



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“COMPORTAMIENTO ELÁSTICO Y PLÁSTICO
DEL CONCRETO CON AGREGADO CALIZO DE
ALTA ABSORCIÓN A EDADES TEMPRANAS”**

TESIS

PRESENTADA POR:

I.C. EDUARDO DE JESÚS SÁNCHEZ GUADARRAMA

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

OPCIÓN ESTRUCTURAS

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2017

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Yucatán, por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.

RESUMEN

Los programas de obra cada vez más ajustados y la utilización de elementos de concreto presforzado, han derivado en la necesidad de aplicar esfuerzos considerables a edades tempranas a dichos elementos estructurales, generando deformaciones excesivas, permanentes, agrietamientos y otras patologías, las cuales pueden poner en riesgo el adecuado comportamiento de la estructura.

Las principales propiedades que describen el comportamiento del concreto son la resistencia a compresión axial, y el módulo de elasticidad. Dichas propiedades son referenciadas a la edad de 28 días, por lo que sus valores a edades tempranas pueden ser subestimados o sobrestimados.

Por otro lado, de acuerdo a estudios previos, el agregado calizo de alta absorción utilizado en la Península de Yucatán, limita la resistencia a compresión axial del concreto. Además se ha observado que con las ecuaciones propuestas en las NTC (2004) para determinar el módulo de elasticidad se obtienen valores mayores a los obtenidos experimentalmente.

El objetivo de esta investigación es determinar la variación de las principales propiedades mecánicas del concreto fabricado con agregados calizos de alta absorción a edades tempranas y comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los modelos de predicción existentes y normas vigentes. Se eligieron tres resistencias a compresión axial del concreto a 28 días (f'_c): $f'_c=150\text{kg/cm}^2$, $f'_c=250\text{kg/cm}^2$ y $f'_c=350\text{kg/cm}^2$, por ser las más utilizadas en la Península de Yucatán. Se fabricaron y ensayaron 35 cilindros de cada resistencia. Las dimensiones de los cilindros fueron de 15cm de diámetro y 30cm de altura. Se determinó experimentalmente la resistencia a compresión axial, módulo de elasticidad, curva esfuerzo-deformación y madurez, a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días. Se verificó que los materiales utilizados cumplan con los requisitos de calidad de acuerdo con la norma NMX-C-111-ONNCCE. El diseño de las mezclas de concreto se realizó de acuerdo al ACI 211 con los datos obtenidos de las pruebas de los materiales. La prueba de resistencia a compresión y curva esfuerzo-deformación se realizó siguiendo

la norma NMX-C-083-ONNCCE y el módulo de elasticidad se determinó con los lineamientos de la norma NMX-C-128-ONNCCE.

De los resultados experimentales se observó que la resistencia a compresión se incrementa con respecto al tiempo, logrando a los 3 días un 65% en promedio del valor final de referencia a 28 días, un 83% de dicho valor en promedio a los 7 días y un incremento más lento hasta alcanzar la resistencia de referencia a los 28 días.

El módulo de elasticidad se incrementa con respecto al tiempo, logrando a los 3 días un 80% en promedio del valor final a 28 días, y posteriormente un incremento más lento hasta alcanzar el valor del módulo de elasticidad de referencia a 28 días. Por lo cual se observó que la relación entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad no tienen una relación constante, especialmente en los tres primeros días. Se observó que la evolución de la resistencia a compresión y del módulo de elasticidad no depende de la $f'c$.

La curva esfuerzo-deformación unitaria a edades tempranas y para cualquier resistencia se puede ajustar a una función cuadrática, similar a los modelos propuestos por Hognestad (1951), Kent y Park modificado (1971) y Todeschini (1964), sustituyendo los valores correspondientes de resistencia a compresión axial máxima y su correspondiente valor de deformación unitaria.

Finalmente el método de madurez subestima la resistencia a compresión axial de los concretos curados a la intemperie elaborados en la Península de Yucatán. Por lo tanto, puede ser utilizado para predecir de manera conservadora la resistencia a compresión axial a edades tempranas de dichos concretos.

ABSTRACT

Increasingly tight work schedules and the use of reinforced concrete elements have led to the need to apply considerable efforts at early ages to these structural elements, generating excessive, permanent deformations, cracking and other pathologies, which can risk the proper behavior of the structure.

The main properties that describe the behavior of the concrete are the axial compressive strength, and the modulus of elasticity. These properties are referenced at the age of 28 days, so their values at early ages can be underestimated or overestimated.

On the other hand, according to previous studies, the high-absorption limestone aggregate used in the Yucatan Peninsula limits the axial compressive strength of the concrete. It has also been observed that with the equations proposed in the NTC (2004) to determine the modulus of elasticity, higher values are obtained than those obtained experimentally.

The objective of this research is to determine the variation of the main mechanical properties of the concrete made with high absorption limestone aggregates at early ages and to compare the results obtained experimentally with the existing prediction models and current norms. Three axial compression strengths of the concrete were chosen at 28 days (f'_c): $f'_c=150\text{kg/cm}^2$, $f'_c=250\text{kg/cm}^2$ and $f'_c=350\text{kg/cm}^2$, being the most used in the Peninsula of Yucatan. 35 cylinders of each strength were fabricated and tested. The dimensions of the cylinders were 15cm in diameter and 30cm in height. The axial compressive strength, modulus of elasticity, stress-strain curve and maturity were determined experimentally at the ages of 1, 3, 7, 14 and 28 days. It was verified that the materials used meet the quality requirements according to the NMX-C-111-ONNCCE standard. The design of the concrete mixtures was done according to ACI 211 with the data obtained from the tests of the materials. The compressive strength and strain-strain curve tests were performed according to the NMX-C-083-ONNCCE standard and the modulus of elasticity was determined using the NMX-C-128-ONNCCE guidelines.

From the experimental results it was observed that the compressive strength increases with respect to time, achieving at 3 days an average of 65% of the final reference value at 28 days, 83% of said value on average at 7 days and a slower increase until reaching the reference resistance at 28 days.

The modulus of elasticity increases with respect to time, achieving an average of 80% of the final value at 28 days after 3 days, and then a slower increase until the value of the 28-day reference modulus of elasticity is reached. Therefore, it was observed that the relation between the compressive strength and the modulus of elasticity did not have a constant relation, especially in the first three days. It was observed that the evolution of the compressive strength and modulus of elasticity does not depend on the f'_c .

The stress-strain curve at early ages and for any resistance can be adjusted to a quadratic function, similar to the models proposed by Hognestad (1951), Kent and Park modified (1971) and Todeschini (1964), substituting the corresponding values of maximum axial compression strength and its corresponding unit deformation value.

Finally, the maturity method underestimates the axial compressive strength of the weather-cured concretes made in the Yucatan Peninsula. Therefore, it can be used to predict the axial compressive strength at early ages of such concretes.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Objetivo general	3
1.3. Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.	4
2.2. Resistencia a Compresión del Concreto	6
2.1.1. Método de Madurez del Concreto.....	8
2.3. Módulo de elasticidad del Concreto	10
2.4. Curva esfuerzo- deformación	12
2.3.1. Modelo de Hognestad.....	13
2.3.2. Modelo de Todeschini.....	14
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	15
3.1. Descripción general.....	15
3.2. Selección de las variables de estudio	15
3.3. Determinación de las propiedades básicas de los agregados.....	17
3.3.1. Granulometría	17
3.3.2. Módulo de finura.....	18
3.3.3. Humedad.	18
3.3.4. Gravedad específica y absorción.	18
3.4. Diseño y elaboración de los especímenes de concreto.....	20
3.5. Ensaye de los especímenes.....	22
3.5.1. Pruebas en estado fresco	22
3.5.2. Pruebas en estado endurecido	23
3.6. Determinación de las propiedades elásticas y plásticas del concreto	29
3.6.1. Resistencia a compresión.....	29
3.6.2. Módulo de elasticidad	29
3.6.3. Curva esfuerzo-deformación.	30

3.6.4. Método de madurez.	30
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	32
4.1. Propiedades del agregado grueso.	32
4.2. Propiedades del agregado fino.....	32
4.3. Diseño de mezclas de concreto.	33
4.4. Propiedades del concreto en estado fresco.	34
4.5. Resistencia a compresión.	34
4.6. Módulo de Elasticidad.	35
4.7. Curva esfuerzo-deformación.	37
4.8. Madurez.	39
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	45
5.1. Resistencia a compresión	45
5.2. Módulo de Elasticidad	48
5.3. Curva esfuerzo – deformación.	52
5.4. Madurez	62
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	65
REFERENCIAS.....	67
APÉNDICE A. PRUEBAS DE LOS MATERIALES	72
A.1. Análisis granulométrico de la grava.	73
A.2. Análisis granulométrico de la arena.	74
A.3. Peso volumétrico de la grava.....	75
A.4. Peso volumétrico de la arena.....	75
A.5. Gravedad específica y absorción de la grava	75
A.6. Gravedad específica y absorción de la arena	76
APÉNDICE B. DISEÑO DE MEZCLAS	77
B.1. Mezcla $f'c=150\text{kg/cm}^2$	78
B.2. Mezcla $f'c=250\text{kg/cm}^2$	82

B.3. Mezcla $f'c=350\text{kg/cm}^2$	86
APÉNDICE C. RESISTENCIA A COMPRESIÓN	90
C.1. Resistencia a compresión - $f'c=150\text{kg/cm}^2$	91
C.2. Resistencia a compresión - $f'c=250\text{kg/cm}^2$	92
C.3. Resistencia a compresión - $f'c=350\text{kg/cm}^2$	93
C.4. Resistencia a compresión en intemperie - $f'c=150\text{kg/cm}^2$	94
C.5. Resistencia a compresión en intemperie - $f'c=250\text{kg/cm}^2$	95
C.6. Resistencia a compresión en intemperie - $f'c=350\text{kg/cm}^2$	96
APÉNDICE D. MÓDULOS DE ELASTICIDAD	97
D.1. Módulos de elasticidad - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 1 día.....	98
D.2. Módulos de Elasticidad - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 3 días.....	99
D.3. Módulos de elasticidad - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 7 días.....	100
D.4. Módulos de elasticidad - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 14 días.....	101
D.5. Módulos de elasticidad - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 28 días.....	102
D.6. Módulos de elasticidad - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 1 día.....	103
D.7. Módulos de Elasticidad - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 3 días.....	104
D.8. Módulos de elasticidad - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 7 días.....	105
D.9. Módulos de elasticidad - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 14 días.....	106
D.10. Módulos de elasticidad - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 28 días.....	107
D.11. Módulos de elasticidad - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 1 día.....	108
D.12. Módulos de Elasticidad - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 3 días.....	109
D.13. Módulos de elasticidad - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 7 días.....	110
D.14. Módulos de elasticidad - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 14 días.....	111
D.15. Módulos de elasticidad - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 28 días.....	112
APÉNDICE E. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN.....	113
E.1. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ a 1 día.....	114

E.2. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ a 3 días.....	115
E.3. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ a 7 días.....	116
E.4. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ a 14 días.....	117
E.5. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ a 28 días.....	118
E.6. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a 1 día.....	119
E.7. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a 3 días.....	120
E.8. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a 7 días.....	121
E.9. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a 14 días.....	122
E.10. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a 28 días.....	123
E.11. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ a 1 día.....	124
E.12. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ a 3 días.....	125
E.13. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ a 7 días.....	126
E.14. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ a 14 días.....	127
E.15. Curvas esfuerzo – deformación - M2 $f'c=350\text{kg/cm}^2$ a 28 días.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Avance de la Rigidización y Endurecimiento del Concreto con el Tiempo Tomada del Manual de Tecnología del Concreto. Tomo II (CFE 2002).	6
Figura 2.2: Efectos de la edad en la resistencia a compresión f_c para concretos (Nilson 1999).	7
Figura 2.3: Efectos del tipo de cemento en la ganancia de la resistencia a compresión f_c para concretos con relación agua/cemento = 0.49. (Wigth and MacGregor 2012). 7	7
Figura 2.4: Influencia de la temperatura de curado e índice de madurez (Wade et al. 2006).	8
Figura 2.5: Índice de Madurez, área bajo la curva..	9
Figura 2.6: Efecto crossover en dos mezclas de concreto a diferentes temperaturas, durante el desarrollo de la Relación Resistencia - Madurez. (National Institute of Standards and Technology).	10
Figura 2.7: Curvas esfuerzo – deformación a compresión en cilindros estándar (Paulay y Priestley 1992).	12
Figura 2.8: Curva esfuerzo-deformación del concreto a compresión (Hognestad 1951).	14
Figura 2.9: Curva esfuerzo-deformación del concreto a compresión (Todeschini 1964).	14
Figura 3.1: Granulometría de agregados.	18
Figura 3.2: Gravedad específica y absorción.	20
Figura 3.3: Peso volumétrico.	23
Figura 3.4: Marco de reacción, formado de secciones W	24
Figura 3.5: Anillos con adaptación de potenciómetros lineales.	24
Figura 3.6: Distribución del sistema de carga en el marco de reacción.	25
Figura 3.7: Adaptación de potenciómetros lineales.	26

Figura 3.8: Equipo para monitoreo de temperatura.....	27
Figura 3.9: Curva de la prueba de Módulo de Elasticidad.....	29
Figura 3.10: Ejemplo de gráfica temperatura-tiempo (madurez) vs resistencia.....	31
Figura 4.1 Curva esfuerzo-deformación elástica $f'c=150\text{kg/cm}^2$ a diversas edades..	36
Figura 4.2: Curva esfuerzo-deformación elástica $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a diversas edades.	36
Figura 4.3: Curva esfuerzo-deformación elástica $f'c=350\text{kg/cm}^2$ a diversas edades.	37
Figura 4.4: Curvas esfuerzo-deformación $f'c=150\text{kg/cm}^2$ a diversas edades.....	38
Figura 4.5: Curvas esfuerzo-deformación $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a diversas edades.....	38
Figura 4.6: Curvas esfuerzo-deformación $f'c=350\text{kg/cm}^2$ a diversas edades.....	39
Figura 4.7: Monitoreo de temperatura para la resistencia $f'c=150\text{kg/cm}^2$	40
Figura 4.8: Monitoreo de temperatura para la resistencia $f'c=250\text{kg/cm}^2$	40
Figura 4.9: Monitoreo de temperatura para la resistencia $f'c=350\text{kg/cm}^2$	41
Figura 4.10: Curva de madurez resistencia $f'c=150\text{kg/cm}^2$	43
Figura 4.11: Curva de madurez resistencia $f'c=250\text{kg/cm}^2$	43
Figura 4.12: Curva de madurez resistencia $f'c=350\text{kg/cm}^2$	44
Figura 5.1: Resistencia a compresión vs tiempo.....	46
Figura 5.2: Resistencia a compresión normalizada vs tiempo.....	46
Figura 5.3: Resistencia a compresión vs tiempo normalizado, comparaciones con la literatura.	47
Figura 5.4: Ecuación de predicción de resistencia a compresión.....	48
Figura 5.5: Comportamiento del módulo de elasticidad a edades tempranas	49
Figura 5.6: Módulo de elasticidad normalizado vs tiempo.....	50
Figura 5.7: Ecuaciones de predicción para módulo de elasticidad.....	51
Figura 5.8 Curva esfuerzo-deformación normalizada resistencia $f'c=150\text{kg/cm}^2$ a 1 día.	53

Figura 5.9 : Curvas esfuerzo-deformación normalizada a 1 día.....	53
Figura 5.10: Curva normalizada a la edad de 1 día.....	55
Figura 5.11: Curva normalizada a la edad de 3 días.....	56
Figura 5.12: Curva normalizada a la edad de 7 días.....	56
Figura 5.13: Curva normalizada a la edad de 14 días.....	57
Figura 5.14: Curva normalizada a la edad de 28 días.....	57
Figura 5.15: Esfuerzos máximos y sus correspondientes deformaciones unitarias a diversas edades.	59
Figura 5.16: Comportamiento del valor ϵ_0 a edades tempranas.....	60
Figura 5.17: Evolución de ϵ_0 normalizado	60
Figura 5.18: Ecuación de predicción para el valor de ϵ_0	61
Figura 5.19: Curva madurez $f'c=150\text{kg/cm}^2$ y resultados a intemperie	63
Figura 5.20: Curva madurez $f'c=250\text{kg/cm}^2$ y resultados a intemperie	63
Figura 5.21: Curva madurez $f'c=350\text{kg/cm}^2$ y resultados a intemperie	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Principales Aspectos del Concreto Influidos por los Agregados.....	5
Tabla 2.2: Normatividad para Calcular el Módulo de Elasticidad.	11
Tabla 3.1: Número de cilindros considerados para calcular cada propiedad.	16
Tabla 3.2: Pruebas al concreto.....	22
Tabla 4.1: Resultado de las pruebas al agregado grueso.	32
Tabla 4.2: Resultado de las pruebas al agregado fino.	32
Tabla 4.3: Proporcionamiento para la resistencia $f'c=150\text{kg/cm}^2$	33
Tabla 4.4: Proporcionamiento para la resistencia $f'c=250\text{kg/cm}^2$	33
Tabla 4.5: Proporcionamiento para la resistencia $f'c=350\text{kg/cm}^2$	33
Tabla 4.6: Propiedades del concreto en estado fresco.	34
Tabla 4.7: Resistencia a compresión axial.	34
Tabla 4.8: Módulo de elasticidad.....	35
Tabla 4.9: Resistencia a compresión axial promedio de especímenes curados en intemperie.....	41
Tabla 4.10 Tabla de índices de madurez	42
Tabla 5.1: Valores de resistencia a compresión y relación f_c/f_{c28}	45
Tabla 5.2: Valores de módulo de elasticidad y relaciones E_c/E_{c28}	49
Tabla 5.3: Comparativa de desarrollo de módulo de elasticidad y resistencia a compresión.....	50
Tabla 5.4: Valores promedio de $f_{c\text{max}}$ y ϵ_0	52
Tabla 5.5: Parámetros a y b de las ecuaciones de regresión.....	58
Tabla 5.6: Promedios de ϵ_0 y relación $\epsilon_0/\epsilon_{0,28}$	58
Tabla 5.7: Resumen de índices de madurez, resistencia a compresión y relaciones $f_{c\text{max}}/f_{c28}$	62

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad, en la industria de la construcción se consideran programas de obra cada vez más reducidos en tiempo, con lo cual los elementos estructurales diseñados de concreto reforzado son expuestos a cargas significativas a edades tempranas, esto es, antes de lograr su resistencia especificada de diseño.

Los elementos estructurales se diseñan considerando que el concreto alcanzará su máxima resistencia a compresión a 28 días, y es a esta edad que se predicen los valores de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, así como su respectiva curva esfuerzo-deformación. La subestimación o sobreestimación de estas propiedades puede conducir a un inadecuado dimensionamiento de los elementos estructurales; es decir, se sobredimensionan o se diseñan elementos más esbeltos de lo que realmente se requieren.

El comportamiento dentro del rango elástico del concreto está definido por el módulo de elasticidad, en dicho rango al aplicar una carga axial uniforme, el material puede deformarse sin que se generen deformaciones permanentes, es decir, al retirar la carga el material recupera su longitud inicial; el comportamiento plástico se presenta posterior al rango elástico, en el cual se generan deformaciones permanentes, dentro de este rango se localiza la resistencia máxima a compresión y su correspondiente deformación, así como la deformación máxima del concreto antes de la falla. Dentro de la curva esfuerzo-deformación se incluyen ambas etapas del concreto, así como las propiedades antes mencionadas.

Comúnmente durante el desarrollo y construcción de los proyectos de ingeniería se descimbran y aplican cargas significativas a los elementos estructurales a edades tempranas, los cuales aún no han logrado su resistencia de diseño, generándose deformaciones permanentes significativas e incluso accidentes laborales.

En el caso de los elementos de concreto pre-esforzados, en los primeros tres días se aplican las cargas de pre-esfuerzo que generan en muchas ocasiones, flechas mayores a las calculadas.

Por otro lado, los agregados utilizados en la Península de Yucatán para la fabricación del concreto, son de tipo calizo de alta absorción, lo cual, de acuerdo a estudios previos realizados, derivan en concretos que no pueden lograr altas resistencias y por consiguiente su módulo de elasticidad tiene valores inferiores a los establecidos por las normas vigentes, como son las NTC (2004) o el ACI-318 (2011).

Existen diversos estudios que determinan el comportamiento del concreto a edades tempranas en las cuales no ha alcanzado sus propiedades de diseño, pero no han considerado el uso de agregado grueso calizo de alta absorción como el utilizado en la Península de Yucatán.

Establecer expresiones matemáticas para determinar la resistencia a compresión axial, módulo de elasticidad y curva de esfuerzo-deformación de los concretos fabricados en la Península de Yucatán a edades tempranas, permitirá tener los parámetros necesarios para predecir el comportamiento de los elementos estructurales sujetos a cargas antes de que alcancen su resistencia de diseño.

1.2.Objetivo general

Determinar la variación de las propiedades mecánicas elásticas y plásticas del concreto con agregados calizos de alta absorción a edades tempranas.

1.3.Objetivos específicos

- Determinar curvas de evolución de resistencia a compresión axial y de módulo de elasticidad con respecto al tiempo para concretos con agregados calizos de alta absorción a edades tempranas.
- Comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los modelos de predicción y los que se establecen en las NTC (2004) Y ACI-318(2012).
- Obtener expresiones matemáticas que permitan determinar la resistencia a compresión axial, módulo de elasticidad y curva esfuerzo-deformación del concreto fabricado con agregados calizos de alta absorción, a edades tempranas.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

La industria de la construcción con concreto presiona para proveer programas de obra más cortos, contrariamente a los requerimientos óptimos de curado y del posible deterioro de la integridad estructural del concreto, con lo cual se aplican cargas a elementos estructurales inmaduros (Herrera 2010).

Las ganancias económicas derivadas de programas de construcción acelerados han creado la necesidad de desarrollar técnicas que permitan predecir la resistencia del concreto a diversas edades. Una adecuada técnica de predicción, especialmente a edades tempranas, es importante para realizar una programación para el retiro de apuntalamientos y cimbras, haciendo predicciones de confianza sobre las deflexiones, y prevenir fallas de resistencia durante la construcción debido a un inadecuado conocimiento de la resistencia del concreto a edades tempranas (Oluokun et al. 1991).

La investigación tradicional sobre el concreto en gran medida se ha enfocado en las propiedades del concreto en estado fresco, y aún más en las propiedades del concreto endurecido a 28 días. Existe una extensa literatura que cubre esos dos campos de la tecnología del concreto, pero la etapa intermedia en la cual el concreto recién colado comienza su etapa de solidificación y empieza a ganar resistencia se tiene muy poca información.

Las principales propiedades mecánicas que permiten tener un conocimiento adecuado del comportamiento del concreto bajo carga a cualquier edad son la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y su correspondiente curva esfuerzo deformación.

En la Tabla 2.1 se mencionan las características de los agregados que deben tomarse en cuenta a la hora de definir el proporcionamiento de la mezcla de concreto, ya que esta se vería afectada al perder agua absorbida por los agregados o adicionar agua que contengan estos mismos. Al ocurrir esto la relación Agua – Cemento cambiaría, afectando así el proceso de generación de calor y por ende la resistencia final del concreto (CFE 2002).

*Tabla 2.1. Principales Aspectos del Concreto Influidos por los Agregados.
Manual de Tecnología del Concreto, Sección 1 (CFE 2002).*

Características	Efectos en el Concreto	
	Fresco	Endurecido
Granulometría	Manejabilidad Requerimiento de Agua Sangrado	Resistencia Mecánica Cambios Volumétricos Economía
Limpieza (materia orgánica, limo, arcilla y otros finos indeseables)	Requerimiento de agua Contracción plástica	Durabilidad Resistencia mecánica Cambios Volumétricos
Densidad (gravedad específica)	Peso unitario	Peso unitario
Sanidad	Requerimiento de agua	Durabilidad
Absorción y porosidad	Perdida de revenimiento Contracción plástica	Durabilidad Permeabilidad
Forma de partículas	Manejabilidad Requerimiento de Agua Sangrado	Resistencia Mecánica Cambios Volumétricos Economía
Textura Superficial	Manejabilidad Requerimiento de Agua	Durabilidad Resistencia al desgaste Economía
Tamaño máximo	Segregación Peso unitario Requerimiento de agua	Resistencia Mecánica Cambios Volumétricos Peso unitario Permeabilidad Economía
Reactividad con los álcalis		Durabilidad
Módulo de elasticidad		Módulo de elasticidad Cambios volumétricos
Resistencia a la abrasión		Resistencia a la abrasión Durabilidad
Resistencia mecánica (por aplastamiento)		Resistencia mecánica
Partículas fiables y terrones de arcilla	Contracción plástica	Resistencia mecánica Durabilidad Reventones superficiales
Coefficiente de expansión térmica		Propiedades térmicas

Los agregados gruesos naturales de origen calizo de nuestra región presentan ciertas características como son: alta absorción, alta porosidad, baja densidad y gran porcentaje de partículas finas (Chan et al. 2003). Por consiguiente los concretos elaborados con este agregado natural presentan características de resistencia inferiores a las de otros concretos elaborados con otros tipos de agregado, como son los agregados de origen ígneo o metamórfico. Siendo su peso volumétrico, resistencia

a compresión, a flexión (módulo de ruptura), y módulo de elasticidad inferiores, con una alta absorción y porosidad (Solís et al. 2012).

2.2. Resistencia a Compresión del Concreto

La resistencia a compresión del concreto es la propiedad mecánica más común de desempeño que se emplea para el diseño de las estructuras. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo.

El incremento de resistencia del concreto es mayor en las primeras edades, ralentizándose el proceso con el paso del tiempo hasta que se estabiliza. Normalmente se adopta como patrón la resistencia a la edad de 28 días, habiéndose alcanzado a esa edad gran parte de su resistencia total (Valcuende et al. 2010).

La resistencia a la compresión depende principalmente de dos factores: la compactación y la relación agua/cemento, aunque en estudios previos se ha demostrado que existen otros factores como son la velocidad de aplicación de la carga o la resistencia de los agregados con los que se fabrica el concreto (Hernández 2013).

A continuación, en la Figura 2.1, se presenta la evolución de la resistencia del concreto, puede notarse que el concreto se conserva blando las primeras dos horas, y que a partir de ahí comienza a mostrar síntomas de rigidización, ganando una resistencia considerable en los primeros 3 a 7 días.

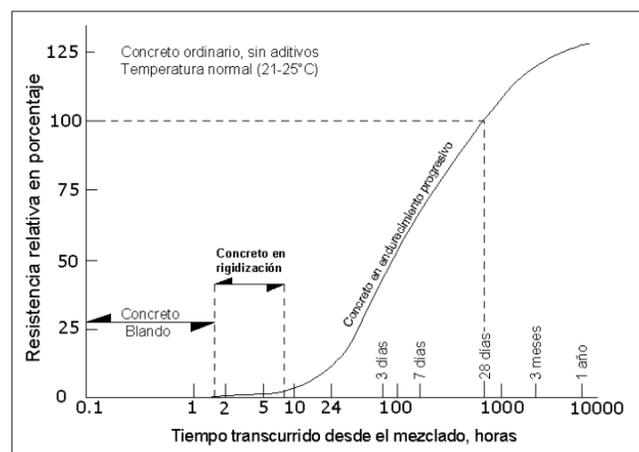


Figura 2.1: Avance de la Rigidización y Endurecimiento del Concreto con el Tiempo Tomada del Manual de Tecnología del Concreto. Tomo II (CFE 2002).

La figura 2.2 muestra una curva típica del aumento en la resistencia del concreto con la edad para concretos que utilizar cemento convencional Tipo I (normal), la curva está normalizada con respecto a la resistencia a la compresión a los 28 días (Nilson 1999).

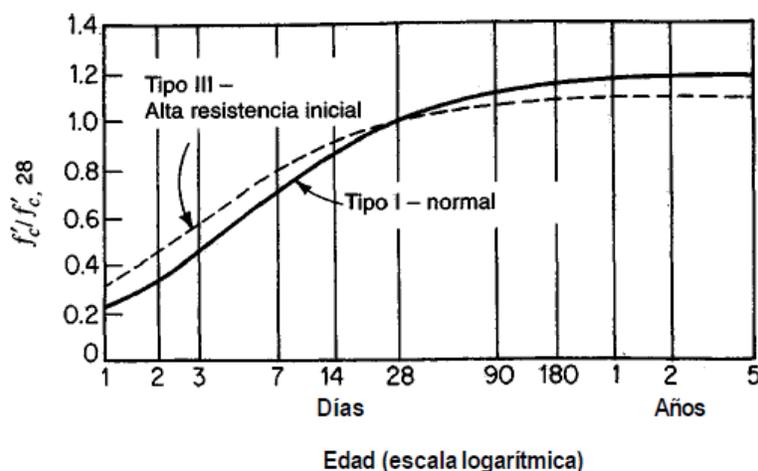


Figura 2.2: Efectos de la edad en la resistencia a compresión f_c para concretos (Nilson 1999).

El concreto gana resistencia con la edad, como se muestra en la Figura 2.3, utilizando cemento Tipo I (normal) a los 7 días logra entre el 65 y 70% de su resistencia a compresión de 28 días. (Wigth and MacGregor 2012).

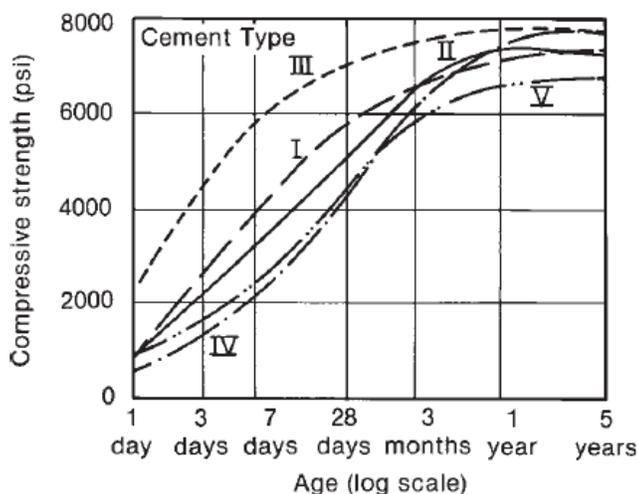


Figura 2.3: Efectos del tipo de cemento en la ganancia de la resistencia a compresión f_c para concretos con relación agua/cemento = 0.49. (Wigth and MacGregor 2012).

2.1.1. Método de Madurez del Concreto

El Método de Madurez es uno de los métodos más usados y estudiados para determinar la resistencia a compresión en las primeras edades del concreto, el cual se ha utilizado en las últimas décadas de forma exitosa, para la estimación de la resistencia in situ del concreto, basándose en su comportamiento térmico, esto se hace mediante la estimación de la edad equivalente a una temperatura específica.

Este método es usado para estimar la resistencia del concreto en sitio permitiendo el inicio de actividades de construcción críticas como son: el retiro de cimbras y apuntalamiento de elementos estructurales, la aplicación de cargas de pre-esfuerzo, permitir el tráfico en pavimentos rígidos de concreto, entre otras.

La madurez se refiere al grado y la velocidad de hidratación del cemento presente en una mezcla de concreto, la cual es una función del historial de temperatura y el tiempo en el periodo de curado (ASTM-C-1074 2011).

La función de madurez, se refiere a la expresión matemática que relaciona el historial de temperatura de una mezcla de concreto en un periodo de tiempo determinado para calcular un índice de madurez del concreto, para posteriormente utilizar este índice y relacionarlo con una resistencia a compresión equivalente (Castro et al. 2013).

La Figura 2.4 muestra cómo las funciones de madurez de una misma mezcla curada a diferentes temperaturas convergen en una sola curva característica de índice de madurez vs resistencia a compresión.

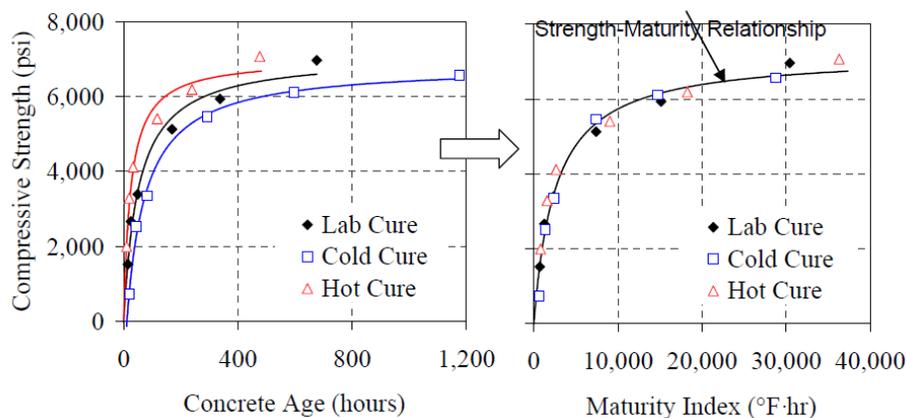


Figura 2.4: Influencia de la temperatura de curado e índice de madurez (Wade et al. 2006).

En otras palabras la madurez es el área bajo la curva de tiempo vs temperatura, por lo que dos especímenes pueden tener el mismo índice de madurez si cumplen con esta condición, independientemente de si lograron esta madurez mediante una temperatura baja durante mayor tiempo o si se logra en poco tiempo a una temperatura alta. La figura 2.5 muestra la relación antes mencionada.

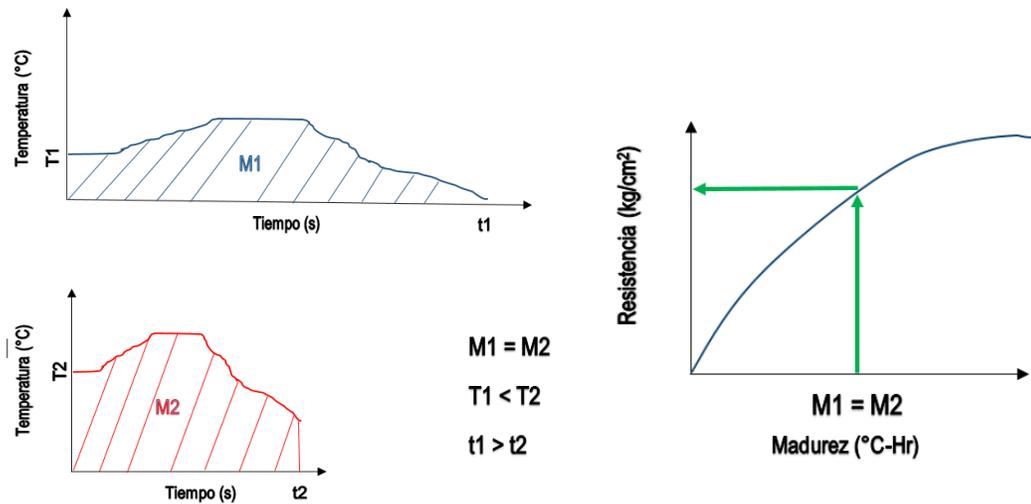


Figura 2.5: Índice de Madurez, área bajo la curva..

La temperatura de curado tiene gran influencia en la velocidad y forma en que se logra la resistencia de un concreto. En la Figura 2.6 se muestra como una mezcla que se cura a una baja temperatura inicialmente registra una menor resistencia y conforme aumenta su edad logra una mayor resistencia en comparación con una mezcla curada a una mayor temperatura en la cual inicialmente se registra una mayor resistencia y posteriormente logra una resistencia menor.

