, sección 18.6 la cual corresponde a vigas de hormigón armado especiales resistentes a momento, que forman parte del sistema resistente ante fuerzas sísmicas y que se diseñan principalmente para resistir efectos de flexión y cortante. Las dimensiones de la viga se detallan en la ilustración 13.

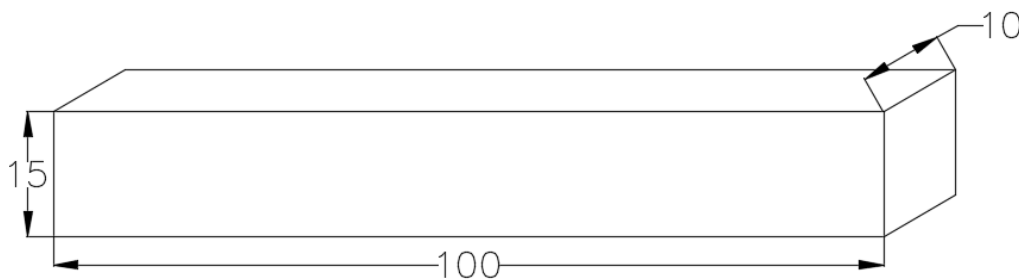


Ilustración 13 Dimensiones de la viga en centímetros.

Se eligieron estas dimensiones ya que los equipos que se disponen en el laboratorio de Geotecnia y Materiales de la facultad de ingeniería de la Universidad de Cuenca no permiten desarrollar elementos de mayor dimensión.

5.1.1 Diseño del refuerzo de acero a flexión.

El recubrimiento de la viga tiene una dimensión de 2.1 cm al centro de la varilla.

Límites dimensionales:

- La luz de las vigas debe cumplir con los siguientes requerimientos: la luz libre (l_n) no debe ser menor que $4d$; dónde d corresponde a la altura efectiva. La luz libre corresponde a 75cm debido a que los equipos disponibles en el laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca no proporcionan el desarrollo de elementos de mayor dimensión.



- b) El ancho b_w de la viga debe ser al menos igual al menor de $0.3h$ y 250mm . Como la altura efectiva de la viga es de 15 cm , el ancho de la viga de 10 cm cumple con el requerimiento, dado que $0.3h$ corresponde a 4.5 cm .

Refuerzo longitudinal.

De acuerdo al ACI 318 14, las vigas deben tener al menos 2 barras continuas en las 2 caras del elemento, es decir, superior e inferior.

Acero de refuerzo máximo $A_{s, \text{máx}}$:

La cuantía de refuerzo ρ (rho) no debe ser mayor a 0.025 fórmula 31.

$$A_{s \text{ máx}} = 0.025 * B_w * d = 3.225 \text{ cm}^2 \quad [31]$$

Acero de refuerzo mínimo $A_{s, \text{min}}$:

Debe ser mayor que las ecuaciones 32 y 33.

$$A_{s \text{ min}} = 0.80 * \frac{\sqrt{f'c}}{f_y} * b_w * d \quad [32]$$

$$A_{s \text{ min}} = 14 * \frac{b_w}{f_y} * d \quad [33]$$

Dónde;

$f'c$ = Resistencia del hormigón 1000 Kg/cm^2 .

f_y = Fluencia del acero (4200 Kg/cm^2).

B_w = Ancho de la viga 10 cm .

d = Altura efectiva de la viga 12.90 cm .

La fórmula que gobierna la cuantía mínima corresponde a la fórmula 34, debido a que la resistencia del hormigón $f'c$ es mayor a 307 Kg/cm^2 .

$$A_{s \text{ min}} = 0.80 * \frac{\sqrt{1000}}{4200} * 10 * 12.90 = 0.78 \text{ cm}^2 \quad [34]$$



Se colocaron 2 varillas de 10mm, lo que significa que el acero colocado corresponde a 1.57 cm² y cumple con la cuantía máxima.

Finalmente se determinó el momento último que resiste el elemento siendo este de 74290.9 Kg-m, por lo tanto, la carga máxima que soporta el elemento es de 5943.27 Kg.

5.1.2 Diseño del refuerzo de acero a cortante (Refuerzo transversal).

El código ACI – 318 14 sección 18.6.4 indica que deben colocarse estribos cerrados de confinamiento en las siguientes secciones de la viga:

- a) Los estribos cerrados de confinamiento deben colocarse en una longitud de dos veces la altura de la viga, esto medido desde la cara de miembros de apoyo hacia el centro de la luz, en los extremos de la viga.
- b) Los estribos cerrados de confinamiento deben colocarse en longitudes iguales a 2 veces la altura de la viga en ambos lados de una sección donde puede ocurrir fluencia por flexión debido a los desplazamientos laterales más allá del rango elástico de comportamiento.

De acuerdo con la sección 18.6.4.4 el primer estribo cerrado de confinamiento debe ser colocado a no más de 50 mm de la cara de la columna de apoyo. Además, el espaciamiento de los estribos cerrados de confinamiento no debe exceder el menor de:

- a) $d/4$
- b) Seis veces el diámetro de las barras principales a flexión más pequeñas, excluyendo el refuerzo superficial requerido
- c) 150 mm.

Resistencia a cortante.

El código ACI-318 14 sección 18.6.5.1 indica que la fuerza cortante de diseño V_e debe determinarse a partir de las fuerzas en la parte de la viga comprendida entre las caras del nudo.

La resistencia a cortante requerida se obtiene considerando un esfuerzo de al menos 1.25 f_y para el refuerzo longitudinal. Esto debido a que la resistencia a fluencia del acero real



puede exceder la resistencia de fluencia especificada por el fabricante. Mediante la tabla 22 se muestra la resistencia a cortante obtenida.

Tabla 22 Resultados de diseño a cortante.

a	$As1*(1.25*fy) /0.85f'c*b)$	0.97 cm
Mu	$0,9*As1*(1.25*fy) *(d-a/2)$	92143.5 Kg-cm
Pu	$(2/25) *Mu$	7371.48 kg
Vu	$Pu/2$	3685.74 kg

Se tiene que suponer que en las caras de los nudos localizados en los extremos de la viga actúan momentos de signo opuesto los cuales corresponden a la resistencia a flexión probable, M_{pr} , y que la viga se encuentra cargada a lo largo de la luz con cargas aferentes gravitacionales mayoradas.

De acuerdo a la sección 18.6.5.2, el refuerzo transversal que corresponde a los estribos cerrados de confinamiento en los lugares identificados de la viga debe diseñarse para resistir un cortante suponiendo que $V_c=0$, donde V_c es la colaboración de la resistencia al cortante del hormigón, donde ocurran simultáneamente los literales (a) y (b):

- a) La fuerza de cortante calculada de acuerdo a la sección 18.6.5.1 representa la mitad o más de la resistencia máxima a cortante requerido en dichas zonas.
- b) La fuerza axial correspondiente a la compresión mayorada P_u incluyendo los efectos sísmicos es menor a $A_g f'c/20$. Donde A_g es el área bruta de la sección.

En la tabla 22 se muestra la fuerza cortante obtenida la misma que tiene un valor de 3685.74 Kg, el elemento viga fue diseñado para esta fuerza cortante. Por lo tanto, se cumplen con el literal (1), el literal (2) se cumple debido a que se tiene un hormigón con $f'c$ de 1000 Kg/cm². Por lo tanto, $V_c=0$.

Las dimensiones de la sección transversal de la viga deben seleccionarse para que cumplan con la fórmula 35 del código ACI 318-14.

$$Vu \leq \phi(Vc + 2.2\sqrt{f'c} bw d) \quad [35]$$

Mediante la fórmula anterior se determina que cumple con la disposición del código, el valor obtenido con la fórmula fue de 6730.91 Kg.



De esta manera se propusieron 2 ramas para el refuerzo a cortante, es decir se colocará un estribo cerrado de confinamiento de 135°, el diámetro de la varilla para el estribo es de 6mm, por lo tanto, el área de refuerzo a cortante colocado es de 0.565 cm².

En la ilustración 14, se detalla las dimensiones del estribo cerrado de confinamiento utilizado para la elaboración del elemento viga, desarrollado en este trabajo de titulación.

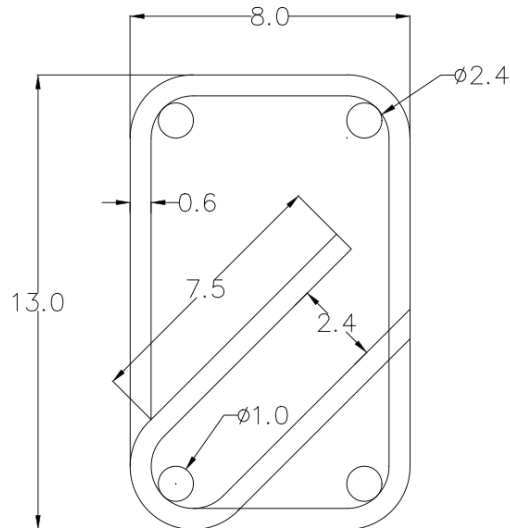


Ilustración 14 Detalle del estribo cerrado de confinamiento.

