

**ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE VIGAS DE CONCRETO
REFORZADO Y CILINDROS DE CONCRETO SIMPLE MODIFICADO CON
CENIZA VOLANTE, $f'c = 28$ MPA**

**LUIS CARLOS LOZANO ALVAREZ
CARLOS ERNESTO RODRIGUEZ SOLANO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
2015**

**ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE VIGAS DE CONCRETO
REFORZADO Y CILINDROS DE CONCRETO SIMPLE MODIFICADO CON
CENIZA VOLANTE, $f'c = 28$ MPA**

**LUIS CARLOS LOZANO ALVAREZ
CARLOS ERNESTO RODRIGUEZ SOLANO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIEROS CIVILES**

**DIRECTOR:
CLAUDIA PATRICIA RETAMOSO LLAMAS
M,I,C, Ingeniera Civil**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
2015**

*A Dios por llenarme de bendiciones
y fuerzas para vencer cada
obstáculo en mi vida, a mi madre
por todo el esfuerzo y sacrificio
realizado para llegar a ser lo que
soy, por todo su amor y
comprensión; por ser mi apoyo
incondicional, A todos y cada uno
de mis seres queridos quienes me
ayudaron siempre aportando su
granito de arena*

Carlos Ernesto Rodríguez Solano

*Ofrezco este trabajo a Dios, que me
guió hasta lograr todos mis
objetivos; a mis padres, a mi
hermanita, a mis abuelas, a mi tía
y a mi novia, porque ellos han
dado razón a mi vida, quienes con
su apoyo y amor, permitieron que
lograra este proyecto, culminando
mi carrera de Ingeniería Civil y a
mi familia, por siempre creer en
mí,*

Luis Carlos Lozano Álvarez

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarnos la oportunidad de terminar con éxito nuestros estudios, por crecer como personas y alcanzar este sueño de lograr ser Ingenieros Civiles,

A nuestros padres por el esfuerzo y el apoyo que nos brindaron día a día a lo largo de estos años de nuestra vida estudiantil, por ser nuestros amigos incondicionales porque nos ayudaron a levantarnos cuando sentíamos que no podríamos superar un obstáculo a lo largo de este proceso académico, porque fueron ellos los que siempre sin importar las circunstancias, nos brindaron su amor y comprensión,

A la directora del proyecto, MSC Claudia Patricia Retamoso Llamas por su apoyo y confianza para realizar este proyecto de grado, así mismo por su dedicación y contribución como docente a formarnos como personas integrales y profesionales comprometidos con nuestra profesión, Por sus consejos, orientaciones y motivaciones para la realización de este trabajo de grado,

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana, que nos dedicaron gran parte de su tiempo y nos guiaron en el camino del aprendizaje, así como los otros docentes que nos dejaron marcadas sus enseñanzas a lo largo de nuestras vidas,

A los auxiliares del Laboratorio de Materiales de construcción de la Universidad Pontificia Bolivariana, por la orientación y colaboración en el proceso de desarrollo de las muestras,

CONTENIDO

1. OBJETIVOS,	12
1.1. OBJETIVO GENERAL,	12
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS,	12
2. METODOLOGÍA	13
2.1. ANÁLISIS DE LA NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 673	13
2.2. PRODUCCIÓN DEL CONCRETO	13
2.3. CONSTRUCCIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES (CILINDROS Y VIGAS)	14
2.4. ENSAYO A COMPRESIÓN DEL CONCRETO, MÓDULO ELÁSTICO EN CILINDROS Y ENSAYO A FLEXIÓN EN VIGAS	17
2.4.1. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	18
2.4.2. ENSAYO MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO POR MEDIO DE CILINDROS A COMPRESIÓN	19
2.4.3. ENSAYO MÓDULO ELÁSTICO DEL CONCRETO POR MEDIO DE VIGAS ENSAYADAS A FLEXIÓN,	20
2.4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO	24
2.4.5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LOS TEÓRICOS	24
3. JUSTIFICACIÓN	25
4. ALCANCE	26
5. ANTECEDENTES	27
6. MARCO TEÓRICO,	29
6.1. CONCRETO	29
6.2. PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO	30
6.3. ASENTAMIENTO	30
6.4. CEMENTO	31
6.5. AGREGADO GRUESO	32
6.6. AGREGADO FINO	33
6.7. AGUA	33
6.8. AIRE	33
6.9. ADITIVOS	34
6.10. ACERO	36
6.10.1. ACERO DE REFUERZO	36

6.10.2.	CARACTERISTICAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VARILLAS	37
6.11.	CONCRETO REFORZADO	37
6.12.	VENTAJAS DEL CONCRETO REFORZADO COMO MATERIAL ESTRUCTURAL	38
6.13.	COMPATIBILIDAD DEL CONCRETO Y EL ACERO	39
6.14.	CENIZA VOLANTE	40
6.14.1.	CENIZAS VOLANTES EN EL CONCRETO	40
6.14.2.	VENTAJAS DE CENIZAS VOLANTES EN EL CONCRETO	41
6.15.	MÓDULO DE ELASTICIDAD	42
6.16.	ZONA ELÁSTICA	42
6.16.1.	TEORÍA DE LA ELASTICIDAD DE LOS MATERIALES (RELACIÓN ESFUERZO – DEFORMACIÓN UNITARIA)	43
6.16.2.	DEFINICION DE MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS MATERIALES	45
6.16.3.	DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO	46
6.16.4.	MÉTODO DEL SEGUNDO TEOREMA DE CASTIGLIANO	47
6.16.5.	MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO SEGÚN EL REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10,	50
6.17.	MEDIDA DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	51
6.18.	DEFLEXIONES	51
6.19.	COMPRESÓMETRO	52
	EL COMPRESIMETRO SIRVE PARA DESCUBRIR A TIEMPO LOS DIFERENTES VALORES DE COMPRESIÓN EN LOS CILINDROS Y EVITAR ASÍ GRAVES DAÑOS POSTERIORES DEL MOTOR,	52
	EL COMPRESIMETRO MIDE LA OBTENCIÓN DE UNA COMPRESIÓN UNIFORME EN TODOS LOS CILINDROS, DARÁ COMO RESULTADOS UNA POTENCIA UNIFORME PARA CADA CILINDRO Y UN ANDAR SUAVE Y EFICIENTE DEL MOTOR, LA COMPRESIÓN UNIFORME DE ACUERDO AL VALOR ESPECIFICADO DE NOTARÁ QUE PISTONES, JUNTAS, AROS Y VÁLVULAS SE HALLAN EN BUENAS CONDICIONES, LA COMPRESIÓN A LA VELOCIDAD DE ARRANQUE DEL MOTOR ES DE 6,3 KG/CM ² (90 LBS/PULG ²) COMO MÍNIMO,	52
6.20.	ANÁLISIS DE VIGAS SOMETIDAS A FLEXIÓN	52
6.20.1.	ETAPA DEL CONCRETO NO AGRIETADO	52
6.20.2.	CONCRETO AGRIETADO: ETAPA DE ESFUERZOS ELÁSTICOS	53
6.20.3.	FALLA DE LA VIGA: ETAPA DE RESISTENCIA ÚLTIMA	54
6.20.4.	ESFUERZO ELÁSTICO: CONCRETO AGRIETADO	57
7.	<u>RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO A COMPRESIÓN DE LOS CILINDROS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE DIFERENTES PORCENTAJES DE CENIZA VOLANTE (10%, 15%, 20%, Y 25%),</u>	59
7.1.	RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD EN CILINDROS A COMPRESIÓN:	60
7.2.	RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD EN VIGAS REFORZADAS DE CONCRETO:	66
7.3.	RESULTADOS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD OBTENIDOS MEDIANTE LOS REQUERIMIENTOS ESTIPULADOS EN EL REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE, NSR-10 TÍTULO C,8,5	70

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS,	72
8.1. ANÁLISIS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO	72
8.1.1. ANÁLISIS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS PARA ENCONTRAR SU CARGA A UTILIZAR EN ENSAYO MÓDULO DE ELASTICIDAD	72
8.1.2. ANÁLISIS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS UTILIZADOS EN ENSAYO DE MODULO ELÁSTICO	75
8.2. ANÁLISIS MÓDULO DE ELASTICIDAD EN CILINDROS DE CONCRETO A COMPRESIÓN	77
8.3. ANÁLISIS MÓDULO DE ELASTICIDAD OBTENIDOS MEDIANTE EL ENSAYO DE VIGAS REFORZADAS A FLEXIÓN,	79
A CONTINUACIÓN SE ANALIZARAN LOS RESULTADOS DEL MÓDULO ELÁSTICO EN VIGAS REFORZADAS, ESTO CON LA FINALIDAD DE DETERMINAR SI EXISTE UNA INFLUENCIA DEL ACERO DE REFUERZO EN LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE MODULO ELÁSTICO,	79
EN LA TABLA 22 SE MUESTRAN LOS RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS CINCO (5) VIGAS REFORZADAS, CADA UNA PERTENECIENTE A LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE EN LA MEZCLA (0%,10%, 15%, 20% Y 25% DE CENIZA),	79
8.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD DE VIGAS REFORZADAS VS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS EN CILINDROS DE CONCRETO COMPRESIÓN,	80
8.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS RESPECTO AL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO SEGÚN EL REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10,	81
8.6. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL MÓDULO ELÁSTICO DETERMINADO POR CILINDROS DE CONCRETO A COMPRESIÓN Y EL REGLAMENTO NSR-10,	86
8.7. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL MÓDULO ELÁSTICO DETERMINADO POR VIGAS REFORZADAS DE CONCRETO ENSAYADAS A FLEXIÓN Y EL REGLAMENTO NSR-10,	90
9. CONCLUSIONES,	94
10. RECOMENDACIONES	95
11. BIBLIOGRAFÍA	96
12. ANEXOS	98
12.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO A COMPRESIÓN DE LOS CILINDROS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE DIFERENTES PORCENTAJES DE CENIZA VOLANTE (10%, 15%, 20%, Y 25%),	98
12.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO A COMPRESIÓN DE LOS CILINDROS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE DIFERENTES PORCENTAJES DE CENIZA VOLANTE (10%, 15%, 20%, Y 25%) DESPUÉS DE SER ENSAYA PARA ENCONTRAR SU MÓDULO ELÁSTICO,	106
12.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO MODULO DE ELASTICIDAD EN CILINDROS DE CONCRETO A COMPRESIÓN	111
12.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD DE VIGAS REFORZADAS VS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS EN CILINDROS DE CONCRETO COMPRESIÓN,	115

12.5. RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD EN VIGAS REFORZADAS DE CONCRETO:

117

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1,</i>	<i>Extracción de materiales para la preparación de la mezcla de concreto</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2,</i>	<i>Formaletas utilizadas para la producción de cilindros de concreto</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3,</i>	<i>Mezclado.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4,</i>	<i>Verificación del Asentamiento</i>	<i>16</i>
<i>Figura 5,</i>	<i>Transporte y Refrentado de cilindros para ensayo de módulo elástico</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6,</i>	<i>Ensayo Resistencia a la compresión en cilindros de concreto.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7,</i>	<i>Ensayo Módulo Elástico del concreto en cilindros a compresión.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 8,</i>	<i>Datalogger para registro de fuerza y deformación en ensayo de módulo elástico</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9,</i>	<i>Montaje ensayo módulo elástico del concreto por medio de vigas ensayadas a flexión,..</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10,</i>	<i>Montaje del dial de deformación para ensayo módulo elástico del concreto por medio de vigas ensayadas a flexión,.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 11,</i>	<i>Toma de resultados del ensayo módulo elástico del concreto por medio de vigas ensayadas a flexión</i>	<i>23</i>
<i>Figura 12,</i>	<i>Tamaños y áreas de las varillas de refuerzo</i>	<i>37</i>
<i>Figura 13,</i>	<i>Zonas del acero ensayado a tracción,.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 14,</i>	<i>Diagrama de vida de laboratorio sometida a flexión,</i>	<i>49</i>
<i>Figura 15,</i>	<i>Comportamiento de esfuerzos y deformaciones, Concreto no agrietado.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 16,</i>	<i>Concreto agrietado: etapa de esfuerzos elásticos,</i>	<i>54</i>
<i>Figura 17,</i>	<i>Concreto agrietado: etapa de esfuerzos elásticos,</i>	<i>54</i>
<i>Figura 18,</i>	<i>Etapa de resistencia última,.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 19,</i>	<i>Diagrama de momento-curvatura para una viga de concreto reforzado con refuerzo de tensión solamente,</i>	<i>56</i>
<i>Figura 20,</i>	<i>Esfuerzo elástico: concreto agrietado.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 21,</i>	<i>Esfuerzos compresión cilindros</i>	<i>59</i>
<i>Figura 22,</i>	<i>Regresión lineal datos módulo elástico</i>	<i>65</i>
<i>Figura 23,</i>	<i>Fuerza vs Deformación en viga reforzada de concreto.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 24,</i>	<i>Área del acero transformada en concreto</i>	<i>70</i>
<i>Figura 25,</i>	<i>Resistencia a la compresión de cilindros.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 26,</i>	<i>Resistencia a la compresión de cilindros.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 27,</i>	<i>Módulos de elasticidad vigas reforzadas vs Módulos en cilindros a compresión</i>	<i>81</i>
<i>Figura 28,</i>	<i>Módulo de elasticidad según el Reglamento NSR-10 de la mezcla con 0% de adición de ceniza</i>	<i>82</i>
<i>Figura 29,</i>	<i>Módulo de elasticidad según el Reglamento NSR-10 de la mezcla con 10% de adición de ceniza</i>	<i>82</i>
<i>Figura 30,</i>	<i>Módulo de elasticidad según el Reglamento NSR-10 de la mezcla con 15% de adición de ceniza</i>	<i>83</i>
<i>Figura 31,</i>	<i>Módulo de elasticidad según el Reglamento NSR-10 de la mezcla con 20% de adición de ceniza</i>	<i>83</i>
<i>Figura 32,</i>	<i>Módulo de elasticidad según el Reglamento NSR-10 de la mezcla con 25% de adición de ceniza</i>	<i>84</i>
<i>Figura 33,</i>	<i>Módulos de elasticidad en cilindros con 0% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10</i>	<i>87</i>
<i>Figura 34,</i>	<i>Módulos de elasticidad en cilindros con 10% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 35,</i>	<i>Módulos de elasticidad en cilindros con 15% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10.....</i>	<i>88</i>

<i>Figura 36, Módulos de elasticidad en cilindros con 20% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 37, Módulos de elasticidad en cilindros con 25% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 38, Módulos de elasticidad en viga con 0% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10</i>	<i>91</i>
<i>Figura 39, Módulos de elasticidad en viga con 0% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10</i>	<i>91</i>
<i>Figura 40, Módulos de elasticidad en viga con 0% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10</i>	<i>92</i>
<i>Figura 41, Módulos de elasticidad en viga con 0% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10</i>	<i>92</i>
<i>Figura 42, Módulos de elasticidad en viga con 0% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10</i>	<i>93</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1, Esfuerzo a compresión del concreto</i>	60
<i>Tabla 2, Módulos de elasticidad</i>	61
<i>Tabla 3, Información geométrica del cilindro de concreto</i>	63
<i>Tabla 4, Datos de carga y deformaciones verticales presentes en el cilindro de concreto</i>	63
<i>Tabla 5, Puntos sobre la regresión lineal.....</i>	66
<i>Tabla 6, Datos de carga y deformaciones verticales presentes viga reforzada de concreto a flexión ..</i>	66
<i>Tabla 7, Carga vs deformación en viga reforzada de concreto</i>	68
<i>Tabla 8,Características geométricas de viga reforzada de concreto.....</i>	69
<i>Tabla 9, Módulos elásticos calculados según NSR-10</i>	71
<i>Tabla 10, Datos estadísticos muestra (sin ceniza) cilindros a compresión,</i>	73
<i>Tabla 11, Datos estadísticos muestra (10% ceniza) cilindros a compresión,</i>	73
<i>Tabla 12, Datos estadísticos muestra (15% ceniza) cilindros a compresión,</i>	74
<i>Tabla 13, Datos estadísticos muestra (20% ceniza) cilindros a compresión,</i>	74
<i>Tabla 14, Datos estadísticos muestra (25% ceniza) cilindros a compresión,</i>	74
<i>Tabla 15, Datos estadísticos muestra (sin ceniza) cilindros a compresión,</i>	76
<i>Tabla 16, Datos estadísticos muestra (10% ceniza) cilindros a compresión,</i>	76
<i>Tabla 17, Datos estadísticos muestra (15% ceniza) cilindros a compresión,.....</i>	76
<i>Tabla 18, Datos estadísticos muestra (20% ceniza) cilindros a compresión,</i>	77
<i>Tabla 19, Datos estadísticos muestra (25% ceniza) cilindros a compresión,</i>	77
<i>Tabla 20, Módulos de elasticidad en cilindros a compresión</i>	78
<i>Tabla 21, Datos estadísticos modulo a compresión</i>	79
<i>Tabla 22, Tabla Modulo Elástico vigas reforzadas de concreto</i>	80
<i>Tabla 23, Datos estadísticos del módulo de elasticidad de la mezcla con 0% de adición de ceniza</i>	84
<i>Tabla 24, Datos estadísticos del módulo de elasticidad de la mezcla con 10% de adición de ceniza</i>	85
<i>Tabla 25, Datos estadísticos del módulo de elasticidad de la mezcla con 15% de adición de ceniza</i>	85
<i>Tabla 26, Datos estadísticos del módulo de elasticidad de la mezcla con 20% de adición de ceniza</i>	86
<i>Tabla 27, Datos estadísticos del módulo de elasticidad de la mezcla con 25% de adición de ceniza</i>	86
<i>Tabla 28 Ecuaciones planteadas de módulo de elasticidad en las distintas mezclas de cilindros de concreto.....</i>	90
<i>Tabla 29, Ecuaciones planteadas de módulo de elasticidad en las distintas mezclas de vigas reforzadas de concreto.....</i>	93

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TÍTULO: ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO Y CILINDROS DE CONCRETO SIMPLE MODIFICADO CON CENIZA VOLANTE, $f'_c = 28$ MPA
AUTOR(ES): CARLOS ERNESTO RODRIGUEZ SOLANO
LUIS CARLOS LOZANO ALVAREZ
FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil
DIRECTOR(A): Claudia Patricia Retamoso Llamas

RESUMEN

El módulo de elasticidad es uno de los principales valores a la hora de diseñar estructuras de concreto, ya que este influye en las deflexiones y rigidez de una estructura, Esta propiedad del concreto está determinado por una estrecha relación que existe entre el esfuerzo que experimenta un material y la correspondiente deformación unitaria, es un valor muy importante para el análisis estructural, Por esta razón nace el interés de este estudio el cual se enfoca al análisis comparativo del módulo de elasticidad determinado por los ensayos de compresión y flexión y al final estos valores compararlos con el establecido en el Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente NSR-10, En el título C, numeral C,8,5,, se plantea la fórmula para obtener el módulo de elasticidad del concreto la cual se utiliza para concreto de densidad normal, En este trabajo se analizaron doscientos cinco (205) especímenes de concreto, se ejecutaron doscientos (200) cilindros y cinco (5) vigas reforzadas con acero; producidos con materiales de una planta de concreto del Área Metropolitana de Bucaramanga, Los porcentajes de ceniza utilizados son 0%, 10%, 15%, 20% y 25%, reemplazando al cemento, Las vigas se ensayaron a flexión y se determinó el módulo de elasticidad, en este ensayo, se debió realizar la determinación de la inercia, después de fisurada la sección transversal, ya que no se cuenta con la manera de obtener experimentalmente el módulo de rotura, Los cilindros se probaron a compresión y se realizó el ensayo del módulo de elasticidad, Del presente estudio se compararon el módulo de elasticidad de los cilindros y las vigas con el módulo de elasticidad estipulado por el Reglamento NSR-10, se pudo comprobar que el módulo de Elasticidad de los cilindros cumple con los parámetros propuestos en la ecuación, mientras que las vigas sometidas a flexión no.

PALABRAS CLAVES: Elasticidad, Concreto, Ceniza, Flexión, Compresión.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: REINFORCED CONCRETE BEAMS ELASTICITY
MODULUS AND MODIFIED SIMPLE CONCRETE
CYLINDERS WITH AIRBORNE ASH ANALYSIS, F_c=
28 MPA

AUTHOR(S): CARLOS ERNESTO RODRIGUEZ SOLANO
LUIS CARLOS LOZANO ALVAREZ

FACULTY: Civil Engineering Faculty

DIRECTOR: Claudia Patricia Retamoso Llamas

ABSTRACT

The elasticity modulus (E) is one of the main values when designing concrete structures, since this affects the deflections and stiffness of a structure, This property of the concrete is determined by a close relation that exists between the effort experienced by a material and the corresponding unitary strain, is a very important value for the structural analysis, Thus is born the interest of this study which is focused on the comparative analysis of the elasticity module determined by the compression and bending tests and at the end compare these values with the one established in the Colombian Earthquake Resistant Building Regulations NSR-10; this regulation is responsible for giving the security with which buildings must have in order that the structural response to an earthquake is favorable in their resistance, In the title C, numeral C,8,5,, it poses the formula to obtain the elasticity modulus of concrete which is used for concretes of regular density, In this paper two hundred and five (205) specimens of concrete were analyzed, they were executed (200) cylinders and five (5) reinforced with steel beams; produced with materials from a concrete plant of the metropolitan area of Bucaramanga, The ash percentages used are 0%, 10%, 15%, 20% and 25% replacing the cement, The beams were tested in bending and the modulus of elasticity was determined, in this test, the determination of the inertia had to be done, after fissured the cross section, as it does not count with the way to experimentally obtain the rotation modulus, The cylinders were tested by compression and the elasticity modulus test was run, From this study the modulus of elasticity of the cylinders and beams to the modulus of elasticity provided by the NSR-10 were compared, it could be proven that the elastic modulus of the cylinder meets the parameters proposed in the equation, while the beams subjected to bending did not.

KEY WORDS: elasticity, concrete, ash, bending, compression.

INTRODUCCIÓN,

Cuando se llevan a cabo la realización de mezclas de concreto es recomendable hacer mezclas de ensayo para cumplir las características deseadas, entre estas se busca encontrar su principal característica la cual es la resistencia, esta última se ve aumentada con la edad, por tal razón en las últimas décadas se llevaron a cabo experimentos para obtención de mejoras en la calidad y durabilidad de los concretos,

Gran parte de los resultados de estos ensayos han mostrado que la durabilidad del concreto está influenciada por la capacidad de transporte de los fluidos en su red porosa, por dicha razón aparece la ceniza volante como un material aliado en las mezclas de concreto, extendiendo su uso por el ahorro económico que supone, los cambios micro-estructurales motivados por la adición y contribuir a mejorar la resistencia a compresión a edades tan tempranas como los veintiocho (28) días,¹

Buscando siempre mejorar la calidad de la mezcla de concreto, esta necesita ser evaluada, Uno de los factores más importantes del análisis y diseño de estructuras es el Módulo de Deformación, más conocido como Módulo Elástico (E), Este tiene su importancia en indicar la deformación de los materiales obtenida por la acción de fuerzas que actúan sobre estos, lo cual representa una amenaza para la seguridad de las personas en las estructuras, cuando estén en utilidad de uso,

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente de 2010 (NSR -10), el cual es el encargado de dar las condiciones de seguridad con las que debe contar las construcciones con el fin de que la respuesta estructural a un sismo sea favorable en su resistencia, Este reglamento en su título C, numeral C,8,5, Plantea,

“El módulo de elasticidad, E_c para el concreto puede tomarse como $W_c^{1,5} 0,043 \sqrt{f'_c}$ (en MPa), para valores de w_c comprendidos entre 1440 y 2560 kg/m^3 , Para concreto de densidad normal, E_c puede tomarse como $4700 \sqrt{f'_c}$,”

A pesar de lo cual en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga se han llevado a cabo estudios en años anteriores, estos

¹ MOLINA BAS, O. I, et al. La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento portland en la durabilidad del hormigón... [Online]. Anales de Mecánica de la Fractura 25, Vol. 2 (2008). Disponible en internet <<http://www.gef.es/Congresos/25/PDF/8-1.pdf>>

requirieron de ensayos de compresión al concreto, los módulos elásticos (E) resultantes, para dichos ensayos han arrojado valores inferiores a los estipulados en el reglamento NSR-10,

Por tal razón, se requiere determinar un parámetro que permita un análisis comparativo del módulo de elasticidad a partir de lo establecido en la Norma Técnica Colombiana NTC-4025 mediante los ensayos de compresión en concreto y los ensayos de flexión en vigas comprobando la similitud en los resultados obtenidos, también analizando dichas condiciones en especímenes de cilindros y vigas reforzadas de concreto con adición de ceniza volante para finalmente compararlos con el reglamento NSR-10,

Aunque el ensayo de compresión de cilindros es en concreto simple y en vigas en concreto reforzado, el módulo de elasticidad es una característica que aporta el concreto y no el acero en este material compuesto, según los estudios realizados,²

² FIGUEROA, Jessica Carolina y LEZCANO, Manuel José. Determinación del módulo de elasticidad en vigas de concreto adicionados con limalla fina, reforzadas y no reforzadas comparadas con el módulo obtenido en el ensayo de compresión. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de ingenierías. Facultad de Ingeniería civil, 2014. 229 p

1. OBJETIVOS,

1.1. Objetivo General,

El principal objetivo de este trabajo es determinar el módulo de la elasticidad en cilindros de concreto simple sometidos a compresión y vigas reforzadas ensayadas a flexión, teniendo como variable la sustitución de un porcentaje de cemento por un porcentaje de ceniza volante (10%, 15%, 20% y 25%) y compararlos entre sí y el módulo obtenido en el Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente NSR-10,

1.2. Objetivos Específicos,

Realizar el diseño de las vigas reforzadas de concreto adicionadas con ceniza volante (10%, 15%, 20% y 25%) para poder determinar el rango elástico de la viga sometida a flexión,

Determinar el valor del esfuerzo a compresión del concreto, con algunos cilindros prueba a los 28 días de edad, con los diferentes porcentajes de adición de ceniza volante,

Realizar el ensayo de módulo de elasticidad del concreto simple, en los cilindros a compresión,

Realizar el ensayo de módulo de elasticidad en vigas reforzadas en su zona elástica, ubicando la carga estática en diferentes puntos de la viga y tomando lecturas de deformación en flexión en esos mismos puntos, (En el centro de la viga),

Determinar los módulos de elasticidad en compresión de cilindros elaborados con concreto simple, adicionado con ceniza volante y vigas reforzadas de concreto adicionado con ceniza volante,

Comparar los resultados del módulo en cilindros, vigas y el Reglamento colombiano de construcción Sismo Resistente NSR-10,

2. METODOLOGÍA

2.1. ANÁLISIS DE LA NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 673

Este análisis se realizó para determinar el procedimiento que se debe llevar a cabo para hallar la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto, tales como cilindros moldeados y núcleos perforados, Se encuentra limitado al concreto que tiene un peso unitario mayor que 800 kg/m³ [50 lb/pie³],

Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla, La resistencia a la compresión de un espécimen se calculó dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por la sección transversal de área del espécimen,³

2.2. PRODUCCIÓN DEL CONCRETO

La preparación del concreto, debe ceñirse a los requerimientos indicados en la norma NTC 3318 (concreto premezclado), Los equipos de mezclado y transporte deben cumplir con los requisitos aplicables de la misma norma, De igual modo, los requisitos de uniformidad en el mezclado, deben cumplir con el anexo A1 de la norma NTC 3318, para evitar segregación, Una vez analizadas y teniendo en cuenta estas especificaciones, el diseño de mezcla utilizado fue el proporcionado por una planta de concreto localizada en el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), en dicho diseño existió una adición de ceniza en reemplazo por un porcentaje de cemento, dichos porcentajes variaron en un 10%, 15%,20 y 25%, en la figura 1 se muestra la extracción de materiales para luego ser transportados y mezclados en el laboratorio del edificio k de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga,

³ NTC 673. Norma Técnica Colombiana. Ensayo de Resistencia a la compresión de especímenes en cilindros de concreto



Figura 1, Extracción de materiales para la preparación de la mezcla de concreto

2.3. CONSTRUCCIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES (cilindros y vigas)

Se decidió que los especímenes serán curados a cincuenta y seis (56) días, para garantizar que se logre la máxima resistencia del concreto,

Se llevó a cabo la elaboración de cinco (5) vigas de concreto reforzado, las cuales serán distribuidas según su porcentaje de ceniza volante (10%, 15%, 20%, 25%) y una que será fabricada con concreto simple, Estas vigas tendrán unas dimensiones de, ciento veinte (120) cm de largo, veinticinco (25) cm de ancho y treinta y cinco (35) cm de alto, esta última especificación para cumplir el recubrimiento del acero de refuerzo,

Además se elaboraron doscientos (200) cilindros de concreto simple con adición de ceniza volante los cuales fueron distribuidos en cuarenta (40) especímenes por cada porcentaje de ceniza volante (10%, 15%, 20%, 25%) y cuarenta (40) elaborados solo con concreto simple, Tomando veinte (20) especímenes de cada mezcla para el ensayo de compresión y a los diez (10) restantes de cada mezcla se les aplicó el ensayo de módulo elástico, Se utilizaron como medidas estándares para las dimensiones de los cilindros, treinta (30) cm de alto, y quince (15) cm de diámetro,