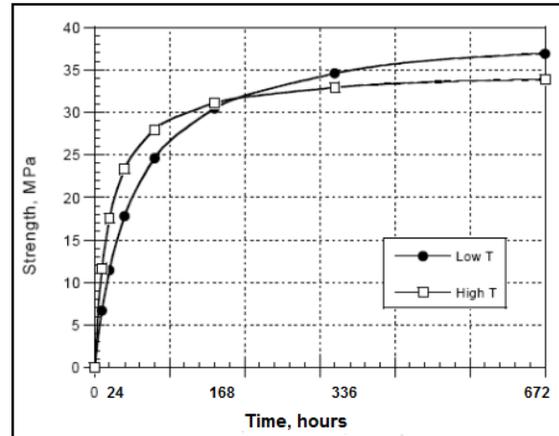


Figura 2.6: Efecto crossover en dos mezclas de concreto a diferentes temperaturas, durante el desarrollo de la Relación Resistencia - Madurez. (National Institute of Standards and Technology).

De acuerdo a un estudio realizado sobre la aplicación del método de Madurez a edades tempranas se concluyó que, especialmente durante los 2 a 3 primeros días, es necesario tomar el registro de temperaturas interiores de los especímenes y no de la temperatura exterior de curado, esto debido a que la temperatura que se genera por la hidratación del cemento es mayor y por consiguiente se tendría un índice de madurez inadecuado (Oluokun et al. 1990).

2.3. Módulo de elasticidad del Concreto

El módulo de elasticidad del concreto es utilizado para predecir las deformaciones que se presentarán en una estructura al ser sometida a cierta condición de cargas. Es entendible que imprecisiones en el valor utilizado del módulo de elasticidad del concreto aumentan la incertidumbre en la estimación de la rigidez de los distintos elementos estructurales.

La normatividad vigente plantea diversos métodos para la obtención del módulo de elasticidad, en el caso del ACI 318 propone una fórmula basada en el peso volumétrico del concreto y en función de la resistencia a compresión. En el caso de las normas mexicanas (NTC-RCDF 2011) se proponen diferentes ecuaciones que utilizan tomando en cuenta el peso volumétrico y están en función de la resistencia a

compresión del concreto pero sin tomar en cuenta el peso volumétrico dentro de la ecuación. (Tabla 2.2).

Tabla 2.2: Normatividad para Calcular el Módulo de Elasticidad.

NTC-RCDF	Clase 1 P.V. > 2200 kg/m ³ f'c ≥ 250 kg/cm ²	$E_c = 14,000\sqrt{f'_c}$ Agregado grueso calizo
		$E_c = 11,000\sqrt{f'_c}$ Agregado grueso basáltico
	Clase 2 P.V. ≤ 2200 kg/m ³ f'c < 250 kg/cm ²	$E_c = 8,000\sqrt{f'_c}$
ACI 318	P.V. de 1,500 a 2,500 kg/m ³	$E_c = W_c^{1.5} \cdot 0.14\sqrt{f'_c}$
	P.V. de 2,200 a 2,400 kg/m ³	$E_c = 15,100\sqrt{f'_c}$

Para el caso de los concretos hechos en el estado de Yucatán con agregado calizo de alta absorción, se observó que el peso volumétrico promedio es de 2,041 kg/m³ (Solís et al. 2011). Por lo que debido al tipo de agregado utilizado en la región, solo es posible obtener concretos clase 2, de acuerdo a las normas vigentes.

Las ecuaciones que se utilizan actualmente para el cálculo del Módulo de Elasticidad del Concreto, proporcionan valores altos respecto a los valores verdaderos del E_c de concretos elaborados con materiales de la región (Gómez 1980).

2.4. Curva esfuerzo- deformación

Para el concreto simple, es importante conocer su curva esfuerzo-deformación, dicha curva se obtiene de forma experimental mediante mediciones de deformaciones unitarias de ensayos en cilindros de concreto, sometidos a compresión uniaxial con una velocidad de carga moderada.

La curva esfuerzo-deformación tiene como características generales, como se muestra en la Figura 2.7, que en su rama inicial es relativamente lineal aproximadamente hasta la mitad de la resistencia máxima a compresión, después de que se supera esta primera rama, la curva tiende a hacerse horizontal hasta alcanzar su resistencia máxima.

La pendiente de la última rama de la curva es negativa debido a que después de que se alcanza la ϵ_{cmax} , el concreto no es capaz de tomar esfuerzos adicionales y por lo tanto la resistencia decrece, la curva termina donde se alcanza la deformación unitaria de aplastamiento del concreto ϵ_{cult} . También se ha observado que la deformación unitaria asociada a la resistencia máxima ϵ_{cmax} es aproximadamente igual a 0.002.

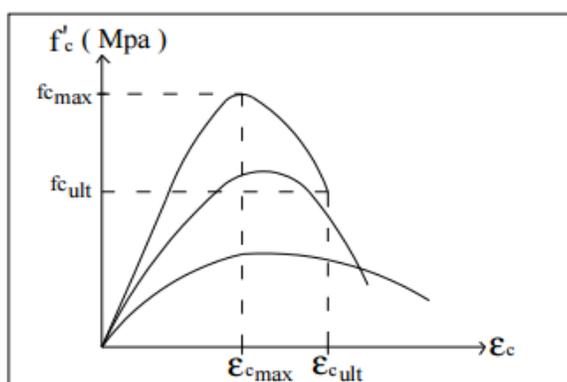


Figura 2.7: Curvas esfuerzo – deformación a compresión en cilindros estándar (Paulay y Priestley 1992).

En la actualidad, no se conoce ningún modelo matemático exacto que represente la relación esfuerzo-deformación en la zona de compresión del concreto, aunque se conocen varios modelos aproximados como son los modelos de E. Hognestad, C. Todeschini y Kent y Park modificado. (Villagrán et al 2013)

2.3.1. Modelo de Hognestad

Uno de los modelos más conocidos y aceptados es el propuesto por Hognestad, (1951). Es aplicable tanto para secciones circulares como para secciones rectangulares o cuadradas. La primera rama consiste en una parábola de segundo grado hasta alcanzar su resistencia máxima; después la curva desciende y esta rama se representa por medio de una recta con una pendiente “ \emptyset ”, como se muestra en la Figura 2.8. El modelo de Kent y Park modificado utiliza la misma ecuación para el tramo ascendente.

Comúnmente la deformación unitaria última o de aplastamiento del concreto ϵ_{cu} , tienen como valor más aceptado 0.0038. En este modelo, la ecuación (2.1) define la rama de la curva ascendente, la ecuación (2.2) define la rama de la curva descendente y la ecuación (2.3) la pendiente de la segunda rama:

Para la primera rama:

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\epsilon_0}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right]; 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_0 \quad (2.1)$$

Para la segunda rama:

$$\epsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \quad (2.2)$$

Para la pendiente de la segunda rama:

$$\emptyset \approx \frac{3f'_c}{20(\epsilon_{cu} - \epsilon_0)} \quad (2.3)$$

Donde:

E_c : Módulo de elasticidad del concreto.

f'_c : Resistencia máxima a compresión de un espécimen de concreto, ensayado en laboratorio.

ϵ_0 : Deformación unitaria asociada a la resistencia máxima del concreto, f'_c

CAPÍTULO 3.METODOLOGÍA

3.1. Descripción general

En este trabajo de investigación se determina la variación de las propiedades mecánicas elásticas y plásticas del concreto con agregados calizos de alta absorción a edades tempranas. Para este propósito se realizaron los siguientes pasos:

- 1) Selección de las variables de estudio.
- 2) Determinación de las propiedades básicas de los agregados.
- 3) Diseño y elaboración de especímenes de concreto.
- 4) Ensaye de los especímenes.
- 5) Determinación de las propiedades elásticas y plásticas del concreto.

3.2. Selección de las variables de estudio

Se seleccionaron valores de resistencias a compresión axial del concreto:

- $f'c=150\text{kg/cm}^2$ utilizada comúnmente para elementos confinantes como son castillos y cadenas.
- $f'c=250\text{kg/cm}^2$ considerada la resistencia mínima para ser considerado un concreto estructural Clase I de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción del Distrito Federal (2004).
- $f'c=350\text{kg/cm}^2$ resistencia comúnmente utilizada para la fabricación de elementos de concreto pretensados.

Las edades a las que se realizaron las pruebas fueron: 1 día, 3 días, 7 días, 14 días y 28 días. Estas edades se consideraron ya que en los primeros tres días se aplican las cargas de pre-esfuerzo en el caso de los concretos pretensados, a los 7 días comúnmente se descimbran los elementos tipo columna, a los 14 días regularmente se descimbran los elementos tipo losa y los elementos tipo viga, y finalmente la edad de 28 días es la edad de referencia de diseño de las mezclas.

Se elaboraron 5 especímenes de cada resistencia y de cada edad, tres de ellos se probaron para obtener el módulo de elasticidad, y 2 de ellos se probaron para obtener la resistencia máxima ya que es la cantidad mínima que establece la norma NMX-C-

128-ONNCCE-2013 para la determinación del Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson.

Adicionalmente se fabricaron 10 cilindros de cada resistencia para la aplicación del método de la madurez, registrándose la temperatura de 4 cilindros testigo de cada resistencia, 2 curados a intemperie y 2 curados en laboratorio. Los 6 cilindros restantes se probaron a 7, 14 y 28 días, dos cilindros en cada edad, para obtener la resistencia máxima a compresión y poder así obtener las curvas de madurez.

En la Tabla 3.1 se resume la cantidad de cilindros elaborados para determinar una propiedad asociada a un valor de resistencia a compresión axial del concreto, de acuerdo a lo antes planteado. Se elaboraron 35 cilindros para cada valor de resistencia y un total de 105 cilindros.

Tabla 3.1: Número de cilindros considerados para calcular cada propiedad.

Prueba	Cilindros curados en Laboratorio (pzas)	Cilindros curados en Intemperie (pzas)	Subtotal (pzas)	Total (pzas)
Máxima resistencia a compresión a 24 horas	2	0	2	35
Módulo de elasticidad a 24 horas	3	0	3	
Máxima resistencia a compresión a 3 días	2	0	2	
Módulo de elasticidad a 3 días	3	0	3	
Máxima resistencia a compresión a 7 días	2	2	4	
Módulo de elasticidad a 7 días	3	0	3	
Máxima resistencia a compresión a 14 días	2	2	4	
Módulo de elasticidad a 14 días	3	0	3	
Máxima resistencia a compresión a 28 días	2	2	4	
Módulo de elasticidad a 28 días	3	0	3	
Monitoreo de temperatura durante 28 días	2	2	4	

3.3. Determinación de las propiedades básicas de los agregados

En este apartado se verifica que los materiales utilizados cumplan con los requisitos de calidad que se establecen para los agregados, en la producción de concreto de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción-Agregados para concreto hidráulico-Especificaciones y métodos de prueba”.

Para realizar esto, se tomó una muestra representativa de los agregados conforme lo establece la norma NMX-C-030-ONNCCE-2004, se redujo por cuarteo conforme a la norma NMX-C-170-1997-ONNCCE, hasta dejar una muestra del tamaño requerido, tomando todas las precauciones necesarias para que la muestra resulte representativa.

3.3.1. Granulometría

La determinación de la granulometría del agregado fino y grueso se realizó de acuerdo con la norma NMX-C-077-1997-ONNCCE, “Agregados para concreto - análisis granulométrico, métodos de prueba”. Esta norma señala el método que se debe usar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos con el fin de determinar la distribución de las partículas de diferentes tamaños a través de las cribas.

La muestra de agregado se hace pasar a través de una serie de mallas, determinándose el porcentaje de material que se retiene en cada tamiz. Los resultados de análisis se reportan graficando junto a los límites que especifican los porcentajes aceptables para cada tamaño (Figura 3.1).

Las razones para especificar límites en las granulometrías y en el tamaño máximo del agregado se deben a que estas propiedades afectan las proporciones relativas de los agregados, el cemento y el agua necesarios en la elaboración de un concreto, así como la manejabilidad, la economía, la porosidad y la contracción del mismo.



Figura 3.1: Granulometría de agregados.

3.3.2. Módulo de finura.

Para obtener el módulo de finura del agregado fino es necesario calcular la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados a partir de la criba 4.75 mm (malla No.4) hasta la criba 0.150 mm (malla No. 100), dividirlo entre 100.

3.3.3. Humedad.

La humedad es la cantidad total de agua que contiene la muestra de agregado al momento de efectuar la determinación de su masa. Se obtiene mediante la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco (NMX-C-166-0NNCCE-2006).

3.3.4. Gravedad específica y absorción.

La gravedad específica es la relación entre la densidad del material y la densidad del agua. De acuerdo a la condición de humedad del agregado, la gravedad específica se determina en condición seca o saturada con superficie seca (SSD). Esta información permite hacer una relación entre el peso de los agregados y el volumen que ocupa dentro de la mezcla.

La capacidad de absorción se determina encontrando el peso de un agregado bajo condición saturada (SSD) y en condición seca. La diferencia en pesos expresada como

porcentaje del peso seco es la capacidad de absorción (Figura 3.2). Esta información se requiere para balancear las necesidades de agua en la mezcla de concreto.

La absorción es el incremento en la masa de un agregado seco cuando es sumergido en agua durante un tiempo determinado a temperatura ambiente. Este aumento de masa se da debido a que el agua es introducida en los poros del material; no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas (NMX-164-ONNCCE-2014).

Las fórmulas para calcular la gravedad específica (3.1) y la absorción de la grava (3.2) son:

$$\text{Gravedad específica de masa} = \frac{B}{B - C} \quad (3.1)$$

$$\text{Absorción} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (3.2)$$

Dónde:

A = Peso de la muestra secada al horno, (g)

B = Peso de la muestra SSD, (g)

C = Peso de la muestra sumergida en agua, (g)

Las fórmulas para calcular la gravedad específica (3.3) y la absorción de la arena (3.4) son:

$$\text{Gravedad Específica de Masa (SSD)} = \frac{\text{PESO}}{\text{PESO} + B - C} \quad (3.3)$$

$$\text{Absorción} = \frac{500 + A}{A} \times 100 \quad (3.4)$$

Dónde:

A = Peso de la muestra secada al horno, (g)

B = Peso del frasco (picnómetro) con agua, (g)

$C = \text{Peso del frasco} + \text{la muestra} + \text{el agua, hasta la marca de calibración (g)}$

$\text{PESO} = \text{Peso de agregado fino saturado usado (g)}$

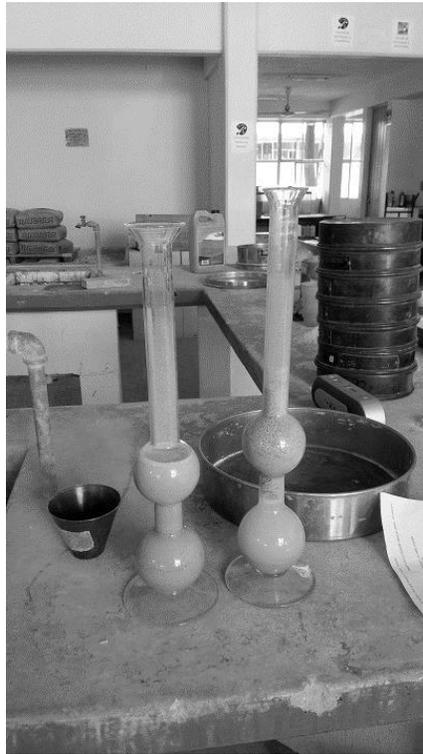


Figura 3.2: Gravedad específica y absorción.

3.4. Diseño y elaboración de los especímenes de concreto

Los materiales utilizados para la elaboración del concreto fueron:

- Agregados finos (conocido como arena) es el material que pasa por la criba 4.75 mm (malla No.4) y se retiene en la criba 0.075 mm (malla No. 200). (NMX-C-111-ONNCCE-2014, Industria de la construcción–Agregados para concreto hidráulico. Especificaciones y Métodos de Prueba).
- Agregados gruesos naturales (obtenidos de rocas calizas) de TMA 3/4” es el material retenido por la criba 4.75 mm (malla No.4) y que pasa por la criba 90 mm (malla No.3 1/2”) (NMX-C-111-ONNCCE-2014).
- Agua (Norma NMX-C-122-ONNCCE-2004 Industria de la construcción - Agua para concreto-Especificaciones)

- Cemento Portland Ordinario (NMX-C-414-ONNCCE-2014, Industria de la construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo.)

El equipo utilizado para la fabricación de los especímenes fue:

- Revolvedora a gasolina de 1 saco de capacidad.
- Moldes cilíndricos de medida estándar (15cm de diámetro y 30cm de altura).
- Pileta de curado para almacenamiento de especímenes de prueba en laboratorio

El diseño de las mezclas de concreto se realizó de acuerdo al ACI 211 con los datos obtenidos en las pruebas de los materiales. El diseño de la mezcla de concreto es importante para realizar una mezcla práctica y económica de los materiales con los que se dispone y para que el concreto que se produzca satisfaga los requisitos de comportamiento durante su uso.

Las muestras obtenidas se descimbraron 24 horas después de su elaboración. Posteriormente los especímenes fueron curados manteniéndolos con agua libre en su superficie durante todo el tiempo, mediante inmersión en agua saturada con cal, siguiendo la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016.

Previo a las pruebas de los especímenes, es necesario el cabeceo mediante mortero de azufre o por medio de placas de neopreno, para que las bases de los especímenes cilíndricos logren el paralelismo entre las caras para su prueba (NMX-C-109-2013 ONNCCE), en el caso de esta investigación se realizó el cabeceo por medio de placas y cabezales de neopreno.

3.5. Ensaye de los especímenes

Las pruebas que se realizaron al concreto se pueden clasificar de acuerdo al estado en que éste se encuentre, en la Tabla 3.2 se enlistan las pruebas consideradas:

Tabla 3.2: Pruebas al concreto.

Estado fresco	Estado endurecido
Revenimiento	Resistencia a compresión
Peso volumétrico	Módulo de Elasticidad
	Curva esfuerzo-deformación

3.5.1. Pruebas en estado fresco

3.5.1.1 Revenimiento.

Al concreto en estado fresco, antes de su colocación en las cimbras, se le deben hacer pruebas para verificar que cumple con los requisitos de revenimiento. La prueba de revenimiento se hace de acuerdo con la NMX-C-156-ONNCCE-2010.

3.5.1.2 Peso volumétrico.

El peso volumétrico es la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen el ocupado por el material en un recipiente especificado (NMX-C-073-0NNCCE-2004). Físicamente, es el volumen ocupado por el agregado y los vacíos entre sus partículas. Los métodos para determinar los pesos volumétricos describen la forma en que será llenado el recipiente (Figura 3.3). Los resultados varían de acuerdo al grado de compactación alcanzada. En el diseño de mezclas de concreto se utilizan los datos del peso volumétrico suelto y compacto del agregado grueso. Calculándose los pesos respectivos con las siguientes relaciones (3.5 y 3.6):

$$P.V.S. = F.Cal. \times \text{peso del material (suelto) kg/m}^3 \quad (3.5)$$

$$P.V.C.=F.Cal. \times \text{peso del material (varillado) kg/m}^3 \quad (3.6)$$

Donde:

F.Cal. = factor de calibración del recipiente utilizado

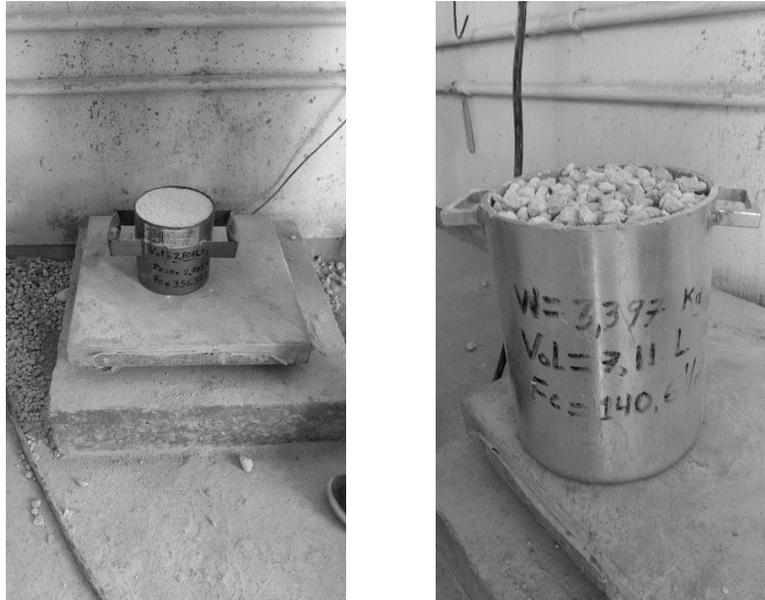


Figura 3.3: Peso volumétrico.

El concreto debe tener un peso volumétrico entre 1,900 y 2,400 kg/cm² de acuerdo a la norma NMX-C-162-ONNCCE-2014.

3.5.2. Pruebas en estado endurecido

Para las pruebas en estado endurecido se utilizó el siguiente equipo:

- Marco de reacción formado de secciones W metálicas, existente en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (Figura 3.4).
- Equipo hidráulico para la aplicación de carga, consistente en bomba hidráulica y gato hidráulico RR7513 con capacidad de 75 toneladas.

- Anillos para medición de Módulo de Elasticidad a los cuales se les realizó una adecuación con 3 potenciómetros lineales para la medición de las deformaciones (Figura 3.5).
- Sistema de adquisición de datos digital de marca National Instruments propiedad de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, el cual registró las lecturas de 3 potenciómetros lineales, 1 celda de carga y 1 transductor de presión en cada ensaye.

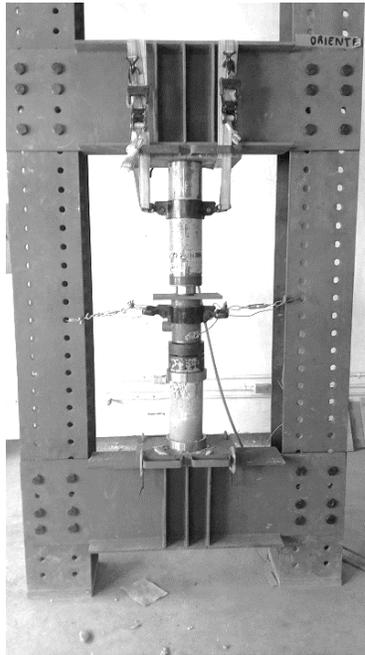


Figura 3.4: Marco de reacción, formado de secciones W .

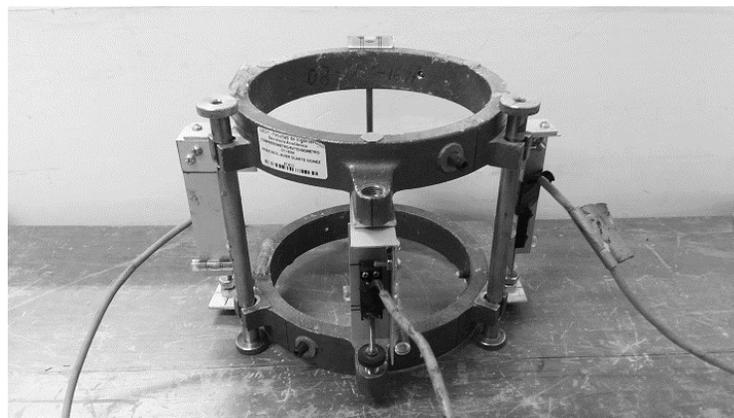


Figura 3.5: Anillos con adaptación de potenciómetros lineales.

3.5.1.1 Prueba de resistencia a compresión.

Se deben de ensayar al menos dos especímenes para obtener un promedio de la resistencia a compresión. En cada prueba limpiaron las superficies de las cabezas de los especímenes de prueba, se colocaron cada uno de estos últimos sobre los cabezales de neopreno y se alineó su eje cuidadosamente con el centro de la placa colocada sobre el marco de reacción previamente nivelada.

La distribución del sistema de carga se realizó como se muestra en la Figura 3.6, siguiendo las velocidades y lineamientos establecidos por la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014.

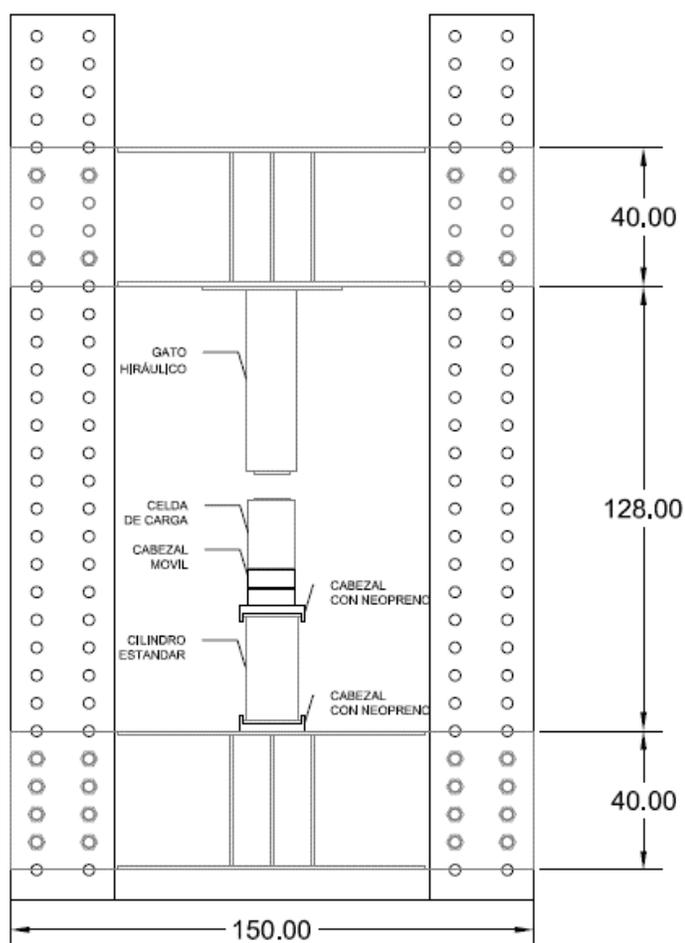


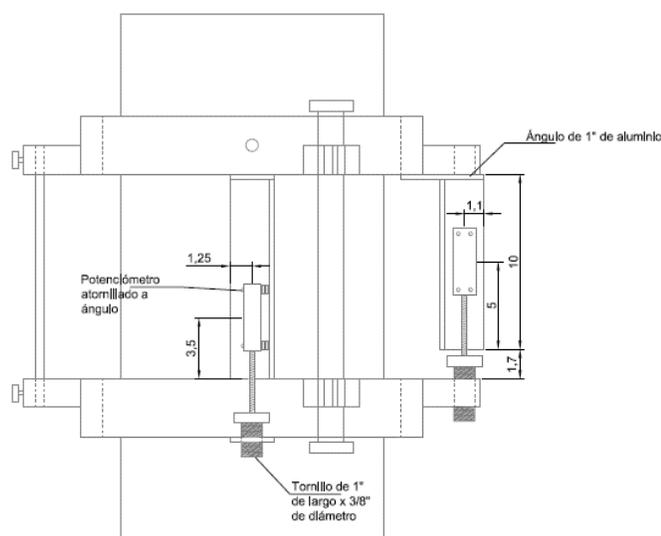
Figura 3.6: Distribución del sistema de carga en el marco de reacción.

3.5.1.2 Prueba de módulo de elasticidad.

Para determinar el módulo de elasticidad se siguió la norma NMX-C-128-ONNCCE-2013, la cual establece que se debe disponer como mínimo de 5 especímenes, especificando que dos de ellos se ensayarán a compresión (NMX-C-083-ONNCCE-2014), con el objeto de conocer el esfuerzo máximo del concreto; y en los tres restantes se determinará el módulo de elasticidad estático.

El proceso de la prueba para la obtención del módulo de elasticidad fue el siguiente:

1. Se colocó el espécimen en una superficie horizontal plana y firme, donde se le instalaron los anillos con los potenciómetros lineales adaptados al centro de la longitud del espécimen, y de igual manera se alineó la celda de carga.
2. Se verificó que los potenciómetros quedaran verticales, paralelos al eje longitudinal del espécimen.
3. Se tomaron lecturas de deformación de 3 potenciómetros lineales, uno de ellos supliendo al micrómetro que originalmente traen de fábrica los anillos el cual registra el doble de la deformación real del espécimen y dos más colocados a la derecha y a la izquierda del espécimen, los cuales registraron la deformación real al centro. Como se muestra en la Figura 3.7:



VISTA LATERAL

Figura 3.7: Adaptación de potenciómetros lineales.

4. Se aplicó una primera precarga al 15% del promedio de la resistencia de ruptura. Durante esta precarga se verificó el correcto funcionamiento de los potenciómetros, verificando que el potenciómetro frontal registrara el doble de los potenciómetros derecho e izquierdo y que los potenciómetros registraran deformaciones lo más iguales posible; de igual manera se verificó que la celda de carga funcionará correctamente comparándola con la lectura del transductor de presión.
5. Posteriormente, se aplicó la carga de ensaye, aplicando las primeras 5 toneladas en 60seg y posteriormente 15 toneladas cada 20 segundos, de acuerdo a la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014.
6. Una vez obtenida la carga que representa el 60% de la máxima obtenida en el ensaye a compresión, se redujo la velocidad de aplicación de la carga para evitar el daño de los anillos, hasta llegar a la falla.

3.5.1.3 Método de madurez.

El equipo utilizado para el monitoreo de la temperatura fue:

- 2 equipos para monitoreo de la temperatura, con capacidad de 4 sensores cada uno (Figura 3.8).

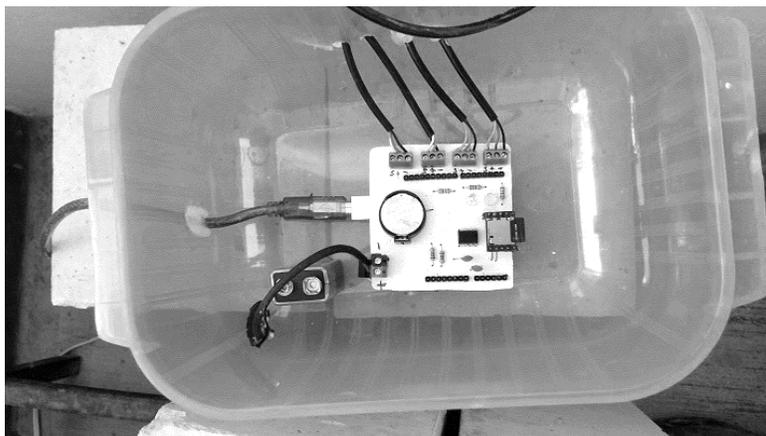


Figura 3.8: Equipo para monitoreo de temperatura.

Para la aplicación del método de madurez de acuerdo a la norma NMX-C-219-ONNCCE-2005, Industria de la Construcción - Concreto - Resistencia a la Compresión A Edades Tempranas y Predicción de la Misma A Edades Posteriores - Método de Prueba, se fabricaron 10 cilindros de concreto de cada resistencia, como se mencionó anteriormente.

Se tomó el registro de temperatura al centro del espécimen, de 4 cilindros de cada resistencia, de los cuales dos fueron curados en laboratorio y dos fueron curados a la intemperie.

Los equipos para el registro de la temperatura toman lecturas de los 4 sensores cada hora, registrando la fecha, hora y temperatura con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Para la obtención de las curvas de madurez se siguieron los lineamientos de acuerdo a la norma NMX-C-219-2005:

- Se moldearon y curaron los especímenes de acuerdo con la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016.
- Se mantuvo un registro exacto de la temperatura de los especímenes durante el curado.
- Se retiraron los especímenes de los moldes a las 24 horas.
- Se cabecearon y ensayaron los especímenes a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días de acuerdo a las normas NMX-C-109-ONNCCE-2013 y NMX-C-083-ONNCCE-2014 respectivamente.
- Se obtuvo la madurez de los especímenes la cual es el área bajo la curva de tiempo vs temperatura.
- Se construyó la curva de madurez con los datos de madurez y resistencia como se muestra en la Figura 3.10.

Se pueden utilizar datos de campo siempre y cuando se proporcione toda la información antes mencionada y se cumpla que los especímenes se curen como se indica en la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016.

3.6. Determinación de las propiedades elásticas y plásticas del concreto

3.6.1. Resistencia a compresión

Para la obtención de la resistencia a compresión, se toman y registran 3 medidas del diámetro del espécimen tanto en la parte superior e inferior para obtener un promedio y se registra la máxima carga resistida en kilogramos.

La resistencia a compresión se obtiene con la siguiente fórmula (3.7):

$$f_c = \frac{\text{máxima carga (kg)}}{\text{área de la sección transversal promedio (cm)}} \quad (3.7)$$

3.6.2. Módulo de elasticidad

Para la determinación del módulo de elasticidad se utilizó la ecuación (3.8) de acuerdo a la Figura 3.9:

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (3.8)$$

En donde:

σ_1 es el esfuerzo correspondiente a la 50 millonésima de deformación unitaria.

σ_2 es el esfuerzo correspondiente al 40% de la máxima resistencia.

ε_2 es la deformación que ocurre en ese punto.

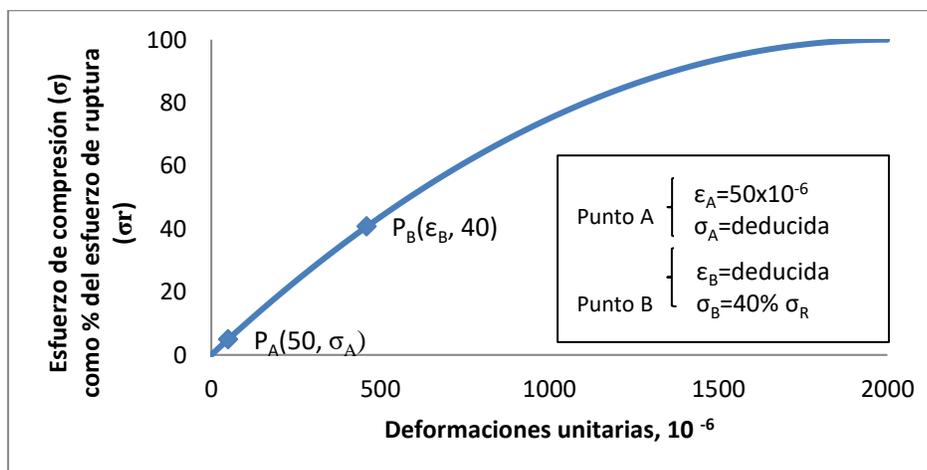


Figura 3.9: Curva de la prueba de Módulo de Elasticidad.

3.6.3. Curva esfuerzo-deformación.

Como se mencionó anteriormente los cilindros se probaron a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días, siguiendo lo indicado por la prueba de carga uniaxial, alcanzado la resistencia a la compresión, hasta la falla, siguiendo los lineamientos de la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014.

Se midieron en cada ensaye la carga aplicada y las deformaciones de los 3 potenciómetros lineales, por lo cual en cada ensaye se obtienen 3 curvas de esfuerzo-deformación, una obtenida por la deformación registrada por el potenciómetro lineal frontal, y dos de los potenciómetros de cada lado del espécimen.

De las 3 curvas anteriormente mencionadas se obtiene una cuarta curva obtenida de los promedios de cada deformación registrada.

3.6.4. Método de madurez.

La ASTM-C-1074-11 recomienda que la temperatura de referencia sea determinada experimentalmente o sea tomada como 0 °C para cementos Tipo I, cuya temperatura de curado este entre 0 °C y 40 °C, y es en esta norma donde se describe el procedimiento para relacionar el índice de madurez con la resistencia a la compresión.

Con base en los datos tomados se evalúa el índice madurez. Se construye una gráfica de resistencia vs el índice de madurez. Obteniendo el índice de madurez por medio de la ecuación (3.9):

$$M = \int_0^t (T_1 - T) dt \quad (3.9)$$

Donde:

M.- es el índice de madurez

T₁.- Es la temperatura en el tiempo t

T.- Es la temperatura de referencia en la cual se considera que el fraguado es poco probable.

