



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

EXPERIMENTACIÓN Y ESTUDIO DE ADICIÓN DE FIBRAS CORTAS PARA USO
EN PISOS INDUSTRIALES. UN ENFOQUE ESTRUCTURAL

ORTAD

PRESENTA

Sabás Holofernes Rangel Martínez

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL
CON ESPECIALIDAD EN ESTRUCTURAS

TUTOR

Dr. José Ángel Ortiz Lozano

COMITÉ TUTORAL

Dr. Mario Eduardo Zermeño de León

M. en C. Lorenzo Peralta Jaime

Aguascalientes, Ags, 25 de noviembre del 2013



**UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE AGUASCALIENTES**

Centro de Ciencias del Diseño
y de la Construcción

No. Oficio: CCDC-D-224-12

Asunto: Integración de Comité Tutorial
programada de Maestría en Ingeniería Civil

ING. SABAS HOLOFERNES RANGEL MARTÍNEZ
P R E S E N T E

Con fundamento en el Artículo 105-G Sección 2 del Capítulo XI del Reglamento General de Docencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, me permito designar como tutor al DR. JOSÉ ÁNGEL ORTIZ LOZANO y como asesores al DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN y al M. I. C. LORENZO PERALTA JAIME del proyecto de tesis titulado “EXPERIMENTACIÓN Y ESTUDIO DE ADICIÓN DE FIBRAS CORTAS PARA USO EN PISOS INDUSTRIALES” en el marco del programa de posgrado de la Maestría en Ingeniería Civil con salida en estructuras, durante el periodo del 23 de Julio del 2012 al 30 de Junio del 2013.

Esta asignación de comité tutorial sustituye a cualquier otra realizada con fecha anterior. Sin otro particular lo exhorto a que continúe trabajando con esmero y dedicación para que pueda obtener el grado en el tiempo y forma establecidos en nuestra legislación vigente.

A T E N T A M E N T E
“SE LUMEN PROFERRE”

Aguascalientes, Ags., 09 de noviembre de 2012.

DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
DECANO

c.c.p. Dr. Jesús Pacheco Martínez- Coordinador del programa de Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p. Archivo
JPM/cgm.



UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE AGUASCALIENTES

DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **SABAS HOLOFERNES RANGEL MARTINEZ** con ID 18418 quien realizó la tesis titulada: EXPERIMENTACIÓN Y ESTUDIO DE ADICIÓN DE FIBRAS CORTAS PARA USO EN PISOS INDUSTRIALES. UN ENFOQUE ESTRUCTURAL, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que la tesis pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATE NTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 8 de octubre de 2013.

Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Tutor de tesis

M. C. Lorenzo Peralta Jaime
Asesor de tesis

V.B.

Recibí:

- c.c.p.- Sabás Holofernes Rangel Martínez.
- c.c.p.- Secretario de Investigación y Posgrado, M.I. José Luis López López.
- c.c.p.- Jefatura del Depto. de Construcción y Estructuras, M.I. Manuel Andrei Murillo.
- c.c.p.- Consejero Académico, Dr. José Ángel Ortiz Lozano.
- c.c.p.- Minuta Secretario Técnico, Dr. Jesús Pacheco Martínez.



AGRADECIMIENTOS

Es justo agradecer a todas aquellas personas que ayudaron a realizar este trabajo de tesis aportando conocimiento, tiempo y experiencia:

En primer instancia a mis tutores José Ángel Ortiz Lozano y Lorenzo Peralta Jaime que en todo momento recibí su valiosísima orientación, asesoría y atenciones.

A toda la comunidad universitaria que permitió que hiciera posible este aporte al conocimiento, en especial al rector Mario Andrade, al decano Mario Eduardo Zermeño, a la Dirección de Posgrados y al Centro de Ciencias del Diseño y la Construcción.

Al Grupo Constructor PEASA y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT) por el financiamiento de este proyecto de investigación a través del Convenio de Colaboración C. No. E. 94/11 en el marco del proyecto clave EC0-2011-COI-000000000171093: “Desarrollo de concreto de alto desempeño y su proceso constructivo, adaptable a las materias primas de la región centro del país, para su aplicación en pisos de naves industriales de la industria automotriz y aeroespacial”, del Fondo de Innovación Tecnológica Secretaría de Economía-CONACyT.

Durante el desarrollo de las campañas de experimentación al grupo CEMEX y al plantel de la sucursal de la concretera dosificadora norte en Aguascalientes, al Ing. Miguel Ángel Dávila Caldera; Asesor Jr. de Control de Calidad, al Ing. Edgar Gerardo Villa Castañeda; al Ing. Francisco Medina Fuentes; como Analistas de Control de Calidad y al Tec. José de Jesús Corpus Zapata como Laboratorista Central de Planta.

A mis compañeros y profesores por haberme acompañado en esta travesía de conocimiento y por su singular apoyo en ser mejores.

Y por último pero no menos importante, a mi familia por su incondicional apoyo.



*Dedicado a mi madre. Ella es la fuente
de mi inspiración, adoración
y respeto.*



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	1
ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE ECUACIONES	7
ACRÓNIMOS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
1. CAPÍTULO 1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	14
1.1. Reseña Histórica del Uso de las Fibras	14
1.2. Propiedades de los concreto reforzados con fibras	15
1.2.1. Metálicas	16
1.2.2. Sintéticas	16
1.2.2.1. Polipropileno	16
1.3. Modelos Constitutivos	19
1.3.1. Métodos Analíticos	19
1.3.2. Métodos Numéricos. Análisis de Elemento Finito	21
1.3.3. Modelo Hidrostático Endurecido (Drüker-Prager)	23
1.3.4. Modelos Paramétricos de Normativas	23
2. CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	26
2.1. Descripción de la Metodología	26
2.2. Diseño de Mezcla y Elaboración del Concreto Hidráulico Base	27
2.3. Fase I. Selección y caracterización de las fibras.	28
2.3.1. Determinación de Parámetros Mecánicos	31
2.3.1.1. Caracterización en muestras cilíndricas	31
2.3.1.2. Módulo de Ruptura en probetas prismáticas	35
2.3.1.3. Esfuerzo Residual	36
2.4. Fase II Experimentación y Estudio de las dos fibras seleccionadas	38