De acuerdo con el espaciamiento o la distribución de los estribos cerrados de confinamiento el primer estribo debe ser colocado a no más de 50 mm de la cara de la columna según disposiciones del ACI-318 14. Según la sección 18.6.4.4 el espaciamiento de los estribos cerrados de confinamiento se debe elegir el menor de (a), (b) ó (c):

Tabla 23 Espaciamiento en la zona de confinamiento.

(a) $d/4$	3.23 cm
(b) 6 veces el diámetro de las barras principales a flexión de menor diámetro.	60 cm
(c) 150 mm	150 cm

De acuerdo a la tabla 23, el espaciamiento máximo del refuerzo transversal corresponde a 3.23 cm. Para la elaboración de los elementos viga el espaciamiento máximo del refuerzo es de 3 cm, con lo cual cumple las especificaciones del código ACI-318 14.



Finalmente se verifico la capacidad real a cortante ΦV_n , la cual corresponde a la suma de la resistencia al cortante por parte del hormigón V_c y la resistencia al cortante por parte del acero V_s . La resistencia al cortante brindada por el refuerzo de acero se determinó según la fórmula 36.

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad [36]$$

Con lo cual se obtuvo un valor de V_s de 10212.69 Kg. De esta manera el valor de la resistencia a cortante nominal ΦV_n es de 7659.52 Kg. Como la resistencia de cortante nominal ΦV_n es mayor que el cortante V_u de diseño, el diseño cumple con los requerimientos impuestos por el código ACI-318 14.

5.2 Índice esclerométrico a los 21 días en las vigas de hormigón armado.

Al ser una viga de hormigón armado parte de las estructuras, al índice esclerométrico promedio se realizó una corrección por el ángulo de inclinación con la fórmula 23:

$$R = R_o + \Delta R \quad [23]$$

Donde:

R = Índice esclerométrico.

R_o = Índice esclerométrico promedio.

ΔR = Valor de corrección.

En la tabla 24 se muestran los valores de corrección según el ángulo y el índice esclerométrico.

Tabla 24 Corrección de rebotes. Fuente: Manual esclerómetro.

Ro	ΔR			
	+90	+45	-45	-90
20	-6	-4	+2	+3
30	-5	-3	+2	+3
40	-4	-3	+2	+2
50	-3	-2	+1	+2
60	-2	-2	+1	+2

Al realizar la corrección se puede ver que las vigas de hormigón armado tienen una resistencia asociada al índice esclerométrico promedio de 671 kg/cm², lo cual es un 29.53% mayor a la resistencia asociada al índice esclerométrico de las probetas ensayadas



a los 28 días y además tienen una resistencia 1 % mayor a las de las vigas simples. Es decir, la resistencia a compresión del hormigón en las vigas de hormigón armado tiene prácticamente la misma resistencia de las vigas simples. En la tabla 25 se puede observar el índice esclerométrico de cada viga armada y su resistencia asociada al índice esclerométrico.

Tabla 25 Resistencia del hormigón utilizado en las vigas con acero de refuerzo, a partir del # de rebotes.

Vigas armadas.	Índice esclerométrico.										Promedio Ro	R	Resistencia asociada a R (kg/cm ²)
Viga Cv1	52	49	47	47	51	44	43	49	48	51	48,9	50,9	671
	50	49	48	49	51	48	47	48	53	50			
	49	49	45	50	56	49	45	55	50	49			
Viga Cv2	42	46	45	50	50	50	48	50	50	53	48,6	50,6	671
	50	49	46	49	50	48	50	52	48	50			
	48	49	50	50	48	48	49	48	48	45			
Viga Dv1	43	50	46	49	49	51	50	50	51	48	48,9	50,9	671
	47	49	48	50	51	50	52	51	51	47			
	47	48	50	48	49	43	50	47	51	43			
Viga Ev1	47	42	42	47	51	52	48	48	49	45	48,7	50,7	671
	51	49	46	55	50	53	53	49	49	50			
	53	48	46	46	49	49	50	46	46	49			

5.3 Resultados ensayo a flexión.



Ilustración 15 Ensayo de flexión de la viga de hormigón armado.



El ensayo de flexión de la viga de hormigón armado se realizó de manera similar a la viga simple que sigue la norma NTE INEN 2554. Ya que al tener la viga una luz libre entre apoyos de 75 cm como se muestra en la ilustración 15, la carga se aplica en el tercio medio pero separados 25 cm y no 15 cm.

En la ilustración 16 se muestra el resultado del ensayo de flexión de la viga dónde se muestra claramente la falla esperada, el acero principal fluyó y fracasó la viga a flexión.

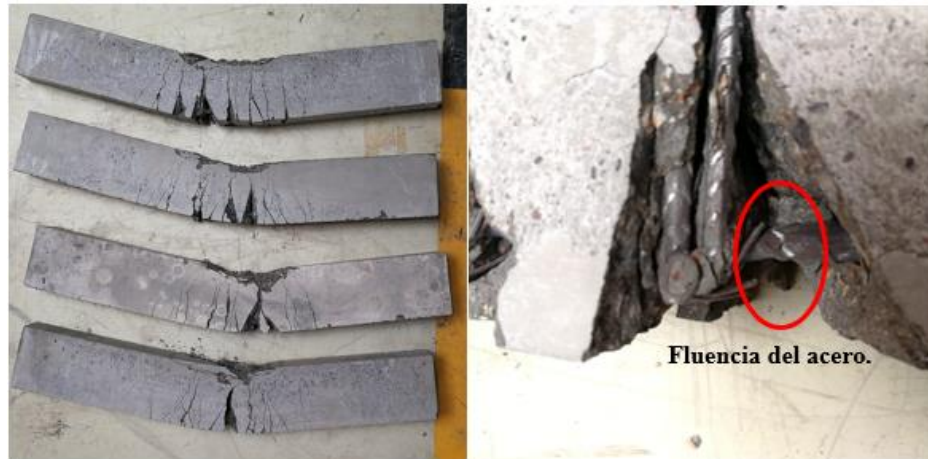


Ilustración 16 Resultado del ensayo a flexión con hormigón de 1000 Kg/cm²

En el curso de proyecto estructural dictado en el último semestre de la carrera se realizó una viga de hormigón armado con la misma estructura de acero, pero con un hormigón de resistencia a la compresión de 450 Kg/cm². La falla que se obtuvo al usar un hormigón de menor resistencia fue a cortante como se puede ver en la ilustración 17.



Ilustración 17 Resultado del ensayo a flexión con hormigón de 450 Kg/cm²

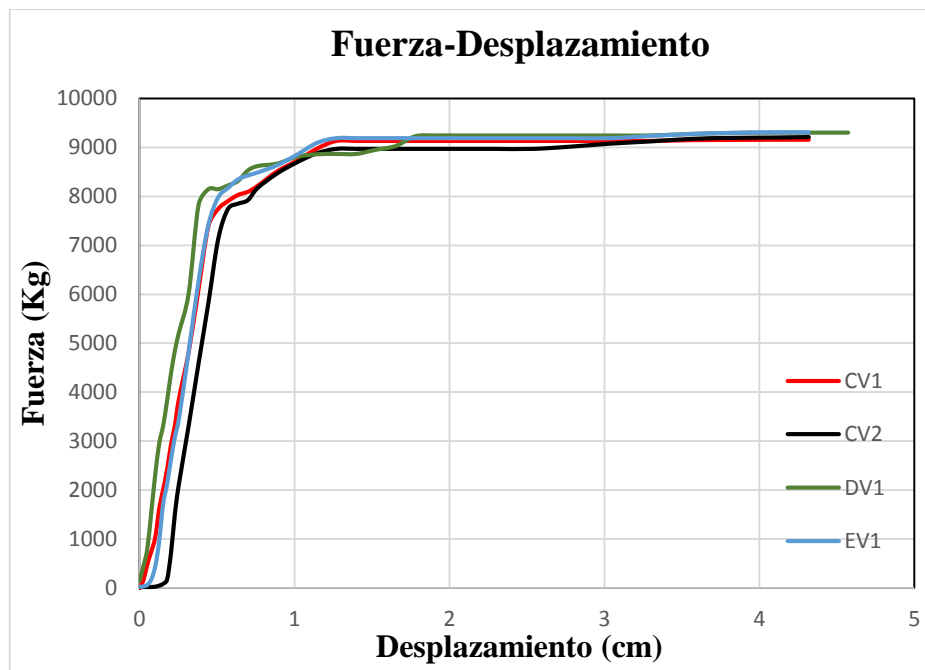


Además, se presenta en la ilustración 18 la falla a flexión de la viga, donde se produjo la estricción del acero y posterior rotura.



