

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CENIZAS VOLANTES OBTENIDAS DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR COMO SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL CEMENTO EN EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO DE RESISTENCIAS ALTAS

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs.
Amigo Olave, María Karina
Palomino Cerrada, Jorge Abrahan
Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CENIZAS VOLANTES OBTENIDAS DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR COMO SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL CEMENTO EN EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO DE RESISTENCIAS ALTAS

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ronald Torres

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs.
Amigo Olave, María Karina
Palomino Cerrada, Jorge Abrahan
Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, 2009

ACTA

El día 22 de junio de 2009 se reunió el jurado formado por los profesores:

Idalberto Águila

Cesar Peñuela

Ronald Torres

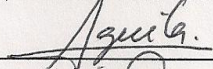
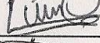

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: **"EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CENIZAS VOLANTES OBTENIDAS DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR COMO SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL CEMENTO EN EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO DE RESISTENCIAS ALTAS"**.
Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de **INGENIERO CIVIL**.

Una vez oída la defensa oral que los bachilleres hicieron de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. María Karina Amigo O.	20	VEINTE
Br. Jorge Abrahan Palomino C.	20	VEINTE

Recomendaciones:

FIRMAS DEL JURADO

Caracas, 22 de junio de 2009

DEDICATORIA

A Dios, que me acompaña en todo momento, dándome la fortaleza para seguir adelante, brindándome la oportunidad de hacer mis sueños realidad.

A mis padres, Jaime y Rosa, por todo el amor que me han dado, por su comprensión, apoyo y enseñanzas; por confiar en mí y hacerme ver que todos los problemas que se presentan en la vida tienen solución.

A Mary y Jose, a quienes quiero mucho, y como hermanos mayores han sabido ser un ejemplo a seguir.

A Jorge, mi compañero de tesis, por todo lo que hemos compartido y logrado juntos para alcanzar esta meta.

María Karina

En primer lugar, dedico este Trabajo Especial de Grado a Dios, por haberme dado fuerzas para seguir adelante con buena salud y, sobre todo, con un espíritu positivo y emprendedor, en segundo lugar, a mis padres, Marta Cerrada y Martín Palomino, por darme la vida, educarme con tanto amor y dedicación y, sobre todo, por las palabras de motivación y aliento que me dan cada día, en especial en aquellos en los que verdaderamente son necesarias, en tercer lugar, dedico este esfuerzo, muy especialmente, a mi compañera de tesis Mary por su dedicación, comprensión, motivación y por estar en todo momento a mi lado, apoyándome y brindándome todo el amor necesario para lograr mis metas con éxito, por último, quisiera también dedicar de una manera especial a mis profesores quienes me aportaron las luces suficientes en el camino a mi formación profesional a través de la motivación y el trabajo en las instalaciones de esta gran Casa que Vence las Sombras de la cual me siento muy orgulloso de pertenecer.

Jorge

AGRADECIMIENTOS

A nuestro Tutor, Profesor Ronald Torres, por proponer la realización de este trabajo, por su gran ayuda, paciencia y apoyo a lo largo de todo su desarrollo.

A la Universidad Central de Venezuela, por ser nuestra segunda casa y permitir el desarrollo de nuestros conocimientos en esta etapa de nuestras vidas.

Al Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), por los servicios prestados en sus instalaciones y el equipo utilizado que permitió el progreso de la investigación.

A los profesores Cesar Peñuela y Nelson Camacho, por estar siempre dispuestos a ayudarnos y aclararnos las dudas e inquietudes que se presentaron a lo largo de la investigación

Al profesor Felipe Odehnal, por haber encontrado la materia prima con la cual se desarrolló este trabajo y habernos llevado a las instalaciones de la Central El Palmar para conocer los procesos de producción.

A la empresa Central El Palmar por la colaboración prestada y el suministro de las cenizas volantes utilizadas en esta investigación.

Al personal técnico del IMME, en especial a Elione Barrios por su buena disposición y ayuda en todos los ensayos realizados.

Al Ing. Jaime Amigo por su apoyo y valiosos consejos que contribuyeron con el desarrollo de este trabajo.

A nuestros amigos que de alguna manera colaboraron con nosotros, en especial a Elena por su compañía en la parte experimental de este trabajo y por su paciencia y comprensión en todo momento.

María Karina y Jorge

**Amigo O, María K
Palomino C, Jorge A**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CENIZAS VOLANTES
OBTENIDAS DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR COMO
SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL CEMENTO EN EL DISEÑO DE
MEZCLAS DE CONCRETO DE RESISTENCIAS ALTAS**

**Tutor Académico: Prof. Ronald V, Torres M.
Trabajo Especial de Grado. Ciudad, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Civil. Año, nº 2009 pág. (161).**

Palabras Clave: Concreto, Cenizas volantes, Cemento, Resistencia.

En las plantas de producción de azúcar en Venezuela se generan grandes cantidades de desechos, provenientes de la combustión del bagazo de caña de azúcar utilizado como combustible para la producción de energía. Las cenizas resultantes de este proceso son depositadas por medios hidráulicos en una laguna de sedimentación; la mayoría de este material es utilizado en la elaboración de fertilizantes, siendo la cantidad restante problemática, ya que si no posee una disposición adecuada provocan un alto nivel de contaminación ambiental en la zona.

Debido a que la ceniza es un material puzolánico, con antecedentes de que posee capacidad cementante, se idea una forma de utilizar estos desechos industriales, incorporándolos como sustituto parcial del cemento en mezclas de concreto.

El siguiente Trabajo Especial de Grado se realizó con la finalidad de evaluar el comportamiento de las cenizas volantes provenientes de la combustión del bagazo de caña de azúcar como sustitución parcial del cemento en el diseño de

mezclas de concretos de resistencias altas, utilizando la finura natural del material, mediante la caracterización del concreto en estado fresco y el contraste con mezclas patrones, a través de la caracterización del concreto en estado endurecido. Se evaluaron resistencias de diseño de 280 Kg/cm^2 y 350 Kg/cm^3 y proporciones de sustitución del material de 5%, 10% y 15%.

La metodología de la investigación fue organizada para lograr los objetivos planteados a través del siguiente procedimiento: Caracterización de los agregados; Caracterización de las cenizas volantes; Diseño de mezclas; Elaboración de probetas; Caracterización del concreto en estado fresco; Curado; Caracterización del concreto en estado endurecido. Ésta comprende una serie de ensayos respaldados por normativas, que permitieron establecer parámetros de aceptación y rechazo de la calidad de las muestras elaboradas, en función de su resistencia, módulo de elasticidad, velocidad de pulso ultrasónico y peso unitario.

Las muestras con cenizas volantes presentaron disminución del asentamiento en función al aumento de proporción de ceniza, el cual es atribuido a la capacidad de absorción del material. Los resultados obtenidos de esta investigación demuestran la factibilidad del uso de cenizas volantes como sustitución parcial del cemento en mezclas de resistencias altas con proporciones de hasta 15%, obteniendo un comportamiento de las resistencias estudiadas aceptable en una sustitución de hasta 10%.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	4
TEMA DE INVESTIGACIÓN	4
I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
I.2 OBJETIVOS.....	6
I.2.1 Objetivo General	6
I.2.2 Objetivos Específicos	6
I.3 APORTES.....	7
CAPÍTULO II	8
MARCO TEÓRICO	8
II.1 ANTECEDENTES.....	8
II.1.1 Materiales Puzolánicos	9
II.1.2 “Cementos Puzolánicos, una Alternativa para Venezuela”, Águila(2001)9	
II.1.3 “Evaluación de la Hoja de Maíz como Posible Fuente de Material Puzolánico”, Águila y Sosa (2005)	10
II.1.4 “El Empleo de las Cenizas Volantes en la Fabricación de los Hormigones”, Rodríguez Santiago (1988)	11
II.1.5 Normativas Existentes.....	12
II.2 MOLIENDA DE CAÑA DE AZUCAR Y COMBUSTIÓN DEL BAGAZO	13
II.3 MEZCLA DE CONCRETO.....	16

II.3.1 Mezclado.....	17
II.3.2 Colocación y Compactación.....	17
II.3.3 Curado	18
II.4 COMPONENTES DE LA MEZCLA DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR CENIZAS VOLANTES.....	19
II.4.1 Cenizas	19
II.4.2 Cemento.....	19
II.4.3 Agregados.....	19
II.4.4 Agua.....	20
II.5 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO FRESCO	21
II.5.1 Reología.....	21
II.5.1.1 Fluidéz	21
II.5.1.2 Compactibilidad	21
II.5.1.3 Estabilidad a la segregación.....	22
II.5.2 Trabajabilidad.....	23
II.5.3 Retracción	24
II.5.4 Tiempo de Fraguado.....	24
II.6 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO ENDURECIDO.....	25
II.6.1 Resistencia a la Compresión Simple.....	25
II.6.2 Módulo de Elasticidad	27
II.6.3 Peso Unitario.....	27
II.7 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEL CONCRETO.....	28
II.7.1 Ultrasonido	28

II.8 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA DEL CONCRETO	28
II.8.1 Promedio o Media Aritmética	29
II.8.2 Desviación Estándar	29
II.8.3 Rango Ponderado	30
II.8.4 Coeficiente de Variación	31
CAPÍTULO III	32
MÉTODO.....	32
III.1 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.....	33
III.1.1 Granulometría	34
III.1.1.1 Agregado Grueso	34
III.1.1.2 Agregado Fino	35
III.1.2 Densidad, Absorción y Contenido de Humedad de los Agregados	36
III.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS VOLANTES	39
III.2.1 Secado y Separación Mediante el Tamiz #4	39
III.2.2 Ensayo de Penetración de la Aguja de Vicat.....	40
III.3 DISEÑO DE MEZCLA.....	43
III.3.1 Resistencias	43
III.3.2 Ley de Abrams	44
III.3.3 Correcciones de la Relación Agua/Cemento (α)	45
III.3.4 Relación Triangular	46
III.3.5 Corrección del Cemento (Cc)	46
III.3.6 Volumen Absoluto de los Granos de Cemento.....	47

III.3.7 Volumen de Aire Atrapado	47
III.3.8 Dosis de Agua	48
III.3.9 Volumen Absoluto de los Agregados	48
III.3.10 Relación Beta (β).....	49
III.3.11 Dosis de Agregado.....	49
III.3.12 Corrección por Humedad	50
III.3.13 Dosificación	51
III.4 PREPARACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO	52
III.4.1 Pesado de Materiales.....	52
III.4.2 Mezclado	53
III.4.3 Elaboración de los Cilindros de Concreto	54
III.4.4 Curado	57
III.5 CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.....	57
III.6 CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO ENDURECIDO	59
III.6.1 Ensayo a Compresión	59
III.6.2 Ensayo de ultrasonido.....	60
III.6.3 Módulo de elasticidad.....	61
CAPÍTULO IV	64
RESULTADOS Y ANÁLISIS	64
IV.1 RESULTADOS	64
IV.1.1 Granulometría de los Agregados	64
IV.1.1.1 Agregados Gruesos	64
IV.1.1.2 Agregados Finos	65

IV.1.2 Densidad y Absorción de los Agregados	67
IV.1.2.1 Agregado Grueso	67
IV.1.2.2 Agregado Fino	67
IV.1.3 Contenido de Humedad de los Agregados	68
IV.1.3.1 Agregado Grueso	68
IV.1.3.2 Agregado Fino	68
IV.1.4 Ensayo de Penetración de la Aguja de Vicat	69
IV.1.5 Diseños de Mezclas	72
IV.1.5.1 Dosificaciones	75
IV.1.6 Ensayo de Cono de Abrams	79
IV.1.7 Ensayos de Resistencia a Compresión	80
IV.1.7.1 Tipos de Fallas Obtenidas en las Probetas de Concreto	92
IV.1.8 Ensayos de Ultrasonido	93
IV.1.9 Ensayos de Módulo de Elasticidad Secante	104
IV.1.10 Peso Unitario	124
IV.1.11 Coloraciones Presentadas en las Probetas de Concreto	142
IV.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	143
IV.2.1 Granulometría	143
IV.2.1.1 Agregado Grueso	143
IV.2.1.2 Agregado Fino	143
IV.2.2 Densidad, Absorción y Contenido de Humedad	144
IV.2.2.1 Agregado Grueso	144
IV.2.2.2 Agregado Fino	144

IV.2.3 Ensayo de Aguja de Vicat.....	145
IV.2.4 Ensayo de Cono de Abrams	145
IV.2.5 Ensayos de Resistencia a Compresión	146
IV.2.6 Ensayos de Ultrasonido	148
IV.2.7 Ensayos de Módulo de Elasticidad	150
IV.2.8 Peso Unitario	151
CAPÍTULO V.....	153
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	153
V.1 CONCLUSIONES.....	153
V.2 RECOMENDACIONES	156
BIBLIOGRAFÍA	157
APÉNDICE.....	160
APÉNDICE N°1. Modelo de Control de Probetas. Ensayo de Compresión.	160
APÉNDICE N°2. Modelo de Control de Probetas. Ensayo de Ultrasonido.	160
APÉNDICE N°3. Modelo de Control de Probetas. Ensayo de Módulo de Elasticidad.	161
APÉNDICE N°4. Especificaciones del Yeso Piedra Utilizado.	161

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO II

Tabla N° II.1 Valores de fluidez correspondientes al ensayo de trabajabilidad. 24

Tabla N° II.2 Factor del rango ponderado 30

CAPÍTULO III

Tabla N° III.1 Límite de los porcentajes en peso que pasan los dos (2) cedazos de aberturas cuadradas..... 35

Tabla N° III.2 Límites en la Granulometría. 36

Tabla N° III.3 Valores de la desviación estándar que son de esperar en el concreto, según el grado de control 44

Tabla N° III.4 Factor para corregir α por tamaño máximo (K_r) 45

Tabla N° III.5 Factor para corregir α por tipo de agregado (K_A)..... 45

Tabla N° III.6 Factor para corregir la dosis de cemento por tamaño máximo (C_1). 46

Tabla N° III.7 Factor para corregir la dosis de cemento por tipo de agregado (C_2)47

CAPÍTULO IV

Tabla N° IV.1 Resultado del Ensayo de Granulometría del Agregado Grueso..... 64

Tabla N° IV.2 Resultado del Ensayo de Granulometría del Agregado Fino 66

Tabla N° IV.3 Resultado del Módulo de Finura del Agregado Fino 67

Tabla N° IV.4 Resultado del Ensayo de Densidad y Absorción de la Piedra 1..... 67

Tabla N° IV.5 Resultado del Ensayo de Densidad y Absorción de Arena Lavada 68

Tabla N° IV.6 Resultado del Ensayo de Contenido de Humedad de Piedra N° 1.. 68

Tabla N° IV.7 Resultado del Ensayo de Contenido de Humedad de Arena Lavada.....	68
Tabla N° IV.8 Resultados del Ensayo de Consistencia de las Pastas de Cemento.....	69
Tabla N° IV.9 Resultados del Ensayo de la Aguja de Vicat para la Mezcla Patrón	69
Tabla N° IV.10 Resultados del Ensayo de la Aguja de Vicat para la Mezcla con 5% de Sustitución de Ceniza.....	70
Tabla N° IV.11 Resultados del Ensayo de la Aguja de Vicat para la Mezcla con 10% de Sustitución de Ceniza.....	70
Tabla N° IV.12 Resultados del Ensayo de la Aguja de Vicat para la Mezcla con 15% de Sustitución de Ceniza.....	71
Tabla N° IV.13 Tiempo de Fraguado de las Mezclas	71
Tabla N° IV.14 Datos para el Diseño de Mezcla $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$	73
Tabla N° IV.15 Datos para el Diseño de Mezcla $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$	74
Tabla N° IV.16 Dosificación de la Mezcla Patrón $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$	75
Tabla N° IV.17 Dosificación de la Mezcla Patrón $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$	75
Tabla N° IV.18 Dosificación de la Mezcla con Sustitución de Cenizas 5% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	76
Tabla N° IV.19 Dosificación de la Mezcla con Sustitución de Cenizas 10% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	76
Tabla N° IV.20 Dosificación de la Mezcla con Sustitución de Cenizas 15% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	77
Tabla N° IV.21 Dosificación de la Mezcla con Sustitución de Cenizas 5% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	77

Tabla N° IV.22 Dosificación de la Mezcla con Sustitución de Cenizas 10% $f'c=350$ Kg/cm ²	78
Tabla N° IV.23 Dosificación de la Mezcla con Sustitución de Cenizas 15% $f'c=350$ Kg/cm ²	78
Tabla N° IV.24 Asentamiento en las mezclas $f'c = 280$ Kg/cm ²	79
Tabla N° IV.25 Asentamiento en las mezclas $f'c = 350$ Kg/cm ²	79
Tabla N° IV.26 Asentamiento en las mezclas C-15 con adición de agua de resistencias de diseño 280 Kg/cm ² y 350 Kg/cm ²	80
Tabla N° IV.27 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar. Mezcla Patrón $f'c = 280$ Kg/cm ²	81
Tabla N° IV.28 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar. Mezcla con Sustitución de 5% $f'c = 280$ Kg/cm ²	82
Tabla N° IV.29 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar. Mezcla con Sustitución de 10% $f'c = 280$ Kg/cm ²	83
Tabla N° IV.30 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar. Mezcla con Sustitución de 15% $f'c = 280$ Kg/cm ²	84
Tabla N° IV.31 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar. Mezcla Patrón $f'c = 350$ Kg/cm ²	85
Tabla N° IV.32 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar. Mezcla con sustitución de 5% $f'c = 350$ Kg/cm ²	86
Tabla N° IV.33 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar. Mezcla con sustitución de 10% $f'c = 350$ Kg/cm ²	87
Tabla N° IV.34 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar. Mezcla con sustitución de 15% $f'c = 350$ Kg/cm ²	88

Tabla N° IV.35 Análisis de Aceptación y Rechazo a Través de Probabilidades. Mezcla C-10.	89
Tabla N° IV.36 Análisis de Aceptación y Rechazo a Través de Probabilidades. Mezcla C-5.	89
Tabla N° IV.37 Tipos de Falla Obtenidas en los Ensayos de Resistencia a Compresión Simple	92
Tabla N° IV.38 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla Patrón $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$..	93
Tabla N° IV.39 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla con sustitución de 5% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	94
Tabla N° IV.40 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla con sustitución de 10% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	95
Tabla N° IV.41 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla con sustitución de 15% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	96
Tabla N° IV.42 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla Patrón $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$..	97
Tabla N° IV.43 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla con sustitución de 5% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	98
Tabla N° IV.44 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla con sustitución de 10% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	99
Tabla N° IV.45 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla con sustitución de 15% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	100
Tabla N° IV.46 Características de las Probetas Patrones $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$	104
Tabla N° IV.47 Características de las Probetas con Sustitución de 5% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	105
Tabla N° IV.48 Características de las Probetas con Sustitución de 10% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	105

Tabla N° IV.49 Características de las Probetas con Sustitución de 15% $f'c = 280$ Kg/cm ²	106
Tabla N° IV.50 Características de las Probetas Patrones $f'c = 350$ Kg/cm ²	106
Tabla N° IV.51 Características de las Probetas con Sustitución de 5% $f'c=350$ Kg/cm ²	107
Tabla N° IV.52 Características de las Probetas con Sustitución de 10% $f'c=350$ Kg/cm ²	107
Tabla N° IV.53 Características de las Probetas con Sustitución de 15% $f'c=350$ Kg/cm ²	108
Tabla N° IV.54 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla Patrón $f'c=280$ Kg/cm ²	108
Tabla N° IV.55 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico. Mezcla Patrón $f'c=280$ Kg/cm ²	109
Tabla N° IV.56 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla con sustitución de 5% $f'c=280$ Kg/cm ²	110
Tabla N° IV.57 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico. Mezcla con Sustitución de 5% $f'c=280$ Kg/cm ²	111
Tabla N° IV.58 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla con sustitución de 10% $f'c=280$ Kg/cm ²	112
Tabla N° IV.59 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico. Mezcla con Sustitución de 10% $f'c=280$ Kg/cm ²	113
Tabla N° IV.60 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla con sustitución de 15% $f'c=280$ Kg/cm ²	114
Tabla N° IV.61 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico. Mezcla con Sustitución de 15% $f'c=280$ Kg/cm ²	115

Tabla N° IV.62 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla Patrón $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	116
Tabla N° IV.63 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico. Mezcla Patrón $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	117
Tabla N° IV.64 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla con Sustitución de 5% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	118
Tabla N° IV.65 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico Mezcla con Sustitución de 5% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	119
Tabla N° IV.66 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla con Sustitución de 10% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	120
Tabla N° IV.67 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico Mezcla con Sustitución de 10% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	121
Tabla N° IV.68 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla con Sustitución de 15% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	122
Tabla N° IV.69 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico Mezcla con Sustitución de 10% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	123
Tabla N° IV.70 Peso Unitario. Mezcla Patrón $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	124
Tabla N° IV.71 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas de Mezcla Patrón $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	125
Tabla N° IV.72 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla con sustitución de 5% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	126
Tabla N° IV.73 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas con sustitución de 5% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	127
Tabla N° IV.74 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla con sustitución de 10% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	128

Tabla N° IV.75 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas con sustitución de 10% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	129
Tabla N° IV.76 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla con sustitución de 15% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	130
Tabla N° IV.77 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas con sustitución de 15% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	131
Tabla N° IV.78 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla Patrón $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	132
Tabla N° IV.79 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas de Mezcla Patrón $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	133
Tabla N° IV.80 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla con sustitución de 5% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	134
Tabla N° IV.81 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas con sustitución de 5% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	135
Tabla N° IV.82 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla con sustitución de 10% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	136
Tabla N° IV.83 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas con sustitución de 10% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	137
Tabla N° IV.84 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla con sustitución de 15% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	138
Tabla N° IV.85 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas con sustitución de 15% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	139
Tabla N° IV.86 Coloraciones de las Probetas de Concreto	142
Tabla N° IV.86 Coeficientes de Variación del Ensayo de Ultrasonido	150

LISTA DE GRÁFICAS

CAPÍTULO IV

Gráfica N° IV.1 Curva Granulométrica Agregados Gruesos.....	65
Gráfica N° IV.2 Curva Granulométrica Agregados Finos.....	66
Gráfica N° IV.3 Comparación de los Resultados del Ensayo de Penetración	72
Gráfica N° IV.4 Evolución de la Resistencia a Compresión en las Mezclas de Concreto de Resistencia de Diseño 280 Kg/cm ²	90
Gráfica N° IV.5 Evolución de la Resistencia a Compresión en las Mezclas de Concreto de Resistencia de Diseño 280 Kg/cm ²	91
Gráfica N° IV.6 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla Patrón de Resistencia f'c = 280 Kg/cm ²	94
Gráfica N° IV.7 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla con sustitución de 5% de Resistencia f'c = 280 Kg/cm ²	95
Gráfica N° IV.8 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla con sustitución de 10% de Resistencia f'c = 280 Kg/cm ²	96
Gráfica N° IV.9 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla con sustitución de 15% de Resistencia f'c = 280 Kg/cm ²	97
Gráfica N° IV.10 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla Patrón de Resistencia f'c = 350 Kg/cm ²	98
Gráfica N° IV.11 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla con sustitución de 5% de Resistencia f'c = 350 Kg/cm ²	99
Gráfica N° IV.12 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla con sustitución de 10% de Resistencia f'c = 350 Kg/cm ²	100
Gráfica N° IV.13 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla con sustitución de 15% de Resistencia f'c = 350 Kg/cm ²	101

Gráfica N° IV.14 Comparación de las Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezclas de Resistencia $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$	102
Gráfica N° IV.15 Comparación de las Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezclas de Resistencia $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$	103
Gráfica N° IV.16 Módulo de Elasticidad. Mezcla Patrón $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$	109
Gráfica N° IV.17 Módulo de Elasticidad. Mezcla con 5% de sustitución $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$	111
Gráfica N° IV.18 Módulo de Elasticidad. Mezcla con 10% de Sustitución $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$	115
Gráfica N° IV.19 Módulo de Elasticidad. Mezcla con 15% de Sustitución $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	113
Gráfica N° IV.20 Módulo de Elasticidad. Mezcla Patrón $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$	117
Gráfica N° IV.21 Módulo de Elasticidad. Mezcla con Sustitución de 5% $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$	119
Gráfica N° IV.22 Módulo de Elasticidad. Mezcla con Sustitución de 10% $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$	121
Gráfica N° IV.23 Módulo de Elasticidad. Mezcla con Sustitución de 15% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$	123
Gráfica N° IV.24 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla Patrón $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	125
Gráfica N° IV.24 Peso Unitario de las Probetas con Sustitución de 5% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	127
Gráfica N° IV.25 Peso Unitario de las Probetas con Sustitución de 10% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	129

Gráfica N° IV.26 Peso Unitario de las Probetas con Sustitución de 10% $f'c=280$ Kg/cm ²	131
Gráfica N° IV.27 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla Patrón $f'c=350$ Kg/cm ²	133
Gráfica N° IV.28 Peso Unitario de las Probetas con Sustitución de 5% $f'c=350$ Kg/cm ²	135
Gráfica N° IV.29 Peso Unitario de las Probetas con Sustitución de 10% $f'c=350$ Kg/cm ²	137
Gráfica N° IV.30 Peso Unitario de las Probetas con Sustitución de 15% $f'c=350$ Kg/cm ²	139
Gráfica N° IV.31 Comparación de Pesos Unitarios en Mezclas de Resistencia $f'c=280$ Kg/cm ²	140
Gráfica N° IV.32 Comparación de Pesos Unitarios en Mezclas de Resistencia $f'c=350$ Kg/cm ²	141

LISTA DE FOTOS

CAPÍTULO II

Foto N° II.1 Molinos. Central El Palmar.	14
Foto N° II.2 Deposito y Transporte del Bagazo. Central El Palmar.	14
Foto N° II.3 Chimenea Principal. Central El Palmar.	15
Foto N° II.4 y N° II.5 Canal de Descarga. Lagunas de Cenizas Volantes. Central El Palmar.	16

CAPÍTULO III

Foto N° III.1 Muestra de Agregado Grueso (piedra 1”)......	33
Foto N° III.2 Muestra de Agregado Fino (arena lavada).	33
Foto N° III.3 Tamizadora Mecánica.	35
Foto N° III.4 Bandejas con Cenizas Volantes Colocadas en el Horno.....	40
Foto N° III.5 y N° III.6 Mezclado. Preparación de Pastas de Cemento.	41
Foto N° III.7 y N° III.8. Moldeo de Probetas. Determinación de Consistencia de la Pasta de Cemento.....	42
Foto N° III.9 Ensayo de Penetración de la Aguja de Vicat.....	42
Foto N° III.10 Pesado de Materiales.....	52
Foto N° III.11 y N° III.12 Materiales Utilizados en la Mezcla de Concreto.	53
Foto N° III.13 Trompo Utilizado para el Mezclado.	54
Foto N° III.14 Moldes Preparados para el Vaciado del Concreto.	55
Foto N° III.15 Vaciado de los Cilindros de Concreto.....	56
Foto N° III.16 Probetas Vaciadas con Sustitución de Cenizas en 15% de Resistencias 280 Kg/cm ² y 350 Kg/cm ²	56

Foto N° III.17 Curado de los Cilindros de Concreto.....	57
Foto N° III.18 y N° III.19 Ensayo de Cono de Abrams.	59
Foto N° III.20 Prensa Universal Utilizada en los Ensayos de Compresión.	60
Foto N° III.21 Equipo de Ultrasonido Utilizado.	61
Foto N° III.22 y N° III.23 Colocación de Capping. Extensómetro.....	62
Foto N° III.24 y N° III.25 Probeta Preparada. Ensayo de Módulo de Elasticidad...	63

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura N° II.1 Composición del Concreto Simple.....	17
Figura N° II.2 Medición del asentamiento mediante el Cono de Abrams.....	23
Figura N° II.3 Aparato de Vicat.....	25
Figura N° III.1 Ensayo de Cono De Abrams	58

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la tecnología de los materiales ha permitido un avance en el campo de la construcción en los últimos años, debido a investigaciones que emplean cenizas volantes, escorias de alto horno, microsílíce y cenizas de desechos agrícolas. Dos de las investigaciones realizadas en Venezuela son: la del Ing. Idalberto Águila Arboláez en el año 2001, cuyo objetivo principal es el desarrollo de una tecnología para producir un material puzolánico, a partir de la cascarilla de arroz, para utilizarlo como sustituto parcial del cemento Portland en las obras; y por el Ing Idalberto Águila Arboláez y la Arq. Milena Sosa Griffin en el año 2005, en la cual se presenta una caracterización de las cenizas provenientes de la hoja de maíz para sustituir parcialmente el cemento Portland en la elaboración de morteros y mezclas de concreto.

En este Trabajo Especial de Grado, se propone la utilización de cenizas volantes provenientes del bagazo de caña de azúcar de la central El Palmar para sustituir parcialmente en diferentes proporciones el cemento Portland, en el diseño de mezclas de concreto de resistencias altas.

Esta investigación es importante porque permitió el establecimiento de parámetros de referencia sobre el comportamiento y calidad del concreto de resistencias altas en presencia de cenizas volantes, utilizada en diferentes proporciones. Además facilitará a las empresas constructoras elaborar diseños de mezclas para los concretos a ser utilizados en obras, conociendo las limitaciones que implica el uso de este material, para que cumplan con los requisitos mínimos exigidos en las normas venezolanas.

El uso de las cenizas volantes provenientes del bagazo de caña de azúcar surge de la necesidad de mejorar el aprovechamiento de los desechos en la planta refinadora de azúcar El Palmar, debido a que en su mayoría son dispuestas en lagunas de sedimentación sin ninguna utilidad final.

Este estudio fue realizado aplicando un diseño de mezcla para resistencias altas de 280 Kg/cm² y 350 Kg/cm², con una sustitución parcial de cenizas volantes de 5%, 10% y 15 %. Se realizó la caracterización del concreto en estado fresco y en estado endurecido, con la finalidad de comparar mezclas patrones y mezclas con sustitución parcial de cenizas.

En el diseño de mezcla es importante tomar en cuenta la absorción de las cenizas volantes, debido a que influye considerablemente en la trabajabilidad de la misma. Se recomienda en futuras investigaciones determinar la capacidad de absorción de las cenizas y desarrollar un método para la corrección de la dosificación de agua a ser utilizada en la mezcla.

El procedimiento que permitió lograr los objetivos fue el siguiente: Caracterización de los agregados (gruesos y finos); Caracterización de las cenizas volantes; Diseño de mezclas, utilizando el método simplificado del “Manual del Concreto Estructural” de J. Porrero y otros; Elaboración de probetas; Caracterización del concreto en estado fresco; Caracterización del concreto en estado endurecido.

Mediante este trabajo se logró evaluar el comportamiento de las cenizas volantes provenientes del bagazo de caña de azúcar como sustitución parcial del cemento en el diseño de mezclas de resistencias altas.

A través de este informe se presenta el resultado de la investigación realizada en los siguientes capítulos. En el Capítulo I: se expone el problema objeto de investigación, el objetivo general, los objetivos específicos y los aportes. En el Capítulo II: se detallan los aspectos referidos a los antecedentes, bases teóricas y variables que se probaron en este estudio. En el Capítulo III: se presenta el diseño metodológico que fue seguido para realizar el estudio. En el Capítulo IV: se exponen y analizan los resultados. Finalmente en el Capítulo V: se presentan las conclusiones, recomendaciones, apéndice y referencias bibliográficas.

CAPÍTULO I

TEMA DE INVESTIGACIÓN

I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las construcciones realizadas por las grandes civilizaciones como la egipcia, romana y griega, se utilizaban materiales con propiedades puzolánicas como cenizas y rocas volcánicas, piedra pómez, calcedonia, ópalo, entre otros. Dichos materiales son capaces de reaccionar con cal en presencia de agua para generar productos con propiedades cementantes. A pesar de ello, estos materiales han quedado en desuso, por lo que en la actualidad se utiliza el cemento Pórtland como principal material cementante en la preparación del concreto.

Recientemente en el área de la tecnología del concreto se ha retomado el uso de materiales puzolánicos a través de investigaciones que emplean cenizas volantes, escorias de alto horno, microsílíce y cenizas de desechos agrícolas.

La factibilidad del uso de desechos agrícolas, como la cascarilla de arroz para la producción de material puzolánico en sustitución parcial del cemento utilizado en obras, fue comprobada por el Ing. Idalberto Águila Arboláez (2001) quien en sus investigaciones obtuvo un producto que cumple con los estándares de calidad e incluso produce ciertas mejoras en las características del concreto. Además, Idalberto Águila y Milena Sosa Griffin (2005) utilizaron la hoja de maíz con el mismo fin, obteniendo resultados similares.

En Venezuela existen grandes áreas de cultivo de caña de azúcar distribuidas en los estados Aragua, Carabobo, Lara, Yaracuy, Portuguesa, Barinas, Sucre, Zulia, Táchira y Trujillo, cuya producción en el año 2001 fue de 8.862.621 toneladas. En el procesamiento de la caña de azúcar se generan cenizas volantes como producto de la combustión del bagazo. Estas cenizas contaminan el ambiente al no ser tratadas correctamente antes de darles una disposición final adecuada.

En el marco de este Trabajo Especial de Grado, se propone utilizar dichas cenizas como sustitución parcial del cemento en el diseño de mezclas de resistencias altas. Con ello se pretende responder las siguientes interrogantes:

- ¿Qué cambios se deben producir en las características del concreto en estado fresco y endurecido si se usan las cenizas volantes del bagazo de caña de azúcar?
- ¿Qué tan efectiva es la utilización de cenizas volantes y en qué casos es aplicable?

I.2 OBJETIVOS

I.2.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento de cenizas volantes obtenidas del bagazo de caña de azúcar como sustitución parcial del cemento en el diseño de mezclas de concreto de resistencias altas.

I.2.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar las cenizas volantes, tomando en cuenta la finura, capacidad cementante y la proporción a ser utilizada.
2. Diseñar mezclas de concreto tomando en cuenta la granulometría de los agregados, relación agua – cemento (α) y porcentaje de cenizas volantes.
3. Caracterizar las mezclas de concreto obtenidas en estado fresco, tomando en cuenta la trabajabilidad.
4. Contrastar las mezclas de concreto en estado endurecido, tomando en cuenta el desarrollo de la resistencia, módulo de elasticidad, peso unitario y ensayos de ultrasonido.

I.3 APORTES

La contribución de nuevos conocimientos y técnicas para la utilización de materiales de desecho contaminante, constituye un avance en la ingeniería conjuntamente con la ecología. Con ello se quiere introducir un nuevo material en la tecnología del concreto en sustitución del cemento, que constituya una alternativa diferente y posiblemente con mayor factibilidad económica, en contraste con las mezclas de concreto tradicional.