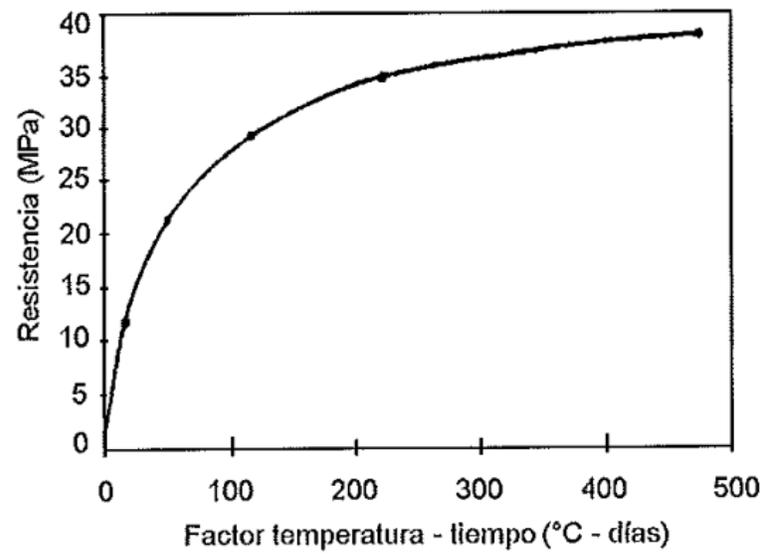


Figura 3.10: Ejemplo de gráfica temperatura-tiempo (madurez) vs resistencia.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas a los agregados, los diseños de mezclas de los concretos elaborados, sus propiedades en estado fresco, los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y las curvas esfuerzo-deformación.

4.1. Propiedades del agregado grueso.

Se presentan en la Tabla 4.1 los resultados de la caracterización del agregado grueso empleado en las mezclas, los cuales se detallan en el Apéndice A.

En la región, nuestro agregado natural presenta malas características con respecto a otras regiones, como son: la alta absorción, alta porosidad y bajo peso volumétrico. El promedio de la absorción en Yucatán es de 6.43% (Solís y Moreno, 2011).

Tabla 4.1: Resultado de las pruebas al agregado grueso.

G. E. Grava	2.3
Absorción Grava	6.60%
P.V.S.S. Grava	1,123 kg/m ³
P.V.S.C. Grava	1,253 kg/m ³

4.2. Propiedades del agregado fino.

Se presentan en la Tabla 4.2 los resultados de la caracterización del agregado fino empleado, los cuales se detallan en el Apéndice A

Tabla 4.2: Resultado de las pruebas al agregado fino.

P.V.S.S.	1,344 kg/m ³
Densidad Relativa	2.44
Absorción	4.30%
Módulo de finura (%)	2.9

4.3. Diseño de mezclas de concreto.

En las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5 se presenta el proporcionamiento de cada uno de los materiales para el diseño de cada resistencia. En el Apéndice B se presenta a detalle la obtención de estos valores.

Tabla 4.3: Proporcionamiento para la resistencia $f'c=150\text{kg/cm}^2$.

$f'c=150\text{kg/cm}^2$	
Material	Masa (kg/m^3)
Agua	285
Cemento	267
Grava Húmeda	772
Arena Húmeda	865

Tabla 4.4: Proporcionamiento para la resistencia $f'c=250\text{kg/cm}^2$.

$f'c=250\text{kg/cm}^2$	
Material	Masa (kg/m^3)
Agua	283
Cemento	346
Grava Húmeda	772
Arena Húmeda	804

Tabla 4.5: Proporcionamiento para la resistencia $f'c=350\text{kg/cm}^2$.

$f'c=350\text{kg/cm}^2$	
Material	Masa (kg/m^3)
Agua	280
Cemento	442
Grava Húmeda	772
Arena Húmeda	730

4.4. Propiedades del concreto en estado fresco.

En la tabla 4.6 se presentan los resultados de las pruebas del concreto en estado fresco. El peso volumétrico en las resistencias $f'c=250\text{kg/cm}^2$ y $f'c=350\text{kg/cm}^2$ fue inferior al límite establecido de 2200 kg/m^3 en las normas NTC-RCDF para el concreto de clase 1 y de resistencia mayor a 250 kg/cm^2 . Estos datos concuerdan con pruebas anteriores, donde se establece que el peso volumétrico promedio en el estado de Yucatán es de 2041 kg/m^3 para concreto con agregado calizo de alta absorción (Solís y Moreno, 2011).

Tabla 4.6: Propiedades del concreto en estado fresco.

Pruebas	$f'c=150\text{kg/cm}^2$	$f'c=250\text{kg/cm}^2$	$f'c=350\text{kg/cm}^2$
Peso Volumétrico (kg/m^3)	2,122	2,117	2,125
Revenimiento (cm)	9.5	3.5	4.5

4.5. Resistencia a compresión.

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados de las pruebas a compresión: edad, resistencia a compresión axial promedio, desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (C.V.). Estos resultados se detallan en el Apéndice C.

Tabla 4.7: Resistencia a compresión axial.

	Edad	Resistencia (kg/cm^2)	σ	C.V.
$f'c=150\text{kg/cm}^2$	1 día	66	3.48	5%
	3 días	108	4.42	4%
	7 días	122	8.46	7%
	14 días	130	3.43	3%
	28 días	143	4.95	3%
$f'c=250\text{kg/cm}^2$	1 día	81	6.59	8%
	3 días	130	10.34	8%
	7 días	191	14.01	7%
	14 días	210	16.18	8%
	28 días	235	8.36	4%
$f'c=350\text{kg/cm}^2$	1 día	128	3.76	3%
	3 días	201	8.80	4%
	7 días	257	22.82	9%
	14 días	293	9.08	3%
	28 días	312	5.68	2%

4.6. Módulo de Elasticidad.

En la Tabla 4.8 se presentan los resultados de las pruebas de módulo de elasticidad: edad, módulo de elasticidad promedio (E_c), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (C.V.). Como se mencionó anteriormente se tomó el valor promedio de las 3 lecturas de deformación de los potenciómetros lineales. Estos resultados se detallan en el Apéndice D.

Tabla 4.8: Módulo de elasticidad.

Edad	$f'c=150\text{kg/cm}^2$			$f'c=250\text{kg/cm}^2$			$f'c=350\text{kg/cm}^2$		
	E_c	σ	C.V.	E_c	σ	C.V.	E_c	σ	C.V.
1	131,268	22,796.71	17%	140,008	14,114.08	10%	153,203	11,883.41	8%
3	152,991	13,299.72	9%	170,324	18,123.31	11%	197,385	22,385.97	11%
7	166,176	29,203.45	18%	180,269	20,709.92	11%	204,266	17,109.74	8%
14	173,695	19,368.95	11%	189,053	18,378.30	10%	210,922	22,896.28	11%
28	186,984	17,977.30	10%	211,039	20,868.17	10%	252,068	28,715.02	11%

En las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se presenta la curva esfuerzo-deformación del concreto sujeto a compresión axial. En las Figuras se grafica hasta el 40% de la resistencia obtenida. Se puede observar cómo el módulo de elasticidad aumenta conforme tiene mayor edad. Adicionalmente, al comparar las figuras se observa que al incrementar la resistencia a compresión axial del concreto, incrementa el módulo de elasticidad.

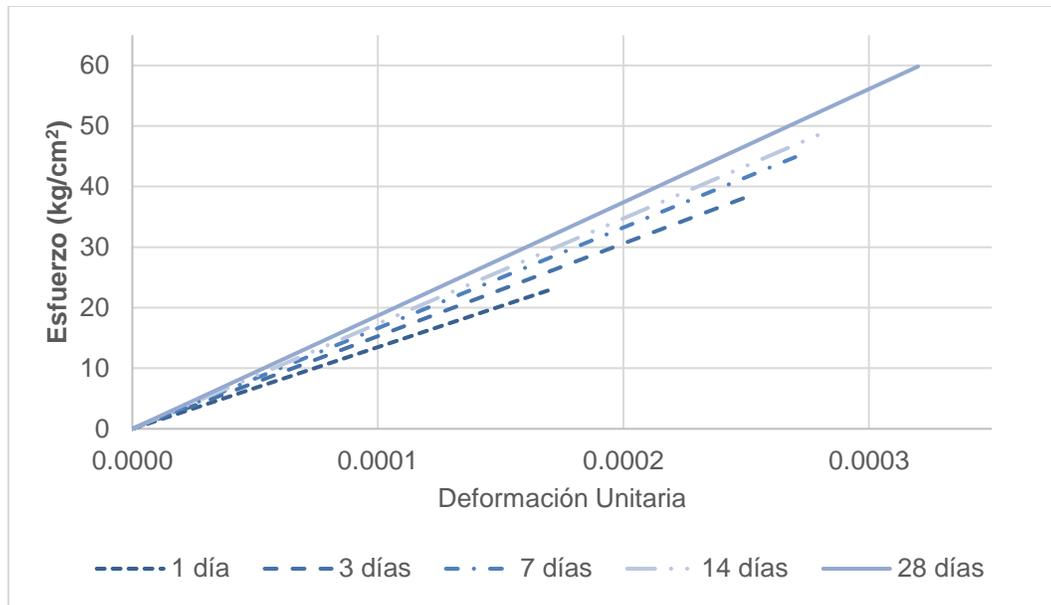


Figura 4.1 Curva esfuerzo-deformación elástica $f'c=150\text{kg/cm}^2$ a diversas edades.

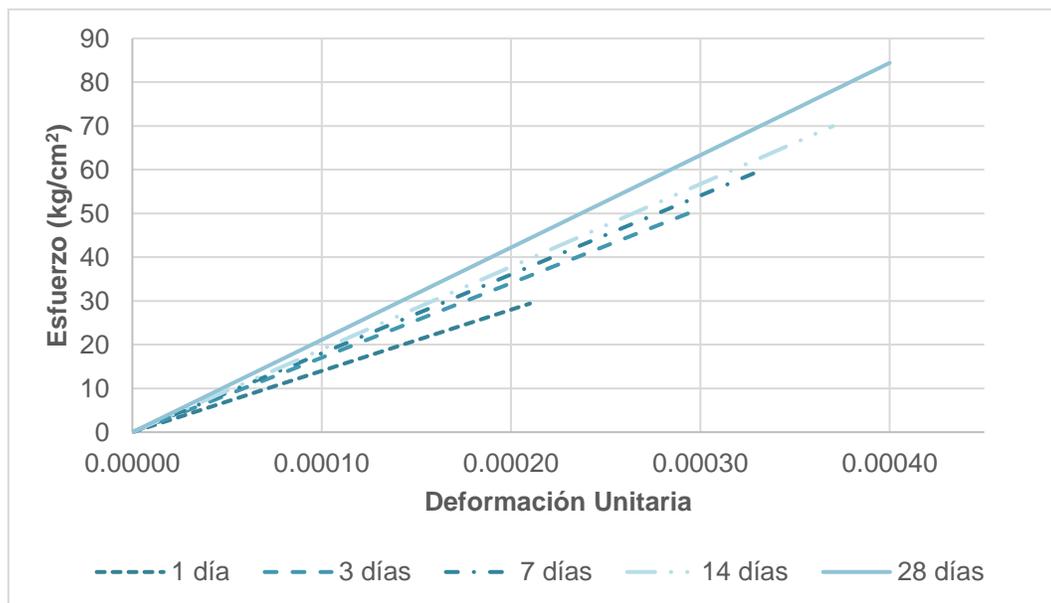


Figura 4.2: Curva esfuerzo-deformación elástica $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a diversas edades.

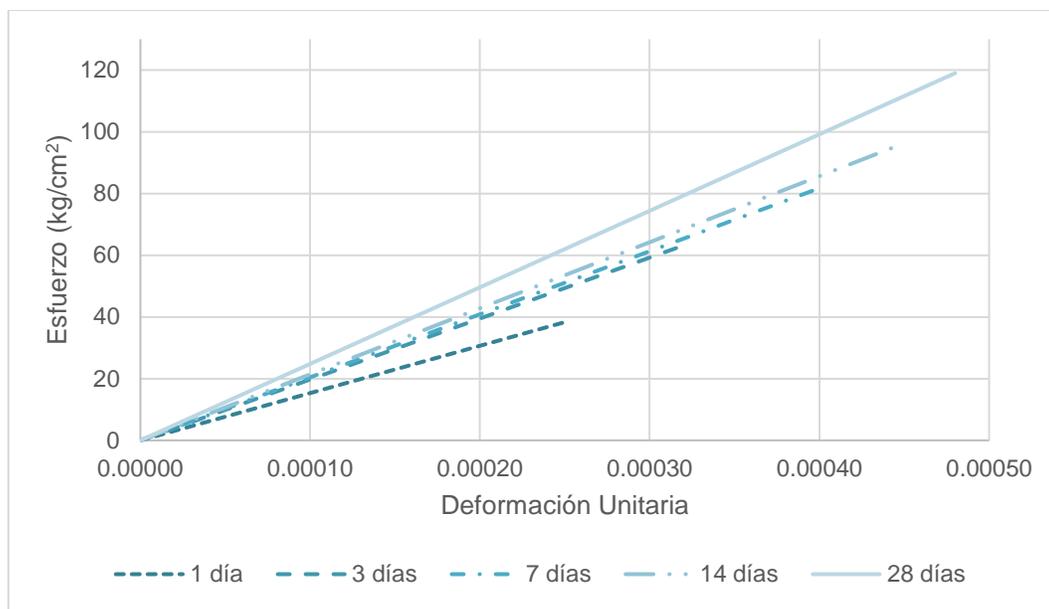


Figura 4.3: Curva esfuerzo-deformación elástica $f'c=350\text{kg/cm}^2$ a diversas edades.

4.7. Curva esfuerzo-deformación.

En las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 se presentan las curvas esfuerzo-deformación completas para cada edad. En el Apéndice E se detallan todas las curvas obtenidas en cada ensaye.

En las gráficas se observa el comportamiento lineal en el intervalo elástico y la reducción de la rigidez en el intervalo plástico, alcanzando el esfuerzo máximo y posteriormente la deformación última.

Se observa que conforme la edad del concreto incrementa, la resistencia a compresión axial aumenta. La deformación al momento de la falla se incrementa conforme aumenta la resistencia y la edad del concreto. Debido a que el equipo de carga no cuenta con servocontrol, no se pudo aplicar carga con control de desplazamientos y determinar las deformaciones y esfuerzos en la parte descendente de las curvas, después de la carga máxima.

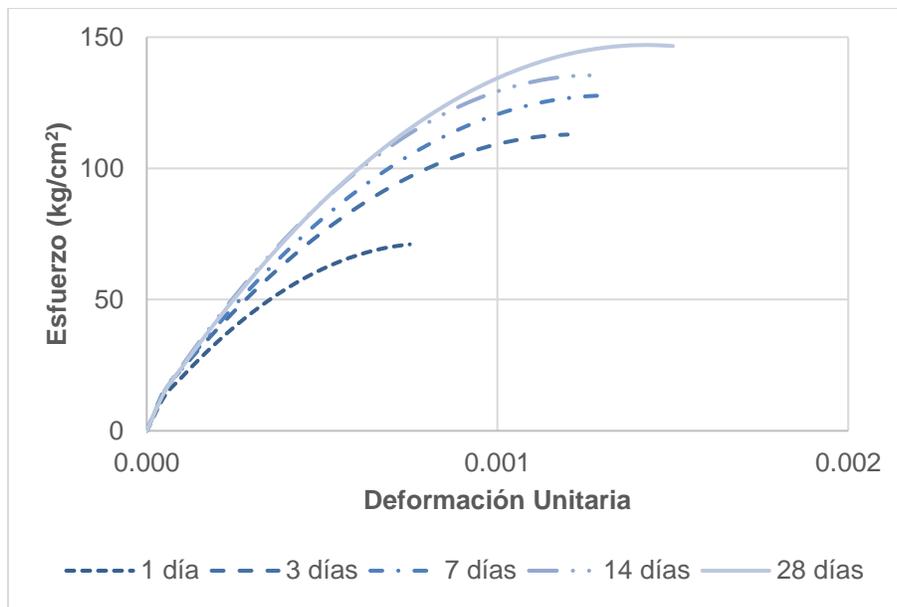


Figura 4.4: Curvas esfuerzo-deformación $f'c=150\text{kg/cm}^2$ a diversas edades.

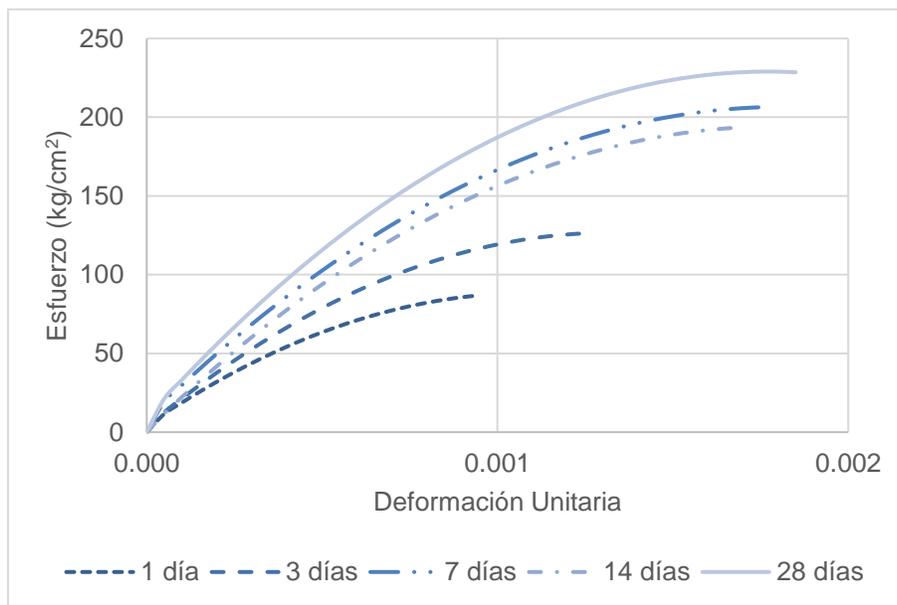


Figura 4.5: Curvas esfuerzo-deformación $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a diversas edades.

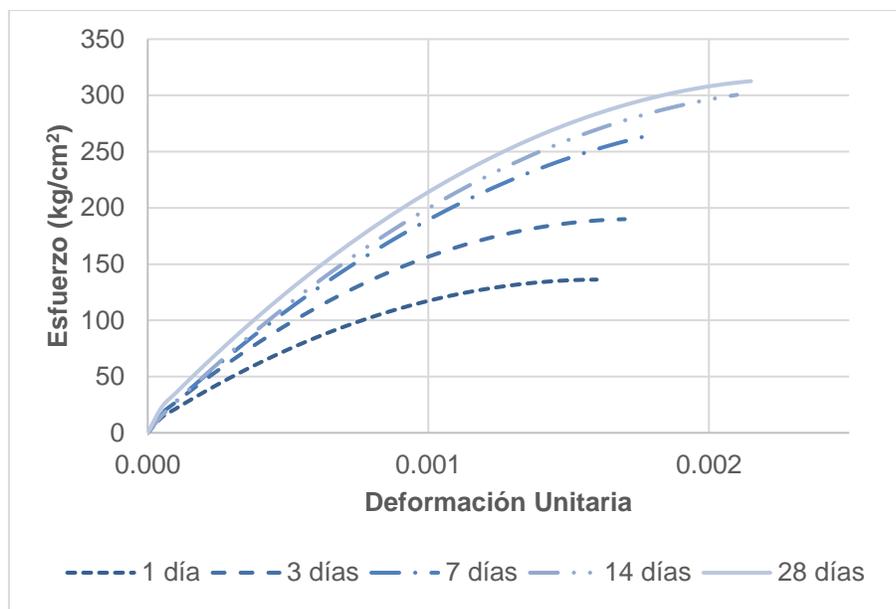


Figura 4.6: Curvas esfuerzo-deformación $f'_c=350\text{kg/cm}^2$ a diversas edades.

4.8. Madurez.

En las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se presentan las curvas de monitoreo de temperatura durante los 28 días.

Es apreciable cómo en las primeras horas de fraguado se presentan los mayores registros de temperatura debido a la reacción química que se genera al hidratarse el cemento. También se observa que las temperaturas de los cilindros curados en laboratorio son más bajas y con valores más constantes en comparación con las temperaturas registradas en los cilindros que fueron curados en intemperie.

La diferencia en la variación de la temperatura entre la resistencia $f'_c=150\text{kg/cm}^2$ y las resistencias $f'_c=250\text{kg/cm}^2$ y $f'_c=350\text{kg/cm}^2$, es debido a que la primera se realizó en el mes de marzo de 2017, y las otras dos resistencias se elaboraron en el mes de noviembre de 2016.

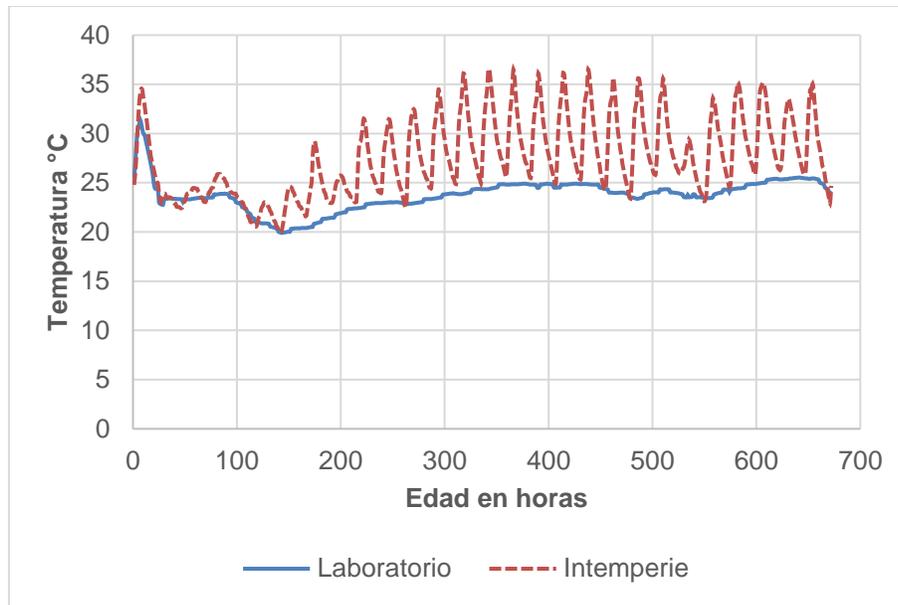


Figura 4.7: Monitoreo de temperatura para la resistencia $f'c=150\text{kg/cm}^2$.

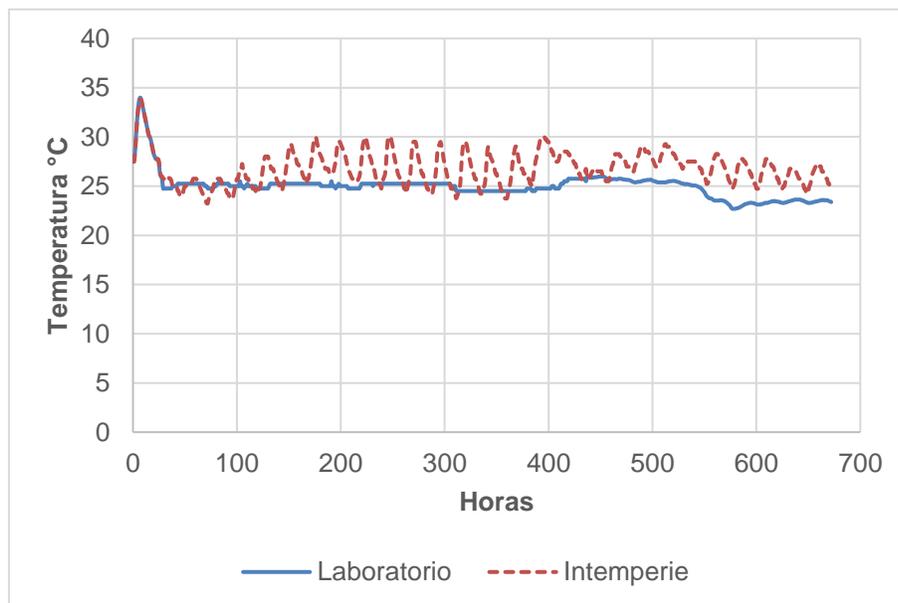


Figura 4.8: Monitoreo de temperatura para la resistencia $f'c=250\text{kg/cm}^2$.

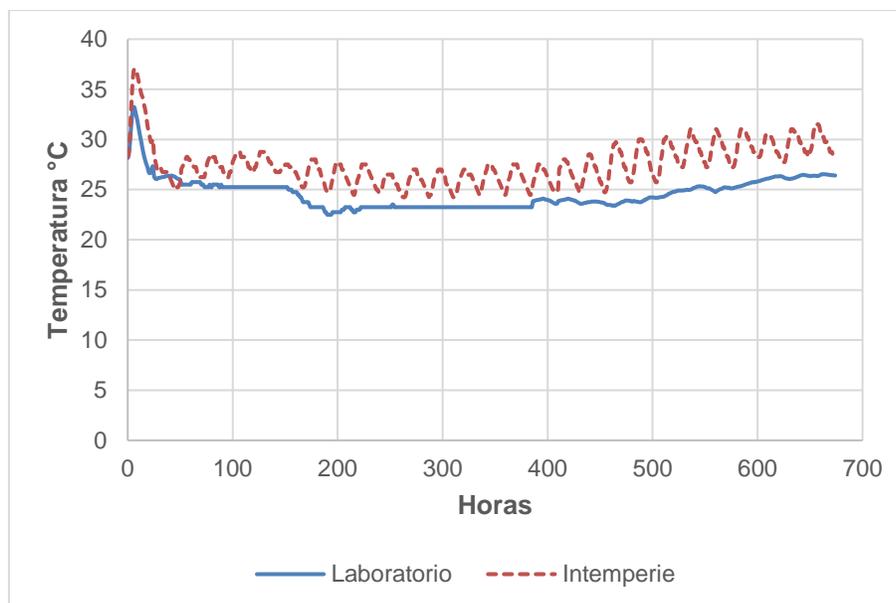


Figura 4.9: Monitoreo de temperatura para la resistencia $f'c=350\text{kg/cm}^2$.

En la Tabla 4.9 se presentan los resultados de las pruebas de resistencia a compresión axial de los especímenes curados en intemperie: edad, resistencia a compresión axial promedio, desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (C.V.). Estos resultados se detallan en el Apéndice C.

Los resultados de resistencia a compresión axial de cilindros curados en laboratorio no son presentados en la tabla, debido a que ya fueron presentados en la Tabla 4.7

Tabla 4.9: Resistencia a compresión axial promedio de especímenes curados en intemperie.

Resistencia	Edad	Resistencia (kg/cm ²)	σ	C.V.
$f'c=150\text{kg/cm}^2$	7 días	137	0.51	0%
	14 días	170	0.63	0%
	28 días	177	9.77	6%
$f'c=250\text{kg/cm}^2$	7 días	191	2.59	1%
	14 días	236	9.00	4%
	28 días	241	4.41	2%
$f'c=350\text{kg/cm}^2$	7 días	282	6.60	2%
	14 días	315	20.35	6%
	28 días	324	5.58	2%

Con la información anteriormente mostrada y siguiendo lo establecido con la norma NMX-C-219-ONNCCE-2005, se obtienen los valores correspondientes de madurez a cada edad que se muestran en la tabla 4.10, y posteriormente en las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 se plasman las curvas de madurez de cada mezcla así como los valores obtenidos de resistencia a compresión de los cilindros curados en intemperie.

Tabla 4.10 Tabla de índices de madurez

Laboratorio						
Resistencia	f'c=150kg/cm ²		f'c=250kg/cm ²		f'c=350kg/cm ²	
Edad (días)	Madurez (°C-hr)	fc (kg/cm ²)	Madurez (°C-hr)	fc (kg/cm ²)	Madurez (°C-hr)	fc (kg/cm ²)
0	0	0	0	0	0	0
1	657	66	732	81	732	128
3	1,777	108	1,941	130	1,941	201
7	3,860	122	4,350	191	4,350	257
14	7,693	130	8,558	210	8,558	293
28	15,931	143	16,803	235	16,803	312
Intemperie						
Resistencia	f'c=150kg/cm ²		f'c=250kg/cm ²		f'c=350kg/cm ²	
Edad (días)	Madurez (°C-hr)	fc (kg/cm ²)	Madurez (°C-hr)	fc (kg/cm ²)	Madurez (°C-hr)	fc (kg/cm ²)
7	4,022	137	4,424	191	4,424	282
14	8,602	170	8,947	236	8,947	315
28	18,520	177	17,984	241	17,984	324

Se observa como los especímenes curados en intemperie al haber permanecido en temperaturas mayores que las de laboratorio tienen un mayor índice de madurez y por consiguiente una resistencia a la compresión superior para una misma edad.

A pesar de que la resistencia estructural se ve beneficiada al no realizar el curado y considerando que su núcleo conservará la humedad necesaria, lo anterior no debería disminuir la importancia del curado, ya que la zona externa del elemento es precisamente la que está sometida a la intemperie durante su vida útil, y se verá afectada por fenómenos tales como: permeabilidad, carbonatación y abrasión; por lo

que la calidad del concreto en esa zona es de primordial importancia desde el punto de vista de la durabilidad, por problemas asociados a la corrosión del acero y al desgaste superficial por la aplicación de cargas friccionantes (Moreno, 2000)

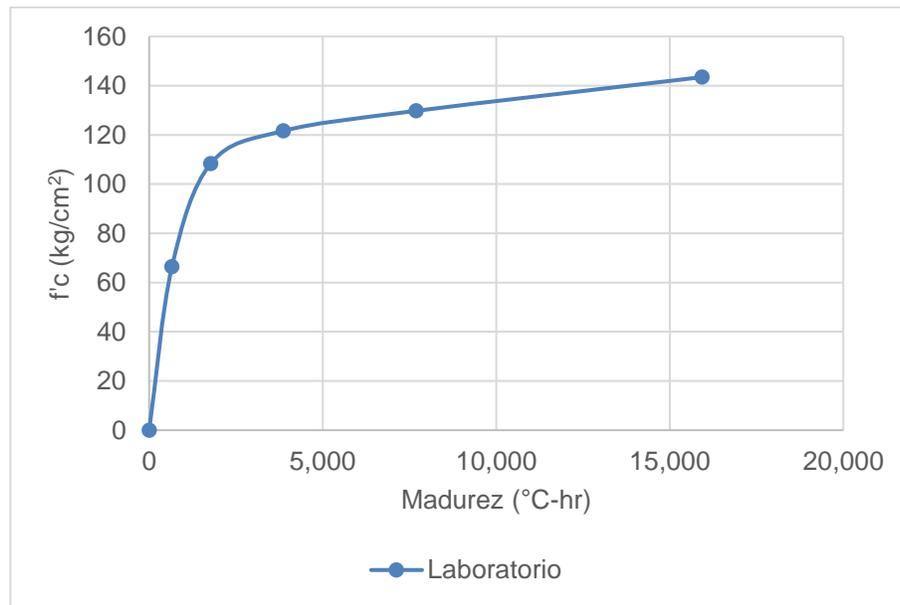


Figura 4.10: Curva de madurez resistencia $f'c=150\text{kg/cm}^2$

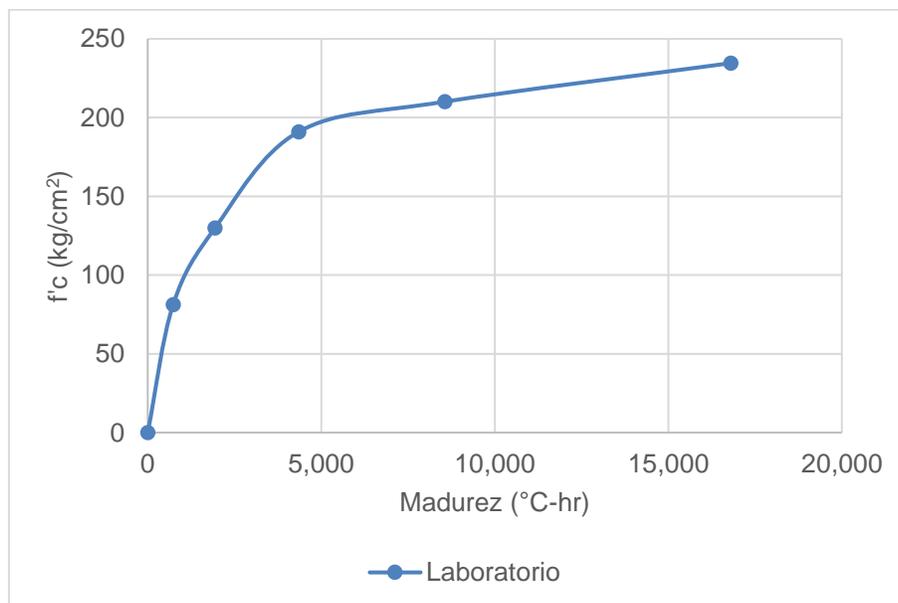


Figura 4.11: Curva de madurez resistencia $f'c=250\text{kg/cm}^2$

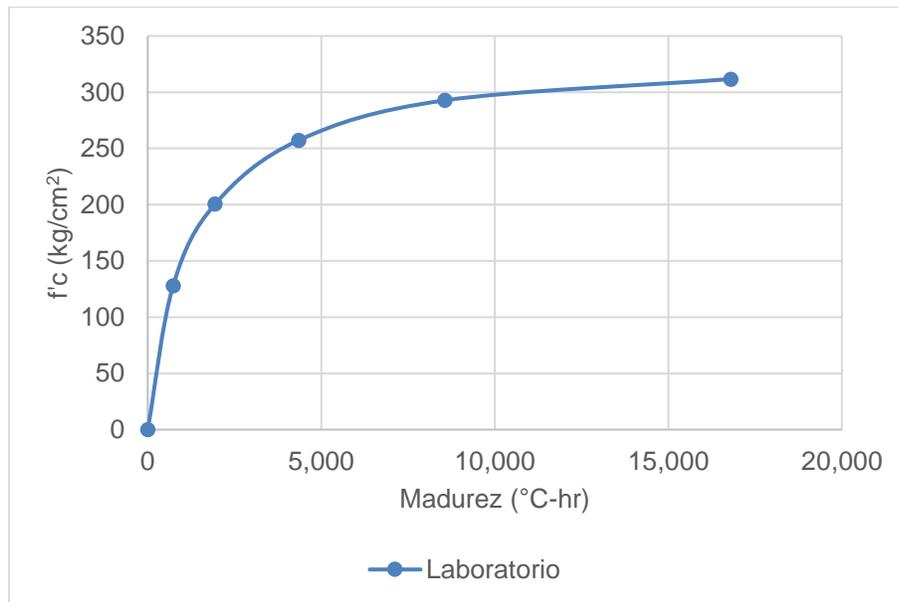


Figura 4.12: Curva de madurez resistencia $f'c=350\text{kg/cm}^2$

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan y discuten las propiedades y resultados obtenidos experimentalmente.

5.1. Resistencia a compresión

En la Tabla 5.1 se presentan los valores promedio de resistencia a compresión axial obtenidos en cada edad, así como el porcentaje alcanzado con respecto a la resistencia máxima obtenida a los 28 días. Se observa un incremento gradual en la resistencia conforme va aumentando el tiempo, llegando a un 65% en promedio de la resistencia a 28 días, a 3 días y a un 83% en promedio a 7 días.

Tabla 5.1: Valores de resistencia a compresión y relación f_c/f_{c28} .

Mezcla	$f'_c=150\text{kg/cm}^2$		$f'_c=250\text{kg/cm}^2$		$f'_c=350\text{kg/cm}^2$	
	fc	fc/fc ₂₈	fc	fc/fc ₂₈	fc	fc/fc ₂₈
0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	66	0.46	81	0.35	128	0.41
3	108	0.76	130	0.55	201	0.64
7	122	0.85	191	0.81	257	0.83
14	130	0.90	210	0.90	293	0.94
28	143	1.00	235	1.00	312	1.00

En la Figura 5.1 se representa el comportamiento de la resistencia a compresión a través del tiempo.