Ilustración 18 Falla a flexión en las vigas con $f'c$ de 1000 Kg/cm².

En la gráfica 11 se tiene el resultado obtenido del ensayo a flexión para las 4 vigas, para obtener las gráficas de fuerza-desplazamiento se utilizó un deformímetro, para lo cual se registraba el desplazamiento y la fuerza aplicada por la máquina, estos datos se registraron de manera manual ya que el laboratorio no posee una máquina computarizada para registrar con exactitud este tipo de ensayos.



Gráfica 11 Curva fuerza desplazamiento de las vigas con $f'c$ de 1000 Kg/cm².

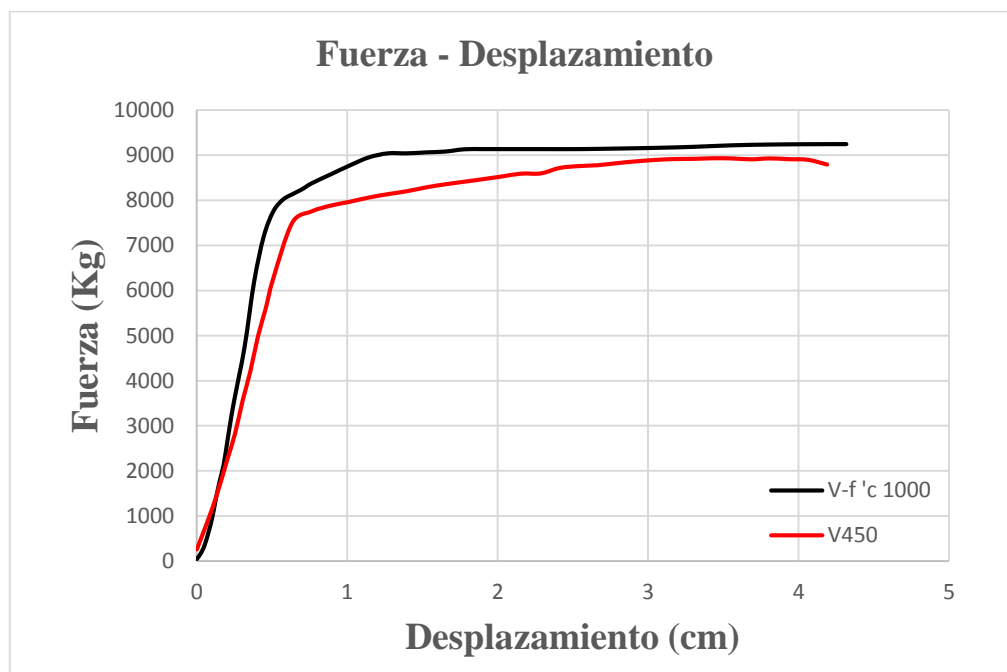


La carga máxima registrada en el punto de ruptura fue de 9303 Kg para las vigas con $f'c$ de 1000 Kg/cm² mientras que para la viga desarrollada con $f'c$ de 450 Kg/cm² fue de 8929 Kg, la carga promedio que resistieron las 4 vigas fue de 9243,75 Kg como se indica en la tabla 26 y en la gráfica 11.

Tabla 26 Promedio de la carga máxima en las vigas con $f'c$ de 1000 Kg/cm².

	Fuerza (Kg)
CV1	9154
CV2	9211
DV1	9303
EV1	9307
Promedio	9243.75

Además, se puede observar en la gráfica 12 que la fuerza en el punto de fluencia corresponde a 8011 Kg como promedio para las vigas con $f'c$ de 1000Kg/cm², mientras que para la viga con $f'c$ de 450 Kg/cm² el valor en la zona de fluencia fue de 7504 Kg



Gráfica 12 Curvas esfuerzo desplazamiento



CAPITULO 6: CORRELACION ENTRE ENSAYOS.

6.1 Correlación simple.

Kottegoda et al., (1984) indica que la correlación es un tipo específico de asociación que se examina con frecuencia entre variables de estudio. En este trabajo de titulación estudiamos la correlación que existe entre ensayos destructivos y no destructivos. El ensayo destructivo corresponde al ensayo a compresión de los especímenes, lo cual provoca la destrucción de los mismos, mientras que los ensayos no destructivos fueron realizados con equipos que utilizan métodos indirectos para determinar la resistencia del hormigón como son los ensayos de ultrasonido y con el esclerómetro, el primero de estos mide la velocidad de pulso a través del espécimen, en cambio el otro mide el índice esclerométrico sobre el espécimen. Walpole et al., (2012) recomienda suponer que tanto X como Y son variables aleatorias, pues esta consideración es más realista en las técnicas de regresión. Se debe tener presente el problema de medir la relación entre las dos variables X y Y; que en nuestro caso la variable X corresponde a la resistencia obtenida mediante el ensayo a compresión en la prensa hidráulica mientras que la variable Y corresponde al ensayo realizado mediante el ultrasonido. Además, se realizó la correlación con el ensayo ejecutado con el esclerómetro.

Para determinar la correlación que existe entre dos variables se obtiene la recta de regresión, la cual está expresada en la fórmula 37.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x \quad [37]$$

Donde:

β_0 = Intersección;

β_1 = Pendiente de la recta.

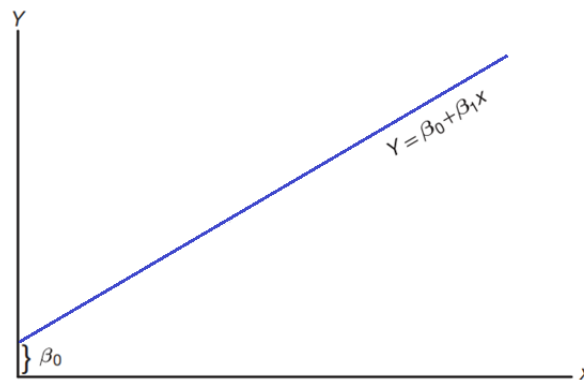


Ilustración 19 Relación lineal; β_0 : intersección; β_1 : pendiente. Fuente: Walpole et al., 2012

Sin embargo, la fórmula 37 representa de manera simplificada algo desconocido y más complicado. Los modelos que representan estructuras más complicadas y desconocidas son de naturaleza lineal. Las estructuras lineales son de naturaleza empírica por lo que se denominan modelos empíricos.

El análisis entre la relación que existe entre X y Y necesita de un modelo estadístico. Este modelo incluye el conjunto de n datos lo cual implica n pares de valores (X, Y), siendo Y dependiente de X por medio de la estructura lineal. La respuesta de la variable dependiente Y se relaciona con la variable independiente X de acuerdo a la fórmula 38.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad [38]$$

Donde:

β_0 = Intersección;

β_1 = Pendiente de la recta.

ε = Variable aleatoria que se supone está distribuida con $E(\varepsilon) = 0$ y $\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$.

En la fórmula 38 el valor de Y es una variable aleatoria, debido a que ε es aleatoria, el valor de ε se conoce como error aleatorio. La presencia de ε evita que el modelo se convierta en una fórmula determinista. $E(\varepsilon) = 0$ implica que para un regresor específico X, los valores de Y se distribuyen alrededor de la recta de regresión, como se muestra en la ilustración 20.

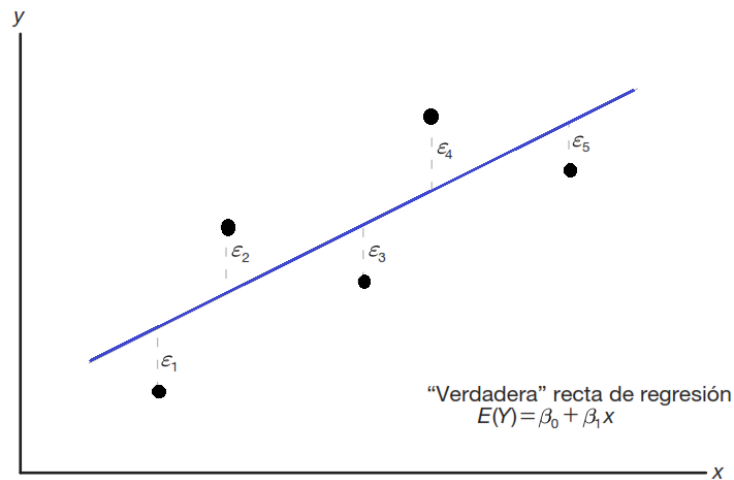


Ilustración 20 Datos (x,y) hipotéticos dispersos alrededor de la verdadera recta de regresión para $n = 5$. Fuente: Walpole et al., 2012.