Se pretende proporcionar utilidad a las cenizas volantes provenientes del bagazo de caña de azúcar en el marco del reciclaje, disminuyendo los niveles de contaminación cuando son dispuestas incorrectamente en el medio ambiente. Además la sustitución parcial del cemento por cenizas volantes en mezclas de concreto permite disminuir hasta en un 50% las emisiones de CO₂ producidos en las industrias cementeras, al mismo tiempo se quiere jugar con las propiedades que pueden aportar las cenizas a la mezcla de concreto para mejorar sus propiedades y optimizar sistemas constructivos. Con ello es posible sensibilizar y concienciar a la población respecto a los problemas ambientales existentes proponiendo alternativas en el desarrollo de nuevos productos a nivel nacional.

La investigación a realizar permite profundizar conocimientos adquiridos en diferentes cátedras de la carrera de Ing. Civil y aplicarlos a nivel profesional. Además proporcionará a la Universidad Central de Venezuela, concretamente al Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, las especificaciones técnicas de un material con propiedades cementantes que serán útiles para su posterior uso en la institución.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1 ANTECEDENTES

Es importante conocer los estudios realizados sobre los materiales puzolánicos y cenizas volantes utilizadas en mezclas de concreto, los cuales han generado caracterizaciones y resultados que confirman la capacidad cementante de dichos materiales y las mejoras que producen en las mezclas de concreto. Estas investigaciones han sido desarrolladas para proporcionar alternativas para el diseño de las mezclas de concreto y que además tienen una finalidad ecológica en lo que respecta a la utilización de un material de desecho y a la reducción del consumo de cemento. Además existen normativas que especifican el uso de materiales puzolánicos no solo como sustituto de cemento, sino también como sustituto del agregado fino. En otros países estas normas especifican la dosificación, composición química y finura con la que pueden ser utilizadas las cenizas volantes.

La importancia del presente Trabajo de Grado radica en la ampliación de conocimientos que se pretende generar sobre sustituciones de cenizas volantes en el concreto en Venezuela, específicamente en resistencias altas, permitiendo tener parámetros de referencia sobre el comportamiento y calidad del concreto obtenido.

II.1.1 Materiales Puzolánicos

“Las puzolanas son materiales que contienen sílice y/o aluminio, los cuales por si solos tienen poca o ninguna propiedad cementante, sin embargo, cuando son mezclados con hidróxido de calcio, ante la presencia de agua, pueden endurecer como los cementos”¹.

El término puzolana se aplica también a otros productos naturales o artificiales que tienen propiedades análogas, tales como las cenizas volantes. Estas se definen como “un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía y constituyen en sí las partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases”². Además de carbón, los equipos de combustión emplean basura y bagazo, en el caso de las azucareras.

Los materiales puzolánicos pueden ser utilizados en combinación con cemento Portland o con hidróxido de calcio para mejorar morteros y mezclas de concreto. Su uso permite reducir las cantidades de cemento Portland, cuya producción involucra elevados consumos de energía y emisiones de CO₂.

II.1.2 “Cementos Puzolánicos, una Alternativa para Venezuela”, Águila (2001)

En el artículo de Águila se expone el resultado parcial de una investigación llevada a cabo en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC) de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Central de Venezuela, cuyo objetivo principal es el desarrollo de una tecnología para producir

¹ Estado Actual de la Investigación de las Puzolanas en Guatemala como Material de Construcción, Quiñónez de la Cruz

² ¿Qué, por qué y cómo? Adiciones al cemento, National Ready Mixed Concrete Association

un material puzolánico, a partir de la cascarilla de arroz, para utilizarlo como sustituto parcial del cemento Portland en las obras.

Se describe el proceso por el cual se obtiene experimentalmente cierta cantidad de puzolana con la cual se realizaron los ensayos correspondientes para la evaluación de su calidad y así establecer sus potencialidades de empleo. Se señalan las especificaciones técnicas que deben cumplir una ceniza de buena calidad y los intentos realizados hasta obtener las características deseadas.

Se concluye que el producto obtenido cumple con los estándares de calidad planteados al inicio de la investigación, siendo posible utilizarlo como sustituto parcial del cemento sin disminución de su calidad e, incluso con cierta mejoría en algunas de sus propiedades.

II.1.3 “Evaluación de la Hoja de Maíz como Posible Fuente de Material Puzolánico”, Águila y Sosa (2005)

En el trabajo realizado por Águila y Sosa, se presenta una caracterización de las cenizas de hojas de maíz para sustituir parcialmente el cemento Portland en la elaboración de morteros y mezclas de concreto. La investigación fue realizada en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC) de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la UCV.

Se describe el procedimiento para la obtención del material, el cual se inicia a partir de la combustión de la hoja de maíz y sigue con la molienda de las cenizas obtenidas. La caracterización de los materiales que conforman las mezclas comprende análisis físico-químicos del cemento y de las cenizas, así como la granulometría de la arena. La resistencia estudiada es de 250 Kg/cm² y las

proporciones de sustitución de cenizas se encuentran en un rango del 10% al 30%.

Se concluye que las cenizas volantes provenientes de la hoja de maíz tienen la potencialidad de ser usados como sustituto parcial del cemento en mezclas de morteros y concretos en proporciones que no superen el 20%, ya que la resistencia a la compresión y la estabilidad química hasta esa proporción se comportan de forma deseable. El flujo de la mezcla disminuye por lo que se presenta una mayor demanda de agua en la elaboración de las mezclas.

II.1.4 “El Empleo de las Cenizas Volantes en la Fabricación de los Hormigones”, Rodríguez Santiago (1988)

En el trabajo realizado por Rodríguez Santiago se presenta un resumen de las especificaciones contenidas en algunas normas existentes sobre las cenizas volantes empleadas en la fabricación de mezclas de concreto. Además contiene información sobre las características de las cenizas volantes de las centrales eléctricas españolas y el proceso de fabricación de las mezclas de concreto; mencionando algunas propiedades de las mismas en estado fresco y endurecido.

Se concluye que la incorporación de cenizas volantes a las mezclas de concreto reduce el costo de las mismas y produce mejoras en la trabajabilidad permeabilidad y resistencia al ataque químico, siempre que se utilicen según las especificaciones de las normativas correspondientes (en este caso la Norma Española UNE 83415-87) y se realice un curado adecuado. Las mezclas con cenizas presentan disminución de la resistencia a la compresión a tempranas edades y aumento a largo plazo.

II.1.5 Normativas Existentes

A continuación se mencionan algunas de las normas internacionales referentes al uso de materiales puzolánicos en mezclas de concreto:

1. ASTM C618-08 “*Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete*”: “Esta especificación trata sobre la ceniza volante de carbón y la puzolana natural en crudo o calcinada para su uso en concreto donde se desee una acción cementicia o puzolánica, o ambas, o donde pueda desearse alguna otra propiedad normalmente atribuida a la ceniza volante o a las puzolanas, o donde se pretenda alcanzar ambos objetivos.”³
2. Norma COVENIN 3135-1994 “*Puzolanas. Determinación del índice de actividad puzolánica*”: La Norma establece las especificaciones para determinar el índice de actividad puzolánica de las puzolanas en probetas cubicas, realizando una comparación entre una mezcla control y una mezclas de ensayo, esta última con una sustitución parcial de cemento por puzolana en un 20%. Las mezclas elaboradas utilizan una relación agua-cemento de 0,485.
3. Norma Española UNE 83415-87 “*Adiciones al hormigón. Cenizas volantes. Definición, especificaciones, transporte y almacenamiento de las cenizas volantes utilizadas como adición a los hormigones y morteros de cemento Portland*”.

³ ASTM International. Disponible desde Internet en < <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C618-08-SP.htm>>

4. BS 3892 “British Pulverized-fuel ash”. Parte 1 “Specification for pulverized-fuel ash for use as a cementitious component in structural concrete”. 1982. Parte 2 “Specification for pulverized-fuel ash for use in grouts and for miscellaneous uses in concrete”.1984.
5. Recomendaciones UC-85. Generalitat de Catalunya “Us de les cendres volants en el formigó”

II.2 MOLIENDA DE CAÑA DE AZUCAR Y COMBUSTIÓN DEL BAGAZO

La producción de azúcar involucra grandes emisiones de cenizas al ambiente, dependiendo del tratamiento que se le den a los gases producto de la combustión del bagazo de caña. En la Central El Palmar, de donde provienen las cenizas volantes a evaluar en este Trabajo de Grado, se muelen diariamente de 7.000 a 8.000 toneladas de caña de azúcar desde el mes de noviembre hasta principios del mes de mayo, lo que equivale anualmente a un millón y medio de toneladas de molienda las cuales generan aproximadamente 300.000 toneladas de cenizas húmedas.

El proceso de molienda se inicia con la caña desmenuzada por picadoras y desfibradoras, la cual llega a una serie de molinos en serie que extraen el jugo mediante presión (*Ver Foto N° II.1*). En el recorrido de la caña por los molinos se agrega agua caliente, para extraer al máximo la sacarosa que contienen el material fibroso. El azúcar extraído de la caña se encuentra en un porcentaje del 94% al 95%, el resto se queda en el bagazo residual.

El bagazo sale de la última unidad de molienda y es conducido a una bagacera para que seque (*Ver Foto N° II.2*), seguidamente es trasladado a las

calderas para su utilización como combustible. La combustión del bagazo produce el vapor de alta presión que se emplea en las turbinas de los molinos, cuchillas y generadores de electricidad de la planta.



Foto N° II.1 Molinos. Central El Palmar.



Foto N° II.2 Depósito y Transporte del Bagazo. Central El Palmar.

Antiguamente cuando las regulaciones ambientales eran menos exigentes, en la Central “El Palmar” se construyeron chimeneas muy altas con la finalidad de

que las cenizas volantes y los gases no afectaran directamente a la población cercana, ni a la planta en sí (*Ver Foto N° II.3*). Debido a la altura a la que los gases eran expulsados la contaminación se producía a grandes distancias cuando las cenizas bajaban por gravedad.

Con los cambios en los controles de emisiones atmosféricas se realizaron ciertas modificaciones en los procesos, por lo que ahora los gases generados en las calderas y conducidos a las chimeneas son lavados para ser controlada su emisión. Se realiza una separación de sólidos, en el que se prehumedecen los gases a la entrada de la chimenea y son pasados por una cascada de agua; los gases limpios ascienden por la chimenea y salen a la atmosfera. El agua de lavado arrastra las cenizas volantes mediante canales que la depositan en una laguna de sedimentación, para luego ser reutilizada el agua en un circuito cerrado (*Ver Foto N° II.4 y II.5*). Las cenizas son retiradas por maquinas excavadoras para depositarla en botaderos como relleno, parte de ellas se utiliza para producir fertilizante.



Foto N° II.3 Chimenea Principal. Central El Palmar.



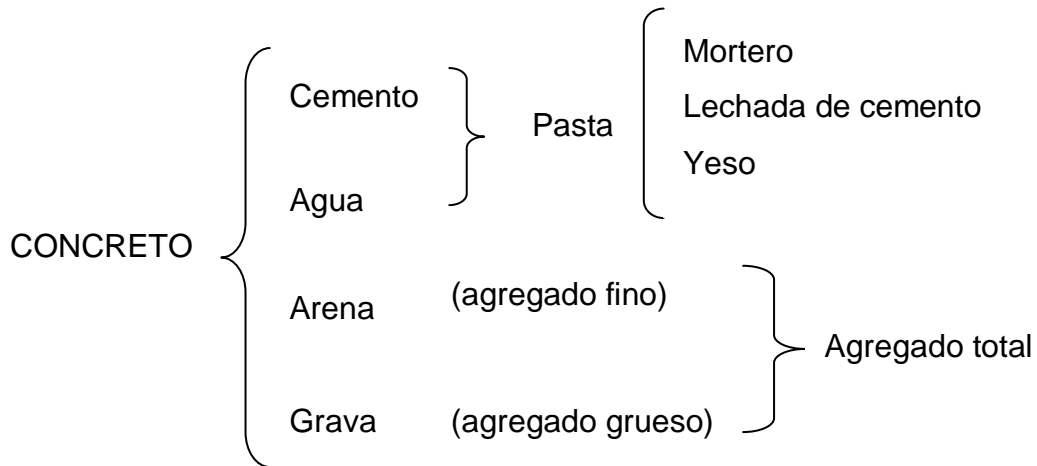
***Foto N° II.4 y N° II.5 Canal de Descarga. Lagunas de Cenizas Volantes.
Central El Palmar.***

II.3 MEZCLA DE CONCRETO

La mezcla de concreto es “un material que se puede considerar constituido por dos partes: una es un producto pastoso y moldeable, que tiene la propiedad de endurecer con el tiempo, y la otra son trozos pétreos que quedan englobados en esa pasta”⁴.

La pasta está compuesta de cemento Portland, agua y aire atrapado o aire incluido intencionalmente. Generalmente, la pasta constituye del 25 al 40% del volumen total del concreto, la cual une a los agregados gruesos y finos que constituyen del 60 al 75% del volumen total del concreto, lo que hace importante una selección adecuada.

⁴ Manual del Concreto Estructural. Porrero. Pág. 31



Fuente: Diseño Simplificado de Concreto Reforzado. Parker y Ambrose. Pág. 30

Figura Nº II.1 Composición del Concreto Simple.

II.3.1 Mezclado

La operación de mezclado consiste básicamente en la rotación o batido, con el propósito de cubrir la superficie de todas las partículas del agregado con la pasta de cemento en una masa uniforme. Existen varios tipos de mezcladoras que varían de acuerdo a la posición del eje del tambor o al tipo de mezclado que efectúen.

II.3.2 Colocación y Compactación

La colocación tiene por objeto depositar el concreto tan cerca como sea posible a su posición final, evitando la segregación y permitiendo su compactación.

La compactación se define como “el proceso manual o mecánico que tiende a reducir el volumen total de los vacíos de una masa de mortero o de concreto fresco.”⁵ Se puede realizar manualmente o por vibrado.

La compactación manual se realiza mediante golpes verticales al concreto con una barra o pistón. Según la Norma COVENIN 338-2002 “*Concreto. Método para la Elaboración, Curado y Ensayo de los Cilindros de Concreto*”, la barra compactadora debe ser de acero, cilíndrica y lisa de 16 mm de radio y 600 mm de longitud, además debe tener una punta semiesférica de 8 mm de radio.

El vibrado permite alcanzar un grado mayor de compactación del concreto, se puede realizar por varios procedimientos: interno (vibradores de inmersión), externo (vibradores de contacto acoplados al encofrado), por medio de mesas vibratoras o por vibración superficial con reglas vibratorias.

II.3.3 Curado

El curado a una temperatura normal mantiene al concreto saturado o casi tan saturado como sea posible, hasta que el espacio originalmente lleno de agua en la pasta de cemento fresco se haya ocupado hasta el nivel deseado con los productos de hidratación del cemento. La pérdida de agua puede ocasionar grietas en la superficie del concreto, así como pérdida de resistencia.

Existen varios métodos de curado que se basan en reponer la cantidad de agua perdida (riego superficial) o en evitar la salida de la misma (cobertura o sellado de superficies).

⁵ Norma COVENIN 337-1978. Definiciones y terminología relativa al concreto. Pág. 3

II.4 COMPONENTES DE LA MEZCLA DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR CENIZAS VOLANTES

II.4.1 Cenizas

Producto de la combustión del bagazo de la caña de azúcar en calderas, las cenizas volantes son partículas finas en estado sólido que contienen sílice. Se activan en contacto con la cal de hidrólisis de los silicatos del clinker que se encuentran en disolución en la fase líquida de la pasta de cemento. Se adicionan al cemento en proporciones de 5%, 10% y 15% como sustituto.

II.4.2 Cemento

El cemento es un material aglomerante que tiene propiedades de adhesión y cohesión, las cuales permiten unir fragmentos minerales y formar una masa compacta con características de resistencia y durabilidad.

En la actualidad el cemento más utilizado en la construcción es el cemento Portland, el cual está constituido básicamente de la combinación de un material calcáreo y una base de sílice y alúmina.

II.4.3 Agregados

Los agregados también denominados áridos o inertes, son fragmentos o granos usualmente naturales provenientes de canteras, se clasifican de acuerdo al tamaño de sus partículas en gruesos (piedra) y finos (arena) y su finalidad es

abaratar los costos y dotar a la mezcla de propiedades favorables, como disminución de la retracción durante el fraguado.

Deben estar bien graduados con una proporción de partículas grandes a pequeñas en un intervalo que permita que las partículas más pequeñas llenen los espacios que existen entre las grandes. El volumen de concreto queda determinado por el volumen total del agregado, ya que el agua y el cemento llenan los espacios que quedan entre las partículas más pequeñas de los agregados.

II.4.4 Agua

La calidad del agua es importante en las mezclas de concreto debido a que las impurezas que ésta contenga pueden influir directamente en la resistencia, además en el concreto armado influye en la corrosión del acero.

“En muchas especificaciones, la calidad del agua se considera en una cláusula que establece que ésta debe ser apta para beber. Esta agua rara vez contendrá sólidos disueltos por sobre 2000 partes por millón (ppm) y por lo general menos de 1000 ppm.”⁶

El agua de mezclado tiene dos funciones, la primera es hidratar el cemento (agua de hidratación) y otra producir la pasta (agua evaporable) que lubrica los agregados, la cual comunica fluidez a la mezcla.

⁶ Tecnología del Concreto. Neville. Pág. 62

II.5 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO FRESCO

El concreto fresco es la mezcla recién preparada cuyo estado es plástico y moldeable, en la cual no se produce el fraguado ni el endurecimiento y adopta la forma del encofrado.

II.5.1 Reología

Es el conjunto de características de la mezcla fresca que posibilitan su manejo y posterior compactación, comprende tres características del concreto: fluidez, compactabilidad y estabilidad a la segregación.

II.5.1.1 Fluidez

Es la capacidad que tiene la mezcla de concreto para compactarse como un líquido en determinadas circunstancias, indica el grado de movilidad que puede tener la mezcla.

II.5.1.2 Compactibilidad

La compactibilidad permite que la mezcla se haga más fluida al ser vibrada permitiendo su adaptación al molde. Se debe a la tixotropía de la mezcla, la cual se define como atiesamiento en reposo y fluidificación en movimiento.

II.5.1.3 Estabilidad a la segregación

La segregación es “la tendencia de separarse los granos gruesos del mortero, depende de la viscosidad y de la tixotropía y se relaciona con la cantidad y el tamaño de los granos”⁷.

Entre las causas inherentes al concreto que pueden producir segregación se encuentran, la diferencia en tamaño de las partículas y su distribución granulométrica, así como la densidad de los constituyentes y su proporción dentro de la mezcla. Otras causas que dependen del manejo y la colocación, pueden ser el mal mezclado, transporte largo y sometido a vibración, colocación inadecuada y sobrevibración al consolidarlo.

La segregación generalmente se presenta de dos formas; la primera las partículas gruesas tienden a separarse por desplazamiento sobre taludes de la mezcla amontonada o porque se asientan más que las partículas finas por acción de la gravedad, ésta generalmente ocurre en mezclas secas y poco cohesivas. La segunda forma de segregación, es la separación de la pasta de la mezcla, la cual ocurre en mezclas húmedas y con pasta muy diluida.

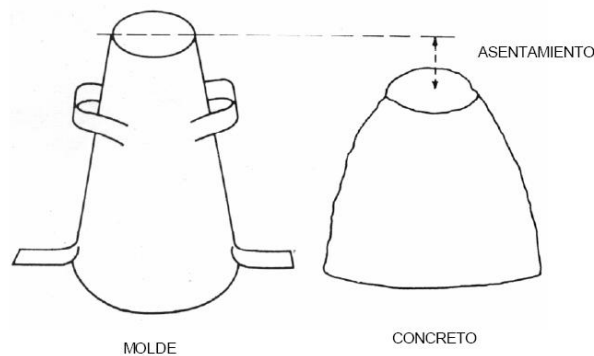
Por otro lado, la exudación o sangrado se produce cuando parte del agua de mezclado tiende a elevarse a la superficie del concreto recién colocado o durante el proceso de fraguado. Por tal razón se dice que es una forma especial de segregación o de sedimentación de partículas, las cuales no pueden retener toda el agua cuando se asientan.

⁷ Manual del Concreto Estructural. Porrero. Pág. 46

II.5.2 Trabajabilidad

La trabajabilidad es aquella propiedad del concreto mediante la cual se determina su capacidad para ser colocado, consolidado y terminado sin segregación dañina alguna. Según Sánchez en su libro “Tecnología del Concreto y del Mortero” (1986), la trabajabilidad se define como: “la cantidad de trabajo interno útil y necesario para producir una compactación completa, debido a que la fricción interna es una propiedad intrínseca de la mezcla y no depende de un tipo o sistema particular de construcción”⁸.

La trabajabilidad se mide con el asentamiento que proporciona el ensayo de Cono de Abrams, el cual se realiza según la Norma COVENIN 339-2003 “*Método para la Medición del Asentamiento con el Cono de Abrams*”. En la Tabla N° II.1 se presentan los rangos de fluidez de una mezcla de concreto que corresponden con el ensayo de Cono de Abrams.



Fuente: Norma COVENIN 339-2003. Pág 3

Figura N° II.2 Medición del asentamiento mediante el Cono de Abrams.

⁸ Tecnología del Concreto y del Mortero. Sanchez. Pág. 146

Tabla N° II.1 Valores de fluidez Correspondientes al Ensayo de Trabajabilidad.

Estado del concreto	Fluidez				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Asentamiento del cono de Abrams (cm)	0 - 1	2 - 3	4 - 6	7 - 9	10 - 12

Fuente: Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte. Pág. 18.

II.5.3 Retracción

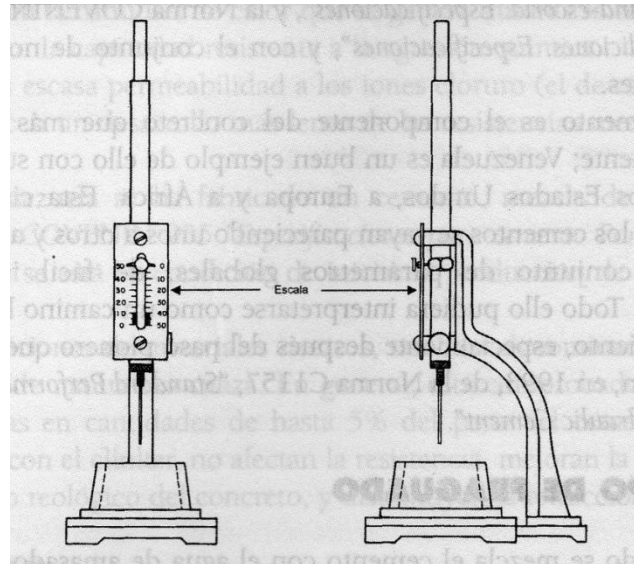
Es la disminución del volumen en el material ocasionada por la pérdida de agua consecuencia de la evaporación en la superficie del concreto. La contracción induce esfuerzos de tensión en las capas superficiales, ya que el concreto tiene poca resistencia durante el fraguado se produce agrietamiento en la superficie.

II.5.4 Tiempo de Fraguado

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el proceso de endurecimiento de la mezcla, el lapso transcurrido entre el mezclado y el inicio del atiesamiento se denomina tiempo de fraguado. El fraguado inicia una pérdida de plasticidad en la pasta que se va pronunciando con el tiempo, la cual es generada por el proceso de hidratación del cemento.

El procedimiento más utilizado para medir el tiempo de fraguado es el ensayo de la Aguja de Vicat, descrito en la Norma CCCA Ce: 11 “Método de Ensayo para Determinar el Tiempo de Fraguado de Cementos Hidráulicos por la Aguja de Vicat”. Se utiliza el Aparato de Vicat (*Ver Figura N° II.3*) para determinar

el tiempo que transcurre en obtener una penetración de 25 mm en la mezcla de prueba, el cual se considera como el tiempo de fraguado.



Fuente: Porrero J., Manual del Concreto Estructural. Pág. 100

Figura Nº II.3 Aparato de Vicat.

II.6 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO ENDURECIDO

II.6.1 Resistencia a la Compresión Simple

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto, a partir de ella se estudian otras propiedades como la resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, resistencia al corte, entre otras.

La resistencia del concreto se rige principalmente por la resistencia e interacción de sus fases constituyentes:

- La resistencia de la pasta hidratada y endurecida (matriz).

- La resistencia de las partículas del agregado.
- La resistencia de la interface matriz-agregado.

Son muchos los factores que afectan la resistencia del concreto, independientemente de la calidad y tipo de materiales que lo constituyen, para unas propiedades dadas de sus componentes en una mezcla trabajable y bien colocada se pueden mencionar los siguientes:

- Contenido de cemento: Es importante la proporción de cemento en la mezcla, debido a que para un determinado tipo de cemento, a medida que aumenta el contenido de este, aumenta la resistencia; con excepción de las mezclas con una relación agua-cemento muy baja y un contenido de cemento extremadamente alto que tienen un retroceso de resistencia.
- Relación agua cemento: Es necesario desarrollar la correspondencia entre la resistencia y la relación agua-cemento de los materiales que se utilizaran en la mezcla.
- Influencia de los agregados: La granulometría, la forma y textura, así como la resistencia y la rigidez de las partículas de los agregados inciden en la resistencia del concreto.
- Tamaño máximo del agregado grueso: La cantidad de cemento requerida para producir una resistencia a la compresión máxima, a cierta edad, con un determinado agregado varía según el tamaño máximo del agregado grueso de la mezcla.
- Fraguado del concreto: La determinación del tiempo de fraguado es importante para saber si es necesario utilizar aditivos que controlen la velocidad de fraguado, con el fin de regular los tiempos de mezclado y

transporte de manera que no se vean afectadas la trabajabilidad y la resistencia de la mezcla.

- Curado del concreto: La exposición al aire del concreto impide posteriormente la hidratación completa del cemento, lo que produce una disminución de la resistencia final.

II.6.2 Módulo de Elasticidad

Se denomina módulo de elasticidad a la pendiente que existe en la gráfica esfuerzo contra deformación y es una medida de su resistencia a la deformación. El valor del módulo de elasticidad del concreto se establece mediante una fórmula que incorpora variables de peso (densidad) del concreto y su resistencia.

El concreto presenta un comportamiento casi elástico cuando la carga se aplica por primera vez; sin embargo, al aplicar cargas ininterrumpidamente el comportamiento pasa a ser plástico; es decir la deformación aumenta con el tiempo.

II.6.3 Peso Unitario

El peso unitario del concreto se define como el peso del material por unidad de volumen, considerando que el material no tiene poros. El peso unitario o densidad en concretos convencionales, normalmente usados en edificaciones, puentes, pavimentos, presenta un rango de 2240 y 2400 Kg/m³. La variación del peso unitario depende de la cantidad y densidad relativa del agregado, de la cantidad de aire atrapado y de los contenidos de agua y cemento.

II.7 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEL CONCRETO

Los ensayos no destructivos son todas las pruebas aplicadas al concreto endurecido que no altera de forma permanente las propiedades físicas, mecánicas o dimensionales del mismo. En general los ensayos no destructivos proveen datos menos exactos acerca del estado de la variable a medir que los ensayos destructivos y tienen mayores limitaciones en su uso. Son aplicados en concreto colocado en estructuras para evaluar sus propiedades en nuevas construcciones, rehabilitaciones o reparaciones.

II.7.1 Ultrasonido

El ensayo mide el tiempo que tarda un pulso de ondas ultrasónicas en recorrer la masa de concreto. Mide en cierto modo el módulo de elasticidad dinámico del concreto, el cual se relaciona parcialmente con la resistencia mecánica del mismo. Además determina la condición relativa del concreto, detectando grietas de gran tamaño o macro huecos, así como las zonas donde el concreto es homogéneo.

II.8 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA DEL CONCRETO

Los resultados de los ensayos de compresión de los cilindros de concreto pueden tener variaciones debido a diversas causas procedentes de la calidad de los materiales, deficiencias en los controles de mezclado y dosificación, alteraciones de la relación agua/cemento, alteraciones por segregación, entre otras.

Los parámetros estadísticos permiten manejar los resultados de los ensayos en forma probabilística, dando una base sustentable para establecer criterios que evalúen la calidad del concreto. La evaluación supone que los ensayos han sido bien ejecutados y que la elaboración de las mezclas cumplieron con el control de calidad y especificaciones.

II.8.1 Promedio o Media Aritmética

“Es la tendencia central del valor del resultado de los ensayos o datos.”⁹

$$\bar{X} = \frac{[\sum_1^n X_i]}{n} \quad (\text{Ecuación II.1})$$

Donde:

n: número de ensayos

II.8.2 Desviación Estándar

Es una medida de dispersión para variables de razón y de intervalo. Es una medida que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n X_i^2 - \frac{(\sum_1^n X_i)^2}{n}}{(n-1)}} \quad (\text{Ecuación II.2})$$

⁹ Manual de Concreto Estructural. Porreo. Pág. 328

Donde:

n: número de ensayos

II.8.3 Rango Ponderado

Se utiliza para determinar el límite superior de la desviación estándar cuando se disponen de pocos valores.

$$S = k_r \cdot d \quad (\text{Ecuación II.3})$$

Donde:

$$d = X_{m\acute{a}x} - X_{m\acute{i}n}$$

k_r : valor estadístico, tomado de la Tabla N° II.2

Tabla N° II.2 Factor del rango ponderado

Número de Ensayos, n	Factor k_r
2	0,8865
3	0,5907
4	0,457
5	0,4299
6	0,3946
7	0,3698
8	0,3512
9	0,3367
10	0,3249

Fuente: Porrero J., Manual del Concreto Estructural. Pág. 329.

II.8.4 Coeficiente de Variación

Se define como la relación entre la desviación estándar y la media expresada en forma porcentual.

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación II.4})$$

CAPÍTULO III

MÉTODO

La evaluación del uso de cenizas volantes provenientes del bagazo de caña de azúcar en concreto de resistencias altas requiere un proceso fundamentalmente experimental, es decir un proceso en el cual se quiere comprobar que porcentaje de ceniza optimiza el valor de la resistencia de la mezcla de concreto.

Las variables del proceso son la resistencia y la proporción de cenizas volantes utilizada. La variable dependiente es la resistencia del concreto, la cual se encuentra en un rango alto (280 - 350 Kg/cm²), la variable independiente es la proporción de cenizas volantes que sustituye a una proporción entre el 5 al 15% de cemento Portland usado para elaborar la mezcla de concreto.

Las exigencias necesarias que requieren los ensayos de los componentes de las mezclas de concreto estarán realizados en base a las normas COVENIN correspondientes.

III.1 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Los agregados utilizados fueron piedra 1" y arena lavada, se transportaron desde su sitio de venta hasta el laboratorio del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, donde fueron colocados en sacos de 30 Kg aproximadamente.

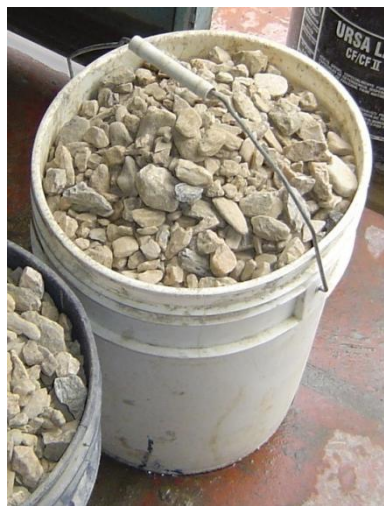


Foto N° III.1 Muestra de Agregado Grueso (piedra 1").



Foto N° III.2 Muestra de Agregado Fino (arena lavada).

III.1.1 Granulometría

Para la determinación del tamaño de los granos se emplearon cedazos de diferentes aberturas calibradas según la Norma COVENIN 254-1998 "*Cedazos de Ensayos*". Estos cedazos se dispusieron en forma vertical uno encima del otro, colocando el de mayor abertura arriba y el de menor abertura abajo. El proceso se realizó mediante una serie de agitaciones durante un periodo de tiempo determinado según el procedimiento establecido en la Norma COVENIN 255-1998 "*Método de Ensayo Para Determinar la Composición Granulométrica de Agregados Finos y Gruesos*".

III.1.1.1 Agregado Grueso

La granulometría del agregado grueso se realizó con una muestra de 20 Kg a través de una tamizadora mecánica, utilizando tamices de abertura 1 ½", 1", ¾", 1/2", 3/8" y ¼". Con los resultados se preparo una tabla para determinar el porcentaje pasante de cada tamiz. Según la Norma COVENIN 277-2000 "*Concreto. Agregados. Requisitos*", la granulometría determinada del agregado grueso debe estar entre los límites de la Tabla N° III.1.

Tabla N° III.1 Límite de los porcentajes en peso que pasan los dos (2) cedazos de aberturas cuadradas.

Piedra Picada ó grava COVENIN	75 mm (3")	64,0 mm (2½")	50,8 mm (2")	38,1 mm (1½")	25,4 mm (1")	19,0 mm (¾")	12,7 mm (½")	9,51 mm (⅜")	6,35 mm (¼")	4,76 mm (N°4)	2,38 mm (N°8)	1,19 mm (N°16)	595 µm (N°30)	297 µm (N°50)
N°1	-	-	-	100	100 a 90	90 a 50	45 a 15	20 a 0	7 a 0	-	-	-	-	-

Fuente: Norma COVENIN 277



Foto N° III.3 Tamizadora Mecánica.

III.1.1.2 Agregado Fino

La granulometría del agregado fino se realizó con una muestra de 500 gr, la cual fue secada en un horno por 24 horas. Se tamizo la muestra a mano utilizando tamices de abertura 3/8", #4, #8, #16, #30, #50, #100 y #200. Según la Norma COVENIN 277-200 "Concreto. Agregados. Requisitos" la granulometría determinada del agregado fino debe estar entre los límites de la Tabla N° III.2,

además el agregado fino no debe tener más del 45% retenido entre dos cedazos consecutivos.

Tabla Nº III.2 Límites en la Granulometría.

Cedazos COVENIN	Porcentaje que pasa
9,51 mm (3/8")	100
4,76 mm (#4)	85 – 100
2,38 mm (#8)	60 – 95
1,19 mm (#16)	40 – 80
595 µm (#30)	20 – 60
297 µm (#50)	8 – 30
149 µm (#100)	2 – 10
75 µm (#200)	0 – 5

Fuente: Norma COVENIN 277.

III.1.2 Densidad, Absorción y Contenido de Humedad de los Agregados

El ensayo del agregado fino se realizó según lo establecido en la Norma COVENIN 268-1998 “Agregado fino. Determinación de la densidad y absorción”, con una muestra de 500 gr. Para el agregado grueso se utilizó una muestra de 10 Kg y se realizó el procedimiento de la Norma COVENIN 269-1998 “Agregado grueso. Determinación de la densidad y absorción”.

Densidad aparente de la muestra saturada y de superficie seca del agregado grueso

$$\rho_s = \frac{d \cdot M_2}{M_2 - M_3} \quad (\text{Ecuación III. 1})$$

Donde:

d: densidad del agua aproximándola a 1 gr/ml.

M₂: Masa en el aire de la muestra de ensayo saturada con superficie seca en gr.

M₃: Masa en el agua de la muestra de ensayo saturada en gr.

Densidad Nominal de la muestra de agregado grueso

$$\rho = \frac{d \cdot M_1}{M_1 - M_3} \quad (\text{Ecuación III. 2})$$

Donde:

d: densidad del agua aproximándola a 1 gr/ml.