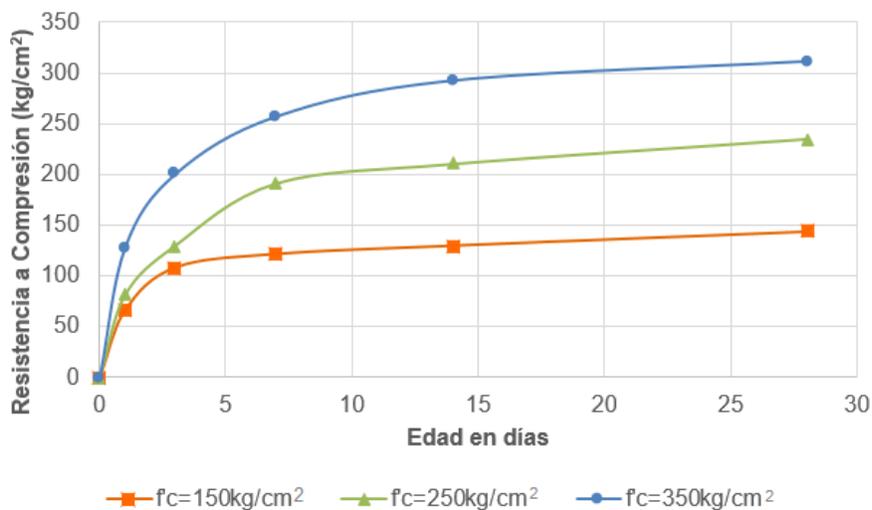


Figura 5.1: Resistencia a compresión vs tiempo.

En esta figura se observa que la forma de las tres curvas son muy similares alcanzando el 83% de la resistencia máxima a los 28 días dentro de los primeros 7 días.

En la figura 5.2 se presenta el valor normalizado de cada resistencia con respecto al valor de resistencia axial máxima alcanzada a los 28 días. En esta figura se observa que el desarrollo de la resistencia a compresión axial de las tres mezclas a través del tiempo son muy similares: un incremento acelerado en la resistencia de 1 a 3 días y un incremento lento en el intervalo de 3 a 28 días.

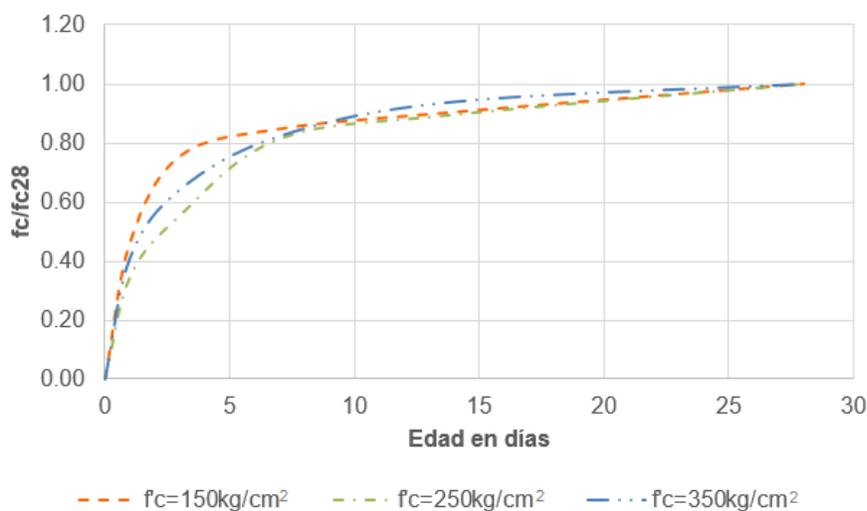


Figura 5.2: Resistencia a compresión normalizada vs tiempo.

Tomando los resultados normalizados anteriormente mostrados, en la Figura 5.3 se realiza una comparativa con lo mencionado en el Manual de Tecnología del Concreto de la CFE (2012) y con lo registrado por Nilson (1999), en la cual se observa un comportamiento muy similar en el incremento de la resistencia a compresión axial. Sin embargo, los valores reportados por la literatura son menores a los obtenidos experimentalmente.

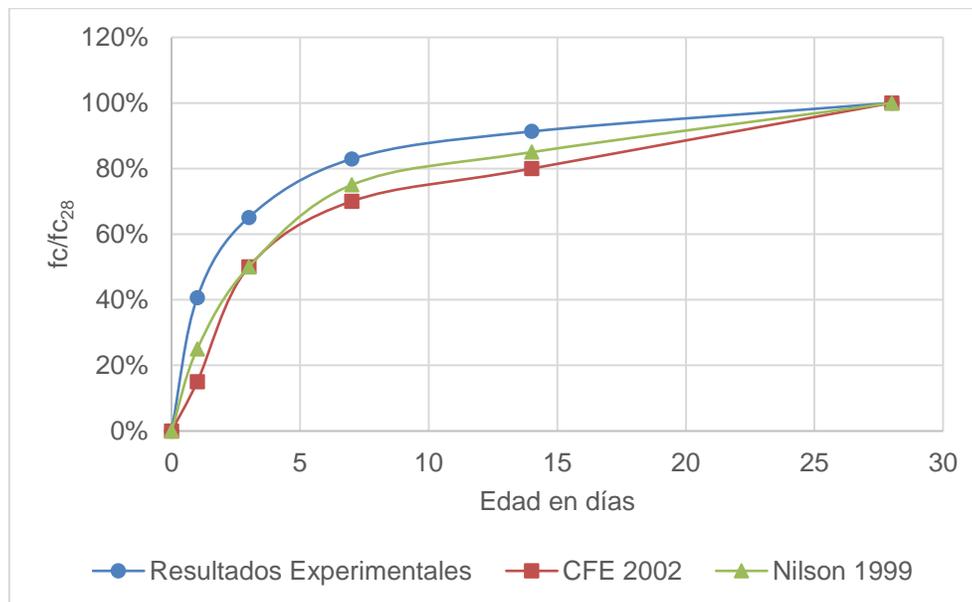


Figura 5.3: Resistencia a compresión vs tiempo normalizado, comparaciones con la literatura.

De acuerdo a los resultados obtenidos y por el método de mínimos cuadrados se propone una ecuación logarítmica de predicción para obtener la relación de $f_c/f_{c_{28}}$ para edades tempranas.

Las ecuaciones propuestas (5.1) y (5.2), que mejor se ajustan a los datos experimentales, se presenta en la Figura 5.4 y son:

$$\frac{f_c}{f_{c_{28}}} = 0.1792 \ln(t) + 0.4369 \quad \forall t \in [1, 22] \quad (5.1)$$

$$\frac{f_c}{f_{c28}} = 1 \quad \forall t \in [23, 28] \quad (5.2)$$

Donde:

$\frac{f_c}{f_{c28}}$ = Relación entre la resistencia a edad temprana y la resistencia a compresión de 28 días

t= Edad en días

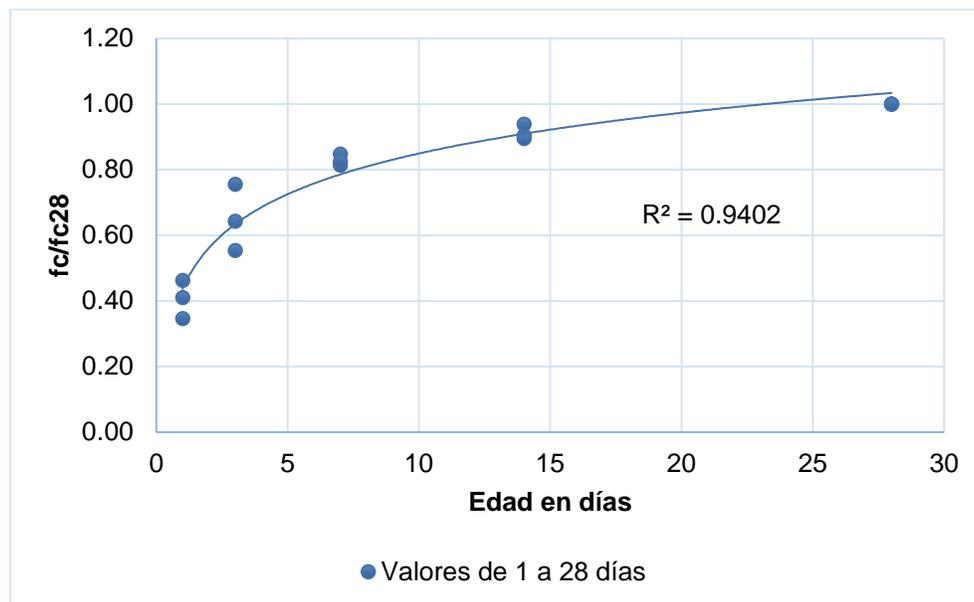


Figura 5.4: Ecuación de predicción de resistencia a compresión.

5.2.Módulo de Elasticidad

Los valores obtenidos para módulo de elasticidad y las relaciones entre el valor de módulo de elasticidad a edad temprana con respecto al valor de referencia a 28 días son representados en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Valores de módulo de elasticidad y relaciones E_c/E_{c28} .

Edad	$f'_c=150\text{kg/cm}^2$		$f'_c=250\text{kg/cm}^2$		$f'_c=350\text{kg/cm}^2$	
	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	E_c/E_{c28}	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	E_c/E_{c28}	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	E_c/E_{c28}
0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	131,268	0.70	140,008	0.66	153,203	0.61
3	152,991	0.82	170,324	0.81	197,385	0.78
7	166,176	0.89	180,269	0.85	204,266	0.81
14	173,695	0.93	189,053	0.90	210,922	0.84
28	186,984	1.00	211,039	1.00	252,068	1.00

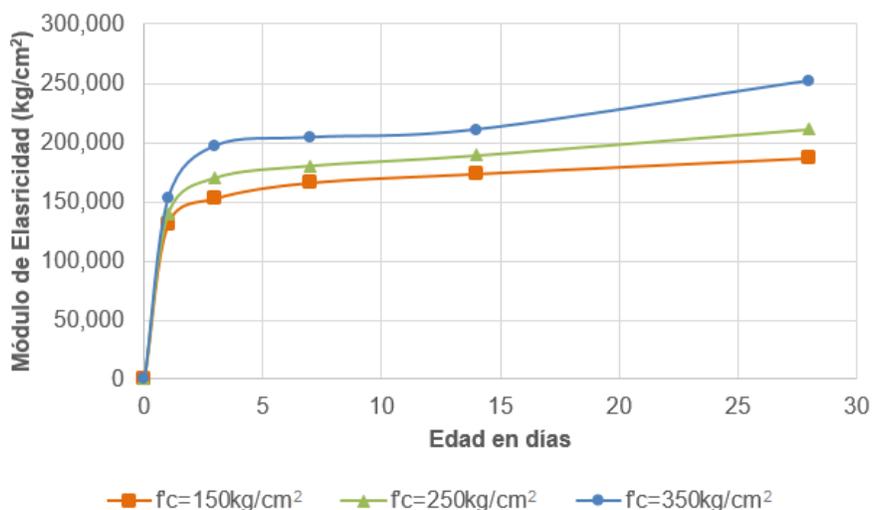


Figura 5.5: Comportamiento del módulo de elasticidad a edades tempranas

Los valores de módulo de elasticidad aumentan al incrementar la resistencia a compresión y el tiempo, logrando el 80% de su valor final a los 3 días, como se observa en la Figura 5.5. Es importante señalar que se logra un 83% del valor de la resistencia a compresión axial hasta los 7 días. Esto es, la evolución con respecto al tiempo del módulo de elasticidad es más rápida que el de la resistencia a compresión axial en los primeros 7 días. Por lo tanto, no se puede considerar una misma ecuación para calcular el módulo de elasticidad con respecto a la resistencia del concreto.

En la tabla 5.3 se muestra el resumen de los porcentajes que alcanza cada parámetro en cada edad.

Tabla 5.3: Comparativa de desarrollo de módulo de elasticidad y resistencia a compresión

Edad	$f'c=150\text{kg/cm}^2$		$f'c=250\text{kg/cm}^2$		$f'c=350\text{kg/cm}^2$		Promedio	
	fc	Ec	fc	Ec	fc	Ec	fc	Ec
1	46%	70%	35%	66%	41%	61%	41%	66%
3	76%	82%	55%	81%	64%	78%	65%	80%
7	85%	89%	81%	85%	83%	81%	83%	85%
14	90%	93%	90%	90%	94%	84%	91%	89%
28	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

En la figura 5.6 se normalizan los valores de módulo de elasticidad de cada resistencia con su respectivo valor obtenido a 28 días. Se observa un comportamiento muy similar entre las tres resistencias: un incremento acelerado en el valor del módulo de elasticidad a 1 día y un incremento más lento de 3 a 28 días.

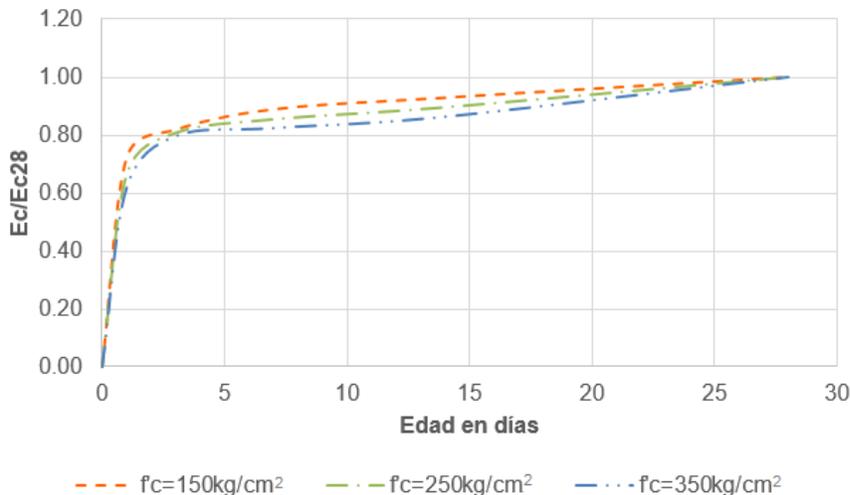


Figura 5.6: Módulo de elasticidad normalizado vs tiempo.

Con base en lo observado en la Figura 5.6, se ajusta una ecuación de tipo logarítmica por el método de mínimos cuadrados para obtener la relación entre el valor del módulo

de elasticidad a edad temprana y el valor del módulo de elasticidad esperado a los 28 días.

Las ecuación obtenida (5.3), que mejor se ajusta a los datos experimentales se presentan en la Figura 5.7 y es:

$$\frac{E_c}{E_{c28}} = 0.0941 \ln(t) + 0.67 \quad (5.3)$$

Donde:

$\frac{E_c}{E_{c28}}$ = Relación entre el módulo de elasticidad a edad temprana y el módulo de elasticidad de 28 días

t = Edad en días

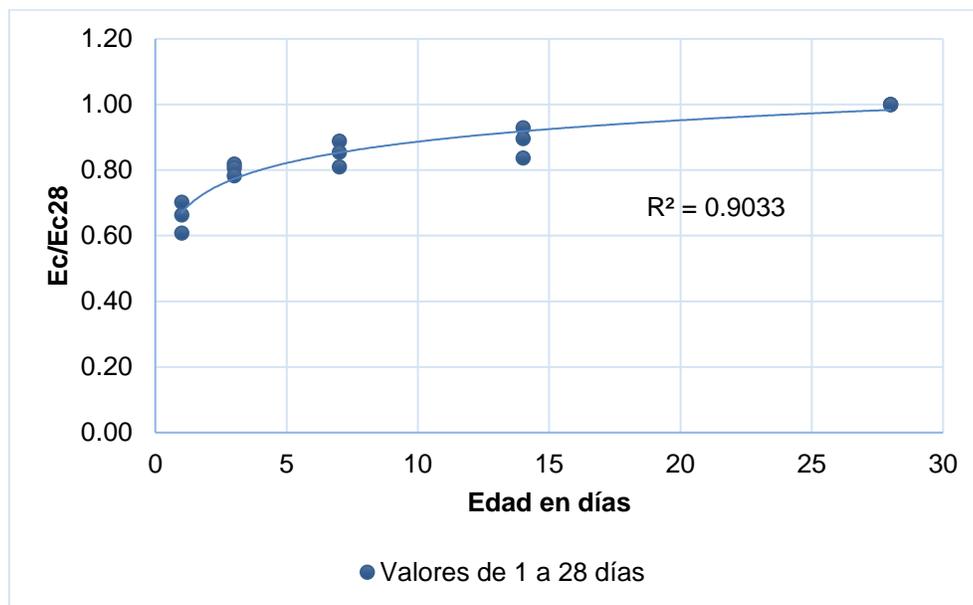


Figura 5.7: Ecuaciones de predicción para módulo de elasticidad.

5.3. Curva esfuerzo – deformación.

De cada una de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de los datos experimentales se obtuvieron ecuaciones de regresión por el método de mínimos cuadrados para relacionar los valores de deformación y esfuerzo normalizados para cada edad.

En la tabla 5.4 se resumen los valores promedio de resistencia compresión máxima a 28 días ($f_{c_{max}}$) y los valores de su correspondiente deformación unitaria (ϵ_0) obtenidos experimentalmente.

Tabla 5.4: Valores promedio de $f_{c_{max}}$ y ϵ_0 .

Resistencia	$f'c=150\text{kg/cm}^2$		$f'c=250\text{kg/cm}^2$		$f'c=350\text{kg/cm}^2$	
Edad	$f_{c_{max}}$	ϵ_0	$f_{c_{max}}$	ϵ_0	$f_{c_{max}}$	ϵ_0
1	66	0.00083	81	0.00096	128	0.00161
3	108	0.00118	130	0.00124	201	0.00174
7	122	0.00127	191	0.00172	257	0.00182
14	130	0.00131	210	0.00186	293	0.00213
28	143	0.00175	235	0.00189	312	0.00219

A manera de ejemplo se presenta en la figura 5.8 la curva esfuerzo deformación normalizada para la resistencia $f'c=150\text{kg/cm}^2$ a la edad de 1 día. En el anexo E se muestran a detalle las curvas del resto de las resistencias y edades.

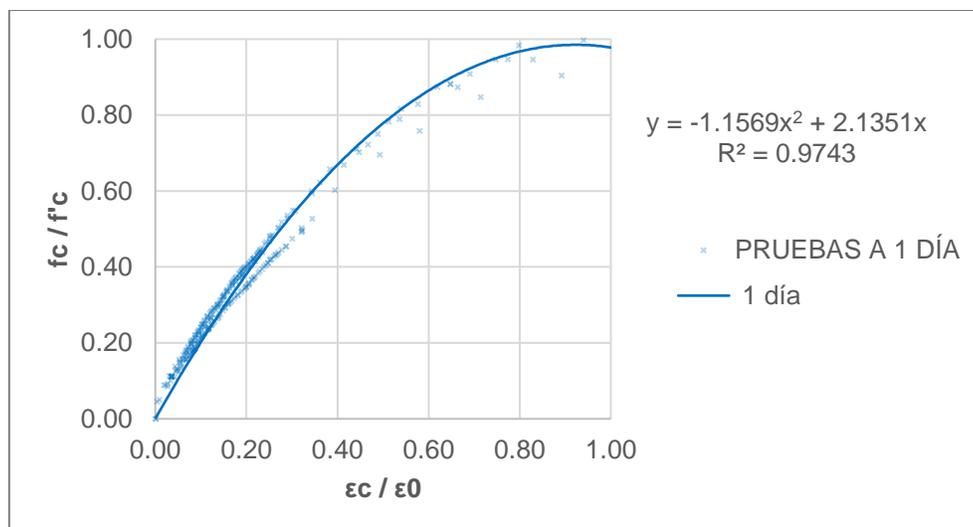


Figura 5.8 Curva esfuerzo-deformación normalizada resistencia $f'_c = 150 \text{ kg/cm}^2$ a 1 día.

Para cada edad se obtuvo un modelo de curva esfuerzo-deformación normalizado cada uno con su respectivo valor de $f_{c\max}$ y ϵ_0 ; en la cual se incluyen los resultados de las tres resistencias. En la figura 5.9 se observa que sin importar la resistencia el comportamiento tiende a una curva cuadrática.

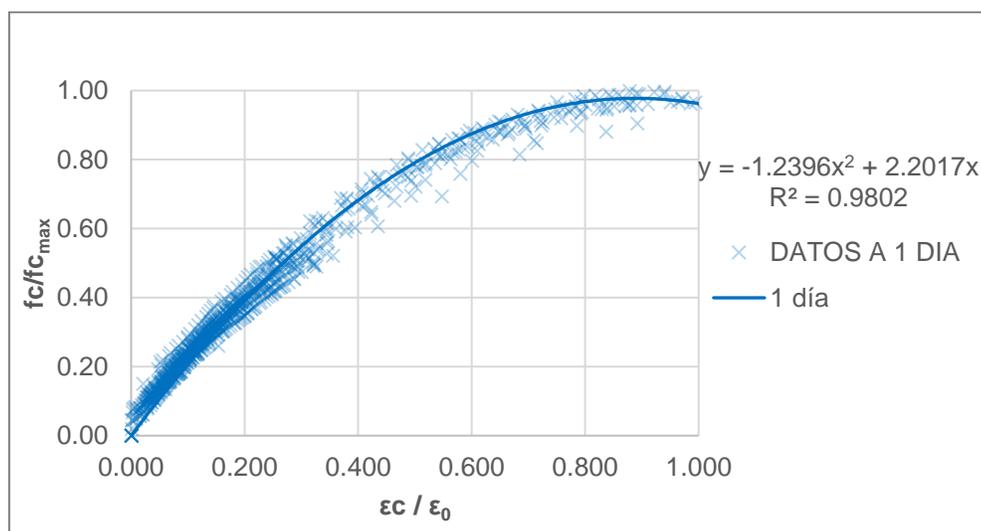


Figura 5.9 : Curvas esfuerzo-deformación normalizada a 1 día.

La forma de la ecuación obtenida que se ajusta a los datos experimentales a cada edad es similar a la ecuación (5.4):

$$y = -a \cdot x^2 + b \cdot x \quad (5.4)$$

Donde:

$y = \frac{f_c}{f_{cmax}}$ es la relación entre el esfuerzo y el esfuerzo máximo a la edad determinada

$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ es la relación entre la deformación y la deformación en el esfuerzo máximo a la edad determinada

En el modelo propuesto por Kent y Park de la curva esfuerzo-deformación se generaliza la ecuación de Hognestad para describir el comportamiento de la parte ascendente de la curva.

En los modelos mostrados para la parte ascendente es representada mediante la modificación de la parábola de segundo grado de Hognestad reemplazando ε_0 por el valor promedio correspondiente a cada edad y $0.85f'_c$ por el valor f_{cmax} promedio correspondiente a cada edad.

El modelo de Kent y Park para la parte ascendente de la curva esfuerzo deformación representado por la ecuación (2.1), en forma normalizada es representada por la ecuación (5.5):

$$\frac{f_c}{f_{cmax}} = \left[2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (5.5)$$

La cual a su vez puede expresarse como la ecuación (5.6):

$$y = -x^2 + 2x \quad (5.6)$$

Donde:

$y = \frac{f_c}{f_{cmax}}$ es la relación entre el esfuerzo y el esfuerzo máximo a la edad determinada

$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ es la relación entre la deformación y la deformación en el esfuerzo máximo a la edad determinada.

En el caso del modelo de Todeschini para la parte ascendente está representado como se mencionó anteriormente por la ecuación (2.4), y en forma normalizada es representada por la ecuación (5.7):

$$\frac{f_c}{f_{cmax}} = \left[\frac{2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)}{1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2} \right] \quad (5.7)$$

La cual a su vez puede ser representada por la ecuación (5.8):

$$y = \frac{2x}{1 + x^2} \quad (5.8)$$

Donde:

$y = \frac{f_c}{f_{cmax}}$ es la relación entre el esfuerzo y el esfuerzo máximo a la edad determinada

$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ es la relación entre la deformación y la deformación en el esfuerzo máximo a la edad determinada.

En las figuras 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14 se comparan las curvas de regresión de los datos experimentales con las curvas de Kent y Park modificado y de Todeschini para cada edad.

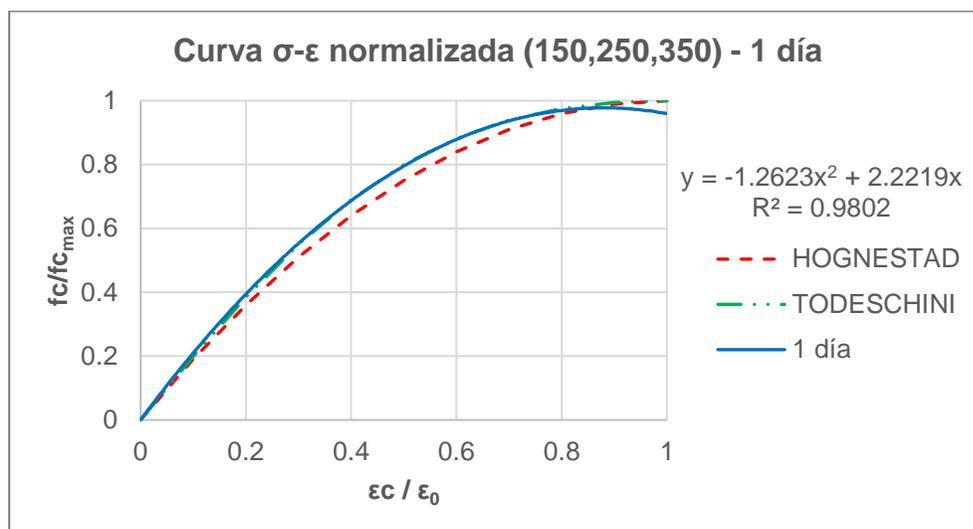


Figura 5.10: Curva normalizada a la edad de 1 día

En la tabla 5.5 se muestra un resumen de ambos parámetros:

Tabla 5.5: Parámetros a y b de las ecuaciones de regresión

Edad	Parámetros	
	a	b
1	1.262	2.222
3	0.990	1.997
7	0.953	1.933
14	0.924	1.887
28	1.191	2.158

De acuerdo con la información anterior se observa que es posible utilizar el modelo de Kent y Park modificado para representar el comportamiento de la curva esfuerzo – deformación del concreto a cualquier edad tempranas y cualquier resistencia, siempre y cuando se sustituyan los valores correspondientes de $f_{c_{max}}$ y ϵ_0 .

En la tabla 5.6 se muestra el resumen de los valores obtenidos para el valor de ϵ_0 , así como la relación de $\frac{\epsilon_0}{\epsilon_{0,28}}$.

Tabla 5.6: Promedios de ϵ_0 y relación $\epsilon_0/\epsilon_{0,28}$

Edad	$f'c=150kg/cm^2$		$f'c=250kg/cm^2$		$f'c=350kg/cm^2$		Promedios
	ϵ_0	% ϵ_0 28 días	ϵ_0	% ϵ_0 28 días	ϵ_0	% ϵ_0 28 días	
0	0.00000	0%	0.00000	0%	0.00000	0%	0.00000
1	0.00072	43%	0.00096	51%	0.00131	72%	0.00100
3	0.00118	70%	0.00124	66%	0.00151	83%	0.00131
7	0.00127	75%	0.00172	91%	0.00160	88%	0.00153
14	0.00128	76%	0.00186	99%	0.00173	95%	0.00162
28	0.00169	100%	0.00189	100%	0.00183	100%	0.00180

En la Figura 5.15 se grafican los esfuerzos máximos y sus correspondientes deformaciones.

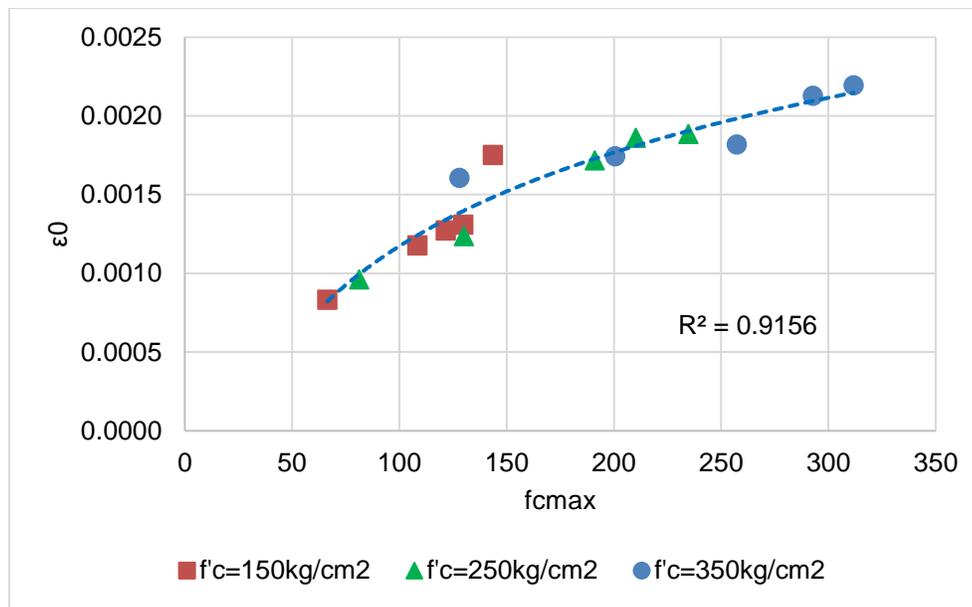


Figura 5.15: Esfuerzos máximos y sus correspondientes deformaciones unitarias a diversas edades.

Por medio de un ajuste de mínimos cuadrados se obtiene la ecuación de tipo logarítmica, que permite obtener un valor de deformación unitaria a partir de un valor de resistencia a compresión axial

Las ecuación obtenida (5.9), que mejor se ajusta a los datos experimentales se presentan en la Figura 5.15 y es:

$$\varepsilon_0 = 0.0009 \ln(fc_{max}) - 0.0028 \quad (5.9)$$

Donde:

ε_0 = Valor de deformación unitaria en la resistencia a compresión máxima.

fc_{max} = Resistencia a compresión máxima

Se observa como los valores aumentan conforme aumenta el tiempo y conforme aumenta la resistencia a compresión axial.

El comportamiento del valor ε_0 a través del tiempo para las tres resistencias es representado en la Figura 5.16.

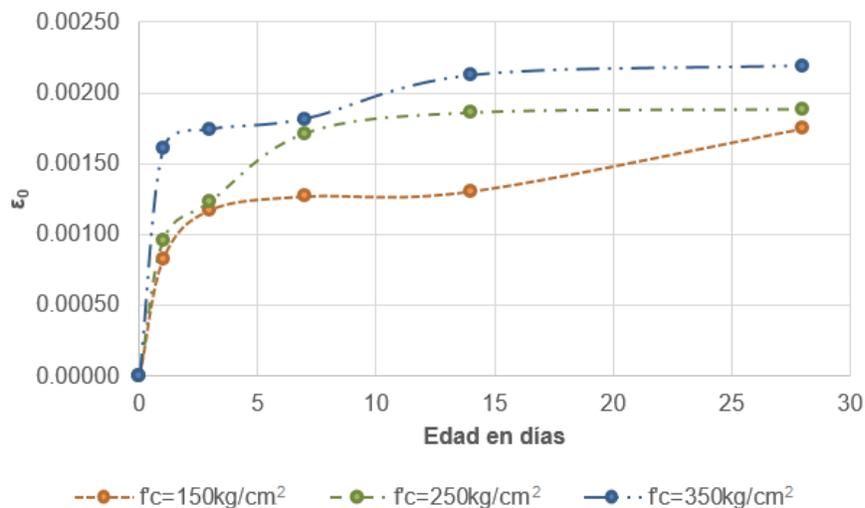


Figura 5.16: Comportamiento del valor ϵ_0 a edades tempranas.

Normalizando los valores obtenidos con respecto al valor correspondiente a 28 días es mostrado en la figura 5.17.

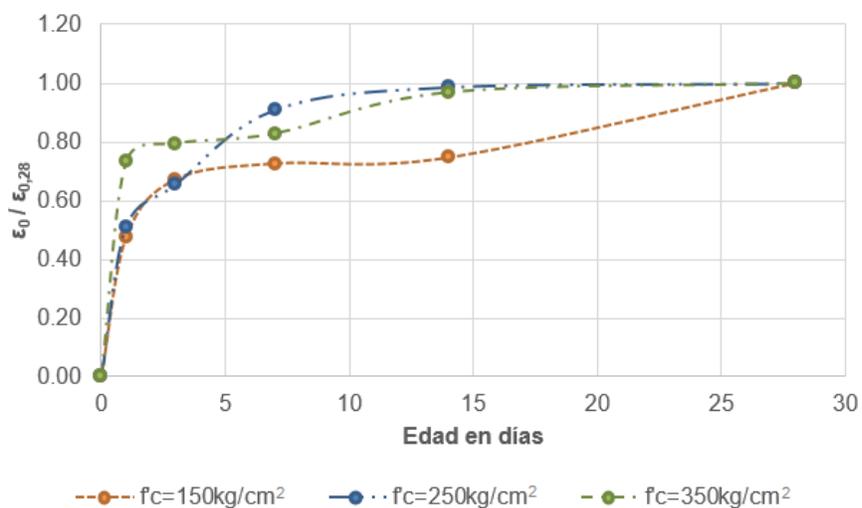


Figura 5.17: Evolución de ϵ_0 normalizado

Con base en lo anterior y por el método de mínimos cuadrados se propone una ecuación de tipo logarítmica para obtener la relación entre el valor de ϵ_0 a edad temprana y el valor de ϵ_0 esperado a los 28 días.

Las ecuación obtenida (5.10), que mejor se ajustan a los datos experimentales se presentan en la Figura 5.18 y es:

$$\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{0,28}} = 0.1276 \ln(t) + 0.5706 \quad (5.10)$$

Donde:

$\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{0,28}}$ = Relación entre el valor de ε_0 a edad temprana y ε_0 de 28 días

t = Edad en días

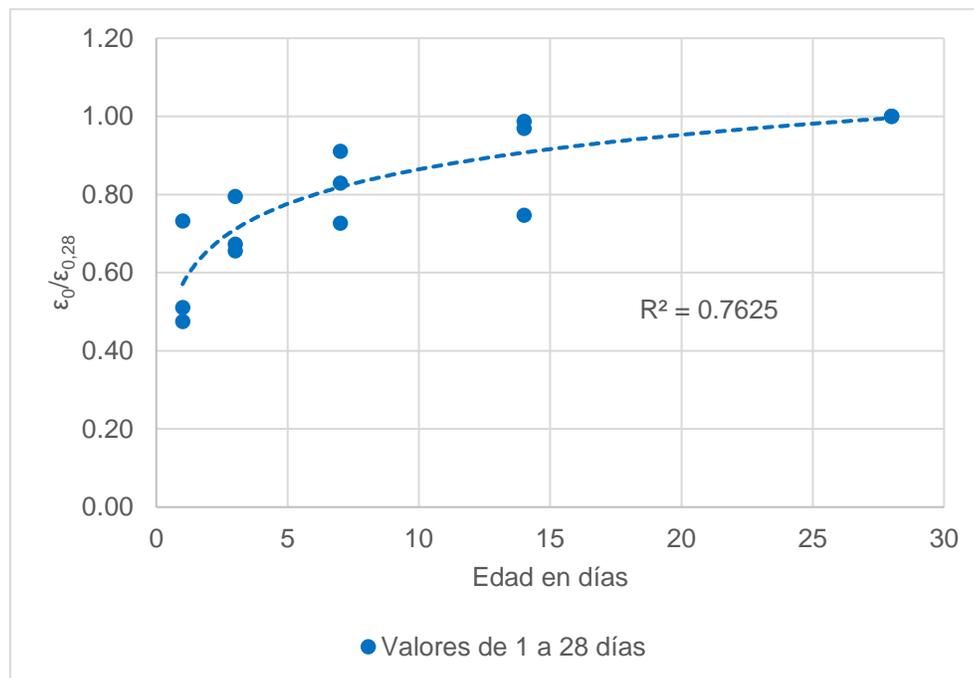


Figura 5.18: Ecuación de predicción para el valor de ε_0 .