2.4.1.	Motivo _____	38
2.4.2.	Metodología de la Experimentación _____	38
2.5.	Fase III Experimentación de Losas _____	39
2.5.1.	Motivo _____	39
3.	CAPÍTULO 3. RESULTADOS _____	40
3.1.	De Fase I Experimentación y análisis de las once fibras _____	41
3.2.	De Fase II Dosificación Óptima y selección de las mejores fibras _____	50
3.2.1.	Repetibilidades _____	50
3.2.1.1.	Carga-Deformación _____	55
3.2.1.2.	Carga-Deformación _____	56
4.	CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE AEF Y VALIDACIÓN DE DATOS _____	67
4.1.	Caracterización de Sustratos o Subgrados _____	67
4.1.1.	Caracterización mecánica de terracerías con métodos indirectos _____	67
4.1.2.	Cálculo de los módulos elásticos _____	68
4.1.3.	Selección del lugar de prueba, preparativos y caracterización del terreno. ____	70
4.1.3.1.	Localización del Terreno de Pruebas. _____	70
4.1.3.2.	Preparación de Terreno de Pruebas y Conformación de terracerías. ____	71
4.1.3.3.	Caracterización Geofísica de los Sustratos. _____	72
4.2.	Construcción de Losas de Ensaye _____	74
4.2.1.	Ensaye de Losas de Concreto mediante camiones de carga _____	75
4.2.2.	Diseño de losas _____	77
4.2.2.1.	Datos de entrada del diseño _____	77
4.2.2.2.	Procedimiento _____	78
4.2.2.3.	Datos de entrada de la simulación en software SAP2000 y STAAD Pro84	
4.2.3.	Modelación comparativa entre software de análisis estructural y resultados obtenidos en el ensaye _____	84
4.3.	Comparación de Resultados en Losas: Numérica Vs. Experimental _____	86
5.	CAPÍTULO 5. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN _____	87
6.	CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS _____	88
	CONCLUSIONES _____	90



GLOSARIO	92
REFERENCIAS	93
ANEXOS	96





ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Esqueleto Granular de la mezcla base _____	27
Tabla 2 Selección de Fibras para Experimentación y Análisis _____	28
Tabla 3 Concentrado de Probetas utilizadas en toda la etapa experimental _____	40
Tabla 4 Comparativa De Resultados _____	41
Tabla 5 Comparativa De Resultados _____	47
Tabla 6 Resumen de resultados _____	50
Tabla 7 Dosificación de fibra _____	61
Tabla 8 Dosificación _____	65
Tabla 9 Método sísmico _____	69
Tabla 10 Módulos de Reacción _____	73
Tabla 11 Obtención de datos producto de experimentación en campo _____	76
Tabla 12 Factores de seguridad empleados para diferentes tipos de cargas (ACI) _____	82
Tabla 13 Relación de esfuerzo contra ciclos repetidos de carga _____	83



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Curvas de típico comportamiento carga-deformación de mezclas sin fibras y con fibras de refuerzo	15
Figura 2 (a).- Placa flexible sometida a una carga uniforme. (b).- Placa rígida sometida a una carga concentrada	20
Figura 3 Representación de un dominio global y su subdivisión en dominios locales a) Sistema Continuo, b) Modelo Discreto y c) Elemento Finito	22
Figura 4 Colocación de dispositivo deformímetro extensómetro para determinar el módulo de elasticidad.	32
Figura 5 Representación esquemática de instalación de dispositivos para determinar módulos de Elasticidad y de Poisson	32
Figura 6 Representación curva carga-deformación con tenacidades	34
Figura 7 Secuencia de trabajos, colocación de riel de apoyo, adaptación de micrómetro y colocación de espécimen	35
Figura 8 Gráfica de curva carga-deformación para una viga cargada en tres puntos.	37
Figura 9 Resistencia a la compresión promedio mostrando la varianza de los resultados	42
Figura 10 Módulo de Ruptura de las fibras	43
Figura 11 Módulos de Elasticidad Promedio obtenidos de las fibras	44
Figura 12 Relación de Poisson Promedio obtenidos de las fibras	45
Figura 13 Esfuerzo Residual obtenidos de las fibras	46
Figura 14 Tenacidad correspondiente a la primer fisura (δ)	48
Figura 15 Tenacidad a 3δ	48
Figura 16 Tenacidad a 5δ	49
Figura 17 Resistencia a la compresión	51
Figura 18 Modulo de elasticidad del concreto	51
Figura 19 Relación de Poisson del concreto (μ)	52
Figura 20 Tenacidad correspondiente a la primer fisura (δ)	53
Figura 21 Tenacidad correspondiente a 3δ	53
Figura 22 Tenacidad correspondiente a 5.5δ	54
Figura 23 Esfuerzo residual ($f_e, 3$)	54
Figura 24 Diagrama carga- deformación Dramix	55
Figura 25 Diagramas carga deformación Euclid	56
Figura 26 Módulo de elasticidad	57
Figura 27 Resistencia a la compresión simple	58
Figura 28 Esfuerzo residual ($f_e, 3$)	58
Figura 29 Concentrado carga deformación Dramix	60
Figura 30 Concentrado carga deformación Euclid	61
Figura 31 Modulo de elasticidad	62



Figura 32 Resistencia a la compresión simple _____	63
Figura 33 Esfuerzo residual (Fe,3) _____	63
Figura 34 Concentrado carga deformación Dramix _____	64
Figura 35 concentrado carga deformación Euclid _____	65
Figura 36 Localización del Terreno de Pruebas _____	70
Figura 37 Cajón en Corte _____	71
Figura 38 Disposición de losa experimental que muestra franjas diferentes sustratos _____	71
Figura 39 Prueba Penetración Estándar (SPT). _____	72
Figura 40 Pruebas Métodos Sísmicos. _____	72
Figura 41 Método Exploración Sísmica _____	73
Figura 42 Acabado de Losas _____	74
Figura 43 Construcción de Losas _____	74
Figura 44 Muestra de los camiones para transferir carga por medio de una viga IR _____	75
Figura 45 Áreas propuestas para la losa _____	78
Figura 46 Distancia entre los pasajuntas. ACI 360R-22 _____	80
Figura 47 Vista de planta de nueve losas unidas en SAP _____	81
Figura 48 Acercamiento de las uniones efectuadas entre losas en SAP _____	81
Figura 49 Iso-áreas de deformaciones del SAP2000 _____	85
Figura 50 Iso-áreas de Momentos Flectores del SAP2000. _____	85
Figura 51 Comparación costo-resistencia de pisos industriales _____	86



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 1	20
Ec. 2	23
Ec. 3	24
Ec. 4	24
Ec. 5	24
Ec. 6	24
Ec. 7	24
Ec. 8	24
Ec. 9	32
Ec. 10	33
Ec. 11	33
Ec. 12	35
Ec. 13	35
Ec. 14	37
Ec. 15	37
Ec. 16	37
Ec. 17	68
Ec. 18	68
Ec. 19	68
Ec. 20	68
Ec. 21	68
Ec. 22	69
Ec. 23	78
Ec. 24	78



ACRÓNIMOS

ACI	Instituto Americano del Concreto.
IMCYC	Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
ASTM	Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (
JSCE	Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles
JCI	Instituto Japonés del Concreto.
RILEM	Reunión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales de Construcción, Sistemas y Estructuras.
ASCE	Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles.
SC	Concreto Simple.
RC	Concreto Reforzado.
FRC	Concreto Reforzado con Fibras.
SFRC	Concreto Reforzado con Fibras de Acero.
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SPT	Prueba de Penetración Estándar.
PFRC	Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno.
A/C	Relación agua cemento.
AEF	Análisis de Elemento Finito.
ESO	Efectos de Segundo Orden
NMX	Norma Mexicana



RESUMEN

Consiste en la experimentación de concreto hidráulico de 40 MPa de resistencia a la compresión con dos gravas y dos arenas adicionado con once distintas fibras. Se consideró la disposición y adquisición de esas fibras en la región. Se determinó que dos de las once fibras adicionadas con el concreto hidráulico fueron las de mejor aporte y comportamiento mecánico a partir de la definición de los parámetros de módulo de elasticidad, de Poisson, tenacidades, esfuerzo residual y revenimiento. De esas dos fibras se diseñó, se construyó y se experimentó una losa para obtener parámetros de deformación y momento en losas sostenidas sobre tres típicos medios elásticos diferentes. Se comparan y validan resultados producto de experimentación versus analíticos por medio del método de elemento finito.