Para la construcción de dichos especímenes, primero se alistaron las formaletas, en la figura 2, las cuales fueron engrasadas para evitar imperfecciones y daños en el concreto a la hora de retirarse una vez este endurecido, luego se procedió a vaciar la mezcla, mostrada en la figura 3, realizada siguiendo el diseño proporcionado por la planta de concreto que apoya el proyecto,



Figura 2, Formaletas utilizadas para la producción de cilindros de concreto



Figura 3, Mezclado

Una vez realizada la mezcla se procedió a verificar el asentamiento, mostrado en la figura 4, siguiendo el procedimiento estipulado por la Norma Técnica Colombiana NTC-396, la cual establece el proceso para la medición del asentamiento del concreto en estado fresco y así obtener un control en su calidad y fluidez, este debe estar próximo al diseño de mezcla, en este

caso fue el proporcionado por la planta de concreto, el cual debía corresponder a un rango de 5 ± 1 cm,



Figura 4, Verificación del Asentamiento

A continuación, en el caso de las vigas se vació un porcentaje primero para dar lugar al recubrimiento del figurado del acero que se muestra en la figura, al cual se le hizo el armado y doblado en el laboratorio del edificio k de la universidad pontificia bolivariana seccional Bucaramanga utilizando varillas de acero corrugado para su refuerzo horizontal ($3/8''$) y para su refuerzo transversal ($1/2''$) de diámetro, culminada esta fase se realizó el vaciado total sobre las formaletas de las vigas, Una vez terminado este proceso de vaciado de la mezcla (para vigas y cilindros) se dejaron secar durante veinticuatro (24) horas para lograr su estado semisólido para después retirar las formaletas y sumergir los especímenes en agua para su curado por inmersión durante cincuenta y seis (56) días,

2.4. ENSAYO A COMPRESIÓN DEL CONCRETO, MÓDULO ELÁSTICO EN CILINDROS Y ENSAYO A FLEXIÓN EN VIGAS

Una vez finalizado el proceso de curado de los cilindros de concreto, el cual duro cincuenta y seis (56) días, garantizando así su resistencia máxima la cual es alcanzada a los veintiocho (28) días, se procedió a la realización de los ensayos de compresión y modulo elástico en cilindros de concreto y el ensayo de flexión para las vigas con acero de refuerzo, En la figura 5, se muestra las vigas en la maquina universal siendo ensayadas, el transporte de cilindros para llevarlos a ser fallados en la máquina de compresión, además de la capa de yeso tipo 4 de alta resistencia (utilizado en laboratorios dentales) perteneciente a los cilindros de concretos que fueron ensayados para la obtención de su módulo elástico en la maquina universal,



Figura 5, Transporte y Refrentado de cilindros para ensayo de módulo elástico

Para llevar a cabo el ensayo de módulo de elasticidad en los cilindros, estos fueron refrentados con yeso tipo 4 para lograr una superficie lisa y que a su vez estuviera nivelada evitando así posibles errores de lectura en su deformación,

Por otra parte, siguiendo la Norma Técnica Colombiana NTC- 2871 “*Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios)*”, se realizó el ensayo de flexión en vigas de concreto reforzadas, sometiendo cada una de estas (5) hasta una carga de 40 kN para evitar el agrietamiento y posible falla de las vigas,

2.4.1. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

El ensayo de resistencia a la compresión en los cilindros fue el primero en llevarse a cabo, debido a la necesidad de conocer su resistencia máxima a la compresión para así poder calcular el esfuerzo ultimo a compresión y comprobar la resistencia para la cual fueron diseñados dichos especímenes, Además este ensayo se requería para poder determinar la carga máxima a aplicar en el ensayo de módulo de elasticidad,

La resistencia a la compresión se midió con una prensa, que aplica carga sobre la superficie superior del cilindro a una velocidad especificada mientras ocurre la falla, La operación tardó entre 2 y 3 minutos y la carga a la que falló la probeta quedo registrada en un tablero anexo a la máquina; en la figura 6 se puede observar este proceso,



Figura 6, Ensayo Resistencia a la compresión en cilindros de concreto

Una vez obtenida la carga se dividió por el área de la sección transversal del cilindro, obteniéndose así el esfuerzo de rotura del concreto,⁴

$$f_c = \frac{P_{max}}{\text{Área}} \quad \text{Ecuación (9)}$$

2.4.2. ENSAYO MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO POR MEDIO DE CILINDROS A COMPRESIÓN

Se determinó de acuerdo con la norma NTC 4025 (ASTM C469), sobre cilindros elaborados de la misma manera que los que se ensayan a compresión, a los cuales se les adapta un dispositivo en forma de corona que tiene dos deformímetros verticales (esto para hallar el módulo de elasticidad), además de un compresímetro ubicado en la parte inferior del cilindro el cual va registrando los datos de carga, como se muestra en la figura 7, La velocidad de carga es la misma que se utiliza en el ensayo de compresión, para no dañar el dispositivo por un exceso de deformación, solo se debe aplicar carga hasta cuando la deformación longitudinal, definida como la deformación vertical dividida sobre la luz del deformímetro, sea de 50 millones, o hasta el 40% de la compresión,⁵



⁴ NIÑO HERNANDEZ, Jairo. Colección del concreto – tecnología del concreto. Tomo 1. Tercera edición. 2010. P. 125.

⁵ Ibid. P. 131.

Figura 7, Ensayo Módulo Elástico del concreto en cilindros a compresión

Para la captura y registro de los datos de deformación y carga fue necesaria la utilización de un aparato (Datalogger), como se muestra en la figura 8, adquirido recientemente por la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, el cual nos permite el almacenamiento de dichos datos en una memoria para después ser transferidos a una computadora y por último en esta hacer su análisis correspondiente,



Figura 8, Datalogger para registro de fuerza y deformación en ensayo de módulo elástico

2.4.3. ENSAYO MÓDULO ELÁSTICO DEL CONCRETO POR MEDIO DE VIGAS ENSAYADAS A FLEXIÓN,

Este ensayo fue el último en llevarse a cabo en el laboratorio de estructuras de la Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, para la realización de este se utilizaron 5 vigas, cada una correspondiente a los diferentes tipos de mezcla los cuales variaban en su porcentaje de adición de ceniza volante (0%, 10%, 15%,20%,25%), cada una de estas contenía acero de refuerzo,

Para este ensayo se utilizaron dos apoyos móviles, los cuales tenían una separación de cien (100) cm, los cuales estaban apoyados en una viga de acero anteriormente instalada como base de estos, en la figura 9, se puede observar dicho montaje,



Figura 9, Montaje ensayo módulo elástico del concreto por medio de vigas ensayadas a flexión,

Luego de este procedimiento de montaje se realizó la instalación del dial de deformación, como se muestra en la figura 10, el cual tiene una celda magnética que se fijaba firmemente en la estructura de acero utilizada como base, Se decidió su ubicación central debido a que las vigas no estaban uniformemente niveladas y así evitar posibles errores en la toma de resultados de las deformaciones



Figura 10, Montaje del dial de deformación para ensayo módulo elástico del concreto por medio de vigas ensayadas a flexión,

Para finalizar este ensayo, se tomaron datos de carga cada dos (2) kN hasta llegar a cuarenta y dos (42) kN, garantizando así su zona elástica, mientras a su vez se iban registrando los valores de deformación con el Datalogger, A continuación en la figura 11 se puede observar este procedimiento,



Figura 11, Toma de resultados del ensayo módulo elástico del concreto por medio de vigas ensayadas a flexión

El siguiente procedimiento proporciona un método que puede usarse para determinar la deflexión o pendiente en un punto en una viga mediante el teorema de Castigliano,

Fuerza externa P o momento concentrado, aplique una fuerza P sobre la viga o marco en el punto y en la dirección del desplazamiento buscado, Si la pendiente va a determinarse, coloque un momento concentrado en el punto,

Momentos internos M, establezca coordenadas x apropiada que sean válidas dentro de regiones de la viga donde no haya discontinuidades de fuerza, carga distribuida o momento concentrado, Calcule el momento interno M como función de P y de cada coordenada x, Calcule también la derivada parcial $\partial M/\partial P$ para cada coordenada x, Después de que M y $\partial M/\partial P$ o han sido determinadas, asigne a P su valor numérico si ha reemplazado una fuerza real o un momento concentrado, De otra manera, haga P igual a cero,

Teorema de Castigliano, Aplique la ecuación $\delta = \int_0^L M \left(\frac{\partial M}{\partial P} \right) \frac{dx}{EI}$ para determinar el desplazamiento δ buscado, Es importante retener los signos algebraicos de los valores correspondientes de M y $\partial M/\partial P$, Si la suma resultante de todas las integrales definidas es positiva, δ actúan con el mismo sentido que P,

2.4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO

En este capítulo del trabajo de grado se llevará a cabo el análisis de los datos obtenidos en el laboratorio, se verificará el esfuerzo a compresión de los cilindros de concreto verificando así la resistencia para la cual fueron diseñados, por otra parte se calculará el módulo elástico del concreto, a través de las deformaciones obtenidas en el ensayo de módulo de elasticidad de cilindros a compresión, por último se calculará el módulo de elasticidad del concreto mediante el ensayo de vigas a flexión, con el fin de comparar y validar los dos valores de módulo de elasticidad obtenidos en laboratorio,

2.4.5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LOS TEÓRICOS

Se estudiarán los resultados desde un análisis estadístico para determinar los valores exactos de los módulos de elasticidad obtenidos en laboratorio y así podrán ser comparados con los datos teóricos estipulados en el Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente NSR-10, si estos valores no son similares, se procederá a determinar una fórmula que permita obtener valores más ajustados de los módulos experimentales obtenidos en laboratorio,

3. JUSTIFICACIÓN

El módulo de elasticidad es uno de los principales valores a la hora de diseñar concreto, ya que este influye en las deflexiones, derivas y rigidez de una estructura, Por esta razón nace el interés de este estudio el cual se enfoca al análisis comparativo del módulo de elasticidad determinado por los ensayos de compresión, flexión y estos con el Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente NSR-10,

Para obtener el módulo de elasticidad en las vigas de concreto simple usadas en el ensayo de flexión, para pavimentos rígidos, como el material es frágil y falla con una carga mínima, no se pueden tomar lecturas de deflexión, Por esta razón, en estudios previos desarrollados en la UPB Bucaramanga, se pudo observar que el módulo de elasticidad obtenido en los cilindros de concreto simple, es el mismo obtenido en la zona elástica del concreto reforzado, por esta razón, se refuerzan las vigas y se tiene un rango mayor de lectura de deformaciones,

A nivel regional, Torrado Gómez, Luz Marina y Porras Álvarez, Natalia Andrea (2009) realizaron una investigación en la cual se logró determinar de manera experimental ecuaciones para el módulo de elasticidad en concretos elaborados en laboratorio con resistencias de 21 MPa, Sin embargo, es necesario ampliar los estudios a otras condiciones diferentes como lo sería la utilización de un concreto de resistencia diferente (28 MPa) y el uso de ceniza volante como un sustituto de un porcentaje de cemento, esta última ayudando al concreto en características como la durabilidad, estabilidad, plasticidad, permeabilidad, etc., además de una economía en el costo del conglomerante,

4. ALCANCE

Analizando la problemática planteada y siguiendo las recomendaciones de diferentes trabajos de grados, se realizarán cilindros de concreto simple y vigas de concreto reforzado, dichas vigas estarán reforzadas debido a que si fueran hechas con concreto simple, por la forma se falla con una carga mínima, Además se adicionará ceniza volante de 10%, 15%, 20% y 25% que reemplazará parte del cemento en la mezcla y se debe realizar el diseño estructural de las vigas reforzadas, para establecer el rango elástico,

En el presente trabajo se determinará el módulo de elasticidad para el concreto con 5 diferentes ensayos, se realizarán 40 cilindros de concreto simple para cada porcentaje de ceniza, a 10 de ellos se les realizarán ensayos de compresión a los 56 días y con los restantes se determinará el módulo de elasticidad, Además se realizará 1 viga de concreto reforzado por cada porcentaje de ceniza, a la cual se le practicará el ensayo de flexión para determinar el módulo de elasticidad, También se construirán 10 cilindros sin porcentaje de ceniza para analizar el comportamiento de este aditivo en la mezcla,

La norma técnica colombiana NTC – 4025 y la norma ASTM – C469/469M, son utilizadas para desarrollar el ensayo de módulo de elasticidad en cilindros de concreto simple, mientras que la norma ASTM – C1609/1608M, es la utilizada para determinar el módulo de elasticidad en vigas de concreto reforzado,

Por otra parte, los resultados obtenidos al finalizar este trabajo de grado se compararan entre sí y simultáneamente se compararan con los valores que establece el Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente NSR – 10, analizando si el valor que se obtiene en la ecuación que plantean en el Reglamento NSR-10 para determinar el módulo de elasticidad es igual o parecido al obtenido en este trabajo de grado; teniendo en cuenta que este valor posiblemente no es igual al establecido por el Reglamento NSR-10, se definirá una ecuación para determinar el módulo elasticidad, con los materiales empleados en este estudio los cuales serán suministrados por una planta de concreto de la región,

5. ANTECEDENTES

Cuando se analizan los procesos para dosificar las mezclas de concreto, se recomienda hacer mezclas de prueba para determinar las proporciones del concreto y se cumplan las características deseadas, Esto se debe a que el concreto es un material heterogéneo, sus componentes tienen características no constantes, además de sus materiales también influye la forma de mezclarlo, su transporte y colocación en formaleas, la compactación y el curado que se le proporcione,

La resistencia de un concreto se ve aumentada con la edad, Esto se genera rápidamente durante los primeros días posteriores a su colocación, aún continuará incrementándose de manera más reducida durante un tiempo indefinido, La resistencia a compresión de un concreto a los 28 días, de acuerdo con los ensayos normalizados y teniendo en cuenta que fue curado de manera correcta, se emplea como índice de calidad,⁶

En las últimas décadas se han llevado a cabo distintos experimentos para la obtención de mejoras en la calidad y durabilidad de los concretos, esta última se ve influenciada por la disposición porosa que tiene para el transporte de fluidos, La reducción porosa es una de las causas principales de la aparición de ceniza volante en concretos además de la disminución de costo que esta representa al ser sustituida por un porcentaje de cemento, Por otro lado ayuda a la solución del problema de eliminar la ceniza,⁷

Desde el punto de vista económico, la vida útil de las diferentes estructuras de concreto se encuentra condicionada por el desgaste de los materiales de construcción, En el año 2002, EE.UU, estimó que el costo de corrosión en sus estructuras era de 22,6 mil millones de dólares anuales,⁸

En la actualidad la inclusión de cenizas (volante) se encuentra limitada por el tipo de cemento disponible en el mercado, en vez de condicionar el tipo de cemento a las cenizas disponibles, Esto se ve reflejado en especificaciones proyectadas para que las cenizas se ajusten a los parámetros de los diferentes tipos de cemento encontrados en el mercado,

⁶ RIVERA. L, Gerardo. A. Concreto simple [En línea]. [Consultado 9 de febrero de 2015] Disponible en <http://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/geanrilo/docs/FIC%20y%20GEOtec%20SEM%202%20de%202010/Tecnologia%20del%20Concreto%20-%20%20PDF%20ver.%20%202009/Cap.%2006%20-%20Resistencia.pdf>

⁷ MOLINA BAS, O. I, et al. La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento portland en la durabilidad del hormigón... [Online]. Anales de Mecánica de la Fractura 25, Vol. 2 (2008). Disponible en internet <<http://www.gef.es/Congresos/25/PDF/8-1.pdf>>

⁸ KOCH, G.H; BRONGERS, M.P.H; THOMPSON, N.G, et al. (2002) Corrosion Costs by Industry Sector. Supplement to Materials Performance, 4 – 8

Debido a que las propiedades del concreto con ceniza volante aún no se encuentran bien definidas, se hace evidente la necesidad de más estudios e investigaciones que analicen la trascendencia de las cenizas en el campo de la construcción,

En los antecedentes de investigaciones colombianas no se tiene registro de ningún estudio acerca del módulo de elasticidad con respecto al concreto reforzado, en cambio para concreto simple se pudieron encontrar valores propuestos para el módulo de elasticidad del concreto por el reglamento colombiano de construcción sismo resistente de 2010 NSR-10, esto último siendo apreciablemente mayores a los determinados en los distintos laboratorios y centros de investigación de Bucaramanga y su área metropolitana⁴,

Estudios realizados en la ciudad de Bogotá, proporcionaron las ecuaciones para la determinación de los módulos de elasticidad, y se encontraron diferencias entre los valores estimados partiendo de datos experimentales y los datos obtenidos con la norma NSR-98, En dicho estudio se recomendaba obtener formulas propias para cada región⁹,

⁹ Ruiz D., Vacca H. y León M. (2007), Propuesta de modificación de la ecuación para la estimación del módulo de elasticidad del concreto en función de la resistencia a la compresión para Bogotá. Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería N°67 Julio - Septiembre. P. 7-15.

6. MARCO TEÓRICO,

Debido a que el concreto es el principal material en las construcciones, en los últimos años se han llevado a cabo investigaciones que puedan mejorar sus características principales entre las cuales se encuentran la resistencia a la compresión, la durabilidad, la adherencia y el Módulo de Elasticidad (E), las cuales son necesarias de conocer para el análisis y diseño de estructuras, Estas investigaciones han tenido como resultado el hallazgo de nuevos aditivos en el concreto para el mejoramiento de sus cualidades, En el presente trabajo se ve enfocado un aditivo en especial (Ceniza volante), El cual mejorará y dará nuevas características al concreto, Este trabajo tiene como objetivo el estudio y comparación del Módulo de elasticidad del concreto, a través de ensayos de compresión y flexión, para una vez hallados sean comparados con los estipulados en el reglamento NSR-10, Por dicha razón en este capítulo, se presentarán y explicarán los diferentes términos y materiales a utilizar para el desarrollo del presente trabajo de grado para optar por el título de ingenieros civiles,

6.1. CONCRETO

El concreto es un material compuesto empleado en construcción, formado esencialmente por un aglomerante al que se añade partículas o fragmentos de un agregado, agua y aditivos específicos,

El concreto no es un material eminentemente elástico, esto se puede observar fácilmente si se somete a un espécimen a esfuerzos de compresión crecientes hasta llevarlos a la falla, los cambios volumétricos constituyen uno de los aspectos más importantes del comportamiento del concreto, tanto del punto de vista de la tecnología de diseño de mezclas de concreto, su producción, colocación y curado , como desde la perspectiva del diseño estructural, dado que los efectos se traducen en contracciones y expansiones que ocasionan una gran variedad de problemas, asociados principalmente a fisuras y deformaciones que algunas veces son objetables desde el punto de vista estático y en otras producen la pérdida de la capacidad portante y alteración de las condiciones de uso y operatividad de la estructura,

El principal componente del concreto es el cemento portland el cual ocupa entre el 7% y el 15% del volumen de la mezcla, el segundo componente son los agregados que ocupan entre el 56% y el 76% y el tercer componente es

el agua que ocupa entre el 14% y el 18% del volumen de la mezcla, adicionalmente el volumen de aire atrapado ocupa entre el 1% y el 3%,¹⁰

El aglomerante es en la mayoría de ocasiones cemento (generalmente cemento Portland) mezclado con una proporción adecuada de agua para que se produzca una reacción de hidratación, Las partículas de agregados, dependiendo fundamentalmente de su diámetro medio, son los áridos (que se clasifican en grava, gravilla y arena), La sola mezcla de cemento con arena y agua (sin la participación de un agregado) se denomina mortero, Existen concretos que se producen con otros conglomerantes que no son cemento, como el concreto asfáltico que utiliza betún para realizar la mezcla,

6.2. PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO

Esta es la etapa en la cual se puede manipular el concreto, en ella se realizan actividades tales como mezclado de los materiales para la conformación del mismo, transporte, colocación de la mezcla dentro de la formaleta adecuada y vibrado de la misma, a fin de evitar hormigueros y de eliminar el aire atrapado por las partículas durante el proceso¹¹,

6.3. ASENTAMIENTO

Uno de los ensayos que miden la manejabilidad del concreto fresco es el ensayo de asentamiento, el cual se encuentra descrito en la norma NTC-396, el cual mide la consistencia del concreto o fluidez de la misma, el cono de dimensiones prefijadas por Abrams es llenado en tres capas de igual volumen compactándolas con 25 golpes con una varilla de acero de dimensiones y peso prefijado en el ensayo, una vez se ha llenado completamente el cono, éste es retirado sin girarlo, de ésta forma con la mezcla está fresca y se le ha retirado el soporte lateral que la sostiene, la mezcla se asienta, se toma la diferencia de alturas entre la que tenía la mezcla antes de ser retirado el molde y la que tomó una vez retirado y con esta se mide la manejabilidad de la mezcla, dando como resultado mezclas secas (2,5 – 3,5 cm), semi-secas (3,5 – 5,0 cm), media (5,0 – 10,0 cm), húmeda (10,0 – 15,0 cm) y muy húmedas (mayor a 15,0 cm)¹²,

¹⁰ AWAD ROBERTO ROCEHL. (2007). Hormigón Reforzado NSR-98, Tomo I. Medellín, Antioquia: Universidad EAFIT.

¹¹ Instituto del Concrete-Asocreto. Tecnología y Propiedades. Asociación Colombiana de Productores de concreto. Bogotá. 215p. 2000.

¹² Instituto del Concrete-Asocreto. Tecnología y Propiedades. Asociación Colombiana de Productores de concreto. Bogotá. 215p. 2000.

6.4. CEMENTO

El cemento se puede definir como aquella sustancia adhesiva, natural o artificial, con la que se puede formar masas plásticas, que son capaces de unir entre sí a fragmentos o masas de materiales sólidos con una distribución granulométrica determinada, que generalmente recibe el nombre de agregado, formando un conjunto totalmente compacto, Así mismo con la masa plástica de cemento pueden unirse distintas piezas entre sí, realizarse recubrimientos, enlucir, realizar reparaciones, etc, La unión se produce mediante el endurecimiento del cemento desde el estado plástico,

La definición anterior incluye o abarca a un gran número de sustancias muy diferentes entre sí, que tienen poco en común excepto su adhesividad, Así se tienen cementos inorgánicos y orgánicos, Además la importancia científica y técnica de los diferentes tipos de cemento es muy desigual, lo que ha dado lugar a una restricción de la definición de cemento hacia un grupo de sustancias adhesivas, que son las masas plásticas empleadas para producir la adhesión entre rocas clasificadas (Arena, gravilla y grava), ladrillos, etc,, que es la práctica que se usa en la construcción de edificios en la ingeniería civil,

Los cementos de esta clase también tienen en común cierta relación química, ya que ellos están formados por mezclas que contienen compuestos de cal como constituyentes principales, El término “Cementos” en ese sentido más restrictivo llega a ser equivalente al término “Cementos calcáreos”, aunque también pueden incluirse ciertos compuestos de magnesio, Los cementos orgánicos están basados en los polímeros y debido a su alto costo su uso es muy limitado en comparación con el de los inorgánicos, Generalmente se usan como adhesivos tipo pegamentos y colas¹³,

Sin embargo, están empezando a desarrollarse, usos a gran escala como ligantes de agregados, por ejemplo, como material de endurecimiento rápido para carreteras dañadas y cubiertas de puentes, Dentro de este tipo de cementos puede citarse al metil metacrilato, que es un monómero que endurece “in situ” por polimerización, Los cementos inorgánicos más importantes son aquellos productos, (naturales) o artificiales, que tienen como constituyentes principales compuestos de calcio, que tienen la propiedad de que al mezclarlos con determinados productos líquidos,

¹³ Pickett, G. Effect of Gypsum Content and Other Factors on Shrinkage of Concrete Prisms Proceedings, American Concrete Institute, Vol. 44, October 1974, pp. 149-175.

fundamentalmente agua, forman masas plásticas que a medida que pasa el tiempo van aumentando su resistencia a la compresión y volviéndose rígidas, es decir endurecen y cohesionan,

Normalmente la masa plástica se realiza al mezclar el cemento con agua y el endurecimiento se produce por reacción química con los componentes del agua (HIDRÓLISIS) y por absorción de agua formándose compuestos hidratados (HIDRATACIÓN), Los cementos inorgánicos del tipo anterior pueden clasificarse en dos grandes grupos: HIDRÁULICOS y NO HIDRÁULICOS, Los cementos hidráulicos son aquellos en que la masa plástica aumenta su resistencia tanto al aire como bajo el agua, es decir pueden ser usados como cementos bajo el agua, No solo endurecen por reacción con el agua, sino que se forman compuestos que resisten a su acción, Sin embargo, los no hidráulicos no pueden ser usados bajo el agua (Sus productos de hidratación no son resistentes al agua) y solo endurecen al aire, así las cales no hidráulicas (cales aéreas o duras) endurecen al aire por combinación del CO₂, formando otra vez CaCO₃, pero bajo el agua solo forman una pasta de Ca (OH)₂ que no endurece, Dentro de los cementos inorgánicos hidráulicos el más importante es el cemento portland y su predominancia en la industria de la construcción y en las grandes obras de ingeniería civil es tal que cuando se habla simplemente de cemento se sobreentiende que es del cemento portland,

6.5. AGREGADO GRUESO

Teniendo en cuenta que el concreto es una piedra artificial, el agregado grueso es la materia prima para fabricar el concreto, En consecuencia se debe usar la mayor cantidad posible y del tamaño mayor, teniendo en cuenta los requisitos de colocación y resistencia, Hasta para la resistencia de 250kgf/cm² se debe usar el mayor tamaño posible del agregado grueso; para resistencias mayores investigaciones recientes han demostrado que el menor consumo de concreto para mayor resistencia dada (eficiencia), se obtiene con agregados de menor tamaño,

Se llama eficiencia del concreto a la relación entre la resistencia del concreto y el contenido de cemento, En concreto de alta resistencia, mientras más alta sea esta, menor deberá ser el tamaño máximo para que la eficiencia sea máxima, Para cada resistencia existe un margen estrecho del valor del tamaño máximo por debajo del cual es necesario aumentar el contenido del cemento, En concretos de mediana y baja resistencia mientras mayor sea el tamaño mayor es la eficiencia,¹⁴

¹⁴ <http://elconcreto.blogspot.com/2009/01/agregado-grueso-del-concreto.html>

6.6. AGREGADO FINO

El agregado fino o arena se usa como llenante, además actúa como lubricante sobre los que ruedan los agregados gruesos dándole manejabilidad al concreto, Una falta de arena se refleja en la aspereza de la mezcla y un exceso de arena demanda mayor cantidad de agua para producir un asentamiento determinado, ya que entre más arena tenga la mezcla se vuelve más cohesiva y al requerir mayor cantidad de agua se necesita mayor cantidad de cemento para conservar una determinada relación agua cemento¹⁵,

6.7. AGUA

El agua es un componente esencial en las mezclas de concreto y morteros, pues permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante,

Para cada cuantía de cemento existe una cantidad de agua del total de la agregada que se requiere para la hidratación del cemento; el resto del agua solo sirve para aumentar la fluidez de la pasta para que cumpla la función de lubricante de los agregados y se pueda obtener la manejabilidad adecuada de las mezclas frescas, El agua adicional es una masa que queda dentro de la mezcla y cuando se fragua el concreto va a crear porosidad, lo que reduce la resistencia, razón por la que cuando se requiera una mezcla bastante fluida no debe lograrse su fluidez con agua, sino agregando aditivos plastificantes,

El agua utilizada en la elaboración del concreto y mortero debe ser apta para el consumo humano, libre de sustancias como aceites, ácidos, sustancias alcalinas y materias orgánicas, En caso de tener que usar en la dosificación del concreto, agua no potable o de calidad no comprobada, debe hacerse con ella cubos de mortero, que deben tener a los 7 y 28 días un 90% de la resistencia de los morteros que se preparen con agua potable,¹⁶

6.8. AIRE

Cuando el concreto se encuentra en proceso de mezclado, es normal que quede aire incluido dentro de la masa (aire naturalmente atrapado), el cual posteriormente es liberado por los procesos de compactación a que es sometido el concreto una vez ha sido colocado, Sin embargo, como la

¹⁵ Instituto del Concreto- Asocreto. Tecnología y Propiedades. Asociación Colombiana de Productores de concreto. Bogotá. 215p. 2000

¹⁶ <http://elconcreto.blogspot.com/2009/01/el-agua-del-concreto.html>

compactación no es perfecta, queda siempre un aire residual dentro de la masa endurecida, Además, en algunas ocasiones se incluyen burbujas de aire, por medio de aditivos, con fines específicos¹⁷,

6.9. ADITIVOS

Los materiales que se agregan al concreto durante o antes del mezclado se denominan aditivos, Se usan para mejorar el desempeño del concreto en ciertas situaciones, así como para disminuir su costo, Hay un dicho bastante conocido relacionado con los aditivos, que dice que “son para el concreto lo que los artículos de belleza son para el pueblo”, Varios de los tipos más comunes de aditivos se dan en la siguiente lista y se describen brevemente,

- Los aditivos inclusivos de aire, se usan principalmente para incrementar la resistencia del concreto al congelamiento y derretimiento; proporcionan mejor resistencia a la acción de deterioro de las sales descongelantes, Los agentes inclusivos de aire ocasionan la formación de espuma en el agua de mezclado, resultando billones de burbujas de aire estrechamente espaciadas que se incorporan en el concreto, Cuando el concreto se congela, el agua penetra en las burbujas de aire, aliviando la presión sobre el concreto, Cuando el concreto se descongela, el agua puede salir de las burbujas gracias a lo cual se da un menor agrietamiento al que se hubiera dado sin usar el aire atrapado,
- La adición de aditivos acelerantes, como el cloruro de calcio, acelera en el concreto el desarrollo de su temprana resistencia, Los resultados de tales adiciones (particularmente útiles en climas fríos) son los tiempos reducidos requeridos para el curado y protección del concreto, así como el pronto retiro de la cimbra, (La sección 3,6,3 del código ACI establece que debido a problemas de corrosión, el cloruro de calcio no debe agregarse a concretos con aluminio ahogado, ni a concretos colados en cimbras de acero galvanizado permanente, ni a concretos preesforzados,) Hay otros aditivos aceleradores que pueden usarse, entre éstos se incluyen varias sales solubles y otros compuestos orgánicos,
- Los aditivos retardadores se usan para retardar tanto el fraguado del concreto como los aumentos de temperatura, Consisten en

¹⁷ Mezclas binarias y ternarias basadas en cenizas volantes. Influencia del activador sobre la formación de fases y resistencias mecánicas. Sindy Sofía Suarez Silgado. Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Julio de 2010. Universidad Politécnica de Cataluña.

varios ácidos o azúcares, o derivados del azúcar, Algunos conductores de camiones de concreto llevan consigo sacos de azúcar para añadirla al concreto en caso de ser demorados por el tránsito u otra circunstancia, Los aditivos retardadores son particularmente útiles para grandes colados donde pueden presentarse notables incrementos de temperatura, También prolongan la plasticidad del concreto, permitiendo mejorar el mezclado o adherencia entre colados sucesivos, Los retardadores también pueden desacelerar la hidratación del cemento en superficies de concreto expuestas o superficies cimbradas para producir acabados atractivos con agregado aparente,

- Los superplastificantes son aditivos hechos a partir de sulfonatos orgánicos, Su uso permite a los ingenieros reducir considerablemente el contenido de agua en los concretos y al mismo tiempo incrementar sus revenimientos, Aunque los superplastificantes también pueden usarse para mantener proporciones de agua-cemento constantes usando menos cemento, son más comúnmente usados para producir concretos manejables con resistencias considerablemente superiores, aun-que se use la misma cantidad de cemento, Un producto relativamente nuevo, el concreto autoconsolidante, utiliza superplastificantes y modificaciones en las proporciones de las mezclas para producir una mezcla muy manejable que no requiere vibración, aun para las situaciones de colocación más congestionadas,
- Usualmente, materiales impermeables al agua se aplican a las superficies endurecidas de concreto, pero pueden agregarse también a las mezclas de concreto, Estos aditivos consisten general-mente en algún tipo de jabón o de algunos productos derivados del petróleo, como por ejemplo las mulsiones asfálticas, Pueden ayudar a retardar la penetración del agua en los concretos porosos, pero probablemente no ayudan mucho a los concretos densos, bien curados,¹⁸
-

¹⁸ MCCORMAC, Jack C; BROWN, Russell H. Diseño de concreto reforzado. 8a Edición. México: Alfaomega Grupo Editor. 2011. 9 p.