M₁: Masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno en gr.

M₃: Masa en el agua de la muestra de ensayo saturada en gr.

Densidad aparente de la muestra saturada y de superficie seca del agregado fino

$$\rho_s = \frac{d \cdot M}{M_a + M - M_p} \quad (\text{Ecuación III. 3})$$

Donde:

d: densidad del agua aproximándola a 1 gr/ml

M: Masa en el aire de la muestra de ensayo saturada con superficie seca en gr.

M_a: Masa del picnómetro lleno con agua en gr.

M_p: Masa del picnómetro con la muestra y el agua, hasta la marca de calibración en gr.

Densidad Nominal de la muestra de agregado fino

$$\rho = \frac{d \cdot M_1}{M_a + M_1 - M_p} \quad (\text{Ecuación III. 4})$$

Donde:

d: densidad del agua aproximándola a 1 gr/ml

M₁: Masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno en gr.

M_a: Masa del picnómetro lleno con agua en gr.

M_p: Masa del picnómetro con la muestra y el agua, hasta la marca de calibración en gr.

Absorción de la muestra de agregado grueso y fino

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación III. 5})$$

Donde:

M₁: Masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno en gr.

M₂: Masa en el aire de la muestra de ensayo saturada con superficie seca en gr.

El ensayo de contenido de humedad se realizó con una muestra de 500 gr para el agregado fino y 1000 gr para el agregado grueso. Se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se pesó la muestra de agregado
2. Se colocó la muestra en un horno por 24 horas.
3. Se pesó la muestra de agregado seco

Contenido de humedad de la muestra de agregado grueso y fino

$$w(\%) = \frac{M - M_1}{M_1} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación III. 6})$$

Donde:

M: Masa en el aire de la muestra de ensayo, en gr.

M₁: Masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno, en gr.

III.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS VOLANTES

III.2.1 Secado y Separación Mediante el Tamiz #4

Las cenizas volantes fueron secadas en un horno por un tiempo de 48 horas a una temperatura de 80 ± 5 °C, para eliminar el estado de saturación que adquirieron en el proceso de lavado de gases, evitando que la humedad influya en su capacidad cementante.

Para la determinación de la finura de la ceniza se estableció un límite de partículas pasantes del tamiz normalizado N° 4, el cual se usó en la granulometría de la arena. Este proceso se realizó con todo el material utilizado con la finalidad de eliminar las partículas más gruesas y trabajar con la finura natural en las mezclas de concreto, evaluando de esta forma su comportamiento en las mismas.



Foto N° III.4 Bandejas con Cenizas Volantes Colocadas en el Horno.

III.2.2 Ensayo de Penetración de la Aguja de Vicat

El ensayo de penetración con la aguja de Vicat se realizó mediante el procedimiento de la Normativa CCCA:Ce 11 (1972) “*Método de Ensayo para Determinar el Tiempo de Fraguado de Cementos Hidráulico por la Aguja de Vicat*”. Con este ensayo se determinó el tiempo de fraguado de 4 muestras; una patrón realizada con cemento Portland y 3 muestras con sustitución de ceniza volante en porcentajes de 5%, 10% y 15%.

El ensayo se realizó mediante las siguientes pautas:

1. Se diseñaron pastas de cemento de consistencia normal a través del ensayo descrito en la Normativa CCCA: Ce 12 (1972) “*Método para Determinar la Consistencia Normal de Cementos Hidráulicos*”. Se utilizaron 500 gr de cemento para la mezcla patrón, realizando varias pruebas para lograr el agua requerida. De igual forma se realizó la sustitución de cenizas

- por cemento, determinando para cada porcentaje el agua necesaria para lograr una consistencia normal.
2. La pasta de cemento se preparó mediante el procedimiento descrito en la Normativa CCCA: Ce 4 (1972) “*Método para Obtener Pastas de Cementos Hidráulicos y Morteros de Consistencia Plástica por Mezclado Mecánico*”. (Ver Foto N° III.5 y N° III.6)
 3. Se determinó la consistencia moldeando la mezcla en probetas y ensayándolas con el aparato de Vicat. (Ver Foto N° III.8)
 4. Se elaboraron nuevas mezclas con las dosificaciones obtenidas del ensayo de consistencia a las cuales se les realizó el ensayo de penetración de la aguja de Vicat. Se realizó una primera medición a los 30 minutos de enrasar la probeta, se midió cada 15 min hasta que la mezcla presento una penetración aproximada a 30 mm, iniciando mediciones cada 10 min hasta que la mezcla presento una penetración aproximada a cero.
 5. Se determinó el tiempo de fraguado calculando por interpolación el tiempo para obtener una penetración de 25 mm.



Foto N° III.5 y N° III.6 Mezclado. Preparación de Pastas de Cemento.



Foto N°III.7 y N°III.8. Moldeo de Probetas. Determinación de Consistencia de la Pasta de Cemento.



Foto N° III.9 Ensayo de Penetración de la Aguja de Vicat.

III.3 DISEÑO DE MEZCLA

El diseño de mezcla utilizado se basa en el método propuesto en el “Manual de Concreto Estructural” de Joaquín Porrero. En este método se consideran variables como la dosis de cemento, trabajabilidad, relación agua/cemento y resistencia, que son vinculadas a través de la relación triangular y la Ley de Abrams, además tiene consideraciones respecto al tamaño máximo y tipo de agregado.

III.3.1 Resistencias

Las resistencias definidas para este Trabajo Especial de Grado son 280 Kg/cm² y 350 Kg/cm², para el diseño de mezcla la resistencia utilizada es la resistencia media esperada f_{cr} . La diferencia entre f'_c y f_{cr} es en función de la desviación estándar según la Tabla N° III.3 cuando la misma no es conocida.

En este caso no es conocida y con un control de calidad bueno, se tiene que;

$$f_{cr} = f'_c + 32 \quad (\text{Ecuación III. 7})$$

Tabla Nº III.3 Valores de la Desviación Estándar que son de Esperar en el Concreto, Según el Grado de Control

Descripción del grado de control	σ (kgf/cm ²)
Sin ningún control (Inaceptable en estructuras de edificaciones).	70
Control visual de los agregados y rechazo de aquellos que aparentan muy mala calidad o que son muy diferentes de los que se están usando. Control visual de la mezcla por la trabajabilidad aparente (Control pobre).	50
Como en el anterior, pero se conocen las granulometrías de los agregados que se están usando por ensayos que se hicieron una vez; se es riguroso en el rechazo de agregados y se comprueban de vez en cuando los asentamientos de las mezclas con el Cono de Abrams (Control intermedio).	40
A cada lote de agregados se le determina algún índice granulométrico y de calidad; solo se aceptan los que estén dentro de ciertos límites pre-establecidos. Se controla la humedad de los agregados. Se tiene en cuenta la marca y lote de cemento. La dosificación es exclusivamente por peso; los sistemas de pesajes son automáticos y son calibrados ocasionalmente. El asentamiento con el Cono se mide sistemáticamente y se rechazan las mezclas que no estén dentro de ciertos límites. No se permite la adición de agua posterior al mezclado, ni el espaciamiento de las mezclas por tiempo de espera (Control bueno).	32
Igual que el anterior pero con márgenes de aceptación muy estrictos. Uso de al menos tres agregados de granulometría complementarias. Limitación de la humedad de los agregados en el momento de su uso y, además, correcciones por humedad, lote y marca de cemento y aditivo, efectuadas mediante ajustes en el diseño. Revisión y calibración de los equipos de forma periódica y sistemática (Control excelente).	25

Fuente: Porrero J., Manual del Concreto Estructural. Pág. 338

III.3.2 Ley de Abrams

Con la Ley de Abrams se obtuvo la relación agua/cemento, que corresponde con la resistencia media esperada.

$$\alpha = 3,147 - 1,065 \cdot \log R_{28} \quad (\text{Ecuación III. 8})$$

Donde:

R_{28} : Resistencia media esperada a los 28 días, en Kg/cm²

$$\alpha = a/C \quad (\text{Ecuación III.9})$$

Donde:

a: dosis de agua, en litros o en Kgf.

C: dosis en peso del cemento, en Kgf.

III.3.3 Correcciones de la Relación Agua/Cemento (α)

La corrección de la relación agua cemento se realizó a través de los factores K_R y K_A los cuales toman en cuenta la influencia del tamaño máximo (Ver Tabla N° III.4) y el tipo de los agregados (Ver Tabla N° III.5).

Tabla N° III.4 Factor para Corregir α por Tamaño Máximo (K_r)

Tamaño Máximo	6,35	9,53	12,7	19,1	25,4	38,1	50,8	63,5	76,2
	(1/4)	(3/8)	(1/2)	(3/4)	(1)	(1 1/2)	(2)	(2 1/2)	(3)
Factor K_R	1,6	1,3	1,1	1,05	1	0,91	0,82	0,78	0,74

Fuente: Porrero J., Manual del Concreto Estructural. Pág. 136

Tabla N° III.5 Factor para Corregir α por Tipo de Agregado (K_A)

Gruesos	Triturados	Semitriturados	Canto Rodado (Grava Natural)
Finos			
Arena Natural	1	0,97	0,91
Arena Triturada	1,4	1,1	0,93

Fuente: Porrero J., Manual del Concreto Estructural. Pág. 137

III.3.4 Relación Triangular

Con la Ecuación III.10 se calculó la dosis de cemento a ser utilizada en la mezcla, relacionando la trabajabilidad y la relación agua/cemento. Se asumió un asentamiento de 7,5 cm

$$C = 117,2 \cdot \frac{T^{0,16}}{\alpha^{1,3}} \quad (\text{Ecuación III. 10})$$

Donde:

T: asentamiento en el Cono de Abrams, en cm.

C: dosis de cemento, en Kg/m³.

III.3.5 Corrección del Cemento (C_c)

La corrección del cemento se realizó de la misma manera que la corrección de agua/cemento, a través de los factores C₁ y C₂ los cuales toman en cuenta la influencia del tamaño máximo (Ver Tabla N° III.6) y el tipo de los agregados (Ver Tabla N° III.7).

Tabla N° III.6 Factor para Corregir la Dosis de Cemento por Tamaño Máximo (C₁)

Tamaño Máximo	6,35	9,53	12,7	19,1	25,4	38,1	50,8	63,5	76,2
	(1/4)	(3/8)	(1/2)	(3/4)	(1)	(1 1/2)	(2)	(2 1/2)	(3)
Factor C₁	1,33	1,2	1,14	1,05	1	0,93	0,88	0,85	0,82

Fuente: Porrero J., Manual del Concreto Estructural. Pág. 141

Tabla N° III.7 Factor para Corregir la Dosis de Cemento por Tipo de Agregado (C₂)

Gruesos	Triturados	Semitriturados	Canto rodado (grava natural)
Finos			
Arena natural	1,00	0,93	0,90
Arena triturada	1,28	1,23	0,96

Fuente: Porrero J., Manual del Concreto Estructural. Pág. 142

III.3.6 Volumen Absoluto de los Granos de Cemento

El volumen ocupado por el cemento, sin tomar en cuenta el aire entre los granos, se obtiene al dividir el peso del cemento entre el peso específico. El peso específico está en el orden de 3,12 a 3,15, sin embargo para los efectos de la mezcla de concreto en el seno de agua, se consideran valores mayores, del orden de 3,25 a 3,35. Por esta razón en la práctica se recomienda multiplicar el peso del cemento por el inverso de 3,33; es decir por 0,3.

III.3.7 Volumen de Aire Atrapado

En las mezclas de concreto siempre quedan pequeñas cantidades de aire, a pesar de una buena compactación manual o por vibración, esta porción de aire se denomina atrapado. La obtención del volumen de aire atrapado nunca va a ser exacta, debido a la cantidad de variables de las que depende; sin embargo, por ser volúmenes muy pequeños, se puede aproximar con la siguiente expresión;

$$V = C/P \quad (\text{Ecuación III. 11})$$

Donde:

C: dosis de cemento, en Kg/m³.

P: tamaño máximo del agregado, en mm.

III.3.8 Dosis de Agua

Con la Ecuación III.9 se calculó el peso del agua:

$$a_d = C \cdot \alpha \quad (\text{Ecuación III. 12})$$

Donde:

a_d: peso del agua, en Kg/m³.

III.3.9 Volumen Absoluto de los Agregados

Del análisis granulométrico se obtuvieron los pesos específicos del agregado grueso $\gamma_{(G)}$ y del agregado fino $\gamma_{(A)}$. La dosis de agregados se calculó a través de la Ecuación III.13, donde $\gamma_{(A+G)}$ es el peso específico de los agregados combinados y se calcula mediante la Ecuación III.14.

$$A + G = \gamma_{(A+G)}(1000 - 0,3 \cdot C - a - V) \quad (\text{Ecuación III.13})$$

$$\gamma_{(A+G)} = \beta \cdot \gamma_A + (1 - \beta) \cdot \gamma_G \quad (\text{Ecuación III.14})$$

III.3.10 Relación Beta (β)

La relación entre agregados finos y agregados gruesos se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{A}{(A+G)} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación III.15})$$

En el diseño de todas las mezclas se utilizó el procedimiento gráfico que describe Porrero en el “Manual del Concreto Estructural”.

III.3.11 Dosis de Agregado

De la Ecuación III.15 se obtiene la dosis de agregado fino:

$$A = (A + G) \cdot \beta \quad (\text{Ecuación III.16})$$

Donde:

A: peso del agregado fino, en Kgf/m³

El agregado grueso se obtiene de la siguiente ecuación:

$$G = (A + G) - A \quad (\text{Ecuación III.17})$$

Donde:

G: peso del agregado grueso, en Kgf/m³

III.3.12 Corrección por Humedad

Conocidos la humedad y la absorción del agregado grueso y agregado fino se corrigió el peso de cada agregado mediante la siguiente ecuación:

$$G_W = \frac{G_{SSS} \cdot (100 + w)}{(100 + A_b)} \quad (\text{Ecuación III. 18})$$

Donde:

G_{SSS} : peso del agregado grueso.

w : humedad del agregado grueso.

A_b : absorción del agregado grueso.

Para el agregado fino se procedió de la misma forma:

$$A_W = \frac{A_{SSS} \cdot (100 + w)}{(100 + A_b)} \quad (\text{Ecuación III. 19})$$

Donde:

A_{SSS} : peso del agregado fino.

W : humedad del agregado fino.

A_b : absorción del agregado fino.

El agua a utilizar en la mezcla se corrigió con la siguiente ecuación:

$$a_M = a_D + A_{SSS} - A_W + G_{SSS} + G_W \quad (\text{Ecuación III.20})$$

III.3.13 Dosificación

La dosificación se calculó para cubrir el volumen de 14 cilindros (0,090 m³).

$$C = C_c \cdot 0,09 \text{ m}^3 \quad (\text{Ecuación III.21})$$

Donde:

C: dosis de cemento, en Kg.

C_c: dosis de cemento corregida, en Kg/m³.

$$C = \frac{C_c}{42,5} \quad (\text{Ecuación III.22})$$

Donde:

C: dosis de cemento, en sacos.

$$a = a_M \cdot 0,09 \text{ m}^3 \quad (\text{Ecuación III.23})$$

Donde:

a: dosis de agua, en Kg.

$$A = A_w \cdot 0,09 \text{ m}^3 \quad (\text{Ecuación III.24})$$

Donde:

A: dosis de arena, en Kg.

$$G = G_w \cdot 0,09 \text{ m}^3 \quad (\text{Ecuación III.25})$$

Donde:

G: dosis de piedra, en Kg.

III.4 PREPARACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO

La elaboración de los cilindros de ensayo se realizó según las especificaciones de la Norma COVENIN 338-2002 “*Concreto. Método para la Elaboración, Curado y Ensayo a Compresión de Cilindros y Concreto*”. Se realizaron 2 mezclas patrones de resistencias 280 Kg/cm² y 350 Kg/cm², y 6 mezclas con sustitución de cenizas volantes para cada una con proporciones de 5%, 10% y 15%, dando como resultado 8 vaciados.

III.4.1 Pesado de Materiales

Se pesaron los materiales granulares (cemento, cenizas volantes y agregados) y el agua en una balanza, previamente dosificados para 0,090 m³ de mezcla.



Foto N° III.10 Pesado de Materiales.



Foto N° III.11 y N°III.12 Materiales Utilizados en la Mezcla de Concreto.

III.4.2 Mezclado

Se ejecutó con el apoyo de una mezcladora de eje con inclinación variable o trompo, esto permitió tiempos cortos de carga, mezclado y descarga, así como homogeneidad en la mezcla (Ver Foto N° III.13).

La unión de las mezclas patrones se realizó según el siguiente procedimiento:

1. Se mezclaron los agregados gruesos y finos por 2 minutos aproximadamente.
2. Se agregó el cemento y la mitad del agua, mezclando por 2 minutos.
3. Se agregó el resto del agua, mezclado por 5 minutos.

La unión de las mezclas con sustitución de ceniza volante, se realizó según el siguiente procedimiento:

1. Se introdujeron las cenizas y los agregados (gruesos y finos) con el trompo apagado, para evitar perdida de material debido a la finura de las partículas de las cenizas.
2. Se procedió a encender el trompo para mezclar los materiales por 2 minutos.
3. Se agregó el cemento y la mitad del agua, mezclando por 2 minutos.
4. Se agregó el resto del agua, mezclado por 5 minutos.



Foto Nº III.13 Trompo Utilizado para el Mezclado.

III.4.3 Elaboración de los Cilindros de Concreto

En cada vaciado se elaboraron 12 cilindros de concreto en moldes de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura aproximadamente. Según la Norma COVENIN 338-2002 “*Concreto. Método para la Elaboración, Curado y Ensayo de los Cilindros de Concreto*”, las dimensiones de los cilindros deben ser de $152,5 \pm 2,5$ mm de diámetro y $305 + 6,0$ mm de altura para el tamaño nominal de agregado grueso no mayor de 50 mm.

Previo al vaciado, los moldes se limpiaron y se cubrió con aceite quemado la superficie de contacto con el concreto (*Ver Foto N° III.14*).



Foto N° III.14 Moldes Preparados para el Vaciado del Concreto.

El vaciado se realizó según el siguiente procedimiento:

1. Se colocó una primera capa de mezcla equivalente a un tercio del molde y se compactó con 25 golpes de una barra compactadora distribuidos en su sección transversal.
2. Se colocó una segunda capa de material y se compactó con 25 golpes, penetrando con la barra compactadora hasta 30 mm aproximadamente la capa inferior.
3. Se colocó una última capa igual a las anteriores y se compactó con 25 golpes, penetrando con la barra compactadora hasta 30 mm aproximadamente la capa inferior.

4. Se enrasaron las probetas con la barra compactadora, cuidando que la superficie quedara lisa y al ras con el borde del molde.



Foto N° III.15 Vaciado de los Cilindros de Concreto.



Foto N° III.16 Probetas Vaciadas con Sustitución de Cenizas en 15% de Resistencias 280 Kg/cm² y 350 Kg/cm².

III.4.4 Curado

Las probetas fueron desencofradas en un lapso de aproximadamente 24 horas. Según la Norma COVENIN 338-2002 “*Concreto. Método para la Elaboración, Curado y Ensayo de los Cilindros de Concreto*”, las probetas deben ser retiradas de los moldes en un lapso de 20 a 48 horas.

Inmediatamente fueron colocadas en una piscina de curado, la cual fue preparada con agua saturada de cal. Los cilindros permanecieron allí hasta su edad de ensayo (7, 14, 21 y 28 días) (Ver foto N° III.17).



Foto N° III.17 Curado de los Cilindros de Concreto.

III.5 CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

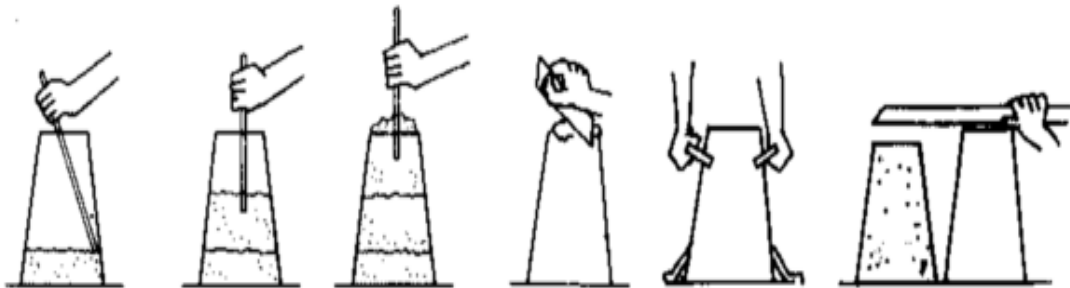
La caracterización del concreto en estado fresco se realizó mediante el ensayo del Cono de Abrams según lo establecido en la Norma COVENIN 339-

2003 "Concreto. Método para la medición del asentamiento con el Cono de Abrams".

El ensayo se realizó después de culminar el proceso de mezclado en el trompo. La Figura N° III.1 ilustra el procedimiento descrito a continuación:

1. Se humedeció el interior del molde y se colocó sobre una superficie horizontal rígida.
2. Se sujetó el molde firmemente con los pies y se procedió a llenarlo con 2 capas de mezcla, cada una equivalente a un tercio del molde, las cuales se compactaron con 25 golpes con una barra compactadora.
3. Se colocó una tercera capa que sobrepasaba por exceso al molde y se procedió a compactarla con 25 golpes.
4. Se enrasó el molde con la barra compactadora e inmediatamente se procedió a alzarlo.
5. Se midió el asentamiento correspondiente a la diferencia entre la altura del molde y la altura promedio de la base superior del cono deformado (Ver foto N° III.19).

Figura N° III.1 Ensayo de Cono De Abrams



Fuente: Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte. Pág. 6.



Foto N° III.18 y N° III.19 Ensayo de Cono de Abrams.

III.6 CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO ENDURECIDO

La caracterización de las probetas de concreto se realizó mediante ensayos de resistencia a la compresión, ultrasonido y módulo de elasticidad.

III.6.1 Ensayo a Compresión

Se ensayaron 2 cilindros cada vez a los 7,14 y 21 días y 4 cilindros a los 28 días, para las muestras patrones y para las muestras con sustitución de cenizas de cada resistencia evaluada. El procedimiento se llevó a cabo según lo establecido en la NORMA COVENIN 338-2002 “*Concreto. Método para la Elaboración, Curado y Ensayo de los Cilindros de Concreto*”. El ensayo se realizó en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, utilizando una prensa universal (Ver Foto N° III.20). Se elaboraron tablas para registrar las mediciones de los cilindros y los valores de carga del ensayo (Ver Apéndice N° 1).



Foto N° III.20 Prensa Universal Utilizada en los Ensayos de Compresión.

III.6.2 Ensayo de ultrasonido

El ensayo de ultrasonido se realizó según lo establecido en la Norma COVENIN 1681-1980 “*Método de Ensayo para Determinar la Velocidad de Propagación de Ondas en el Concreto*”, para las probetas patrones y para las muestras con sustitución de cenizas de cada resistencia evaluada a una edad de ensayo de 28 días. Se ensayaron 4 cilindros por mezcla y se confeccionaron tablas para registrar las mediciones de los cilindros y los valores de velocidad del ensayo (Ver Apéndice N° 2).



Foto N° III.21 Equipo de Ultrasonido Utilizado.

La velocidad de pulso ultrasónico se calculó según la ecuación de la Norma COVENIN 1681-1980:

$$V = \frac{L}{t} \quad (\text{Ecuación III.26})$$

Donde:

V: Velocidad de propagación de la onda, en m/s.

L: Altura del cilindro, en m.

T: tiempo de paso de la onda, en s

III.6.3 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad se determinó según el procedimiento establecido en la Norma COVENIN 1468-1979 “*Método de Ensayo para Determinar el Módulo de Elasticidad (Secante) en Probetas Cilíndricas de Concreto*”, a una edad de ensayo de 28 días. El ensayo se realizó en el IMME utilizando una Prensa

Universal y dos extensómetros (Ver Foto N° III.23). Cada probeta de concreto fue preparada colocando un remate o capping de yeso piedra (Ver Apéndice N° 4), para lograr que las caras planas de los cilindros estuviesen completamente lisas y paralelas (Ver Foto N° III.22). Se ensayaron dos probetas por cada mezcla patrón y con sustitución de cenizas. Se confeccionaron tablas para registrar las mediciones de las deformaciones provenientes del ensayo (Ver Apéndice N° 3)

El módulo de elasticidad se calculó según la ecuación de la Norma COVENIN 1468-1979:

$$E_c = \frac{S_c - S_D}{\epsilon_c - 5 \cdot 10^{-5}} \quad (\text{Ecuación III.27})$$

Donde:

E_c : Módulo de elasticidad secante, expresado en Kgf/cm².

S_c : Esfuerzo correspondiente a la carga C, expresada en Kgf/cm².

S_D : Esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria longitudinal de 5×10^{-5} mm/mm expresada en Kgf/cm².

ϵ_c : Deformación unitaria longitudinal por el esfuerzo S_c .



Foto N° III.22 y N° III.23 Colocación de Capping. Extensómetro.



Foto N° III.24 y N° III.25 Probeta Preparada. Ensayo de Módulo de Elasticidad.

El módulo de elasticidad teórico se calculó según la siguiente ecuación:

$$E_c = 0,137 \cdot W^{1,5} \cdot \sqrt{f'_c} \quad (\text{Ecuación III.28})$$

Donde:

E_c : Módulo de elasticidad del concreto, en Kg/cm^2 .

W : peso unitario del concreto, en un rango de 1440 a 2500 Kg/m^3 .

f'_c : Resistencia de diseño del concreto.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

IV.1 RESULTADOS

IV.1.1 Granulometría de los Agregados

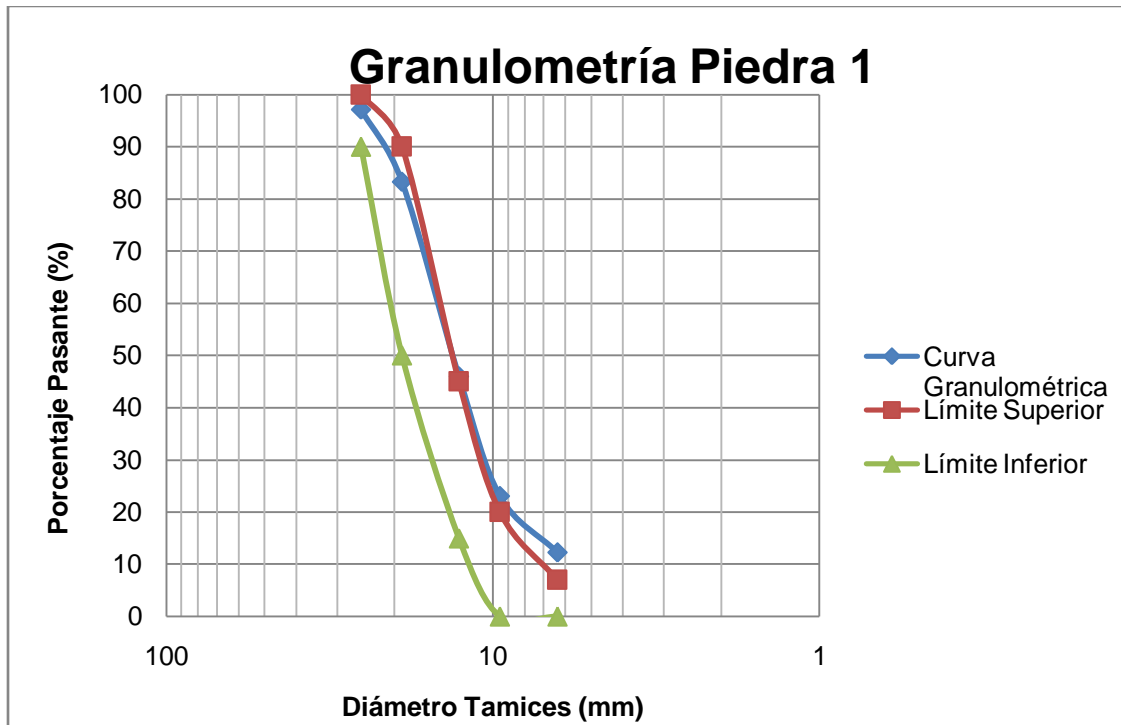
IV.1.1.1 Agregados Gruesos

Se presentan a continuación los resultados del ensayo de granulometría del agregado grueso realizado según la Norma COVENIN 255-1998. La Tabla N° IV.1 muestra el porcentaje pasante con respecto a los tamices de ensayo. La Grafica N° IV.1 muestra la proporción de granos finos y gruesos del agregado en contraste con los límites de la Norma.

Tabla N° IV.1 Resultado del Ensayo de Granulometría del Agregado Grueso

Tamices	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (kg)	% Retenido	% Acumulado	% Pasante	Límite Superior	Límite Inferior
1"	25,4	0,56	2,8	2,8	97,16	100	90
¾"	19,00	2,75	13,9	16,7	83,31	90	50
½"	12,70	7,40	37,3	54,0	46,03	45	15
3/8"	9,51	4,55	22,9	76,9	23,11	20	0
¼"	6,35	2,15	10,8	87,7	12,28	7	0

Gráfica N° IV.1 Curva Granulométrica Agregados Gruesos



IV.1.1.2 Agregados Finos

Se presentan a continuación los resultados del ensayo de granulometría del agregado fino realizado según la Norma COVENIN 255-1998. La Tabla N° IV.2 muestra el porcentaje pasante con respecto a los tamices de ensayo. La Gráfica N° IV.2 muestra la proporción de granos finos y gruesos del agregado en contraste con los límites de la Norma.

Tabla N° IV.2 Resultado del Ensayo de Granulometría del Agregado Fino

Tamices	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (Kg)	% Retenido	% Acumulado	% Pasante	Límite Superior	Límite Inferior
3/8"	9,51	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
No 4	4,76	0,16	33,37	33,37	66,63	100	85
No 8	2,38	0,08	16,57	49,84	50,16	95	60
No 16	1,19	0,07	13,92	63,76	36,24	80	40
No 30	0,60	0,06	12,01	75,77	24,23	60	20
No 50	0,30	0,05	10,73	86,50	13,50	30	8
No 100	0,15	0,04	7,76	94,26	5,74	10	2
No 200	0,08	0,02	3,93	98,19	1,81	5	0

Gráfica N° IV.2 Curva Granulométrica Agregados Finos

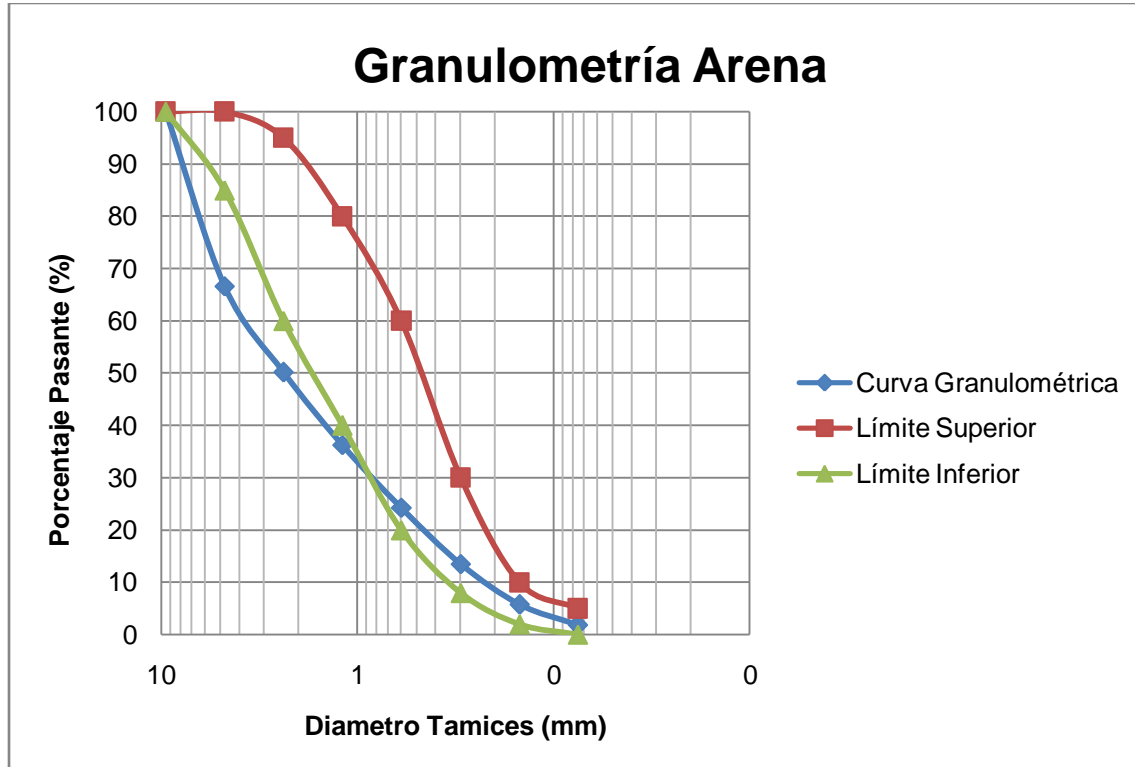


Tabla N° IV.3 Resultado del Módulo de Finura del Agregado Fino

Módulo de Finura
4,04

IV.1.2 Densidad y Absorción de los Agregados

IV.1.2.1 Agregado Grueso

La Tabla N° IV.4 presenta los resultados del ensayo de densidad y absorción realizado según la Norma COVENIN 269-1998. Los resultados del ensayo del agregado grueso se utilizaron para el cálculo de la dosificación en el diseño de mezcla.

Tabla N° IV.4 Resultado del Ensayo de Densidad y Absorción de la Piedra 1

Piedra 1		
Densidad aparente (gr/ml)	Absorción (%)	Densidad Nominal (gr/ml)
2,50	1,67	2,55

IV.1.2.2 Agregado Fino

La Tabla N° IV.5 presenta los resultados del ensayo de densidad y absorción realizado según la Norma COVENIN 268-1998. Los resultados del ensayo del agregado fino se utilizaron para el cálculo de la dosificación en el diseño de mezcla.

Tabla N° IV.5 Resultado del Ensayo de Densidad y Absorción de Arena Lavada

Arena Lavada		
Densidad aparente (gr/ml)	Absorción (%)	Densidad Nominal (gr/ml)
2,63	3,09	2,77

IV.1.3 Contenido de Humedad de los Agregados

Los contenidos de humedad obtenidos en el ensayo del agregado grueso y del agregado fino se presentan en las Tablas N° IV.6 y N° IV.7. Los resultados de este ensayo se utilizaron en la corrección por humedad del diseño de mezcla; los mismos indican la condición de humedad en la que se encontraba el agregado y por ello son tomados en consideración para establecer el peso de los agregados y la cantidad de agua que se utilizara en la mezcla.