Los resultados de la simulación numérica se compararon con datos de ensayos experimentales documentados y con datos analíticos. La reciprocidad obtenida entre los resultados obtenidos con el modelo y los experimentales se considera satisfactoria.

**Palabras clave: concreto reforzado con fibras, losas industriales, estructuras, diseño de losas, fibras metálicas, fibras de polipropileno, experimentación, propiedades mecánicas.*



ABSTRACT

It works consists an hydraulic concrete experimentation of 40 MPa of compressive strength with two sand and gravel added and eleven different fibers. The disposition and acquisition of these fibers in the region was considered. It was determined that two of the eleven concrete with added fibers were the best hydraulic and mechanical behavior contribution from the definition of the parameters of elasticity modulus , Poisson , toughness , residual stress and slump . Of these two fibers are designed was built, designed and experienced for a floor slab to get parameters of moment and strain of slabs supported on three typical different elastic media. Results were compared and validated analytical versus experimental product by the finite element method .

The results of the simulation are compared with experimental data tests documented and analytical data. Reciprocity between the results obtained with the model and the experimental is considered satisfactory.

**Keywords: fiber reinforced concrete, industrial slabs, structures, design of slabs, metal fibers, polypropylene fibers, testing, mechanical properties, constitutive models.*



INTRODUCCIÓN

El qué hacer de la ingeniería estructural no tan solo se limita al análisis y diseño de la diversidad de estructuras competentes a la ingeniería civil, además se responsabiliza de la selección y uso de materiales de construcción con finalidad de que resistan en forma segura y funcional las fuerzas que se ejercen sobre ellas, por mencionar algunos de los materiales más usados son los metálicos, los pétreos, la madera, los cerámicos, el concreto asfáltico e hidráulico. Este último es el que nos evoca el estudio propuesto en este trabajo y con el afán de encontrar mejoras a la problemática que envuelve el uso y aplicación del concreto hidráulico; específicamente en pisos utilizados en los espacios de uso industrial.

La importancia de mejorar este tipo de elementos radica que permitir una aceleración en los procesos constructivos, ya que en la actualidad en la región circundante presenta una explosión constructiva que satisfaga una demanda de proyectos industriales, por tanto reducir problemas inherentes a este tipo de elementos de forma inmediata, corto y largo plazo son de suma importancia ya que generan una derrocha económica masiva que impacta a nivel social de la región, así también se espera mejorar el comportamiento mecánico, ya que de ello implicaría un ahorro en materiales y por tanto una optimización de recursos. También no se olvidará la cuestión de durabilidad de estos elementos ya que por su exigencia a las condiciones de servicio que son sometidos deben garantizar un mínimo de tiempo de vida útil, además de implicar disminución en costos por mantenimiento y sobre todo evitando los paros de producción a causa de las fallas totales o parciales de estos.

Existe una necesidad emergente de las empresas dedicadas a este tipo de edificación de adaptar y adoptar nuevos procesos internos que cubran las exigencias del mercado actual con altos estándares de calidad.

Actualmente en la región circundante del estado de Aguascalientes y particularmente en su ciudad, existe un incremento significativo de actividad industrial sobretodo la relacionada con la automotriz, en donde se abren nuevos espacios de trabajo para el desarrollo de dicha actividad, por ejemplo la presencia de la planta armadora de Nissan y la nueva planta donde existirán varias empresas satélites de inversión que



regularmente concursan proyectos de construcción, en los cuales la tipología característica es de naves industriales, las cuales ofrecen una extensiva amplitud de pisos que estarán también sometidos a rigurosas y particulares condiciones de trabajo.

El uso del concreto hidráulico en pisos industriales, es por hoy, el material más utilizado dado que ofrece una serie de virtudes buscadas en este tipo de elementos para pisos. Se le puede encontrar en su versión más comúnmente utilizado: simple (SC), reforzado (RC) y adicionado con fibras cortas (FRC).

Dentro de la cultura del concreto hidráulico, se conoce la nobleza por parte del mismo para crear estructuras de diferentes formas, tamaños y que cubran ciertas necesidades específicas de desempeño y de vida útil. Dicha nobleza en gran parte la recibe gracias a la compatibilidad de diferentes componentes que lo integran por ejemplo los agregados y otra diversidad de materiales que día a día son experimentados y utilizados para contribuir en las diferentes soluciones y necesidades.

En lo que se refiere a los agregados pétreos y cementantes tipo Portland ya están bien analizados en su conjunto como mezcla, en cambio existen otros materiales adicionados al concreto en estado fresco como lo son las denominadas *fibras cortas* que ofrecen ciertas mejoras al comportamiento del concreto hidráulico sobre todo en estado endurecido. En las fibras cortas existe una gran diversidad de formas, precios de adquisición, tipos de materiales con las que están hechas, disponibilidad en el mercado; por lo que se hace necesario obtener una serie de parámetros comparativos que ayuden a seleccionar la mejor fibra corta que involucren aspectos de costos, de producción, mejoras en conjunto con el concreto hidráulico en su comportamiento mecánico, en acabados, en proceso constructivo, en durabilidad, elongación de vida útil, resistencia bajo ciertas condiciones adversas, etc.

Aunque el uso de las fibras cortas adicionadas al concreto hidráulico ya se utilizaba desde hace tiempo atrás, aún no se ha demostrado que su uso reduzca significativamente los costos para disminuir el peralte de una losa. Tal vez esa limitante la origina su costo de producción que todavía no se ha industrializado lo suficiente como para disminuirlo, o bien, por el desconocimiento de sus virtudes y contrapartes. Es por ello el motivo de este estudio para determinar la magnitud y significancia de esas virtudes y contrapartes.



El uso de las fibras en el concreto hidráulico se limita a otras cuestiones. Por ejemplo el de comportamiento mecánico, reduciendo la contracción inicial por fraguado y endurecimiento del concreto hidráulico. Afectando considerablemente la trabajabilidad que por ende, para solucionar esta problemática el diseño de mezcla se ve afectado sobre todo en su contenido de A/C, solo por mencionar una intuitiva comparación donde se pretende analizar este tipo de aspectos.