6.10. ACERO

El acero es uno de los más importantes materiales estructurales, Entre sus propiedades de particular importancia en los usos estructurales, están la alta resistencia, comparada con cualquier otro material disponible, y la ductilidad, Ductilidad es la capacidad que tiene el material de deformarse sustancialmente ya sea a tensión o compresión antes de fallar, Otras ventajas importantes en el uso del acero son su amplia disponibilidad y durabilidad, particularmente con una modesta cantidad de protección contra el interperismo,

El acero se produce por la refinación del mineral de hierro y metales de desecho, junto con agentes fundentes apropiados, coque (para el carbono) y oxígeno, en hornos a alta temperatura, para producir grandes masas de hierro llamadas arrabio de primera fusión, El arrabio se refina aún más para remover el exceso de carbono y otras impurezas y/o se alea con otros metales como cobre, níquel, cromo, manganeso, molibdeno, fósforo, sílice, azufre, titanio, columbio y vanadio, para producir las características deseadas de resistencia, ductilidad, soldadura y resistencia a la corrosión¹⁹,

6.10.1. ACERO DE REFUERZO

El refuerzo usado en las estructuras de concreto puede ser en forma de varillas o de malla soldada de alambre, Las varillas pueden ser lisas o corrugadas, Las varillas corrugadas, que tienen protuberancias en sus superficies (los patrones difieren según los fabricantes) para aumentar la adherencia entre el concreto y el acero, se usan en casi todas las aplicaciones, El alambre corrugado es dentado y no con protuberancias por laminado, Las varillas lisas no se usan con frecuencia, excepto para rodear las varillas longitudinales, sobre todo en columnas,

Las varillas redondeadas lisas están identificadas por sus diámetros en fracciones de pulgada, como de 3/8", 1/2" y 5/8", Las varillas corrugadas son redondas y varían en tamaños del #3 al #11, con dos tamaños muy grandes, el #14 y el #18, también disponibles, Para varillas de hasta el #8 inclusive, el número de la varilla coincide con el diámetro de la varilla en octavos de pulgada, Por ejemplo, una varilla del #7 tiene un diámetro de 7/8 de pulgada y un área de la sección transversal de 0,60 plg² (que es el área de un círculo con un diámetro de 7/8 de pulgada), Antes las varillas se fabricaban con

¹⁹ HERNANDEZ DE LA CRUZ, Marcos. Construcción de estructuras de acero. México. 2008. 2 p.

secciones redondas y cuadradas, pero actualmente todas las varillas son redondas²⁰,

Las varillas #9, #10 y #11 tienen diámetros que proporcionan áreas iguales a las áreas de las viejas varillas cuadradas de 1 plg x 1 plg, 1 1/8 de pulgada x 1 1/8 de pulgada y 1 1/4 de pulgada x 1 1/4 de pulgada, respectivamente, De manera similar, las varillas #14 y #18 corresponden a las viejas varillas cuadradas de 1 1/2 plg x 1 1/2 plg y de 2 plg x 2 plg, respectivamente,

6.10.2. CARACTERISTICAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VARILLAS

Al producir exactamente las mismas varillas, la industria no tiene que conservar los inventarios diferentes (un conjunto de tamaños para varillas de libra-pulgada y otro conjunto de tamaños diferentes de varillas en unidades métricas), La figura 12 muestra los tamaños de varillas dándose ambos conjuntos de unidades²¹

Varillas estándar de libra-pulgada			Varillas con valores aproximados en el sistema métrico		
Número de varilla	Diámetro (plg)	Área (plg ²)	Número de varilla	Diámetro (mm)	Área (mm ²)
3	0.375	0.11	10	9.5	71
4	0.500	0.20	13	12.7	129
5	0.625	0.31	16	15.9	199
6	0.750	0.44	19	19.1	284
7	0.875	0.60	22	22.2	387
8	1.000	0.79	25	25.4	510
9	1.128	1.00	29	28.7	645
10	1.270	1.27	32	32.3	819
11	1.410	1.41	36	35.8	1006
14	1.693	2.25	43	43.0	1452
18	2.257	4.00	57	57.3	2581

Figura 12,Tamaños y áreas de las varillas de refuerzo

6.11. CONCRETO REFORZADO

Es el más popular y desarrollado de estos materiales, ya que aprovecha en forma muy eficiente las características de buena resistencia en compresión, durabilidad, resistencia al fuego y moldeabilidad del concreto, junto con las de alta resistencia en tensión y ductilidad del acero, para formar un material

²⁰ MCCORMAC, Jack C; BROWN, Russell H. Op. Cit., 30p

²¹ MCCORMAC, Jack C; BROWN, Russell H. Op. Cit., 39p

compuesto que reúne muchas de las ventajas de ambos materiales componentes, Manejando de manera adecuada la posición y cuantía del refuerzo, se puede lograr un comportamiento notablemente dúctil en elementos sujetos a flexión, Por el contrario, el comportamiento es muy poco dúctil cuando la falla está regida por otros estados límite como cortante, torsión, adherencia y carga axial de compresión, En este último caso puede eliminarse el carácter totalmente frágil de la falla si se emplea refuerzo transversal en forma de zuncho, El concreto está sujeto a deformaciones importantes por contracción y flujo plástico que hacen que sus propiedades de rigidez varíen con el tiempo, Estos fenómenos deben ser considerados en el diseño, modificando adecuadamente los resultados de los análisis elásticos y deben tomarse precauciones en la estructuración y el dimensionamiento para evitar que se presenten flechas excesivas o agrietamientos por cambios volumétricos, Por su moldeabilidad, el concreto se presta a tomar las formas más adecuadas para el funcionamiento estructural requerido y, debido a la libertad con que se puede colocar el refuerzo en diferentes cantidades y posiciones, es posible lograr que cada porción de la estructura tenga la resistencia necesaria para las fuerzas internas que se presentan,

6.12. VENTAJAS DEL CONCRETO REFORZADO COMO MATERIAL ESTRUCTURAL

El concreto reforzado es probablemente el material disponible más importante para la construcción, Puede usarse en una u otra forma para casi todas las estructuras, grandes o pequeñas: en edificios, puentes, pavimentos, presas, muros de retención, túneles, instalaciones de drenaje e irrigación, tanques, etcétera, El gran éxito de este material universal en la construcción puede entenderse fácilmente si se consideran sus numerosas ventajas, Algunas de éstas son las siguientes:

- Tiene una resistencia considerable a la compresión por unidad de costo en comparación con muchos otros materiales,
- El concreto reforzado tiene gran resistencia a las acciones del fuego y el agua y, de hecho, es el mejor material estructural que existe para los casos en que el agua esté presente, Durante incendios de intensidad media, los miembros con un recubrimiento adecuado de concreto sobre las varillas de refuerzo sufren sólo daño superficial sin fallas,
- Las estructuras de concreto reforzado son muy rígidas,
- Requiere de poco mantenimiento,

- Comparado con otros materiales, tiene una larga vida de servicio, Bajo condiciones apropiadas, las estructuras de concreto reforzado pueden usarse indefinidamente sin reducción en sus capacidades de carga, Esto puede explicarse por el hecho de que la resistencia del concreto no disminuye con el tiempo, sino que en realidad aumenta con los años, debido al largo proceso de solidificación de la pasta de cemento,
- Es prácticamente el único material económico disponible para zapatas, losas de piso, muros de sótano, columnas y construcciones similares,
- Una característica especial del concreto es la posibilidad de colarlo en una variedad extraordinaria de formas que van desde simples losas, vigas y columnas, hasta grandes arcos y cascarones,
- En muchas regiones, el concreto aprovecha para su elaboración la existencia de materiales locales baratos (arena, grava y agua) y requiere cantidades relativamente pequeñas de cemento y acero de refuerzo, las cuales puede ser necesario conseguir en otras regiones del país,
- Se requiere mano de obra de baja calificación para su montaje, en comparación con otros materiales, como el acero estructural,²²

6.13. COMPATIBILIDAD DEL CONCRETO Y EL ACERO

El concreto y el acero de refuerzo funcionan en conjunto en forma excelente en las estructuras de concreto reforzado, Las ventajas de cada material compensan las desventajas del otro, Por ejemplo, la gran ventaja del concreto es su falta de resistencia a la tensión; pero la resistencia a la tensión es una de las grandes ventajas del acero, Las varillas de refuerzo tienen una resistencia a la tensión aproximadamente 100 veces mayor a la del concreto usado, Los dos materiales se adhieren muy bien entre sí de modo que no hay deslizamiento entre los dos y por tanto funcionan conjuntamente como una unidad para resistir las fuerzas, La excelente liga obtenida se debe a la adherencia química entre los dos materiales, a la rugosidad natural de las varillas y a la estrecha separación de las corrugaciones en las superficies de las varillas, Las varillas de refuerzo están expuestas a la corrosión, pero el concreto que las rodea les proporciona excelente protección, La fuerza del acero expuesto a las temperaturas que se alcanzan en los incendios normales es nula, pero su recubrimiento con concreto da como resultado calificaciones de prueba de fuego muy satisfactorias, Finalmente, el concreto y el acero trabajan muy

²² MCCORMAC, Jack C; BROWN, Russell H. Op. Cit., 1p.

bien juntos respecto a los cambios de temperatura porque sus coeficientes de dilatación térmica son muy parecidos, Para acero el coeficiente es 0,0000065 por unidad de longitud por grado Fahrenheit y para el concreto varía entre 0,000004 y 0,000007 (valor promedio, 0,0000055),²³

6.14. CENIZA VOLANTE

Las cenizas son los residuos de la combustión de carbón pulverizado en centrales térmicas, Los productos de esta combustión se subdividen en cenizas volantes y de hogar, Los primeros, son residuos volátiles obtenidos a lo largo del trayecto de los gases de la combustión del carbón que son evacuados por la chimenea de la caldera, Las propiedades de estas cenizas varían ampliamente según el tipo de carbón, el residuo de cenizas, el grado de pulverización y el tipo de colectores empleados, Aun cuando estas cenizas se obtengan de una misma fuente de producción, sus propiedades físicas y químicas presentan cierto rango de variación, Las cenizas de hogar, por su parte, se obtienen desde el fondo del hogar de la caldera y el tamaño de sus partículas es entonces mayor que el de las cenizas volantes, Su producción corresponde al 20 %, aproximadamente, del total de cenizas obtenidas²⁴,

Las cenizas como subproducto, se han visto utilizando por varios motivos: conservación y reciclado de recursos y materias primas, conservación y ahorro de energía, protección ambiental y, en el campo del concreto, por imperativos del desarrollo tecnológico moderno de este material,

Las cenizas son aptas como adiciones activas al Clinker de cemento portland, en paralelo con las puzolanas naturales, ya que como materiales activo, confieren a los cementos naturales, ya que como materiales activo, confieren a los cementos resultantes propiedades y comportamientos específicos distintos y mejores en muchos aspectos que los cementos portland ordinarios que no contienen adiciones activas o constituyentes secundarios,

6.14.1. CENIZAS VOLANTES EN EL CONCRETO

El tamaño de las partículas de ceniza volante varia, pero tiende a ser similar o ligeramente más grande que la tipo I Cemento Portland, Las cenizas volantes se obtienen de los gases de escape mediante precipitadores electrostáticos o filtros de mangas, Composición química de la ceniza volante

²³ MCCORMAC, Jack C; BROWN, Russell H. Op. Cit., 6p.

²⁴ REVISTA COMBUSTION, octubre 1974: "Nuevo enfoque para la ceniza volante".

es principalmente de vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio, Color generalmente varía de gris oscuro a canela amarillento de cenizas volantes utilizados para el concreto,

ASTM C 618 Especificaciones para cenizas volantes de carbón y crudo o calcinada puzolana natural para uso como adición mineral en concreto tiene dos designaciones para las cenizas volantes utilizadas en concreto²⁵,

- Clase F cenizas volantes normalmente se produce por la quema de la antracita o carbón bituminoso que cumpla con los requisitos aplicables, Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas y tendrá un dióxido de sílice mínimo más óxido de hierro óxido de aluminio, más del 70%,
- Cenizas de Clase C normalmente se produce a partir de carbón sub-bituminoso que cumpla con los requisitos aplicables, Esta clase de cenizas volantes, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes y tendrá un dióxido de sílice mínimo más óxido de aluminio más contenido de óxido de hierro de 50%,

La mayoría de las especificaciones estatales y federales permitan, e incluso estimulan, el uso de las cenizas volantes; especialmente, cuando se necesitan los requisitos de durabilidad específicos, Además de éstas, existen otras clasificaciones hechas por diferentes autores en las cuales se han manejado distintos criterios,

6.14.2. VENTAJAS DE CENIZAS VOLANTES EN EL CONCRETO

Las cenizas volantes mejoran la trabajabilidad del concreto y reduce la demanda de agua, Partículas de cenizas volantes son diminutas cuentas de vidrio principalmente esféricas, Materiales terrestres, como el cemento Portland son partículas sólidas angulares, Partículas de cenizas volantes proporcionan una mayor facilidad de trabajo de la porción de polvo de la mezcla de concreto que se traduce en una mayor facilidad de trabajo del concreto, y una disminución de la necesidad de agua para la misma consistencia normal del concreto, El uso de cenizas volantes puede reducir en gran medida la acumulación de calor, el agrietamiento externo y la permeabilidad de concreto,

²⁵ ASTM INTERNATIONAL. Standard Spec. Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan. Philadelphia, 2002, (ASTM C618).

Cabe resaltar que los costos de las cenizas volantes es generalmente mayor que el cemento Portland en función de transporte, Cantidades importantes pueden ser sustituidas por el cemento Portland en mezclas de concreto y sin embargo aumentar la fuerza y la durabilidad a largo plazo, Por lo tanto, el uso de las cenizas volantes puede impartir beneficios considerables a la mezcla de concreto,

6.15. MÓDULO DE ELASTICIDAD

El Módulo de elasticidad del concreto, es una propiedad mecánica que indica la rigidez de un material, Su estudio es importante, dado que sirve como parámetro para determinar las deformaciones que tiene un material, al aplicarle esfuerzos,

Es muy importante conocer de un material que vaya a ser utilizado para funciones estructurales, tanto la resistencia que posee, como la deformación que tendrá dicho material al aplicarle una determinada carga²⁶,

6.16. ZONA ELÁSTICA²⁷

Es la capacidad que tienen los materiales de recuperar la forma inicial cuando cesa la carga que los deforma, Si se pasa de los límites de elasticidad llega a la zona plástica donde la deformación producida es permanente, Se valora mediante el llamado límite elástico “carga que puede soportar un material por unidad de sección, sin sufrir deformaciones permanentes”, Se calcula con los ensayos de resistencia de materiales, muy importantes a la hora de dimensionar cada pieza por debajo del límite elástico,

Para determinar el límite elástico se hace por medio del ensayo de tracción o se puede determinar a partir de un ensayo de flexión, en el cual se determina el módulo a partir de las deflexiones obtenidas en el elemento y de sus propiedades de rigidez,

En la figura 13, se puede observar un diagrama característico de un ensayo de tracción:

²⁶ ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. (ASTM C469/C469 M-10)

²⁷http://www.aulatecnologia.com/BACHILLERATO/1_bg/APUNTES/materiales/propiedadesmateriales.htm

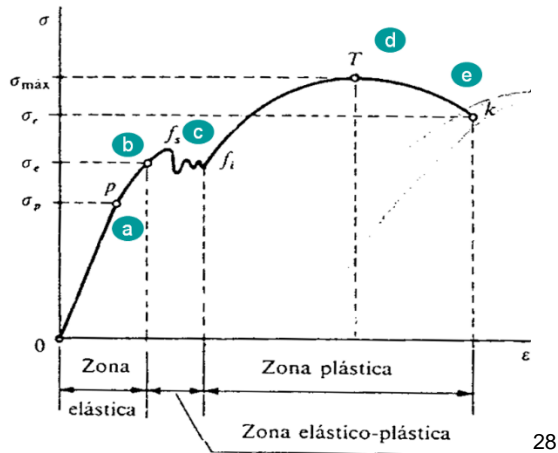


Figura 13, Zonas del acero ensayado a tracción,

La zona elástica comprende los puntos (0ab) los alargamientos elásticos son pequeños y proporcionales a los esfuerzos, Cuando el esfuerzo cesa la probeta recupera su estado inicial,

La zona elástica es la misma zona proporcional (0ab), Hay una relación lineal entre tensión y deformación, Esta relación se conoce como (E) módulo de elasticidad o de Young (N/m²), que es la relación entre la tensión y la deformación en la zona de comportamiento proporcional,

Zona elástico plástica (bc), en esta zona no se recupera su condición inicial, pero existe una gran deformación unitaria bajo un esfuerzo constante, también se conoce como la zona de fluencia en los aceros dúctiles,

Zona plástica (cde), en esta zona el material no tiene un comportamiento uniforme y se produce la falla del material, al inicio entre c y d, gana un poco de resistencia, pero después falla cuando alcanza sus límites máximos de deformaciones,

6.16.1. TEORÍA DE LA ELASTICIDAD DE LOS MATERIALES (RELACIÓN ESFUERZO – DEFORMACIÓN UNITARIA)

Cuando un cuerpo que está sometido a una carga externa es seccionado, hay una distribución de fuerza que actúa sobre el área seccionada que

²⁸ <http://mecatronica4b.blogspot.com/2011/11/diagrama-esfuerzo-deformacion-unitaria.html>

mantiene cada segmento del cuerpo en equilibrio, La intensidad de esta fuerza interna en un punto del cuerpo se denomina esfuerzo,²⁹

El esfuerzo normal de un material, es el resultado de dividir una carga axial (P) con el área de la sección transversal,

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación (1)}$$

El esfuerzo dado que es una fuerza dividida sobre un área, sus unidades según el sistema internacional (SI), la fuerza se denotan en Newton (N) y el área en metros cuadrados (m²), expresándose en N/m², o Pascal (Pa), Para el sistema americano se mide la fuerza en libras (lb) y el área en pulgadas cuadradas (plg²), quedando el esfuerzo en lb/plg², psi,

La resistencia de un material no es el único criterio que debe utilizarse al diseñar estructuras, Frecuentemente, la rigidez suele tener la misma o mayor importancia, Así como otras propiedades como la dureza, tenacidad y ductilidad también influye en la decisión de un material, Estas propiedades se determinan mediante pruebas, comparando los resultados obtenidos con patrones establecidos,³⁰

Cuando se aplica una fuerza a un cuerpo, esta tiende a cambiar la forma y tamaño del cuerpo, A estos cambios se les llama deformación y esta puede ser visible o prácticamente inadvertida si no se emplea el equilibrio apropiado para hacer mediciones precisas,³¹

A partir de una prueba de tensión o de compresión de un material, permite determinar el alargamiento que tienen diversos materiales al aplicarse cargas, ya que cualquier material al soportar una fuerza tiende a obtener deformaciones constantes en el mismo sentido que se está aplicando la fuerza,

La prueba consiste en someter una pieza de un determinado material (probeta), generalmente en aceros, a esfuerzos que se aumentan gradualmente hasta que el material llegue a la rotura,

Considerando una probeta con un área (A) a la que se le aplica en sus extremos una fuerza axial (F) ya sea a tensión o compresión, La probeta

²⁹ HIBBELER, Russel C. Mecánica de Materiales. México: Cecsa. 1994. 27p.

³⁰ SINGER, Ferdinand y Pytel, Andrew. Resistencia de Materiales. 3a Edición. México: Harla. 1982. 27p.

³¹ HIBBELER, Russell C. Op. Cit., 69p.

debido al esfuerzo se comienza a alargar, Aumentando progresivamente el valor de la fuerza (F) y midiendo las deformaciones que esté sufriendo el material a lo largo de la fuerza, se puede graficar una curva llamada diagrama de esfuerzo-deformación,

Desde el origen de la curva esfuerzo-deformación hasta un punto llamado límite de proporcionalidad, el diagrama es un segmento rectilíneo, de donde se deduce la tan conocida relación de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación, enunciada en el año 1678 por Robert Hooke,

El límite de proporcionalidad tiene una gran importancia, ya que toda la teoría subsiguiente respecto al comportamiento de los sólidos elásticos está basada precisamente en la citada proporcionalidad: según la deformación así es la fuerza,³²

Según Hooke, la deformación (unitaria) ε es el cociente del alargamiento (deformación total) δ y la longitud L en la que se ha producido,

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Un diagrama de esfuerzo-deformación, es importante en la ingeniería ya que proporciona un medio para obtener datos sobre la resistencia a tensión o compresión del material sin importar el tamaño o forma física del material,³³

6.16.2. DEFINICION DE MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS MATERIALES

El módulo elástico, E, proporciona una información muy práctica, Representa la rigidez del material (estos es, su resistencia a la deformación elástica), y se manifiesta como la cantidad de deformación durante la utilización normal del material por debajo de su límite elástico y también como el grado de recuperación elástica del material durante el conformado,³⁴

Thomas Young (1773 – 1829), físico y medico inglés, fue el primero en definir el módulo elástico, anteriormente conocido como módulo de Young, E,

Cuando un material se comporta elásticamente y exhibe también una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria, se dice que es

³² SINGER, Ferdinand y Pytel, Andrew. Op. Cit., 29p.

³³ HIBBELER, Russell C. Op. Cit., 97p.

³⁴ SCHACKELFORD, James F. Introducción a la ciencia de Materiales para Ingenieros. 6a Edición. Madrid: Pearson Education. 2005. 183 p.

elástico lineal, La relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria en una barra sometida a tensión o compresión simple se expresa por la siguiente ecuación,³⁵

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{Ecuación (3)}$$

Esta ecuación se conoce también como la ley de Hooke, donde σ es el esfuerzo axial, ε es la deformación unitaria axial y E, es el módulo de elasticidad del material,

El módulo de elasticidad es la pendiente del diagrama esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica lineal, También se puede calcular como el cociente entre el esfuerzo y la deformación unitaria,

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Como la pendiente tiene unidades de esfuerzo dividido entre deformaciones unitarias, el módulo de elasticidad, E, posee las mismas unidades,

Los valores comunes de módulos de elasticidad, E, para distintos materiales de ingeniería están a menudo tabulados en códigos de ingeniería y en libros de referencia,³⁶

6.16.3. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO

Generalmente los códigos de construcción en los países, generan las ecuaciones de módulo de elasticidad del concreto en función de esfuerzos de compresión al que hayan sido sometidos, Igualmente se puede calcular en el laboratorio mediante el ensayo del módulo de elasticidad según la Norma Técnica Colombiana (NTC4025),³⁷

Para determinar el módulo de elasticidad del concreto en Colombia, la Norma Técnica Colombiana (NTC-4025) establece los parámetros del ensayo y los requisitos que se deben cumplir,

³⁵ GERE, James m. y TIMOSHENKO, Stephen P. Mecánica de Materiales. 2a Edición. México: Grupo Editorial Iberoamericana. 1986. 23p

³⁶ HIBBELER, Russell C. Op. Cit., 95p.

³⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN INCONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC 4025: Concretos. Método de Ensayo para Determinar el Modulo de Elasticidad Estático y la Relación de Poisson en Concreto a Compresión. Bogota. 2006

La NTC 4025 es una adopción idéntica (IDT) por traducción de la ASTM C469:2002,³⁸

Se deben realizar probetas en concreto moldeadas cilíndricamente, y se deben probar una vez hayan cumplido los tiempos de fraguado y de curado previamente establecidos,¹⁵

Como el módulo de elasticidad se manifiesta como la cantidad de deformación que tiene un material al aplicarse fuerzas de compresión por debajo de su límite elástico, las cargas deben ser máximas del 40% de la carga máxima de resistencia del concreto,

Se puede usar cualquier tipo de máquina de ensayo capaz de imponer una carga a una tasa y a una magnitud fijada en el numeral 6,4 de la NTC 4025, Se debe utilizar un extensómetro que cumpla los requisitos en el numeral 3, De la NTC 4025, para medir deformaciones de los cilindros una vez le están aplicando las fuerzas,

El módulo de elasticidad se calcula mediante la siguiente fórmula: ,¹²

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

E = módulo de elasticidad secante, en MPa (psi)

S_2 = esfuerzo correspondiente al 40% de la carga ultima

S_1 = esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal, ε_1 , de las 50 millonésimas, en MPa

ε_2 = deformación longitudinal producida por el esfuerzo S_2

6.16.4. MÉTODO DEL SEGUNDO TEOREMA DE CASTIGLIANO

En 1879, Alberto Castigliano, un ingeniero de ferrocarriles italiano, publicó un libro en el que delineó un método para determinar la deflexión o la pendiente en un punto de una estructura, ya fuese esta una armadura, una viga o un marco, Este método llamado segundo teorema de Castigliano o método del trabajo mínimo, es aplicable sólo a estructuras con temperaturas constantes, con soportes sin asentamientos y hechas de material con respuesta elástica lineal,³⁹

³⁸ ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson Ratio of Concrete in Compression. Philadelphia, 2002m 3 il, (ASTM C469)

³⁹ HIBBELER, Russel C. Análisis Estructural. 3a Edición. México: Prentice Hall. 1997. 417p.