La recta que se muestra en la ilustración 20 indica el significado de las suposiciones, y no es usada para estudios científicos debido a que en la práctica nunca se conoce los valores reales de ϵ lo cual impide generar una recta estimada mediante regresión ajustada.

Para obtener la recta de regresión ajustada se estiman los valores de β_0 y β_1 , a continuación, se denotan los estimados b_0 para β_0 y b_1 para β_1 . Entonces la recta de regresión ajustada está dada por la fórmula 39.

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x \quad [39]$$

Para obtener los coeficientes b_0 y b_1 se utiliza el método de mínimos cuadrados, el cual consiste en que la suma de los cuadrados de los residuales sea mínima. Los residuales corresponden a los errores en el ajuste del modelo, esto significa que dado un conjunto de datos de regresión $\{[X_i; Y_i]; i=1, 2, 3, \dots, n\}$ y un modelo ajustado $\hat{y} = b_0 + b_1 x$, el i -ésimo e_i está dado por la Fórmula 40.

$$e_i = y_i - \hat{y}_i x, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad [40]$$

Por lo tanto; es evidente que si la suma de los residuales es grande el ajuste es malo; en cambio si la suma de los residuales es pequeña el ajuste es correcto. Es así que al diferenciar la suma de los cuadrados de los residuos se minimiza e_i . Luego se iguala a 0 las derivadas parciales y se acomodan los términos con lo cual se obtienen las fórmulas 41 y 42 que ayuda a determinar los valores de b_0 y b_1 de la fórmula de la recta de regresión ajustada.



$$b_1 = \frac{(n \sum_{i=1}^n x_i y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{(n \sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad [41]$$

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b_1 \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad [42]$$

Aunque el modelo es no lineal en X y Y, sí lo es en los parámetros, y debido a ello se lo analiza como un modelo lineal, por lo que existen transformaciones susceptibles de mejorar el ajuste de un modelo. En la tabla 27 se muestran funciones para describir la relación que existe entre Y y X, la cual puede producir una regresión lineal por medio de las transformaciones indicadas.

Tabla 27 Funciones que describen la relación entre X y Y.

Forma funcional que relaciona y con x	Transformación propia	Forma de la regresión lineal simple
Exponencial: $y = \beta_0 e^{\beta_1 x}$	$y^* = \ln y$	Hacer la regresión de y^* contra x
Potencial: $y = \beta_0 x^{\beta_1}$	$y^* = \log y; x^* = \log x$	Hacer la regresión de y^* contra x^*
Recíproca: $y = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{x}\right)$	$x^* = \frac{1}{x}$	Hacer la regresión de y contra x^*
Hiperbólica: $y = \frac{x}{\beta_0 + \beta_1 x}$	$y^* = \frac{1}{y}; x^* = \frac{1}{x}$	Hacer la regresión de y^* contra x^*

6.1.1 Coeficiente de correlación de Pearson.

Se debe considerar el problema de medir la relación entre 2 variables, en nuestro caso X y Y son datos de pruebas realizadas a los especímenes de hormigón, estos datos fueron obtenidos mediante ensayos destructivos y no destructivos, por lo que se desarrolló un análisis para determinar si los valores de X se asocian con los valores de Y y viceversa.

El análisis de correlación intenta medir la ligadura de la relación entre dos variables por medio de un solo número al cual se lo denomina como coeficiente de correlación.



Escribiendo la variable aleatoria en la fórmula siguiente.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad [43]$$

Dónde ahora X es una variable aleatoria independiente de error ε . Como la media del error aleatorio es cero, se obtienen las siguientes fórmulas 44 y 45.

$$\mu_Y = \beta_0 + \beta_1 \mu_X \quad [44]$$

$$\sigma_Y^2 = \sigma^2 + \beta_1^2 \sigma_X^2 \quad [45]$$

Luego de algunos artificios matemáticos al sustituir α y σ^2 en la expresión anterior para $f(x, y)$, se obtiene la distribución normal bivariada; en la cual encontramos por primera vez la constante ρ (rho) la cual se denomina coeficiente de correlación de la población y desempeña un papel importante en problemas en los que se involucran datos bivariados.

El coeficiente de correlación se encuentra entre los siguientes límites $-1 \leq \rho \leq +1$. Es importante interpretar estos resultados, por lo tanto, cuando ρ toma los valores ± 1 indica una relación lineal perfecta entre las dos variables y ocurre cuando $\sigma^2 = 0$. En cambio, cuando ρ es igual a $+1$ resulta una relación lineal perfecta con pendiente positiva, de la misma manera cuando ρ es igual a -1 resulta una relación lineal perfecta con pendiente negativa. Entonces se podría decir que cuando los estimadores muestrales de ρ con magnitud cercana a la unidad implica una buena correlación entre las variables X y Y, mientras que los valores cercanos a cero indican poca o nula relación.

La medida ρ de la asociación lineal entre dos variables X y Y se calcula mediante el coeficiente de correlación muestral r indicado en la fórmula 46.

$$r = b1 \sqrt{\frac{S_{xx}}{S_{yy}}} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} \quad [46]$$

Dónde;

S_{xy} = es la covarianza de X con respecto a Y.

S_{xx} = es la covarianza de X con respecto a X.

S_{yy} = es la covarianza de Y con respecto a Y.



Walpole et al., (2012) recomienda tener cuidado cuando se interpreten los resultados, por ejemplo, cuando se tengan valores de r iguales a 0.3 y 0.6 significa sólo que hay 2 correlaciones positivas, una más fuerte que la otra. Sería un error pensar que r igual a 0.6 indica una relación lineal dos veces mejor que la de del valor de r igual a 0.3.

Según Guarín (2002), los valores del coeficiente de Pearson se pueden tomar de acuerdo a la ilustración 21.

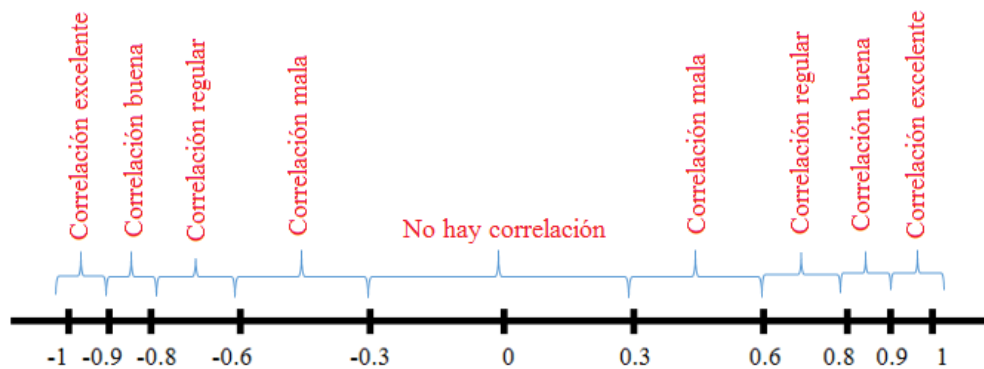


Ilustración 21 Calidad de la correlación

6.1.2 Correlación entre la resistencia a compresión y el índice esclerométrico.

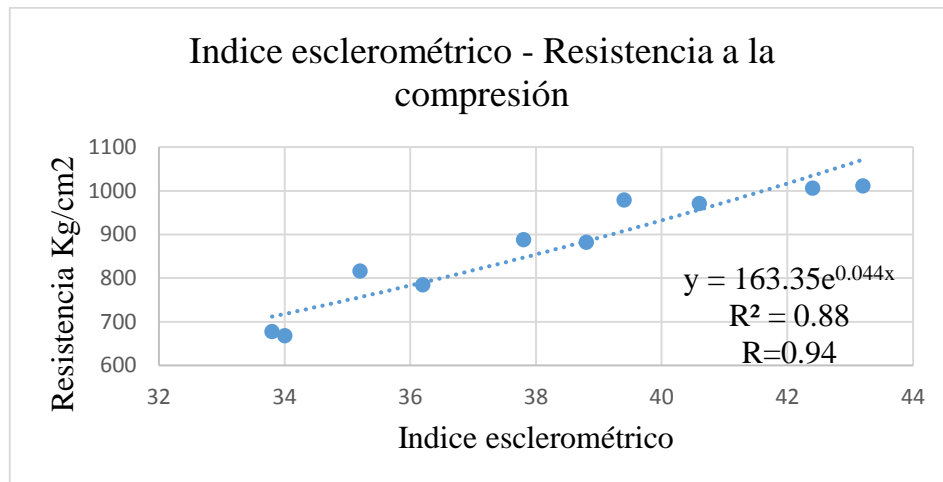
La correlación se realizó con los datos obtenidos a 1, 3, 7, 14 y 28 días como se indica en la tabla 28.