En Aguascalientes se tiene acceso a una diversidad de fibras así como quienes la proveen. No es de sorprenderse que, también el costo de los mismos difieren, pero lo interesante es el hecho de que cada uno de estos proveedores y fabricantes de este material defienden su producto estableciendo una significativa mejoría en las diversas propiedades del concreto hidráulico endurecido utilizados como los elementos de piso (losas).

Y otro aspecto muy importante e incluso preocupante a denotar, es el hecho de que establecen por medio de la publicidad de sus productos una serie de cualidades o características del material que es complicado que permanezca estables ya que dependen de múltiples factores para que dichas características no se alteren

Entonces existe una problemática evidente en esa diversidad de fibras, cuyas características difieren en tipo de material, aplicación, dosificación, costo, otorgamiento de propiedades mecánicas al concreto, etc. que contribuyen a la supuesta mejora del producto terminal.



CAPÍTULO 1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

1.1. Reseña Histórica del Uso de las Fibras

Su utilización se remonta desde la antigüedad sobretodo en materiales frágiles y quebradizos. Por ejemplo en el uso de la paja como fibra en la elaboración de adobes secados al sol utilizada en 1540 y la crin de caballo para reforzar morteros y yesos en trabajos de albañilería. Ya en épocas más recientes se tiene un uso más comercial de fibras en el proceso de elaboración del asbesto por medio de una matriz a base de cemento, inventada por Hatschek en 1898. Este tipo de material fue utilizado ampliamente en todo el mundo, más sin embargo, debido a los problemas de salud asociados al asbesto se introdujeron a través de los años 1960 y 1970 otras alternativas de fibras.

Actualmente, existe una amplia gama de materiales cerámicos, plásticos, cementicios y de yeso que incorporan fibras para mejorar las propiedades del compuesto. Estas propiedades incluyen la mejora de resistencia a la tensión, a la compresión, a la resistencia del módulo de elasticidad, al agrietamiento, al control de las fisuras, a la durabilidad, a la fatiga, al impacto, a la abrasión, a la contracción, expansión e incluso aportan características térmicas y de resistencia al fuego.

Aunque desde 1910 se utilizaban las rebabas y virutas de acero adicionadas en el concreto, es hasta comienzos de 1960 que se manifiesta una gran investigación, experimentación y desarrollo de esta tecnología. En Rusia se utilizó por primera vez las fibras de vidrio en el concreto hidráulico. Pero la alcalinidad del cemento ataca y eventualmente destruye al boro-silicato contenido en la fibra de vidrio. Este problema se resolvió con fibras de vidrio a base de circonia. Ahora se utiliza mayormente en paneles para revestimiento arquitectónico.

Al inicio de utilizar fibras sintéticas como las de nylon y polipropileno no tuvieron tanto éxito en comparación de las de acero y de vidrio, mas sin embargo en la actualidad se ha erradicado esta situación debido a mejoras en el conocimiento de fabricación.

El uso de las fibras puede ser económico para elementos estructurales convencionales. Lamentablemente el ACI 518 no trata este tipo de material. La utilización es amplia y por mencionar en los más comúnmente utilizados son el los concretos lanzados, en dovelas prefabricadas para túneles, losas sobre medios elásticos, zapatas de cimentación, etc.

Básicamente, las fibras se clasifican en sintéticas, en metálicas, de vidrio y naturales.

Que para motivos de este documento, no incluye fibras naturales.

Dentro de la evolución histórica de las fibras metálicas, estas surgen a partir de la investigación de las cercas de alambre donde surge una patente a finales de 1950 y comienzos de 1960. En 1972 fue concedida otra patente basada en la relación de aspecto. Desde entonces se han producido bastantes fibras metálicas.

1.2. Propiedades de los concreto reforzados con fibras

Los FRC se definen como aquellos concretos que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. El concreto reforzado con fibras, según la definición del ACI, no es más que concreto hecho a partir de cementos hidráulicos, conteniendo agregados finos y gruesos, y fibras discretas discontinuas.

Como fines estructurales proporcionan una mayor energía de rotura pudiendo implicar la sustitución parcial o total de armadura en algunas aplicaciones; en el caso en que las fibras no tengan función estructural suponen una mejora ante determinadas propiedades como por ejemplo el control de la fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros.

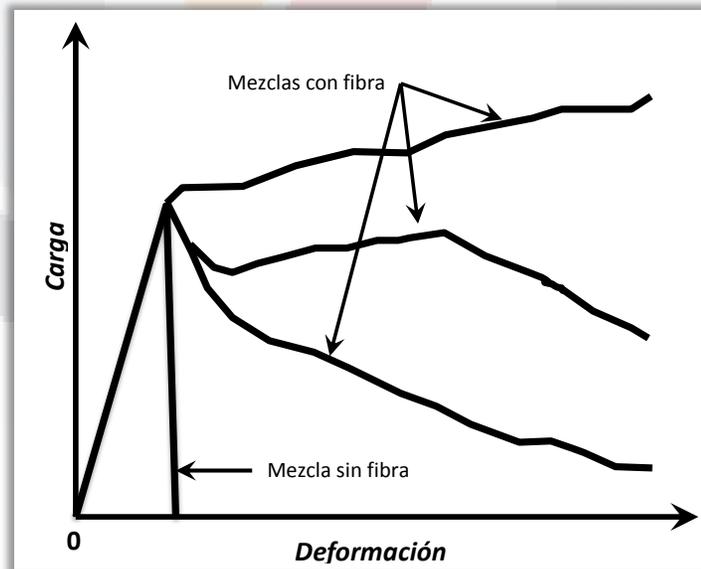


Figura 1 Curvas de típico comportamiento carga-deformación de mezclas sin fibras y con fibras de refuerzo

Las fibras son empleadas en aplicaciones estructurales en busca de beneficios adicionales en cuanto a reducción de mano de obra, incremento de la durabilidad y



reducción o eliminación del refuerzo tradicional. El concreto soporta esfuerzos a tracción que son transmitidos por adherencia a las fibras una vez se ha producido micro-fisura, controlan la fisuración y reducen la intensidad de la misma a la vez que mejoran la tenacidad.

Esencialmente, la naturaleza y el tipo de fibras determinan la efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión. En la actualidad se utilizan diversos tipos de fibras.

1.2.1. Metálicas

La rigidez de las fibras, la resistencia y la capacidad de instalar puentes de esfuerzo en el concreto son las más importantes propiedades. La resistencia del enlace es afectado directamente por la relación de aspecto de la fibra. Las relaciones de aspecto típicas varían de 20 a 100 y la longitud de 6 a 76 mm. Las fibras metálicas deben estar protegidas contra la alcalinidad del cemento y presentan un relativo valor alto de módulo de elasticidad y resistencia. Para las fibras de acero el ASTM 820 establece un mínimo de resistencia a la tensión y requerimientos de flexión a partir de la longitud, diámetro equivalente y relación de aspecto. El esfuerzo de fluencia a la tensión según ASTM 820 es de 50,000 psi (3,500 kg/cm²) mientras que JSCE exige 80,000 psi (5,600 kg/cm²).