5.4. Madurez

En la tabla 5.7 se hace un resumen de los valores de madurez y de resistencia a compresión tanto para los cilindros curados en laboratorio como para los cilindros curados en intemperie, además se muestra el porcentaje con respecto al valor de resistencia máxima de referencia a 28 días.

Tabla 5.7: Resumen de índices de madurez, resistencia a compresión y relaciones f_{Cmax}/f_{C28}

Laboratorio									
Resistencia	$f'c=150\text{kg/cm}^2$			$f'c=250\text{kg/cm}^2$			$f'c=350\text{kg/cm}^2$		
Edad (días)	Madurez ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$)	f_c (kg/cm^2)	f_c/f_{c28}	Madurez ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$)	f_c (kg/cm^2)	f_c/f_{c28}	Madurez ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$)	f_c (kg/cm^2)	f_c/f_{c28}
0	0	0	0%	0	0	0%	0	0	0%
1	657	66	46%	732	81	35%	738	128	41%
3	1,777	108	76%	1,941	130	55%	1,983	201	64%
7	3,860	122	85%	4,350	191	81%	4,398	257	83%
14	7,693	130	90%	8,558	210	90%	8,293	293	94%
28	15,931	143	100%	16,803	235	100%	16,568	312	100%
Intemperie									
Resistencia	$f'c=150\text{kg/cm}^2$			$f'c=250\text{kg/cm}^2$			$f'c=350\text{kg/cm}^2$		
Edad (días)	Madurez ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$)	f_c (kg/cm^2)	f_c/f_{c28}	Madurez ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$)	f_c (kg/cm^2)	f_c/f_{c28}	Madurez ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$)	f_c (kg/cm^2)	f_c/f_{c28}
7	4,022	137	95%	4,424	191	82%	4,746	282	90%
14	8,602	170	119%	8,947	236	100%	9,116	315	101%
28	18,520	177	124%	17,984	241	103%	18,535	324	104%

En la tabla anterior se observa como el método de madurez es aplicable en nuestro medio y de forma conservadora, ya que debido a las condiciones de humedad y al tipo de agregado utilizado en la región de alta absorción, se ha demostrado en estudios previos que el proceso de hidratación del cemento no se ve afectado y por consiguiente no se presenta una pérdida de resistencia.

Adicionalmente al estar curado a una mayor temperatura obtiene un mayor índice de madurez y por consiguiente una mayor resistencia.

En las figuras 5.19, 5.20 y 5.21, se muestran las curvas de madurez y los valores de resistencia a compresión obtenidos de los ensayos curados en intemperie.

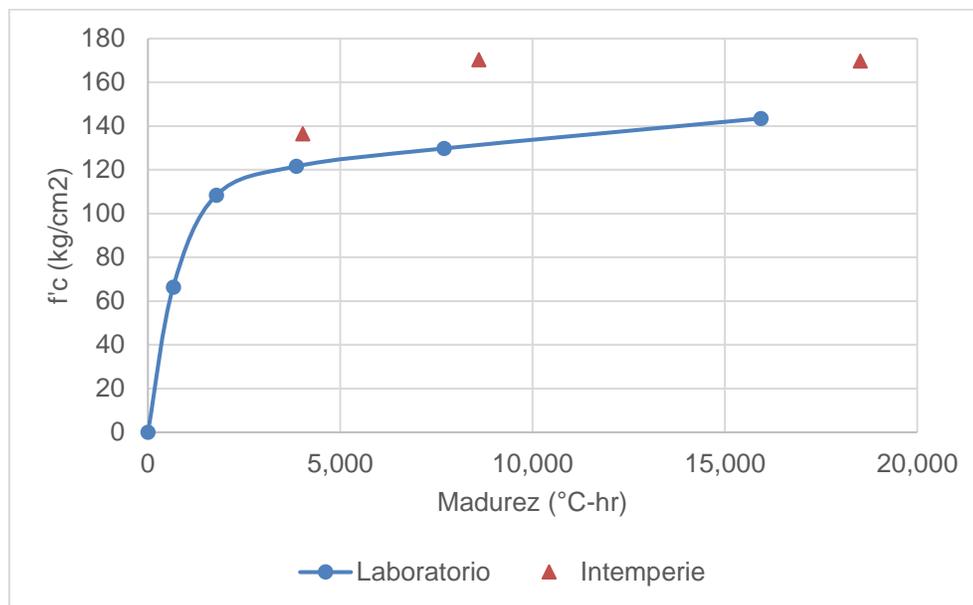


Figura 5.19: Curva madurez $f'c=150\text{kg/cm}^2$ y resultados a intemperie

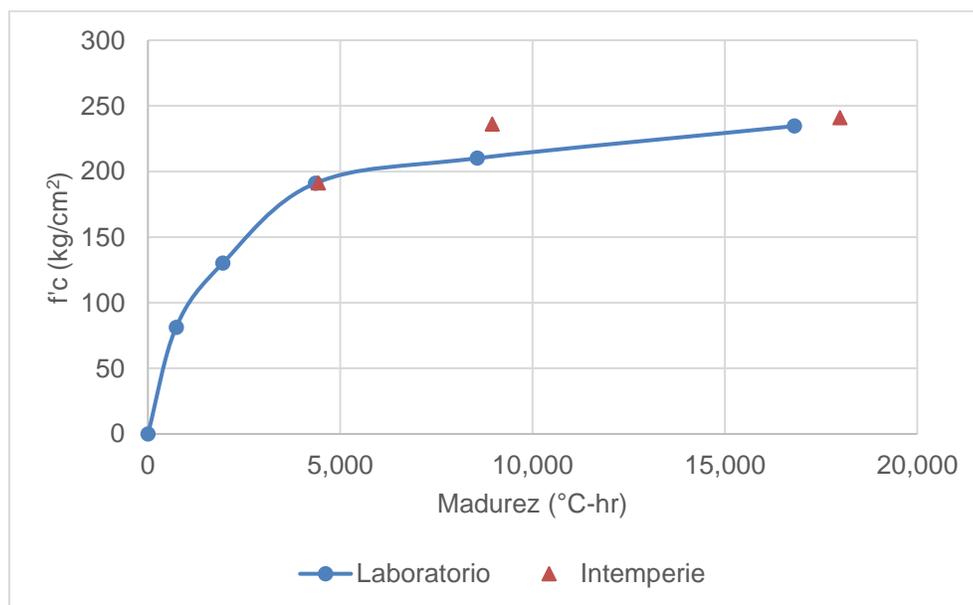


Figura 5.20: Curva madurez $f'c=250\text{kg/cm}^2$ y resultados a intemperie

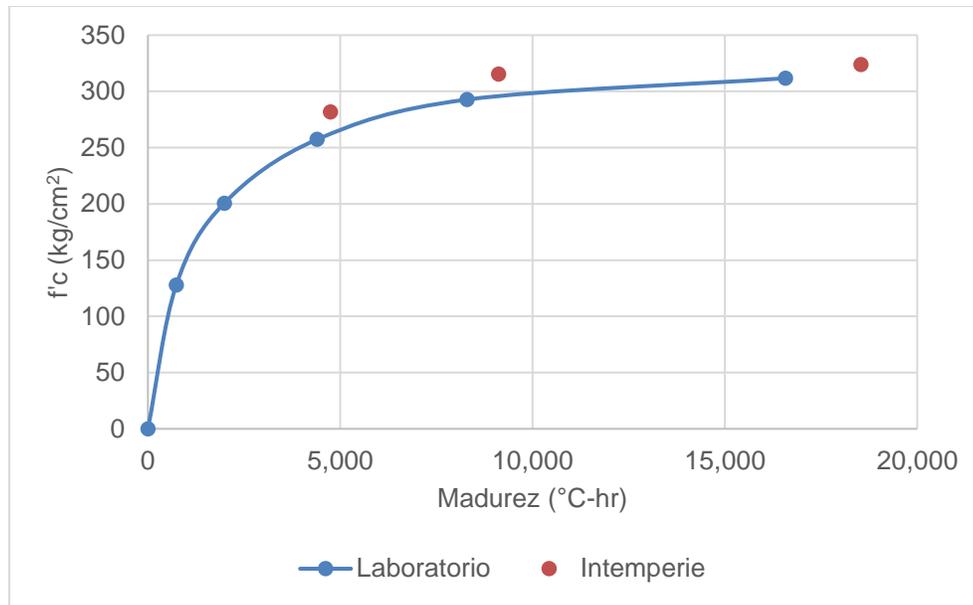


Figura 5.21: Curva madurez $f'c=350\text{kg/cm}^2$ y resultados a intemperie

Con base a lo anterior se observa que el método de madurez puede ser utilizado para hacer predicciones conservadoras para la resistencia a compresión a edades tempranas, teniendo una subestimación de al menos un 5%, concordando los resultados con el estudio hecho por Aguilar (2009).

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En el presente capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo de investigación relativo al comportamiento de las principales propiedades mecánicas del concreto con agregado calizo de alta absorción a edades tempranas. Se eligieron tres valores de resistencia a compresión axial, que son las más utilizadas en la Península de Yucatán, $f'_c=150\text{kg/cm}^2$, $f'_c=250\text{kg/cm}^2$ y $f'_c=350\text{kg/cm}^2$. Se fabricaron y ensayaron 35 cilindros de cada resistencia, obteniendo resultados de resistencia a compresión axial, módulo de elasticidad, curvas de esfuerzo-deformación y madurez, a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días.

De acuerdo a la información consultada y con base en los resultados obtenidos de manera experimental, se concluye lo siguiente:

- La resistencia a compresión axial incrementa con respecto al tiempo, siendo más rápida en los primeros 7 días hasta alcanzar un valor promedio del 83% de la resistencia a compresión axial a 28 días. Posteriormente la resistencia a compresión axial incrementa de manera lenta hasta alcanzar la resistencia de referencia a 28 días.
- Los valores de incremento de resistencia a compresión axial reportados en el Manual de Tecnología del Concreto de la CFE (2012) y de acuerdo a Nilson (1999), fueron inferiores en un 14% en promedio en comparación con los valores obtenidos experimentalmente.
- El módulo de elasticidad incrementa con respecto al tiempo, siendo más rápido en los primeros 3 días hasta alcanzar un valor promedio del 80% del módulo de elasticidad a 28 días. Posteriormente el módulo de elasticidad incrementa de manera lenta hasta alcanzar el módulo de elasticidad de referencia a 28 días.
- La evolución con respecto al tiempo de la resistencia a compresión axial y el módulo de elasticidad son diferentes, especialmente en los tres primeros días.
- La deformación longitudinal del concreto para un mismo estado de carga disminuye con el paso del tiempo, de modo que la pendiente de la curva esfuerzo-deformación aumenta. Esto significa que el valor del módulo de elasticidad también aumenta con el tiempo.

- La curva esfuerzo-deformación para cualquier resistencia a edad temprana puede ser representada por una función cuadrática, similar a los modelos propuestos por Hognestad, Kent y Park modificado y Todeschini. Sustituyendo los valores correspondientes de edades tempranas de resistencia máxima ($f_{c_{max}}$) y su deformación correspondiente (ϵ_0).
- Los métodos de curado de concreto a intemperie que se utilizan en la región, incrementan la resistencia a compresión a edades tempranas. Esto debido en parte a que al incrementar la temperatura de curado, logra un mayor índice de madurez y por consiguiente una mayor resistencia a compresión para una misma edad; sin embargo no realizar ningún método de curado afecta directamente la durabilidad y vida útil del concreto.
- El método de madurez puede ser aplicado en concretos de la región para predicciones de resistencia a compresión a edades tempranas, ya que subestima la resistencia de los concretos curados en intemperie.

REFERENCIAS

- ACI-318. (2011). Building Code Requirements for Strcutural Concrete and Commentary. American Concrete Institute, Famington Hills, MI.
- Aguilar B., Rodríguez M., Sermeño M. (2009). Determinación de la resistencia del concreto a edades tempranas bajo la norma ASTM C 1074, en viviendas de concreto coladas en sitio. Tesis de licenciatura, Universidad de El Salvador, El Salvador.
- ASTM-C-469. (2010). Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA.
- ASTM-C-1074. (2011). Standard practice for estimating concrete strength by the maturity concrete. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken,PA.
- Castro M. C. y López M.C. (2013). Aplicación del método de madurez para la estimación de tiempos de fraguado y resistencias de concretos industrializados con el fin de conocer la edad de descimbrado. Tesis de licenciatura, Universidad Pontificia Javeriana, Colombia.
- CFE. (2002). Manual de tecnología del concreto. Comisión Federal de Electricidad, México.
- Chan, J. L., Solís, R. y Moreno, E. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. Revista Ingeniería de la UADY. 7(2), pp. 39-46.
- Gómez J. J. (1980). Cálculo del módulo de elasticidad de concretos elaborados con materiales de la región. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Hernández G. (2013). Determinación de la influencia de la calidad de los agregados en el concreto. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Herrera E. (2010). Predicción de la resistencia a compresión axial del concreto en función de los resultados obtenidos en ensayos a probetas de dimensión

estándar y la obtención de su módulo de elasticidad. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de México, México.

- Kent D. y Park R. (1971). Flexural members with confined concrete. Journal of the Structural Division, Proc. Of the American Society of Civil Engineers, 1969-1990.
- Moreno, E. (2000). La corrosión del acero de refuerzo inducida por la carbonatación del concreto. Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, 4(2), pp. 43-48.
- Nilson A. H. (1999). Diseño de estructuras de concreto. 12va Edición. Mc Graw Hill, Bogotá, Colombia.
- NMX-C-111-ONNCCE. (2014). Industria de la construcción - Agregados para concreto hidráulico – Especificaciones y métodos de ensayo. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NMX-C-128-ONNCCE. (2013). Industria de la construcción - Concreto sometido a compresión - Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2004). Industria de la construcción - Agua para concreto – Especificaciones. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2014). Industria de la Construcción - Cementantes hidráulicos - Especificaciones y métodos de ensayo. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NMX-C-030-ONNCCE. (2004). Industria de la Construcción - Agregados – Muestreo. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NMX-C-170-ONNCCE. (1997). Industria de la construcción - Agregados - Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.

- NMX-C-077-ONNCCE. (1997). Industria de la Construcción - Agregados para concreto - Análisis granulométrico - Método de prueba. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NMX-C-166-ONNCCE. (2006). Industria de la Construcción - Agregados - Contenido de agua por secado - Método de prueba. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NMX-C-164-ONNCCE. (2014). Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). Industria de la construcción - Agregados - Masa volumétrica - Método de prueba. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2016). Industria de la construcción – Concreto - Elaboración y curado de especímenes de ensayo. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NMX-C-109-ONNCCE. (2013). Industria de la construcción - Concreto hidráulico - Cabeceo de especímenes. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NMX-C-156-ONNCCE. (2010). Industria de la construcción - Concreto hidráulico - Determinación del revenimiento en el concreto fresco. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NMX-C-162-ONNCCE. (2014). Industria de la construcción - Concreto hidráulico - Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NMX-C-083-ONNCCE. (2014). Industria de la construcción - Concreto - Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes - Método de

ensayo. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.

- NMX-C-219-ONNCCE. (2005). Industria de la construcción - Concreto - Resistencia a la compresión a edades tempranas y predicción de la misma a edades posteriores - Método de prueba. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- NTC-RDF. (2011). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto. Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, México.
- Oluokun F. A., Burdette E. G., and Deatherage J.H. (1990). Early-age concrete strength prediction by maturity - another look. ACI Materials Journal. 87(6), pp. 565-572.
- Oluokun F. A., Burdette E. G., and Deatherage J.H. (1991). Elastic modulus, poisson's ratio, and compressive strength relationships at early ages. ACI Materials Journal. 88(1), pp. 3-10.
- Solís R. y Moreno E. (2006). Análisis de la Porosidad del Concreto con Agregado Calizo. Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, 21(3), pp. 57-68.
- Solís R., Moreno E. y Arjona E. (2012). Resistencia del concreto con agregado de alta absorción y baja relación a/c. Revista ALCONPAT. 2(1), pp. 21-29.
- Todeschini C., Bianchini A. and Kesler C. (1964). Behavior of concrete columns reinforced with high strength steels. ACI Journal Proceedings, 61(6), pp. 701-716.
- Valcuende M., Marco E., Jardón R. y Gil A. (s.f.). Evolución de la resistencia del Hormigón con la edad y la temperatura. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Villagrán E., Vera C. y Posada A. (2013). Modelo esfuerzo-deformación para elementos de concreto reforzado que cumple con las hipótesis de las NTC RCDF 2004. Concreto y Cemento, Investigación y Desarrollo. 5(1), pp.32-39.

- Wade S. A., Schindler A. K., Barnes, R. W. and Nixon J. M. (2006). Evaluation of the maturity method to estimate concrete strength. ALDOT Research Project 930-590.
- Wight J.K. and MacGregor J. G. (2012). Reinforced Concrete – Mechanics & Design. 6ta Edición. Pearson. New Jersey, USA.

APÉNDICE A. PRUEBAS DE LOS MATERIALES

A.1. Análisis granulométrico de la grava.

Malla	Diámetro (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% que Pasa	Límite inferior	Límite Superior
1"	25	0	0%	100%	100%	100%
3/4"	19	395	4%	96%	90%	100%
1/2"	12.5	5800	58%	38%	20%	55%
3/8"	9.5	3059.5	31%	7%	0%	15%
#4	4.75	517.5	5%	2%	0%	5%
#8	2.36	13	0%	2%		
Charola	0	215	2%	0%		
	Suma	10000				

Tabla A-1: Granulometría grava.

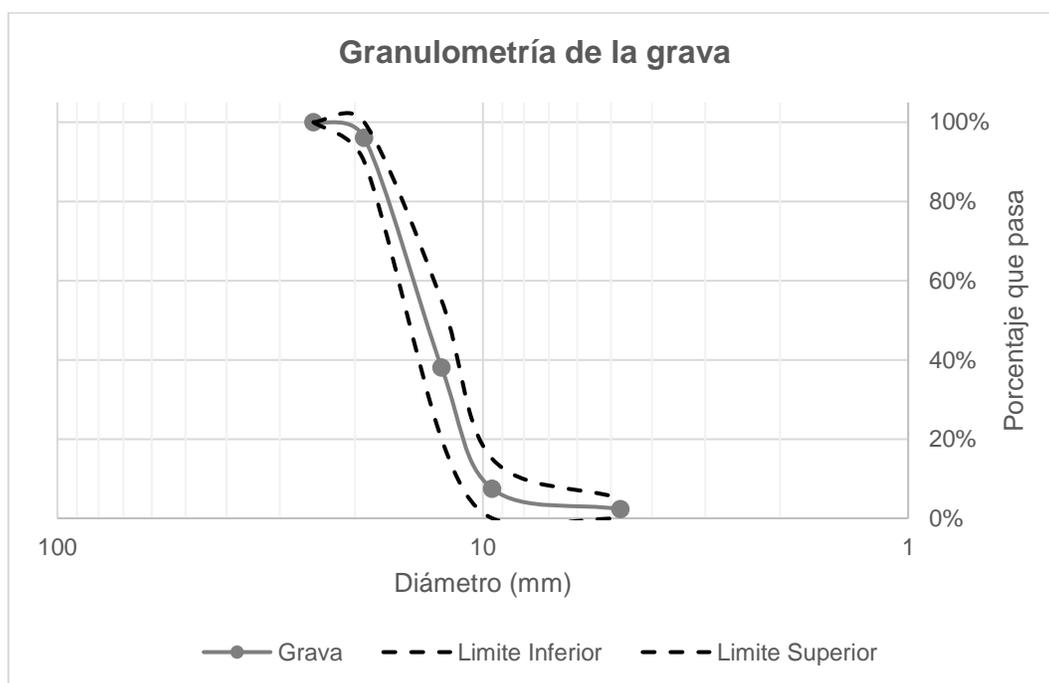


Figura A-1: Granulometría grava.

A.2. Análisis granulométrico de la arena.

Malla	Diámetro (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que Pasa	Límite inferior	Límite Superior
#4	4.75	0.75	0%	0%	100%	95%	100%
#8	2.36	60.3	12%	12%	88%	80%	100%
#16	1.18	151	30%	42%	58%	50%	85%
#30	0.6	120	24%	66%	34%	25%	60%
#50	0.3	44.35	9%	75%	25%	10%	30%
#100	0.15	89.8	18%	93%	7%	2%	10%
Charola	0	33.8	7%	100%	18%		
	Total	500					

Tabla A-2: Granulometría arena.

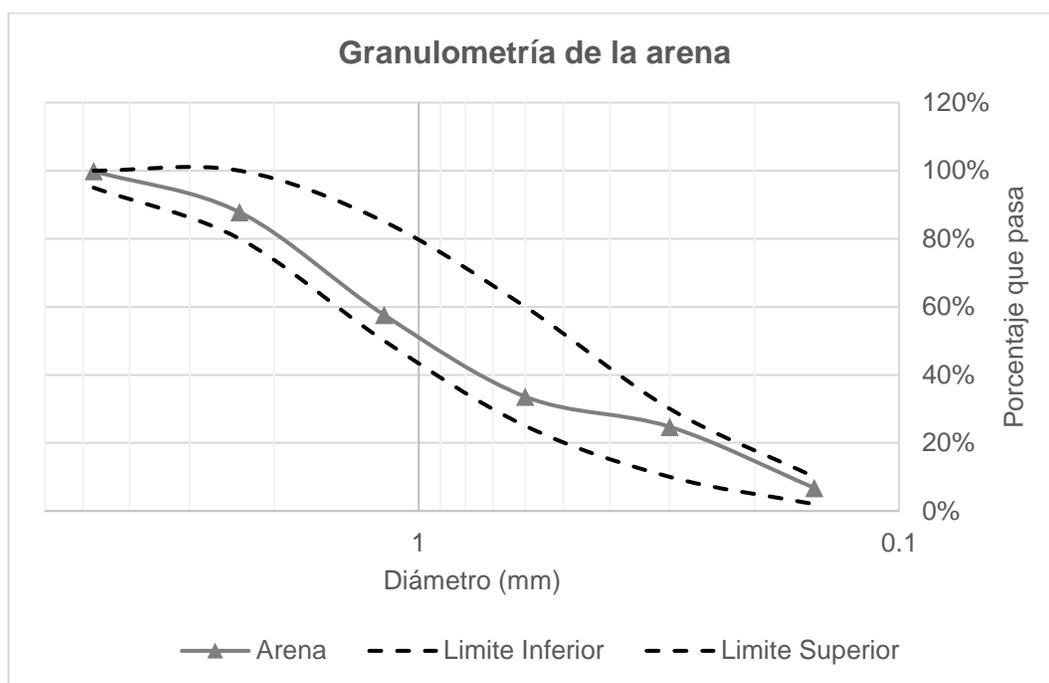


Figura A-2: Granulometría arena.

A.3. Peso volumétrico de la grava

El factor de calibración del recipiente utilizado es:

$$F_c=140.6$$

Muestra	Peso (kg)	Muestra	Peso (kg)
1	7.953	1	8.893
2	7.933	2	8.943
3	8.073	3	8.903
Promedio	7.986	Promedio	8.913
P.V.S.S. (kg/m³)	1,123	P.V.S.C. (kg/m³)	1,253

Tabla A-3: Determinación P.V.S.S. y P.V.S.C. de la grava.

A.4. Peso volumétrico de la arena

El factor de calibración del recipiente utilizado es: $F_c=356.32$

Muestra	Peso (kg)
1	3.745
2	3.785
3	3.785
Promedio	3.772
P.V.S.S. (kg/m³)	1,344

Tabla A-4: Determinación P.V.S.S. de la arena.

A.5. Gravedad específica y absorción de la grava

Muestra	A (Peso Secado en Horno) (kg)	B (Peso Saturado Superficialmente Seco) (kg)	C (Peso Sumergido en agua) (kg)	G.E.	Absorción (%)
1	2.813	3.000	1.695	2.30	6.65
2	2.814	3.000	1.697	2.30	6.61
Promedio	2.8135	3.000	1.696	2.30	6.63

Tabla A-5: Cálculo de la gravedad específica y absorción de la grava.

A.6.Gravedad específica y absorción de la arena

Muestra	PESO (grs)	B (Peso Frasco con Agua) (grs)	C (Peso Frasco+Muestra+Agua) (grs)	G.E.
1	300	758	934	2.42
2	300	840	1018	2.46
Promedio	300	799	976	2.44

Tabla A-6: Gravedad específica de la arena.

Muestra	PESO (grs)	A (Peso Muestra Secada en Horno) (grs)	Absorción
1	500	479.3	4.14
2	500	479	4.38
Promedio	500	479.15	4.26

Tabla A-7: Absorción de la arena.

APÉNDICE B.DISEÑO DE MEZCLAS

B.1. Mezcla $f'c=150\text{kg/cm}^2$.

Con los datos de revenimiento y tamaño máximo del agregado grueso se calcula la cantidad de agua en la siguiente tabla:

Tabla B-1: Estimación del agua de mezclado y contenido de aire.

Concreto sin aire incluido								
Agua por kg/m^3 de concreto para tamaños máximo de agregado indicados								
Revenimiento (mm)	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	169	
Aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

- Revenimiento de 7.5 a 10 cm
- Tamaño máximo del agregado de 19 mm
- Cantidad de agua de 205 kg/m^3
- Aire atrapado de 2%

Con la resistencia a compresión se obtiene la relación agua/cemento con la siguiente tabla:

Tabla B-2: Correspondencia entre agua cemento y resistencia a compresión.

Relación agua/cemento por peso		
Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm^2	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	-
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Debido a que el valor de resistencia se encuentra entre 140 y 210 kg/cm², se obtiene el valor por medio de interpolación, dando un valor de: 0.768

La cantidad de cemento se obtiene del contenido de agua y la relación agua/cemento.

$$\text{cantidad de cemento} = \frac{\text{cantidad de agua}}{\text{relación agua/cemento}} = \frac{205}{0.768} = 267 \text{ kg/m}^3$$

- Cantidad de cemento de 267 kg/m³

El volumen de agregado grueso se obtiene de la siguiente tabla con el tamaño máximo del agregado y el módulo de finura.

Tabla B-3: Estimación del contenido de gravas.

Tamaño máximo de agregado	Volumen de grava compactada por unidad de Volumen de concreto para diferentes módulos de finura			
	2.4	2.6	2.8	3
9.5	0.5	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.6
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.8	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

- Módulo de finura de 2.9
- El volumen de agregado grueso de igual manera se obtiene por interpolación dando un valor de 0.61 m³

La cantidad de grava se obtiene multiplicando su volumen por su peso volumétrico.

$$\text{Cantidad de grava (seca)} = 0.61 \times 1,253 = 764.33 \text{ kg/m}^3$$

La cantidad de grava (sss) es igual a la cantidad de grava (seca) multiplicada por su humedad:

$$\text{Cantidad de grava (sss)} = 764.33 \times 1.01 = 772 \text{ kg/m}^3$$

- Cantidad de grava es de 772.00 kg/m³

Conociendo los consumos de agua, cemento y grava, el material restante que completa un metro cúbico de concreto debe consistir en arena y aire que pueda quedar incluido.

La cantidad de arena resultante será lo que falte para completar el metro cúbico de concreto, ese volumen de arena es multiplicado por su densidad SSS y así se obtiene la cantidad en kilogramos.

Tabla B-4: Proporcionamiento preliminar mezcla $f'c=150\text{kg/cm}^2$.

Proporcionamiento	Masa (kg/m³)	Densidad (kg/l)	Volumen (l)
Agua	205.0	1	205.0
Cemento	267	3.15	84.76
Grava (S.S.S)	772	2.30	335.64
Aire (%)	2.0		20.0
Arena	865.27	2.44	354.62

Haciendo la corrección por humedad y absorción:

$$\text{Humedad de la grava} - \text{Absorción de la grava} = 0.01 - 0.06 = 0.06$$

$$\text{Cantidad de agua adicional para la grava} = 0.06 \times 771.97 = 43.46 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Humedad de la arena} - \text{Absorción de la arena} = 0.00 - 0.04 = 0.04$$

$$\text{Cantidad de agua adicional para la arena} = 0.04 \times 865.27 = 36.86 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total de agua adicional: } 43.46 + 36.86 = 80.32 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Cantidad de agua final: } 80.32 + 205 = 285.32 \text{ kg/m}^3$$

Tabla B-5: Proporcionamiento final mezcla $f'c=150\text{kg/cm}^2$.

Proporcionamiento	Masa (kg/m³)	Densidad (kg/l)	Volumen (l)
Agua	285	1	285
Cemento	267	3.15	84.76
Grava (S.S.S)	772	2.30	335.65
Aire (%)	2.0		20.0
Arena	865	2.44	354.51

B.2. Mezcla $f'c=250\text{kg/cm}^2$.

Con los datos de revenimiento y tamaño máximo del agregado grueso se calcula la cantidad de agua en la siguiente tabla:

Tabla B-1: Estimación del agua de mezclado y contenido de aire.

Concreto sin aire incluido								
Agua por kg/m^3 de concreto para tamaños máximo de agregado indicados								
Revenimiento (mm)	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	169	
Aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

- Revenimiento de 7.5 a 10 cm
- Tamaño máximo del agregado de 19 mm
- Cantidad de agua de 205 kg/m^3
- Aire atrapado de 2%

Con la resistencia a compresión se obtiene la relación agua/cemento con la siguiente tabla:

Tabla B-2: Correspondencia entre agua cemento y resistencia a compresión.

Relación agua/cemento por peso		
Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm^2	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	-
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Debido a que el valor de resistencia se encuentra entre 210 y 280 kg/cm², se obtiene el valor por medio de interpolación, dando un valor de: 0.59

La cantidad de cemento se obtiene del contenido de agua y la relación agua/cemento.

$$\text{cantidad de cemento} = \frac{\text{cantidad de agua}}{\text{relación agua/cemento}} = \frac{205}{0.59} = 346 \text{ kg/m}^3$$

- Cantidad de cemento de 346 kg/m³

El volumen de agregado grueso se obtiene de la siguiente tabla con el tamaño máximo del agregado y el módulo de finura.

Tabla B-3: Estimación del contenido de gravas.

Tamaño máximo de agregado	Volumen de grava compactada por unidad de Volumen de concreto para diferentes módulos de finura			
	2.4	2.6	2.8	3
9.5	0.5	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.6
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.8	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

- Módulo de finura de 2.9
- El volumen de agregado grueso de igual manera se obtiene por interpolación dando un valor de 0.61 m³

La cantidad de grava se obtiene multiplicando su volumen por su peso volumétrico.

$$\text{Cantidad de grava (seca)} = 0.61 \times 1,253 = 764.33 \text{ kg/m}^3$$

La cantidad de grava (sss) es igual a la cantidad de grava (seca) multiplicada por su humedad:

$$\text{Cantidad de grava (sss)} = 764.33 \times 1.01 = 772 \text{ kg/m}^3$$

- Cantidad de grava es de 772 kg/m³

Conociendo los consumos de agua, cemento y grava, el material restante que completa un metro cúbico de concreto debe consistir en arena y aire que pueda quedar incluido.

La cantidad de arena resultante será lo que falte para completar el metro cúbico de concreto, ese volumen de arena es multiplicado por su densidad SSS y así se obtiene la cantidad en kilogramos.

Tabla B-4: Proporcionamiento preliminar mezcla $f'c=250\text{kg/cm}^2$.

Proporcionamiento	Masa (kg/m³)	Densidad (kg/l)	Volumen (l)
Agua	205.0	1	205
Cemento	346	3.15	110
Grava (S.S.S)	772	2.30	336
Aire (%)	2.0		20
Arena	804	2.44	329

Haciendo la corrección por humedad y absorción:

$$\text{Humedad de la grava} - \text{Absorción de la grava} = 0.01 - 0.06 = 0.06$$

$$\text{Cantidad de agua adicional para la grava} = 0.06 \times 771.97 = 43.46 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Humedad de la arena} - \text{Absorción de la arena} = 0.00 - 0.04 = 0.04$$

$$\text{Cantidad de agua adicional para la arena} = 0.04 \times 804 = 34.24 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total de agua adicional: } 43.46 + 34.24 = 77.70 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Cantidad de agua final: } 77.70 + 205 = 282.70 \text{ kg/m}^3$$

Tabla B-5: Proporcionamiento final mezcla $f'c=250\text{kg/cm}^2$.

Proporcionamiento	Masa (kg/m³)	Densidad (kg/l)	Volumen (l)
Agua	283	1	283
Cemento	346	3.15	110
Grava (S.S.S)	772	2.30	336
Aire (%)	2.0		20.0
Arena	804	2.44	330

B.3. Mezcla $f'c=350\text{kg/cm}^2$.

Con los datos de revenimiento y tamaño máximo del agregado grueso se calcula la cantidad de agua en la siguiente tabla:

Tabla B-1: Estimación del agua de mezclado y contenido de aire.

Concreto sin aire incluido								
Agua por kg/m^3 de concreto para tamaños máximo de agregado indicados								
Revenimiento (mm)	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	169	
Aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

- Revenimiento de 7.5 a 10 cm
- Tamaño máximo del agregado de 19 mm
- Cantidad de agua de 205 kg/m^3
- Aire atrapado de 2%

Con la resistencia a compresión se obtiene la relación agua/cemento con la siguiente tabla:

Tabla B-2: Correspondencia entre agua cemento y resistencia a compresión.

Relación agua/cemento por peso		
Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm^2	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	-
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Para la resistencia de 350 se toma un valor de: 0.464

La cantidad de cemento se obtiene del contenido de agua y la relación agua/cemento.

$$\text{cantidad de cemento} = \frac{\text{cantidad de agua}}{\text{relación agua/cemento}} = \frac{205}{0.464} = 442 \text{ kg/m}^3$$

- Cantidad de cemento de 442 kg/m³

El volumen de agregado grueso se obtiene de la siguiente tabla con el tamaño máximo del agregado y el módulo de finura.

Tabla B-3: Estimación del contenido de gravas.

Tamaño máximo de agregado	Volumen de grava compactada por unidad de Volumen de concreto para diferentes módulos de finura			
	2.4	2.6	2.8	3
9.5	0.5	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.6
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.8	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

- Módulo de finura de 2.9
- El volumen de agregado grueso de igual manera se obtiene por interpolación dando un valor de 0.61 m³

La cantidad de grava se obtiene multiplicando su volumen por su peso volumétrico.

$$\text{Cantidad de grava (seca)} = 0.61 \times 1,253 = 764.33 \text{ kg/m}^3$$

La cantidad de grava (sss) es igual a la cantidad de grava (seca) multiplicada por su humedad:

$$\text{Cantidad de grava (sss)} = 764.33 \times 1.01 = 772 \text{ kg/m}^3$$

- Cantidad de grava es de 772 kg/m³

Conociendo los consumos de agua, cemento y grava, el material restante que completa un metro cúbico de concreto debe consistir en arena y aire que pueda quedar incluido.

La cantidad de arena resultante será lo que falte para completar el metro cúbico de concreto, ese volumen de arena es multiplicado por su densidad SSS y así se obtiene la cantidad en kilogramos.

Tabla B-4: Proporcionamiento preliminar mezcla $f'c=250\text{kg/cm}^2$.