Tabla 28 Datos de compresión e índice esclerométrico.

	f'c Kg/cm2	Índice Esclerométrico
WC 1	668.2	34
WC 1'	677.4	33.8
WC 3	785.2	36.2
WC 3'	816.6	35.2
WC 7	888.5	37.8
WC 7'	882.0	38.8
WC 14	978.9	39.4
WC 14'	971.0	40.6
WC 28	1006.5	42.4
WC 28'	1011.5	43.2



Debido a que el comportamiento de la curva es no lineal, se eligió trabajar con una curva exponencial. Para este caso se determinó que el coeficiente de Pearson (r) es igual a 0.94 el cual según Guarín (2012) se considera como una correlación excelente. En la gráfica 13 se muestra la recta de la regresión lineal y el valor de R^2 .



Gráfica 13 Correlación entre $f'c$ vs # de rebotes.

De esta manera la resistencia a compresión para hormigones de alta resistencia se puede obtener a partir del índice esclerométrico, utilizando la fórmula 47. Cabe recalcar que esta fórmula es válida únicamente para probetas de 10 cm de diámetro.

$$y = 163.35e^{0.044x} \quad [47]$$

En la tabla 29 se muestran los resultados corregidos aplicando la fórmula 47.

Tabla 29 $f'c$ asociado corregido para HAR.

Probeta	Índice Esclerométrico	$f'c$ Asociada a R corregida Kg/cm2
WC 1	34	729.2
WC 1'	33.8	722.8
WC 3	36.2	803.3
WC 3'	35.2	768.7
WC 7	37.8	861.9
WC 7'	38.8	900.6
WC 14	39.4	924.7
WC 14'	40.6	974.9
WC 28	42.4	1055.2
WC 28'	43.2	1093.0



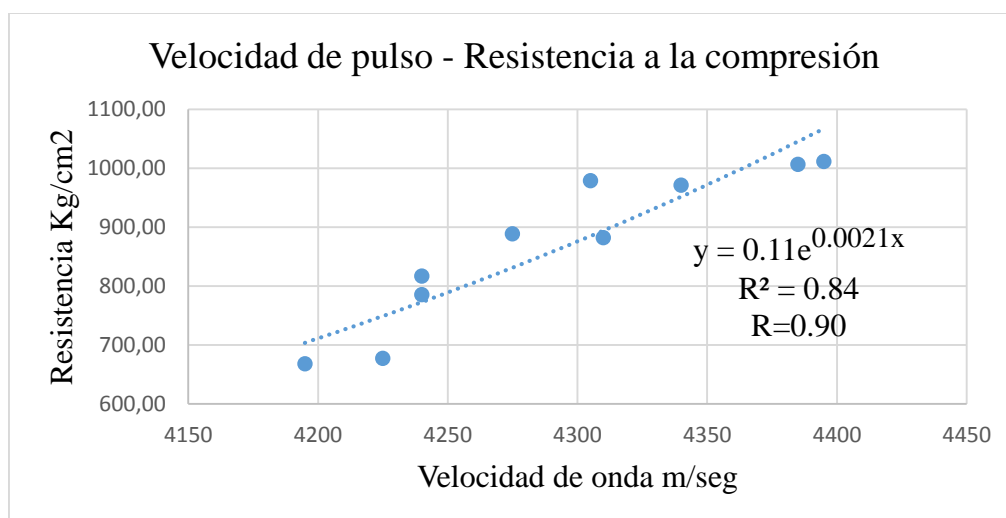
6.1.3 Correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso.

De igual manera se realizó la correlación con los datos obtenidos a diferentes días como se indica en la tabla 30.

Tabla 30 Datos de velocidad de pulso y de compresión.

Probetas	Velocidad de pulso m/seg	f 'c Kg/cm2
WC 1	4195	668.2
WC 1'	4225	677.4
WC 3	4240	785.2
WC 3'	4240	816.6
WC 7	4275	888.5
WC 7'	4310	882.0
WC 14	4305	978.9
WC 14'	4340	971.0
WC 28	4385	1006.5
WC 28'	4395	1011.5

Se utilizó una correlación exponencial, la cual obtuvo un coeficiente de Pearson (r) de 0.90 el cual se considera como una correlación excelente según Guarín (2012). En la gráfica 14 se muestra la recta de la regresión lineal y el valor de R^2 .



Gráfica 14 Correlación entre f'c vs velocidad de pulso.



Al igual que para la correlación entre la resistencia a compresión y el índice esclerométrico. La resistencia a compresión para hormigones de alta resistencia se puede obtener a partir de la velocidad de pulso, utilizando la fórmula 48, la misma que se obtuvo para probetas de 10 cm de diámetro.

$$y = 0.11e^{0.0021x} \quad [48]$$

Dónde;

X= Velocidad de pulso.

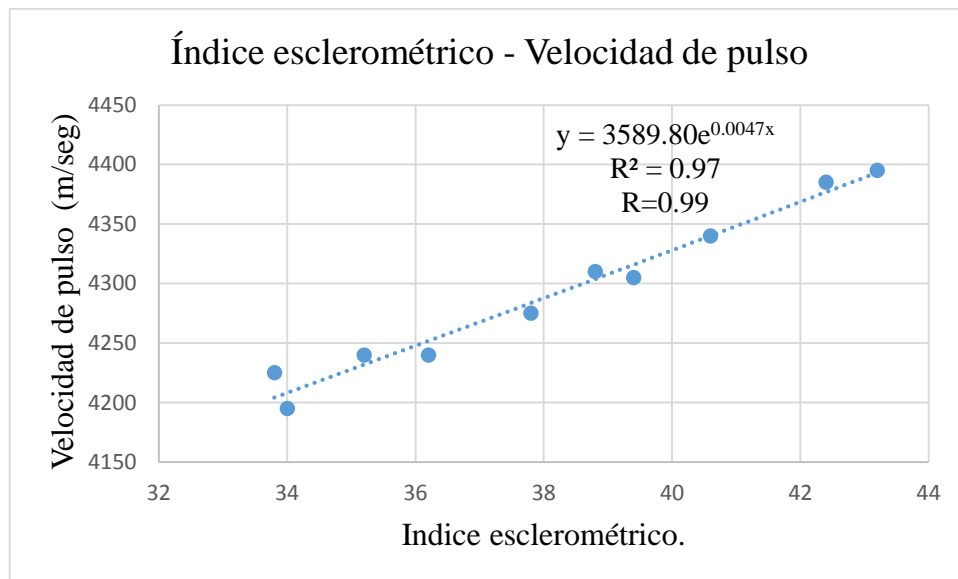
En la tabla 31 se muestran los resultados de $f'c$ asociado a la velocidad de pulso al utilizar la fórmula 48 en HAR.

Tabla 31 $f'c$ Asociado a la velocidad de pulso.

Probetas	Velocidad de pulso m/seg	f 'c Asociada a la velocidad de pulso Kg/cm2
WC 1	4195	736.7
WC 1'	4225	784.6
WC 3	4240	809.7
WC 3'	4240	809.7
WC 7	4275	871.5
WC 7'	4310	938.0
WC 14	4305	928.2
WC 14'	4340	999.0
WC 28	4385	1098.0
WC 28'	4395	1121.3

6.1.4 Correlación entre el índice esclerométrico y velocidad de pulso.

Se realizó una correlación exponencial entre estos parámetros a partir de los datos correspondientes presentados en las tablas 28 y 30 para determinar uno de estos parámetros a través del otro. El coeficiente de correlación es de 0.99, el cual es considerado como una correlación excelente.



Gráfica 15 Correlación entre el Índice esclerométrico vs velocidad de pulso.

Entonces la fórmula 49 se puede utilizar para determinar la velocidad de pulso a partir del índice esclerométrico. Pero de la misma manera que para la correlación entre la resistencia a compresión y el índice esclerométrico, la fórmula es válida únicamente para probetas de 10 cm de diámetro.

$$y = 3589.80e^{0.0047x} \quad [49]$$

Donde,

X= Índice esclerométrico.

6.1.5 Correlación entre los resultados de las vigas y de las probetas de los ensayos no destructivos.

El resultado del esclerómetro en las probetas fue de 42 rebotes, mientras que en las vigas simples fue de 50.6 rebotes y en las vigas armadas se obtuvo 50.8 rebotes. Es decir, se puede ver que las vigas simples y las vigas armadas tienen valores muy cercanos. Por otra parte, las probetas difieren en alrededor de un 17 % de las vigas. El origen de esta diferencia bastante alta se debe a las dimensiones de las probetas, ya que en ellas es difícil realizar el rebote alejado 2.5cm del rebote anterior y del borde de la probeta, lo cual no sucede en las vigas por ser de dimensiones mayores.