1.2.2. Sintéticas

Las fibras más comúnmente utilizadas comercialmente para el uso en el concreto en sus diversas variantes son las de polipropileno, polietileno, nylon, acrílico, carbón, polyester y arámida (poliamida aromática).

1.2.2.1. Polipropileno

Material hidrófugo, capacidad de ignición a los 600°C, punto de fusión y módulo de elasticidad bajo de 35,150-49,200 kg/cm², resistencia a la tensión 1,400- 7,000 kg/cm², dado que es un material fibrilado no presenta diámetro equivalente, no se mezcla químicamente con la matriz de concreto pero presenta una buena interacción mecánica. El concreto armado con fibras (SFRC, PFRC) es un material compuesto que consiste de una matriz de concreto que contiene fibras dispuestas en forma aleatoria. El SFRC tiene propiedades mecánicas superiores en comparación a un concreto simple sin fibras, tales



como aumento de la absorción total de energía antes de la separación completa la mejora de la resistencia a la fatiga, una resistencia más grande impacto, y más resistencia al cortante. La mejora de las propiedades mecánicas de SFRC se pueden atribuir a el efecto de refuerzo localizado de las fibras, mejorando la resistencia a agrietarse, porque las fibras poseen mucha mayor resistencia que la que rodea al concreto como lo establece Parker en 1974, o porque la grieta da un efecto “puente” atribuidos por fibras al transmitir esfuerzos de tensión a través de la grieta Bekaert 1999.

El uso del concreto reforzado con fibras es muy diverso. Incluye, por ejemplo, losas de tipo industrial, en cimentaciones, zapatas, elementos estructurales para revestimiento en túneles (dovelas), puentes, estabilidad de taludes, concreto lanzado, etc.

El uso de las fibras para este tipo de losas ha estado incrementándose, los materiales más usados como fibras son las de metal, polipropileno, polyester y polietileno. Las fibras incrementan las propiedades del concreto como un material compuesto tales como la resistencia a la compresión, resistencia a la fatiga por flexión, ductilidad, etc.

La capacidad localizada de las fibras de refuerzo depende en gran medida de la interacción de fibra-matriz y de las propiedades de la fibra es decir, la textura, la fuerza, y la forma final, el contenido, y la orientación con respecto a la dirección de propagación de la grieta.

Para la mayoría de las estructuras, las propiedades mecánicas que aportan estas estructuras reforzadas con fibras en estado endurecido bajo cargas estáticas permanentes, presentan las siguientes características: un incremento a la compresión axial simple con el 1.5% del volumen total de la mezcla hasta en un 15%, en lo que refiere a la tensión directa incrementa del 30 al 40% con el mismo 1.5% del volumen. En cortante y torsión es variable de 0 hasta 30% por cada 1% de incremento sobre el volumen total de la mezcla. Para la flexión pura se puede obtener del 50 al 70% con respecto sino tuviera. (ACI Committee 544.1R-96., 1997)

El ACI define a las losas sobre medios elásticos como es aquella donde el total de la carga se encuentra totalmente distribuida, donde la presión puede repartirse a la base o sustrato y además no sobrepase el 50% de la capacidad admisible a la flexión. Sin embargo se aclara que hay algunas excepciones que son tratadas en el Instituto del Post-Tensado. Reconoce seis tipos:

- a) Losas de concreto lisas,



- b) Losas reforzadas por contracción y temperatura,
- c) Losas de concreto de contracción compensada con refuerzo a la contracción,
- d) Losas post-tensionadas sin contracción,
- e) Losas post-tensionadas y/o reforzadas con presfuerzo activo, y
- f) Losas reforzadas bajo solicitaciones estructurales.

El concreto reforzado con fibras es un material compuesto en el cual las fibras son distribuidas de forma dispersa en la matriz cementicia. Las fibras actúan en toda la materia de concreto manteniendo unidas cada una de sus partes cumpliendo la función de enlace de tensión en la que al momento de la contracción que sufre el concreto en estado fresco produce fisuras, las fibras no permiten que estas fisuras se ensanchen provocando la exposición interna del concreto. De esta manera, las fibras no admiten la propagación de fisuras influyendo en el comportamiento mecánico de compuesto.

El diseño de estructuras con SFRC no están presentes en muchos de los códigos internacionales, sin embargo el ACI Committee 544, el RILEM Technical Committee 162-TDF y la Junta Italiana de Normalización han presentado recientemente un manual de diseño bajo la habitual teoría elástica para losas soportadas sobre medios continuos basados en la teoría de (Westergaard 1926) y conlleva a una subestimación del aporte de estas fibras a la capacidad real de carga de las losas.

El enfoque lineal no es apropiado debido que las fibras hacen su principal aporte después de la aparición de la grieta y el comportamiento del elemento es totalmente inelástico.

Otro método usado consistente en determinar las líneas de influencia, más sin embargo se debe tener cuidado con modelos no estandarizados y con volúmenes menores al 1% sobre el total de la masa del concreto hidráulico.

Explica, de los diferentes métodos de análisis existentes, como contribuyen las fibras para dichos métodos

Lineal, elástico para losas sobre medios continuos

Líneas de fluencia. Elástico no lineal.

Análisis de Elemento Finito No Lineal. Aparece como el enfoque más acorde actualmente dado que reproduce el mecanismo de falla de una losa sobre medio elástico. No se considera el efecto de alabeo en estas losas.



En general, para las losas de SFRC y PFRC, su diseño atiende a tres categorías de análisis: Los basados en la Teoría Elástica (analíticos para este documento), los basados en Línea de Fluencia y los numéricos basados en Análisis de Elemento Finito.

1.3. Modelos Constitutivos

Existen actualmente diversos modelos constitutivos y aún se siguen desarrollando muchos más, con el objetivo de proporcionar una formulación única suficiente y acorde con el problema que se afronta, ya que no es trivial obtener una formulación única que permita alcanzar la solución general para de esos problemas. Como se verá más adelante, de modelos propuestos los habrá lineales y no lineales. Ya se sabe que los no lineales son los que mejor deducen el comportamiento de estas estructuras y sobre todo por el tipo de material que lo constituye debido a que aporta una considerable resistencia después de la fractura. Así pues resumiendo a la Metodología de análisis no lineal es aquel procedimiento no lineal usado consiste en analizar el comportamiento de la estructura como si fuera lineal en pequeños incrementos de carga o de desplazamiento. En este caso la fuente de la no linealidad entre las cargas y los desplazamientos asociados, radica en el comportamiento del material, el cual está regido por un modelo constitutivo de daño. A demás de la discretización espacial determinada por la red de elementos finitos, en problemas no lineales, es necesario dividir la aplicación de las acciones externas en intervalos de pseudo-tiempo. La discretización en el tiempo permite analizar la ocurrencia de las cargas o los desplazamientos de manera instantánea en cada paso de carga, lo cual se define en la historia de carga.