Este método sirve para calcular las redundantes de un sistema estáticamente indeterminado, entendiéndose “redundante” como una incógnita que no se puede resolver con las ecuaciones de equilibrio estática, cuando se aplica el primer teorema,

El teorema original dice: “la componente de deflexión del punto de aplicación de una acción sobre una estructura, en la dirección de dicha acción, se puede obtener evaluando la primera derivada parcial de la energía interna de deformación de la estructura con respecto a la acción aplicada”,⁴⁰

Si va a determinarse el desplazamiento de un punto, el teorema establece que este es igual a la primera derivada parcial de la energía de deformación en la estructura con respecto a una fuerza que actúa en el punto y en la dirección del desplazamiento,

De manera similar, la pendiente en un punto de una estructura es igual a la primera derivada parcial de la energía de deformación en la estructura respecto a un momento concentrado que actúa en el punto y en la dirección de la rotación,¹⁹

En el teorema de Castigliano se observa que el módulo de elasticidad es inversamente proporcional al desplazamiento así:

$$\delta = \frac{1}{E \cdot I} \int_0^l M \cdot \frac{\partial M}{\partial P} \quad \text{Ecuación (6)}$$

En la ecuación anterior, se tiene que M es el momento interno de la estructura, $\frac{\partial M}{\partial P}$ es la derivada interna del momento respecto a la carga ficticia aplicada en donde se determina el desplazamiento, I es la inercia del elemento estructural y E es el módulo de elasticidad del material,

El análisis de una viga simplemente apoyada (tal y como se realizó en laboratorio para el presente trabajo de grado), por el método del segundo Teorema de Castigliano es el siguiente:

⁴⁰ ESCAMILLA, Jairo U. Análisis de Estructuras. Santa Fe de Bogotá: Uniandes. 1991. 69p.

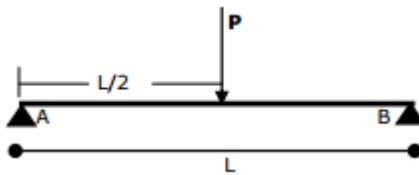


Figura 14, Diagrama de vida de laboratorio sometida a flexión,

Dónde:

P: Carga aplicada variable

L: Longitud de la viga

Para determinar el valor de la deflexión en el punto donde se aplica la carga P a la viga, se produce a desarrollar el análisis de la deflexión de la viga y así, posteriormente se determina el módulo de elasticidad a partir de la relación que se establece entre la carga P aplicada y la deflexión (δ) encontrada,

A continuación se muestra la solución que se obtiene de las reacciones de la viga con la carga P aplicada,

$$R_A = \frac{P}{2}$$

$$R_B = \frac{P}{2}$$

Después que se determinan las reacciones de la estructura, se procede a desarrollar el análisis de los cortes de la viga de tal manera que se obtienen los momentos internos, En la viga en análisis se presentan dos cortes de la siguiente manera, en los cuales se obtiene la derivada parcial respecto a la carga P aplicada en el centro de la luz de la viga simplemente apoyada,

$$\begin{aligned} \text{Corte 1:} \quad & 0 \leq x \leq L/2 \\ & M_1 = \frac{P}{2} \cdot x \Big|_0^{L/2} \quad \frac{\partial M_1}{\partial P} = \frac{x}{2} \\ \text{Corte 2:} \quad & L/2 \leq x \leq L \\ & M_1 = \frac{L \cdot P}{2} - \frac{P \cdot x}{2} \Big|_{L/2}^{L} \quad \frac{\partial M_2}{\partial P} = \frac{L}{2} - \frac{x}{2} \end{aligned}$$

Para determinar la deflexión, se utiliza la ecuación (6) del documento y se determina el valor de la deflexión en función del Módulo de Elasticidad Estático (E_c), de la inercia (I), de la longitud de la viga (L) y de la carga (P) aplicada en el elemento,

$$\delta = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \left[\int_0^{\frac{L}{2}} \left(\frac{P}{2} \cdot x \right) \cdot \left(\frac{x}{L} \right) \cdot dx + \int_{\frac{L}{2}}^L \left(\frac{P \cdot L - P \cdot x}{2} \right) \cdot \left(\frac{L - x}{2} \right) \cdot dx \right]$$

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad \text{Ecuación (7)}$$

6.16.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO SEGÚN EL REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10,

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente de 2010 (NSR-10)⁴¹, se encarga de dar las condiciones de seguridad con las que debe contar las construcciones, Es un deber seguirla y cumplirla a cabalidad, para que las construcciones sean resistentes a eventuales sismos y cargas,

El Título C del reglamento NSR-10 proporciona los requisitos mínimos para el diseño y la construcción de elementos de concreto estructural de cualquier estructura construida según los requisitos del NSR-10 del cual el Título C forma parte, El Título c también cubre la evaluación de resistencia de estructuras existentes,

Este título fue elaborado por AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica), El Título C de la NSR-10 está basado en el documento “Requisitos de Reglamento para concreto estructural (ACI 318S-08)” preparado por El Comité ACI 318 del American Concrete Institute, al cual se le han introducido modificaciones para adaptarlo al medio colombiano,

El módulo de elasticidad, E_c para el concreto puede tomarse como $W_c^{1,5} 0,043 \sqrt{f'_c}$ (en MPa), para valores de w_c comprendidos entre 1440 y 2560 kg/m^3 , Para concreto de densidad normal, E_c puede tomarse como $4700 \sqrt{f'_c}$,⁴² Donde f'_c corresponde al esfuerzo en compresión del concreto normal en MPa

El módulo de elasticidad del concreto es sensible al módulo de elasticidad del agregado y puede diferir del valor específico, Los valores medidos varían típicamente de 120 a 80 por ciento del valor específico, La norma NTC 4025

⁴¹ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA (AIS) (1998). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente. NSR 98. Titulo C: Concreto Estructural. C-1.

⁴² Ibid. p. C-8.5

(ASTM C469C,8,8) se describe métodos para la determinación del módulo de elasticidad del concreto,

El Reglamento Colombiano de Construcción sismo Resistente (NSR-10), en su Título C, a diferencia del reglamento anterior NSR-98, no dispone de ecuaciones para módulo de elasticidad según el origen de los agregados (Material ígneo, sedimentario, metamórfico), cuando se dispone de w_c y f'_c ,

6.17. MEDIDA DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto, dada la importancia que reviste esta propiedad, dentro de una estructura convencional de concreto reforzado, La forma de expresarlas en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm^2 y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (PSI,), La equivalencia que hay entre los dos es que 1 PSI, Es igual a $0,07 \text{ kg/cm}^2$, Aunque hoy en día se ha acogido expresarla en Mega-Pascales (MPa), de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades,

La forma de evaluar la resistencia del concreto es mediante pruebas mecánicas que pueden ser destructivas, para lo cual se toman muestras y se hacen especímenes para fallar, o no destructivas, las cuales permiten probar repetidamente la muestra de manera que se pueda estudiar la variación de la resistencia u otras propiedades con el paso del tiempo, Para las primeras, se utilizan tres tipos de muestras: cilindros, cubos y prismas,⁴³

6.18. DEFLEXIONES

Las deflexiones de las estructuras pueden tener diversas fuentes como cargas, efectos de temperatura, errores de fabricación o asentamiento, En el diseño, las deflexiones deben limitarse, para impedir el agrietamiento de materiales frágiles tales como el concreto o el yeso, Además, una estructura no debe vibrar o deflectarse severamente para que parezca útil a sus ocupantes, Más importante aún, es que las deflexiones en puntos específicos de una estructura deben calcularse si se va a analizar una estructura estáticamente indeterminada,

El análisis de deflexiones por considerarse en este texto es aplicable solo a estructuras hechas de un material que tenga respuesta elástico-lineal, En consecuencia, una estructura sometida a cargas retornará a su posición original no deformada después de que se retiren las cargas, En la mayor

⁴³ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Durabilidad y patología del concreto. Colección del concreto, Vol. 2. pp 138.

parte de los casos la deflexión de una estructura es causada por cargas internas como la fuerza normal, la fuerza cortante y el momento flexionante, En vigas y marcos las deflexiones mayores son causadas por flexión interna mientras que las deflexiones de una armadura son causadas por fuerzas axiales internas,⁴⁴

6.19. COMPRESÓMETRO

El compresímetro es un elemento de precisión que cumple la función de medir la capacidad de compresión que tienen los cilindros u otros elementos que funcionen a través de principios neumáticos e hidráulicos,

El Compresímetro sirve para descubrir a tiempo los diferentes valores de compresión en los cilindros y evitar así graves daños posteriores del motor,

El compresímetro mide la obtención de una compresión uniforme en todos los cilindros, dará como resultados una potencia uniforme para cada cilindro y un andar suave y eficiente del motor, La compresión uniforme de acuerdo al valor especificado de notará que pistones, juntas, aros y válvulas se hallan en buenas condiciones, La compresión a la velocidad de arranque del motor es de 6,3 kg/cm² (90 lbs/pulg²) como mínimo,

6.20. ANÁLISIS DE VIGAS SOMETIDAS A FLEXIÓN

En esta sección se coloca una pequeña carga transversal sobre una viga con refuerzo de tensión y que esta carga se incrementa gradualmente en magnitud hasta que la viga falla, Cuando esto ocurre, se encuentra que la viga pasa por tres etapas distintas antes de que ocurra el colapso, Estas son: 1) etapa del concreto no agrietado, 2) etapa con esfuerzos elásticos y concretos agrietados y 3) etapa de resistencia última,⁴⁵

6.20.1. ETAPA DEL CONCRETO NO AGRIETADO

Bajo cargas pequeñas, cuando los esfuerzos de tensión son menores que el módulo de ruptura, la sección transversal total de la viga resiste la flexión, con compresión a un lado y tensión en el otro, A continuación se muestra la

⁴⁴HIBBELER, Russell. Análisis estructural, Tercera edición. P. 417.

⁴⁵ MCCORMAC, Jack C; BROWN, Russell H. Diseño de concreto reforzado. 8a Edición. México: Alfaomega Grupo Editor. 2011. 35 p.

variación de los esfuerzos y de las deformaciones unitarias bajo cargas pequeñas, en la figura 15,

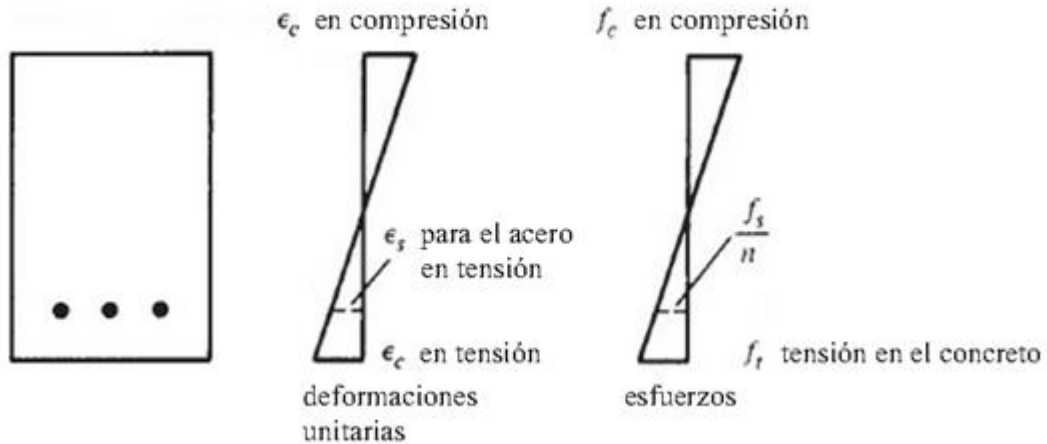


Figura 15, Comportamiento de esfuerzos y deformaciones, Concreto no agrietado

6.20.2. CONCRETO AGRIETADO: ETAPA DE ESFUERZOS ELÁSTICOS

Al incrementarse la carga después de que el módulo de ruptura del concreto se ha excedido, comienzan a desarrollarse grietas en la parte inferior de la viga, El momento cuando empiezan a formarse las grietas, es decir cuando los esfuerzos de tensión en la parte inferior de las vigas son iguales al módulo de ruptura, se denomina Momento de agrietamiento, M_{agr} . Al aumentar la carga, estas grietas se extienden rápidamente hacia la vecindad del eje neutro, el cual comienza a desplazarse hacia arriba, Las grietas se presentan en aquellos lugares a lo largo de la viga, donde el momento real es mayor que el momento de agrietamiento, tal como se muestra en la figura 16,

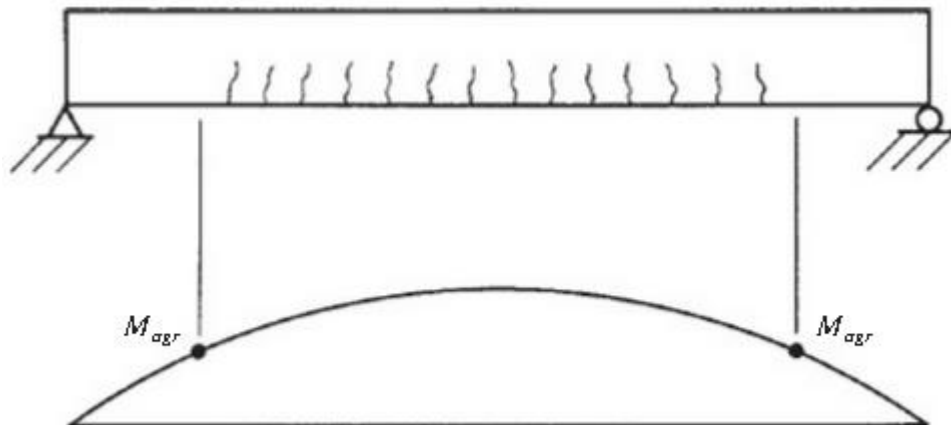


Figura 16, Concreto agrietado: etapa de esfuerzos elásticos,

Una vez que el lado inferior de la viga se ha agrietado, empieza una nueva etapa, porque el concreto en la zona agrietada no puede resistir esfuerzos a tensión; el acero debe resistirlos, Esta etapa continuará mientras los esfuerzos de compresión en las fibras superiores sean menores a aproximadamente la mitad de la resistencia a compresión f'_c del concreto y mientras el esfuerzo en el acero sea menor que su límite elástico, En la figura 17 se muestran los esfuerzos y deformaciones unitarias de esta fluctuación, En esta etapa los esfuerzos de compresión varían linealmente con la distancia del eje neutro o bien como una línea recta,⁴⁶



Figura 17, Concreto agrietado: etapa de esfuerzos elásticos,

La variación lineal de los esfuerzos y de las deformaciones se presenta normalmente en las vigas de concreto reforzado bajo condiciones normales de carga de servicio, ya que debido a esas cargas los esfuerzos del concreto generalmente son inferiores a $0,50f'_c$. Para calcular los esfuerzos en el concreto y en el acero en esta etapa, se usa el método de la sección transformada,

Las cargas de servicio o de trabajo son las cargas que supuestamente se presentan cuando una estructura está en uso o en servicio, Bajo estas cargas se desarrollan momentos que son considerablemente mayores que los momentos de agrietamiento, Obviamente el lado tensado de la viga se agrietara,

6.20.3. FALLA DE LA VIGA: ETAPA DE RESISTENCIA ÚLTIMA

Conforme la carga crece todavía más, de modo que los esfuerzos de compresión resultan mayores que la mitad de f'_c , las grietas de tensión se desplazan aún más hacia arriba, igual que lo hace el eje neutro, y los

⁴⁶ MCCORMAC, Jack C; BROWN, Russell H. Op. Cit., 35p.

esfuerzos de compresión en el concreto comienzan a dejar de ser lineales, En este análisis inicial se supondrá que las varillas de refuerzo han cedido, La variación de los esfuerzos es parecida a la que se muestra en la figura 18,⁴⁷

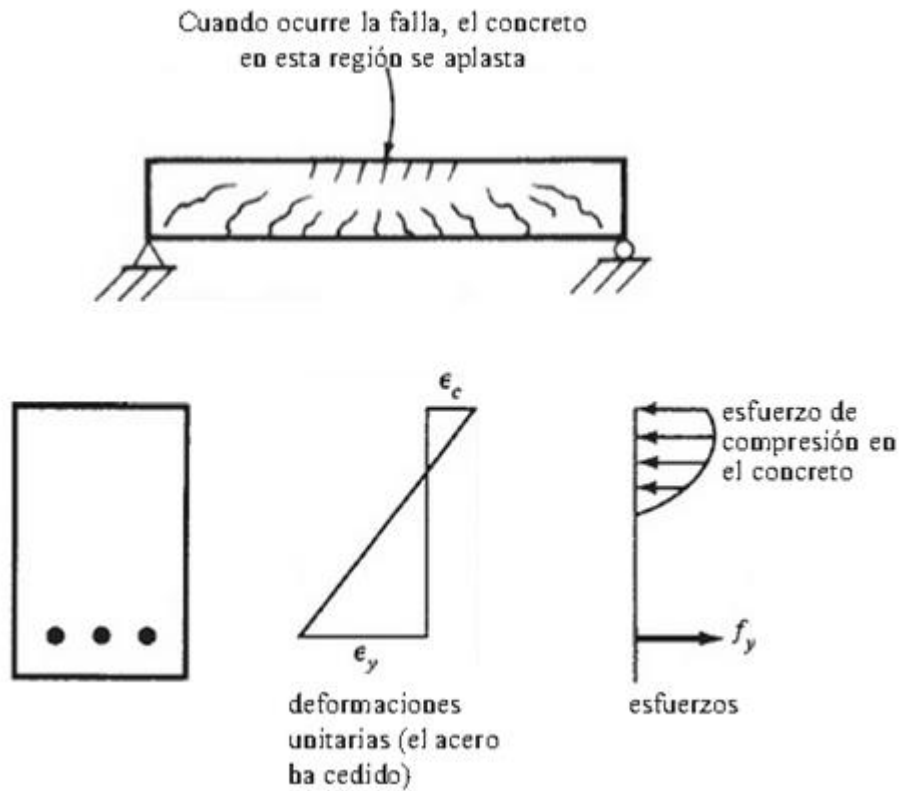


Figura 18, Etapa de resistencia última,

Para ilustrar mejor las tres etapas de comportamiento de la viga que se han descrito, se muestra en la figura 19 Un diagrama de momento-curvatura,

⁴⁷ MCCORMAC, Jack C; BROWN, Russell H. Op. Cit., 36p.

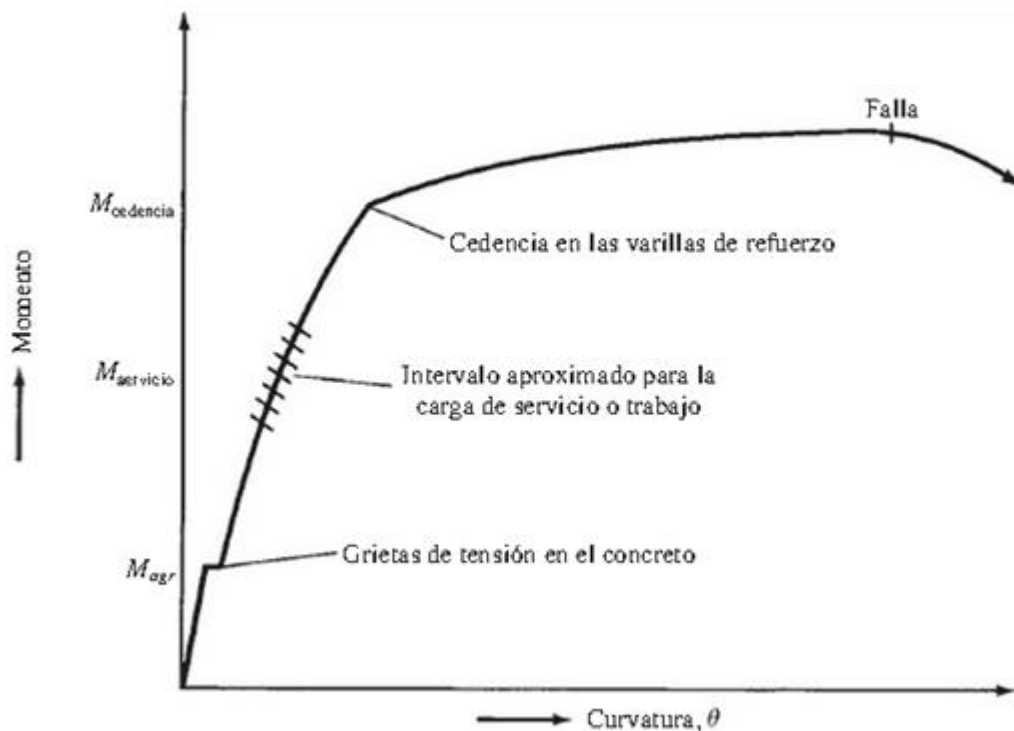


Figura 19, Diagrama de momento-curvatura para una viga de concreto reforzado con refuerzo de tensión solamente,

En este diagrama, θ se define como el cambio angular de la sección de la viga en una cierta longitud y se calcula por medio de la siguiente expresión, en la que ϵ es la deformación unitaria en una fibra de la viga a una distancia γ del eje neutro de la viga:

$$\theta = \frac{\epsilon}{\gamma} \quad \text{Ecuación (8)}$$

La primera etapa del diagrama es para momentos pequeños menores que el momento de agrietamiento M_{cr} donde se dispone de toda la sección transversal de la viga para resistir la flexión, En esta etapa, las deformaciones unitarias son pequeñas, y el diagrama es casi vertical y muy parecido a una línea recta,

Cuando el momento crece más allá del valor del momento de agrietamiento, la pendiente de la curva disminuye un poco debido a que la viga ya no es tan rígida como en la etapa inicial anterior al agrietamiento del concreto, El diagrama describirá casi una línea recta desde M_{cr} , hasta el punto en que el refuerzo queda sometido a su punto de cedencia, Hasta alcanzarse el

esfuerzo de cedencia en el acero, se requiere una carga adicional bastante grande para incrementar apreciablemente la de flexión de la viga, Después de que el acero cede plásticamente, la viga tiene muy poca capacidad adicional por momento, y se requiere sólo una pequeña carga adicional para incrementar considerablemente las rotaciones, así como las de flexiones, En esta etapa la pendiente del diagrama es muy pequeña,

6.20.4. ESFUERZO ELÁSTICO: CONCRETO AGRIETADO

Cuando el momento flexionante es lo suficientemente grande que los esfuerzos de tensión en las fibras extremas resulten mayores que el módulo de ruptura, se supone que todo el concreto en el lado de tensión de la viga está agrietado y se puede desechar en los cálculos de flexión, El momento de agrietamiento de una viga es normalmente muy pequeño comparado con el momento de carga de servicio, Así, cuando se aplican las cargas de servicio, el lecho inferior de la viga se agrieta, El agrietamiento de la viga no implica necesariamente que la viga vaya a fallar,

Las varillas de refuerzo en el lado de tensión comienzan a absorber la tensión causada por el momento aplicado, Se supone que en el lado de tensión de la viga se da una adherencia perfecta entre las varillas de refuerzo y el concreto, Así, las deformaciones unitarias en el concreto y en el acero serán iguales a distancias iguales del eje neutro, Pero si las deformaciones unitarias en los dos materiales en un punto particular son las mismas, los esfuerzos correspondientes no serán iguales, ya que los módulos de elasticidad son diferentes, Así, los esfuerzos en los dos materiales serán proporcionales a la razón de sus módulos de elasticidad, La razón del módulo del acero al módulo del concreto se denomina razón modular n :⁴⁸

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad \text{Ecuación (9)}$$

Si la razón modular para una viga particular es 10, el esfuerzo en el acero será 10 veces el esfuerzo en el concreto a la misma distancia del eje neutro, Otra forma de decir esto es que cuando $n= 10$, 1 Pulg² de acero tomará la misma fuerza total que 10 Pulg² de concreto, Para la viga de la figura 20, las varillas de acero se han remplazado por un área equivalente de concreto ficticio (nA_s), que supuestamente puede resistir tensión, A esta área se le llama área transformada, La sección transversal revisada resultante o sección transformada se trata igual que en las vigas hechas,

⁴⁸ MCCORMAC, Jack C; BROWN, Russell H. Op. Cit., 40p.

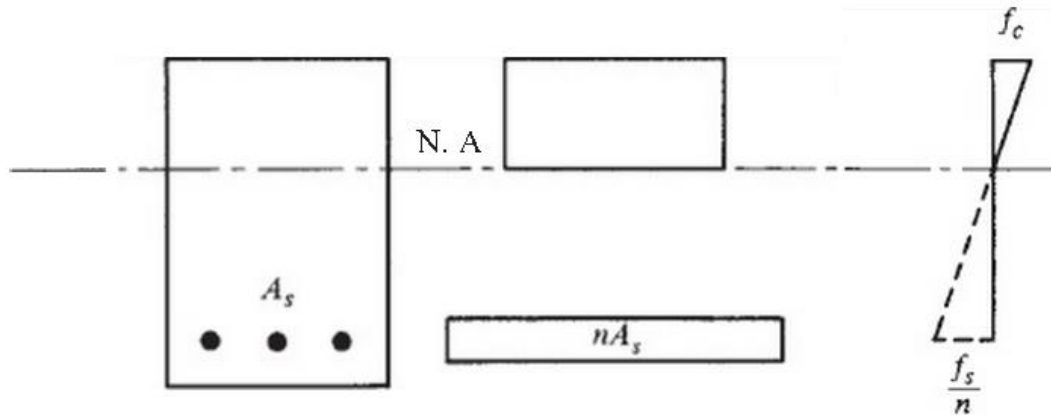


Figura 20, Esfuerzo elástico: concreto agrietado

De un material homogéneo elástico, En la figura se muestra también un diagrama que indica la variación de los esfuerzos en la viga, En el lado de tensión se presenta una línea punteada porque el diagrama es discontinuo, En esa zona se supone que el concreto está agrietado y que no es capaz de resistir tensiones, El valor indicado al lado del acero es el esfuerzo ficticio en el concreto que se presentaría si el concreto estuviese bajo tensiones, Este valor se indica como f_s/n porque debe multiplicarse por n para dar el esfuerzo f_s en el acero,⁴⁹

⁴⁹ MCCORMAC, Jack C; BROWN, Russell H. Op. Cit., 41p.