Proporcionamiento	Masa (kg/m³)	Densidad (kg/l)	Volumen (l)
Agua	205.0	1	205
Cemento	442	3.15	140
Grava (S.S.S)	772	2.30	336
Aire (%)	2.0		20
Arena	729	2.44	229

Haciendo la corrección por humedad y absorción:

$$\text{Humedad de la grava} - \text{Absorción de la grava} = 0.01 - 0.06 = 0.06$$

$$\text{Cantidad de agua adicional para la grava} = 0.06 \times 771.97 = 43.46 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Humedad de la arena} - \text{Absorción de la arena} = 0.00 - 0.04 = 0.04$$

$$\text{Cantidad de agua adicional para la arena} = 0.04 \times 729 = 31.08 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total de agua adicional: } 43.46 + 31.08 = 74.55 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Cantidad de agua final: } 74.55 + 205 = 279.55 \text{ kg/m}^3$$

Tabla B-5: Proporcionamiento final mezcla $f'c=350\text{kg/cm}^2$.

Proporcionamiento	Masa (kg/m³)	Densidad (kg/l)	Volumen (l)
Agua	280	1	280
Cemento	442	3.15	140
Grava (S.S.S)	772	2.30	336
Aire (%)	2.0		20.0
Arena	730	2.44	299

APÉNDICE C. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

C.1.Resistencia a compresión - $f'c=150\text{kg/cm}^2$

$f'c=150\text{kg/cm}^2$						
Edad (días)	Espécimen	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga de Ruptura (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	
1	M3-C1-1-L	15.21	181.61	12,252	67.47	
	M3-C2-1-L	15.19	181.20	11,238	62.02	
	M3-C3-1-L	15.19	181.12	11,496	63.47	
	M3-C4-1-L	15.01	176.97	12,355	69.81	
	M3-C5-1-L	15.20	181.35	12,547	69.19	
					Promedio	66.39
					σ	3.48
				Coef. Var.	5%	
3	M3-C6-3-L	15.19	181.20	19,592	108.13	
	M3-C7-3-L	14.97	176.09	19,463	110.53	
	M3-C8-3-L	14.96	175.75	18,108	103.03	
	M3-C9-3-L	14.94	175.30	18,535	105.74	
	M3-C10-3-L	15.02	177.29	20,305	114.53	
					Promedio	108.39
					σ	4.42
				Coef. Var.	4%	
7	M3-C11-7-L	15.18	181.09	24,456	135.05	
	M3-C12-7-L	15.24	182.35	21,730	119.16	
	M3-C13-7-L	15.25	182.63	20,398	111.69	
	M3-C14-7-L	15.28	183.30	22,099	120.56	
	M3-C15-7-L	15.26	182.79	22,237	121.66	
					Promedio	121.62
					σ	8.46
				Coef. Var.	7%	
14	M3-C16-14-L	15.18	181.09	23,587	130.25	
	M3-C17-14-L	15.24	182.35	24,627	135.05	
	M3-C18-14-L	15.25	182.63	23,005	125.96	
	M3-C19-14-L	15.28	183.30	23,826	129.99	
	M3-C20-14-L	15.26	182.79	23,337	127.67	
					Promedio	129.78
					σ	3.43
				Coef. Var.	3%	
28	M3-C21-28-L	15.28	183.27	25,947	141.58	
	M3-C22-28-L	15.26	182.80	27,811	152.14	
	M3-C23-28-L	15.26	182.88	25,551	139.71	
	M3-C24-28-L	15.27	183.12	25,877	141.31	
	M3-C25-28-L	15.21	181.59	25,911	142.69	
					Promedio	143.49
					σ	4.95
				Coef. Var.	3%	

C.2.Resistencia a compresión - $f'c=250\text{kg/cm}^2$

$f'c=250\text{kg/cm}^2$						
Edad (días)	Espécimen	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga de Ruptura (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	
1	M1-C1-1-L	15.20	181.46	13,327	73.44	
	M1-C2-1-L	15.00	176.71	14,291	80.87	
	M1-C3-1-L	15.20	181.46	16,251	89.56	
	M1-C4-1-L	15.30	183.85	-	-	
	M1-C5-1-L	15.20	181.46	14,693	80.97	
					Promedio	81.21
					σ	6.59
				Coef. Var.	8%	
3	M1-C6-3-L	15.20	181.46	21,042	115.96	
	M1-C7-3-L	15.00	176.71	24,975	141.33	
	M1-C8-3-L	15.30	183.85	22,581	122.82	
	M1-C9-3-L	15.30	183.85	24,583	133.71	
	M1-C10-3-L	15.20	181.46	24,696	136.10	
					Promedio	129.98
				σ	10.34	
				Coef. Var.	8%	
7	M1-C11-7-L	15.30	183.85	37,651	204.79	
	M1-C12-7-L	15.20	181.46	35,967	198.21	
	M1-C13-7-L	15.00	176.71	35,388	200.26	
	M1-C14-7-L	15.30	183.85	32,257	175.45	
	M1-C15-7-L	15.30	183.85	32,420	176.34	
					Promedio	191.01
				σ	14.01	
				Coef. Var.	7%	
14	M1-C16-14-L	15.00	176.71	42,053	237.97	
	M1-C17-14-L	15.30	183.85	38,124	207.36	
	M1-C18-14-L	15.30	183.85	37,338	203.09	
	M1-C19-14-L	15.30	183.85	37,901	206.15	
	M1-C20-14-L	15.30	183.85	36,036	196.00	
					Promedio	210.11
				σ	16.18	
				Coef. Var.	8%	
28	M1-C21-28-L	15.00	176.71	41,221	233.26	
	M1-C22-28-L	15.00	176.71	39,491	223.47	
	M1-C23-28-L	15.00	176.71	41,142	232.81	
	M1-C24-28-L	15.00	176.71	43,595	246.70	
	M1-C25-28-L	15.00	176.71	41,839	236.76	
					Promedio	234.60
				σ	8.36	
				Coef. Var.	4%	

C.3.Resistencia a compresión - $f'c=350\text{kg/cm}^2$

$f'c=350\text{kg/cm}^2$						
Edad (días)	Espécimen	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga de Ruptura (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	
1	M2-C1-1-L	15.30	183.85	22,758	123.79	
	M2-C2-1-L	15.30	183.85	23,922	130.12	
	M2-C3-1-L	15.00	176.71	23,335	132.05	
	M2-C4-1-L	15.30	183.85	23,823	129.57	
	M2-C5-1-L	15.30	183.85	22,811	124.07	
					Promedio	127.92
					σ	3.76
				Coef. Var.	3%	
3	M2-C6-3-L	15.20	181.46	35,385	195.00	
	M2-C7-3-L	15.30	183.85	34,556	187.95	
	M2-C8-3-L	15.30	183.85	38,147	207.49	
	M2-C9-3-L	15.20	181.46	37,814	208.39	
	M2-C10-3-L	15.20	181.46	36,983	203.81	
					Promedio	200.53
					σ	8.80
				Coef. Var.	4%	
7	M2-C11-7-L	15.30	183.85	49,058	266.83	
	M2-C12-7-L	15.20	181.46	45,260	249.42	
	M2-C13-7-L	15.00	176.71	39,046	220.96	
	M2-C14-7-L	15.30	183.85	49,937	271.61	
	M2-C15-7-L	15.20	181.46	50,336	277.40	
					Promedio	257.25
					σ	22.82
				Coef. Var.	9%	
14	M2-C16-14-L	15.20	181.46	53,407	294.32	
	M2-C17-14-L	15.30	183.85	53,251	289.64	
	M2-C18-14-L	15.30	183.85	55,848	303.76	
	M2-C19-14-L	15.20	181.46	50,677	279.28	
	M2-C20-14-L	15.30	183.85	54,529	296.59	
					Promedio	292.72
					σ	9.08
				Coef. Var.	3%	
28	M2-C21-28-L	15.20	181.46	58,200	320.73	
	M2-C22-28-L	15.30	183.85	57,600	313.29	
	M2-C23-28-L	15.30	183.85	57,000	310.03	
	M2-C24-28-L	15.20	181.46	55,800	307.51	
	M2-C25-28-L	15.30	183.85	56,400	306.77	
					Promedio	311.67
					σ	5.68
				Coef. Var.	2%	

C.4.Resistencia a compresión en intemperie - $f'c=150\text{kg/cm}^2$

$f'c=150\text{kg/cm}^2$					
Edad (días)	Especimen	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga de Ruptura (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)
7	M1-C26-7-I	15.18	181.03	24,648	136.15
	M1-C27-7-I	15.28	183.26	25,084	136.88
				Promedio	136.52
				σ	0.51
			Coef. Var.	0%	
14	M1-C28-14-I	15.18	181.03	30,753	169.88
	M1-C29-14-I	15.28	183.26	31,295	170.77
				Promedio	170.33
				σ	0.63
			Coef. Var.	0%	
28	M1-C30-28-I	14.96	175.67	33,379	190.01
	M1-C31-28-I	14.97	176.10	31,779	180.46
	M1-C32-28-IS	15.24	182.51	30,848	169.02
	M1-C33-28-IS	15.23	182.15	31,053	170.48
				Promedio	177.49
				σ	9.77
			Coef. Var.	6%	

C.5. Resistencia a compresión en intemperie - $f'c=250\text{kg/cm}^2$

$f'c=250\text{kg/cm}^2$					
Edad (días)	Espécimen	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga de Ruptura (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)
7	M1-C26-7-I	15.30	183.85	34,837	189.48
	M1-C27-7-I	15.00	176.71	34,133	193.15
				Promedio	191.32
				σ	2.59
			Coef. Var.	1%	
14	M1-C28-14-I	15.30	183.85	42,160	229.31
	M1-C29-14-I	15.30	183.85	44,500	242.04
				Promedio	235.68
				σ	9.00
			Coef. Var.	4%	
28	M1-C30-28-I	15.30	183.85	44,560	242.37
	M1-C31-28-I	15.20	181.46	44,698	246.33
	M1-C32-28-IS	15.00	176.71	42,504	240.52
	M1-C33-28-IS	15.20	181.46	42,770	235.70
				Promedio	241.23
				σ	4.41
			Coef. Var.	2%	

C.6. Resistencia a compresión en intemperie - $f'c=350\text{kg/cm}^2$

$f'c=350\text{kg/cm}^2$					
Edad (días)	Especimen	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga de Ruptura (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)
7	M2-C26-7-I	15.30	183.85	52,623	286.22
	M2-C27-7-I	15.00	176.71	48,929	276.88
				Promedio	281.55
				σ	6.60
			Coef. Var.	2%	
14	M2-C28-14-I	15.30	183.85	55,358	301.10
	M2-C29-14-I	15.30	183.85	60,649	329.88
				Promedio	315.49
				σ	20.35
			Coef. Var.	6%	
28	M2-C30-28-I	15.30	183.85	61,200	332.87
	M2-C31-28-I	15.20	183.85	61,250	333.15
	M2-C32-28-IS	15.00	183.85	58,800	319.82
	M2-C33-28-IS	15.20	183.85	60,250	327.71
				Promedio	323.76
				σ	5.58
			Coef. Var.	2%	

APÉNDICE D. MÓDULOS DE ELASTICIDAD

D.1. Módulos de elasticidad - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 1 día.

<i>Resumen valores $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 1 día</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm²)</i>
M3-C1-1-L	Frontal	0.00005	0.00017	11	27	133,559
	Derecha	0.00005	0.00015	15	27	127,859
	Izquierda	0.00005	0.00018	11	27	126,270
	Promedio	0.00005	0.00017	12	27	129,230
M3-C2-1-L	Frontal	0.00003	0.00024	8	23	66,091
	Derecha	0.00003	0.00019	8	23	89,713
	Izquierda	0.00004	0.00008	15	23	179,739
	Promedio	0.00003	0.00017	10	23	111,848
M3-C3-1-L	Frontal	0.00005	0.00013	14	25	140,648
	Derecha	0.00005	0.00015	11	25	123,740
	Izquierda	0.00005	0.00010	15	25	192,391
	Promedio	0.00005	0.00013	13	25	152,259
M3-C4-1-L	Frontal	0.00005	0.00013	16	28	149,039
	Derecha	0.00007	0.00023	13	28	88,510
	Izquierda	0.00005	0.00011	15	28	198,444
	Promedio	0.00005	0.00016	14	28	145,331
M3-C5-1-L	Frontal	0.00005	0.00015	13	29	158,953
	Derecha	0.00007	0.00024	10	29	106,354
	Izquierda	0.00005	0.00010	23	29	121,386
	Promedio	0.00006	0.00016	15	29	128,898
	PROMEDIO	0.00005	0.00016	13	26	131,268
	σ	0.00001	0.00004	3.12	2.21	22,796.71
	Coef. Var.	20%	28%	24%	8%	17%

D.2.Módulos de Elasticidad - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 3 días.

<i>Resumen valores - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 3 días</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm^2)</i>
M3-C6-3-L	Frontal	0.00005	0.00021	14	43	189,388
	Derecha	0.00005	0.00023	18	43	143,976
	Izquierda	0.00005	0.00023	12	43	176,081
	Promedio	0.00005	0.00022	14	43	169,815
M3-C7-3-L	Frontal	0.00005	0.00040	11	43	89,930
	Derecha	0.00005	0.00021	18	43	155,847
	Izquierda	0.00005	0.00025	15	43	138,533
	Promedio	0.00005	0.00029	15	43	128,103
M3-C8-3-L	Frontal	0.00005	0.00023	14	42	156,850
	Derecha	0.00005	0.00023	15	42	151,955
	Izquierda	0.00005	0.00026	13	42	137,017
	Promedio	0.00005	0.00024	14	42	148,607
M3-C9-3-L	Frontal	0.00005	0.00022	14	43	169,707
	Derecha	0.00005	0.00027	12	43	139,661
	Izquierda	0.00005	0.00018	18	43	184,801
	Promedio	0.00005	0.00023	15	43	164,723
M3-C10-3-L	Frontal	0.00005	0.00025	16	46	152,761
	Derecha	0.00005	0.00031	11	46	138,485
	Izquierda	0.00005	0.00025	15	46	158,201
	Promedio	0.00005	0.00027	14	46	149,816
	PROMEDIO	0.00005	0.00025	14	44	152,991
	σ	0.00000	0.00005	2.04	1.39	13,299.72
	Coef. Var.	3%	18%	14%	3%	9%

D.3. Módulos de elasticidad - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 7 días.

<i>Resumen valores - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 7 días</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm^2)</i>
M3-C11-7-L	Frontal	0.00005	0.00024	17	53	187,683
	Derecha	0.00005	0.00028	15	53	165,540
	Izquierda	0.00005	0.00024	14	53	206,166
	Promedio	0.00005	0.00025	15	53	186,463
M3-C12-7-L	Frontal	0.00005	0.00039	14	50	106,503
	Derecha	0.00005	0.00032	12	50	140,506
	Izquierda	0.00005	0.00027	12	50	172,147
	Promedio	0.00005	0.00033	13	50	139,719
M3-C13-7-L	Frontal	0.00005	0.00018	15	44	215,823
	Derecha	0.00005	0.00017	21	44	193,999
	Izquierda	0.00005	0.00030	12	44	126,180
	Promedio	0.00005	0.00022	16	44	178,668
M3-C14-7-L	Frontal	0.00005	0.00021	15	44	182,770
	Derecha	0.00005	0.00031	10	44	131,240
	Izquierda	0.00005	0.00019	16	44	200,061
	Promedio	0.00005	0.00024	14	44	171,357
M3-C15-7-L	Frontal	0.00005	0.00021	18	54	220,932
	Derecha	0.00005	0.00030	9	54	187,777
	Izquierda	0.00005	0.00037	17	54	118,408
	Promedio	0.00005	0.00029	14	54	175,706
	PROMEDIO	0.00005	0.00027	14	49	166,176
	σ	0.00000	0.00006	2.67	4.24	29,203.45
	Coef. Var.	5%	22%	19%	9%	18%

D.4. Módulos de elasticidad - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 14 días.

<i>Resumen valores - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 14 días</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm^2)</i>
M3-C16-14-L	Frontal	0.00005	0.00021	17	53	225,560
	Derecha	0.00005	0.00022	14	53	225,129
	Izquierda	0.00005	0.00029	19	53	144,098
	Promedio	0.00005	0.00024	17	53	198,262
M3-C17-14-L	Frontal	0.00004	0.00051	14	59	98,056
	Derecha	0.00005	0.00031	17	59	164,445
	Izquierda	0.00005	0.00031	17	59	163,965
	Promedio	0.00005	0.00037	16	59	142,155
M3-C18-14-L	Frontal	0.00005	0.00024	16	53	204,679
	Derecha	0.00005	0.00031	16	53	147,800
	Izquierda	0.00006	0.00028	11	53	190,943
	Promedio	0.00005	0.00027	14	53	181,141
M3-C19-14-L	Frontal	0.00005	0.00025	20	56	174,813
	Derecha	0.00005	0.00020	23	56	220,731
	Izquierda	0.00008	0.00031	13	56	179,431
	Promedio	0.00006	0.00025	19	56	191,658
M3-C20-14-L	Frontal	0.00005	0.00027	18	56	182,947
	Derecha	0.00005	0.00021	18	56	248,061
	Izquierda	0.00006	0.00036	15	56	138,470
	Promedio	0.00006	0.00028	17	56	189,826
	PROMEDIO	0.00005	0.00028	16	55	173,695
	σ	0.00001	0.00007	2.57	2.43	19,368.95
	Coef. Var.	13%	25%	16%	4%	11%

D.5. Módulos de elasticidad - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 28 días.

<i>Resumen valores - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ - 28 días</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm²)</i>
M3-C21-28-L	Frontal	0.00005	0.00028	16	60	197,112
	Derecha	0.00006	0.00033	14	60	168,849
	Izquierda	0.00005	0.00025	17	60	214,957
	Promedio	0.00005	0.00028	16	60	193,639
M3-C22-28-L	Frontal	0.00000	0.00059	0	61	103,597
	Derecha	0.00006	0.00046	14	61	120,255
	Izquierda	0.00005	0.00012	38	61	319,611
	Promedio	0.00004	0.00039	17	61	181,155
M3-C23-28-L	Frontal	0.00005	0.00028	15	61	200,496
	Derecha	0.00005	0.00027	15	61	216,793
	Izquierda	0.00004	0.00044	7	61	132,291
	Promedio	0.00005	0.00033	12	61	183,194
M3-C24-28-L	Frontal	0.00005	0.00028	13	56	188,824
	Derecha	0.00005	0.00028	13	56	182,862
	Izquierda	0.00005	0.00026	14	56	200,893
	Promedio	0.00005	0.00027	13	56	190,860
M3-C25-28-L	Frontal	0.00005	0.00026	15	57	201,573
	Derecha	0.00007	0.00033	12	57	173,667
	Izquierda	0.00005	0.00034	14	57	149,235
	Promedio	0.00006	0.00031	14	57	174,825
	PROMEDIO	0.00005	0.00032	14	59	186,984
	σ	0.00001	0.00009	6.57	2.13	17,977.30
	Coef. Var.	27%	30%	45%	4%	10%

D.6. Módulos de elasticidad - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 1 día.

<i>Resumen valores $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 1 día</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm²)</i>
M1-C1-1-L	Frontal	0.00005	0.00018	13	29	126,434
	Derecha	0.00006	0.00029	9	29	90,491
	Izquierda	0.00005	0.00013	15	29	170,425
	Promedio	0.00005	0.00020	12	29	129,117
M1-C2-1-L	Frontal	0.00005	0.00019	12	32	138,358
	Derecha	0.00005	0.00024	9	32	117,165
	Izquierda	0.00005	0.00018	15	32	129,726
	Promedio	0.00005	0.00021	12	32	128,416
M1-C3-1-L	Frontal	0.00005	0.00022	13	36	136,350
	Derecha	0.00006	0.00027	9	36	128,506
	Izquierda	0.00005	0.00018	15	36	161,656
	Promedio	0.00005	0.00022	12	36	142,171
M1-C4-1-L	Frontal					
	Derecha					
	Izquierda					
	Promedio					
M1-C5-L	Frontal	0.00005	0.00019	12	32	150,354
	Derecha	0.00005	0.00022	8	32	145,776
	Izquierda	0.00005	0.00018	13	32	148,601
	Promedio	0.00005	0.00019	11	32	148,243
	PROMEDIO	0.00005	0.00021	12	32	140,008
	σ	0.00000	0.00004	2.06	2.52	14,114.08
	Coef. Var.	8%	18%	17%	8%	10%

D.7. Módulos de Elasticidad - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 3 días.

<i>Resumen valores $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 3 días</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm^2)</i>
M1-C6-3-L	Frontal	0.00005	0.00028	12	50	165,477
	Derecha	0.00006	0.00039	14	50	105,305
	Izquierda	0.00008	0.00024	10	50	240,817
	Promedio	0.00006	0.00031	12	50	170,533
M1-C7-3-L	Frontal	0.00005	0.00032	11	58	170,305
	Derecha	0.00005	0.00024	15	58	220,319
	Izquierda	0.00005	0.00027	17	58	189,356
	Promedio	0.00005	0.00028	14	58	193,327
M1-C8-3-L	Frontal	0.00005	0.00025	12	46	167,330
	Derecha	0.00006	0.00029	10	46	160,836
	Izquierda	0.00005	0.00025	12	46	174,929
	Promedio	0.00005	0.00026	11	46	167,698
M1-C9-3-L	Frontal	0.00005	0.00030	13	56	174,128
	Derecha	0.00005	0.00034	13	56	148,479
	Izquierda	0.00005	0.00024	14	56	220,449
	Promedio	0.00005	0.00030	13	56	181,019
M1-C10-3-L	Frontal	0.00005	0.00036	11	60	159,198
	Derecha	0.00006	0.00051	9	60	112,361
	Izquierda	0.00005	0.00020	30	60	202,439
	Promedio	0.00005	0.00036	17	60	157,999
	PROMEDIO	0.00005	0.00030	14	54	170,324
	σ	0.00001	0.00007	4.19	5.08	18,123.31
	Coef. Var.	13%	22%	31%	9%	11%

D.8. Módulos de elasticidad - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 7 días.

<i>Resumen valores $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 7 días</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm^2)</i>
M1-C11-7-L	Frontal	0.00005	0.00036	15	80	208,892
	Derecha	0.00005	0.00039	14	80	192,707
	Izquierda	0.00005	0.00033	16	80	227,713
	Promedio	0.00005	0.00036	15	80	209,771
M1-C12-7-L	Frontal	0.00005	0.00045	13	83	175,772
	Derecha	0.00006	0.00039	13	83	212,976
	Izquierda	0.00005	0.00049	13	83	159,892
	Promedio	0.00006	0.00044	13	83	182,880
M1-C13-7-L	Frontal	0.00005	0.00038	14	84	209,632
	Derecha	0.00008	0.00050	13	84	167,901
	Izquierda	0.00005	0.00031	18	84	257,521
	Promedio	0.00006	0.00040	15	84	211,685
M1-C14-7-L	Frontal	0.00005	0.00041	13	73	164,842
	Derecha	0.00007	0.00045	13	73	156,646
	Izquierda	0.00005	0.00038	18	73	166,972
	Promedio	0.00005	0.00041	15	73	162,820
M1-C15-7-L	Frontal	0.00005	0.00039	14	69	165,230
	Derecha	0.00005	0.00044	15	69	138,271
	Izquierda	0.00006	0.00035	11	69	201,408
	Promedio	0.00005	0.00039	13	69	168,303
	PROMEDIO	0.00005	0.00040	14	78	180,269
	σ	0.00001	0.00005	1.75	5.62	20,709.92
	Coef. Var.	12%	12%	12%	7%	11%

D.9. Módulos de elasticidad - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 14 días.

<i>Resumen valores $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 14 días</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm^2)</i>
M1-C16-14-L	Frontal	0.00005	0.00044	14	95	204,856
	Derecha	0.00006	0.00047	14	95	194,376
	Izquierda	0.00005	0.00044	14	95	210,074
	Promedio	0.00005	0.00045	14	95	203,102
M1-C17-14-L	Frontal	0.00005	0.00037	14	81	208,628
	Derecha	0.00005	0.00034	14	81	229,387
	Izquierda	0.00005	0.00032	14	81	243,723
	Promedio	0.00005	0.00034	14	81	227,246
M1-C18-14-L	Frontal	0.00005	0.00040	15	82	190,834
	Derecha	0.00007	0.00059	9	82	139,245
	Izquierda	0.00005	0.00027	29	82	237,477
	Promedio	0.00006	0.00042	18	82	189,186
M1-C19-14-L	Frontal	0.00005	0.00044	15	84	179,568
	Derecha	0.00005	0.00051	12	84	158,491
	Izquierda	0.00005	0.00024	28	84	291,094
	Promedio	0.00005	0.00039	18	84	209,718
M1-C20-14-L	Frontal	0.00005	0.00039	18	78	177,523
	Derecha	0.00006	0.00043	12	78	177,268
	Izquierda	0.00005	0.00023	31	78	262,296
	Promedio	0.00005	0.00035	20	78	205,696
	PROMEDIO	0.00005	0.00039	17	84	189,053
	σ	0.00000	0.00009	5.84	5.80	18,378.30
	Coef. Var.	8%	22%	34%	7%	10%

D.10. Módulos de elasticidad - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 28 días.

<i>Resumen valores $f'c=250\text{kg/cm}^2$ - 28 días</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm^2)</i>
M1-C21-28-L	Frontal	0.00005	0.00035	27	92	214,393
	Derecha	0.00005	0.00036	15	92	243,458
	Izquierda	0.00005	0.00039	20	92	207,371
	Promedio	0.00005	0.00037	21	92	221,741
M1-C22-28-L	Frontal	0.00005	0.00037	19	89	223,164
	Derecha	0.00005	0.00049	15	89	167,594
	Izquierda	0.00005	0.00040	17	89	205,281
	Promedio	0.00005	0.00042	17	89	198,680
M1-C23-28-L	Frontal	0.00005	0.00035	28	96	227,997
	Derecha	0.00005	0.00039	17	96	238,705
	Izquierda	0.00005	0.00043	21	96	200,277
	Promedio	0.00005	0.00039	22	96	222,326
M1-C24-28-L	Frontal	0.00005	0.00043	25	104	207,121
	Derecha	0.00005	0.00044	25	104	201,444
	Izquierda	0.00005	0.00047	20	104	199,916
	Promedio	0.00005	0.00045	23	104	202,827
M1-C25-28-L	Frontal	0.00005	0.00036	25	94	223,667
	Derecha	0.00005	0.00051	18	94	163,977
	Izquierda	0.00005	0.00032	20	94	276,524
	Promedio	0.00005	0.00040	21	94	221,389
	PROMEDIO	0.00005	0.00040	21	95	211,039
	σ	0.00000	0.00005	3.75	5.03	20,868.17
	Coef. Var.	3%	13%	18%	5%	10%

D.11. Módulos de elasticidad - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 1 día.

<i>Resumen valores $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 1 día</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm^2)</i>
M2-C1-1-L	Frontal	0.00005	0.00025	18	49	155,182
	Derecha	0.00005	0.00027	14	49	155,118
	Izquierda	0.00005	0.00029	10	49	157,855
	Promedio	0.00005	0.00027	14	49	157,222
M2-C2-1-L	Frontal	0.00005	0.00025	17	50	167,483
	Derecha	0.00006	0.00039	8	50	126,382
	Izquierda	0.00005	0.00027	20	50	133,047
	Promedio	0.00005	0.00030	14	50	141,127
M2-C3-1-L	Frontal	0.00005	0.00031	13	59	175,827
	Derecha	0.00007	0.00045	8	59	131,655
	Izquierda	0.00001	0.00029	10	59	172,468
	Promedio	0.00005	0.00035	11	59	161,123
M2-C4-1-L	Frontal	0.00005	0.00029	15	51	151,396
	Derecha	0.00006	0.00036	9	51	138,153
	Izquierda	0.00001	0.00030	10	51	136,584
	Promedio	0.00005	0.00032	13	51	141,005
M1-C5-1-L	Frontal	0.00005	0.00027	15	50	156,928
	Derecha	0.00006	0.00031	11	50	153,647
	Izquierda	0.00005	0.00033	11	50	137,516
	Promedio	0.00004	0.00031	11	50	149,355
	PROMEDIO	0.00005	0.00031	13	52	153,203
	σ	0.00002	0.00005	3.22	3.63	11,883.41
	Coef. Var.	31%	16%	26%	7%	8%

D.12. Módulos de Elasticidad - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 3 días.

<i>Resumen valores $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 3 días</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm^2)</i>
M2-C6-3-L	Frontal	0.00005	0.00038	15	78	190,796
	Derecha	0.00007	0.00040	15	78	188,760
	Izquierda	0.00005	0.00039	17	78	180,938
	Promedio	0.00005	0.00039	15	78	187,269
M2-C7-3-L	Frontal	0.00005	0.00034	24	77	185,065
	Derecha	0.00005	0.00037	16	77	192,020
	Izquierda	0.00005	0.00045	12	77	160,194
	Promedio	0.00005	0.00039	18	77	176,748
M2-C8-3-L	Frontal	0.00005	0.00032	27	85	215,198
	Derecha	0.00005	0.00035	12	85	236,377
	Izquierda	0.00005	0.00048	21	85	148,906
	Promedio	0.00005	0.00039	21	85	189,774
M2-C9-3-L	Frontal	0.00005	0.00035	19	80	204,860
	Derecha	0.00005	0.00050	15	80	145,120
	Izquierda	0.00005	0.00033	14	80	237,224
	Promedio	0.00005	0.00039	15	80	188,817
M2-C10-3-L	Frontal	0.00005	0.00033	17	80	221,377
	Derecha	0.00008	0.00048	13	80	163,560
	Izquierda	0.00005	0.00027	28	80	231,821
	Promedio	0.00005	0.00036	16	80	202,130
	PROMEDIO	0.00005	0.00038	18	80	197,385
	σ	0.00001	0.00006	4.53	2.76	22,385.97
	Coef. Var.	12%	15%	26%	3%	11%

D.13. Módulos de elasticidad - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 7 días.

<i>Resumen valores $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 7 días</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm^2)</i>
M2-C11-7-L	Frontal	0.00005	0.00052	15	109	197,995
	Derecha	0.00006	0.00062	11	109	175,339
	Izquierda	0.00005	0.00050	22	109	191,499
	Promedio	0.00005	0.00055	14	109	190,502
M2-C12-7-L	Frontal	0.00005	0.00039	20	102	241,913
	Derecha	0.00005	0.00042	22	102	217,046
	Izquierda	0.00005	0.00050	16	102	195,604
	Promedio	0.00005	0.00044	18	102	217,727
M2-C13-7-L	Frontal	0.00005	0.00034	21	89	237,897
	Derecha	0.00006	0.00047	14	89	183,329
	Izquierda	0.00005	0.00036	21	89	219,016
	Promedio	0.00005	0.00039	18	89	209,034
M2-C14-7-L	Frontal	0.00005	0.00044	20	106	219,928
	Derecha	0.00005	0.00048	16	106	210,166
	Izquierda	0.00005	0.00050	19	106	192,330
	Promedio	0.00005	0.00047	19	106	205,946
M2-C15-7-L	Frontal	0.00005	0.00051	19	113	200,815
	Derecha	0.00005	0.00058	16	113	183,057
	Izquierda	0.00006	0.00056	12	113	200,931
	Promedio	0.00006	0.00055	16	113	195,239
	PROMEDIO	0.00005	0.00048	17	104	204,266
	σ	0.00000	0.00007	3.30	7.95	17,109.74
	Coef. Var.	8%	15%	19%	8%	8%

D.14. Módulos de elasticidad - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 14 días.

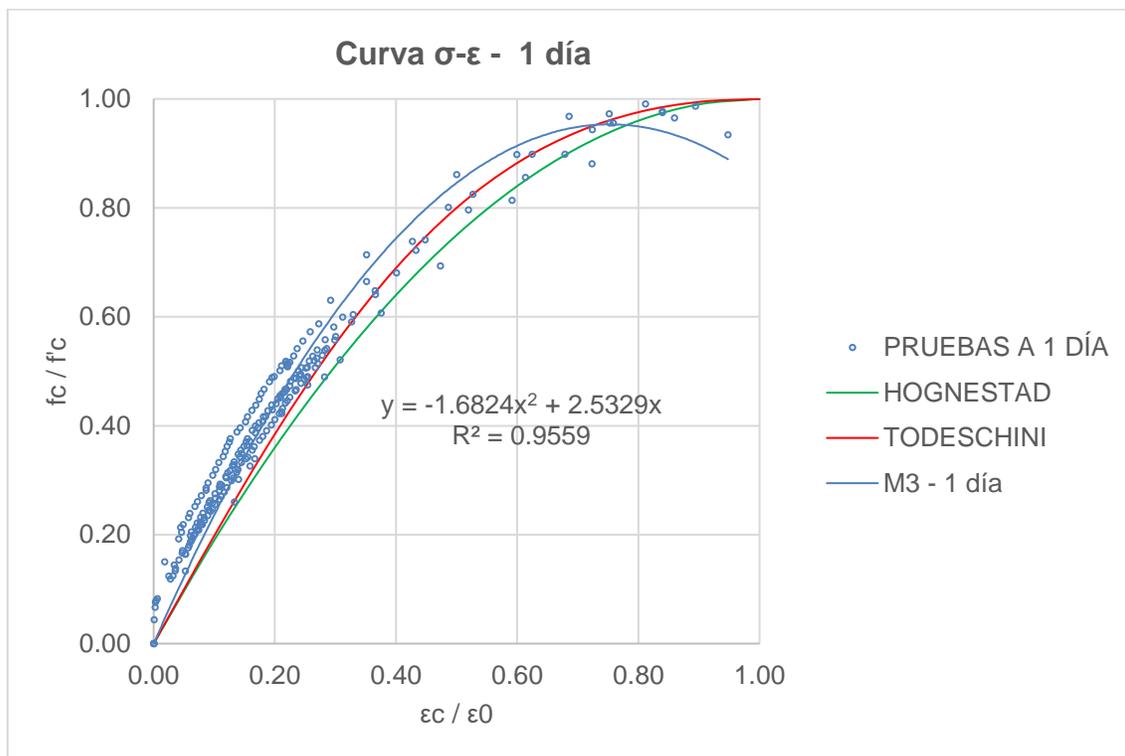
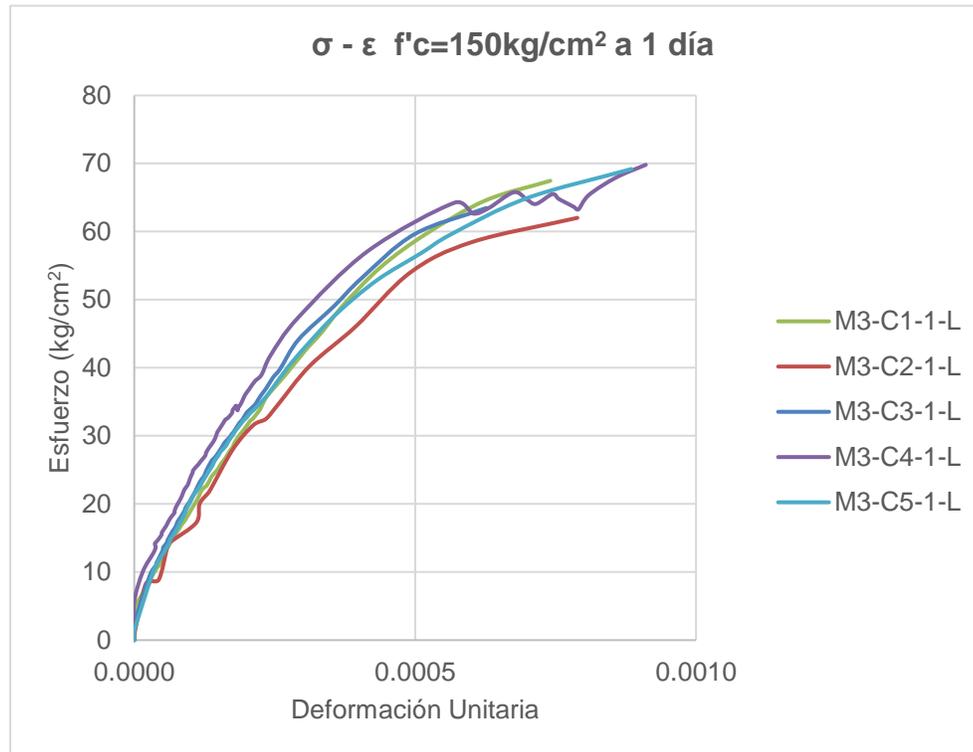
<i>Resumen valores $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 14 días</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm^2)</i>
M2-C16-14-L	Frontal	0.00005	0.00052	18	116	206,488
	Derecha	0.00004	0.00073	15	116	146,193
	Izquierda	0.00005	0.00049	15	116	232,298
	Promedio	0.00005	0.00058	15	116	188,359
M2-C17-14-L	Frontal	0.00006	0.00051	15	118	225,622
	Derecha	0.00005	0.00056	22	118	186,162
	Izquierda	0.00005	0.00062	13	118	184,672
	Promedio	0.00005	0.00057	15	118	199,113
M2-C18-14-L	Frontal	0.00005	0.00053	18	120	210,212
	Derecha	0.00005	0.00052	16	120	219,274
	Izquierda	0.00005	0.00055	23	120	193,258
	Promedio	0.00005	0.00054	18	120	208,431
M2-C19-14-L	Frontal	0.00005	0.00046	17	113	230,206
	Derecha	0.00005	0.00046	13	113	241,984
	Izquierda	0.00005	0.00060	15	113	177,438
	Promedio	0.00005	0.00051	15	113	212,453
M2-C20-14-L	Frontal	0.00005	0.00053	19	121	211,816
	Derecha	0.00005	0.00079	13	121	146,475
	Izquierda	0.00006	0.00046	12	121	271,197
	Promedio	0.00005	0.00059	13	121	198,159
	PROMEDIO	0.00005	0.00056	16	117	210,922
	σ	0.00000	0.00008	2.98	2.97	22,896.28
	Coef. Var.	6%	15%	18%	3%	11%

D.15. Módulos de elasticidad - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 28 días.