1.3.1. Métodos Analíticos

Es ineludible el fenómeno existente que se refiere a la interacción suelo-estructura para este tipo de elementos, referente a las losas de concreto hidráulico sobre medios elásticos. Por ello se recurre a modelar dicho comportamiento donde en primera instancia tenemos el modelo de Winkler (1867). Consta de vigas sobre medios elásticos sustituidos por resortes repartidos de manera continua a lo largo del tramo de una estructura que tiene contacto con el terreno base o de apoyo. Los resortes son independientes entre sí y el desplazamiento de una sección cargada es constante mientras la estructura se infinitamente rígida o infinitamente flexible.

Winkler propone que el desplazamiento transversal v en cualquier punto del suelo que actúa como soporte es directamente proporcional a la presión q aplicada en dicho punto y además independiente de los demás puntos adyacentes al mismo, es decir

$$\text{Ec. 1} \quad q(x) = K v(x)$$

Siendo K el coeficiente de balasto del terreno.

La limitante de este modelo radica en no contemplar las deformaciones fuera de la sección cargada, por tanto no se recomienda su utilización para terrenos cohesivos o que presentan capacidad a cortante

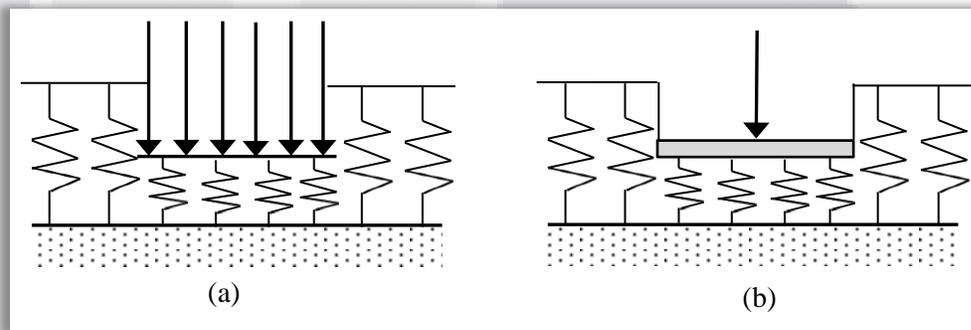


Figura 2 (a).- Placa flexible sometida a una carga uniforme. (b).- Placa rígida sometida a una carga concentrada

Existen otros métodos analíticos que parten de este concepto de Winkler (Santana Naranjo, 2010) pero van agregando consideraciones particulares en los parámetros fundamentales de este tipo de modelos analíticos. Por ejemplo, el modelos de Pasternak que ya considera la interacción de los resortes adyacentes y el de Vlasov-Leontiev donde contempla el módulo de Elasticidad, de Poisson, aún sobre un medio elástico pero semi-infinito, esto quiere decir que ya puede existir una profundidad o espesor de terreno o medio elástico en cuestión.

Westergaard en 1926 desarrolló un modelo analítico para analizar losas apoyadas en medios elásticos bajo el modelo de Winkler. Este y otros modelos similares son restringidos por la teoría elástica, la cual asume una deformación lineal hasta la falla y que ésta ocurre súbitamente. Estos modelos reducen la capacidad de carga de las losas SFRC porque no toman en cuenta la resistencia remanente después de la fractura, de hecho el beneficio de las fibras es totalmente utilizado después de dicha fractura de la matriz del concreto. Por tanto utilizar este tipo de análisis no es apropiado.



1.3.2. Métodos Numéricos. Análisis de Elemento Finito

Dado que las losas de concreto hidráulico sobre suelos presentan discontinuidades, articulaciones y grietas, por tanto su apoyo no es uniforme. Varios se han propuesto modelar esta naturaleza de las losas: Pichumani en 1973 y Spears-Panarese diez años posteriores donde típicamente utilizan combinaciones de elementos basados en bloques elásticos, rígidos y de torsión y así representar el comportamiento de la losa.

La modelación tradicional de los elementos finitos se desarrollada en base a la linealidad e isotropía de los materiales. Sin embargo, el concreto SFRC y PFRC es un material bastante complejo y su comportamiento se aproxima en forma imprecisa por los modelos lineales e isótropos (Pedoja Ingold, 2007). Para el caso de Modelado por Elemento Finito que considera la situación “no lineal” consiste básicamente en despreciar las deflexiones y los giros angulares en elementos donde los esfuerzos a la flexión son importantes como por ejemplo vigas y losas, que de ahí la importancia de establecer el modelo de AEF como *no lineal*, además la exactitud de dicho modelo es afectada por dos principales parámetros: la constitución misma del modelo (ya que varios elementos finitos son derivados por diferentes supuestos o consideraciones) y la representación de sus grietas. (Deaton, 2005)

El método de los elementos finitos es una técnica general de aproximación de problemas continuos con las siguientes características como lo establece Frías 2004:

El medio continuo se divide en un número finito de elementos, cuyo comportamiento se especifica por medio de unos parámetros finitos asociados a ciertos nodos, estos nodos son los puntos de unión del elemento finito y sus adyacentes como se muestra de manera esquemática en la Figura 3.

La solución del sistema completo sigue la regla de los problemas discretos. El sistema completo se forma con el ensamblaje de los elementos. De esta forma se consigue pasar en un sistema continuo, que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con grados de libertad finitos cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones lineales y no lineales. El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las funciones de forma.

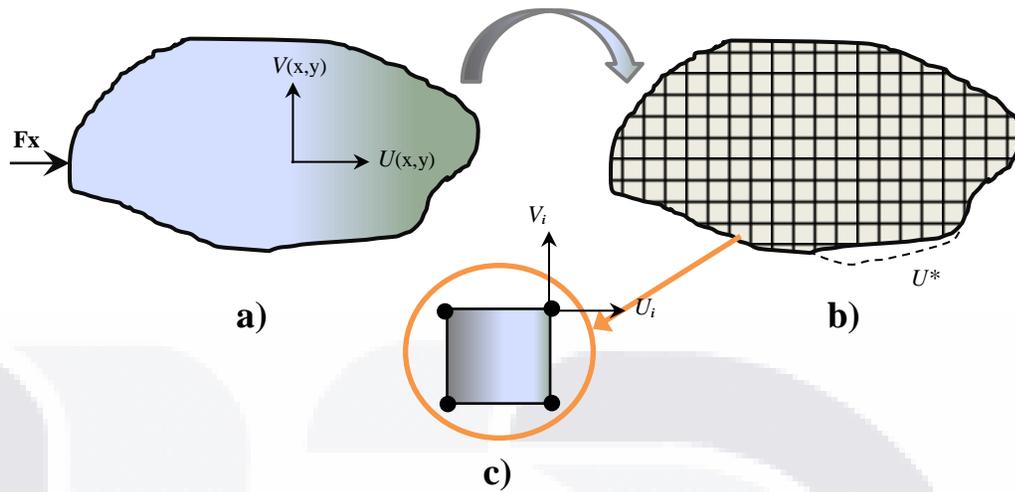


Figura 3 Representación de un dominio global y su subdivisión en dominios locales a) Sistema Continuo, b) Modelo Discreto y c) Elemento Finito

A continuación se presentan los pasos que se requieren para la solución numérica implementando el método de los elementos finitos:

Se discretiza el dominio en elementos, cuyo número y tamaño dependen de las condiciones del problema. Los elementos suelen ser rectos para el caso unidimensional, para el caso bidimensional se usan triángulos, rectángulos, cuadriláteros y paralelogramos y para el caso tridimensional se usan tetraedros, prismas rectangulares y exaedros. La precisión de la solución depende de la cantidad de elementos que se usen, entre mayor número más precisa la solución.