Por otro lado, la velocidad de pulso promedio registrada de las probetas fue de 4385, mientras que el valor promedio registrado en las vigas simples fue de 4393 para la



longitud 1 (base) y 4313 para la longitud 2 (Altura). La velocidad de pulso de las probetas difiere un 0.18 % y un 1.67 % respectivamente. No se tiene resultados para la viga de hormigón armado ya que el acero de refuerzo altera la el tiempo de tránsito y por ende la velocidad de pulso.

6.2 Correlación múltiple.

Con el fin de obtener una respuesta importante ante la presencia de más de una variable Walpole et al., (2012) recomienda un modelo de regresión múltiple. En el caso de k variables independientes, el modelo que da x_1, x_2, \dots, x_k , la media de $Y|X_1, X_2, \dots, X_k$ fórmula 50.

$$\mu_Y|x_1, x_2, \dots, x_k = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k \quad [50]$$

Y la respuesta estimada se obtiene a partir de la ecuación de regresión maestra es la fórmula 51.

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k \quad [51]$$

6.2.1 Estimación de coeficiente.

En esta parte se calculan los coeficientes de mínimos cuadrados para los parámetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ mediante el ajuste para el modelo de regresión lineal múltiple de acuerdo a Walpole et al., (2012).

$$\mu_Y|x_1, x_2, \dots, x_k = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k$$

A los puntos de los datos,

$$\{(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}, Y_i); \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ y } n > k\}$$

Donde Y_i es la respuesta para los datos $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$ de las k variables independientes x_1, x_2, \dots, x_k , donde se supone que cada observación $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}, Y_i$ satisface la siguiente fórmula 52 y 53.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \epsilon_i \quad [52]$$

O bien;



$$Y_i = \hat{Y}_i + e_i = b_0 + b_1 x_{1i} + \dots + b_k x_{ki} + e_i \quad [53]$$

Donde e_i y \hat{Y}_i son respectivamente el error aleatorio y el residual, asociados directamente con la respuesta Y_i y con el valor ajustado \hat{Y}_i .

De la misma manera que en el caso de regresión lineal simple, se supone que los valores de e_i son independientes y están distribuidos en forma idéntica con una media de cero y varianza común σ^2 . Al usar el concepto de mínimos cuadrados para obtener los estimados b_0, b_1, \dots, b_k minimizados en la fórmula 54.

$$SCE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_{1i} - \dots - b_k x_{ki})^2 \quad [54]$$

Y si diferenciamos la SCE respecto a b_0, b_1, \dots, b_k e igualamos el resultado a cero generamos un conjunto de ecuaciones k+1 fórmulas normales para la regresión lineal múltiple.

Walpole et al., (2012) menciona que todos los programas estadísticos de cómputo se pueden utilizar para obtener soluciones numéricas de las ecuaciones obtenidas al diferenciar la fórmula 54.

6.2.2 Correlación múltiple entre Numero de rebotes, Velocidad de pulso y Resistencia a compresión.

Tabla 32 Resultado de ensayos destructivos y no destructivos en el tiempo.

Tiempo (días)	# Índice esclerométrico R	Velocidad de pulso (m/seg)	f'c Kg/cm2
1	34	4195	668.2
1	33.8	4225	677.4
3	36.2	4240	785.2
3	35.2	4240	816.6
7	37.8	4275	888.5
7	38.8	4310	882.0
14	39.4	4305	978.9
14	40.6	4340	971.0
28	42.4	4385	1006.5
28	43.2	4395	1011.5



A partir de los resultados expresados en la tabla 32 dónde se realizaron los ensayos destructivos y no destructivos. Los ensayos no destructivos y los ensayos destructivos se realizaron a 1, 3, 7, 14 y 28 días para realizar una correlación múltiple entre el ensayo de esclerómetro y el ensayo de velocidad de pulso con respecto a los datos obtenidos del ensayo a compresión realizados en el laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Luego de realizar el cálculo en el programa estadístico Excel como lo recomienda Walpole et al., (2012) se determinó mediante la tabla 33 los coeficientes de correlación múltiple con los que se pudo determinar la fórmula 55 para determinar la resistencia de un HAR a partir de los ensayos no destructivos.

Tabla 33 Coeficientes de correlación múltiple.

<i>Coeficientes</i>	
Intersección	1938.06
Variable X 1	50.72
Variable X 2	-0.70

$$f'c = 1938.06 + 50.72 X1 - 0.70 X2 \quad [55]$$

Dónde;

$f'c$ = Resistencia del hormigón asociada a la velocidad de pulso e índice esclerométrico Kg/cm².

X1= Índice esclerométrico R.

X2= Velocidad de pulso en m/seg.

El coeficiente de correlación determinado fue de 0.97, lo cual indica una excelente correlación de acuerdo con la ilustración 21.

Por otro lado, se utilizó el software de la marca PROCEQ para realizar una correlación potencial múltiple. Estos datos corresponden a la resistencia determinada en la prensa hidráulica, índice esclerométrico y la velocidad de pulso en m/seg. En la tabla 34 se muestran los datos que se utilizaron para obtener la fórmula en base a una correlación múltiple.



Tabla 34 Datos para correlación con software PROCEQ

Probeta	Resistencia a la compresión $f'c$ (Kg/cm ²)	Pundit Lab+ Velocidad de pulso ultrasónico (V) (m/s)	SilverSchmidt / Schmidt Original Valores de rebote (S)
WC 1	668.2	4195	34
WC 1'	677.4	4225	33.8
WC 3	785.2	4240	36.2
WC 3'	816.6	4240	35.2
WC 7	888.5	4275	37.8
WC 7'	882.0	4310	38.8
WC 14	978.9	4305	39.4
WC 14'	971.0	4340	40.6
WC 28	1006.5	4385	42.4
WC 28'	1011.5	4395	43.2

En la tabla 35 se muestra los coeficientes obtenidos con el uso del software, así como R^2 obteniendo de esta manera el coeficiente de Pearson R de 0.95.

Tabla 35 Coeficientes obtenidos mediante software PROCEQ

Constante a	5.30E15
Constante b	-4.61
Constante c	2.50
Valor R cuadrado	0.90

De esta manera la resistencia a la compresión del hormigón se determina mediante la fórmula 56.

$$f'c = 5.30E15 * X1^{-4.61} * X2^{2.50} \quad [56]$$

Donde,

$f'c$ = Resistencia a la compresión en Kg/cm²

X1= Velocidad de pulso en m/seg.

X2= Índice esclerométrico.

En la tabla 36 se muestra el resultado de $f'c$ asociado al índice esclerométrico y velocidad de pulso de acuerdo a la fórmula 56.



Tabla 36 f 'c Asociado al índice esclerométrico y velocidad de pulso.

Probeta	Velocidad de pulso m/seg	Índice Esclerométrico	f 'c Asociado Kg/cm2
WC 1	4195	34	711.5
WC 1'	4225	33.8	678.4
WC 3	4240	36.2	792.3
WC 3'	4240	35.2	738.7
WC 7	4275	37.8	849.9
WC 7'	4310	38.8	873.8
WC 14	4305	39.4	912.9
WC 14'	4340	40.6	947.9
WC 28	4385	42.4	1007.4
WC 28'	4395	43.2	1044.6



CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1 Conclusiones.

- El método ACI 211-4R es bastante útil, para resistencias de hasta 843 kg/cm² y sirve como base para el desarrollo de hormigones de mayor resistencia. El método no incorpora información para reductores de agua e hiperplastificante. Por lo que el hormigón base de 843 kg/cm² no tenía el revenimiento dado por el método ACI 211-4R ya que en este trabajo de titulación se utilizó un reductor de agua e hiperplastificante, razón por la cual el hormigón fue auto-compactante.
- La resistencia obtenida a los 28 días es la resistencia requerida, mientras que la resistencia a un día de curado representa aproximadamente un 67% de la resistencia final. El hormigón de alta resistencia presenta una gran ventaja ya que las estructuras pueden ser desencofradas en los primeros días y no a los 14 días que es recomendado por ciertas normas. Los hormigones de alta resistencia pueden representar un gran ahorro ya que se reducen significativamente las secciones de las estructuras.
- Con respecto a las vigas de hormigón armado, se pudo observar la colaboración del HAR de 1000 Kg/cm² en la estructura comparado con el hormigón de 450 Kg/cm². Las 2 estructuras tenían exactamente el mismo armado, sin embargo, el comportamiento ante cargas de flexión fue diferente. Las vigas con HAR ensayadas fallaron de manera dúctil, lo que de acuerdo a la Guía práctica para el diseño de estructuras de hormigón armado basada en la NEC 2015 cumple con un mecanismo dúctil que permita una adecuada disipación de energía sin colapso de la estructura. Al incrementar la resistencia del hormigón mejoró la ductilidad del elemento ya que las vigas elaboradas con un hormigón de $f'c$ de 450 Kg/cm² fallaron de manera frágil es decir fallaron por corte.
- El agregado fino tiene una buena distribución del tamaño de sus partículas ya que este cumple con los límites de la norma ASTM C33 sin la necesidad de realizar una combinación de agregados.
- El agregado fino tiene un módulo de finura de 3.01 el cual ayuda a que el material tenga buena trabajabilidad y baja demanda de agua.
- Ya que los valores obtenidos en las probetas y en las vigas no representan la resistencia real del hormigón, al utilizar el esclerómetro se debe tener en cuenta que



la resistencia asociada a R difiere un 49 % en las probetas y alrededor de un 33 % en las vigas.