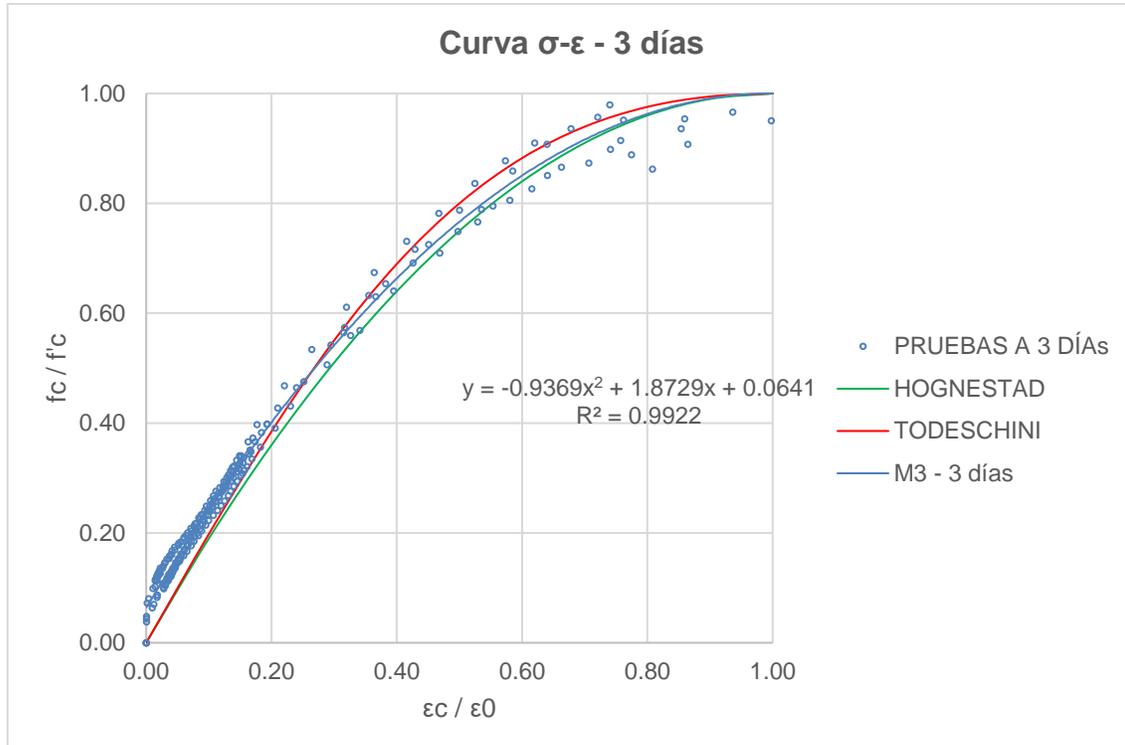
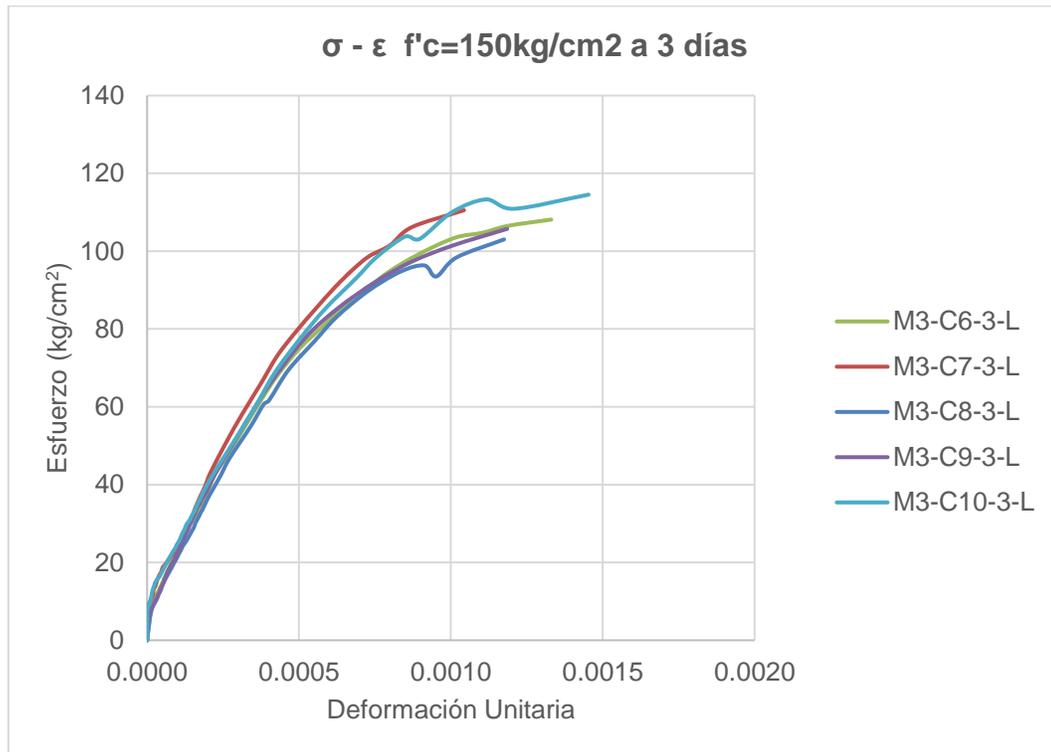
<i>Resumen valores $f'c=350\text{kg/cm}^2$ - 28 días</i>						
<i>Cilindro</i>	<i>Medición</i>	<i>Deformación 1</i>	<i>Deformación 2</i>	<i>Esfuerzo 1</i>	<i>Esfuerzo 2</i>	<i>Módulo de Elasticidad (kg/cm^2)</i>
M2-C21-28-L	Frontal	0.00005	0.00030	53	128	295,470
	Derecha	0.00006	0.00048	11	128	276,803
	Izquierda	0.00005	0.00030	68	128	243,742
	Promedio	0.00005	0.00036	35	128	294,330
M2-C22-28-L	Frontal	0.00006	0.00053	9	123	242,692
	Derecha	0.00006	0.00037	0	123	406,081
	Izquierda	0.00006	0.00055	9	123	233,107
	Promedio	0.00005	0.00048	5	123	273,796
M2-C23-28-L	Frontal	0.00007	0.00046	9	124	295,275
	Derecha	0.00004	0.00061	9	124	201,990
	Izquierda	0.00011	0.00048	9	124	309,892
	Promedio	0.00008	0.00052	9	124	259,418
M2-C24-28-L	Frontal	0.00005	0.00033	9	126	402,730
	Derecha	0.00005	0.00041	18	126	304,407
	Izquierda	0.00019	0.00064	4	126	269,131
	Promedio	0.00008	0.00046	4	126	319,992
M2-C25-28-L	Frontal	0.00004	0.00055	5	124	232,174
	Derecha	0.00007	0.00073	10	124	170,992
	Izquierda	0.00006	0.00055	5	124	241,385
	Promedio	0.00003	0.00061	5	124	206,174
	PROMEDIO	0.00006	0.00049	9	125	252,068
	σ	0.00001	0.00011	0.50	1.81	28,715.02
	Coef. Var.	19%	23%	5%	1%	11%

APÉNDICE E. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN

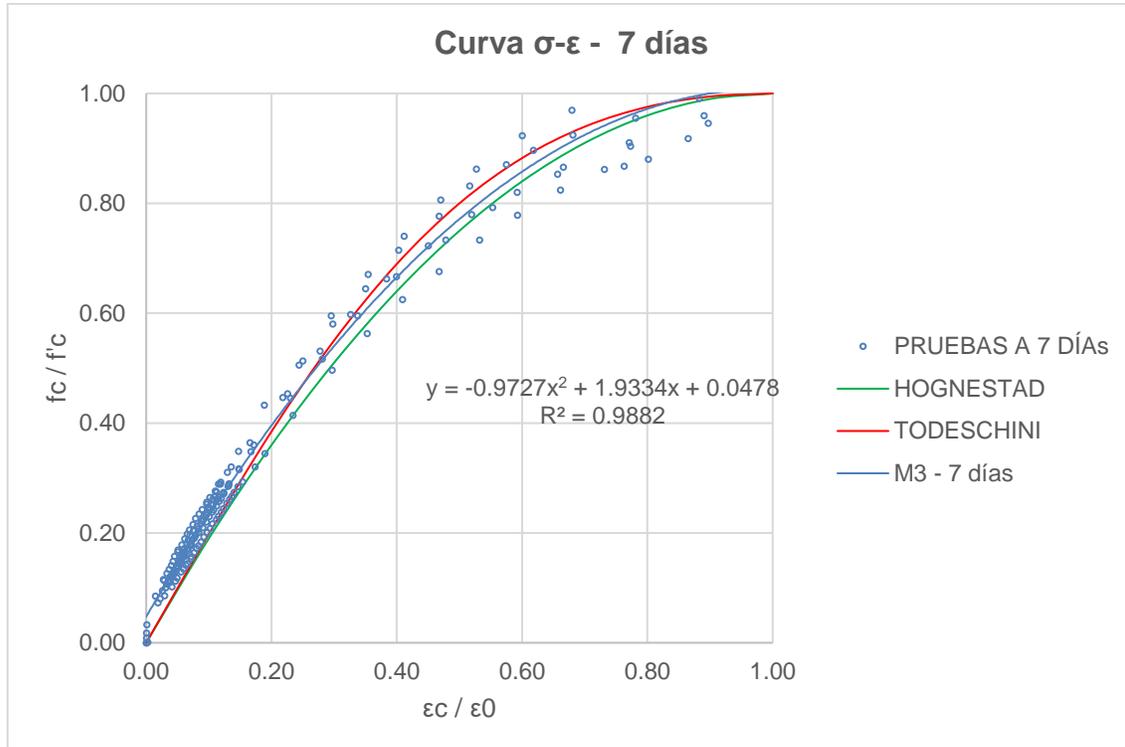
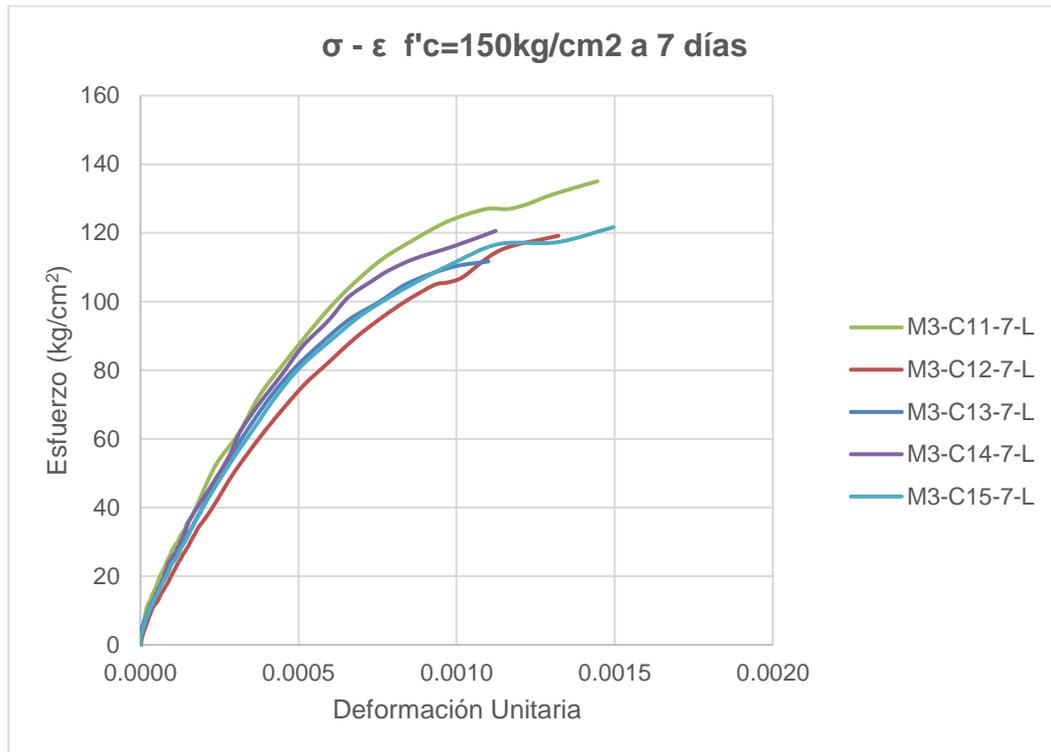
E.1. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=150\text{kg/cm}^2$ a 1 día.



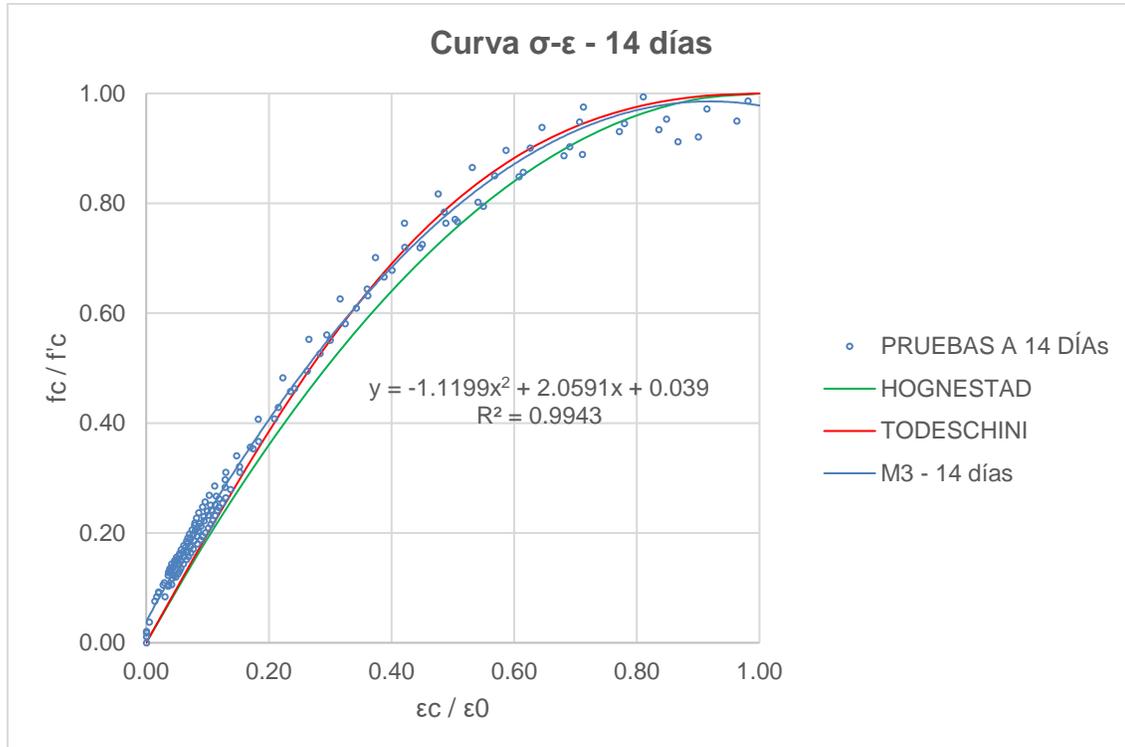
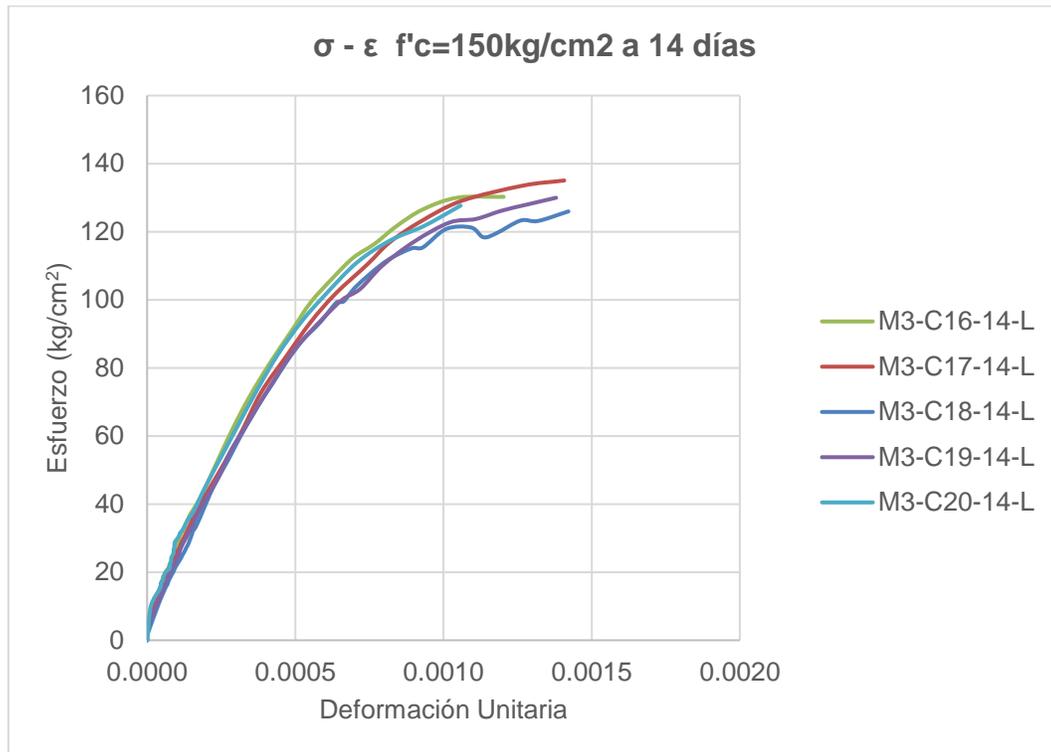
E.2. Curvas esfuerzo – deformación - $f'_c=150\text{kg/cm}^2$ a 3 días



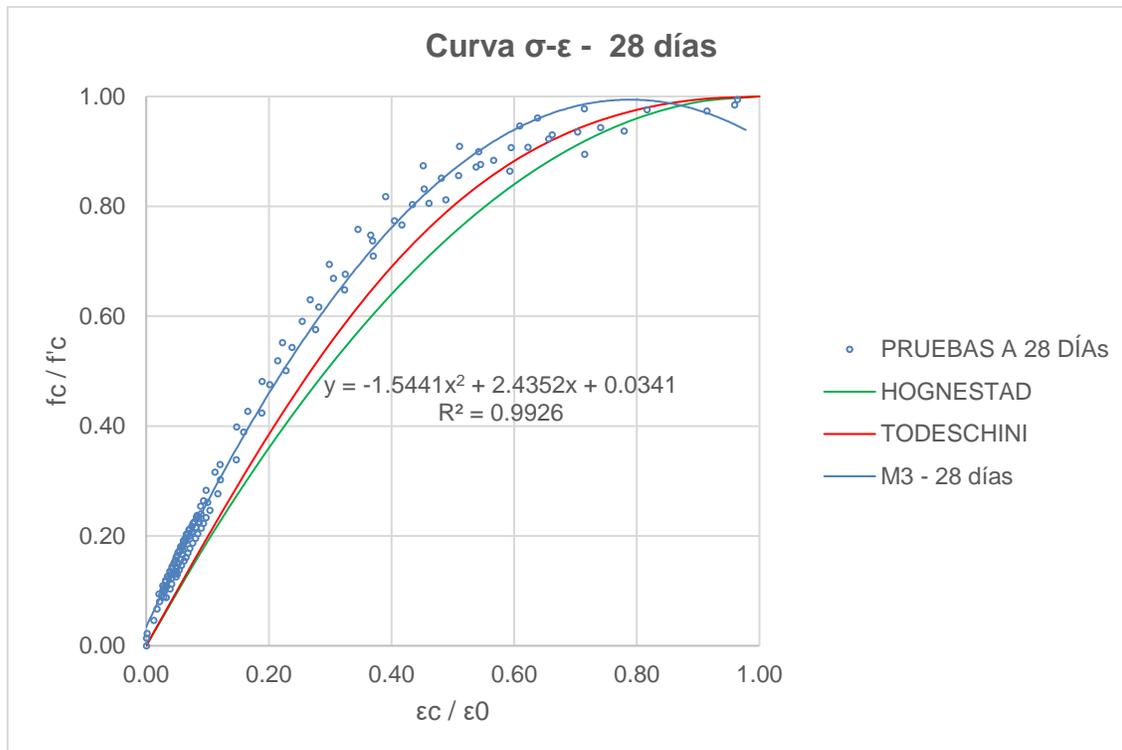
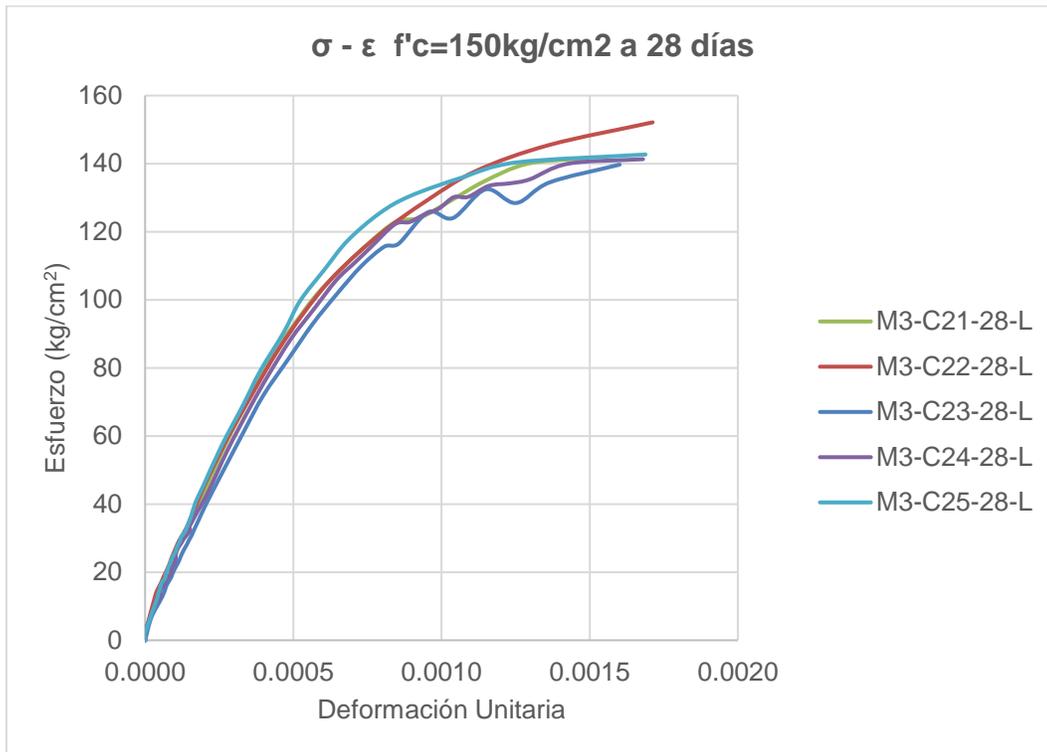
E.3. Curvas esfuerzo – deformación - $f'_c=150\text{kg/cm}^2$ a 7 días



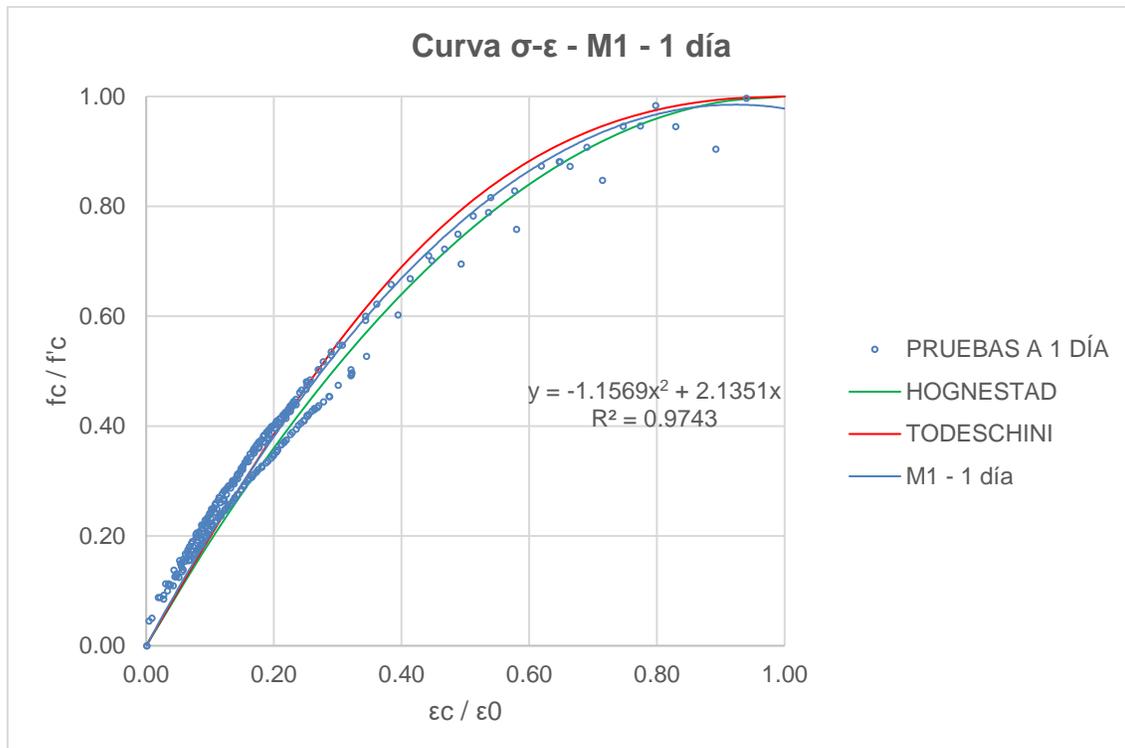
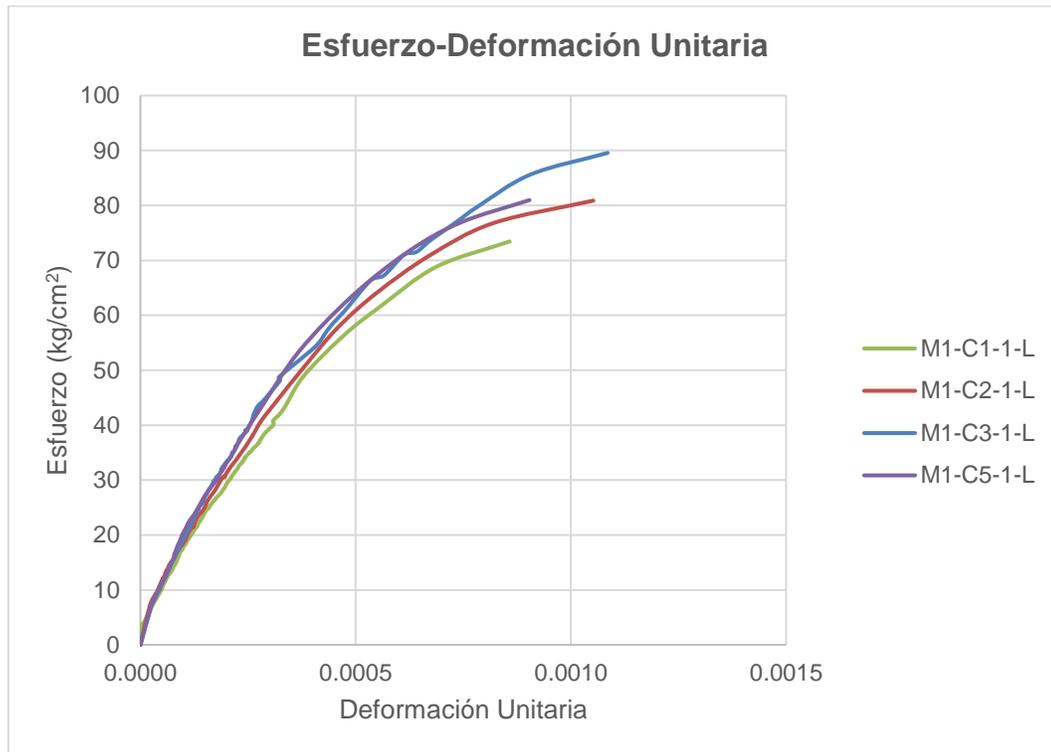
E.4. Curvas esfuerzo – deformación - $f'_c=150\text{kg/cm}^2$ a 14 días



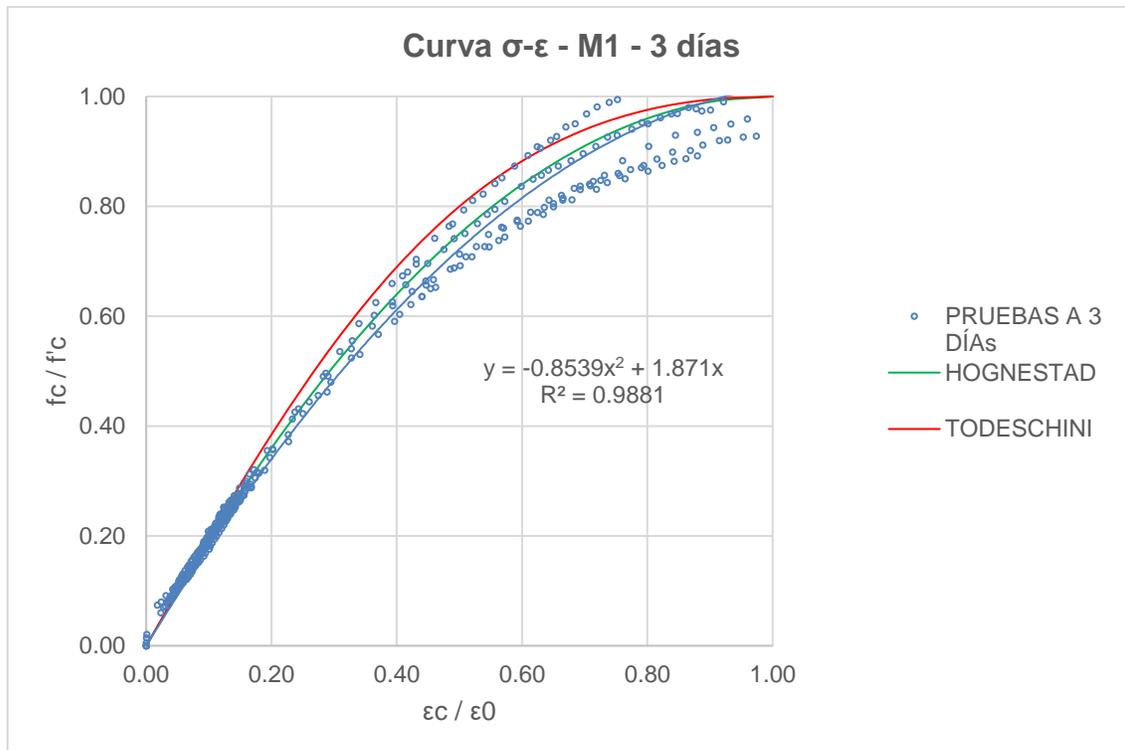
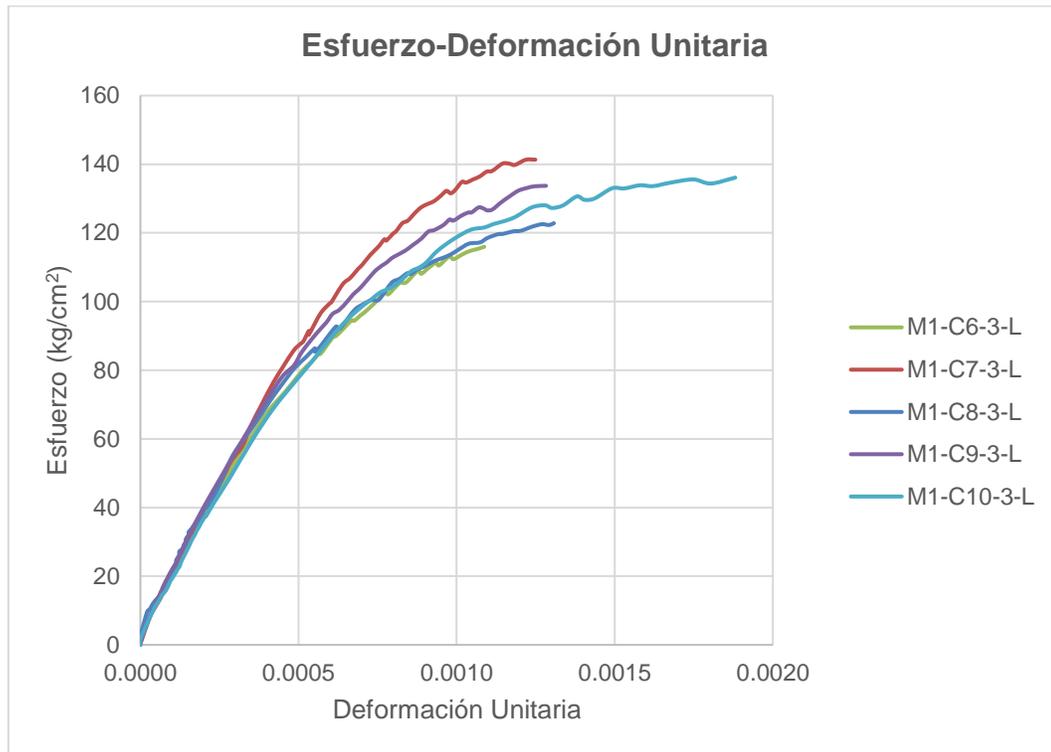
E.5. Curvas esfuerzo – deformación - $f'_c=150\text{kg/cm}^2$ a 28 días



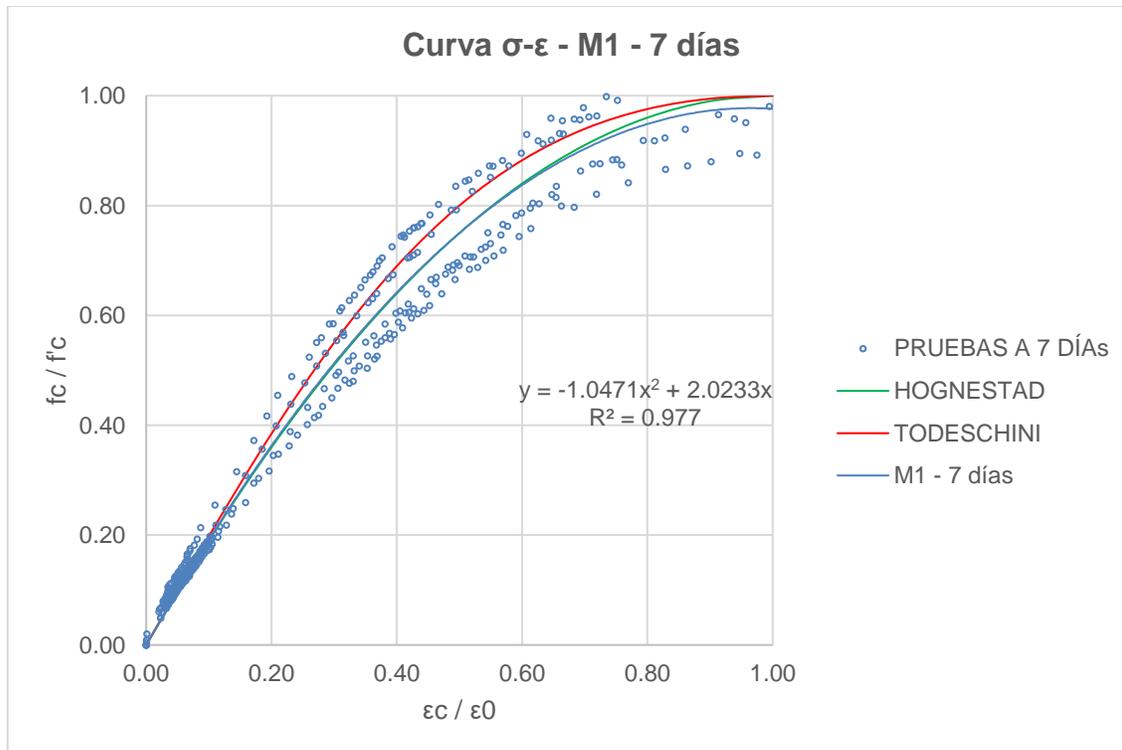
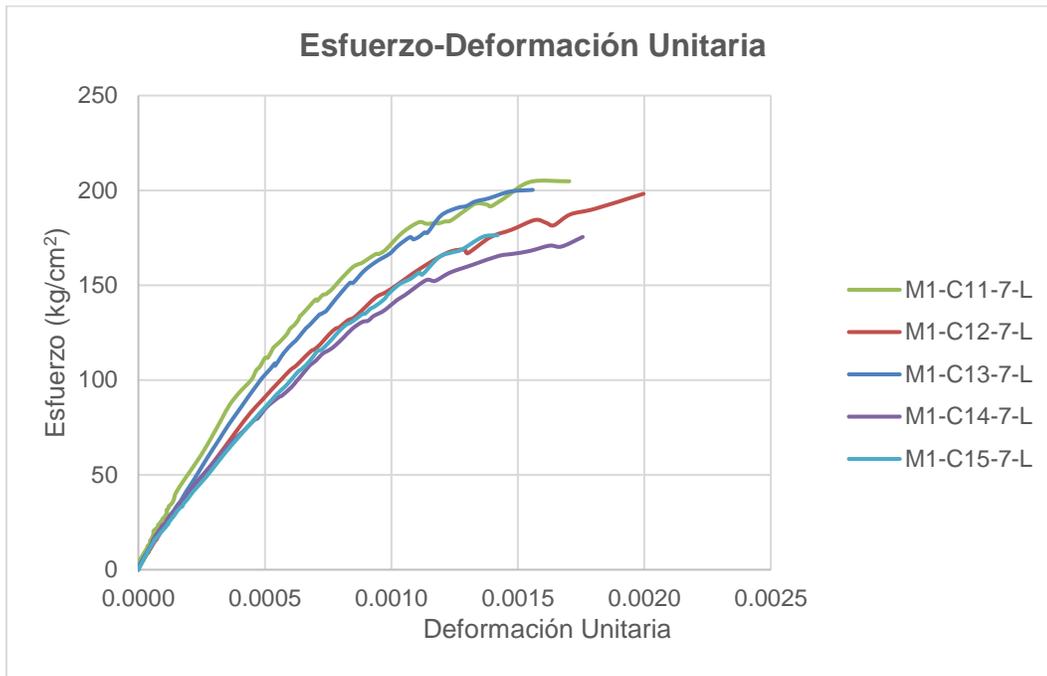
E.6. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a 1 día.