Dentro de cada elemento se propone una solución. Para representar dicha solución, se pueden usar funciones que pueden ser polinomiales conocidas como funciones de forma.

Estas funciones de forma deben cumplir ciertas condiciones básicas:

- Tienen que ser funciones continuas en el interior de cada elemento.
- Tienen que ser continuas en el contorno de cada elemento.
- Tienen que formar polinomios completos.

1.3.3. Modelo Hidrostático Endurecido (Drüker-Prager)

Modelos bajo la teoría plástica que caracterizan la superficie de falla del concreto.

Se ha propuesto una variedad de superficies de fluencia para caracterizar la respuesta del plano de falla en el concreto endurecido. Dos de los primeros fueron los de Mohr-Coulomb (1800) y el criterio de Drüker -Prager [1952] criterio. Estos criterios fueron desarrollados para describir la respuesta de un material tal como la roca, la arena y el concreto para el que la presión hidrostática afecta al plano de falla del material y por ende, su resistencia.

La fórmula que relaciona el ángulo de fricción (ϕ), la resistencia a la compresión (f_c), y la cohesión (c) se puede escribir de la siguiente manera:

$$\text{Ec. 2} \quad c = f_c \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi}$$

En lo que se refiere al cortante después de la fractura, se utilizó la retención del cortante de acuerdo con la ecuación siguiente para considerar el efecto de enclavamiento del agregado y el efecto de transmisión de esfuerzos por las fibras después de la fisuración.

1.3.4. Modelos Paramétricos de Normativas

Existen cinco propuestas de métodos para determinar el espesor de pisos reforzados con Fibras de Acero y de Polipropileno descritos por el ACI 360R-10 que pueden incluir el refuerzo con acero de refuerzo o una combinación de ambos. Cabe mencionar, que estos métodos consideran, entre otras cosas, un mínimo nivel de esfuerzo residual, el cual deberá evaluarse.

El ACI considera el aporte de las fibras metálicas y macro-sintéticas a partir del cálculo del $R_{e,3}$ (esfuerzo residual) como lo establece la norma JSCE SF4 (1983) a partir de un ARS (promedio de esfuerzo residual) obtenido experimentalmente. El ACI acude a diversos criterios de diseño: método elástico, método por líneas de influencia obtenidos por la experimentación de Beckett (1995) que a su vez están basados por los trabajos de Meyerhoff (1962) y Lösberg (1961). El trabajo de Meyerhoff (1962) describe tres casos diferentes según la ubicación de las cargas actuantes.

Caso 1.- Para cargas al centro de la losa

$$\text{Ec. 3} \quad P_0 = 6 \left[1 + \frac{2a}{L} \right] M_0$$

$$\text{Ec. 4} \quad M_0 = M_n + M_p = \left[1 + \frac{R_{e,3}}{100} \right] \times \frac{f_r \times b \times h^2}{6}$$

Caso 2.- Para cargas a lo largo de un eje

$$\text{Ec. 5} \quad P_0 = 3.5 \left[1 + \frac{3a}{L} \right] M_0$$

$$\text{Ec. 6} \quad M_0 = M_n + M_p = \left[1 + \frac{R_{e,3}}{100} \right] \times \frac{f_r \times b \times h^2}{6}$$

Caso 3.- Para cargas al borde de una esquina

$$\text{Ec. 7} \quad P_0 = 2 \left[1 + \frac{4a}{L} \right] M_0$$

$$\text{Ec. 8} \quad M_0 = M_n = \frac{f_r \times b \times h^2}{6}$$

Donde:

a = radio de la circunferencia equivalente al área de la placa. (mm)

b = ancho de la placa (mm)

f_r = resistencia a la falla del concreto (MPa)

h = espesor de la losa (mm)

L = espesor relativo del radio de la circunferencia (mm)

M_n = momento negativo resistente de la losa, a tensión por arriba de la cara de la losa (N-mm)

M_p = momento positivo resistente de la losa, a tensión por debajo de la cara de la losa (N-mm)

P_0 = carga última resistente de la losa (N)

$R_{e,3}$ = esfuerzo residual calculado por JSCE SF4 (%)



Cabe mencionar, que si se analiza el Caso 3, se denotará el hecho de que no considera el aporte del esfuerzo residual $R_{e,3}$.





CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El cemento utilizado fue Portland Tipo I ASTM con una resistencia a la compresión 40 MPa a los 28 días, así como cuatro tipos diferentes de agregados para la conformación del concreto a base de dos arenas y dos tamaños de agregado. Para todas las mezclas, con y sin fibras, la relación agua-cemento (A/C) fue de 0,6. Se utilizó reductor de agua de bajo rango.

La etapa experimental se divide en tres fases. En la primer fase cuenta con la experimentación de once fibras y la selección de las mejores fibras en términos de comportamiento mecánico en conjunto con el concreto considerando su costo. La segunda fase la constituye experimentación de las fibras seleccionadas variando su dosificación para encontrar la óptima y, por último, la tercera incluye también una experimentación de concreto hidráulico adicionado con las fibras seleccionadas en la segunda fase sobre losas de 300 cm x 300 cm y 15 cm de espesor sustentadas sobre tres diferentes suelos aplicando una presión de carga variable y ascendente sobre un área de 545 cm² ubicada al centro de la losa.

2.1. Descripción de la Metodología

Se realizaron pruebas para 28 días tomando en cuenta variables de evaluación como revenimiento, cantidad de fibras agregadas, valores de resistencia a compresión, resistencia a flexión, esfuerzo residual, tenacidad, módulo de elasticidad y de Poisson en probetas cilíndricas. Posteriormente se realizaron trabajos en campo, en la elaboración de pisos industriales agregando diferente tipo de fibra en secciones pequeñas, con la finalidad de observar el revenimiento y trabajabilidad del concreto en estado fresco. Se sometió un proceso de selección donde se analizaron los resultados obtenidos, se continuó con la elaboración de muestras, para finalmente ensayarlas y seleccionar la fibra que será utilizada en pisos industriales. Adicionalmente se inicia la propuesta de análisis y diseño con el método de elementos finitos a partir de los resultados con las muestras de fibra seleccionadas.