7. Resultados obtenidos en el ensayo a compresión de los cilindros de concreto con adición de diferentes porcentajes de ceniza volante (10%, 15%, 20%, y 25%),

Este ensayo se realizó para determinar la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto moldeados como cilindros, En la figura 21, se pueden observar los resultados alcanzados del esfuerzo a compresión (σ) MPa, comparados con el esfuerzo de diseño $\sigma = 28$ MPa, este ensayo se realizó bajo los requerimientos de la NTC-673,

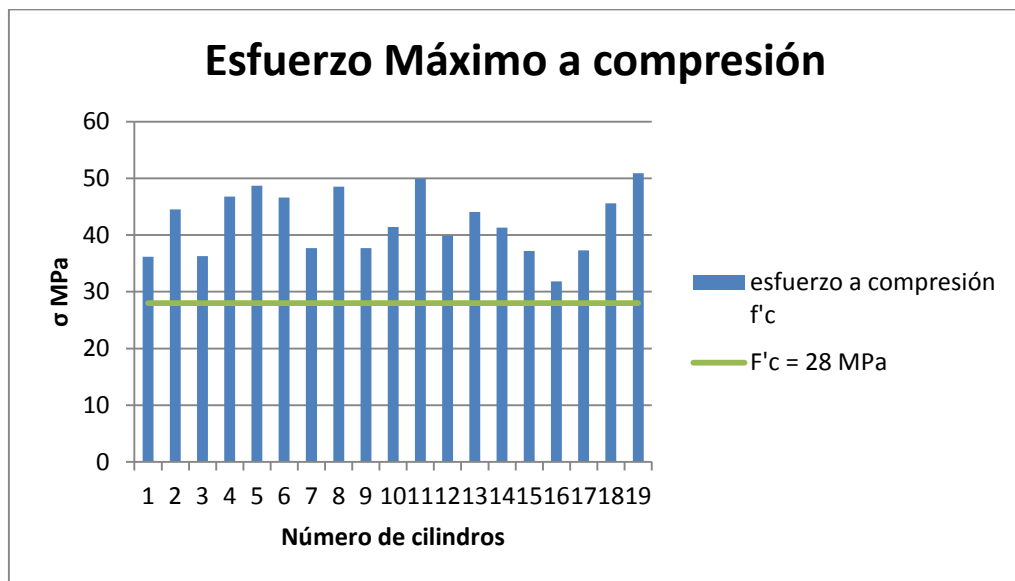


Figura 21, Esfuerzos compresión cilindros

Tabla 1, Esfuerzo a compresión del concreto
Mezcla con 10% de ceniza

No	diámetro (cm)	altura (cm)	kN	σ MPa
1	15	30,5	639,7	36,2
2	15	30,5	783,2	44,52
3	15,2	30,5	641,42	36,27
4	15,2	30,5	826,3	46,76
5	15,3	30,5	861,1	48,7
6	15,2	30,3	823,5	46,6
7	15,3	30,2	668,08	37,72
8	15,3	30,3	859,89	48,54
9	15,2	30,3	665,84	37,68
10	15,3	30,5	734,14	41,44
11	15,5	30,2	882,64	49,92
12	15,2	30,3	707,09	39,91
13	15,3	30,4	779,47	44,09
14	15,3	30,2	729,78	41,3
15	15,3	30,5	660,18	37,21
16	15,3	30,2	565,94	31,81
17	15,1	30,2	664,23	37,33
18	15,6	30,2	802,46	45,58
19	15,2	30,3	899,53	50,88

En la tabla 1, se observa los resultados detallados de los cilindros de concreto con adición del 10% de ceniza volante, ensayados a compresión,

El promedio del esfuerzo a compresión obtenido en el laboratorio fue de $\sigma = 42,23$ MPa, el cual cumple y supera la resistencia para la cual fue diseñada, la justificación de este acontecimiento será analizada en el capítulo de conclusiones,

7.1. Resultados obtenidos ensayo de Módulo de Elasticidad en cilindros a compresión:

Después de obtener la carga máxima que soporta los cilindros a compresión, se procede a realizar el ensayo de módulo de elasticidad en cilindros a compresión, el ensayo se realizó en el rango elástico del concreto, para esto se tendrá en cuenta solo el cuarenta por ciento (40%) de la carga máxima

obtenida en el ensayo a compresión, El ensayo se realizó siguiendo las recomendaciones y requerimientos de la Norma Técnica Colombiana NTC-4025, los resultados obtenidos del módulo de elasticidad estático se pueden observar en la Tabla 2, los siguientes datos se tomaron de la mezcla de concreto con adición del 10% de ceniza volante,

Tabla 2, Módulos de elasticidad

CILINDRO	MODULO DE ELASTICIDAD
1	30576
2	27795
3	29808
4	29771
5	28419
6	30438
7	30362
8	30340
9	32168
10	32306
11	32262
12	30077
13	29933
14	31543
15	34201
16	33811
17	30944
18	32992
19	32930
20	29738
21	31974
22	31561
23	28769
24	30992
25	29613
26	31182
27	30580
28	28445

Los resultados anteriores observados en la tabla , serán comparados y respectivamente analizados con los datos obtenidos del módulo de elasticidad de las vigas por medio del ensayo a flexión, el módulo de

elasticidad promedio para el concreto con adición del 10% de ceniza volante es de $E_c = 30840,37$ MPa, el cual cumple satisfactoriamente con el módulo de elasticidad suministrado por el Reglamento Colombiano de Normas Sismo Resistentes,

Es de gran importancia explicar y describir el procedimiento del ensayo realizado para obtener los anteriores datos suministrados por el módulo de elasticidad mediante el ensayo a compresión de cilindros de concreto; para empezar es importante tener en cuenta la fuerza máxima de compresión del concreto con adición del 10% de ceniza como ya se explicó anteriormente, se debe tener en cuenta que este ensayo se tiene que realizar en la zona elástica del concreto, por lo tanto, este no puede ser llevado a la falla, para lograr esto, se le aplico solamente un cuarenta por ciento (40%) de la carga máxima a compresión f'_c obtenida anteriormente en el ensayo realizado a compresión

$$P(\text{Max}) = 0,4P_u \quad \text{Ecuación (10)}$$

En tesis de grados realizadas en el transcurso de los últimos años, se recomendaba que a medida que se va aplicando la carga, cada 10 KN de carga se debe ir registrando la deformación que registran los diales hasta completar la carga máxima $P(\text{Max})$, Afortunadamente con los avances de la tecnología y con un equipo que fue adquirido en el presente año por la Universidad Pontificia Bolivariana – seccional Bucaramanga, se pueden obtener deformaciones cada segundo que dure el ensayo ya mencionado anteriormente, debido a un montaje que va conformado por una celda de carga con deformímetros a sus respectivos lados, un compresímetro y un Datalogger, se debe ser cuidadoso al momento de realizar el ensayo con las unidades que se registra en el Datalogger, En la imagen , se puede observar el montaje para realizar el ensayo de elasticidad en cilindros a compresión,

El módulo de elasticidad debe ser calculado como la relación entre la carga aplicada y la deformación que se produce, por esto, es de gran importancia que se puedan tomar los datos cada segundo para un mejor análisis, en la Tabla 3, se pueden observar las características el primer cilindro de concreto con adición de 10% de ceniza que fue ensayado, En la tabla, se observan los datos registrados por el Datalogger (el delta y la fuerza), también las deformaciones calculadas con los datos anteriores y el esfuerzo a compresión (σ) en MPa para cada intervalo de carga,

Tabla 3, Información geométrica del cilindro de concreto

Tipo mezcla	10% ceniza
Cilindro No	1
Diámetro promedio (mm)	153
Carga máxima (kN)	310,5659
Área promedio (mm ²)	18385,3856

Tabla 4, Datos de carga y deformaciones verticales presentes en el cilindro de concreto

DI (mm)	F (kN)	e (mm/mm)	σ (MPa)
0,0005	0	3,33E-06	0,00
0,0005	0,67	3,33E-06	0,04
0	3,33	0	0,18
0,001	7,67	6,67E-06	0,42
0,001	8	6,67E-06	0,44
0,001	9	6,67E-06	0,49
0,0015	10	0,00001	0,54
0,0015	11	0,00001	0,60
0,002	12	1,33E-05	0,65
0,002	13,33	1,33E-05	0,73
0,0025	14,33	1,67E-05	0,78
0,0025	16	1,67E-05	0,87
0,003	17,33	0,00002	0,94
0,0035	18,67	2,33E-05	1,02
0,0035	20,33	2,33E-05	1,11
0,004	22	2,67E-05	1,20
0,0045	23,67	0,00003	1,29
0,005	25,33	3,33E-05	1,38
0,0055	27	3,67E-05	1,47
0,006	29	0,00004	1,58
0,0065	31	4,33E-05	1,69
0,007	33	4,67E-05	1,79
0,0075	35,33	0,00005	1,92
0,008	37,67	5,33E-05	2,05
0,0085	40	5,67E-05	2,18
0,009	42,33	0,00006	2,30

0,01	45	6,67E-05	2,45
0,0105	47,67	0,00007	2,59
0,0115	50,67	7,67E-05	2,76
0,012	53,67	0,00008	2,92
0,013	57	8,67E-05	3,10
0,014	60,33	9,33E-05	3,28
0,015	64	0,0001	3,48
0,016	67,33	0,000107	3,66
0,017	71	0,000113	3,86
0,018	75	0,00012	4,08
0,019	79	0,000127	4,30
0,02	83,33	0,000133	4,53
0,021	87,33	0,00014	4,75
0,0225	92	0,00015	5,00
0,0235	96,33	0,000157	5,24
0,025	101	0,000167	5,49
0,0265	105,67	0,000177	5,75
0,0275	110,33	0,000183	6,00
0,029	115,33	0,000193	6,27
0,03	120,33	0,0002	6,54
0,0315	125,67	0,00021	6,84
0,033	131	0,00022	7,13
0,0345	136,67	0,00023	7,43
0,036	142,33	0,00024	7,74
0,0375	148,33	0,00025	8,07
0,0395	154,33	0,000263	8,39
0,041	160,67	0,000273	8,74
0,0425	167,66	0,000283	9,12
0,0445	174,66	0,000297	9,50
0,0465	182	0,00031	9,90
0,0485	189	0,000323	10,28
0,0505	196,33	0,000337	10,68
0,0525	204	0,00035	11,10
0,0545	211,66	0,000363	11,51
0,0565	219	0,000377	11,91
0,0585	226,33	0,00039	12,31

0,0605	234,33	0,000403	12,75
0,0625	242	0,000417	13,16
0,0645	250,66	0,00043	13,63
0,067	258,66	0,000447	14,07
0,069	266,66	0,00046	14,50
0,071	275	0,000473	14,96
0,073	282,33	0,000487	15,36
0,075	290,33	0,0005	15,79
0,077	298	0,000513	16,21
0,079	305,33	0,000527	16,61
0,0815	312,66	0,000543	17,01

Después de realizar los respectivos calculados para determinar los esfuerzos (σ) y las deformaciones (ϵ), se debe realizar una regresión lineal entre los valores dependientes de esfuerzos (σ) MPa y las deformaciones (ϵ) mm/mm, en la figura 22, se puede observar la regresión lineal,

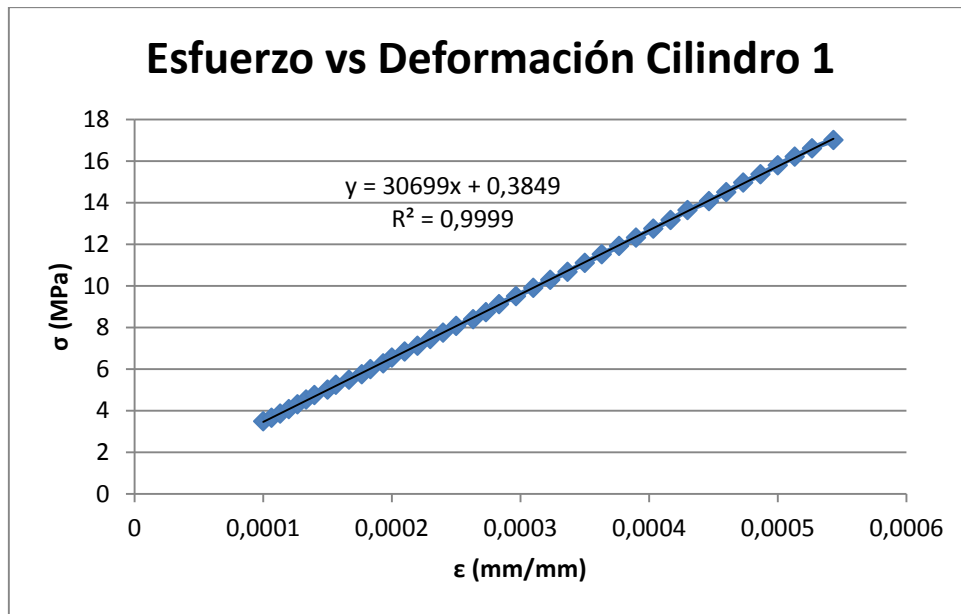


Figura 22, Regresión lineal datos módulo elástico

Para finalizar, se calculó el módulo de elasticidad, tomando un punto sobre la recta de regresión lineal, en la deformación $\epsilon = 0,00005$ mm/mm con su pareja respectiva de esfuerzo y la última deformación registrada por el Datalogger en el laboratorio con su respectiva pareja, El módulo de

elasticidad se obtiene realizando el cálculo de una pendiente entre los puntos que están en la tabla 5,

Tabla 5, Puntos sobre la regresión lineal

ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
0,00005	1,921634975
0,000543333	17,00589842

$$E = \frac{17,01 - 1,92}{0,000543333 - 0,00005} = 30576 \text{ MPa} \quad \text{Ecuación (11)}$$

7.2. Resultados obtenidos ensayo de Módulo de Elasticidad en vigas reforzadas de concreto:

El ensayo de flexión se les fue realizado a cinco (5) vigas de concreto reforzado con sus respectivos adiciones de ceniza volante (0%, 10%, 15%, 20% y 25%), obteniendo datos de deformación a medida que aumentaba la carga aplicada, el procedimiento al que las vigas fueron sometidas en la realización de este ensayo fue explicado en capítulos anteriores, El módulo de elasticidad debió ser calculado utilizando el Teorema de Castigliano, para la deflexión en el punto medio de la viga, sin embargo, por resultados y análisis que se explicaran más adelante, dicho módulo de elasticidad fue obtenido mediante un formula, la cual tiene como variable el porcentaje de inercia que trabajo en el momento de ejecución del ensayo a flexión,

En la tabla 6 se puede observar los resultados del módulo de elasticidad estático mediante el Ensayo de Flexión, Estos resultados, se pueden observar de manera más específica en los anexos,

Es de gran importancia explicar el procedimiento que se llevó a cabo para obtener el módulo de elasticidad (E) mediante el ensayo de vigas a flexión, para empezar se realizó un cálculo numérico(segundo teorema de castigliano) para determinar la carga puntual máxima (P) que se debía aplicar a la viga para garantizar su zona elástica y así evitar que la viga experimentara su etapa de fisura o agrietamiento, posterior a esto, se realizó el ensayo de flexión en vigas de concreto reforzado con una carga ultima ($f'c$) de 40 KN, registrando valores de deformación cada 2 KN hasta llegar a su fuerza máxima, En la tabla 6, se pueden observar los datos obtenidos de la viga con 10% de adición de ceniza volante,

Tabla 6, Datos de carga y deformaciones verticales presentes viga reforzada de concreto a flexión

Lectura	d (mm)	P (kN)
1	0	0
2	0	2
3	0,016	4
4	0,040	6
5	0,061	8
6	0,084	10
7	0,106	12
8	0,127	14
9	0,144	16
10	0,160	18
11	0,179	20
12	0,205	22
13	0,222	24
14	0,239	26
15	0,255	28
16	0,266	30
17	0,276	32
18	0,287	34
19	0,297	36
20	0,306	38
21	0,316	40
22	0,328	42

Después de realizar los respectivos calculados para determinar la fuerza máxima (Pmax), se debe realizar una regresión lineal entre los valores dependientes de la fuerza (p) KN y las deformaciones (e) mm/mm, en la figura 23 , se puede observar la regresión lineal,

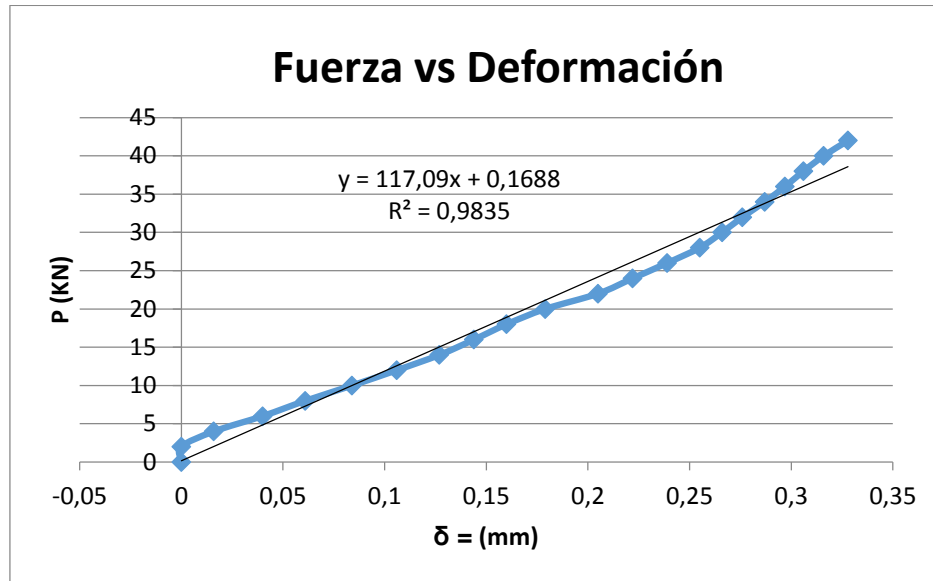


Figura 23, Fuerza vs Deformación en viga reforzada de concreto

Luego, se realizó el cálculo de la Rigidez (k), tomando un punto sobre la recta de regresión lineal, para la mezcla con adición del 10% de ceniza, se tomó un punto en la deformación $\delta = 0,040$ mm con su pareja respectiva fuerza y la última deformación registrada por el datalogger en el laboratorio con su respectiva pareja, La rigidez (k) se obtiene realizando el cálculo de una pendiente entre los puntos que están en la tabla 7,

Tabla 7, Carga vs deformación en viga reforzada de concreto

$\delta=$ (mm)	P= (KN)
0,040	6
0,328	42

$$K = \frac{42 - 6}{0,328 - 0,040} = 125 \frac{KN}{mm}$$

Al obtener la rigidez (k), siendo esta la última variable por conocer, podemos calcular el módulo de elasticidad (E), teniendo en cuenta que las demás variables de la ecuación 13, se conocen por medio de las características de las dimensiones de la viga de concreto reforzado de la mezcla de 10% de ceniza volante, que se pueden observar en la tabla 8,

Tabla 8,Características geométricas de viga reforzada de concreto

Tipo mezcla	10% ceniza
Viga No	1
Altura (mm)	310
Ancho (mm)	253
Longitud (mm)	1000

Al obtener los resultados de los módulos elásticos de cada tipo de mezcla, se observaron que ningún dato era el esperado, Se empezó el análisis respectivo para encontrar la posible causa de dichos resultados, con esto se encontró la razón por la cual, el módulo de elasticidad de las vigas no era el idóneo; esto se debe a que la inercia de la viga reforzada en el momento de aplicarle la fuerza no estaba trabajando en su 100%, Las posibles razones causantes de este fenómeno presentado en el ensayo se debieron al mal desarrollo del procedimiento de curado, Las vigas no experimentaron una hidratación correcta en sus 56 días de curado, además se encontraban a la intemperie del medio ambiente, por tal razón, se realizó un nuevo análisis calculando el módulo de elasticidad teniendo en cuenta, que la viga se encontraba en su etapa 2 del concreto agrietado y con micro fisuras, Dicho análisis se realizó para calcular el módulo de elasticidad teniendo como variable el porcentaje de inercia que en realidad trabajo al momento de realizar el ensayo de flexión de las vigas de concreto reforzado, En el diseño del concreto reforzado, la capacidad del concreto para soportar cargas de tensión se desprecia ya que un posible agrietamiento del concreto es impredecible, el análisis de esfuerzo requiere localizar el eje neutro y determinar el esfuerzo máximo en el acero y en el concreto, Para hacer esto, el área del acero A_s se transforma primero en un área equivalente del concreto usando el factor de transformación $n = E_s/E_c$, Esta relación, que da $n > 1$, se escoge ya que una cantidad “mayor” del concreto es necesaria para reemplazar el acero, El área transformada es nA_s , Y la sección la sección transformada se ve como la mostrada en la figura 24,

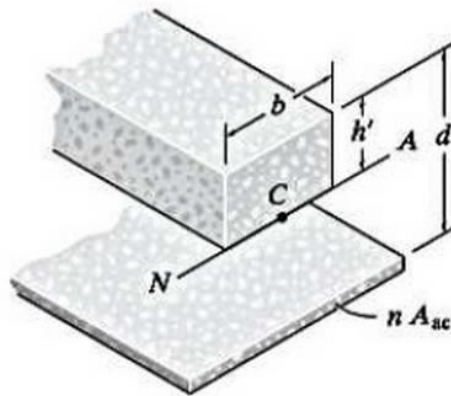


Figura 24, Área del acero transformada en concreto

Aquí, d representa la distancia de la parte superior de la viga al acero transformado, b representa el ancho de la viga, c es la distancia de la parte superior de la viga al eje neutro, esta distancia se calcula mediante una ecuación cuadrática, Los cálculos se podrán observar en los anexos adjuntos de Excel, Después de obtener los datos anteriores se determinó la inercia para viga con adición del 10% de ceniza volante mediante la fórmula siguiente

$$I = \frac{b \cdot c^3}{3} + n \cdot A_s(d - c)^2 \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$I = 92617526,6 \text{ mm}^4$$

Para finalizar el módulo de elasticidad se calculó mediante la formula

$$E = \frac{k \cdot l^3}{48 \cdot I} \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$E = 28,1174 \text{ GPa}$$

7.3. Resultados del módulo de elasticidad obtenidos mediante los requerimientos estipulados en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10 título C,8,5

Conociendo el Esfuerzo a la compresión del concreto ($f'c$) de cada muestra, se reemplazó el valor en la ecuación de módulo de elasticidad estático que plantea el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10,

En la tabla 9, se puede observar los resultados del módulo de elasticidad utilizado la ecuación de módulo de elasticidad del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10,

La ecuación que establece el reglamento para determinar el módulo de elasticidad estático del concreto:

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)}^{50} \quad \text{Ecuación (14)}$$

Tabla 9, Módulos elásticos calculados según NSR-10

Cilindro	F' c (MPa)	Módulo elástico según NSR-10
1	36,2	28278
2	44,52	31360
3	36,27	28306
4	46,76	32139
5	48,7	32799
6	46,6	32084
7	37,72	28866
8	48,54	32745
9	37,68	28850
10	41,44	30256
11	49,92	33207
12	39,91	29692
13	44,09	31208
14	41,3	30205
15	37,21	28670
16	31,81	26508
17	37,33	28716
18	45,58	31731
19	50,88	33525

El Modulo de elasticidad Estático promedio del concreto, calculado utilizando la ecuación del Módulo de Elasticidad del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10 fue de 30481,38092 MPa,

⁵⁰ Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR - . Numeral C.8.5.1. Pág. C-112. 2010.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS,

En este capítulo del presente trabajo de grado, se realizó un análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, En relación a los resultados obtenidos de módulo de elasticidad se analizaron los obtenidos por el ensayo de compresión en cilindros de concreto y flexión en vigas de concreto reforzadas, y se compararon con el establecido en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10,

8.1. Análisis resistencia a la compresión de cilindros de concreto

8.1.1. Análisis resistencia a la compresión de cilindros para encontrar su carga a utilizar en ensayo módulo de elasticidad

Como se puede observar en la figura 25, se muestran los resultados del esfuerzo a compresión obtenidos para cada tipo de mezcla y cilindros, comparados con el esfuerzo a compresión para la cual fueron diseñados (28 MPa),

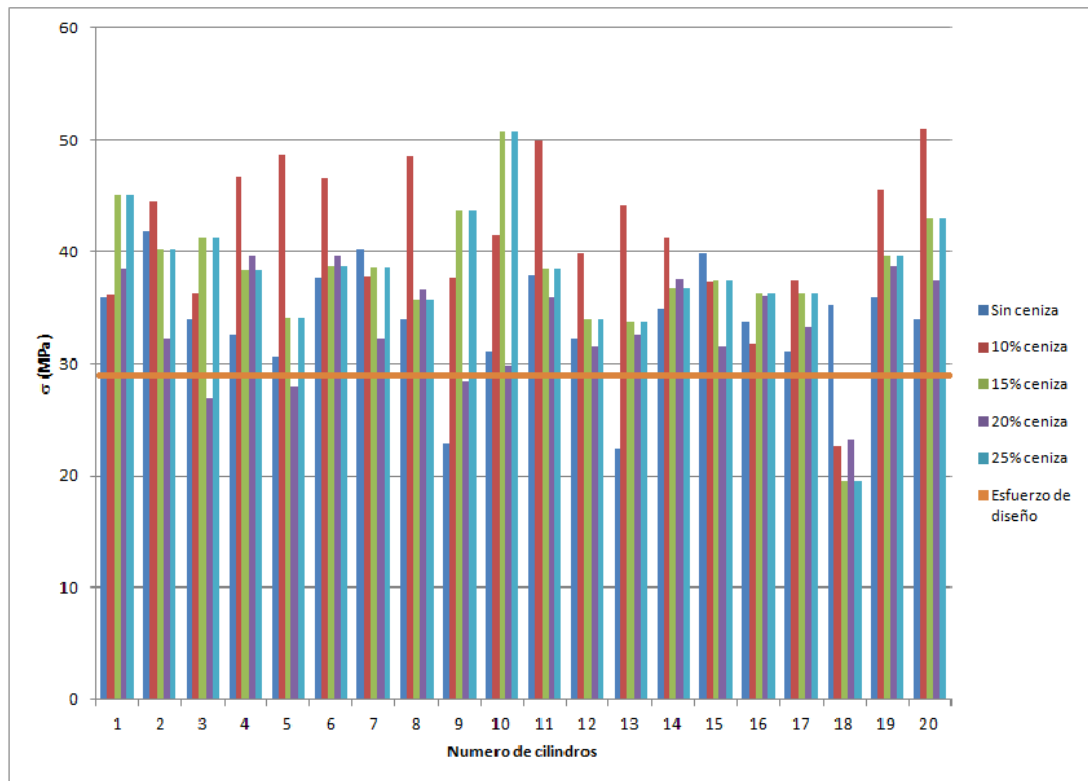


Figura 25, Resistencia a la compresión de cilindros

Se observa que de las cien (100) muestras ensayadas solo nueve (9) estuvieron por debajo del esfuerzo para el cual fueron diseñadas y noventa y uno (91) superaron dicho diseño, por lo tanto los resultados fueron óptimos con respecto al esfuerzo de diseño,

Tabla 10, Datos estadísticos muestra (sin ceniza) cilindros a compresión,

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	20
Resistencia Media (x)=	33,88
Mediana =	33,96
Desviación Estándar =	4,96
Varianza =	24,58
Rango	19,49
Máximo	41,89
Mínimo	22,4

Tabla 11, Datos estadísticos muestra (10% ceniza) cilindros a compresión,

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	20
Resistencia Media (x)=	42,23
Mediana =	41,44
Desviación Estándar =	5,54
Varianza =	30,71
Rango	19,07
Máximo	50,88
Mínimo	31,81

Tabla 12, Datos estadísticos muestra (15% ceniza) cilindros a compresión,

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	20
Resistencia Media (x)=	39,06
Mediana =	38,51
Desviación Estándar =	4,30
Varianza =	18,50
Rango	16,93
Máximo	50,75
Mínimo	33,82

Tabla 13, Datos estadísticos muestra (20% ceniza) cilindros a compresión,

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	20
Resistencia Media (x)=	34,05
Mediana =	33,29
Desviación Estándar =	4,08
Varianza =	16,68
Rango	12,66
Máximo	39,64
Mínimo	26,98

Tabla 14, Datos estadísticos muestra (25% ceniza) cilindros a compresión,

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	20
Resistencia Media (x)=	28,85
Mediana =	29,065
Desviación Estándar =	4,13
Varianza =	17,04
Rango	15,6
Máximo	35,37
Mínimo	19,77

Observando el análisis estadístico podemos percibir que el esfuerzo a compresión promedio presente en los diferentes tipos de mezcla (0%,10%, 15%, 20% y 25% de ceniza) está por encima del esfuerzo de compresión para el cual se realizó el diseño de mezcla, este aumento pudo ser presentado por factores como:

Agregados: la calidad presente de los agregados (finos y gruesos) facilitados por la planta de concreto con la cual existía un convenio para la realización de este trabajo de grado, puesto que dicha empresa cuenta con los controles y normas de calidad en sus procesos,

Ceniza volante: Gracias a las características que añade la ceniza volante a la mezcla del concreto, pudimos ver un aumento en su resistencia a compresión,

8.1.2. Análisis resistencia a la compresión de cilindros utilizados en ensayo de modulo elástico

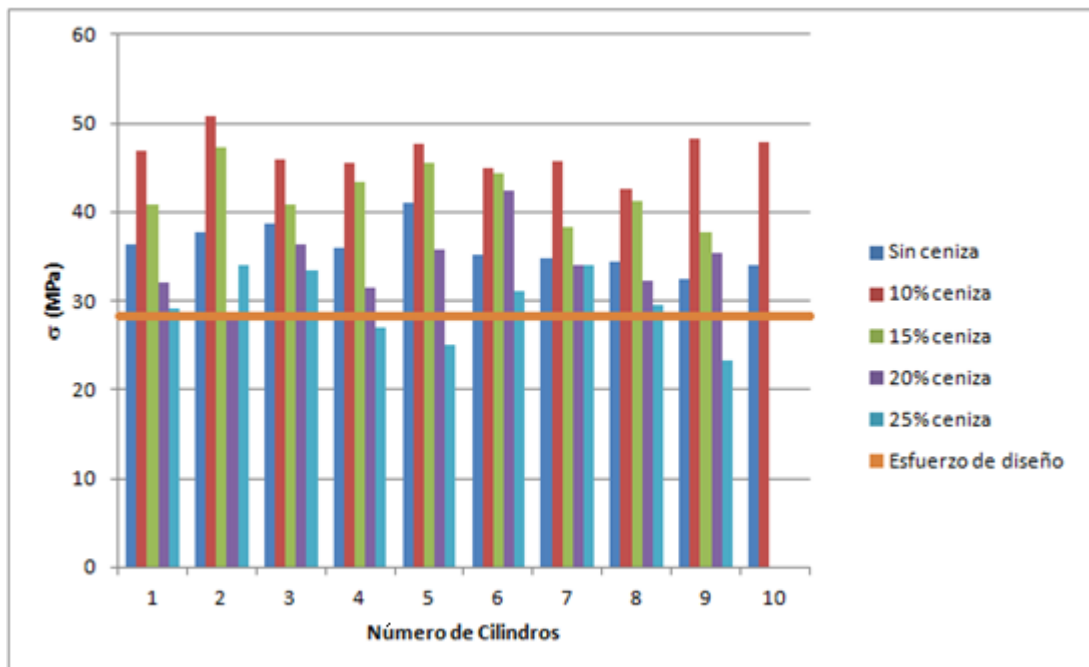


Figura 26, Resistencia a la compresión de cilindros

Se observa que de las cuarenta y siete (47) muestras ensayadas solo tres (3) estuvieron por debajo del esfuerzo para el cual fueron diseñadas y cuarenta y cuatro superaron dicho diseño, por lo tanto los resultados fueron óptimos con respecto al esfuerzo de diseño, ya que estos fueron sometidos antes a una carga para realizar su ensayo de módulo de elasticidad,

Tabla 15, Datos estadísticos muestra (sin ceniza) cilindros a compresión,

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	10
Resistencia Media (x)=	36,07
Mediana =	35,52
Desviación Estándar =	2,54
Varianza =	6,44
Rango	8,68
Máximo	41,13
Mínimo	32,45

Tabla 16, Datos estadísticos muestra (10% ceniza) cilindros a compresión,

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	10
Resistencia Media (x)=	46,64
Mediana =	46,385
Desviación Estándar =	2,21
Varianza =	4,91
Rango	8,17
Máximo	50,86
Mínimo	42,69