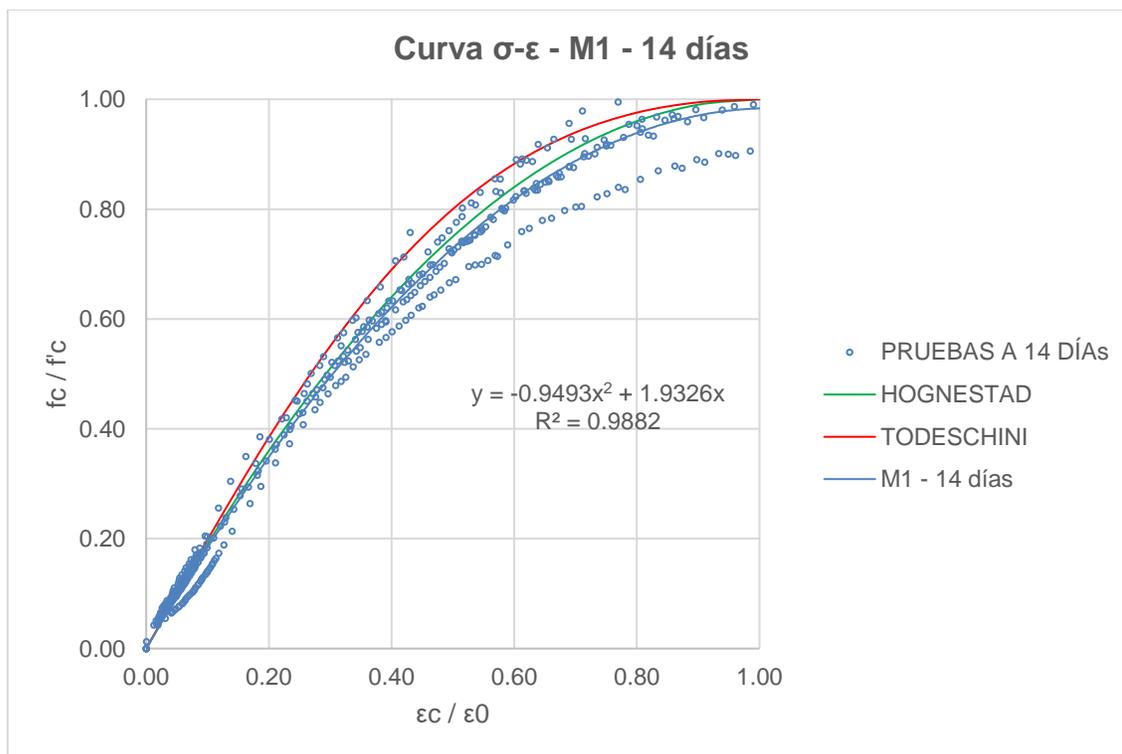
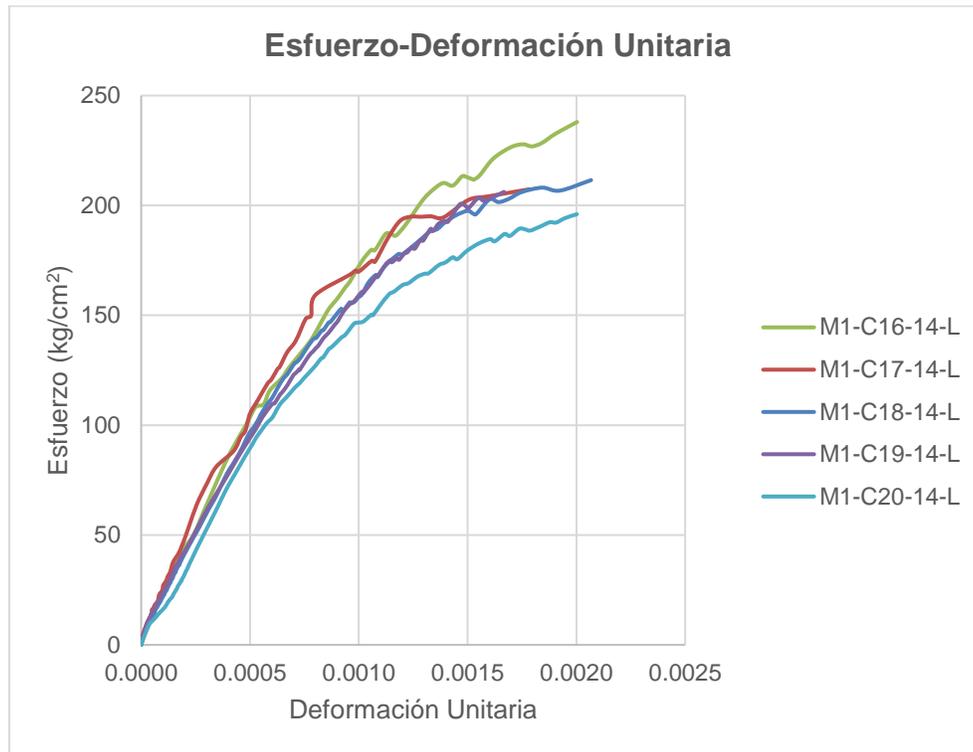
E.7. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a 3 días.



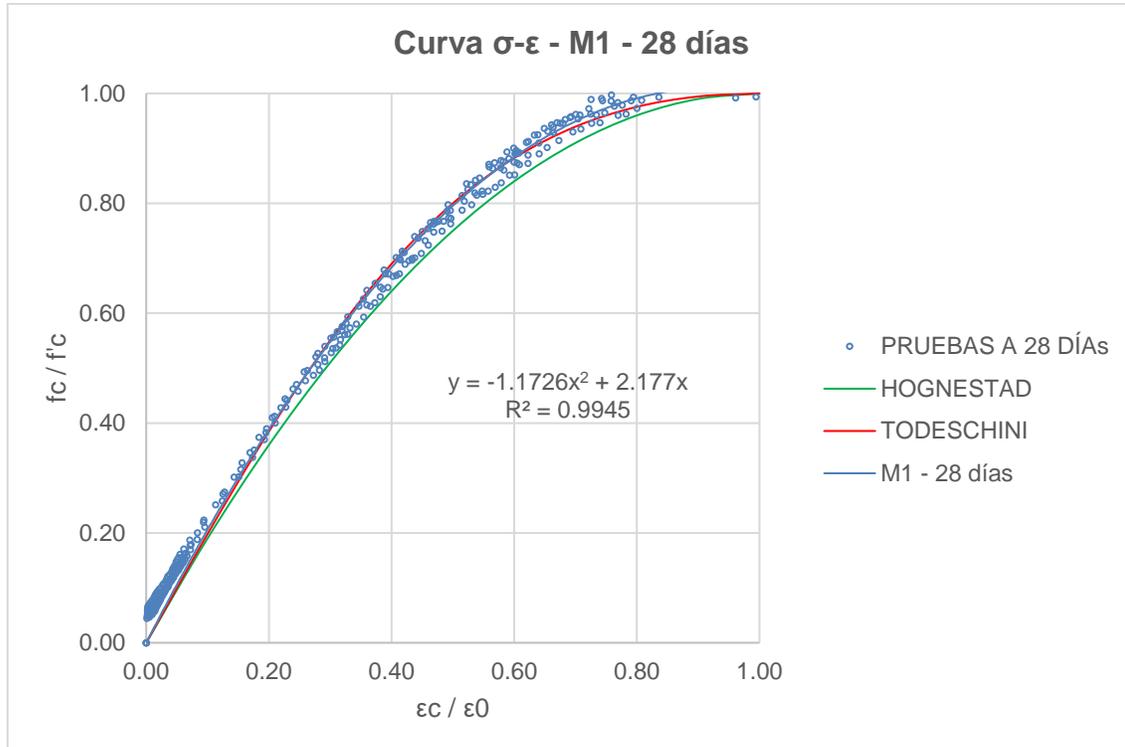
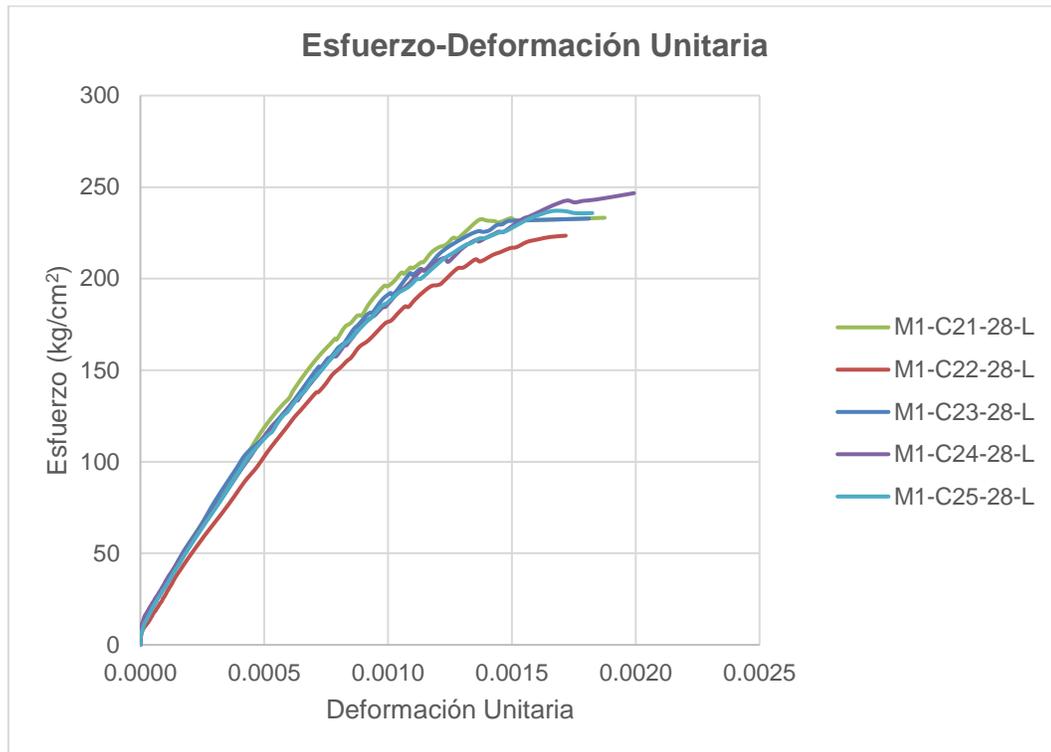
E.8. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a 7 días.



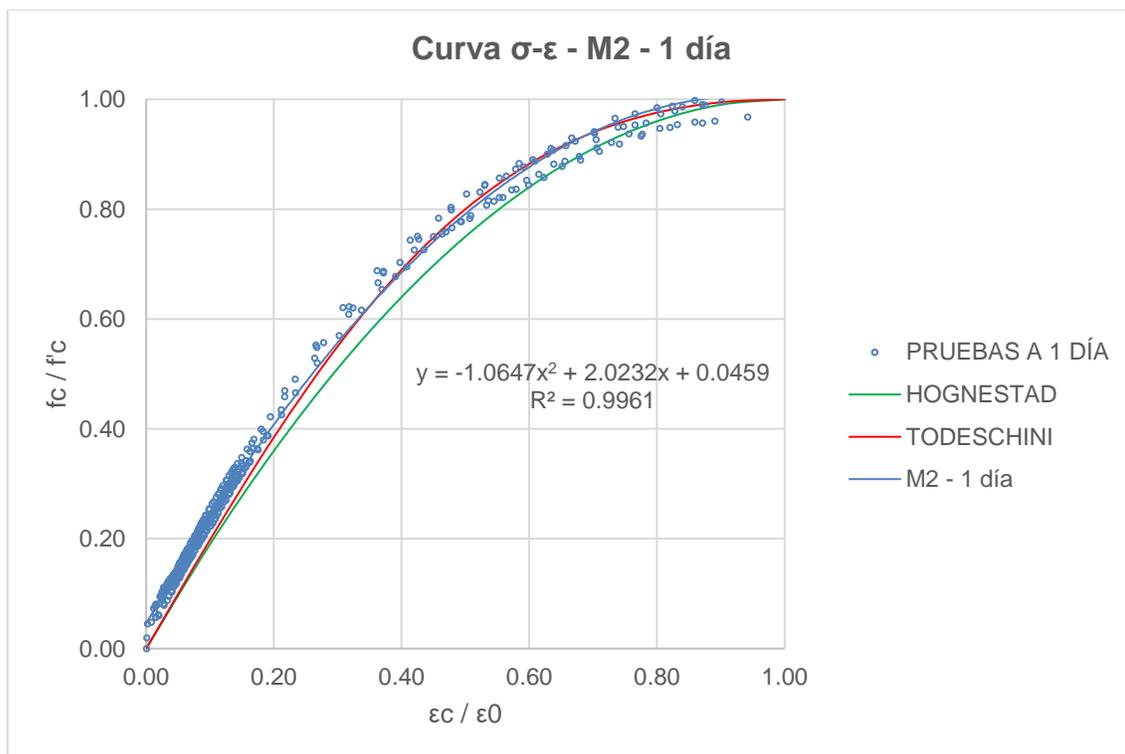
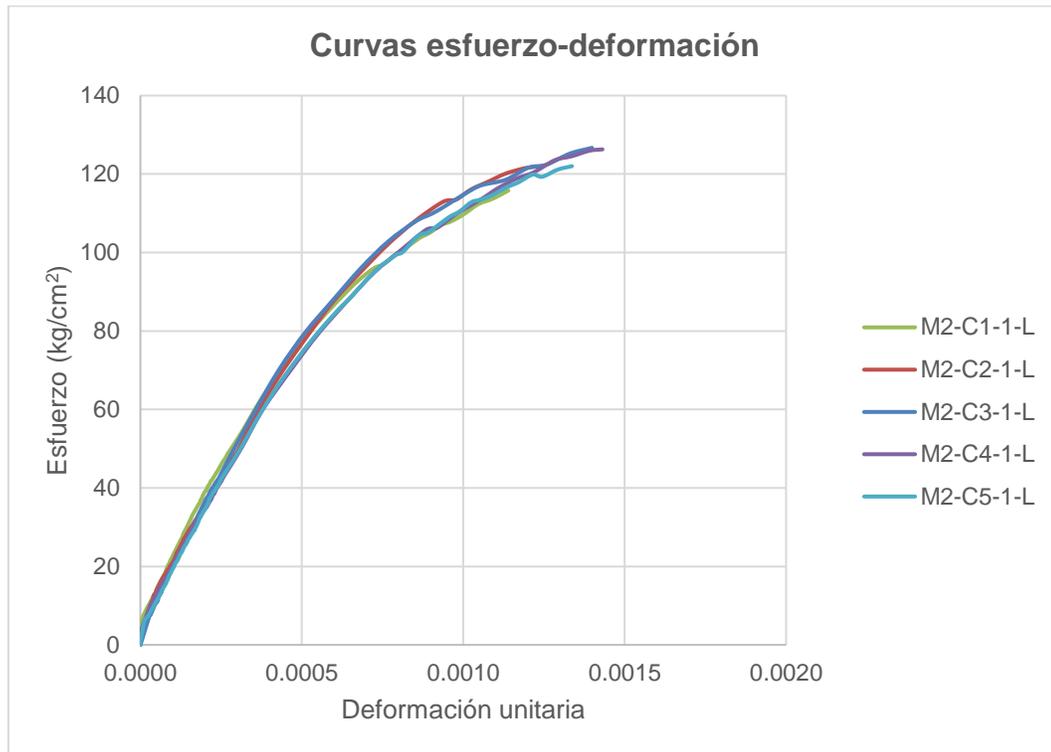
E.9. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a 14 días.



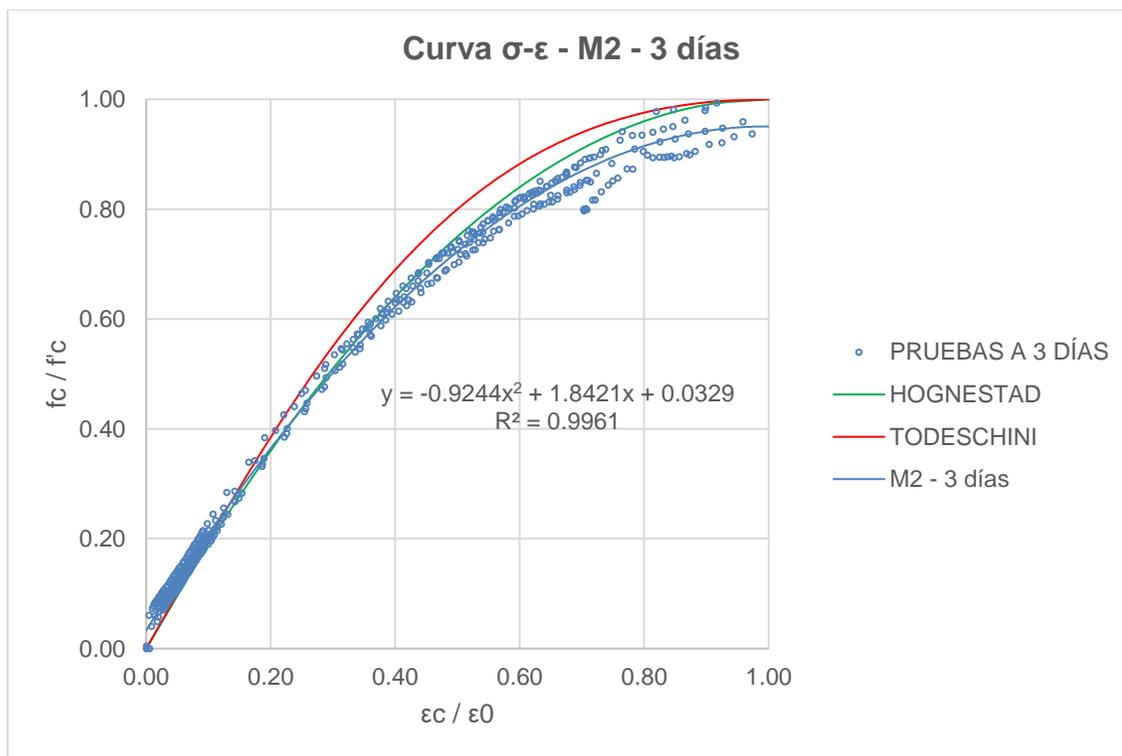
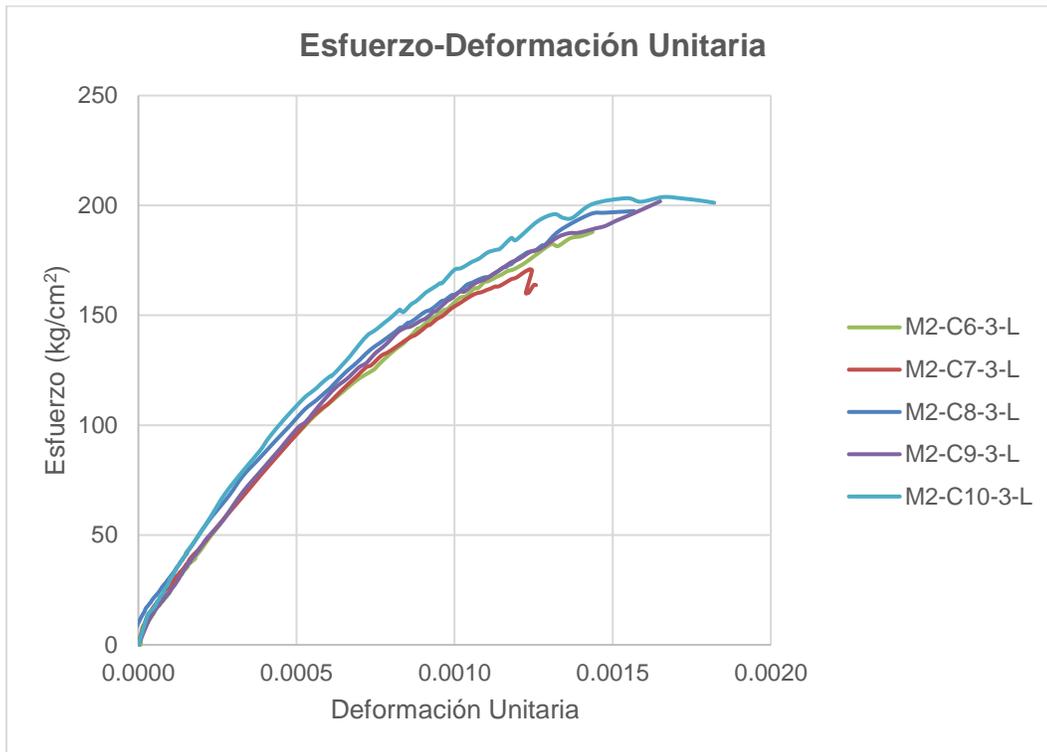
E.10. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=250\text{kg/cm}^2$ a 28 días.



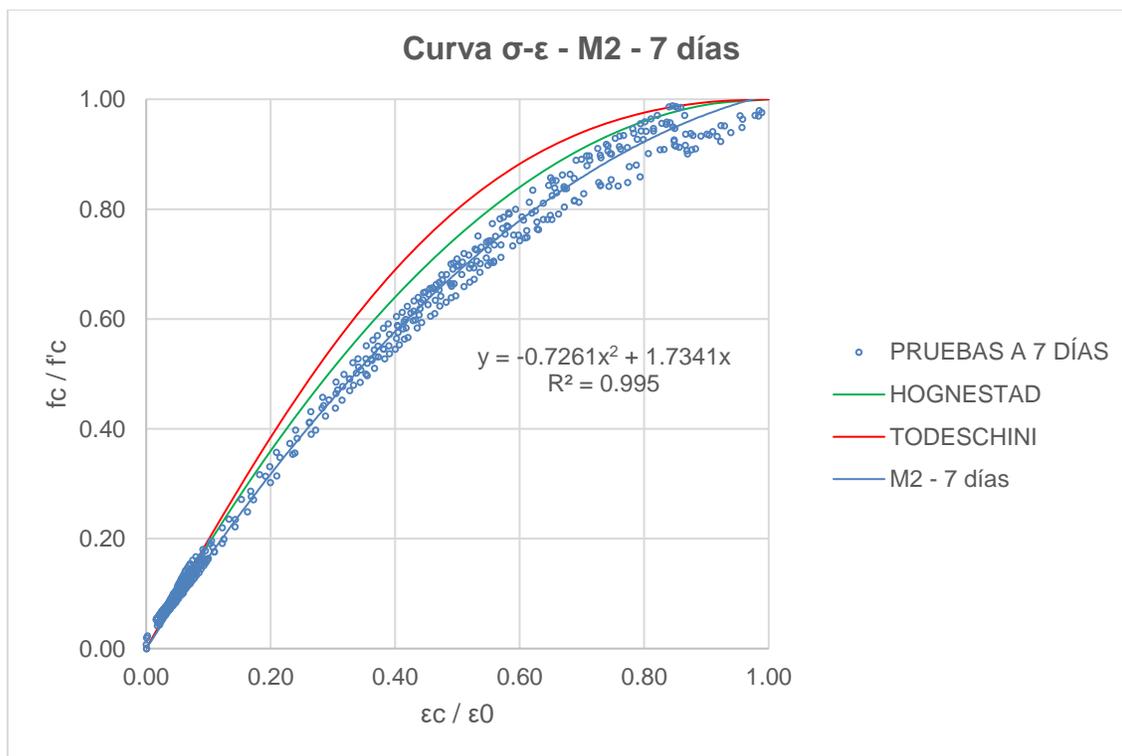
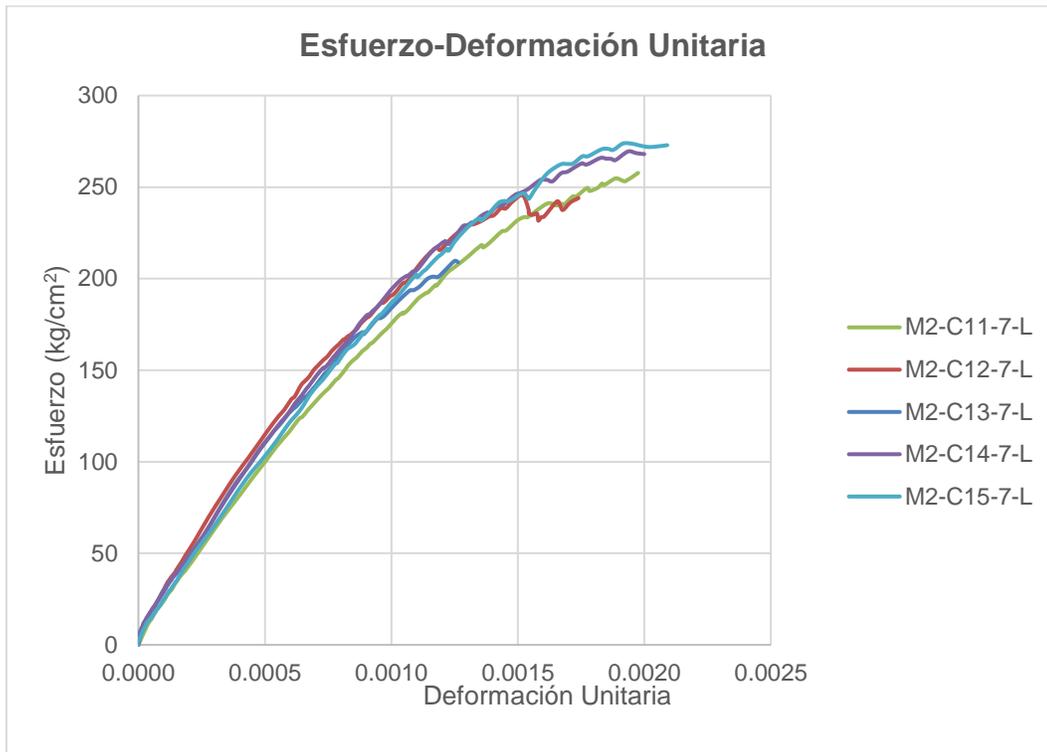
E.11. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ a 1 día.



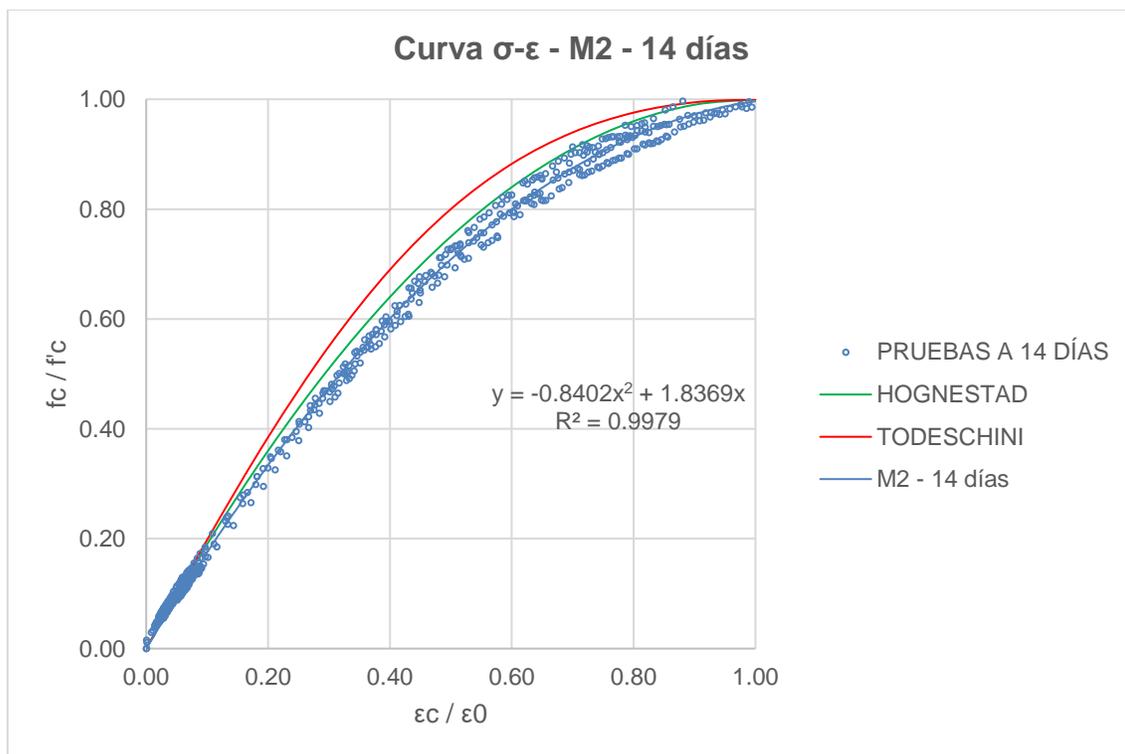
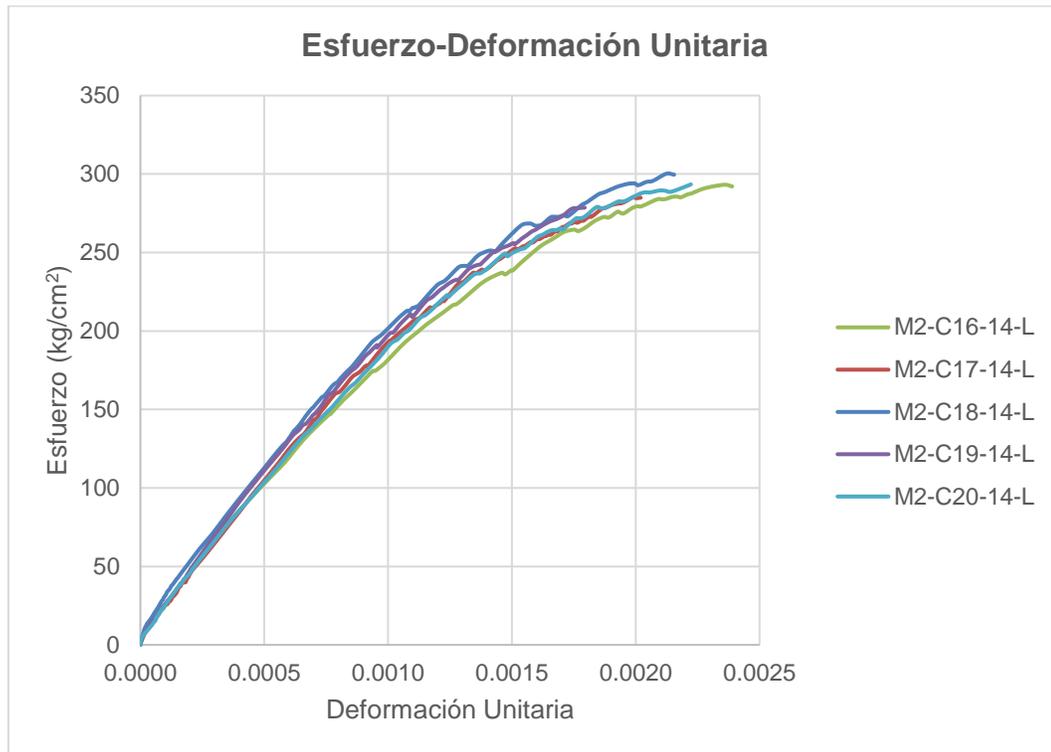
E.12. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ a 3 días.



E.13. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ a 7 días.



E.14. Curvas esfuerzo – deformación - $f'c=350\text{kg/cm}^2$ a 14 días.



E.15. Curvas esfuerzo – deformación - M2 $f'c=350\text{kg/cm}^2$ a 28 días.