IV.1.3.1 Agregado Grueso

Tabla N° IV.6 Resultado del Ensayo de Contenido de Humedad de Piedra N° 1

Piedra 1	
Contenido de Humedad (%)	0,40

IV.1.3.2 Agregado Fino

Tabla N° IV.7 Resultado del Ensayo de Contenido de Humedad de Arena Lavada

Arena Lavada	
Contenido de Humedad (%)	5,93

IV.1.4 Ensayo de Penetración de la Aguja de Vicat

Luego de aplicar el procedimiento de la Norma CCCA:Ce 12 se obtuvieron los resultados de dosificación para las pastas de cemento, los cuales se muestran en la Tabla N° IV.8. Las Tabla N° IV.9, N° IV.10, N° IV.11 y N° IV.12 muestran los resultados del ensayo de penetración y la Tabla N° IV.13 el tiempo de fraguado de cada mezcla. Se realizó una comparación entre dichos resultados, los cuales se reflejan en la Gráfica N° IV.3.

Tabla N° IV.8 Resultados del Ensayo de Consistencia de las Pastas de Cemento

Mezcla	Cemento (gr)	Ceniza (gr)	Agua (cc)	Medida de Consistencia (mm)
Patrón	500	0	125	10
C-5	475	25	135	11
C-10	450	50	150	9
C-15	425	75	167,5	10

Tabla N° IV.9 Resultados del Ensayo de la Aguja de Vicat para la Mezcla Patrón

Hora de Inicio	10:34 a.m.	
Mezcla	Patrón	
Hora de Penetración	Minutos	Penetración (mm)
11:08	30	41
11:24	45	41
11:40	60	41
11:56	75	41
12:13	90	40
12:30	105	33
12:40	115	23
12:53	125	19
01:05	135	7,5
01:11	140	1,5
01:18	145	1,5

Tabla N° IV.10 Resultados del Ensayo de la Aguja de Vicat para la Mezcla con 5% de Sustitución de Ceniza

Hora de Inicio	01:45 p.m.	
Mezcla	C-5	
Hora de Penetración	Minutos	Penetración (mm)
02:25	30	41
02:40	45	41
02:55	60	41
03:10	75	41
03:26	90	41
03:46	105	32
04:05	120	22
04:22	135	9
04:37	150	2
04:54	165	1

Tabla N° IV.11 Resultados del Ensayo de la Aguja de Vicat para la Mezcla con 10% de Sustitución de Ceniza

Hora de Inicio	08:58 a.m.	
Mezcla	C-10	
Hora de Penetración	Minutos	Penetración (mm)
09:40	30	41
10:13	45	40
10:29	60	40
10:48	75	40
10:04	90	38,5
11:23	105	31
11:33	115	19
11:44	130	15
12:00	140	7
12:10	150	2

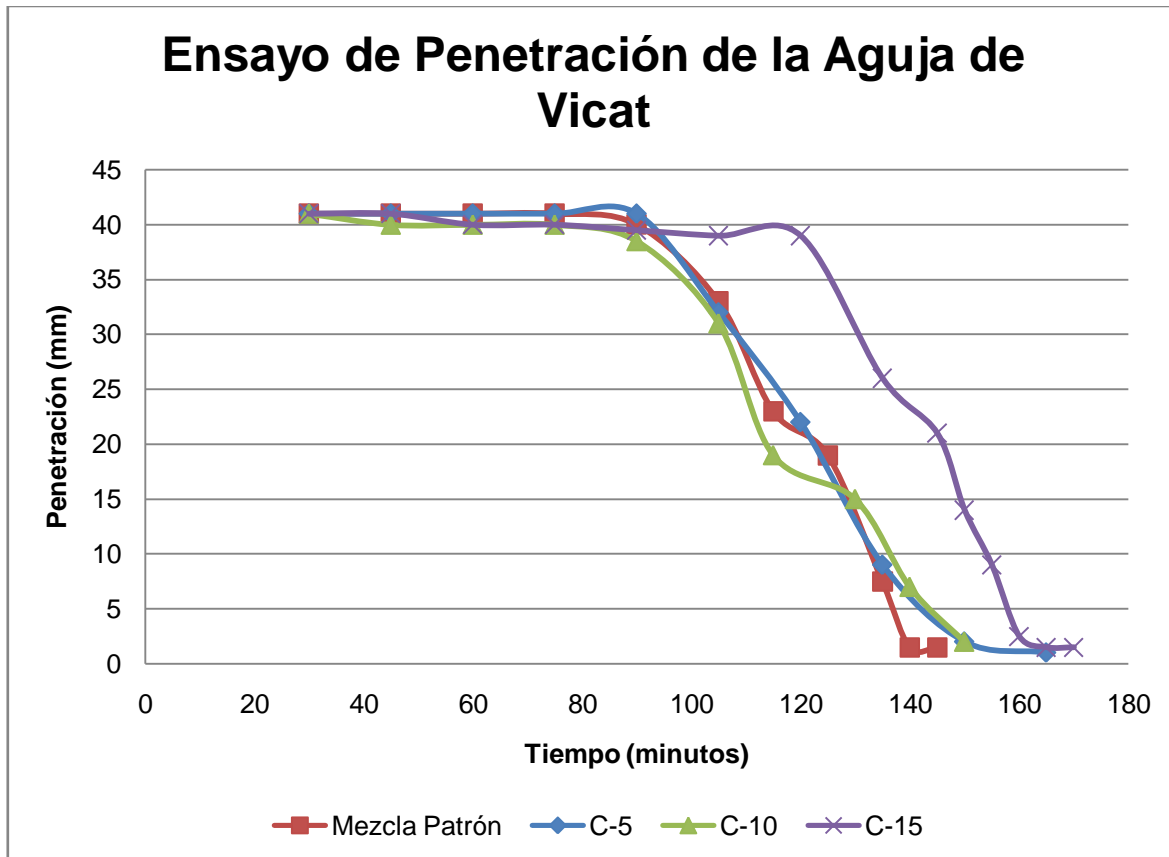
Tabla N° IV.12 Resultados del Ensayo de la Aguja de Vicat para la Mezcla con 15% de Sustitución de Ceniza

Hora de Inicio	09:59 a.m.	
Mezcla	C-15	
Hora de Penetración	Minutos	Penetración (mm)
10:40	30	41
10:56	45	41
11:12	60	40
11:27	75	40
11:47	90	39,5
12:02	105	39
12:21	120	39
12:37	135	26
12:49	145	21
12:57	150	14
01:03	155	9
01:10	160	2,5
01:16	165	1,5
01:21	170	1,5

Tabla N° IV.13 Tiempo de Fraguado de las Mezclas

Mezcla	Tiempo de Fraguado (min)
Patrón	125
C-5	125
C-10	122
C-15	148

Gráfica N° IV.3 Comparación de los Resultados del Ensayo de Penetración



IV.1.5 Diseños de Mezclas

El diseño de mezcla se realizó con la finalidad de establecer las dosificaciones de cada componente de la mezcla, así como analizar la influencia de los cambios en las proporciones de cemento y cenizas volantes.

La Tabla N° IV.14 y N° IV.15 presenta los datos de entrada y los factores de corrección de los agregados, cemento y agua para los diseños de las mezclas patrones, correspondientes a resistencia de 280 Kg/cm² y 350 Kg/cm².

Tabla N° IV.14 Datos para el Diseño de Mezcla $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$

Mezcla 280 Kg/cm²	
f'c	280 Kg/cm ²
fcr	312 Kg/cm ²
Tamaño máximo del grueso	25,40 mm
Tipo de agregado fino	ARENA TRITURADA
α	0,491
K_R	1
K_A	0,95
α	0,466
T	3"
C	437,43 Kg/m ³
C₁	1
C₂	0,93
Cc	406,81 Kg/m ³
Cd	122,04 Kg/m ³
V_{aire}	16,02 l/m ³
a_d	189,65 l/m ³
Y_G	2,5
Y_A	2,69
A+G	1697,55 Kg/m ³
β	0,45
A	763,90 Kg/m ³
G	933,65 Kg/m ³

Tabla N° IV.15 Datos para el Diseño de Mezcla $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$

Mezcla 350 Kg/cm²	
f'c	350 Kg/cm ²
fcr	382 Kg/cm ²
Tamaño máximo del grueso	25,40 mm
Tipo de agregado fino	ARENA TRITURADA
α	0,397
K_R	1
K_A	0,95
α	0,377
T	3"
C	576,01 Kg/m ³
C₁	1
C₂	0,93
Cc	535,68 Kg/m ³
Cd	160,71 Kg/m ³
V_{aire}	21,09 l/m ³
a_d	202,09 l/m ³
Y_G	2,5
Y_A	2,69
A+G	1546,30 Kg/m ³
β	0,45
A	695,83 Kg/m ³
G	850,46 Kg/m ³

IV.1.5.1 Dosificaciones

Se presentan a continuación las Tablas de resultados de las dosificaciones de las muestras patrones y con sustitución de cenizas.

Tabla Nº IV.16 Dosificación de la Mezcla Patrón $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$

Mezcla Patrón $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
Componente	Peso (Kgf/m3)	Peso (Kgf/0,090 m3)
Cemento	385,55	34,70
Agua	174,50	15,71
Arena	790,29	71,13
Piedra	953,84	85,85
Total	2304,18	207,38

Tabla Nº IV.17 Dosificación de la Mezcla Patrón $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$

Mezcla Patrón $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		
Componente	Peso (Kgf/m3)	Peso (Kgf/0,090 m3)
Cemento	507,74	45,70
Agua	187,34	16,86
Arena	728,99	65,61
Piedra	879,85	79,19
Total	2303,91	207,35

**Tabla N° IV.18 Dosificación de la Mezcla con Sustitución de Cenizas 5%
 $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$**

Mezcla C-5 $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
Componente	Peso (Kgf/m3)	Peso (Kgf/0,090 m3)
Cemento	366,27	32,96
Cenizas	19,28	1,74
Agua	174,50	15,71
Arena	790,29	71,13
Piedra	953,84	85,85
Total	2304,18	207,38

**Tabla N° IV.19 Dosificación de la Mezcla con Sustitución de Cenizas 10%
 $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$**

Mezcla C-10 $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
Componente	Peso (Kgf/m3)	Peso (Kgf/0,090 m3)
Cemento	346,99	31,23
Cenizas	38,55	3,47
Agua	174,50	15,71
Arena	790,29	71,13
Piedra	953,84	85,85
Total	2304,18	207,38

Tabla N° IV.20 Dosificación de la Mezcla con Sustitución de Cenizas 15%
 $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

Mezcla C-15 $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
Componente	Peso (Kgf/m3)	Peso (Kgf/0,090 m3)
Cemento	327,71	29,49
Cenizas	57,83	5,20
Agua	174,50	15,71
Arena	790,29	71,13
Piedra	953,84	85,85
Total	2304,18	207,38

Tabla N° IV.21 Dosificación de la Mezcla con Sustitución de Cenizas 5%
 $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

Mezcla C-5 $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		
Componente	Peso (Kgf/m3)	Peso (Kgf/0,090 m3)
Cemento	482,35	43,41
Cenizas	25,39	2,29
Agua	187,34	16,86
Arena	728,99	65,61
Piedra	879,85	79,19
Total	2303,91	207,35

**Tabla N° IV.22 Dosificación de la Mezcla con Sustitución de Cenizas 10%
 $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$**

Mezcla C-10 $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		
Componente	Peso (Kgf/m3)	Peso (Kgf/0,090 m3)
Cemento	456,97	41,13
Cenizas	50,77	4,57
Agua	187,34	16,86
Arena	728,99	65,61
Piedra	879,85	79,19
Total	2303,91	207,35

**Tabla N° IV.23 Dosificación de la Mezcla con Sustitución de Cenizas 15%
 $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$**

Mezcla C-15 $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		
Componente	Peso (Kgf/m3)	Peso (Kgf/0,090 m3)
Cemento	431,58	38,84
Cenizas	76,16	6,85
Agua	187,34	16,86
Arena	728,99	65,61
Piedra	879,85	79,19
Total	2303,91	207,35

IV.1.6 Ensayo de Cono de Abrams

Los resultados obtenidos de la caracterización del concreto fresco según el ensayo de la Norma COVENIN 339-2003 se presentan en las Tablas N° IV.24 y N° IV.25¹⁰.

Las mezclas con sustitución de ceniza en un 15% presentaron asentamiento cero (0) con la dosificación presentada en el Capítulo IV.1.5.1, con una consistencia totalmente seca. Se le adicionó agua hasta llegar a 3 litros para mejorar su trabajabilidad (Ver Tabla N° IV.26).

Tabla N° IV.24 Asentamiento en las mezclas $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$

Resistencia de diseño $f'c=280 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$	
Mezcla	Asentamiento (cm)
Patrón	5
C-5	2,5
C-10	0
C-15	2,5

Tabla N° IV.25 Asentamiento en las mezclas $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$

Resistencia de diseño $f'c=350 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$	
Mezcla	Asentamiento (cm)
Patrón	5,5
C-5	1
C-10	0
C-15	4,5

¹⁰ Asentamiento medido al con aproximación al medio centímetro más cercano. Norma COVENIN 339-2003.

Tabla N° IV.26 Asentamiento en las mezclas C-15 con adición de agua de resistencias de diseño 280 Kg/cm² y 350 Kg/cm²

Resistencia (Kg/cm ²)	Agua adicionada (l)		
	1	2	3
280	0	0,5	2,5
350	0	1	4,5

IV.1.7 Ensayos de Resistencia a Compresión

A continuación se muestran los valores obtenidos de resistencia a compresión, resistencia promedio y desviación estándar en las mezclas de resistencia de diseño 280 Kg/cm² presentes en las Tablas N° IV.27, N° IV.28, N° IV.29, N° IV.30 y las de resistencia de diseño 350 Kg/cm² presentes en las Tablas N° IV.31, N° IV.32, N° IV.33 y N° IV.34, luego de realizar el ensayo a compresión simple según lo establecido en la Norma 338-2002. Las Gráficas N° IV.4 y N° IV.5 presentan una comparación de la evolución de las resistencias promedio obtenidas para cada edad en cada mezcla.

Las Tablas N° IV.35 y N° IV.36 presentan un análisis de los valores poco usuales obtenidos en los ensayos de compresión de dos mezclas de concreto. Los valores rechazados no fueron tomados en cuenta para el promedio de resistencias, ni la desviación estándar a la edad de 28 días.

**Tabla N° IV.27 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar.
Mezcla Patrón $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$**

f'c: 280		Mezcla: M-1					
Edad (días)	Cilindro N°	Ø (cm)	Altura (cm)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	\bar{x} (Kg/cm ²)	S (Kg/cm ²)
7	1	14,91	30,06	36000	207	210	5,68
		14,88					
		14,89					
7	2	14,92	30,30	37400	213	210	5,68
		14,99					
		14,94					
14	3	14,95	30,31	42200	240	246	10,26
		14,96					
		14,99					
14	4	14,88	30,15	44000	251	246	10,26
		14,96					
		14,94					
21	5	14,92	30,16	51000	290	287	5,26
		14,98					
		15,01					
21	6	14,92	30,27	50000	284	287	5,26
		14,99					
		15,02					
28	7	14,81	29,97	50800	294	283	11,55
		14,87					
		14,85					
28	8	14,91	30,28	50200	285	283	11,55
		15,04					
		14,99					
28	9	14,94	30,12	47400	270	283	11,55
		14,96					
		14,97					
28	10	14,90	30,01	49400	282	283	11,55
		14,93					
		14,94					

**Tabla N° IV.28 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar.
Mezcla con Sustitución de 5% $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$**

f'c: 280		Mezcla: C-5		Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	\bar{x} (Kg/cm ²)	S (Kg/cm ²)
Edad (días)	Cilindro N°	Ø (cm)	Altura (cm)				
7	1	14,93	30,50	43800	249	241	13,28
		14,99					
		15,01					
7	2	15,11	30,17	41400	234		
		14,97					
		14,98					
14	3	14,95	30,25	43800	249		
		15,00					
		14,99					
14	4	14,89	30,23	48400	277		
		14,95					
		14,94					
21	5	15,02	30,08	53200	301		
		14,99					
		14,96					
21	6	14,89	29,99	53800	308		
		14,85					
		15,01					
28	7	15,04	30,08	55200	311		
		14,94					
		15,11					
28	8	14,99	30,05	55000	314		
		14,88					
		14,96					
28	9	14,93	30,14	56200	319		
		14,97					
		15,06					
28	10	14,97	30,28	55000	313		
		14,95					
		14,96					

**Tabla N° IV.29 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar.
Mezcla con Sustitución de 10% $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$**

f'c: 280		Mezcla: C-10					
Edad (días)	Cilindro N°	Ø (cm)	Altura (cm)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	\bar{x} (Kg/cm ²)	S (Kg/cm ²)
7	1	15,00	30,26	40000	226	235	15,19
		15,02					
		14,99					
7	2	14,91	30,08	42800	243	235	15,19
		15,00					
		14,98					
14	3	14,96	30,11	48600	276	270	10,74
		14,95					
		14,99					
14	4	14,97	30,29	46800	264	270	10,74
		15,06					
		15,03					
21	5	14,96	30,04	44400	253	268	26,07
		14,92					
		14,94					
21	6	14,85	30,09	49400	283	268	26,07
		14,93					
		14,97					
28	7	14,94	29,97	39200	224	293	9,39
		14,93					
		14,92					
28	8	14,88	30,10	49200	281	293	9,39
		14,95					
		14,98					
28	9	14,92	30,23	52000	298	293	9,39
		14,91					
		14,89					
28	10	14,91	30,20	52400	300	293	9,39
		14,89					
		14,93					

**Tabla N° IV.30 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar.
Mezcla con Sustitución de 15% $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$**

f'c: 280		Mezcla: C-15					
Edad (días)	Cilindro N°	Ø (cm)	Altura (cm)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	\bar{x} (Kg/cm ²)	S (Kg/cm ²)
7	1	14,93	30,11	34200	194	169	43,89
		15,14					
		14,87					
7	2	14,99	30,15	25600	145	169	43,89
		15,05					
		15,01					
14	3	14,90	30,18	41000	234	234	0,08
		14,94					
		14,94					
14	4	14,91	30,16	41200	234	234	0,08
		14,99					
		14,98					
21	5	14,94	30,22	43600	248	250	2,97
		14,96					
		14,98					
21	6	15,08	30,31	45000	251	250	2,97
		15,12					
		15,09					
28	7	14,87	30,19	45200	259	255	2,83
		14,95					
		14,94					
28	8	14,82	30,11	44200	253	255	2,83
		14,96					
		14,99					
28	9	14,88	30,06	44600	255	255	2,83
		14,91					
		14,94					
28	10	14,94	30,23	44600	255	255	2,83
		14,90					
		14,91					

**Tabla N° IV.31 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar.
Mezcla Patrón $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$**

f'c: 350		Mezcla: M-2					
Edad (días)	Cilindro N°	Ø(cm)	Altura (cm)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	\bar{x} (Kg/cm ²)	S (Kg/cm ²)
7	1	14,89	30,24	54000	307,76	300	13,89
		14,97					
		14,98					
7	2	14,79	30,23	51000	292,10	300	13,89
		15,02					
		14,92					
14	3	15,11	30,11	60700	345,02	338	11,94
		14,88					
		14,91					
14	4	14,89	30,28	58200	331,55	338	11,94
		14,97					
		14,99					
21	5	14,91	30,31	59400	337,63	347	15,89
		15,01					
		14,98					
21	6	15,12	30,03	63000	355,56	347	15,89
		15,03					
		14,91					
28	7	14,98	30,38	63200	361,48	363	15,28
		14,95					
		14,83					
28	8	14,91	30,14	66600	380,93	363	15,28
		14,87					
		14,98					
28	9	14,83	30,13	62000	358,13	363	15,28
		14,89					
		14,82					
28	10	14,98	30,19	61400	349,47	363	15,28
		14,93					
		14,96					

**Tabla N° IV.32 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar.
Mezcla con sustitución de 5% $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$**

f'c: 350		Mezcla: C-5		Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	\bar{x} (Kg/cm ²)	S (Kg/cm ²)
Edad (días)	Cilindro N°	Ø(cm)	Altura (cm)				
7	1	14,98	30,01	53800	307,72	304	6,86
		14,97					
		14,81					
7	2	15,05	30,11	53200	299,98	304	6,86
		15,02					
		15,01					
14	3	14,91	30,20	62200	353,08	343	17,50
		14,98					
		15,04					
14	4	14,95	30,27	58800	333,33	343	17,50
		15,01					
		15,00					
21	5	14,94	30,23	57400	329,04	332	6,08
		14,89					
		14,88					
21	6	15,10	30,37	59200	335,90	332	6,08
		14,96					
		14,88					
28	7	14,85	30,15	72000	413,11	382	28,76
		14,90					
		14,94					
28	8	14,92	30,04	68200	388,17	382	28,76
		14,95					
		15,00					
28	9	14,96	30,16	62400	353,90	382	28,76
		14,99					
		15,00					
28	10	14,85	30,05	65400	376,42	382	28,76
		14,87					
		14,90					

**Tabla N° IV.33 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar.
Mezcla con sustitución de 10% $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$**

f'c: 350		Mezcla: C-10					
Edad (días)	Cilindro N°	Ø(cm)	Altura (cm)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm²)	\bar{x} (Kg/cm²)	S (Kg/cm²)
7	1	14,94	30,09	47200	268,89	291	39,96
		14,95					
		14,96					
7	2	15,10	30,18	56200	313,97		
		15,11					
		15,08					
14	3	15,02	30,14	58600	330,14		
		15,03					
		15,05					
14	4	14,90	30,05	52800	300,92		
		15,03					
		14,91					
21	5	14,95	30,210	59400	333,61		
		15,13					
		15,09					
21	6	14,88	30,440	63000	359,38		
		15,11					
		14,83					
28	7	15,07	30,22	61800	350,03		
		14,98					
		14,93					
28	8	14,92	30,11	62000	351,16		
		14,85					
		15,21					
28	9	14,93	30,34	63400	354,82		
		15,01					
		15,31					
28	10	15,11	30,29	63000	356,98		
		14,92					
		14,94					

**Tabla N° IV.34 Resistencia a Compresión, Promedio y Desviación Estándar.
Mezcla con sustitución de 15% $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$**

f'c: 350		Mezcla: C-15		Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	\bar{x} (Kg/cm ²)	S (Kg/cm ²)
Edad (días)	Cilindro N°	Ø(cm)	Altura (cm)				
7	1	15,13	30,21	42600	239,04	240	1,18
		15,09					
		14,97					
7	2	15,11	30,32	42800	240,38		
		15,02					
		15,04					
14	3	14,98	30,08	46400	264,92		
		14,99					
		14,83					
14	4	14,98	30,21	47000	266,68		
		14,99					
		14,97					
21	5	14,93	30,25	50800	288,24	292	7,48
		15,00					
		15,01					
21	6	15,01	30,14	52800	296,67		
		15,05					
		15,10					
28	7	14,91	30,16	56000	319,45		
		14,95					
		14,96					
28	8	14,84	30,15	53800	308,68	318	8,92
		14,89					
		14,96					
28	9	14,82	30,22	57000	327,04		
		14,94					
		14,93					
28	10	14,87	30,19	55000	316,56		
		14,89					
		14,86					

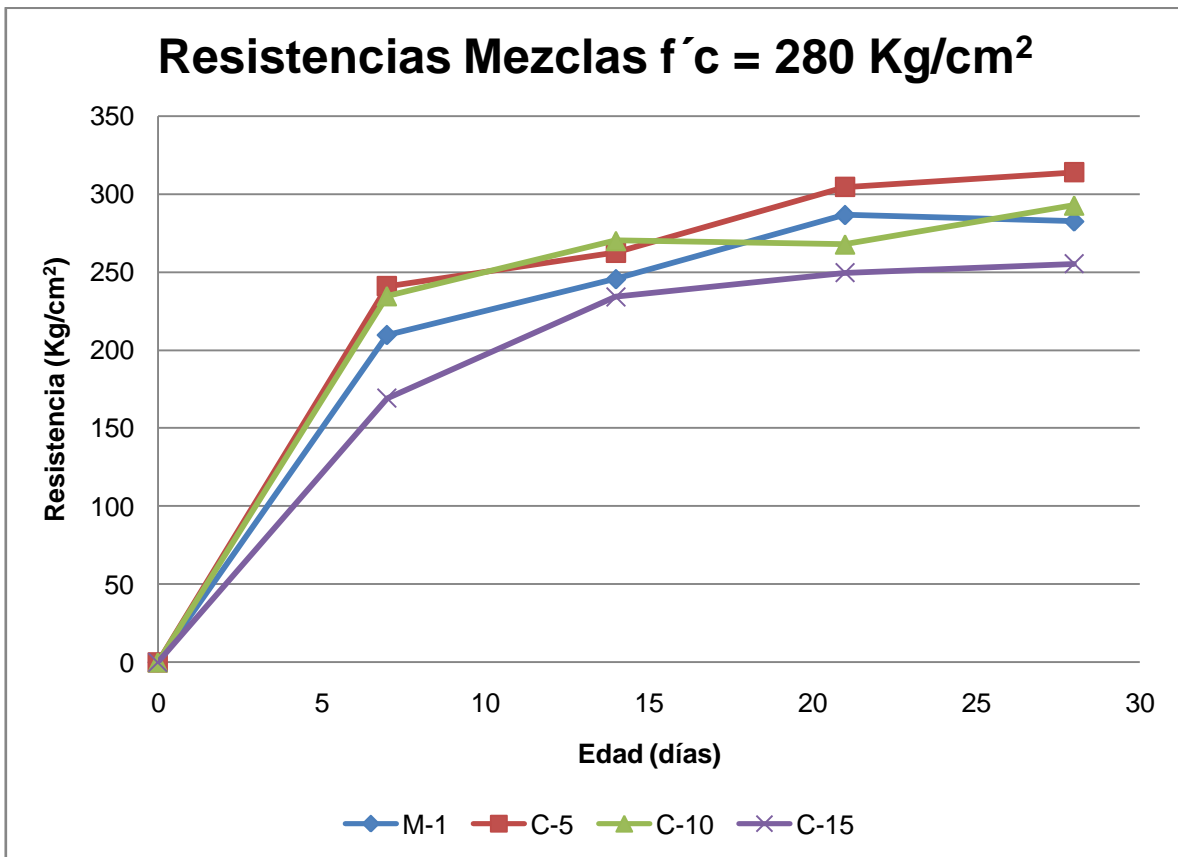
Tabla N° IV.35 Análisis de Aceptación y Rechazo a Través de Probabilidades. Mezcla C-10.

f'c: 280		Mezcla: C-10				
Cilindro N°	Resistencia Obtenida a los 28 días (Kg/cm ²)	\bar{x} (Kg/cm ²)	z	Probabilidad de No Excedencia (%)	Menor Probabilidad de Ocurrencia (%)	Aceptación/Rechazo
7	224	293	-2,16	15,80	25,00	No pertenece a la población
8	281		-0,38	34,46	25,00	Ok
9	298		0,16	44,04	25,00	Ok
10	300		0,22	42,07	25,00	Ok

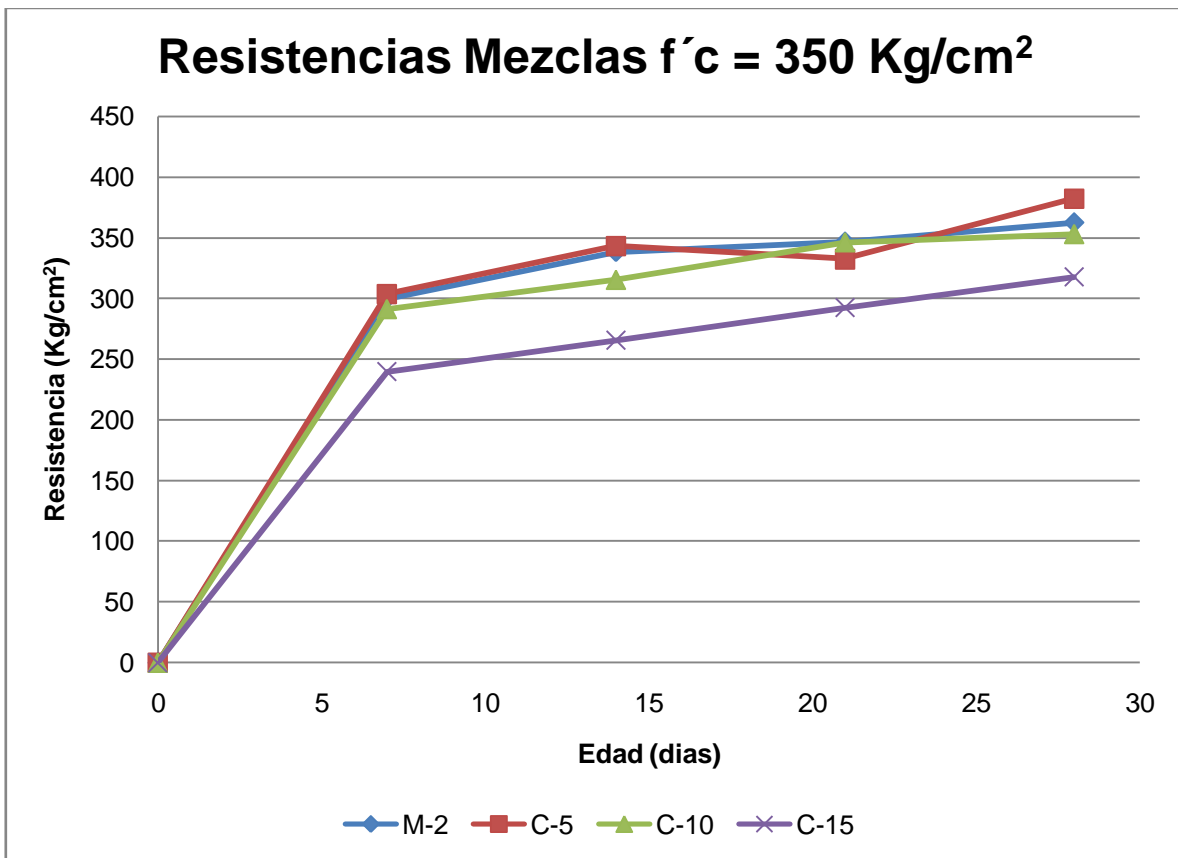
Tabla N° IV.36 Análisis de Aceptación y Rechazo a Través de Probabilidades. Mezcla C-5.

f'c: 350		Mezcla: C-5				
Cilindro N°	Resistencia Obtenida a los 28 días (Kg/cm ²)	\bar{x} (Kg/cm ²)	z	Probabilidad de No Excedencia (%)	Menor Probabilidad de Ocurrencia (%)	Aceptación/Rechazo
7	413	382	0,96	17,11	25,00	No pertenece a la población
8	388		0,18	44,04	25,00	Ok
9	354		-0,89	18,41	25,00	Ok
10	376		-0,18	47,07	25,00	No pertenece a la población

Gráfica N° IV.4 Evolución de la Resistencia a Compresión en las Mezclas de Concreto de Resistencia de Diseño 280 Kg/cm²




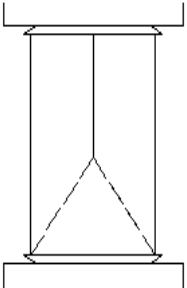

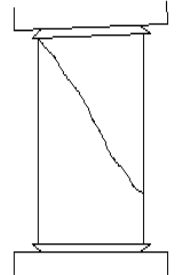

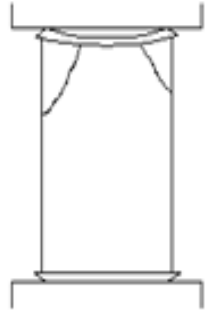
Gráfica N° IV.5 Evolución de la Resistencia a Compresión en las Mezclas de Concreto de Resistencia de Diseño 350 Kg/cm²



IV.1.7.1 Tipos de Fallas Obtenidas en las Probetas de Concreto

La Tabla N° IV.37 presenta las fallas obtenidas en las probetas de concreto luego de realizar el ensayo de compresión.

Tabla N° IV.37 Tipos de Falla Obtenidas en los Ensayos de Resistencia a Compresión Simple

Probeta	Tipo de Falla		Observaciones
C-10 350 7 días			Combinación de falla deseable a compresión y falla por deficiencia de enrase
C-5 280 28 días			Falla por inclinación en una de las caras de carga.
C-15 350 28 días			Falla por deformación del plato cabeceo

<p>M-1 280 7 días</p>			<p>Falla por deficiencia en el enrase de las muestras moldeadas</p>
<p>M-2 350 14 días</p>			<p>Falla por deficiencia en el enrase de las muestras moldeadas</p>

IV.1.8 Ensayos de Ultrasonido

Los resultados obtenidos de los ensayos de ultrasonido se presentan en las tablas y gráficas mostradas a continuación. La Gráfica N° IV.14 y N° IV.15 muestra una comparación de los resultados obtenidos en cada mezcla para la resistencia de diseño de 280 Kg/cm² y 350 Kg/cm² respectivamente.