Tabla 17, Datos estadísticos muestra (15% ceniza) cilindros a compresión,

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	9
Resistencia Media (x)=	42,17
Mediana =	41,2
Desviación Estándar =	3,21
Varianza =	10,28
Rango	9,55
Máximo	47,31
Mínimo	37,76

Tabla 18, Datos estadísticos muestra (20% ceniza) cilindros a compresión,

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	9
Resistencia Media (x)=	34,26
Mediana =	33,93
Desviación Estándar =	3,92
Varianza =	15,36
Rango	13,82
Máximo	42,36
Mínimo	28,54

Tabla 19, Datos estadísticos muestra (25% ceniza) cilindros a compresión,

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	9
Resistencia Media (x)=	29,61
Mediana =	29,52
Desviación Estándar =	3,91
Varianza =	15,32
Rango	10,73
Máximo	33,96
Mínimo	23,23

Como podemos observar en el análisis estadístico de estos cilindros, el promedio de su esfuerzo a compresión en cada uno de los tipos de mezcla siguió siendo mayor con respecto al esfuerzo para el cual se diseñó la mezcla, esto quiere decir que a los cilindros se les hizo un ensayo de modulo elástico satisfactorio ya que su resistencia ultima a compresión no se vio afectada,

8.2. Análisis módulo de elasticidad en cilindros de concreto a compresión

Este análisis fue realizado a diez (10) cilindros de cada mezcla construida, se pudo determinar gracias a la carga aplicada por la maquina universal, y las deformaciones que arrojaban los deformimetro ubicados en la celda de carga, Estos datos fueron registrados en el Datalogger,

A continuación en la tabla 20 se presentaran los resultados de los módulos de elasticidad calculados para los cilindros de concreto con adición del 10% de ceniza y su respectivo análisis estadístico, Cabe decir que dichos resultados y análisis obtenidos en los otros cilindros de las diferentes mezclas serán presentados en el capítulo de anexos,

Tabla 20, Módulos de elasticidad en cilindros a compresión

Cilindro	Módulo de elasticidad E(MPa)
1	30576
2	27795
3	29808
4	29771
5	28419
6	30438
7	30362
8	30340
9	32168
10	32306
11	32262
12	30077
13	29933
14	31543
15	34201
16	33811
17	30944
18	32992
19	32930
20	29738
21	31974
22	31561
23	28769
24	30992
25	29613
26	31182
27	30580
28	28445

Tabla 21, Datos estadísticos modulo a compresión

Análisis Estadístico Modulo de elasticidad en cilindros de concreto a compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	29
Resistencia Media (x)=	30840,38
Mediana =	30578,29
Desviación Estándar =	1607,61
Varianza =	2584400,45
Rango	6405,35
Máximo	34200,83
Mínimo	27795,48

Partiendo de los datos estadísticos se puede observar que el modulo elástico promedio fue de F_c : 30840,38 MPa,

8.3. Análisis módulo de elasticidad obtenidos mediante el ensayo de vigas reforzadas a flexión,

A continuación se analizaran los resultados del módulo elástico en vigas reforzadas, esto con la finalidad de determinar si existe una influencia del acero de refuerzo en los resultados del ensayo de modulo elástico,

En la tabla 22 se muestran los resultados de módulo de elasticidad de las cinco (5) vigas reforzadas, cada una perteneciente a los distintos porcentajes de adición de ceniza volante en la mezcla (0%,10%, 15%, 20% y 25% de ceniza),

Tabla 22, Tabla Modulo Elástico vigas reforzadas de concreto

Tipo Viga	Alto (cm)	Ancho (cm)	Largo (cm)	Modulo Elástico (MPa)
Sin ceniza	30,3	25,2	120,3	14453
10% ceniza	31	25,3	120,3	21117
15% ceniza	28,7	25,8	120,2	49145
20% ceniza	29	25,5	119,4	9392
25% ceniza	28,5	25,4	119,7	18826

Como podemos observar en estos resultados, las diferencias son muy notorias, esto se pudo deber a la falta de hidratación en el curado del concreto ya que este, en el caso de las vigas, fuera dejado a la intemperie durante sus cincuenta y seis (56) días de curado,

8.4. Módulo de elasticidad de vigas reforzadas vs Módulos de elasticidad obtenidos en cilindros de concreto compresión,

En este subcapítulo se muestra un análisis comparativo entre el módulo de elasticidad obtenido en vigas reforzadas en flexión y el módulo de elasticidad obtenido en los cilindros de concreto ensayados a compresión con el objetivo de considerar si presentan una similitud,

A continuación en la figura 27 y se presentaran los resultados de los módulos de elasticidad calculados para los cilindros de concreto con adición del 10% de ceniza y su respectiva viga, Cabe decir que dichos resultados y análisis obtenidos en los otros cilindros y vigas de las diferentes mezclas serán presentados en el capítulo de anexos,

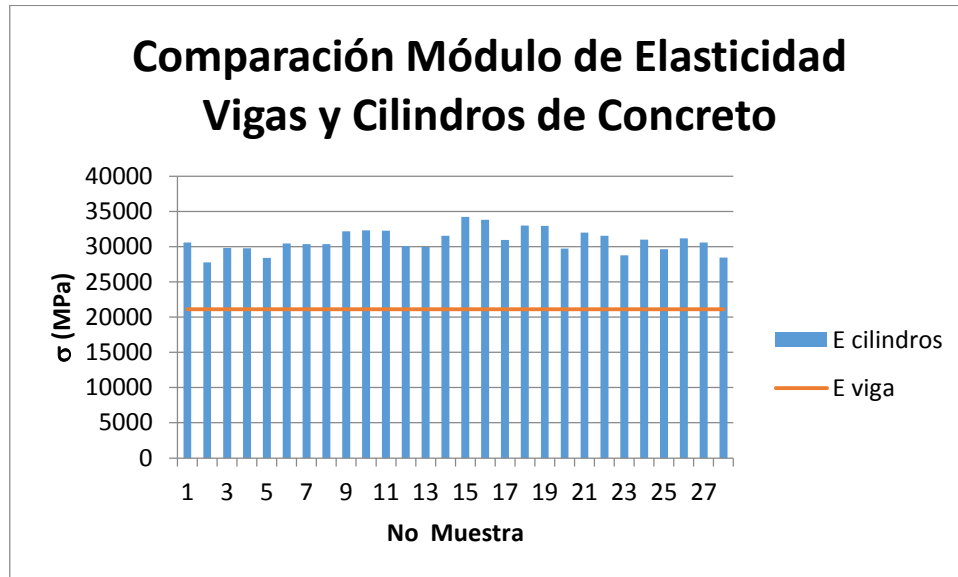


Figura 27, Módulos de elasticidad vigas reforzadas vs Módulos en cilindros a compresión

Como se puede observar en la Figura 27, los módulos de elasticidad de los cilindros son muy superiores al obtenido en la viga, esto se debe a los problemas ya descritos con anterioridad en dichas vigas,

8.5. Análisis de resultados respecto al Módulo de Elasticidad Estático según el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10,

En las siguientes figuras se observa los módulos de elasticidad (E_c), obtenidos reemplazando el Esfuerzo de compresión del concreto hallado en los diferentes tipos de mezclas en la Ecuación que plantea la NSR-10,

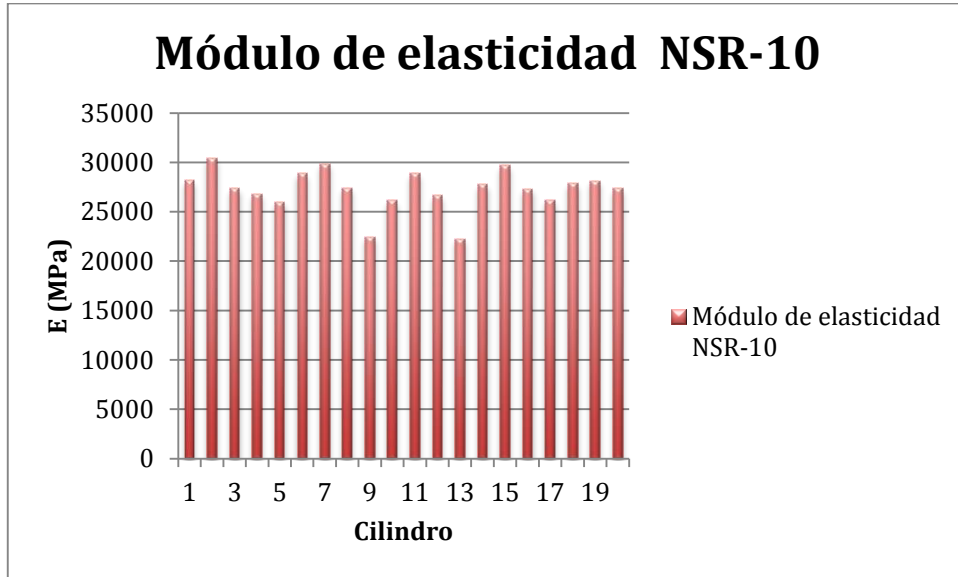


Figura 28, Módulo de elasticidad según el Reglamento NSR-10 de la mezcla con 0% de adición de ceniza

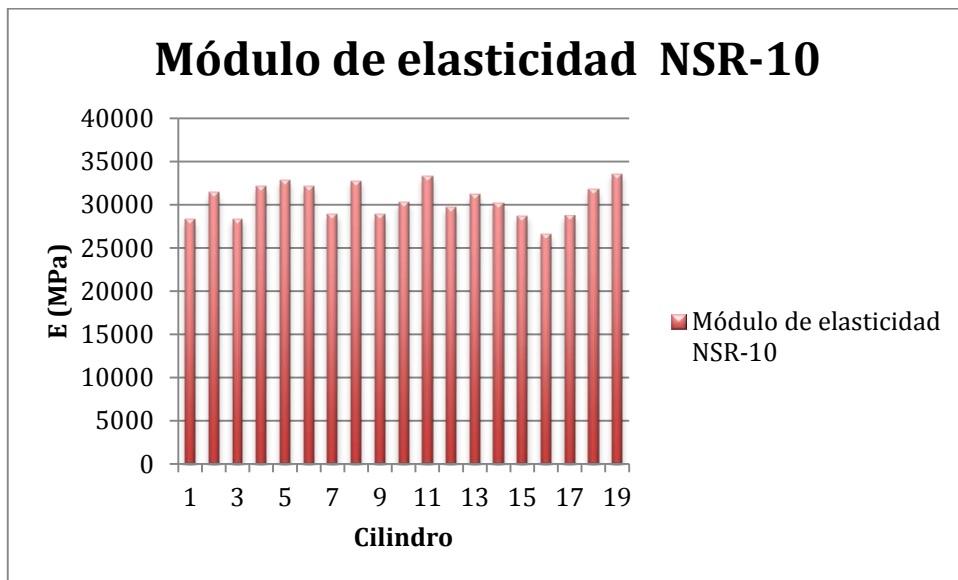


Figura 29, Módulo de elasticidad según el Reglamento NSR-10 de la mezcla con 10% de adición de ceniza

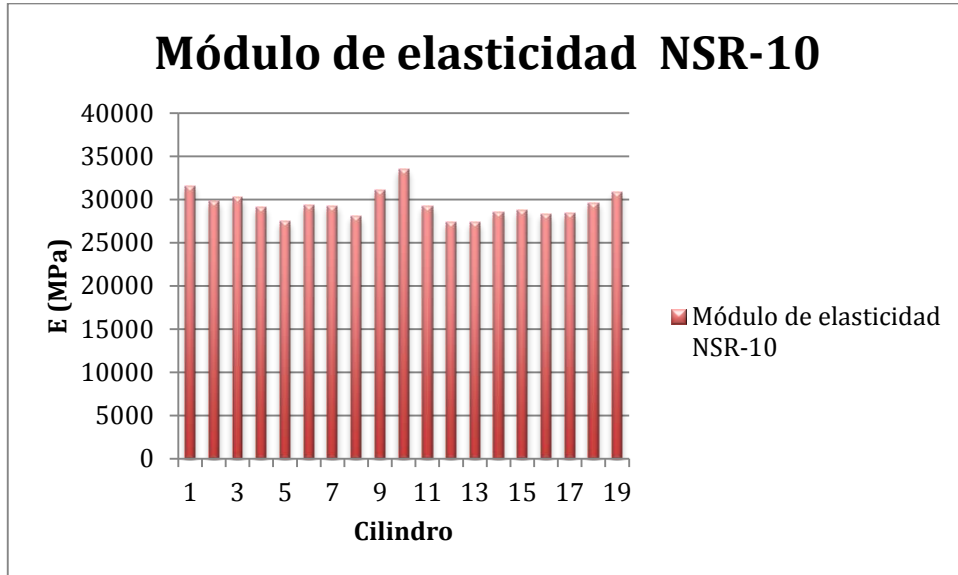


Figura 30, Módulo de elasticidad según el Reglamento NSR-10 de la mezcla con 15% de adición de ceniza

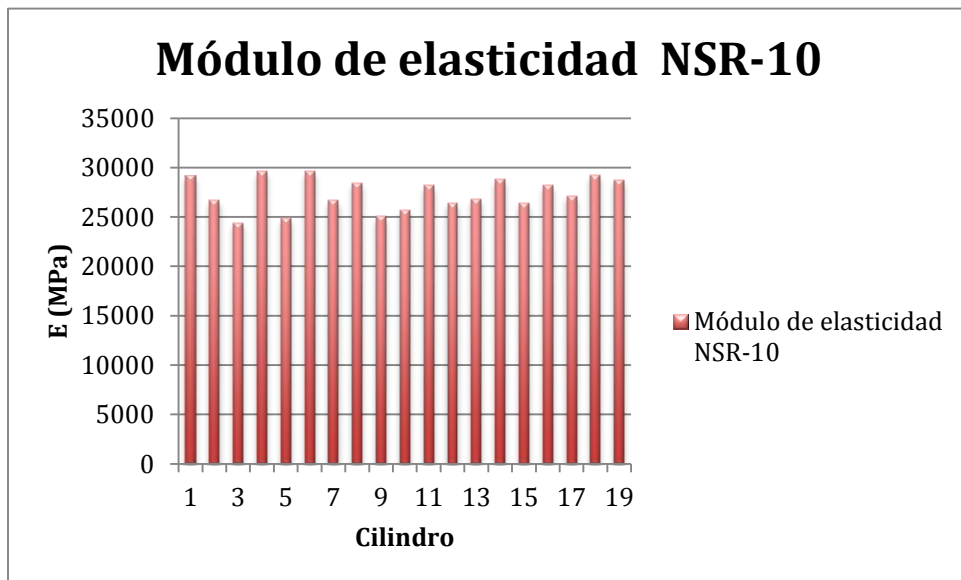


Figura 31, Módulo de elasticidad según el Reglamento NSR-10 de la mezcla con 20% de adición de ceniza

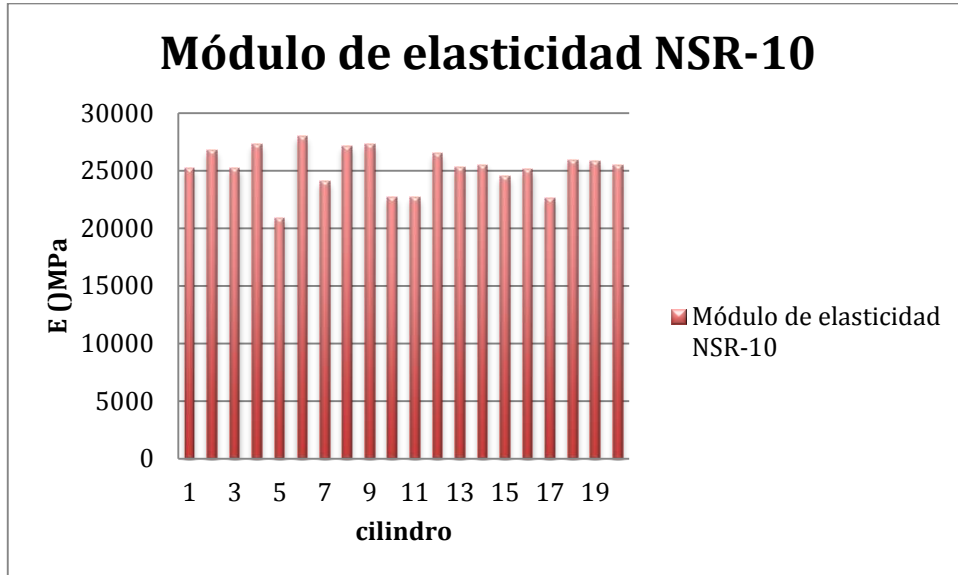


Figura 32, Módulo de elasticidad según el Reglamento NSR-10 de la mezcla con 25% de adición de ceniza

En las siguientes tablas, se observan los datos estadísticos de los módulos de elasticidad estática (E_c) de las diferentes tipos de mezclas, según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10

Tabla 23,Datos estadísticos del módulo de elasticidad de la mezcla con 0% de adición de ceniza

Análisis Estadístico Módulo elástico según NSR-10	
Descripción	MPa
No, Cilindros	20
Resistencia Media (x)=	27279,67
Mediana =	27389,35
Desviación Estándar =	2084,93
Varianza =	4346944,75
Rango	8175,11
Máximo	30419,57
Mínimo	22244,46

Tabla 24,Datos estadísticos del módulo de elasticidad de la mezcla con 10% de adición de ceniza

Análisis Estadístico Módulo elástico según NSR-10	
Descripción	MPa
No, Cilindros	19
Resistencia Media (x)=	30481,38
Mediana =	30255,74
Desviación Estándar =	2016,11
Varianza =	4064684,63
Rango	7017,04
Máximo	33525,20
Mínimo	26508,17

Tabla 25,Datos estadísticos del módulo de elasticidad de la mezcla con 15% de adición de ceniza

Análisis Estadístico Módulo elástico según NSR-10	
Descripción	MPa
No, Cilindros	19
Resistencia Media (x)=	29333,96
Mediana =	29166,52
Desviación Estándar =	1580,20
Varianza =	2497039,08
Rango	6149,51
Máximo	33482,35
Mínimo	27332,83

Tabla 26,Datos estadísticos del módulo de elasticidad de la mezcla con 20% de adición de ceniza

Análisis Estadístico Módulo elástico según NSR-10	
Descripción	MPa
No, Cilindros	19
Resistencia Media (x)=	27378,02
Mediana =	27117,82
Desviación Estándar =	1659,34
Varianza =	2753420,41
Rango	5178,47
Máximo	29591,34
Mínimo	24412,87

Tabla 27,Datos estadísticos del módulo de elasticidad de la mezcla con 25% de adición de ceniza

Análisis Estadístico Módulo elástico según NSR-10	
Descripción	MPa
No, Cilindros	20
Resistencia Media (x)=	25179,22
Mediana =	25338,48
Desviación Estándar =	1852,19
Varianza =	3430603,56
Rango	7054,33
Máximo	27952,16
Mínimo	20897,83

8.6. Análisis comparativo entre el Módulo Elástico determinado por cilindros de concreto a compresión y el reglamento NSR-10,

En este análisis se compararon los módulos de elasticidad obtenidos por medio de los cilindros ensayados a compresión, con respecto a la NSR-10, para analizar si existe similitud entre los datos, Este análisis es el que se desarrolla realmente y el que establece en el Reglamento de construcción Colombiano Sismo Resistente NSR-10, ya que no se involucran ensayos en vigas de concreto reforzado para determinar esta propiedad del concreto que solicita dicho Reglamento

En las siguientes figuras se observan los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio; es de gran importancia destacar que todos los resultados de módulos de elasticidad de las diferentes tipos de mezclas de concreto con su respectiva adición de ceniza son mayores o cercanos al que establece el Reglamento NSR-10,

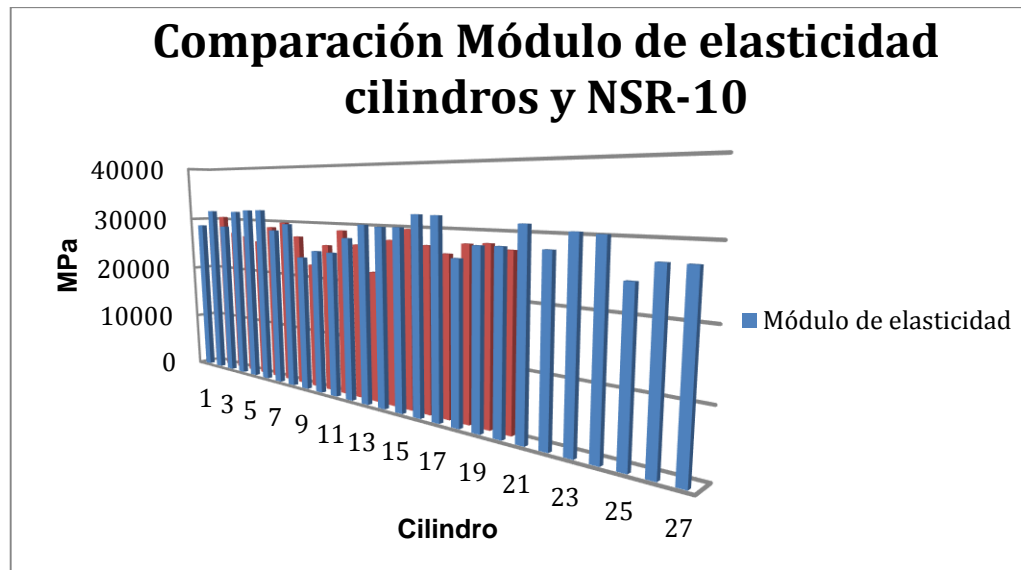


Figura 33, Módulos de elasticidad en cilindros con 0% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10

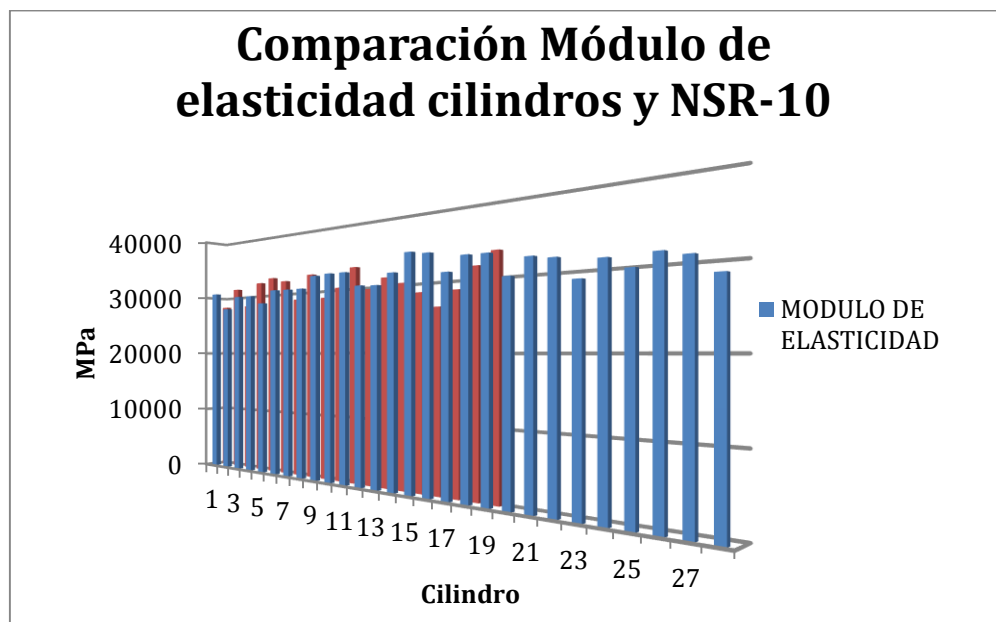


Figura 34, Módulos de elasticidad en cilindros con 10% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10

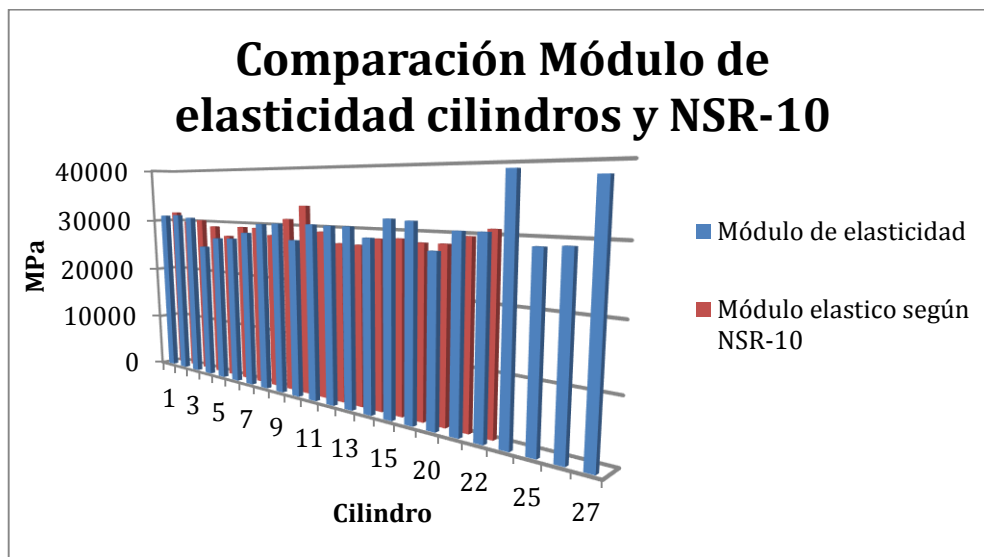


Figura 35, Módulos de elasticidad en cilindros con 15% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10

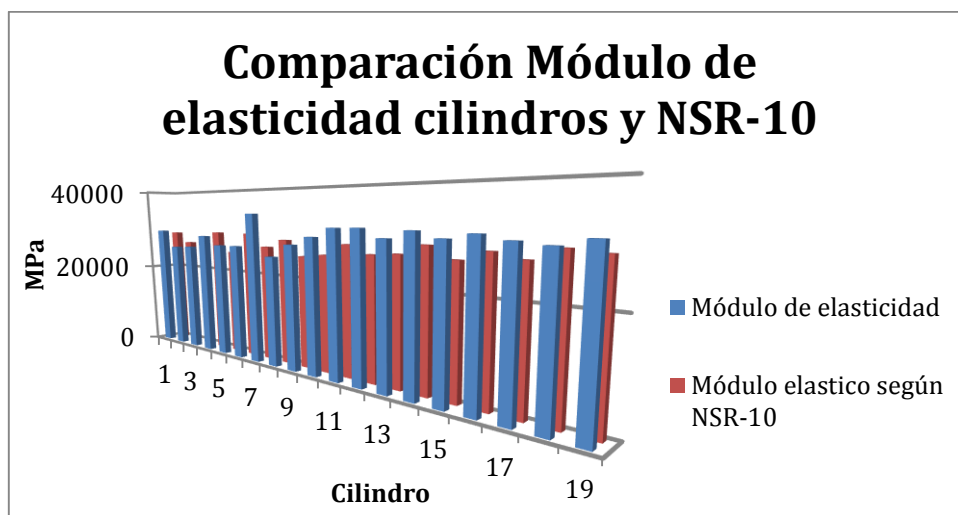


Figura 36, Módulos de elasticidad en cilindros con 20% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10

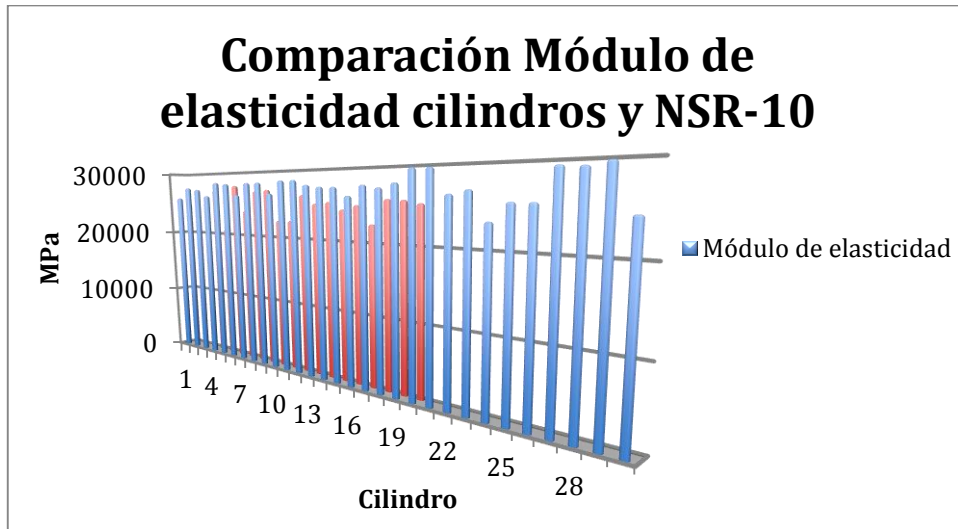


Figura 37, Módulos de elasticidad en cilindros con 25% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10