- Al comparar los valores obtenidos con el esclerómetro entre probetas y vigas, estos tienen una diferencia de 27.99 %, siendo esta diferencia bastante alta para un mismo diseño. La diferencia de estos resultados se atribuye al factor escala de las muestras ensayadas, ya que en las probetas de 10 cm de diámetro no hay espacio suficiente para realizar 10 ensayos separados 2.5 cms uno del otro y separados del borde 2.5 cms. Mientras que en las vigas al ser de mayores dimensiones se pudo realizar de manera correcta el ensayo.
- La velocidad de pulso es un buen método para tener un valor aproximado de la resistencia del hormigón de alta resistencia, ya que mientras mayor es la velocidad de pulso mayor será la resistencia a compresión.
- La densidad de un hormigón de resistencia normal oscila entre 2200 y 2300 kg/m³, mientras que el hormigón diseñado en este proyecto tuvo una densidad de 2404 kg/m³ la cual es comparable con la densidad de un hormigón armado que tiene un valor de 2400 kg/cm³.
- El módulo de elasticidad obtenido es de 534526 Kg/cm², que de acuerdo con el libro de concreto de alto desempeño de Aïtcin el módulo de elasticidad de un HAR es de 509858 Kg/cm². Por lo que el resultado obtenido es muy similar a los obtenidos por otros autores acerca de este tema.
- Los resultados de un HAR respecto al comportamiento esfuerzo-deformación son muy predecibles y presentan muy poca variación, en la gráfica 9 “Determinación del módulo de elasticidad” se puede observar que los 3 ensayos realizados son casi idénticos por lo que el comportamiento del HAR no es variable y se comporta de manera homogénea.
- La resistencia a la tracción obtenida en este trabajo de titulación, es mayor entre un 26.3% a 50.1% a las resistencias a tracción de hormigones convencionales.
- El módulo de ruptura obtenido representa el 7% de la resistencia del hormigón. El hormigón de alta resistencia es recomendado para la realización de vías de pavimento rígido ya que según la Asociación de Cemento Portland (1984) para el uso en vías de pavimento rígido se requiere Módulos de ruptura mayores a 35 kg/cm².



- El costo de los materiales para elaborar el HAR de 1000 kg/cm² es de 187.04 dólares americanos, como se indica en la tabla 32. El costo resulta significativamente menor comparado con otros diseños realizados en el país. El costo de los materiales utilizados por los estudiantes de la Universidad San Francisco de Quito fue de 238 dólares para un hormigón de 1011 kg/cm² tomando en cuenta que ellos incorporaron humo de sílice y un aditivo reductor de agua de alto rango, mientras que el costo de los materiales utilizados por estudiantes de la Universidad Central del Ecuador fue de 367 dólares para una resistencia de 618 kg/cm², en la cual incorporaron humo de sílice.

Tabla 37 Costo materiales para HAR de 1000 kg/cm²

Material	Unidad	Cantidad (kg)	Costo unitario	Total
Cemento	kg	793	0,19	151,46
Ripio	m ³	0,29	18,00	5,22
Arena	m ³	0,25	13,50	3,38
Agua.	m ³	0,18	1,05	0,19
Aditivo	kg	7,14	3,75	26,79
Total, dólares				187,04



7.2 Recomendaciones.

- Se recomienda realizar la mezcla de hormigón sin lavar los materiales ya que de esta manera se emplean en campo, para determinar la variación que existe en la resistencia a compresión entre una mezcla con materiales lavados y una mezcla con materiales sin lavar.
- Se recomienda realizar un HAR con una resistencia a la compresión similar al de este trabajo de titulación, pero empleando un agregado grueso con una granulometría mas amplia.
- Se recomienda investigar y realizar un análisis comparativo entre los costos de producir hormigones de alta resistencia con fibras y humo de sílice y hormigones de alta resistencia como el del presente trabajo de investigación.
- Se recomienda realizar y evaluar el comportamiento del hormigón de alta resistencia en elementos estructurales sometidos a cargas de Flexo-compresión (Columna) ya que en este tipo de elemento actúa directamente la resistencia a compresión del hormigón.
- Se recomienda investigar y evaluar el comportamiento estructural utilizando hormigón de alta resistencia, en comparación con hormigones de resistencia normal, modificando las dimensiones de sus elementos, en función de la capacidad de carga.



BIBLIOGRAFÍA.

- NTE INEN 0696. (2011). Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.
- NTE INEN 0856. (2010). 1R Agregados. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.
- NTE INEN 0857. (2010). 1R Agregados. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.
- NTE INEN 0858. (2010). 1R Agregados. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos.
- NTE INEN 0860. (2011) 1R Agregados. Determinación del valor de la degradación del agregado grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles.
- NTE INEN 0872. (2011). Áridos para hormigón. Requisitos.
- NTE INEN 1573. (2010). Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.
- NTE INEN 2554 (2011). Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón. (Utilizando una viga simple con carga en los tercios)
- NTE INEN 0102 (2011). Varillas corrugadas de acero al carbono laminadas en caliente para hormigón armado. Requisitos
- NTE INEN 0109 (2009). Ensayo de tracción para materiales metálicos a temperatura ambiente.
- ASTM. (2003). C09. ASTM C33-03, Standard Specifications for Concrete Aggregates.
- ASTM. (1997). ASTM C805-97, Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete.
- ASTM. (2002). ASTM C597-02, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
- ASTM. (2002). ASTM C469-02, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.
- ASTM. (2004). ASTM C496-04, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- SIKA Ecuatoriana S.A. (2015). Hoja Técnica de Producto Sika ViscoCrete 4100.



- Holcim Ecuador S.A. (2015). Ficha Técnica Holcim Premium.
- Committee-ACI 363R-92. (1997). State of the art report on high strength concrete. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan.
- Committee-ACI 211.4R-08. (2008). Guide for selecting proportions for high strength concrete using portland cement and other materials. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan.
- 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.
- Nam Le, H. T. (2017). Critical parameters for the compressive strength of high-strength. Cement and Concrete Composites, Pp 202-217.
- McCorman, & Russell. (2011). Diseño de Concreto Reforzado. Alfaomega. Octava Edición. Pp 18.
- Wang, W. (2017). Behaviour of high-strength concrete columns confined by spiral. Construction and Building Materials, Pp 496-503.
- AÏTICIN, P. (1998). High Performance Concrete. Canada: Routledge 11 New Fetter Lane. Pp 589.
- SANCHEZ DE GUZMAN. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Colombia: Bhandar.
- ROMO, M. (2008). Hormigón Armado. Ecuador
- GUARIN, N. (2002). Estadística Aplicada.
- BARRIGA, J. (2007). Tecnología del concreto de alto desempeño. Primera edición. 73
- ZABALETA, H. (1989). Situación de los hormigones de alta resistencia en Chile. Revista Ingeniería de construcción, N 7. Julio-Diciembre (1989)
- GODFREY, Jr., K., A.(1987).Concrete Strenght Record Jumps 36%. Vol.57, No. 10. 84-86.
- HOWARD, N.L, LEATHAM. (1989). The production and Deliver of High-Strenth Concrete. Concrete International, Vol. 11, No. 4, abril. Pp. 26-30.
- KOSMATKA, S.H.;KERKHOFF, B.; and PARNARESE, W.C. (2002). Design and Control of concrete Mixtures. Fourteenth edition, Portland Cement Association.
- CÉSPEDES, M. (2003). Tesis: Resistencia a la Compresión del Concreto a Partir de la Velocidad de Pulsos de Ultrasonido.



Universidad de Cuenca.

WALPOLE, R. MAYERS, R. MAYERS, S. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Novena edición. Pp. 389.

KOTTEGODA, N. ROSSO, R. (1984). Applied statistics for civil and environmental engineers. Second edition.