Tabla N° IV.38 Velocidad de Pulso Ultrasonico. Mezcla Patrón $f'c=280$ Kg/cm²

$f'c = 280$ Kg/cm ²		Mezcla: M-1			\bar{x} (m/s)	S (m/s)	v (%)
Cilindro N°	Tiempo (μ s)	Altura (cm)	Velocidad (m/s)				
7	72,00	29,97	4162,50	4215,94	73,63	1,75	
8	70,60	30,28	4288,95				
9	72,80	30,12	4137,36				
10	70,20	30,01	4274,93				

Gráfica N° IV.6 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla Patrón de Resistencia $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$

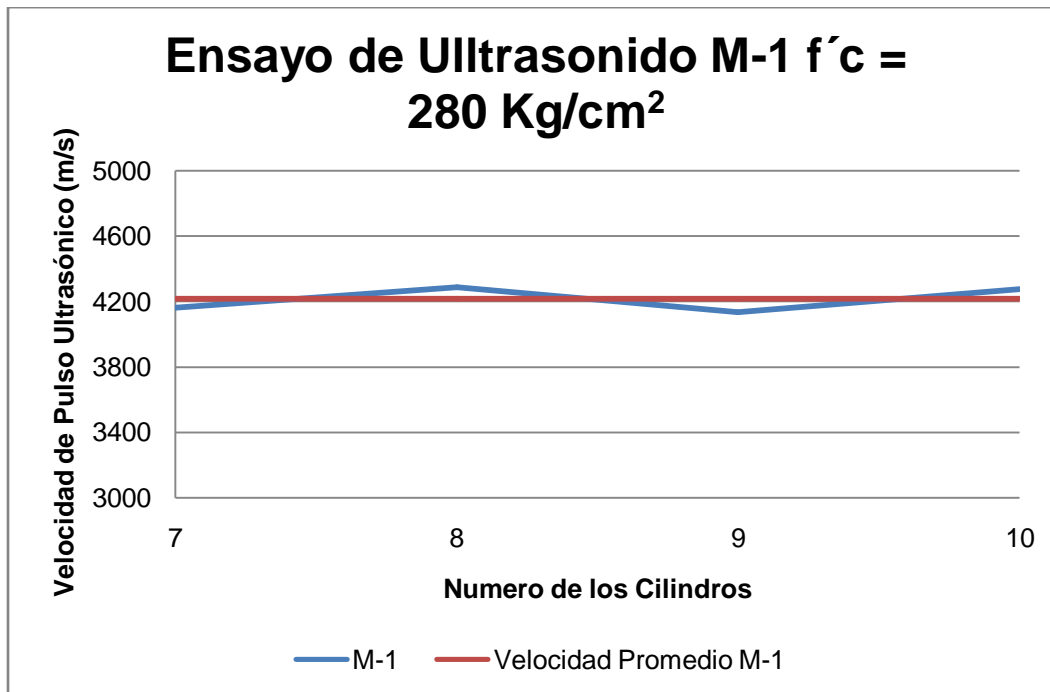


Tabla N° IV.39 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla con sustitución de 5% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-5		\bar{x} (m/s)	S (m/s)	v (%)
Cilindro N°	Tiempo (μs)	Altura (cm)	Velocidad (m/s)			
7	71,10	30,08	4230,66	4282,99	70,46	1,65
8	70,30	30,05	4274,54			
9	70,90	30,14	4251,06			
10	69,20	30,28	4375,72			

Gráfica N° IV.7 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla con sustitución de 5% de Resistencia $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$

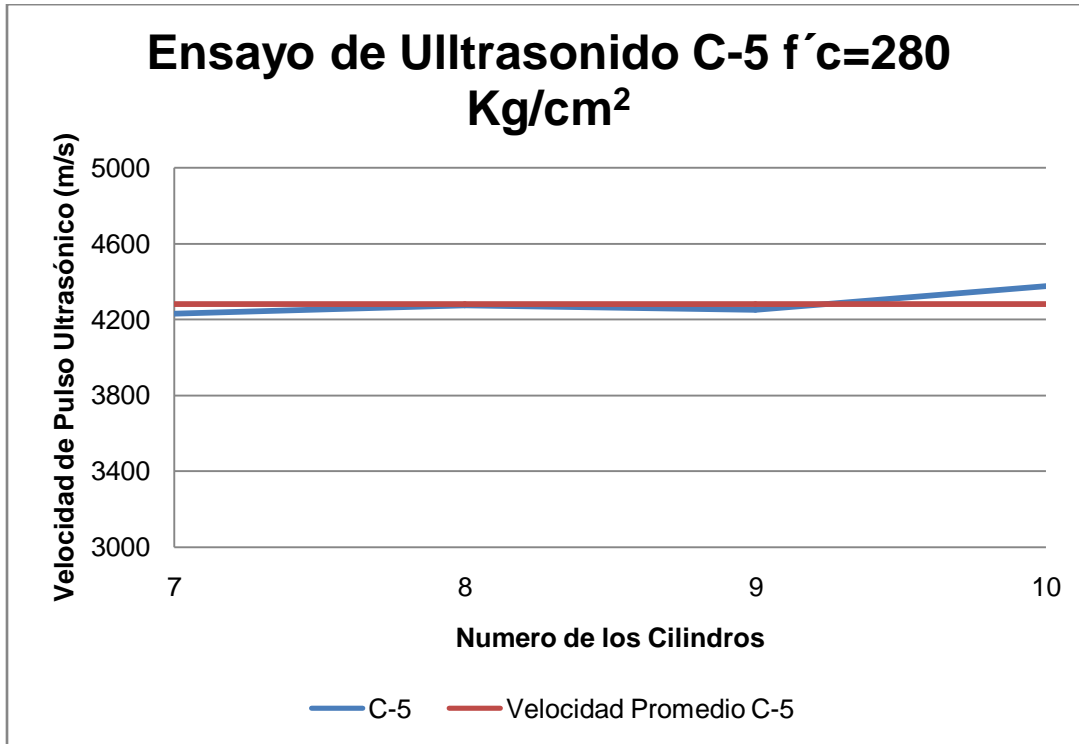


Tabla N° IV.40 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla con sustitución de 10% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-10		\bar{x} (m/s)	S (m/s)	v (%)
Cilindro N°	Tiempo (μs)	Altura (cm)	Velocidad (m/s)			
7	76,80	29,97	3902	4017,76	90,99	2,26
8	73,60	30,10	4090			
9	74,50	30,23	4058			
10	75,10	30,20	4021			

Gráfica N° IV.8 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla con sustitución de 10% de Resistencia $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$

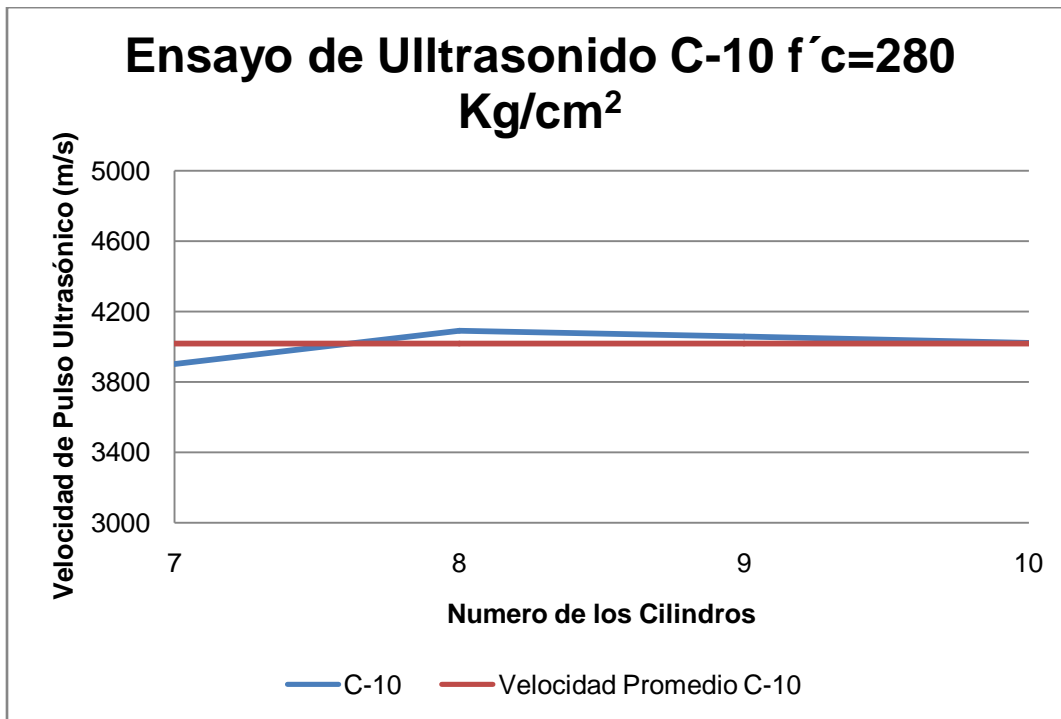


Tabla N° IV.41 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla con sustitución de 15% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-15		\bar{x} (m/s)	S (m/s)	v (%)
Cilindro N°	Tiempo (μs)	Altura (cm)	Velocidad (m/s)			
7	77,40	30,19	3901	3920,17	89,57	2,28
8	76,10	30,11	3957			
9	78,70	30,06	3820			
10	75,50	30,23	4004			

Gráfica N° IV.9 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla con sustitución de 15% de Resistencia $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$

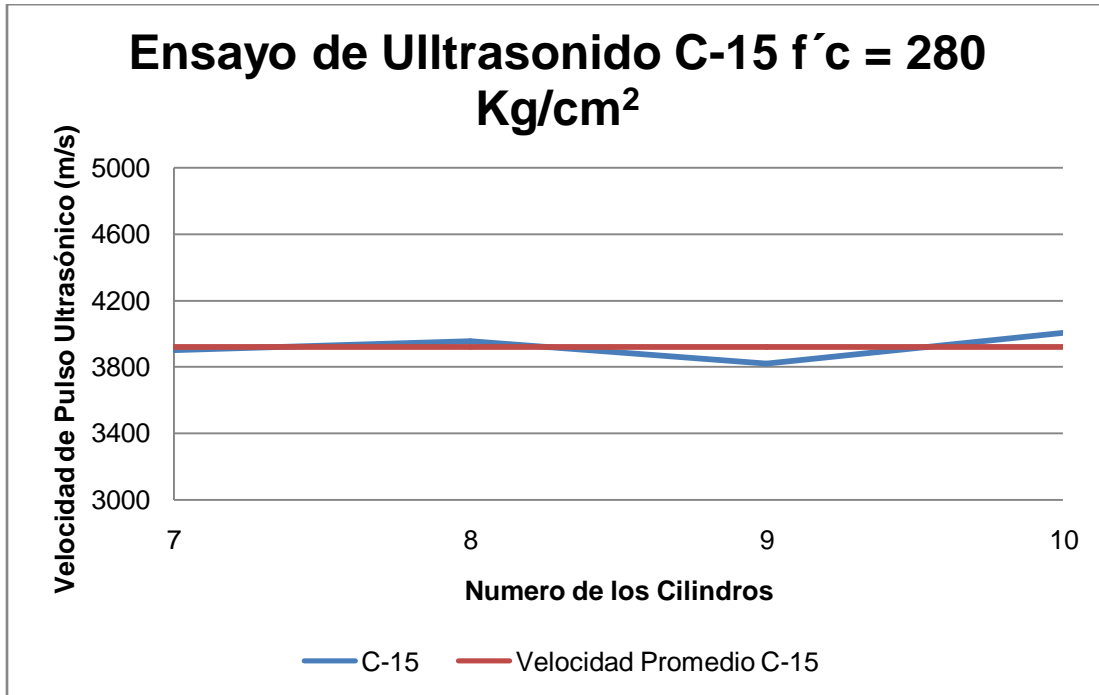


Tabla N° IV.42 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla Patrón $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: M-2		\bar{x} (m/s)	S (m/s)	v (%)
Cilindro N°	Tiempo (μs)	Altura (cm)	Velocidad (m/s)			
7	69,7	30,38	4358,68	4335,89	25,24	0,58
8	69,5	30,14	4336,69			
9	69,4	30,13	4341,50			
10	70,1	30,19	4306,70			

Gráfica N° IV.10 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla Patrón de Resistencia $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$

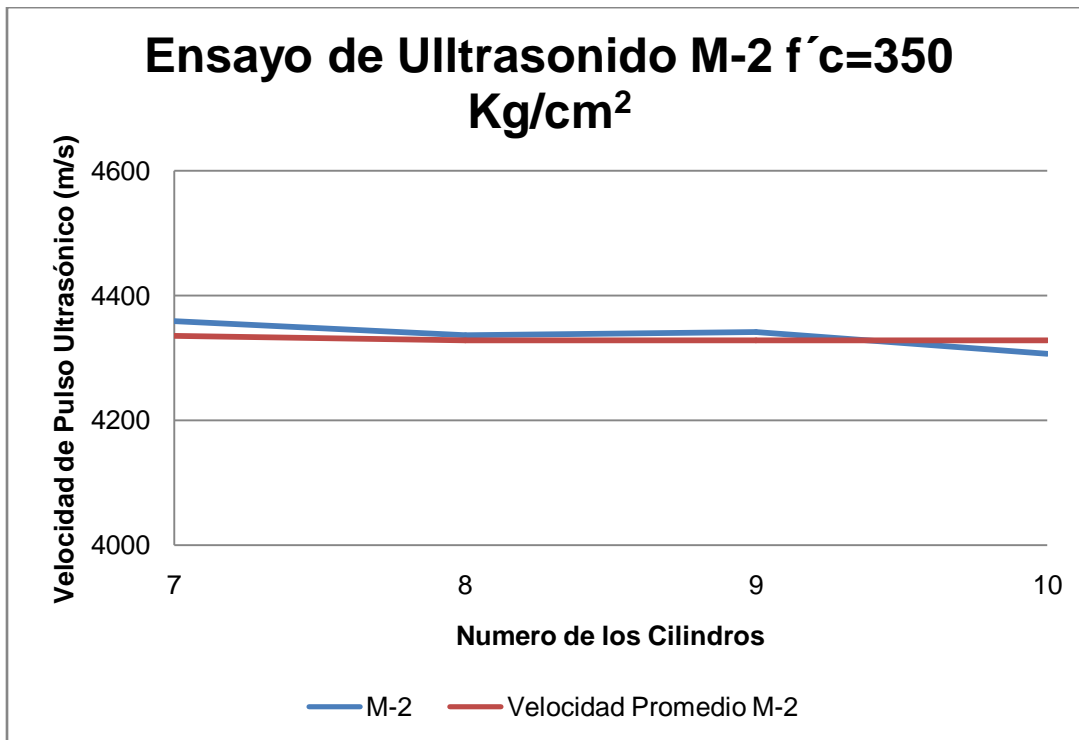


Tabla N° IV.43 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla con sustitución de 5% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-5		\bar{x} (m/s)	S (m/s)	v (%)
Cilindro N°	Tiempo (μs)	Altura (cm)	Velocidad (m/s)			
7	70,5	30,15	4309	4228,56	65,43	1,55
8	72,2	30,04	4175			
9	71,7	30,16	4202			
10	71,4	30,05	4228			

Gráfica N° IV.11 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla con sustitución de 5% de Resistencia $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$

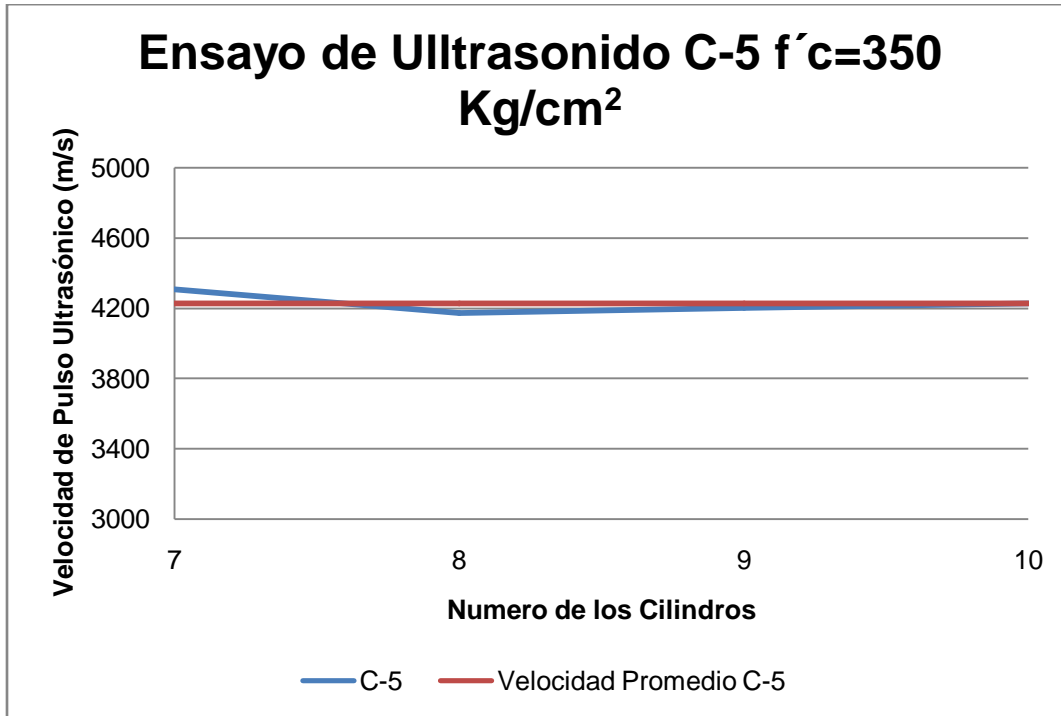


Tabla N° IV.44 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla con sustitución de 10% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-10		\bar{x} (m/s)	S (m/s)	v (%)
Cilindro N°	Tiempo (μs)	Altura (cm)	Velocidad (m/s)			
7	73,2	30,22	4128	4099,21	41,52	1,01
8	74,3	30,11	4052			
9	74,4	30,34	4078			
10	73,2	30,29	4138			

Gráfica N° IV.12 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla con sustitución de 10% de Resistencia $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$

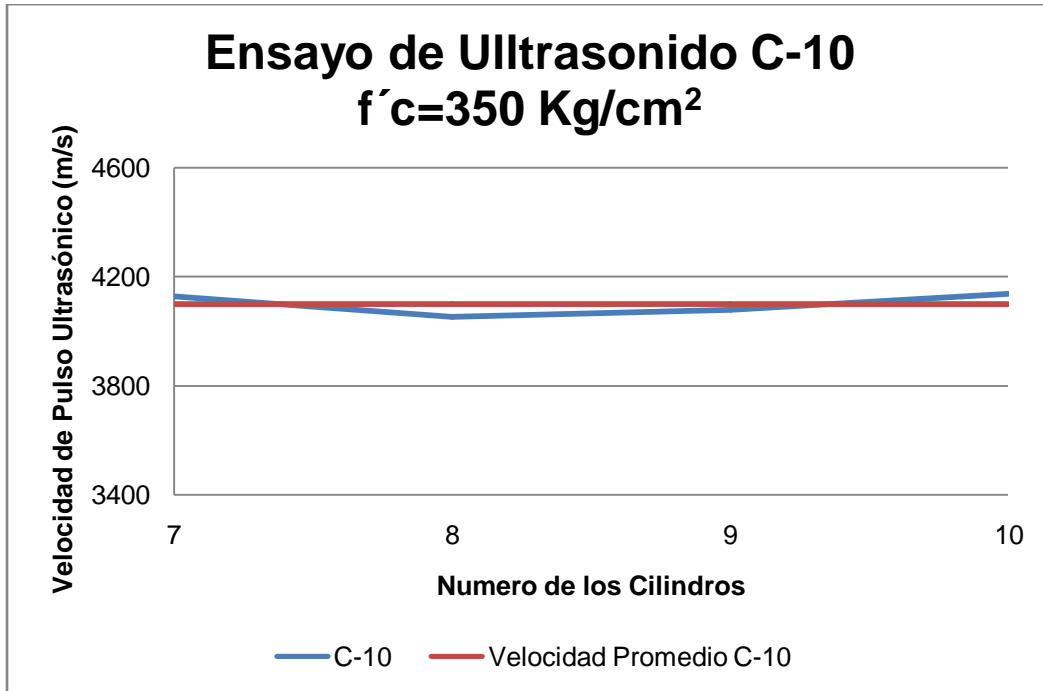
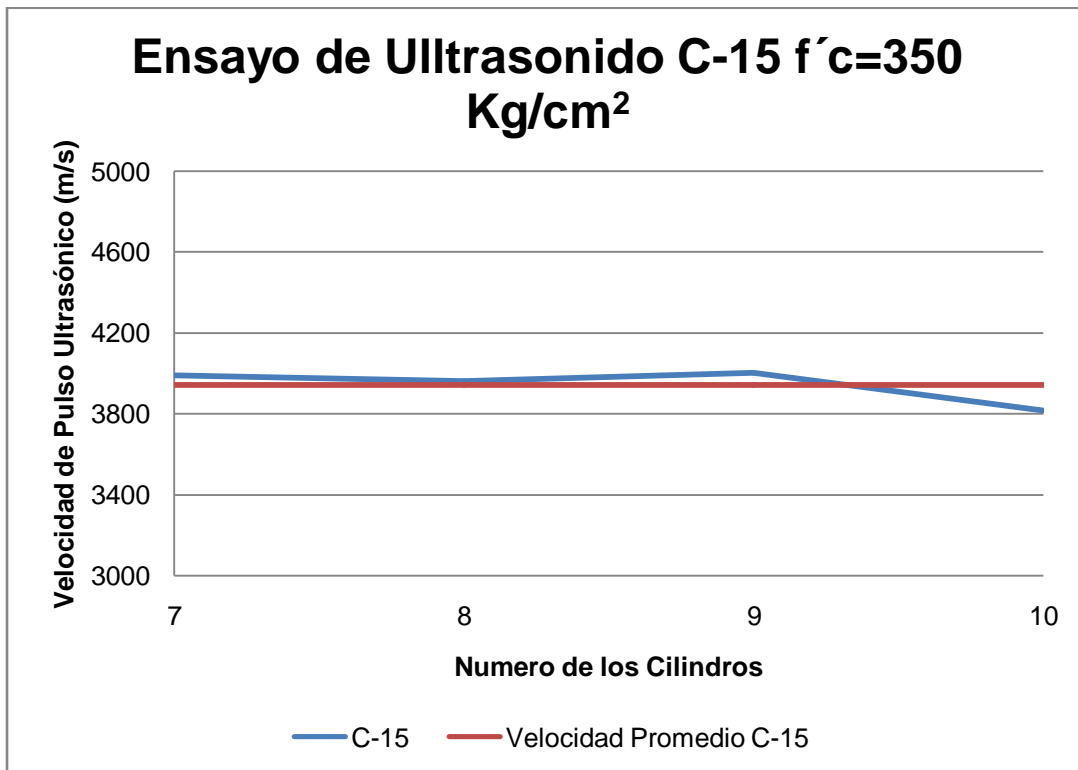


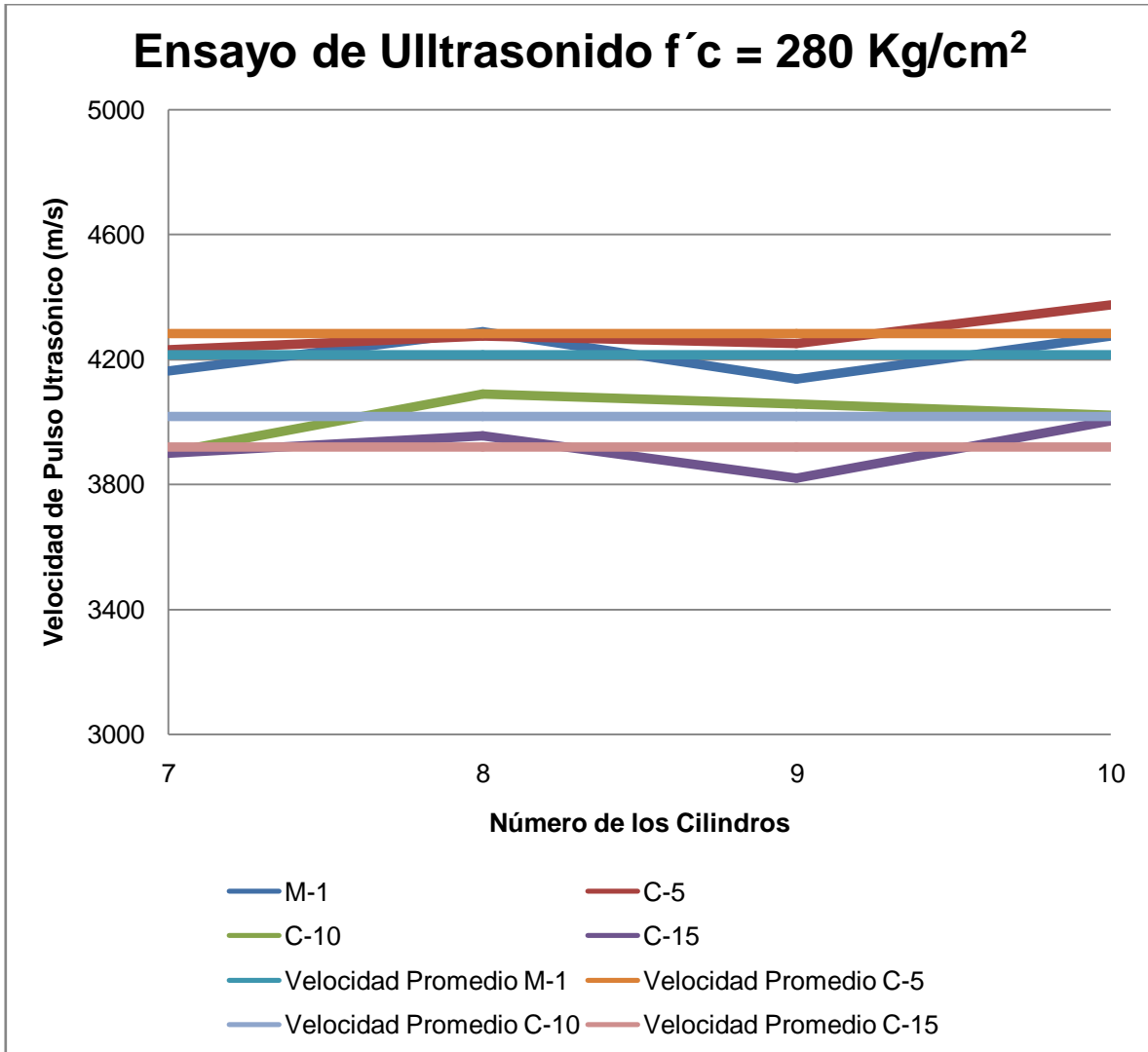
Tabla N° IV.45 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Mezcla con sustitución de 15% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-15		\bar{x} (m/s)	S (m/s)	v (%)
Cilindro N°	Tiempo (μs)	Altura (cm)	Velocidad (m/s)			
7	75,6	30,16	3989	3942,66	90,32	2,29
8	76,1	30,15	3962			
9	75,5	30,22	4003			
10	79,1	30,19	3817			

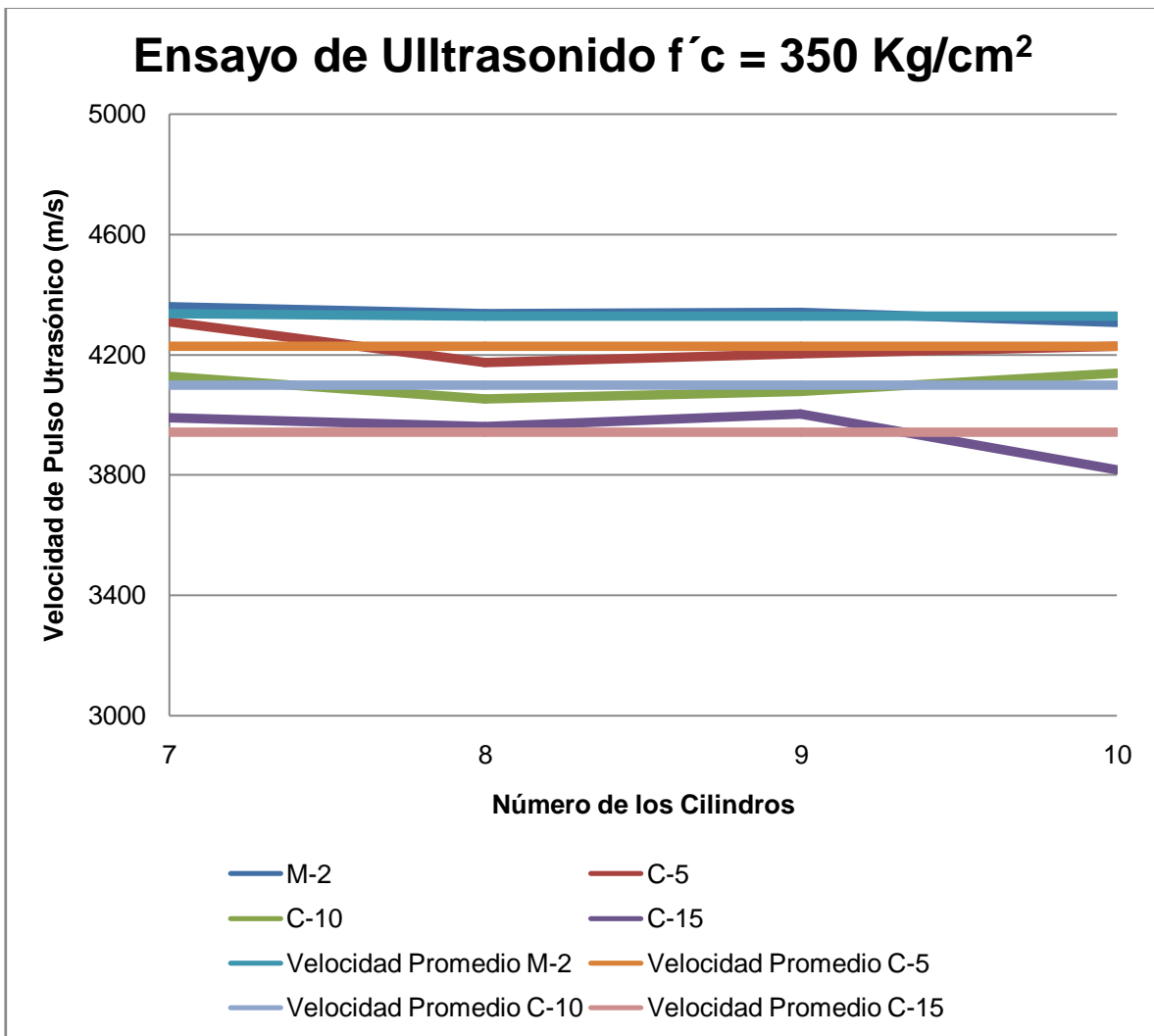
Gráfica N° IV.13 Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezcla con sustitución de 15% de Resistencia $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$



Gráfica N° IV.14 Comparación de las Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezclas de Resistencia $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$



Gráfica N° IV.15 Comparación de las Velocidades de Pulso Ultrasónico en Mezclas de Resistencia $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$



IV.1.9 Ensayos de Módulo de Elasticidad Secante

Se presentan los resultados obtenidos del ensayo de Módulo de Elasticidad Secante luego de realizar el procedimiento establecido en la Norma COVENIN 1468-1979. Los Gráficas se elaboraron con un promedio de los resultados obtenidos en las dos probetas evaluadas por cada resistencia (Probeta A y B). Las Tablas N° IV.55, N° IV.57, N° IV.59, N° IV.61, N° IV.63, N° IV.65, N° IV.67 y N° IV.69 muestran los valores de módulo de elasticidad comparados con los valores teóricos, los cuales se calcularon con los pesos unitarios de cada probeta.

Tabla N° IV.46 Características de las Probetas Patrones $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: M-1						
Probeta	\varnothing (cm)	\bar{X} (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)
A	15,15	15,04	177,66	30,08	12,689	2374,46	51000	287,07
	14,95							
	15,02							
B	14,84	14,87	173,74	30,34	12,734	2415,70	50400	290,08
	14,83							
	14,95							

Tabla N° IV.47 Características de las Probetas con Sustitución de 5% $f'c=280$ Kg/cm²

$f'c = 280$ Kg/cm ²		Mezcla: C-5						
Probeta	Ø (cm)	\bar{x} (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)
A	14,91	14,97	175,93	30,19	12,680	2387,35	51600	293,30
	14,95							
	15,04							
B	14,94	14,96	175,77	30,22	12,567	2365,83	53600	304,94
	14,96							
	14,98							

Tabla N° IV.48 Características de las Probetas con Sustitución de 10% $f'c=280$ Kg/cm²

$f'c = 280$ Kg/cm ²		Mezcla: C-10						
Probeta	Ø (cm)	\bar{x} (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)
A	14,88	14,90	174,37	30,26	12,563	2381,01	50800	291,34
	14,92							
	14,90							
B	15,01	14,95	175,62	30,50	12,732	2377,01	51200	291,54
	14,93							
	14,92							

**Tabla N° IV.49 Características de las Probetas con Sustitución de 15%
 $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$**

$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-15						
Probeta	\varnothing (cm)	\bar{X} (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)
A	14,99	14,99	176,56	30,23	12,601	2360,92	47000	266,20
	14,99							
	15,00							
B	14,92	14,88	173,98	30,00	12,358	2367,75	38400	220,72
	14,89							
	14,84							

Tabla N° IV.50 Características de las Probetas Patrones $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: M-2						
Probeta	\varnothing (cm)	\bar{X} (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)
A	14,81	14,89	174,05	30,14	12,645	2410,41	61000	350,47
	14,96							
	14,89							
B	14,83	14,85	173,28	30,25	12,693	2421,59	61800	356,66
	14,88							
	14,85							

Tabla N° IV.51 Características de las Probetas con Sustitución de 5% $f'c=350$ Kg/cm²

$f'c = 350$ Kg/cm ²		Mezcla: C-5						
Probeta	Ø (cm)	\bar{X} (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)
A	15,00	15,02	177,26	30,13	12,671	2372,41	65200	367,81
	15,03							
	15,04							
B	14,97	14,97	175,93	30,10	12,702	2398,64	61000	346,73
	14,98							
	14,95							

Tabla N° IV.52 Características de las Probetas con Sustitución de 10% $f'c=350$ Kg/cm²

$f'c = 350$ Kg/cm ²		Mezcla: C-10						
Probeta	Ø (cm)	\bar{X} (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)
A	14,91	14,92	174,83	30,20	12,452	2358,33	63000	360,34
	14,92							
	14,93							
B	14,99	15,09	178,92	30,14	12,492	2316,48	62000	346,52
	15,10							
	15,19							

**Tabla N° IV.53 Características de las Probetas con Sustitución de 15%
 $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$**

$f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-15						
Probeta	\varnothing (cm)	\bar{X} (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)
A	14,90	14,93	175,07	30,17	12,33	2334,42	54400	310,73
	14,94							
	14,95							
B	14,85	14,85	173,12	30,25	12,255	2340,13	50600	292,28
	14,78							
	14,91							

Tabla N° IV.54 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla Patrón $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: M-1		
Probeta	A		B	
Carga (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria
2000	11	0,0000050	12	0,0000151
4000	23	0,0000377	23	0,0000502
6000	34	0,0000904	35	0,0000703
8000	45	0,0001356	46	0,0000929
10000	56	0,0001883	58	0,0001331
12000	68	0,0002310	69	0,0001833
14000	79	0,0002988	81	0,0002260
16000	90	0,0003365	92	0,0002762
18000	101	0,0003867	104	0,0003239
20000	113	0,0004319	115	0,0003591

Gráfica N° IV.16 Módulo de Elasticidad. Mezcla Patrón $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$