En estudios anteriores realizados en la universidad pontificia bolivariana los valores del módulo de elasticidad obtenidos por el Reglamento NSR-10 eran más elevados que los calculados en el laboratorio, como se puede observar en las figuras anteriores, los resultados de los módulos de elasticidad de los cilindros ensayados en el laboratorio son mayores a comparación de los datos que se obtuvieron al realizar los cálculos para determinar la elasticidad utilizando la NSR-10, se debe aclarar que los módulos de elasticidad calculados utilizando la ecuación del reglamento NSR-10, fueron obtenidos con base de los esfuerzos máximos a compresión que se obtuvieron en los cilindros de concreto,

Como podemos observar en el análisis comparativo, el módulo de elasticidad en cilindros de concreto aunque no varía mucho respecto al módulo de elasticidad conseguido a través de la ecuación propuesta por el reglamento NSR-10, se procedió a plantear una ecuación de módulo de elasticidad para cada una de las mezclas de los cilindros de concreto, los cuales se mostraran a continuación en la tabla 28,

Tabla 28 Ecuaciones planteadas de módulo de elasticidad en las distintas mezclas de cilindros de concreto

Tipo de mezcla	Ecuación
Adición ceniza 0%	$4970.21\sqrt{f'c}$
Adición ceniza 10%	$4745.796\sqrt{f'c}$
Adición ceniza 15%	$4844.851\sqrt{f'c}$
Adición ceniza 20%	$5027.289\sqrt{f'c}$
Adición ceniza 25%	$5189.309\sqrt{f'c}$

8.7. Análisis comparativo entre el Módulo Elástico determinado por vigas reforzadas de concreto ensayadas a flexión y el reglamento NSR-10,

En este análisis se compararon los módulos de elasticidad obtenidos por medio de vigas reforzadas de concreto ensayadas a flexión, con respecto a la NSR-10, para analizar si existe similitud entre los datos,

En las siguientes tablas se observan los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio; es de gran importancia destacar que todos los resultados de módulos de elasticidad de las diferentes tipos de mezclas de concreto con su respectiva adición de ceniza fueron menores al que establece el Reglamento NSR-10,

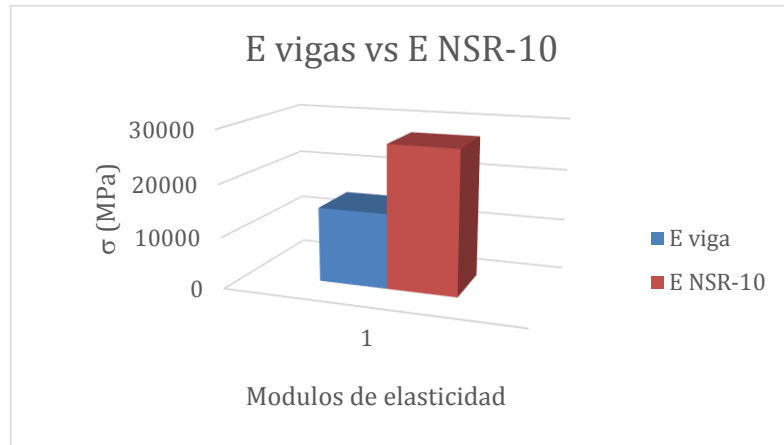


Figura 38, Módulos de elasticidad en viga con 0% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10

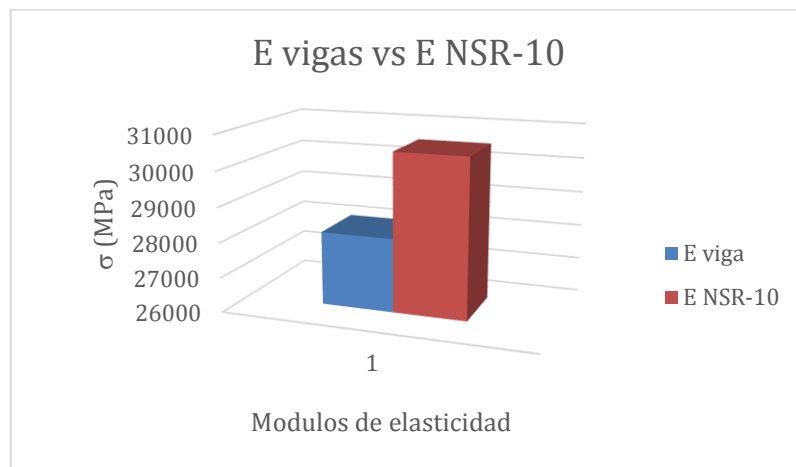


Figura 39, Módulos de elasticidad en viga con 0% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10

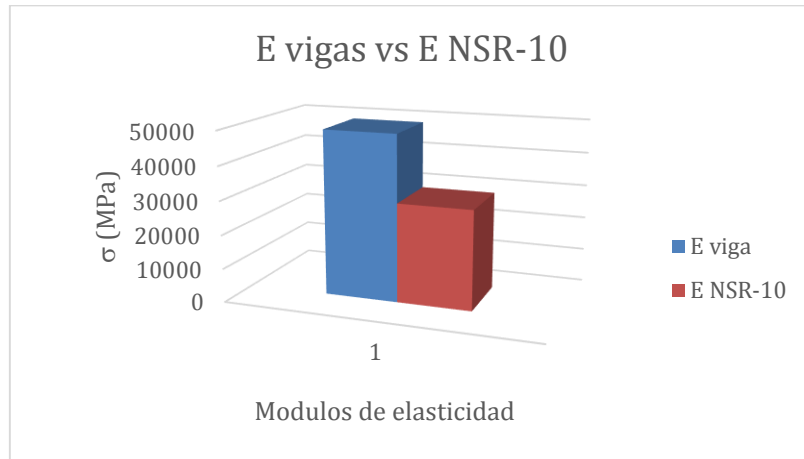


Figura 40, Módulos de elasticidad en viga con 0% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10

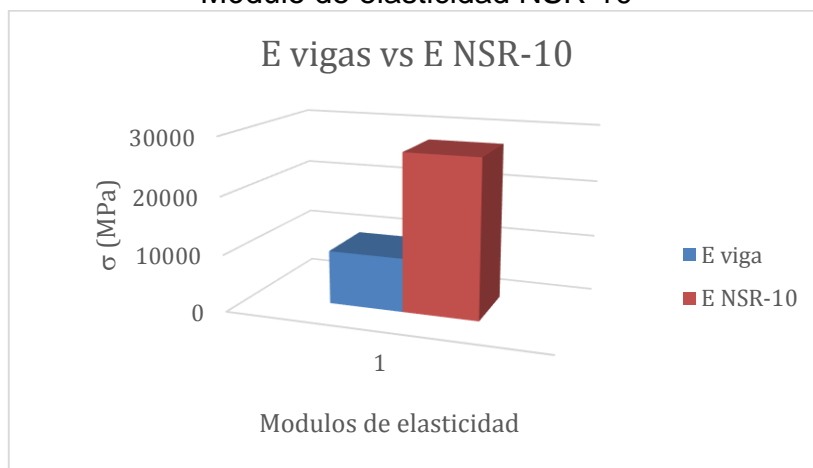


Figura 41, Módulos de elasticidad en viga con 0% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10

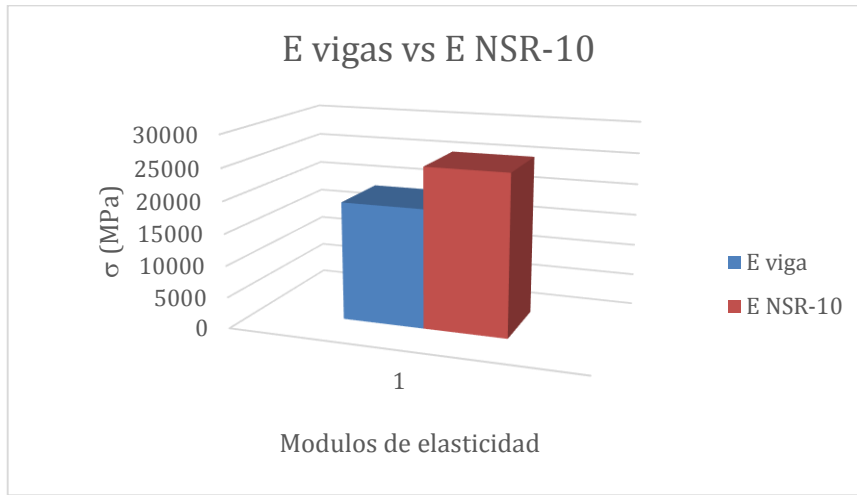


Figura 42, Módulos de elasticidad en viga con 0% de adición de ceniza vs Módulo de elasticidad NSR-10

Como podemos observar en el análisis comparativo, el módulo de elasticidad en vigas reforzadas de concreto varía mucho respecto al módulo de elasticidad conseguido a través de la ecuación propuesta por el reglamento NSR-10, por tal razón se procedió a plantear una ecuación de módulo de elasticidad para cada una de las mezclas de las vigas reforzadas de concreto, las cuales se mostrarán a continuación en la tabla 29,

Tabla 29, Ecuaciones planteadas de módulo de elasticidad en las distintas mezclas de vigas reforzadas de concreto

Tipo de mezcla	Ecuación
Adición ceniza 0%	$E = 2483,49\sqrt{f'c}$
Adición ceniza 10%	$E = 4326,78\sqrt{f'c}$
Adición ceniza 15%	$E = 7863,38\sqrt{f'c}$
Adición ceniza 20%	$E = 1609,60\sqrt{f'c}$
Adición ceniza 25%	$E = 3505,04\sqrt{f'c}$

9. CONCLUSIONES,

Los valores estimados de módulo de elasticidad del concreto a partir del ensayo de flexión en vigas reforzadas presentaron una variación considerable debido a la influencia de la temperatura ambiente, de las condiciones de protección y curado, así como a la variabilidad propia del concreto colocado, situación que puede ser incidente en el comportamiento estructural,

La mezcla diseñada para la resistencia especificada de 28MPa, alcanzó una resistencia característica promedio a los 56 días de 35,6 MPa, resistencia superior a la especificada, Esto refleja la idoneidad de los materiales para fabricar, concretos con resistencias bajas de uso general en nuestra región,

Se obtuvieron las resistencias características cercanas a las resistencias especificada de 28MPa, pero el módulo estático de elasticidad experimental es un poco mayor con respecto al teórico, esto se debe a la calidad de los agregados, en especial al agregado grueso, el cual cuenta con los estándares de calidad propuestos en la Norma Técnica Colombiana NTC-174,

También se destacó el aumento de resistencia a compresión del concreto en las probetas con adición de ceniza volante del 10% y 15%, lo que llevó a concluir que el uso de dicha adición beneficia a la mezcla del concreto siempre y cuando su porcentaje de adición no sea tan alto,

Respecto al módulo de elasticidad obtenido a través del ensayo de compresión en cilindros de concreto se observó una similitud y en muchos casos aumento comparado con el estipulado en el título C del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (*NSR-10*), Esto ocurrido por la utilización de un equipo idóneo para la captura de valores de deformación y carga para el ensayo de módulo de elasticidad, como también la utilización de materiales de calidad para la preparación de la mezcla, por tal razón se plantearon las siguientes constantes (K) para el cálculo del módulo de elasticidad en las distintas mezclas (0%, 10%, 15%, 20% y 25%) respectivamente: 4970,21; 4745,79; 4844,85; 5027,29; 5189,31,

En lo que concierne a las vigas de concreto reforzado se pudo afirmar que la consecuencia de que el módulo de elasticidad sea menor que el teórico, es que las estructuras sufra mayor deformación a las cargas aplicadas ya que influye directamente en el cálculo de la rigidez,

10. RECOMENDACIONES

Para garantizar una óptima resistencia del concreto en vigas reforzadas y ensayadas a flexión se requiere que las vigas experimenten un excelente curado, por lo tanto se sugiere que las vigas se sitúen en dicha etapa en un lugar en el cual el concreto tenga una hidratación constante, si no se cuenta con un lugar donde la viga esté en un riego constante, se pueden proceder a colocar materiales sellantes como hojas o membranas sintéticas colocadas sobre el concreto, su utilización es económica, por su menor costo y facilidad de mantener la humedad, alguno de ellos son telas plásticas, papel impermeable, compuestos químicos que forman una membrana impermeable de curado o una lona húmeda (sacos de yute humedecidos); además se sugiere colocar la viga sobre una superficie rígida, nivelada y libre de vibraciones y otras perturbaciones debido a que en ese lugar permanecerán durante un buen tiempo y deberán evitarse golpes, inclinaciones del espécimen o alteraciones en su superficie, se recomienda también no desencofrar las vigas durante un tiempo mayor de 24 horas,

Se recomienda realizarle un estudio más detallado al módulo de elasticidad para analizar su comportamiento a diferentes edades del concreto, esto revelará la evolución que experimenta esta importante propiedad del concreto, dicho procedimiento puede ser similar al análisis que se le realiza al esfuerzo a compresión (cada 7 días hasta llegar a su edad máxima requerida),

El control de calidad del concreto no sólo debe estar dirigido a obtener la resistencia específica a una edad de 28 días, también se debe enfocar en la obtención del módulo de elasticidad estático del concreto real para 21 MPa y 28 MPa,

Se recomienda seguir realizando estudios en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga con un número mayor de muestras para contar con mayor información y resultados significativos sobre el módulo de elasticidad de concreto en Colombia y sea una ayuda primordial para los diseñadores, constructores y consultores del país,

Se recomienda la utilización de nuevos materiales (virutas, fibra de vidrio, cabello) para adicionarle al concreto y analizar los beneficios que estos pueden traer a la mezcla garantizando que sus propiedades no se alteren desfavorablemente,

11. BIBLIOGRAFÍA

[1], Propiedades del concreto que contiene ceniza volante ultra fina, (consultado 19 de febrero), ver en línea <http://www,imcyc,com,mx/revista/2001/febrero2001/propiedades,htm>

[2], RIVERA, L, Gerardo, A, Concreto simple [En línea], [Consultado 9 de febrero de 2015] Disponible en <http://ftp,unicauca,edu,co/cuentas/gearrilo/docs/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM%20%20de%202010/Tecnologia%20del%20Concreto%20-%20%20PDF%20ver,%20%202009/Cap,%2006%20-%20Resistencia,pdf>

[3], MOLINA BAS, O, I, et al, La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento portland en la durabilidad del hormigón... [Online], Anales de Mecánica de la Fractura 25, Vol, 2 (2008), Disponible en internet <http://www,gef,es/Congresos/25/PDF/8-1,pdf>

[4], KOCH, G,H; BRONGERS, M,P,H; THOMPSON, N,G, et al, (2002) Corrosion Costs by Industry Sector, Supplement to Materials Performance, 4 – 8

[5], Ruiz D., Vacca H, y León M, (2007), Propuesta de modificación de la ecuación para la estimación Del módulo de elasticidad Del concreto en función de la resistencia a la compresión para Bogotá, Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería N°67 Julio - Septiembre, P, 7-15,

[6], SANCHEZ DE GUZMAN, Diego, Durabilidad y patología del concreto, Colección del concreto, Vol, 2, P, 138,

[7], HIBBELER, Russell, Análisis estructural, Tercera edición, P, 417,

[8], NTC 673, Norma Técnica Colombiana, Ensayo de Resistencia a la comprensión de especímenes en cilindros de concreto

[9], NIÑO HERNANDEZ, Jairo, Colección del concreto – tecnología del concreto, Tomo 1, Tercera edición, 2010, P, 125,

[10], Ibid, P, 131

[11], Instituto del Concreto-Asocreto, Tecnología y Propiedades, Asociación Colombiana de Productores de concreto, Bogotá, 215p, 2000,

[12], MCCORMAC, Jack C; BROWN, Russell H, Diseño de concreto reforzado, 8a Edición, México: Alfaomega Grupo Editor, 2011, 9 p,

[13], HERNANDEZ DE LA CRUZ, Marcos, Construcción de estructuras de acero, México, 2008, 2 p,

[14], Mezclas binarias y ternarias basadas en cenizas volantes, Influencia del activador sobre la formación de fases y resistencias mecánicas, Sindy Sofía Suarez Silgado, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Julio de 2010, Universidad Politécnica de Cataluña,

[15], Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR -, Numeral C,8,5,1, Pág, C-112, 2010,

[16], Pickett, G, Effect of Gypsum Content and Other Factors on Shrinkage of Concrete Prisms Proceedings, American Concrete Institute, Vol, 44, October 1974, pp, 149-175,

[17], AWAD ROBERTO ROCEHL, (2007), Hormigón Reforzado NSR-98, Tomo I, Medellín, Antioquia: Universidad EAFIT,

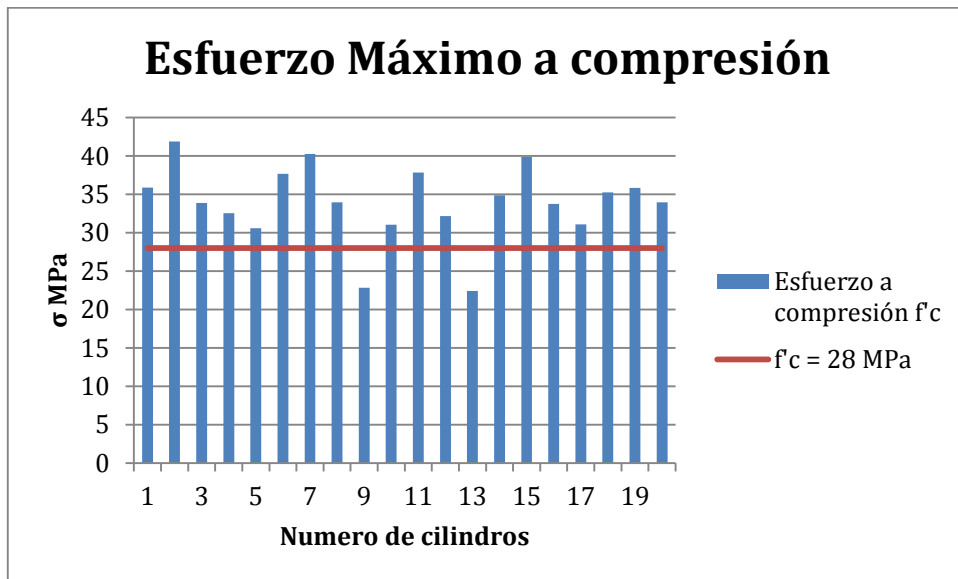
12. ANEXOS

12.1. Análisis de Resultados obtenidos en el ensayo a compresión de los cilindros de concreto con adición de diferentes porcentajes de ceniza volante (10%, 15%, 20%, y 25%),

SIN CENIZA

mezcla sin ceniza				
No	diámetro (cm)	altura (cm)	kN	MPa
1	15,2	30,5	634,62	35,87
2	15,4	30,2	740,69	41,89
3	15,3	30,5	607,31	33,88
4	15,2	30,5	576,5	32,52
5	15,1	30,1	541,99	30,59
6	15,3	30,3	665,74	37,67
7	15,4	30,6	712,3	40,26
8	15,4	30,1	608,38	33,97
9	15,4	30,1	406,4	22,83
10	15,1	30,5	548,64	31,02
11	15,3	30,6	669,89	37,83
12	15,2	30,3	568,73	32,15
13	15,4	30,4	398,77	22,4
14	15,4	30,4	616,57	34,89
15	15,3	30,5	706,19	39,87
16	15,2	30,3	615,83	33,74
17	15,2	30,4	550	31,08
18	15,2	30,3	623,2	35,25
19	15,5	30,1	636,82	35,85
20	15,1	30	600,02	33,95

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	20
Resistencia Media (x)=	33,88
Mediana =	33,96
Desviación Estándar =	4,96
Varianza =	24,58
Rango	19,49
Máximo	41,89
Mínimo	22,4

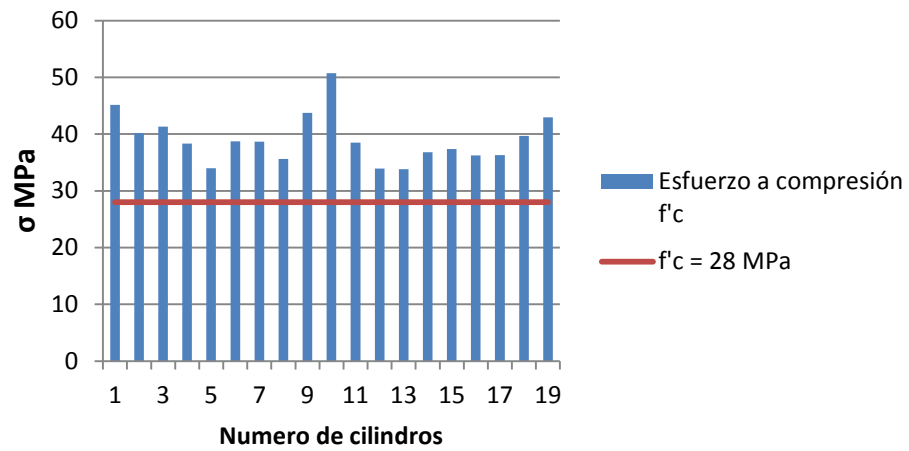


15 % DE CENIZA

Mezcla con ceniza (15%)				
No	diámetro (cm)	altura (cm)	kN	MPa
1	15,1	30,1	797,41	45,12
2	15,3	30,2	711,41	40,21
3	15,2	30,3	730,34	41,3
4	15,2	30,4	677,45	38,34
5	15,2	30,5	607,26	33,99
6	15,2	30,5	684,6	38,74
7	15,3	30,5	683,84	38,68
8	15,3	30,1	630,92	35,64
9	15,3	30,5	773,22	43,76
10	15,2	30,3	900,12	50,75
11	15,1	30,6	681,31	38,51
12	15,4	30	616,99	33,92
13	15,2	30,4	597,73	33,82
14	15,3	30,4	651,46	36,82
15	15,4	30,5	660,74	37,36
16	15,3	30,5	640,44	36,24
17	15,4	30,5	642,78	36,32
18	15,3	30,4	701,95	39,68
19	15,3	30,5	758,92	42,95

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	20
Resistencia Media (x)=	39,06
Mediana =	38,51
Desviación Estándar =	4,30
Varianza =	18,50
Rango	16,93
Máximo	50,75
Mínimo	33,82

Esfuerzo Máximo a compresión

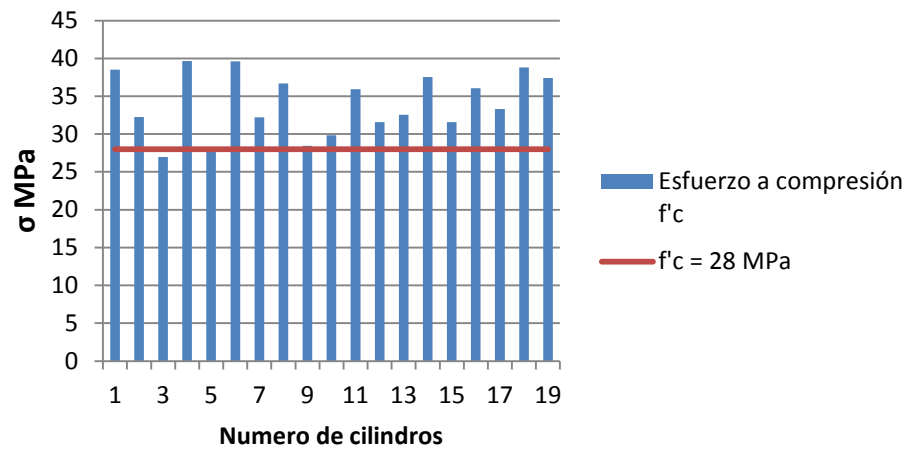


20 % DE CENIZA

Mezcla con ceniza (20%)				
No	diámetro (cm)	altura (cm)	kN	MPa
1	15,3	30	680,67	38,52
2	15,2	30,3	570,04	32,24
3	15,3	30,4	477,28	26,98
4	15,4	30,5	701,01	39,64
5	15,3	30,3	494,9	27,99
6	15,4	30	701,15	39,62
7	15,3	30,4	569,34	32,2
8	15	30,1	649,21	36,69
9	15,2	30,4	502,9	28,46
10	15,1	30,4	529,47	29,86
11	15,3	30,4	638,86	35,95
12	15,4	30,6	558,86	31,56
13	15,3	30,5	576,07	32,57
14	15,1	30,4	664,05	37,56
15	15,3	30,3	558,71	31,57
16	15,4	30,4	638,72	36,04
17	15,3	30,4	588,74	33,29
18	15,4	30,3	687,82	38,81
19	15,4	30,6	661,02	37,4

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	20
Resistencia Media (x)=	34,05
Mediana =	33,29
Desviación Estándar =	4,08
Varianza =	16,68
Rango	12,66
Máximo	39,64
Mínimo	26,98

Esfuerzo Máximo a compresión

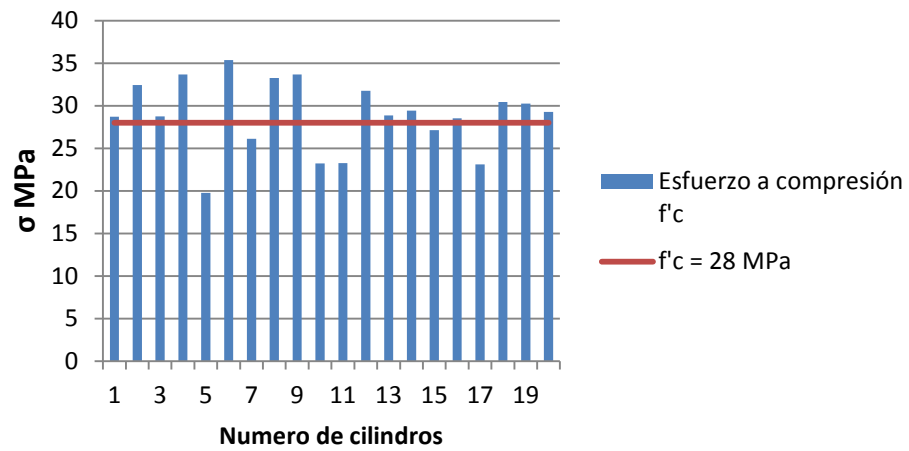


25 % DE CENIZA

Mezcla con ceniza (25%)				
No	diámetro (cm)	altura (cm)	kN	MPa
1	15,3	30,3	507,44	28,72
2	15,3	30,5	573,42	32,43
3	15,4	30,1	508,25	28,76
4	15,3	30,5	584,68	33,67
5	15,3	30,2	350,98	19,77
6	15,5	30,2	625,34	35,37
7	15,3	30,3	462,6	26,13
8	15,3	30,3	587,81	33,26
9	15,2	30,6	584,68	33,67
10	15,5	30,6	410,22	23,21
11	15,4	30,5	410,78	23,25
12	15,4	30,4	560,97	31,74
13	15,3	30,3	510,68	28,87
14	15,4	30,5	520,2	29,42
15	15,4	30,4	479,91	27,14
16	15,5	30,3	504,1	28,53
17	15,3	30,3	408,08	23,09
18	15,5	30,4	537,87	30,44
19	15,2	30,1	534,7	30,23
20	15,4	30,2	517,05	29,26

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	20
Resistencia Media (x)=	28,85
Mediana =	29,065
Desviación Estándar =	4,13
Varianza =	17,04
Rango	15,6
Máximo	35,37
Mínimo	19,77

Esfuerzo Máximo a compresión

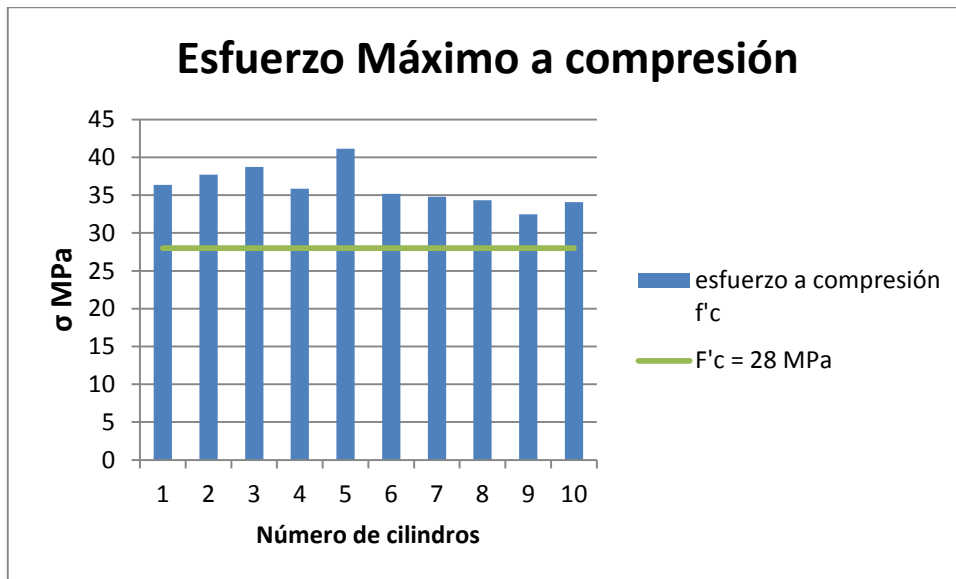


12.2. Análisis de Resultados obtenidos en el ensayo a compresión de los cilindros de concreto con adición de diferentes porcentajes de ceniza volante (10%, 15%, 20%, y 25%) después de ser ensaya para encontrar su módulo elástico,