ANEXOS.

Anexo 1: Tablas.

Tabla 38 Dimensiones y densidad de las probetas a los 21 días.

Nombre	Diámetro (cm)	Atura (cm)	Peso (g)	Área media (cm²)	Densidad (g/cm³)
A1	10,17	19,90	3874,8	81,63	2384,64
	10,22	19,91			
A2	10,10	19,92	3882,5	80,44	2423,10
	10,14	19,92			
A4	10,09	19,87	3879,3	80,28	2428,33
	10,13	19,93			
A5	10,14	19,90	3886,1	80,75	2418,22
	10,14	19,90			
A6	10,11	19,89	3871,0	80,60	2414,79
	10,15	19,89			
A7	10,11	20,07	3930,6	80,28	2439,00
	10,11	20,08			
A8	10,09	20,08	3960,3	80,28	2458,65
	10,13	20,05			
A9	10,16	19,96	3920,5	80,52	2441,34
	10,09	19,93			
A10	10,13	19,99	3957,0	81,31	2432,59
	10,22	20,02			
B1	10,16	19,95	3828,5	80,75	2375,21
	10,12	19,97			
B2	10,09	19,96	3843,8	80,44	2392,34
	10,15	19,99			
C1	10,13	19,92	3849,6	80,52	2400,80
	10,12	19,91			
E1	10,09	20,05	3874,0	80,12	2412,24
	10,11	20,04			
E2	10,16	19,83	3848,8	80,83	2401,09
	10,13	19,83			
E3	10,09	19,90	3848,8	80,44	2405,09
	10,15	19,89			
E4	10,15	20,08	3860,7	80,36	2392,66



	10,08	20,08			
E5	10,04	20,09	3869,8	80,04	2409,61
	10,15	20,04			
E6	10,07	20,11	3879,2	80,44	2399,36
	10,17	20,09			
E7	10,19	20,09	3892,1	81,47	2376,71
	10,18	20,11			
D1	10,17	20,03	3867,9	81,55	2372,00
	10,21	19,96			
D2	10,21	19,95	3879,0	81,15	2388,14
	10,12	20,08			
D3	10,18	19,89	3871,8	81,15	2396,28
	10,15	19,93			
D4	10,25	20,11	3891,8	82,03	2362,63
	10,19	20,05			
D5	10,12	19,98	3867,7	80,75	2394,13
	10,16	20,03			
D6	10,08	20,11	3899,0	80,04	2421,76
	10,11	20,12			
D7	10,22	19,98	3885,8	82,03	2369,01
	10,22	20,01			

Tabla 39 Resistencia a partir del Índice esclerométrico en las probetas, en el tiempo.

Nombre	Tiempo (Días)	Índice esclerométrico.					Promedio	Promedio Diario.	f'c (kg/cm ²)
WC 1		31	35	36	36	32	34,0		
		33	35	36	34	32			
WC 1'	1	32	34	35	34	34	33,9	34,0	365
		36	33	34	35	32			
WC 3		37	38	36	36	36	36		
		35	35	36	35	36			
WC 3'	3	35	34	38	36	36	35,5	36,0	400
		34	36	34	36	36			
WC 7		38	39	38	39	37	38		
		37	38	38	39	37			
WC 7'	7	40	37	36	38	40	38,5	38,0	435
		40	38	39	39	38			
WC 14		37	40	39	39	43	40		



		42	39	41	40	40			
WC 14'	14	41	40	43	41	44	40,1	40,0	471
		39	37	37	39	40			
WC 28		40	43	45	42	43	42,6		
		46	40	42	42	43			
WC 28'	28	45	43	41	42	41	42,5	43,0	518
		42	44	44	41	42			

Tabla 40 Resistencia a partir del Índice esclerométrico en las probetas, a los 21 días.

Probetas.	Índice esclerométrico.										Promedio.	f'c asociada a R (kg/cm²)
A1	39	40	46	42	41	42	44	43	45	42	42,0	500
A2	43	44	40	46	40	42	40	41	43	41	42,0	500
A3	45	42	42	44	41	40	42	45	43	40	42,0	500
A4	42	46	40	46	43	41	44	42	41	48	43,0	518
A5	45	42	40	46	45	40	40	41	42	41	42,0	500
A6	40	43	39	44	41	41	40	42	44	44	42,0	500
A8	48	43	42	44	40	45	40	40	41	39	42,0	500
A9	44	42	44	45	41	40	46	45	41	42	43,0	518
A10	42	45	43	41	42	42	44	46	41	40	43,0	518
B1	45	42	43	45	42	40	44	42	40	42	43,0	518
B2	42	42	47	41	42	47	42	44	41	40	43,0	518
C1	40	44	44	41	40	46	42	41	48	40	43,0	518
E1	39	40	40	39	41	42	44	44	43	44	42,0	500
E2	41	48	44	46	41	44	45	41	42	43	44,0	541
E3	47	44	41	45	44	41	42	41	42	42	43,0	518
E4	44	40	46	42	45	42	45	44	43	41	43,0	518
E5	40	46	46	40	45	43	40	46	41	41	43,0	518
D1	41	44	46	40	41	45	40	45	46	43	43,0	518
D2	42	41	41	43	45	45	43	46	41	43	43,0	518
D3	42	41	39	43	40	48	40	44	42	43	42,0	500
D4	41	42	41	43	42	41	47	42	44	45	43,0	518
D6	40	38	40	41	42	42	43	42	42	43	41,0	482
D7	45	44	44	41	40	44	42	40	42	43	43,0	518



Tabla 41 Módulo dinámico de elasticidad a partir de la velocidad de pulso en las probetas, en el tiempo.

Nombre	Tiempo (Días)	Longitud (cm)	Velocidad Promedio (m/s)	Promedio diario	Densidad (g/cm ³)	Módulo de elasticidad dinámico (kg/cm ²)
WC 1	1	20	4195	4210	2423,55	394486,92
WC 1'		20	4225			
WC 3	3	20	4240	4240	2401,95	396562,93
WC 3'		20	4240			
WC 7	7	20	4275	4293	2397,81	405838,25
WC 7'		20	4310			
WC 14	14	19,9	4305	4323	2408,76	413409,48
WC 14'		20	4340			
WC 28	28	20,1	4385	4390	2431,4	430330,26
WC 28'		20,1	4395			

Tabla 42 Módulo dinámico de elasticidad a partir de la velocidad de pulso en las probetas, a los 21 días.

Nombre	Longitud (cm)	Tiempo (us)	Velocidad (m/s)	Velocidad promedio (m/s)	Densidad (g/cm ³)	Módulo de elasticidad dinámico (kg/cm ²)
A1	19,9	45,6	4370	4385	2384,64	421093,36
		45,4	4400			
A2	19,9	45,7	4360	4360	2423,10	423019,74
		45,7	4360			
A3	19,9	46,3	4300	4300	2428,33	412345,67
		46,3	4300			
A4	19,9	45,7	4390	4355	2418,22	421199,51
		46,1	4320			
A5	19,9	45,5	4380	4375	2414,79	424475,05
		45,6	4370			
A6	20,1	46,1	4350	4340	2439,00	421897,54
		46,3	4330			
A8	20,1	45,6	4410	4405	2458,65	438132,01
		45,7	4400			
A9	19,9	45,2	4420	4425	2441,34	439006,00
		45,1	4430			
A10	20,0	46	4350	4360	2432,59	424676,46
		45,8	4370			
B1	20,0	45,5	4400	4380	2375,21	418472,55



		45,8	4360			
B2	20,0	45,5	4400	4405	2392,34	426315,72
		45,4	4410			
C1	19,9	45,7	4360	4365	2400,80	420088,00
		45,6	4370			
E1	20,0	45,8	4370	4375	2412,24	424026,96
		45,7	4380			
E2	19,8	45,8	4360	4360	2401,09	419177,59
		45,8	4360			
E3	19,9	45,2	4420	4445	2405,09	436405,74
		44,7	4470			
E4	20,1	45,6	4410	4410	2392,66	427340,75
		45,6	4410			
E5	20,1	46	4360	4370	2409,61	422596,73
		45,8	4380			
D1	20,0	45,5	4400	4405	2399,36	427566,30
		45,4	4410			
D2	20,0	45,2	4430	4420	2376,71	426419,40
		45,4	4410			
D3	19,9	45,2	4420	4435	2372,00	428468,86
		44,9	4450			
D4	20,1	46,1	4350	4375	2388,14	419790,00
		45,7	4400			
D6	20,1	45,6	4410	4405	2396,28	427017,10
		45,7	4400			
D7	20,0	45,4	4410	4420	2362,63	423892,86
		45,2	4430			

Anexo 2: Plano viga de hormigón armado.