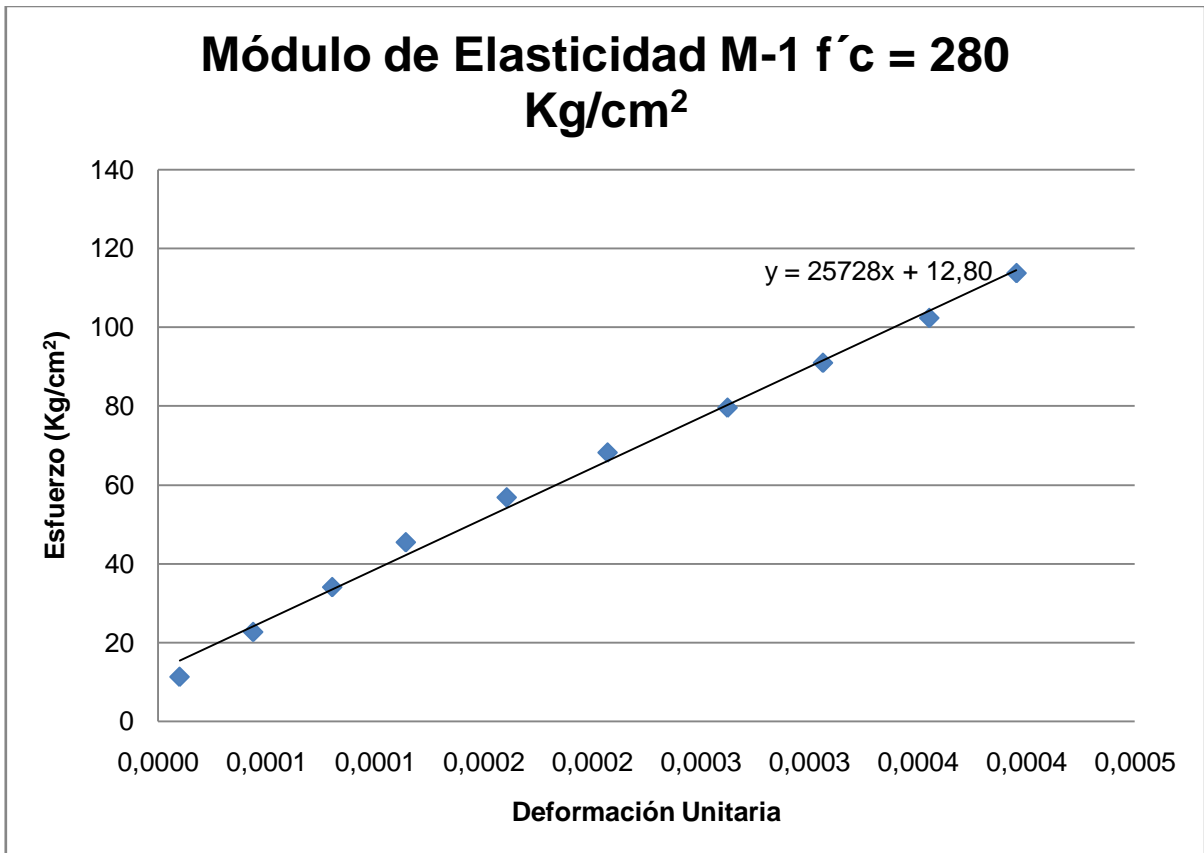


Tabla N° IV.55 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico. Mezcla Patrón $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

	Módulo de Elasticidad Calculado (Kg/cm ²)	Módulo Teórico (Kg/cm ²)
Probeta A	2,59E+05	2,65E+05
Probeta B	3,24E+05	2,72E+05
Promedio	2,89E+05	2,69E+05

Tabla N° IV.56 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla con sustitución de 5% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-5		
Probeta	A		B	
Carga (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria
2000	11	0,0000126	11	0,0000075
4000	23	0,0000628	23	0,0000427
6000	34	0,0001105	34	0,0000904
8000	45	0,0001607	46	0,0001406
10000	57	0,0002059	57	0,0001908
12000	68	0,0002762	68	0,0002411
14000	80	0,0003164	80	0,0002837
16000	91	0,0003616	91	0,0003239
18000	102	0,0004093	102	0,0003716
20000	114	0,0004620	114	0,0004193

Gráfica Nº IV.17 Módulo de Elasticidad. Mezcla con 5% de sustitución $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$

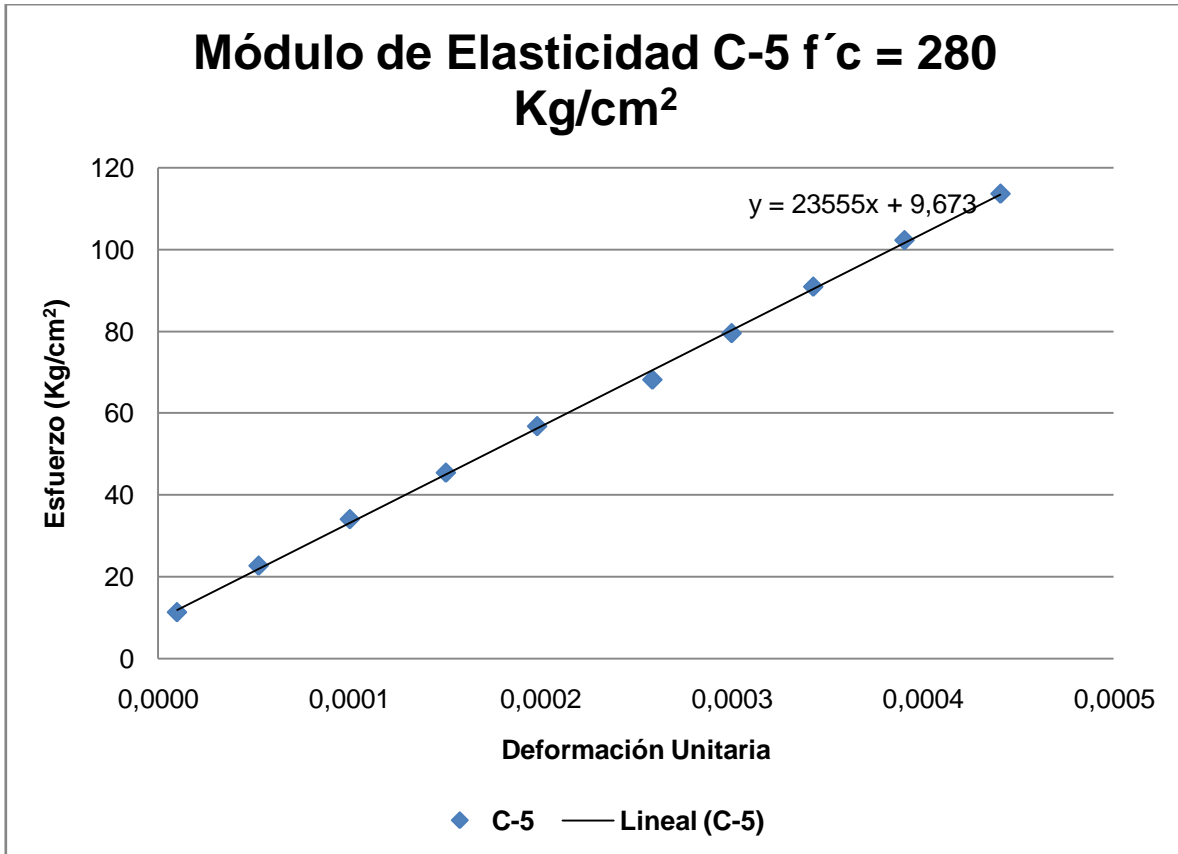


Tabla Nº IV.57 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico. Mezcla con Sustitución de 5% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

	Módulo de Elasticidad Calculado (Kg/cm ²)	Módulo Teórico (Kg/cm ²)
Probeta A	2,52E+05	2,67E+05
Probeta B	2,75E+05	2,64E+05
Promedio	2,64E+05	2,66E+05

Tabla N° IV.58 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla con sustitución de 10% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-10		
Probeta	A		B	
Carga (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria
2000	11	0,0000151	11	0,0000100
4000	23	0,0000352	23	0,0000603
6000	34	0,0000854	34	0,0001155
8000	45	0,0001356	46	0,0001758
10000	57	0,0001908	57	0,0002210
12000	68	0,0002511	68	0,0002863
14000	79	0,0002963	80	0,0003214
16000	91	0,0003767	91	0,0003666
18000	102	0,0004470	102	0,0004168
20000	113	0,0005022	114	0,0004721

Gráfica N° IV.18 Módulo de Elasticidad. Mezcla con 10% de Sustitución
 $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

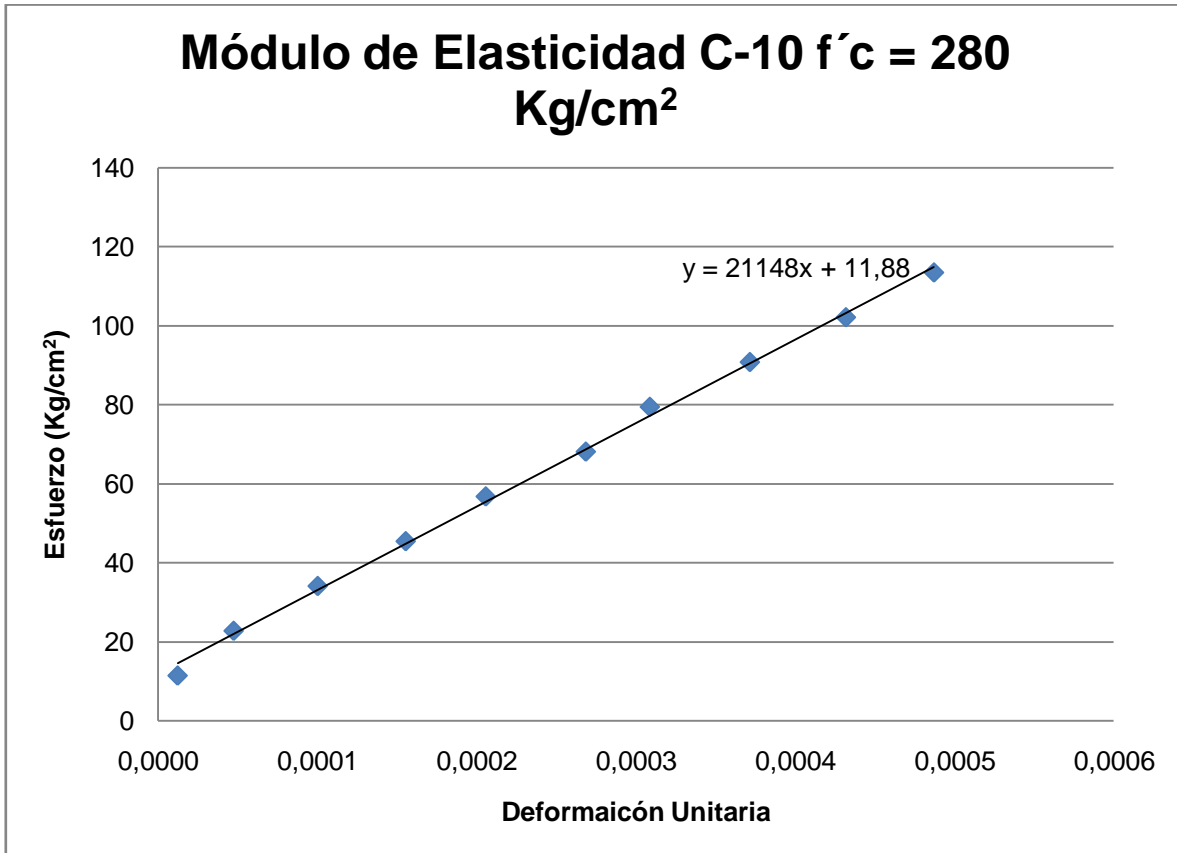


Tabla N° IV.59 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico. Mezcla con Sustitución de 10% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

	Módulo de Elasticidad Calculado (Kg/cm ²)	Módulo Teórico (Kg/cm ²)
Probeta A	2,14E+05	2,66E+05
Probeta B	2,48E+05	2,66E+05
Promedio	2,30E+05	2,66E+05

Tabla N° IV.60 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla con sustitución de 15% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-15		
Probeta	A		B	
Carga (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria
2000	11	0,0000151	11	0,0000301
4000	23	0,0000753	23	0,0000904
6000	34	0,0001456	34	0,0001708
8000	46	0,0002109	46	0,0002360
10000	57	0,0002712	57	0,0002913
12000	69	0,0003315	68	0,0003616
14000	80	0,0003917	80	0,0004219
16000	92	0,0004520	91	0,0004821
18000	103	0,0005022	102	0,0005323
20000	115	0,0005575	114	0,0005826

Gráfica N° IV.19 Módulo de Elasticidad. Mezcla con 15% de Sustitución
 $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

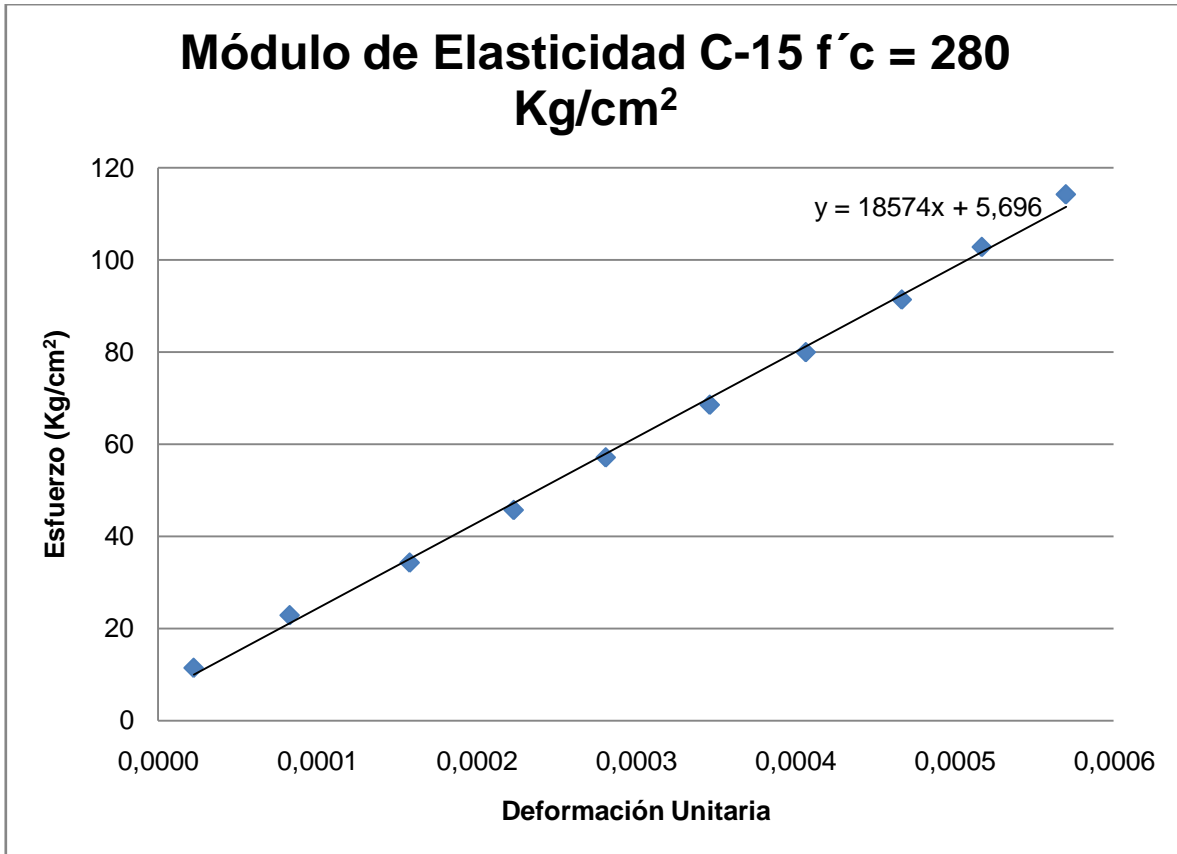


Tabla N° IV.61 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico. Mezcla con Sustitución de 15% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

	Módulo de Elasticidad Calculado (Kg/cm ²)	Módulo Teórico (Kg/cm ²)
Probeta A	2,10E+05	2,51E+05
Probeta B	2,04E+05	2,52E+05
Promedio	2,07E+05	2,52E+05

Tabla N° IV.62 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla Patrón $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: M-2		
Probeta	A		B	
Carga (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria
2500	14	0,0000226	14	0,0000126
5000	29	0,0000703	29	0,0000552
7500	43	0,0001180	43	0,0001080
10000	57	0,0001733	58	0,0001582
12500	72	0,0002260	72	0,0002109
15000	86	0,0002762	87	0,0002561
17500	101	0,0003390	101	0,0003038
20000	115	0,0003942	115	0,0003490
22500	129	0,0004570	130	0,0003993
25000	144	0,0004972	144	0,0004470

Gráfica N° IV.20 Módulo de Elasticidad. Mezcla Patrón $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$

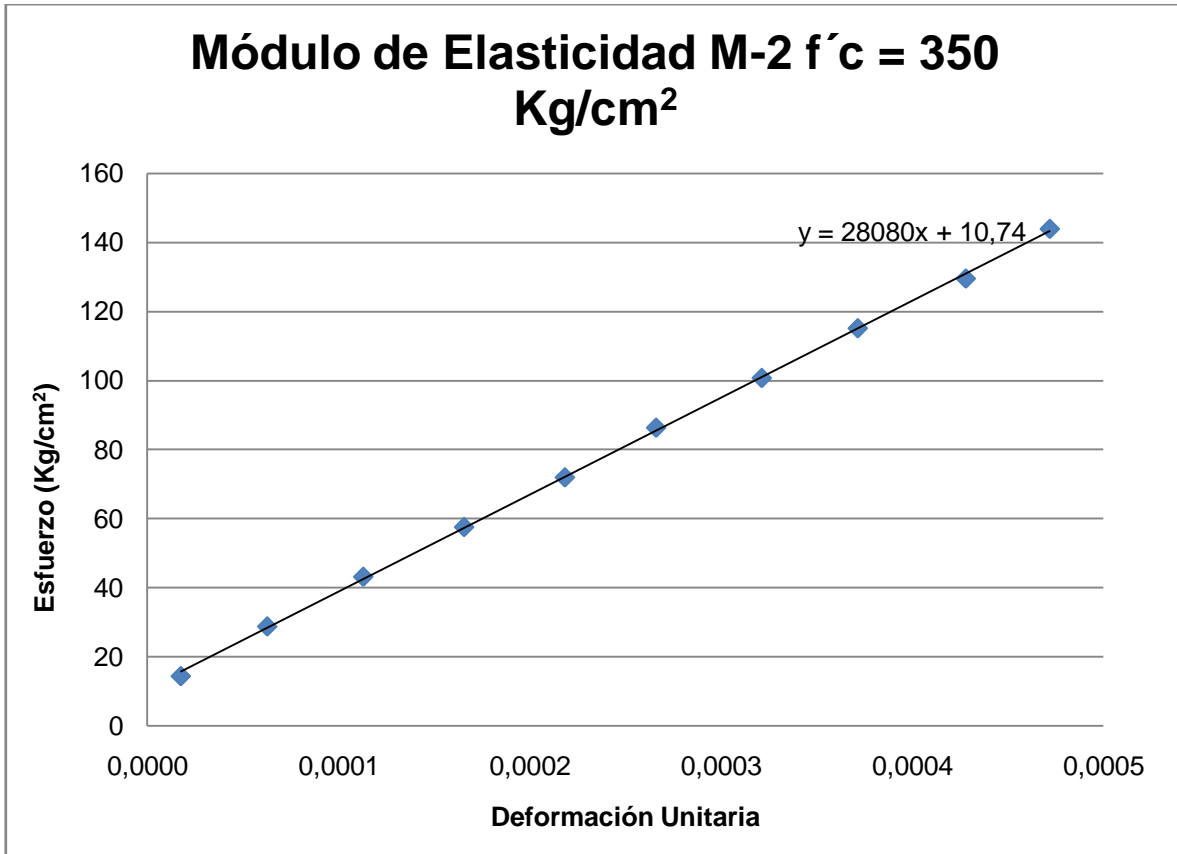


Tabla N° IV.63 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico. Mezcla Patrón $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

	Módulo de Elasticidad Calculado (Kg/cm ²)	Módulo Teórico (Kg/cm ²)
Probeta A	2,95E+05	3,03E+05
Probeta B	3,32E+05	3,05E+05
Promedio	3,12E+05	3,04E+05

Tabla N° IV.64 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla con Sustitución de 5% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-5		
Probeta	A		B	
Carga (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria
2500	14	0,0000301	14	0,0000326
5000	28	0,0000804	28	0,0001180
7500	42	0,0001356	43	0,0001733
10000	56	0,0001908	57	0,0002461
12500	71	0,0002411	71	0,0003239
15000	85	0,0002913	85	0,0003741
17500	99	0,0003415	99	0,0004344
20000	113	0,0003967	114	0,0004871
22500	127	0,0004470	128	0,0005449
25000	141	0,0004972	142	0,0006027

**Gráfica N° IV.21 Módulo de Elasticidad. Mezcla con Sustitución de 5%
f'c=350 Kg/cm²**

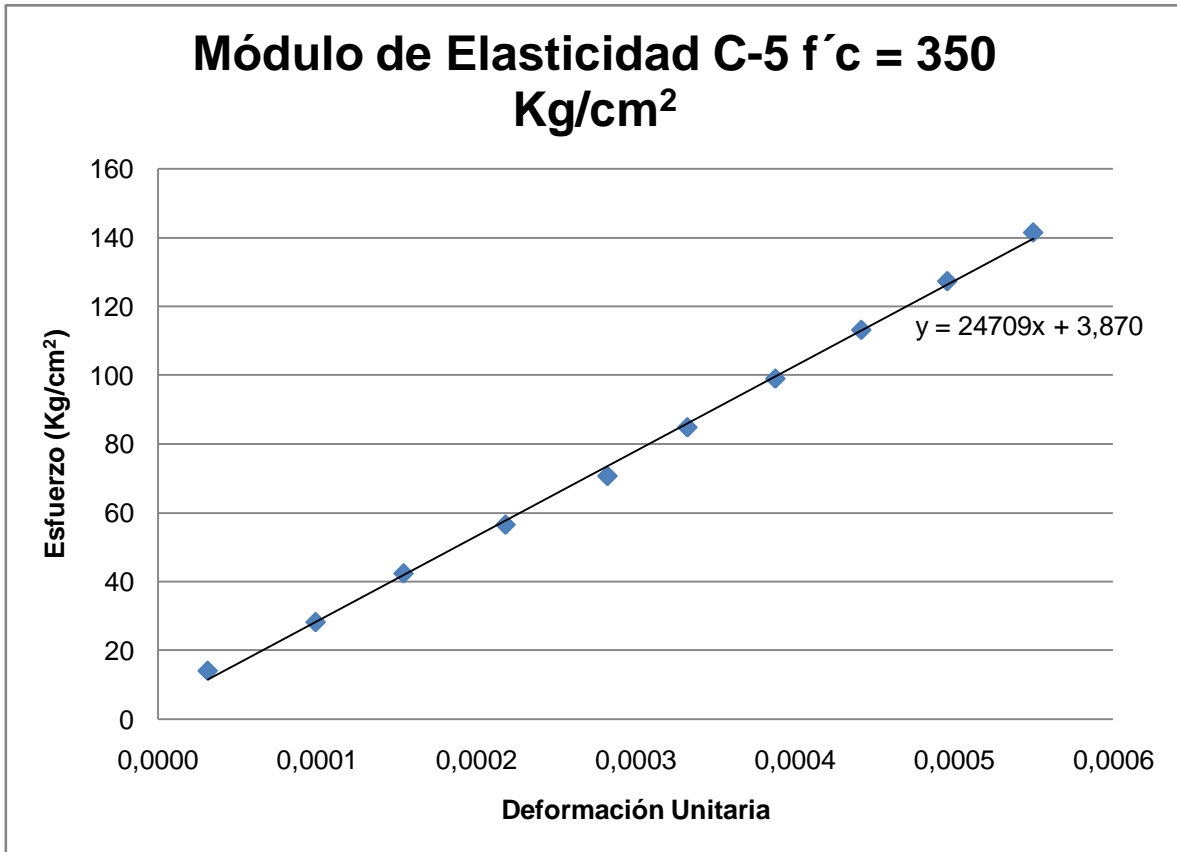


Tabla N° IV.65 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico Mezcla con Sustitución de 5% f'c=350 Kg/cm²

	Módulo de Elasticidad Calculado (Kg/cm ²)	Módulo Teórico (Kg/cm ²)
Probeta A	3,00E+05	2,96E+05
Probeta B	2,51E+05	3,01E+05
Promedio	2,73E+05	2,99E+05

Tabla N° IV.66 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla con Sustitución de 10% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-10		
Probeta	A		B	
Carga (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm^2)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Kg/cm^2)	Deformación Unitaria
2500	14	0,0000100	14	0,0000151
5000	29	0,0000653	28	0,0000804
7500	43	0,0001456	42	0,0001557
10000	57	0,0002109	56	0,0002260
12500	71	0,0002812	70	0,0003013
15000	86	0,0003515	84	0,0003666
17500	100	0,0004219	98	0,0004369
20000	114	0,0004871	112	0,0005072
22500	129	0,0005474	126	0,0005625
25000	143	0,0006027	140	0,0006227

**Gráfica Nº IV.22 Módulo de Elasticidad. Mezcla con Sustitución de 10%
f'c=350 Kg/cm²**

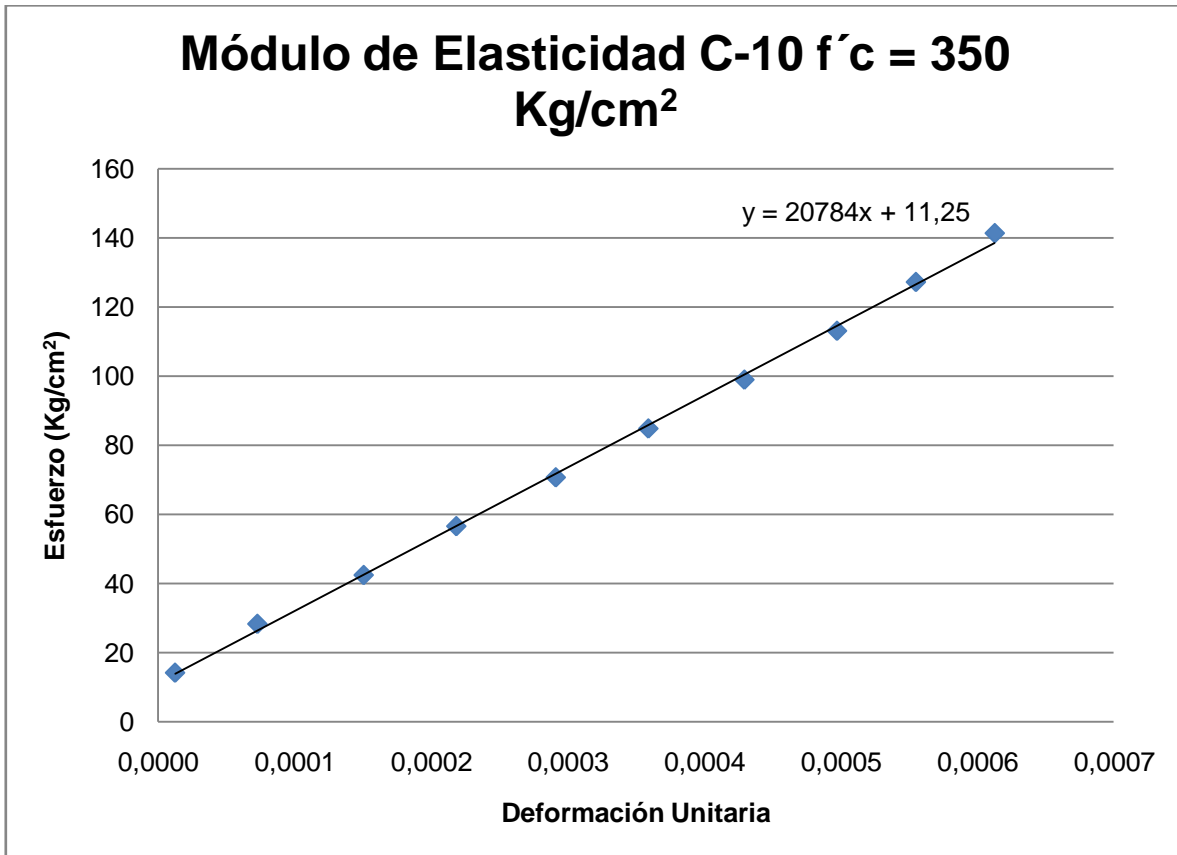


Tabla Nº IV.67 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico Mezcla con Sustitución de 10% f'c=350 Kg/cm²

	Módulo de Elasticidad Calculado (Kg/cm ²)	Módulo Teórico (Kg/cm ²)
Probeta A	2,34E+05	2,94E+05
Probeta B	2,25E+05	2,86E+05
Promedio	2,29E+05	2,90E+05

Tabla N° IV.68 Resultados del Ensayo de Módulo de Elasticidad de la Probeta A y B. Mezcla con Sustitución de 15% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-15		
Probeta	A		B	
Carga (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria
2500	14	0,0000552	14	0,0000452
5000	29	0,0001456	29	0,0001356
7500	43	0,0002561	43	0,0002360
10000	57	0,0003566	58	0,0003315
12500	71	0,0004620	72	0,0004369
15000	86	0,0005575	87	0,0005374
17500	100	0,0006529	101	0,0006328
20000	114	0,0007433	116	0,0007232
22500	129	0,0008387	130	0,0008086
25000	143	0,0008990	144	0,0008939

**Gráfica N° IV.23 Módulo de Elasticidad. Mezcla con Sustitución de 15%
f'c=350 Kg/cm²**

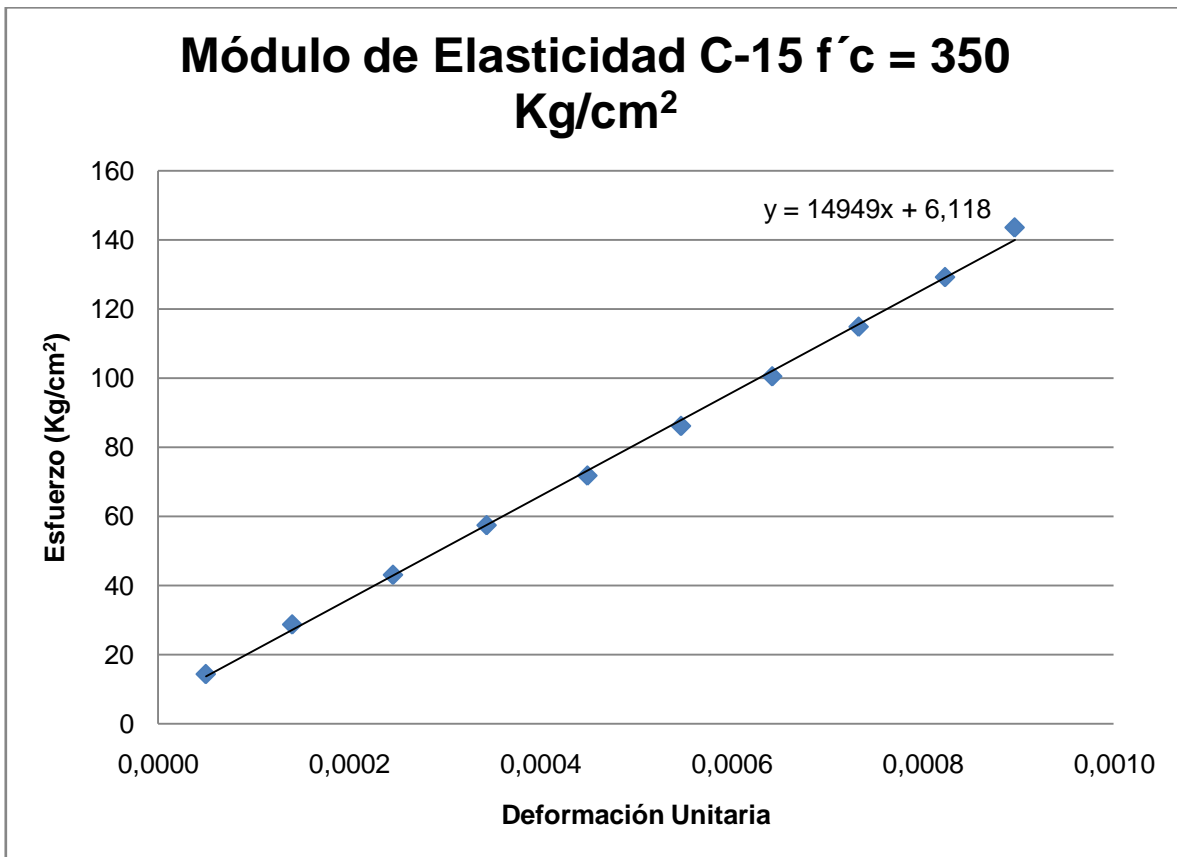


Tabla N° IV.69 Módulo de Elasticidad Calculado y Teórico Mezcla con Sustitución de 10% f'c=350 Kg/cm²

	Módulo de Elasticidad Calculado (Kg/cm ²)	Módulo Teórico (Kg/cm ²)
Probeta A	1,62E+05	2,76E+05
Probeta B	1,62E+05	2,77E+05
Promedio	1,62E+05	2,76E+05

IV.1.10 Peso Unitario

Los resultados del cálculo del peso unitario de las probetas de concreto ensayadas se presentan en las tablas y gráficas mostradas a continuación. La Gráfica N° IV.32 y N° IV.33 muestra una comparación de los resultados obtenidos en cada mezcla para la resistencia de diseño de 280 Kg/cm² y 350 Kg/cm² respectivamente.