SIN CENIZA

mezcla sin ceniza		
cilindro	KN	MPa
1	643,51	36,36
2	667,12	37,72
3	684,39	38,73
4	635,31	35,87
5	727,03	41,13
6	632,2	35,17
7	626,33	34,79
8	607,19	34,35
9	574,05	32,45
10	602,62	34,09

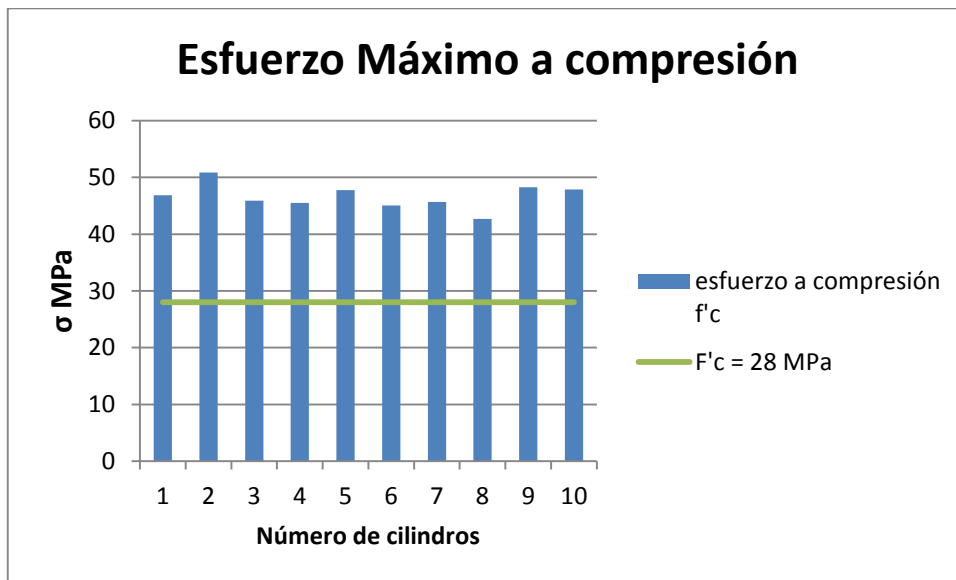
Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No. Cilindros	10
Resistencia Media (x)=	36,07
Mediana =	35,52
Desviación Estándar =	2,54
Varianza =	6,44
Rango	8,68
Máximo	41,13
Mínimo	32,45



10 % DE CENIZA

Mezcla con ceniza (10%)		
cilindro	KN	MPa
1	832,81	46,86
2	906,3	50,86
3	811,3	45,91
4	803,81	45,49
5	843,7	47,73
6	795,74	45,03
7	808,39	45,68
8	754,63	42,69
9	853,07	48,26
10	845,91	47,87

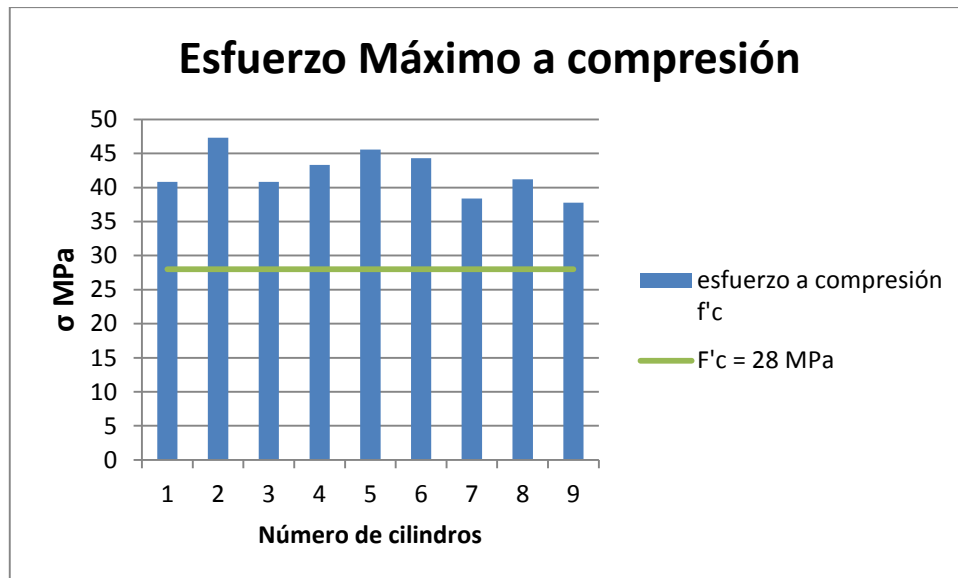
Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No, Cilindros	10
Resistencia Media (x)=	46,64
Mediana =	46,385
Desviación Estándar =	2,21
Varianza =	4,91
Rango	8,17
Máximo	50,86
Mínimo	42,69



15 % DE CENIZA

Mezcla con ceniza (15%)		
cilindro	KN	MPa
1	721,4	40,82
2	836,48	47,31
3	721,37	40,82
4	765,34	43,31
5	805,84	45,6
6	783,59	44,3
7	679,76	38,4
8	730,79	41,2
9	668,1	37,76

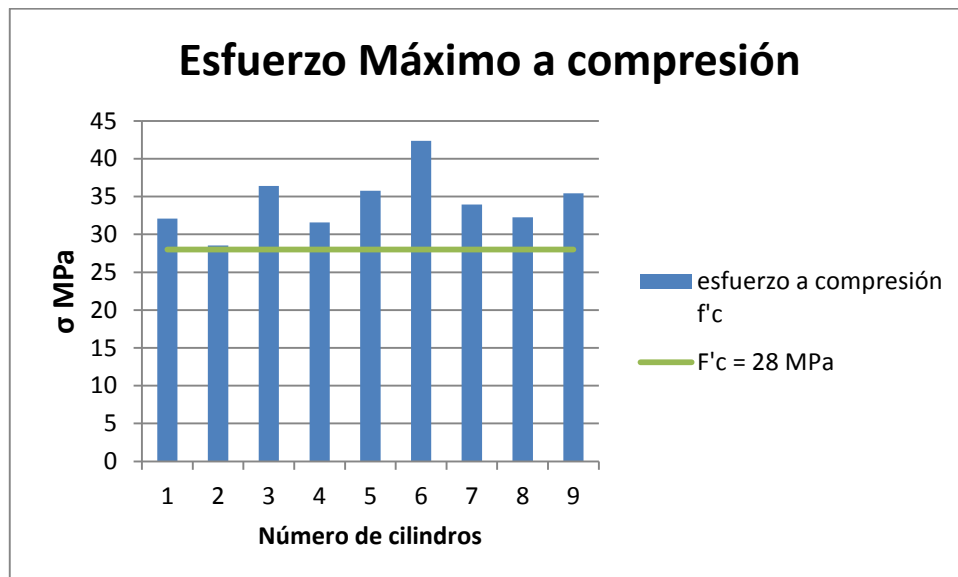
Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No. Cilindros	9
Resistencia Media (x)=	42,17
Mediana =	41,2
Desviación Estándar =	3,21
Varianza =	10,28
Rango	9,55
Máximo	47,31
Mínimo	37,76



20 % DE CENIZA

Mezcla con ceniza (20%)		
cilindro	KN	MPa
1	568,9	32,07
2	504,6	28,54
3	643,65	36,42
4	557,8	31,56
5	633,62	35,76
6	749,65	42,36
7	609,65	33,93
8	570,04	32,24
9	627,13	35,45

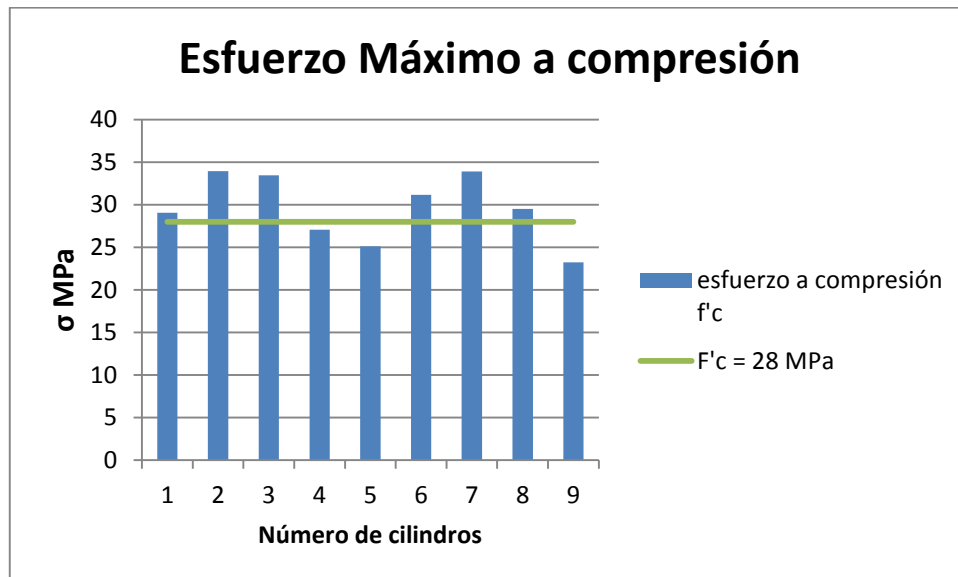
Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No. Cilindros	9
Resistencia Media (x)=	34,26
Mediana =	33,93
Desviación Estándar =	3,92
Varianza =	15,37
Rango	13,82
Máximo	42,36
Mínimo	28,54



25 % DE CENIZA

Mezcla con ceniza (25%)		
cilindro	KN	MPa
1	513,96	29,08
2	611,43	33,96
3	586,24	33,46
4	478,22	27,06
5	443,99	25,11
6	550,78	31,16
7	601,99	33,93
8	522,99	29,52
9	410,5	23,23

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No. Cilindros	9
Resistencia Media (x)=	29,61
Mediana =	29,52
Desviación Estándar =	3,91
Varianza =	15,32
Rango	10,73
Máximo	33,96
Mínimo	23,23



12.3. Análisis estadístico Modulo de elasticidad en cilindros de concreto a compresión

SIN CENIZA

Cilindro	Módulo de elasticidad E(MPa)
1	28689
2	31640
3	28689
4	31640
5	31991
6	32090
7	28477
8	29731
9	23946
10	25266
11	25214
12	27870
13	30216
14	29983
15	30053
16	32141
17	32080
18	25885
19	27973
20	28044
23	31286
24	27973
25	30495
26	30310
27	24716
28	27299
29	27297

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No. Cilindros	29,0
Resistencia Media (x)=	28925,6
Mediana =	28689,0
Desviación Estándar =	2460,0
Varianza =	6051784,7
Rango	8195,0
Máximo	32140,6
Mínimo	23945,6

15 % DE CENIZA

Cilindro	Módulo de elasticidad E(MPa)
1	30985
2	31178
3	30751
4	25258
5	27063
6	27196
7	28433
8	30158
9	30369
10	27657
11	30494
12	30401
13	30431
14	28790
15	31876
16	31676
20	27416
21	30500
22	30510
24	39035
25	28921
26	29202
27	38123
28	41164
29	41545

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No. Cilindros	29,0
Resistencia Media (x)=	31165,4
Mediana =	30431,2
Desviación Estándar =	4276,8
Varianza =	18290783,7
Rango	16286,9
Máximo	41544,9
Mínimo	25258,0

20 % DE CENIZA

Cilindro	Módulo de elasticidad E(MPa)
2	29760
3	25602
4	25874
5	28792
7	26704
8	26746
11	34369
18	24872
19	27800
21	29622
22	31604
23	31719
24	29892
25	31479
26	30232
27	31228
28	30302
29	29778
30	30999

Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No. Cilindros	29,0
Resistencia Media (\bar{x})=	29335,4
Mediana =	29777,7
Desviación Estándar =	2491,6
Varianza =	6208008,9
Rango	9496,8
Máximo	34368,8
Mínimo	24872,0

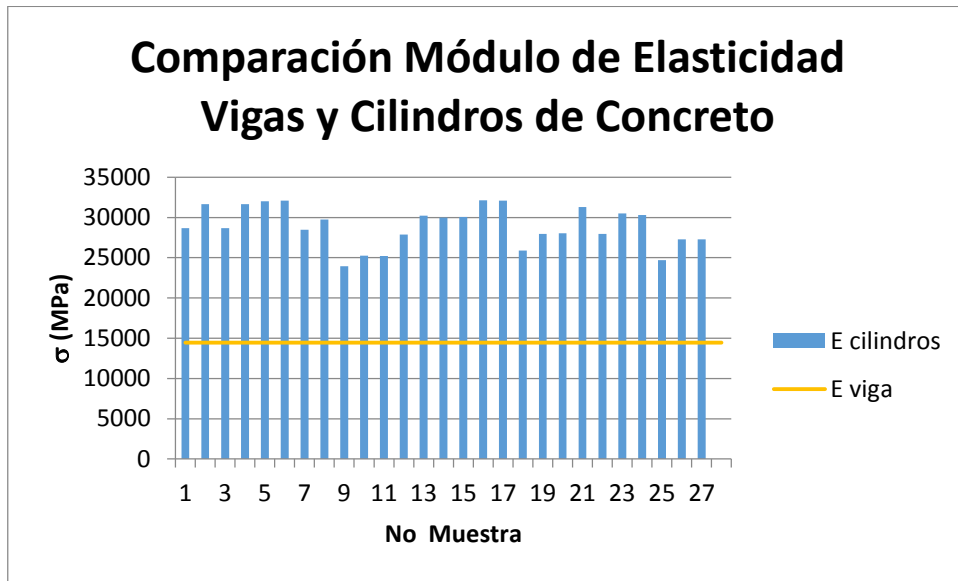
25 % DE CENIZA

Cilindro	Módulo de elasticidad E(MPa)
1	25964
2	27649
3	27391
4	26337
5	28439
6	28230
7	26516
8	28324
9	28345
10	26701
11	28580
12	28594
13	27882
14	27591
15	27545
16	26355
17	27764
18	27394
19	27979
20	29723
21	29701
22	26564
23	27050
24	23483
25	25680
26	25661
27	29443
28	29316
29	29747
30	24564

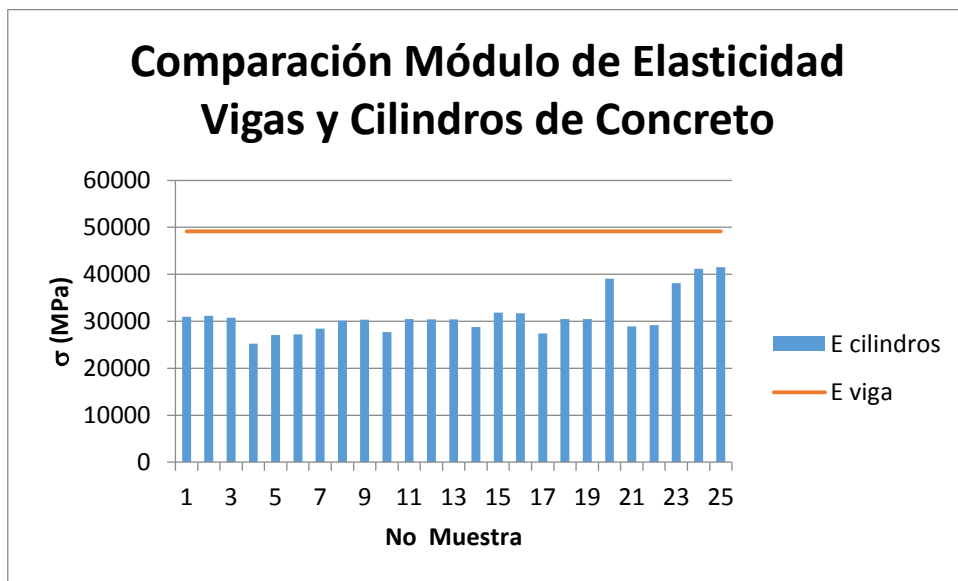
Análisis Estadístico Esfuerzos a Compresión	
Descripción	MPa
No. Cilindros	29,0
Resistencia Media (x)=	27483,8
Mediana =	27619,9
Desviación Estándar =	1517,0
Varianza =	2301281,3
Rango	6264,8
Máximo	29747,5
Mínimo	23482,7

12.4. Módulo de elasticidad de vigas reforzadas vs Módulos de elasticidad obtenidos en cilindros de concreto compresión,

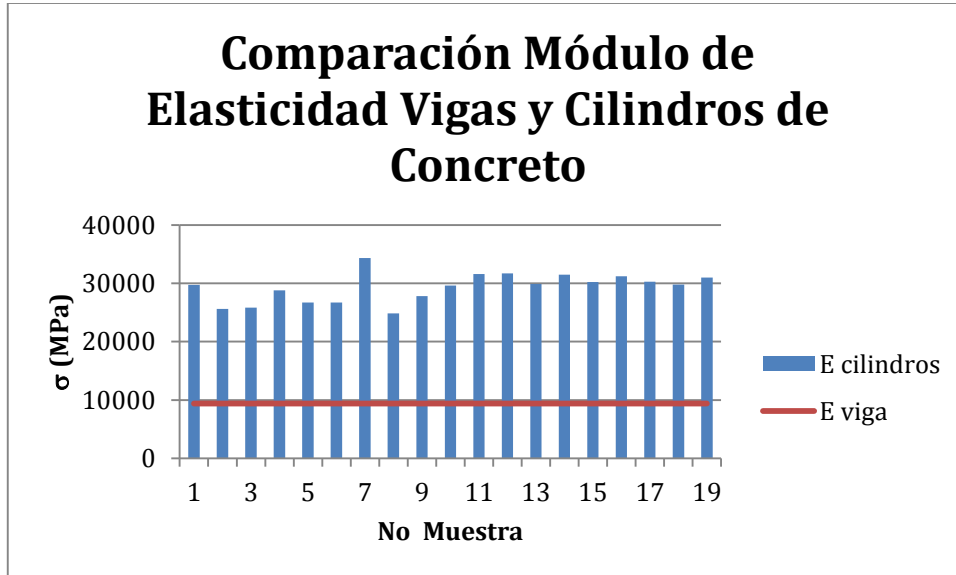
Especímenes sin ceniza



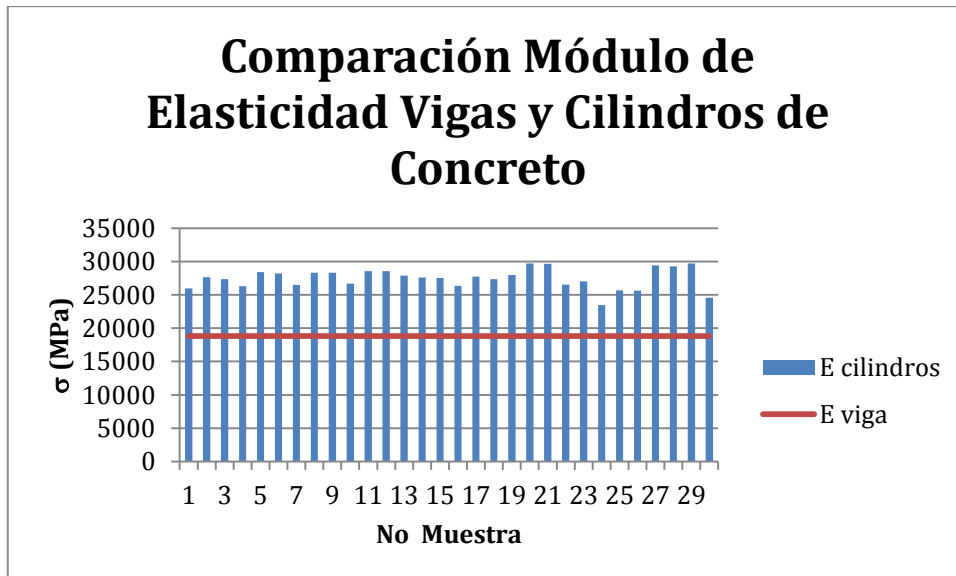
Especímenes con adición 15% de ceniza



Especímenes con adición 20% de ceniza



Especímenes con adición 25% de ceniza

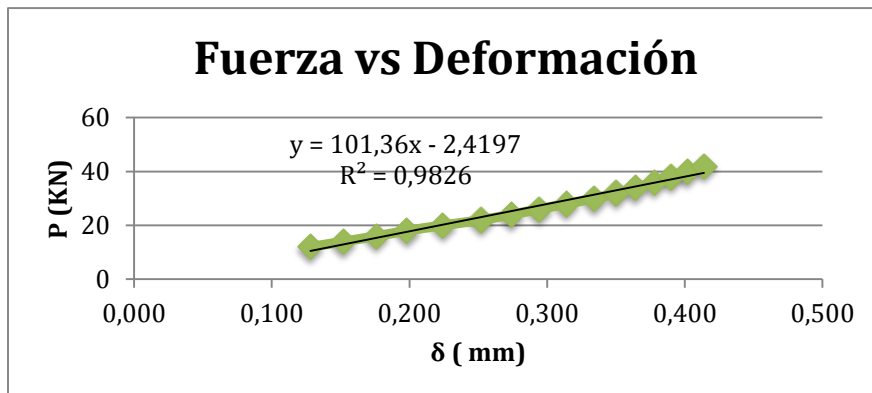


12.5. Resultados obtenidos ensayo de Módulo de Elasticidad en vigas reforzadas de concreto:

Mezcla sin ceniza

Lectura	d (mm)	P (kN)
1	0	0
2	0,000	2
3	0,026	4
4	0,054	6
5	0,078	8
6	0,102	10
7	0,128	12
8	0,152	14
9	0,176	16
10	0,198	18
11	0,224	20
12	0,252	22
13	0,274	24
14	0,294	26
15	0,314	28
16	0,334	30
17	0,350	32
18	0,364	34
19	0,378	36
20	0,390	38
21	0,402	40
22	0,414	42

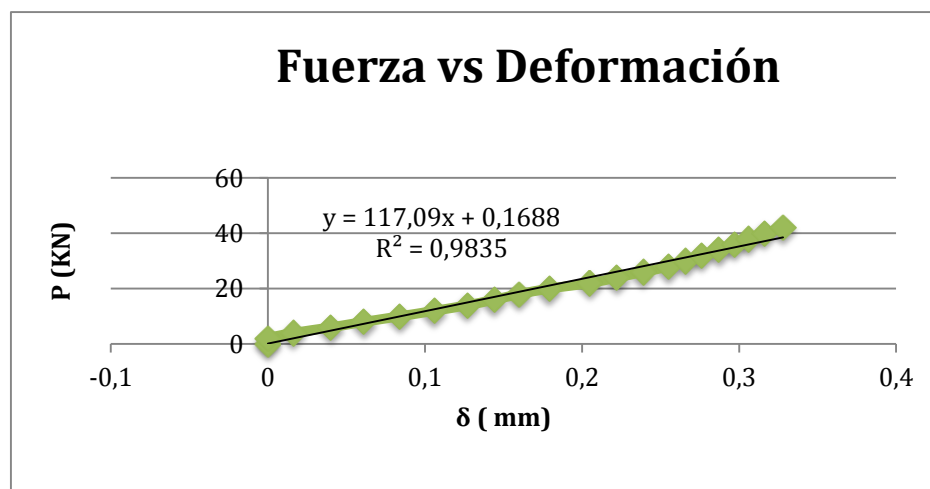
Características de la viga	
Tipo de mezcla	sin ceniza
Ancho (mm)	252
Alto (mm)	303
Longitud (mm)	1203



Mezcla 10% ceniza

Lectura	d (mm)	P (kN)
1	0	0
2	0	2
3	0,016	4
4	0,040	6
5	0,061	8
6	0,084	10
7	0,106	12
8	0,127	14
9	0,144	16
10	0,160	18
11	0,179	20
12	0,205	22
13	0,222	24
14	0,239	26
15	0,255	28
16	0,266	30
17	0,276	32
18	0,287	34
19	0,297	36
20	0,306	38
21	0,316	40
22	0,328	42

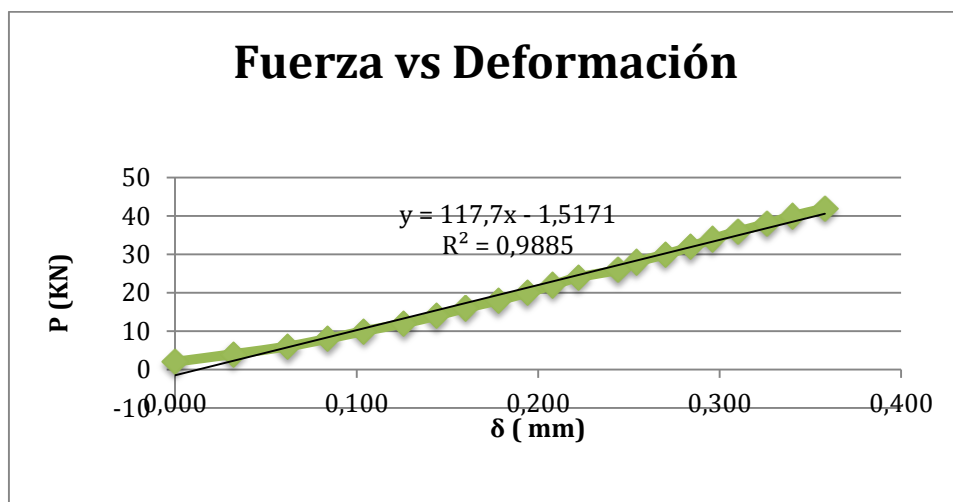
Características de la viga	
Tipo de mezcla	10% ceniza
Ancho (mm)	253
Alto (mm)	310
Longitud (mm)	1203



Mezcla 15% ceniza

Lectura	d (mm)	P (kN)
1	0,000	2
2	0,032	4
3	0,062	6
4	0,084	8
5	0,104	10
6	0,126	12
7	0,144	14
8	0,160	16
9	0,178	18
10	0,194	20
11	0,208	22
12	0,222	24
13	0,244	26
14	0,254	28
15	0,270	30
16	0,284	32
17	0,296	34
18	0,310	36
19	0,326	38
20	0,340	40
21	0,358	42

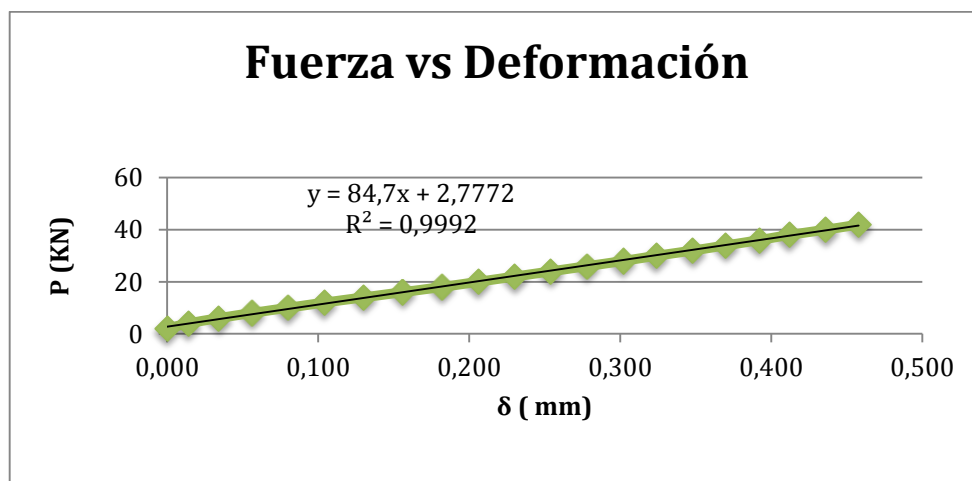
Características de la viga	
Tipo de mezcla	15% ceniza
Ancho (mm)	258
Alto (mm)	287
Longitud (mm)	1202



Mezcla 20% ceniza

Lectura	d (mm)	P (kN)
1	0,000	2
2	0,014	4
3	0,034	6
4	0,056	8
5	0,080	10
6	0,104	12
7	0,130	14
8	0,156	16
9	0,182	18
10	0,206	20
11	0,230	22
12	0,254	24
13	0,278	26
14	0,302	28
15	0,324	30
16	0,348	32
17	0,370	34
18	0,392	36
19	0,412	38
20	0,436	40
21	0,458	42

Características de la viga	
Tipo de mezcla	20% ceniza
Ancho (mm)	255
Alto (mm)	29
Longitud (mm)	1197



Mezcla 25% ceniza

Lectura	d (mm)	P (kN)
1	0,000	2
2	0,014	4
3	0,034	6
4	0,056	8
5	0,080	10
6	0,104	12
7	0,130	14
8	0,156	16
9	0,182	18
10	0,206	20
11	0,230	22
12	0,254	24
13	0,278	26
14	0,302	28
15	0,324	30
16	0,348	32
17	0,370	34
18	0,392	36
19	0,412	38
20	0,436	40
21	0,458	42

Características de la viga	
Tipo de mezcla	20% ceniza
Ancho (mm)	255
Alto (mm)	29
Longitud (mm)	1197