Tabla N° IV.70 Peso Unitario. Mezcla Patrón $f'c=280$ Kg/cm²

$f'c = 280$ Kg/cm ²		Mezcla: M-1				
Cilindro	Ø (cm)	\bar{X} (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)
1	14,91	14,89	30,06	12,564	174,21	2399,19
	14,88					
	14,89					
2	14,92	14,95	30,30	12,796	175,54	2405,80
	14,99					
	14,94					
3	14,95	14,97	30,31	12,685	175,93	2378,84
	14,96					
	14,99					
4	14,88	14,93	30,15	12,610	174,99	2390,08
	14,96					
	14,94					
5	14,92	14,97	30,16	12,586	176,01	2370,95
	14,98					
	15,01					
6	14,92	14,98	30,27	12,829	176,17	2405,80
	14,99					
	15,02					
7	14,81	14,84	29,97	12,505	173,04	2411,26
	14,87					
	14,85					
8	14,91	14,98	30,28	12,718	176,24	2383,14
	15,04					
	14,99					
9	14,94	14,96	30,12	12,753	175,70	2409,89
	14,96					
	14,97					
10	14,90	14,92	30,01	12,590	174,91	2398,49
	14,93					
	14,94					
11 (A)	15,15	15,04	30,08	12,689	177,66	2374,46
	14,95					
	15,02					
12 (B)	14,84	14,87	30,34	12,734	173,74	2415,70
	14,83					
	14,95					

Tabla N° IV.71 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas de Mezcla Patrón $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

\bar{X} (Kg/m ³)	2395
--------------------------------	------

Gráfica N° IV.24 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla Patrón $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

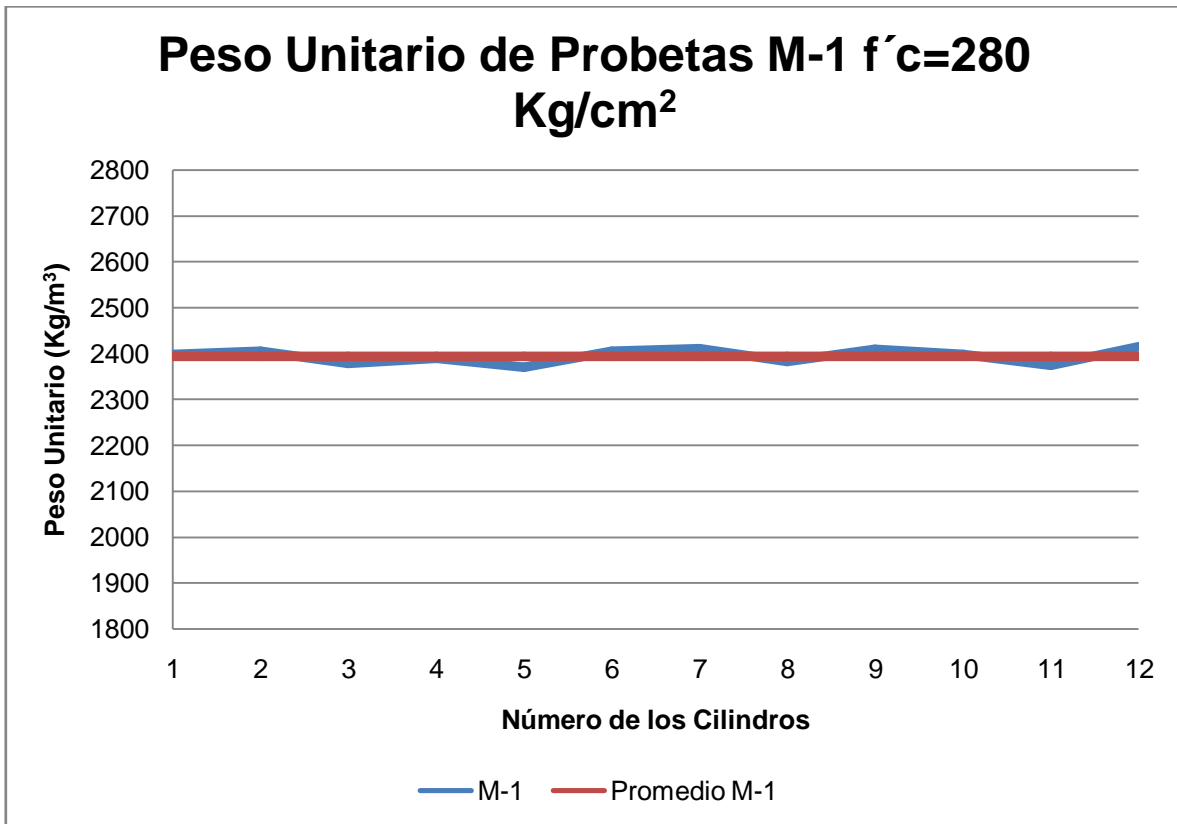


Tabla N° IV.72 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla con sustitución de 5% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-5			Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)
Cilindro	Ø (cm)	\bar{X} (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)		
1	14,93	14,98	30,50	12,849	176,17	2391,38
	14,99					
	15,01					
2	15,11	15,02	30,17	12,650	177,19	2366,39
	14,97					
	14,98					
3	14,95	14,98	30,25	12,670	176,24	2376,50
	15,00					
	14,99					
4	14,89	14,93	30,23	12,671	174,99	2395,28
	14,95					
	14,94					
5	15,02	14,99	30,08	12,665	176,48	2385,80
	14,99					
	14,96					
6	14,89	14,92	29,99	12,587	174,76	2401,66
	14,85					
	15,01					
7	15,04	15,03	30,08	12,680	177,42	2375,93
	14,94					
	15,11					
8	14,99	14,94	30,05	12,544	175,38	2380,16
	14,88					
	14,96					
9	14,93	14,99	30,14	12,703	176,40	2389,26
	14,97					
	15,06					
10	14,97	14,96	30,28	12,642	175,77	2375,24
	14,95					
	14,96					
11 (A)	14,91	14,97	30,19	12,68	175,93	2387,35
	14,95					
	15,04					
12 (B)	14,94	14,96	30,22	12,567	175,77	2365,83
	14,96					
	14,98					

Tabla N° IV.73 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas con sustitución de 5% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

\bar{X} (Kg/m ³)	2383
--------------------------------	------

Gráfica N° IV.25 Peso Unitario de las Probetas con Sustitución de 5% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

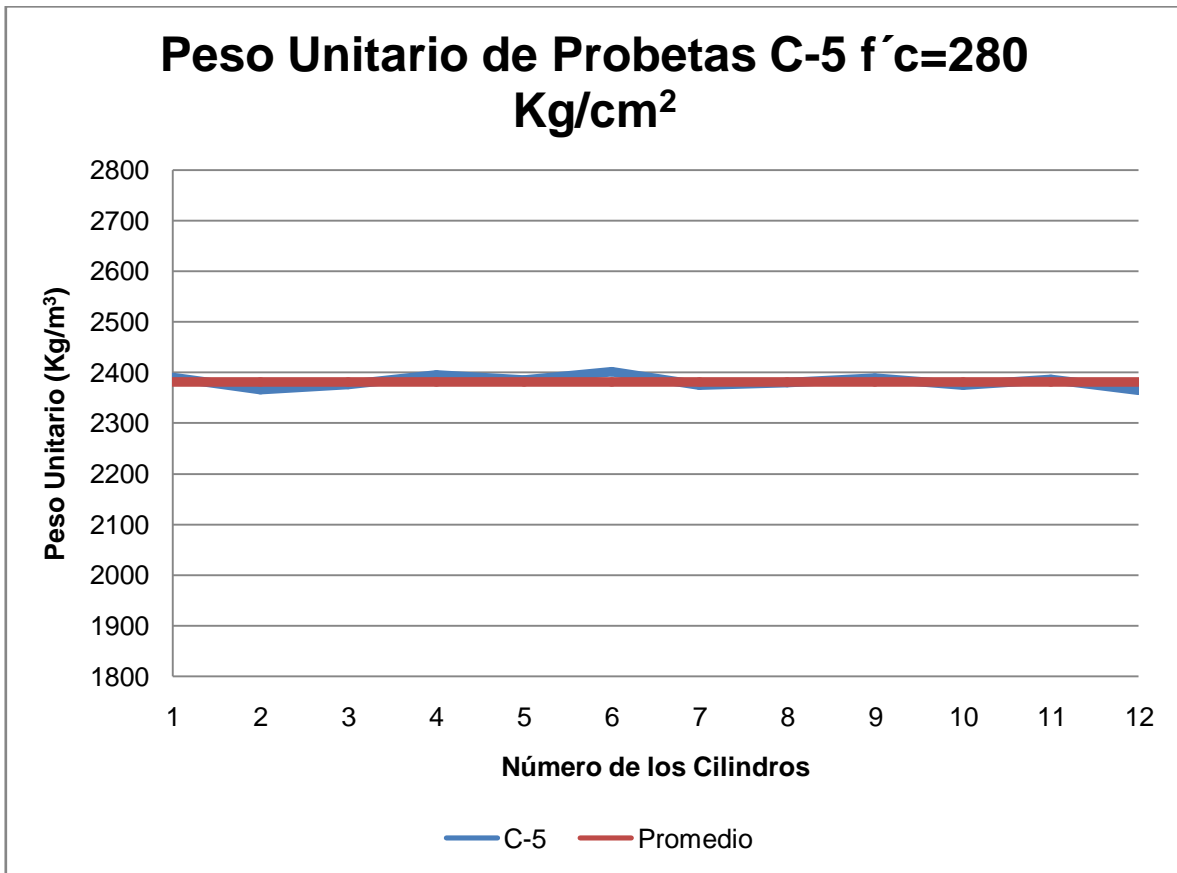


Tabla N° IV.74 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla con sustitución de 10% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-10				
Cilindro	\varnothing (cm)	\bar{X} (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)
1	15,00	15,00	30,26	12,502	176,79	2336,93
	15,02					
	14,99					
2	14,91	14,96	30,08	12,508	175,85	2364,63
	15,00					
	14,98					
3	14,96	14,97	30,11	12,522	175,93	2363,87
	14,95					
	14,99					
4	14,97	15,02	30,29	12,675	177,19	2361,67
	15,06					
	15,03					
5	14,96	14,94	30,04	12,472	175,30	2368,35
	14,92					
	14,94					
6	14,85	14,92	30,09	12,490	174,76	2375,24
	14,93					
	14,97					
7	14,94	14,93	29,97	12,412	175,07	2365,62
	14,93					
	14,92					
8	14,88	14,94	30,10	12,504	175,23	2370,75
	14,95					
	14,98					
9	14,92	14,91	30,23	12,573	174,52	2383,14
	14,91					
	14,89					
10	14,91	14,91	30,20	12,589	174,60	2387,48
	14,89					
	14,93					
11 (A)	14,88	14,90	30,26	12,563	174,37	2381,01
	14,92					
	14,90					
12 (A)	15,01	14,95	30,5	12,732	175,62	2377,01
	14,93					
	14,92					

Tabla N° IV.75 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas con sustitución de 10% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

\bar{X} (Kg/m ³)	2370
--------------------------------	------

Gráfica N° IV.26 Peso Unitario de las Probetas con Sustitución de 10% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

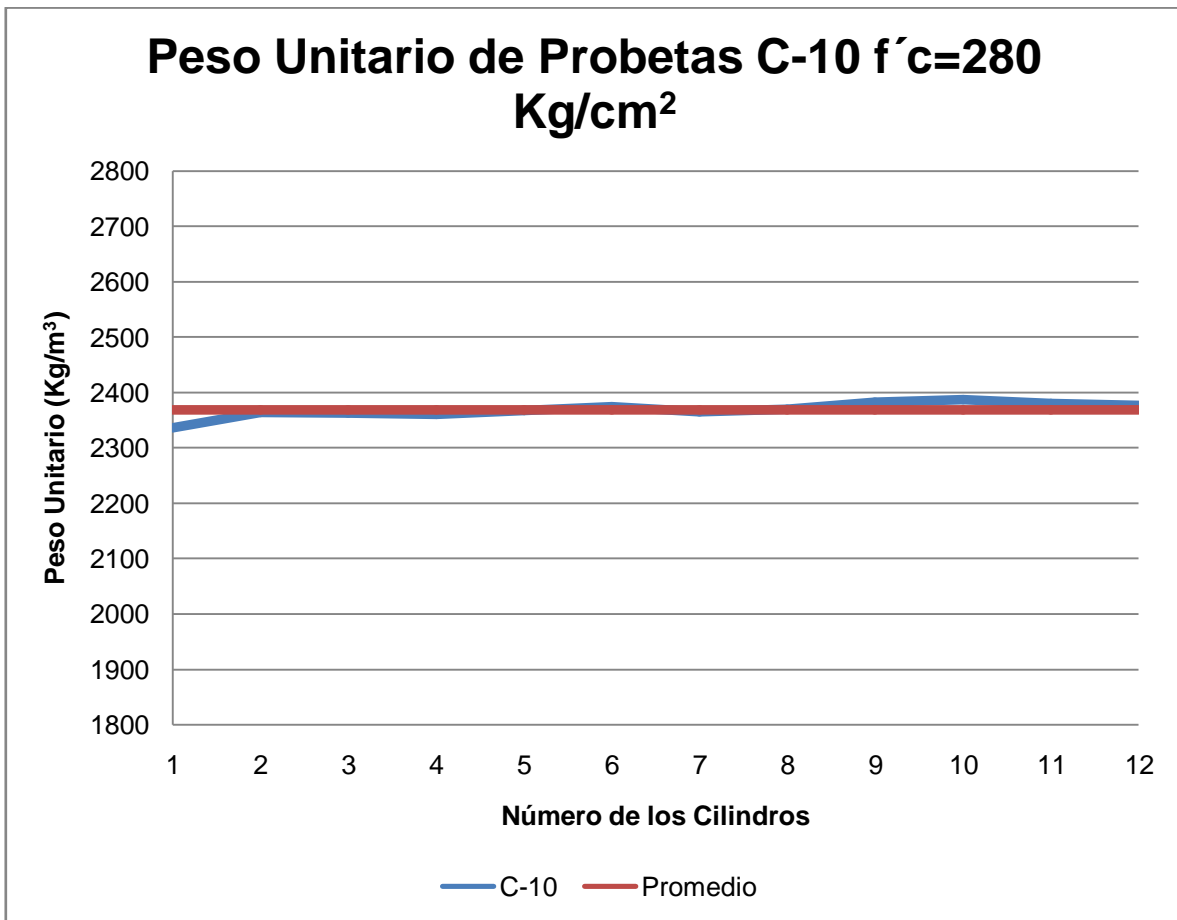


Tabla N° IV.76 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla con sustitución de 15% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-15				
Cilindro	\varnothing (cm)	\bar{x} (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)
1	14,93	14,98	30,11	12,423	176,24	2341,00
	15,14					
	14,87					
2	14,99	15,02	30,15	12,442	177,11	2330,05
	15,05					
	15,01					
3	14,90	14,93	30,18	12,497	174,99	2366,31
	14,94					
	14,94					
4	14,91	14,96	30,16	12,520	175,77	2361,67
	14,99					
	14,98					
5	14,94	14,96	30,22	12,550	175,77	2362,63
	14,96					
	14,98					
6	15,08	15,10	30,31	12,641	179,00	2329,93
	15,12					
	15,09					
7	14,87	14,92	30,19	12,455	174,83	2359,68
	14,95					
	14,94					
8	14,82	14,92	30,11	12,430	174,91	2360,15
	14,96					
	14,99					
9	14,88	14,91	30,06	12,390	174,60	2360,68
	14,91					
	14,94					
10	14,94	14,92	30,23	12,536	174,76	2372,94
	14,90					
	14,91					
11 (A)	14,99	14,99	30,23	12,601	176,56	2360,92
	14,99					
	15,00					
12 (B)	14,92	14,88	30,00	12,358	173,98	2367,75
	14,89					
	14,84					

Tabla N° IV.77 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas con sustitución de 15% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

\bar{X} (Kg/m ³)	2356
--------------------------------	------

Gráfica N° IV.27 Peso Unitario de las Probetas con Sustitución de 15% $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

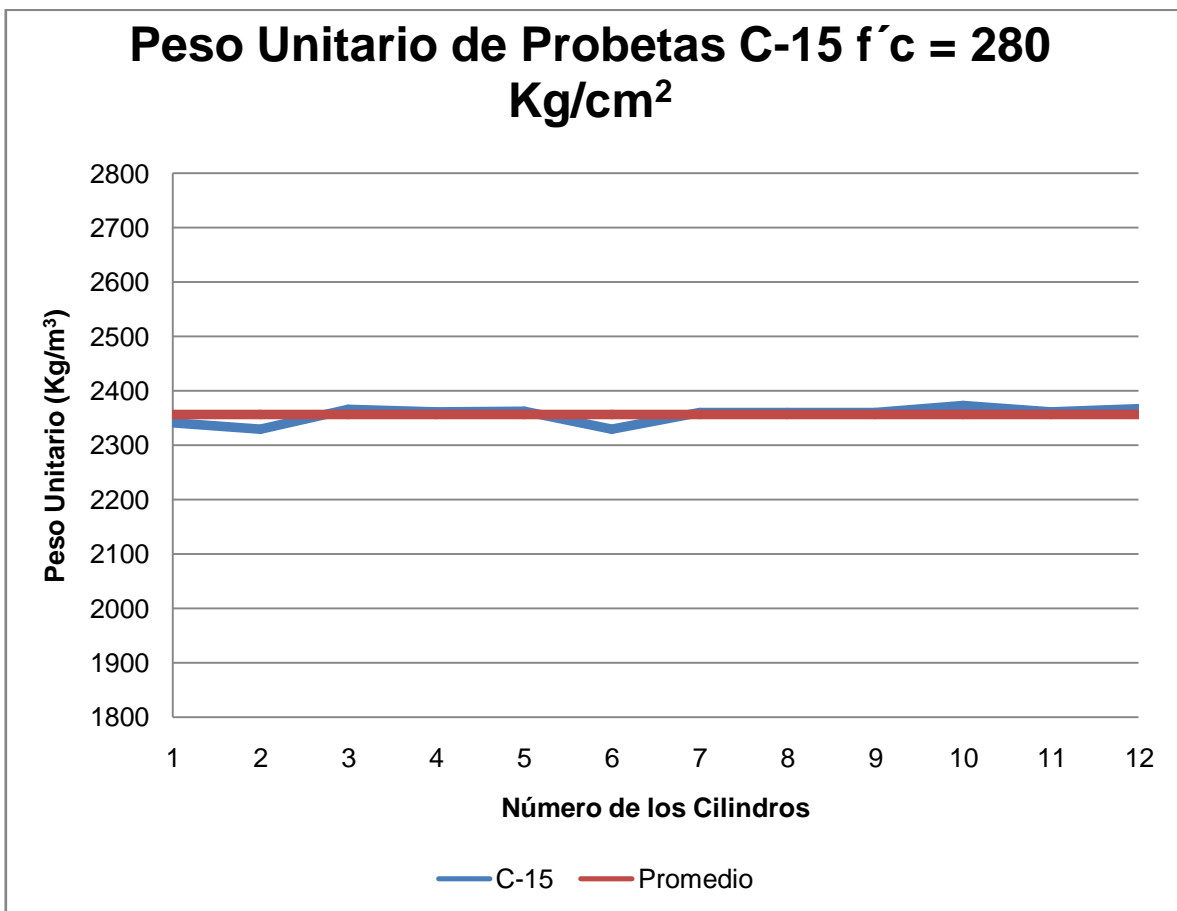


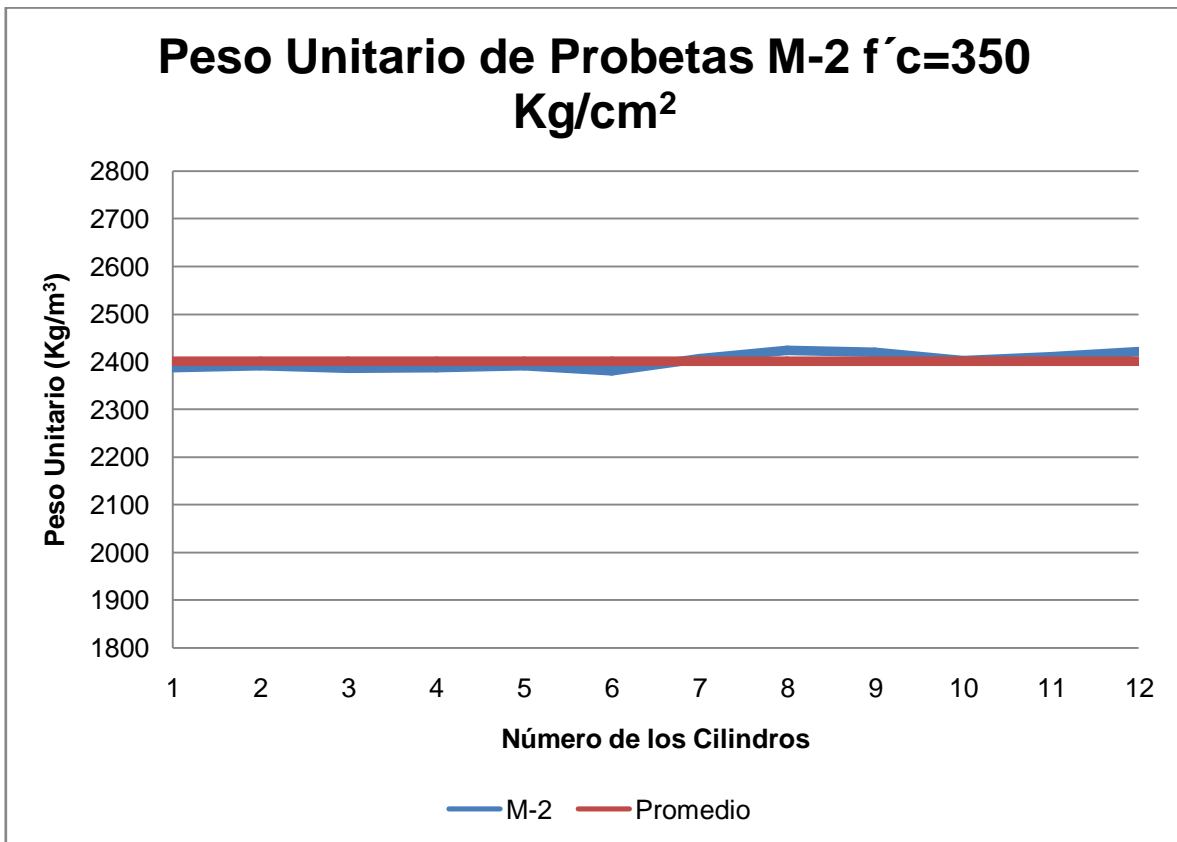
Tabla N° IV.78 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla Patrón $f'c=350$ Kg/cm²

$f'c = 350$ Kg/cm ²		Mezcla: M-2		Área (cm ²)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)
Cilindro	Ø (cm)	\bar{X} (cm)	Altura (cm)			
1	14,89	14,95	30,24	12,667	175,46	2387,34
	14,97					
	14,98					
2	14,79	14,91	30,23	12,628	174,60	2392,50
	15,02					
	14,92					
3	15,11	14,97	30,11	12,642	175,93	2386,52
	14,88					
	14,91					
4	14,89	14,95	30,28	12,696	175,54	2388,57
	14,97					
	14,99					
5	14,91	14,97	30,31	12,754	175,93	2391,78
	15,01					
	14,98					
6	15,12	15,02	30,03	12,667	177,19	2380,61
	15,03					
	14,91					
7	14,98	14,92	30,38	12,787	174,83	2407,43
	14,95					
	14,83					
8	14,91	14,92	30,14	12,774	174,83	2424,13
	14,87					
	14,98					
9	14,83	14,85	30,13	12,621	173,12	2419,62
	14,89					
	14,82					
10	14,98	14,96	30,19	12,744	175,70	2402,61
	14,93					
	14,96					
12 (A)	14,81	14,89	30,14	12,645	174,05	2410,41
	14,96					
	14,89					
13 (B)	14,83	14,85	30,25	12,693	173,28	2421,59
	14,88					
	14,85					

Tabla N° IV.79 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas de Mezcla Patrón $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

\bar{X} (Kg/m ³)	2401
--------------------------------	------

Gráfica N° IV.28 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla Patrón $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$



**Tabla Nº IV.80 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla con sustitución de 5%
 $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$**

$f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-5				
Cilindro	\varnothing (cm)	\bar{X} (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)
1	14,98	14,92	30,01	12,680	174,83	2416,72
	14,97					
	14,81					
2	15,05	15,03	30,11	12,721	177,34	2382,29
	15,02					
	15,01					
3	14,91	14,98	30,20	12,680	176,17	2383,37
	14,98					
	15,04					
4	14,95	14,99	30,27	12,531	176,40	2346,79
	15,01					
	15,00					
5	14,94	14,90	30,23	12,773	174,44	2422,13
	14,89					
	14,88					
6	15,10	14,98	30,37	12,841	176,24	2399,06
	14,96					
	14,88					
7	14,85	14,90	30,15	12,535	174,29	2385,44
	14,90					
	14,94					
8	14,92	14,96	30,04	12,555	175,70	2378,80
	14,95					
	15,00					
9	14,96	14,98	30,16	12,660	176,32	2380,65
	14,99					
	15,00					
10	14,85	14,87	30,05	12,594	173,74	2412,20
	14,87					
	14,90					
11 (A)	15,00	15,02	30,13	12,671	177,26	2372,41
	15,03					
	15,04					
12 (A)	14,97	14,97	30,1	12,702	175,93	2398,64
	14,98					
	14,95					

Tabla N° IV.81 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas con sustitución de 5% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

\bar{X} (Kg/m ³)	2390
--------------------------------	------

Gráfica N° IV.29 Peso Unitario de las Probetas con Sustitución de 5% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

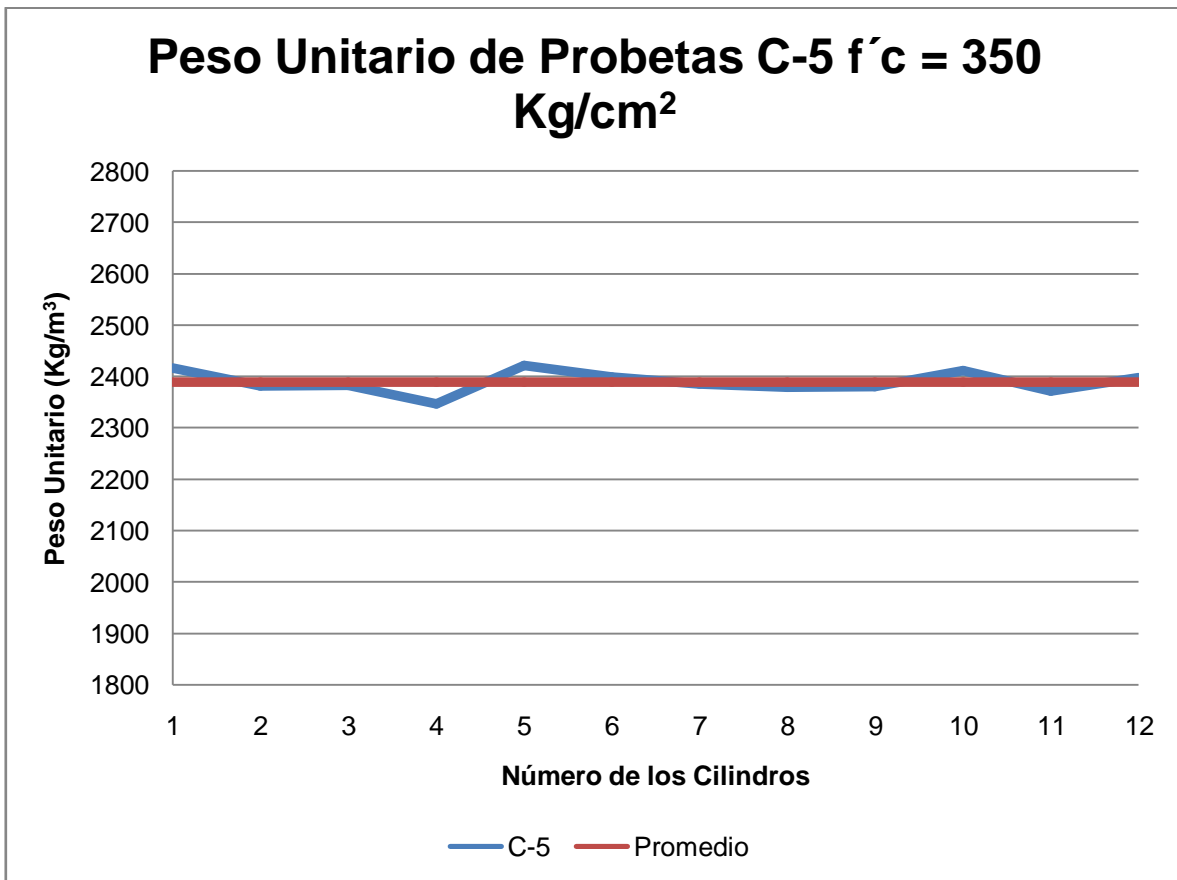


Tabla N° IV.82 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla con sustitución de 10% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-10				
Cilindro	\varnothing (cm)	\bar{x} (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)
1	14,94	14,95	30,09	12,394	175,54	2346,48
	14,95					
	14,96					
2	15,10	15,10	30,18	12,397	179,00	2294,80
	15,11					
	15,08					
3	15,02	15,03	30,14	12,441	177,50	2325,47
	15,03					
	15,05					
4	14,90	14,95	30,05	12,391	175,46	2350,08
	15,03					
	14,91					
5	14,95	15,06	30,210	12,541	178,05	2331,49
	15,13					
	15,09					
6	14,88	14,94	30,440	12,515	175,30	2345,28
	15,11					
	14,83					
7	15,07	14,99	30,22	12,412	176,56	2326,27
	14,98					
	14,93					
8	14,92	14,99	30,11	12,504	176,56	2352,08
	14,85					
	15,21					
9	14,93	15,08	30,34	12,573	178,68	2319,20
	15,01					
	15,31					
10	15,11	14,99	30,29	12,589	176,48	2355,04
	14,92					
	14,94					
11 (A)	14,91	14,92	30,2	12,452	174,83	2358,33
	14,92					
	14,93					
12 (B)	14,99	15,09	30,14	12,492	178,92	2316,48
	15,10					
	15,19					

Tabla N° IV.83 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas con sustitución de 10% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

\bar{X} (Kg/m ³)	2335
--------------------------------	------

Gráfica N° IV.30 Peso Unitario de las Probetas con Sustitución de 10% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

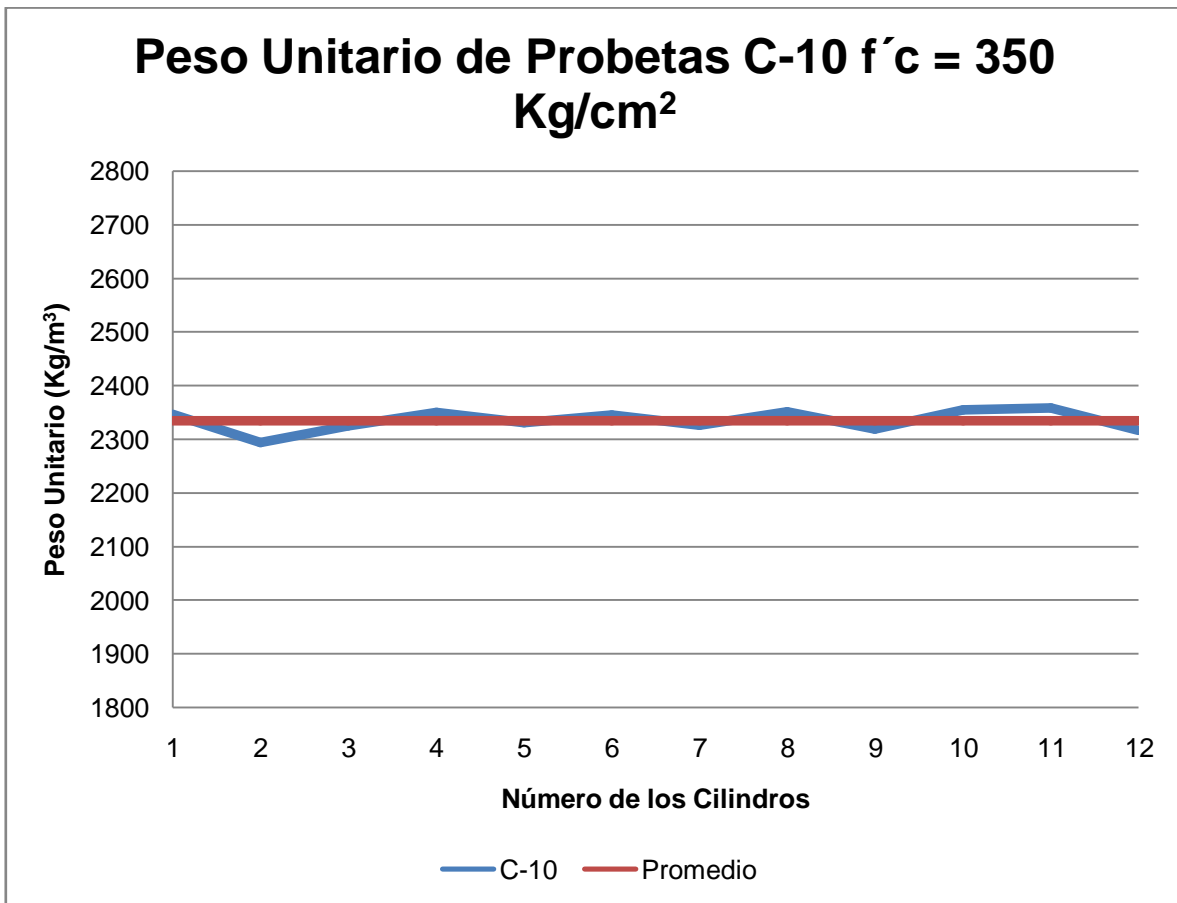


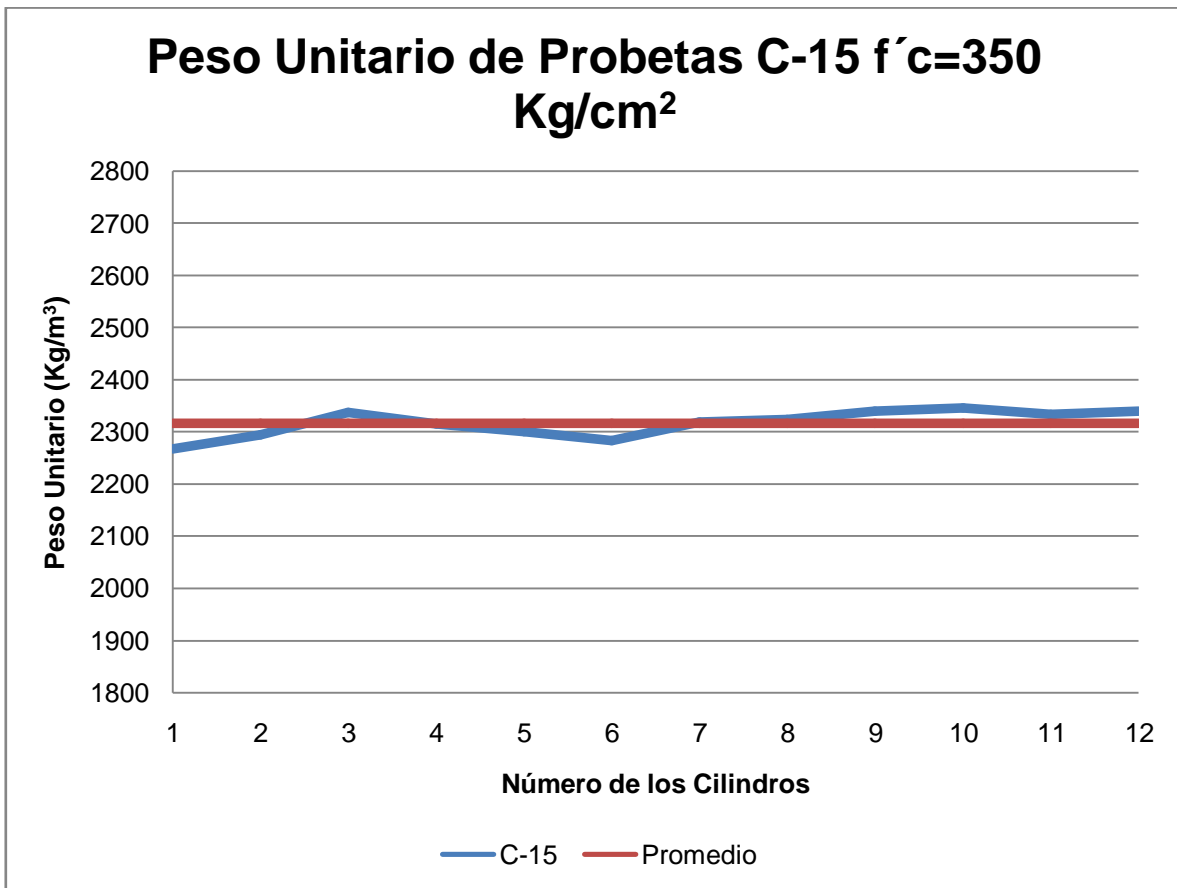
Tabla N° IV.84 Peso Unitario de las Probetas de Mezcla con sustitución de 15% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

$f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$		Mezcla: C-15				
Cilindro	\varnothing (cm)	\bar{X} (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Peso (Kg)	Peso Unitario (Kg/m ³)
1	15,13	15,06	30,21	12,205	178,21	2267,02
	15,09					
	14,97					
2	15,11	15,06	30,32	12,387	178,05	2294,51
	15,02					
	15,04					
3	14,98	14,93	30,08	12,317	175,15	2337,89
	14,99					
	14,83					
4	14,98	14,98	30,21	12,331	176,24	2315,98
	14,99					
	14,97					
5	14,93	14,98	30,25	12,268	176,24	2301,10
	15,00					
	15,01					
6	15,01	15,05	30,14	12,248	177,97	2283,32
	15,05					
	15,10					
7	14,91	14,94	30,16	12,261	175,30	2319,01
	14,95					
	14,96					
8	14,84	14,90	30,15	12,214	174,29	2324,36
	14,89					
	14,96					
9	14,82	14,90	30,22	12,325	174,29	2340,05
	14,94					
	14,93					
10	14,87	14,87	30,19	12,305	173,74	2345,91
	14,89					
	14,86					
11 (A)	14,90	14,93	30,17	12,33	175,07	2334,42
	14,94					
	14,95					
12 (B)	14,85	14,85	30,25	12,255	173,12	2340,13
	14,78					
	14,91					

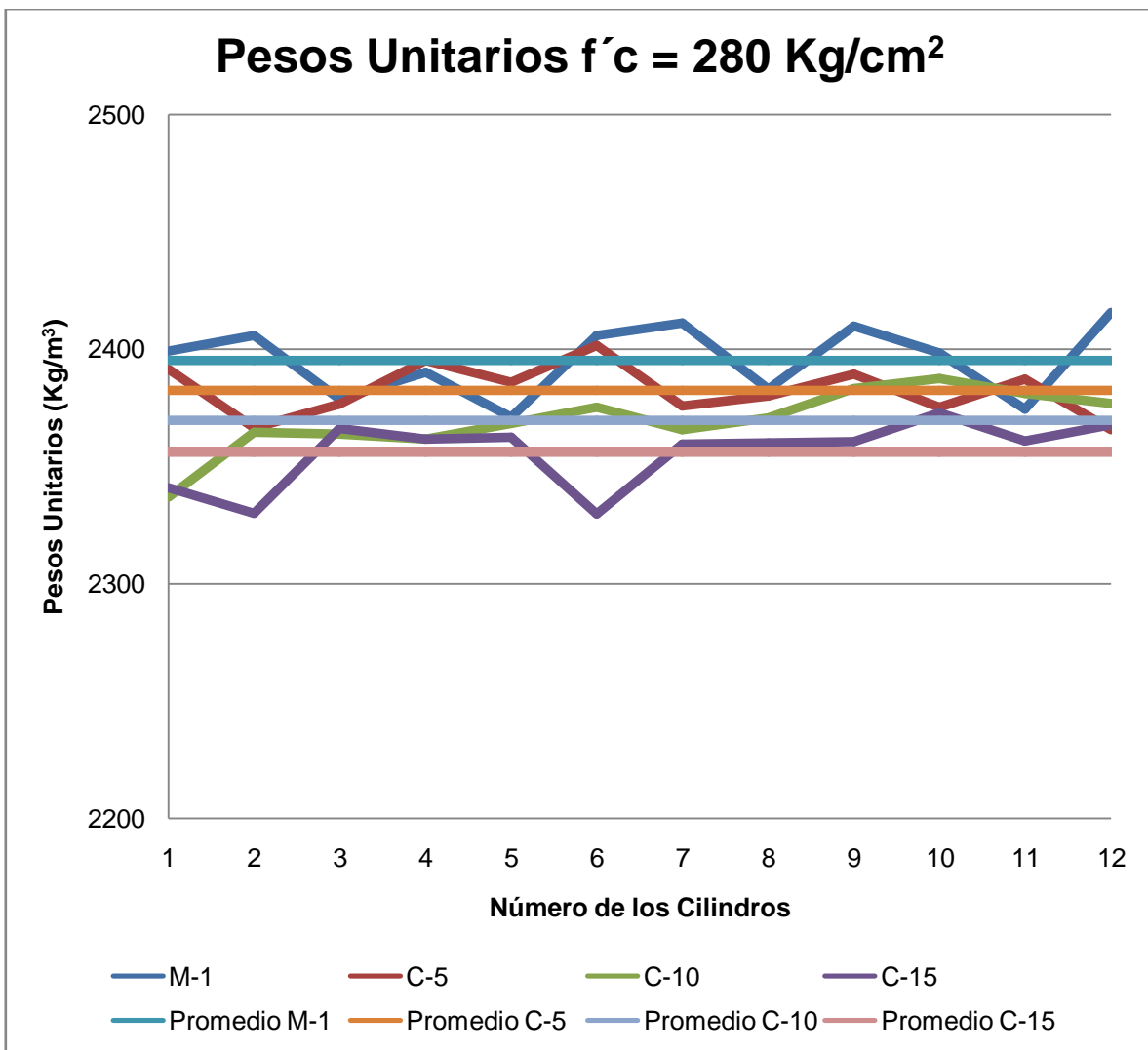
Tabla N° IV.85 Valor Promedio del Peso Unitario de las Probetas con sustitución de 15% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$

\bar{X} (Kg/m ³)	2317
--------------------------------	------

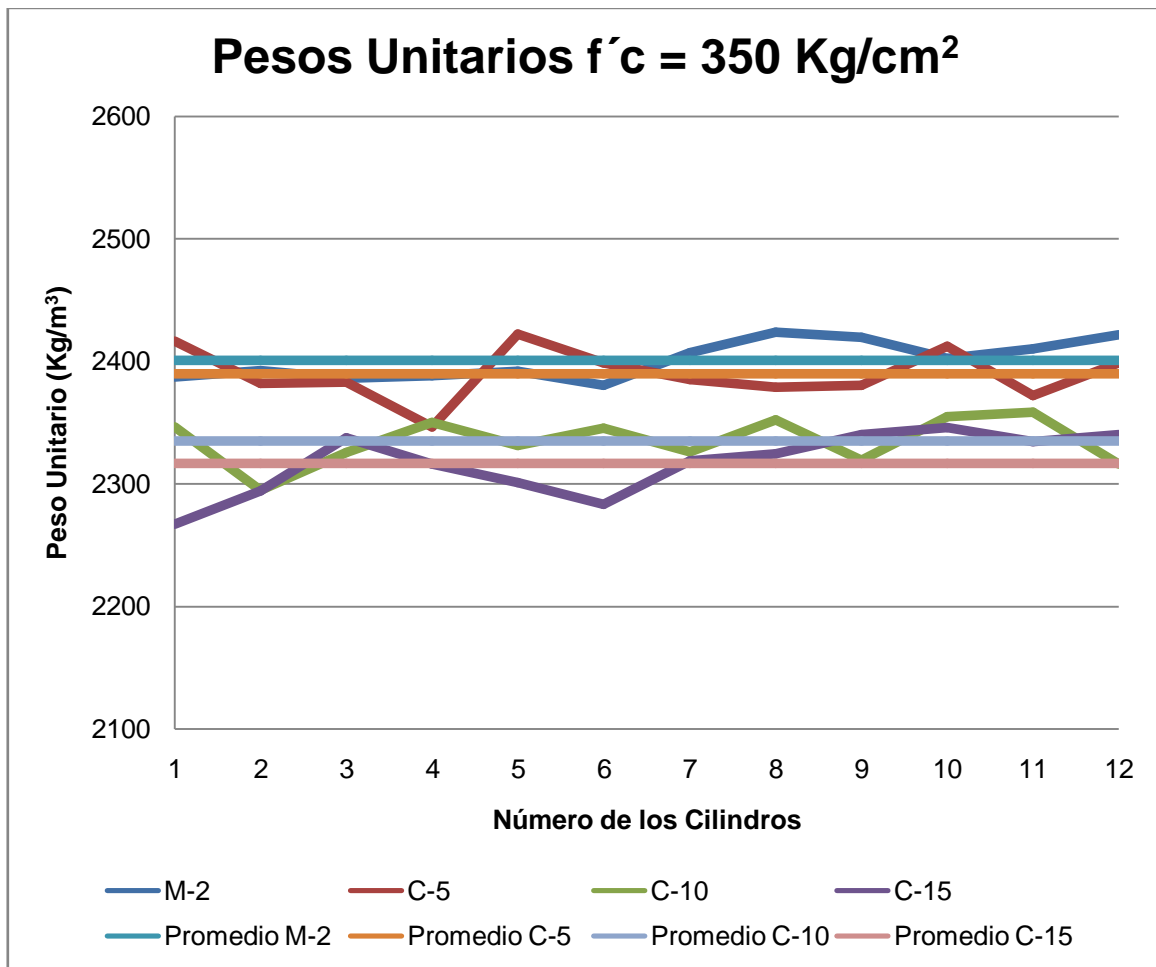
Gráfica N° IV.31 Peso Unitario de las Probetas con Sustitución de 15% $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$



Gráfica N° IV.32 Comparación de Pesos Unitarios en Mezclas de Resistencia $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$



Gráfica N° IV.33 Comparación de Pesos Unitarios en Mezclas de Resistencia $f'c=350 \text{ Kg/cm}^2$



IV.1.11 Coloraciones Presentadas en las Probetas de Concreto

La Tabla N° presenta la coloración típica de una probeta de concreto convencional y una probeta con sustitución de 15% de ceniza volante, en un estado húmedo, luego de haber sido sacadas del curado y en un estado dejadas al aire libre por 24 horas.

Tabla N° IV.86 Coloraciones de las Probetas de Concreto

Probeta	Estado Húmedo	Estado Seco	Observaciones
M-2 350			La coloración en estado húmedo es de un gris medio. En estado seco presenta un color gris claro
C-15 350			La coloración en estado húmedo es gris oscuro, la cual fue la más pronunciada en esta mezcla por tener mayor porcentaje de ceniza. En estado seco presenta un color gris claro, igual que la probeta patrón

IV.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

IV.2.1 Granulometría

IV.2.1.1 Agregado Grueso

La muestra de agregado grueso evaluada no se ajusta a los límites granulométricos establecidos en la Norma COVENIN 277-2000 debido a que presenta exceso de material pasante en los tamices $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ " y $\frac{1}{4}$ ". Dicha muestra presenta mayor cantidad de finos de los que especifica en la Norma para la piedra N°1. Sin embargo el exceso de material pasante en los tamices antes mencionados no es significativo con respecto a los valores del límite superior establecidos en la Norma, razón por la cual el material es aceptado para este Trabajo Especial de Grado.

IV.2.1.2 Agregado Fino

La muestra de agregado fino evaluada no se ajusta a los límites granulométricos establecidos en la Norma COVENIN 277-2000 debido a que presenta un déficit de material pasante en los tamices #4, #8 y #16. La muestra no obedece el criterio 3.1.1.2 de la Norma, el cual indica que el agregado fino no debe tener más de 25% retenido entre dos tamices consecutivos. Dicha muestra presenta mayor cantidad de gruesos de los que se especifica en la Norma para arena, es por ello que no cumple con los requisitos de calidad establecidos.

El módulo de finura obtenido indica que la muestra es una arena muy gruesa, debido a que se encuentra en un valor por encima de 3, el cual no se considera adecuado para la producción de concreto normalizado.

Los valores de déficit de material pasante en los tamices antes mencionados no se alejan significativamente del límite inferior establecido en la Norma, razón por la cual el material es aceptado para este Trabajo Especial de Grado.

IV.2.2 Densidad, Absorción y Contenido de Humedad

IV.2.2.1 Agregado Grueso

Los valores obtenidos de densidad para la muestra de agregado grueso corresponden con los valores usuales indicados en el “Manual del Concreto Estructural” de J. Porrero, los cuales son calculados con agregados empleados habitualmente.

Los valores de absorción y contenido de humedad son bajos, lo cual es muy común en el agregado grueso. La piedra en esta condición afecta poco al agua de mezclado, debido a que el aporte por el agua presente en sus granos externos es muy pequeño; de igual forma el retiro de agua de mezcla debido a la absorción.

IV.2.2.2 Agregado Fino

Los valores obtenidos de densidad para la muestra de agregado fino corresponden con los valores usuales indicados en el “Manual del Concreto Estructural” de Porrero, los cuales son calculados con agregados empleados habitualmente.

Los valores de absorción y contenido de humedad son moderados. Debido a que la arena presenta mayor superficie específica tiende a presentar mayor humedad que el agregado grueso y por ello el agua externa presente afecta de

forma más significativa el agua de mezclado. De igual forma la arena presenta una absorción mayor que retira cantidades más grandes del agua de mezclado.

IV.2.3 Ensayo de Aguja de Vicat

Los resultados obtenidos de las dosificaciones para mezclas de consistencia normal reflejan una alta absorción de agua por parte de las cenizas volantes en comparación con el agua utilizada en la mezcla patrón.

La Gráfica N° IV.3 refleja un comportamiento similar en el tiempo de fraguado para la mezcla patrón y para la de sustitución de cenizas de 5% y 10%. La mezcla con 15% de sustitución de cenizas volantes muestra un tiempo de fraguado mucho mayor.

El tiempo de fraguado de la mezcla patrón y la de sustitución de 5% es de 125 minutos, la mezcla con sustitución de 10% presento una disminución de 3 minutos, sin embargo se considera que el tiempo de fraguado varia muy poco con una sustitución hasta de 10% de ceniza volante. En la mezcla con sustitución de 15% se obtuvo un tiempo de fraguado de 148 minutos, lo que indica que a partir de un porcentaje mayor de 15% de sustitución se producen cambios en el proceso de hidratación del material cementante manteniendo la plasticidad de la mezcla por mayor tiempo.

IV.2.4 Ensayo de Cono de Abrams

Los asentamientos obtenidos del ensayo del cono de Abrams para las mezclas de concreto elaboradas, están en un rango de fluidez entre muy baja a media (*Ver Tabla N° II.1*). En obra, generalmente se diseñan mezclas con

asentamientos teóricos altos (3”), sin embargo una variedad de factores ambientales y de calidad de los materiales evitan que este valor sea el mismo en la práctica.

En las mezclas patrones de 280 y 350 Kg/cm² se obtuvo una fluidez media de 5 cm y 5,5 cm respectivamente, a medida de que se aumentó la proporción de ceniza volante, la fluidez fue disminuyendo de media a baja. En las mezclas con sustitución de 5% se obtuvo asentamientos de 2,5 cm y 1 cm. En las mezclas con sustitución de 10% la fluidez disminuyó a muy baja con asentamientos de 0 cm para las dos resistencias evaluadas.

Con una fluidez muy baja la trabajabilidad de la mezcla disminuye considerablemente, por esta razón en sustitución de 15% de cenizas se agregó 3 litros de agua a las mezclas para aumentar la fluidez a baja y media, haciéndola mucho más trabajable.

El comportamiento de la trabajabilidad de las mezclas evidencia que la pérdida de fluidez en las mismas es producto de la alta capacidad de absorción de las cenizas volantes.

IV.2.5 Ensayos de Resistencia a Compresión

Las resistencias promedio obtenidas a la edad de 28 días de las mezclas patrones M-1 (280) y M-2 (350), fueron 283 Kg/cm² y 363 Kg/cm² respectivamente. Estos resultados se ajustan a la desviación estándar estimada en el diseño de mezcla y cumplen con el criterio que indica el “Manual del Concreto Estructural” de J. Porrero, el cual establece que la resistencia obtenida a la edad normativa de 28 días, debe ser igual o mayor que la resistencia de diseño $f'c$ disminuida en 35

Kg/cm², en base a lo anterior se considera que los diseños de mezcla se realizaron de forma correcta.

Las mezclas con 5% de sustitución de cenizas volantes C-5 (280) y C-5 (350), alcanzaron resistencias mayores que sus respectivas mezclas patrones. La mezcla C-5 (280) alcanzó una resistencia de 314 Kg/cm², con un aumento del 9,9% con respecto a la resistencia obtenida a los 28 días en M-1 (280). La mezcla C-5 (350) alcanzó una resistencia de 382 Kg/cm², con un aumento del 5% con respecto a la resistencia obtenida a los 28 días en M-2 (350).

La mezcla con 10% de sustitución de cenizas volantes C-10 (280), presentó una resistencia de 293 Kg/cm², mayor en un 3,4% a la alcanzada en la mezcla patrón a la edad de 28 días. Por otro lado la mezcla C-10 (350), presentó una resistencia de 353 Kg/cm², menor en un 2,7% a la alcanzada en la mezcla patrón a la edad de 28 días.

Las mezclas con 15% de sustitución de cenizas volantes C-15 (280) y C-15 (350), alcanzaron resistencias menores que sus respectivas mezclas patrones, en la mezcla C-15 (280) se alcanzó una resistencia de 255 Kg/cm², con una disminución del 9,9 % con respecto a la resistencia obtenida a los 28 días en M-1 (280), en la mezcla C-15 (350) se alcanzó una resistencia de 318 Kg/cm², con una disminución del 2,8% con respecto a la resistencia obtenida a los 28 días en M-2 (350). Este comportamiento se debe a la adición de agua en el mezclado, ya que a pesar de que la absorción de agua por parte de las cenizas es considerable, afecto significativamente la relación agua- cemento del diseño de mezcla.

En las mezclas C-10 (280) y C-5 (350) se obtuvieron valores de resistencia a una edad de 28 días que no pertenecen a la población estadística, razón por la cual dichos valores fueron rechazados.

La desviación estándar calculada para cada mezcla a la edad de 28 días se encuentra en un tipo de control intermedio según la Tabla XIV.7 del “Manual del concreto estructural” de J. Porrero, para ensayos realizados en un laboratorio. Esto indica un control de calidad intermedio en la realización de los ensayos de compresión, así como en la elaboración de las probetas tomando en cuenta el manejo de los materiales y el mezclado.

En la mayoría de los ensayos de resistencia a la compresión, se obtuvo fallas debido a deformación en los platos, deficiencia del enrase y una combinación entre falla deseable y deficiencia de enrase. Este resultado corresponde con un control de calidad intermedio de los ensayos debido a que nunca se obtuvo una falla a compresión deseable.

La capacidad de absorción de las cenizas volantes induce a que las mezclas tengan un asentamiento menor al de sus patrones medido según el Cono de Abrams, esto produce un aumento de resistencia debido a la reducción de agua en la relación agua-cemento, sin embargo este comportamiento tiene sus limitaciones en cuanto a resistencias de diseño y proporción de cenizas a ser sustituidas.

IV.2.6 Ensayos de Ultrasonido

El promedio de velocidades de pulso ultrasónico obtenido en la mezcla patrón (M-1) de resistencia de diseño 280 Kg/cm² es menor que en la mezcla con sustitución de 5% de ceniza volante; este resultado corresponde con la resistencia obtenida del ensayo de compresión simple.

Este comportamiento no se produce en la mezcla patrón M-2 (350), cuya promedio de velocidades de pulso ultrasónico es mayor que el de la mezcla con sustitución de 5% de ceniza volante y el promedio de resistencias obtenido del ensayo de resistencia a compresión es menor. Este resultado puede ser atribuido a la baja trabajabilidad obtenida en la mezcla C-5 (350), la cual aumenta las probabilidades de aparición de defectos internos en las probetas, como volúmenes de aire o cangrejeras. Además se debe considerar el grado de humedad de las probetas en el momento del ensayo debido a que favorece la velocidad de transmisión.

La velocidad del pulso ultrasónico en la mezcla patrón M-1 (280), es mayor que en la mezcla con sustitución del 10% de cenizas volantes C-10 (280), este resultado no corresponde con el promedio de resistencias obtenido del ensayo de compresión. Por otro lado, en la mezcla M-2 (350) la velocidad del pulso ultrasónico es mayor que la obtenida en la mezcla C-10 (350) con sustitución del 10% de cenizas volantes, este resultado corresponde con la resistencia obtenida del ensayo de compresión.

La mezcla C-10 (280) presenta resistencias mayores que la mezcla patrón M-1 (280), en contraparte, la homogeneidad en la mezcla patrón M-1 (280) es mayor que en la mezcla C-10 (280). De igual forma que la mezcla C-5 (350), este resultado puede deberse a la baja trabajabilidad obtenida la cual aumenta las probabilidades de la aparición de defectos internos como volúmenes de aire o cangrejeras en las probetas. En este caso, también hay que considerar el grado de humedad de las probetas debido a su influencia en la velocidad de transmisión.

La velocidad del pulso ultrasónico en la mezcla patrón M-1 (280), es mayor que en la mezcla C-15 (280) con sustitución del 15% de cenizas volantes, este resultado corresponde con las resistencias obtenidas del ensayo de compresión

simple. De igual forma, en la mezcla M-2 (350) la velocidad del pulso ultrasónico es mayor que la obtenida en la mezcla C-15 (350) con sustitución del 15% de cenizas volantes, correspondiendo con el resultado de la resistencia obtenida del ensayo de compresión.

Los valores de coeficiente de variación de las mezclas se encuentran en un valor alrededor del 2% (Ver Tabla Nº IV.86), el cual es un valor esperado según la Tabla XV.2 “Coeficientes de Variación Inherentes a los Ensayos Indicados” del “Manual del Concreto Estructural” de J. Porrero.

Tabla Nº IV.86 Coeficientes de Variación del Ensayo de Ultrasonido

Mezcla	v (%)
M-1 (280)	1,75
C-5 (280)	1,65
C-10 (280)	2,26
C-15 (280)	2,28
M-2 (350)	0,58
C-5 (350)	1,55
C-10 (350)	1,01
C-15 (350)	2,29

IV.2.7 Ensayos de Módulo de Elasticidad

El promedio del módulo de elasticidad teórico para las dos probetas de la mezcla patrón M-1 (280), fue $2,69E+05$ Kg/cm² y el promedio del módulo teórico para la mezcla C-5 (280), C-10 (280) y C-15 (280) fue $2,66E+05$ Kg/cm², $2,66E+05$ Kg/cm² y $2,52E+05$ Kg/cm², respectivamente. Se observa que en las mezclas con sustitución de cenizas volantes el módulo de elasticidad teórico disminuye debido a la disminución del peso unitario del concreto.

El promedio del módulo de elasticidad calculado para las dos probetas de la mezcla patrón M-1 (280), fue $2,89E+05 \text{ Kg/cm}^2$ y el promedio del módulo de elasticidad calculado para la mezcla C-5 (280), C-10 (280) y C-15 (280) fue $2,63E+05 \text{ Kg/cm}^2$, $2,30E+05 \text{ Kg/cm}^2$, $2,07E+05 \text{ Kg/cm}^2$, respectivamente. Se observa que al igual que el módulo elástico teórico, éste disminuye en las mezclas con sustitución de cenizas volantes, en este caso por el aumento de deformación que existe en las probetas.

El promedio del módulo de elasticidad teórico para las dos probetas de la mezcla patrón M-2 (350), fue $3,04E+05 \text{ Kg/cm}^2$ y el promedio del módulo teórico para la mezcla C-5 (350), C-10 (350) y C-15 (350) fue $2,99E+05 \text{ Kg/cm}^2$, $2,90E+05 \text{ Kg/cm}^2$ y $2,76E+05 \text{ Kg/cm}^2$, respectivamente. Este comportamiento es similar al de las mezclas de resistencia de diseño de 280 Kg/cm^2 , debido a que se produce una disminución del peso unitario a medida que la proporción de cenizas aumenta dando como resultado una disminución del módulo de elasticidad teórico.

El promedio del módulo de elasticidad calculado para las dos probetas de la mezcla patrón M-2 (350), fue $3,12E+05 \text{ Kg/cm}^2$ y el promedio del módulo de elasticidad calculado para la mezcla C-5 (350), C-10 (350) y C-15 (350) fue $2,73E+05 \text{ Kg/cm}^2$, $2,29E+05 \text{ Kg/cm}^2$, $1,62E+05 \text{ Kg/cm}^2$, respectivamente. Se observa un aumento de las deformaciones en las probetas de concreto con sustitución de cenizas volantes.

IV.2.8 Peso Unitario

Los resultados de pesos unitarios para las mezclas patrones de resistencia de diseño 280 Kg/cm^2 y 350 Kg/cm^2 son 2395 Kg/m^3 y 2401 Kg/m^3 , respectivamente. Las dos resistencias de diseño presentan una disminución del peso unitario a

medida que la proporción de ceniza aumenta, como se muestra en las Gráficas N° IV.32 y N° IV.33. Esta tendencia se debe a la proporción de cemento existente en cada una de las mezclas, por lo que a menor cantidad de cemento menor es el peso unitario.

El peso unitario en la mezcla C-5 (280), con 5% de sustitución de cenizas, presenta una disminución de 0,50% con respecto al peso unitario obtenido en la mezcla patrón. De igual forma en la mezcla C-5 (350), con 5% de sustitución de cenizas, presenta una disminución de 0,46% con respecto al peso unitario obtenido en la mezcla patrón.

El peso unitario en la mezcla C-10 (280), con 10% de sustitución de cenizas, presenta una disminución de 1,04% con respecto al peso unitario obtenido en la mezcla patrón. Así mismo en la mezcla C-10 (350), con 10% de sustitución de cenizas, presenta una disminución de 2,75% con respecto al peso unitario obtenido en la mezcla patrón.

El peso unitario en la mezcla C-15 (280), con 15% de sustitución de cenizas, presenta una disminución de 1,63% con respecto al peso unitario obtenido en la mezcla patrón, al igual que en la mezcla C-15 (350), con 15% de sustitución de cenizas donde se presenta una disminución de 3,50%.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 CONCLUSIONES

- La calidad de los agregados que se encuentran en la actualidad en el mercado venezolano no siempre se ajusta a los parámetros que establecen las Normas, por lo que se debe hallar una relación de combinación óptima entre ellos para realizar el diseño de mezcla del concreto.
- La utilización de cenizas volantes en sustitución de cemento no afecta el tiempo de fraguado de la mezcla en proporciones menores al 10%. En una proporción del 15% se produce un aumento del tiempo de fraguado, esto puede ser beneficioso en países de climas cálidos como Venezuela, ya que la mezcla mantiene su plasticidad por un periodo de tiempo extra, permitiendo que las operaciones de transporte, colocación y vibrado del concreto se realicen en lapsos de tiempos mayores.
- El asentamiento de las mezclas de concreto se ve disminuido a medida que existe un aumento de la proporción de cenizas, esto afecta significativamente la trabajabilidad. Las mezclas de concreto con sustitución de cenizas volantes requieren mucha más agua para lograr una consistencia normal, lo cual afecta su relación agua- cemento y en consiguiente su resistencia.

- La sustitución de ceniza en 5% por cemento Portland en mezclas de concreto producen un incremento de la resistencia de diseño, atribuido a las características propias de las cenizas y a la disminución de la relación agua – cemento por parte de la absorción del material. El comportamiento de la resistencia cumple con los criterios de aceptación, por lo que puede ser utilizado en mezclas de resistencias altas.
- Las mezclas de concreto con sustitución de ceniza de 10% por cemento Portland cumplen con la resistencia de diseño y con los criterios de aceptación, por lo que puede ser utilizado en mezclas de resistencias altas.
- La sustitución de ceniza en 15% por cemento Portland en mezclas de concreto producen una pequeña disminución de la resistencia de diseño, atribuida a la adición de agua al mezclado la cual aumentó la relación agua – cemento. El comportamiento de la resistencia sin un correcto control de la absorción del material no cumple con los criterios de aceptación y en consecuencia su utilización es condicionada al mejoramiento del diseño de mezcla.
- El peso unitario del concreto con sustitución de cenizas volantes se ve levemente disminuido a medida que las proporciones de ceniza aumentan, lo cual garantiza un comportamiento equivalente al concreto normal.
- Las mezclas de concreto con sustitución parcial de cenizas presentan en su estado húmedo de curado una coloración más oscura que las mezclas patrones. A medida que el fraguado avanza y culmina el proceso de curado, el concreto seco presenta una coloración gris claro, similar a las mezclas patrones.

- El módulo de elasticidad para muestras con un 5% de sustitución de cenizas volantes presenta valores similares a los obtenidos por la formulación teórica aunque aproximadamente un 10% menor que los valores de las muestras patrones, para el caso de sustituciones de 10% y 15% se disminuye el módulo de una forma apreciable. Las disminuciones con respecto a la muestra patrón hacen evidenciar que el material con adición de cenizas volantes mejora sus características mecánicas en el tiempo, por lo cual se requiere una evaluación de módulo a los 60 días.
- Observando la reacción en el módulo de elasticidad es posible establecer que mezclas con alto contenido de cenizas volantes pueden tener un comportamiento idóneo para concretos compactados con rodillos, los cuales pueden ser utilizados en presas o grandes terraplenes. El bajo módulo de elasticidad que se podría lograr y la disminución sensible del calor de hidratación permitirían reacomodos por deformación y mejores rendimientos en construcción.
- Los costos de cemento utilizados para la elaboración de los concretos con cenizas volantes se reducen proporcionalmente al porcentaje utilizado, en relación al concreto la disminución del costo es de 3,5% para una sustitución de 5%, 7% para una sustitución de 10% y 10,5% para una sustitución de 15%.
- La inclusión de las cenizas volantes como componente de mezclas de concreto permite eliminar material que tradicionalmente queda como desecho de procesos industriales, esta característica ecológica de este proceso permitirá el mejor uso y disposición de rellenos sanitarios y disminución de costos de construcción.

V.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda efectuar la corrección de agregados gruesos y finos para la realización de diseños de mezclas, debido al deficiente control de calidad que estos poseen.
- Realizar diseños de mezclas con sustitución de cenizas volantes por cemento con asentamientos mayores a 7,5 cm, de fluidez alta a muy alta para evitar obtener concretos de asentamientos bajos a la hora del mezclado.
- Utilizar un aditivo plastificante que permita mejorar la trabajabilidad de las mezclas con sustitución de cenizas volantes para lograr una compactación adecuada sin afectar la resistencia mecánica del concreto.
- Debido a que el fraguado del concreto es más lento se recomienda aumentar el tiempo de encofrado de los elementos.
- Realizar diseños de mezcla con muestras de cenizas volantes sometidas a mayores temperaturas de secado y molienda controlada para mejorar su capacidad cementante.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁGUILA, I. (2001). *Cementos Puzolánicos, una Alternativa para Venezuela*. Tecnología y Construcción, n° 17-III, pp. 27-34. Caracas. [Resumen en Línea]. Disponible: <http://www.upv.es/VALORES/Documentaci%F3n/Reuni%F3n%20Madrid/Prese%F3n%20Presentaci%F3n%20Idalberto%20Aguila.pdf>. [Consulta: 2009, enero 26].
- ÁGUILA, I. y Sosa, M. (2005). *Evaluación de la Hoja del Maíz como Posible Fuente de Material Puzolánico*. Tecnología y Construcción vol.21, no. 3, p.9-17. Caracas. [Resumen en Línea]. Disponible: http://www2.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-96012005000300002&lng=es&nrm=iso. [Consulta: 2009, octubre 14]
- National Ready Mixed Concrete Association (1998). *El Concreto en la Práctica. ¿Qué, por qué y cómo?. Adiciones al cemento*. Revista Técnica. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP30es.pdf> [Consulta: 2008, noviembre 10].
- NEVILLE, A. y Brooks, J. (1998). *Tecnología del Concreto*. México. Editorial Trillas. 329 págs.
- PARKER, H. y Ambrose, J. (2001). *Diseño Simplificado de Concreto Reforzado*. 3era ed. Editorial Limusa S.A de C.V. 349 págs.
- PORRERO, J. y otros (2004). *Manual del Concreto Estructural*. Caracas. Sidetur. 503 págs.

QUIÑONEZ DE LA CRUZ; Francisco (2000). *Estado Actual de la Investigación de las Puzolanas en Guatemala Como Material de Construcción*. [Resumen en línea]; Trabajo de Investigación; Universidad de San Carlos de Guatemala. Disponible: <http://www.minas.upm.es/relext>. [Consulta: 2009, enero 13].

SANCHEZ, D. (1986). *Tecnología del Concreto y del Mortero*. Pontificia Universidad Javierana. Facultad de Ingeniería. 413 pág.

Universidad Católica del Norte (2008). *Tecnología del Hormigón Parte XXIII. Hormigón Fresco y Endurecido*. Recopilación de Portal de Obras Universidad Católica del Norte. [Resumen en línea]. Disponible: http://portaldeobras.cl/portal/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=30&Itemid=30. [Consulta: 2009, mayo 10]

Normativa CCCA: Ce 4 (1972). *Método para Obtener Pastas de Cementos Hidráulicos y Morteros de Consistencia Plástica por Mezclado Mecánico*.

Normativa CCCA: Ce 11 (1972). *Método de Ensayo para Determinar el Tiempo de Fraguado de Cementos Hidráulico por la Aguja de Vicat*.

Normativa CCCA: Ce 12 (1972). *Método para Determinar la Consistencia Normal de Cementos Hidráulicos*.

Norma Venezolana COVENIN 254-1998. *Cedazos de Ensayos*.

Norma Venezolana COVENIN 255-1998. *Método de Ensayo para Determinar la Composición Granulométrica de Agregados Finos y Gruesos*.

Norma Venezolana COVENIN 268-1998. *Agregado fino. Determinación de la densidad y absorción.*

Norma Venezolana COVENIN 269-1998. *Agregado grueso. Determinación de la densidad y absorción.*

Norma Venezolana COVENIN 277-2000. *Concreto. Agregados. Requisitos.*

Norma Venezolana COVENIN 337-1978. *Definiciones y Terminología Relativa al Concreto.*

Norma Venezolana COVENIN 338-2002. *Concreto. Método para la Elaboración, Curado y Ensayo de los Cilindros de Concreto.*

Norma Venezolana COVENIN 339-2003. *Método para la Medición del Asentamiento con el Cono de Abrams.*

Norma Venezolana COVENIN 1468-1979. *Método de Ensayo para Determinar el Módulo de Elasticidad (Secante) en Probetas Cilíndricas de Concreto.*

Norma Venezolana COVENIN 1681-1980. *Método de Ensayo para Determinar la Velocidad de Propagación de Ondas en el Concreto.*

Norma Venezolana COVENIN 3135-1994. *Puzolanas. Determinación del índice de actividad puzolánica.*

APÉNDICE

APÉNDICE N°1. Modelo de Control de Probetas. Ensayo de Compresión.

f'c:		Mezcla:						
Edad (días)	Cilindro N°	Diámetro (cm)	Promedio (cm)	Atura (cm)	Peso (Kg)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Promedio (Kg/cm ²)

APÉNDICE N°2. Modelo de Control de Probetas. Ensayo de Ultrasonido.

f'c:		Mezcla:		
Cilindro	Tiempo (μs)	Altura (m)	Velocidad (m/s)	Promedio

APÉNDICE N°3. Modelo de Control de Probetas. Ensayo de Módulo de Elasticidad.

f'c:	Mezcla:	
Carga	Lectura Extensómetro 1	Lectura Extensómetro 2

APÉNDICE N°4. Especificaciones del Yeso Piedra Utilizado.

Tiempo de fraguado	10 ± 2 minutos
Expansión al fraguado después de 2 horas	0,15%
Resistencia a la compresión después de 1 hora	390 Kg/cm ²