2.2. Diseño de Mezcla y Elaboración del Concreto Hidráulico Base

El mezclado del concreto se realizó en una revolvedora de laboratorio con capacidad de 255 litros y con una velocidad angular de trabajo de 28 a 32 RPM. La temperatura ambiental a la cual fueron elaboradas las mezclas de concreto se mantuvo entre 20 y 25 °C. Para todas las mezclas con y sin fibras la A/C fue de 0.6. Se utilizó un aditivo reductor de agua. Las proporciones de los constituyentes utilizadas para la elaboración del concreto (sin considerar las fibras) se muestran en la Tabla 1. El esqueleto granular se mantuvo constante para que no fuese un parámetro de variabilidad en el comportamiento del concreto y que los resultados obtenidos reflejen solamente el efecto de las fibras. Los valores de equivalente de arena, tamaño de partícula de la grava, calidad de agua, presencia de materia orgánica de agregados fueron determinados y cuidados en términos de aceptabilidad según lo marcan lo establece las NMX. Asimismo, debido a que las cuantías de fibra en el concreto son relativamente bajas, se desprecia la variación en las proporciones de agregados.

Tabla 1 Esqueleto Granular de la mezcla base

Componentes de la mezcla	Cantidad (kg/m ³)	Densidad	Absorción (%)
Cemento	308.00	3.15	NA
Arena triturada caliza	189.00	2.63	4.8
Arena de rio	484.44	2.40	4.2
Grava triturada riolítica de 20mm	531.32	2.59	1.01
Grava triturada riolítica de 40mm	648.00	2.62	2.04
Agua	185.00	1.00	NA
Aditivo líquido	2.06	1.20	NA
Fibra de acero o polipropileno	variable	variable	NA



2.3. Fase I. Selección y caracterización de las fibras.

La selección de las fibras se realizó según lo establece en ASTM C 1116 para el caso de las fibras sintéticas y para el caso de las metálicas como se establece en ASTM A 820. A continuación se muestra una Tabla 2 de la selección de las fibras a analizar, cabe mencionar que se considera la existencia y fácil adquisición en la región de Aguascalientes.

Tabla 2 Selección de Fibras para Experimentación y Análisis

Imagen de la fibra	Descripción y Resumen Ficha Técnica
	<p style="text-align: center;">RAMGRA CON ESTRIBOS</p> <p>Fabricada de alambre de acero trefilado en frío de primera calidad tipo 1006 bajo carbón.</p>
	<p style="text-align: center;">RAMGRA ONDULADA</p> <p>Fabricada de alambre de acero trefilado en frío de primera calidad tipo 1006 bajo carbón.</p>
	<p style="text-align: center;">TECNOR 05-25</p> <p>La fibra Tecnor 05-25 es de acero deformado en frío, cada fibra tiene una forma triangular y por lo menos tiene dos torcidos de 360°, para mejorar la adherencia al concreto.</p>



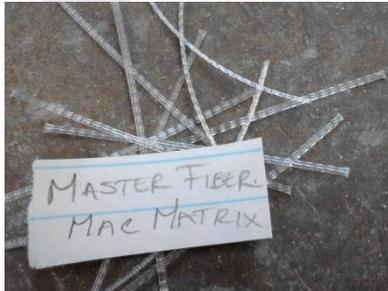
DRAMIX

Las fibras Dramix son filamentos de acero, deformados y cortados en determinadas longitudes, para el refuerzo del concreto, mortero u otros materiales compuestos.



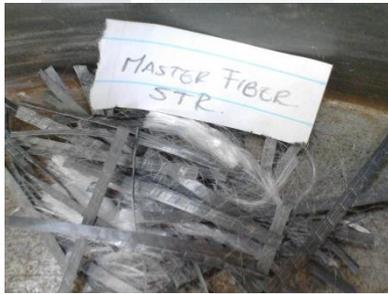
FIBRACERO

Son fibras onduladas de acero de alta resistencia a la tracción fabricadas a partir de alambres de acero conformados en frío, que en conjunto debido a su forma ondulada aseguran un funcionamiento óptimo de anclaje.



MAC MATRIX

Es una fibra de polímero sintético para uso en refuerzo secundario. MasterFiber MAC Matrix fue diseñada para emplearse en concretos de pisos industriales o concretos lanzados.



MASTERFIBER STR

Sistema de refuerzo de fibras 100% de copolímero virgen de alta tenacidad. La fibra es de tipo monofilamento, no fibrilada, totalmente orientada, formando un perfil que permite anclarlo a la matriz cementicia produciendo un concreto de alto desempeño.



MASTERFIBER MICROMASTERFIBER

Es una fibra 100% de polipropileno, especialmente diseñada para su empleo en concreto. Gracias a la red tridimensional que forma, evita la aparición de fisuras motivadas por retracción, mejorando de forma sustancial la calidad de la estructura de hormigón ejecutada.



TUF-STRAND SF EUCLID

Las TUF-STRAND SF son fibras sintéticas estructurales patentadas, mezcla autofibrilante de polipropileno/polietileno.



NYCON-SF-B (SERIE 1)

Fibras de acero pre-mezcladas con fibras Nycon MULTIMESH. Proporcionan un concreto de alto rendimiento. Cumple requisitos de la norma ASTM A820 y C1116. Proporciona múltiples dimensiones de refuerzo, mejora resistencia de impacto del concreto, durabilidad y resistencia, para un buen acabado, además proporciona una fibra de acero macro y de fibra sintética en uno.



NYCON-XL-100 (SERIE 2)

De macro de monofilamento, de alta resistencia para la fuerza después de la grieta, de alto rendimiento para colados de concreto lanzado, diseñado especialmente para el agrietamiento. Cumple con los requisitos de la norma ASTM C-1116, Sección 4.1.3 y la norma ASTM C-1399. Presenta buena adherencia al hormigón, mejora esfuerzos residuales, la durabilidad y la resistencia al refuerzo.

2.3.1. Determinación de Parámetros Mecánicos

En este apartado se mostrará el cálculo y metodología para la obtención y determinación de los parámetros mecánicos que interesan para así lograr un análisis de resultados enfocado a compararlos cualitativa y cuantitativamente.

Los parámetros a determinar incluye el módulo de ruptura, el módulo de elasticidad (MR), el módulo de Poisson (ν), resistencia a la compresión simple ($f'c$), índices de tenacidades (T), esfuerzo residual ($Re,3$) y revenimiento.

2.3.1.1. Caracterización en muestras cilíndricas

Pruebas realizadas en especímenes a los 28 días, (considérese que cada prueba consta de 4 probetas para ensaye) al realizarse la prueba de 3 cilindros, uno de ellos se ensaya a compresión, con el objeto de conocer el esfuerzo máximo del concreto en condiciones normales de ensaye, con estos datos se procedió a obtener el módulo de elasticidad y la relación de Poisson, considerando aplicar el 60% de la carga obtenida en el primer ensaye.

A cada cilindro se le colocó el dispositivo correspondiente al ensayo; consiste en un sistema a base de deformímetro y extensómetro, compuesto por tres anillos unidos por un pivote o soporte, cada uno de los anillos contienen tornillos los cuales cumplen la función de centrar y sujetar el elemento, dos micrómetros para medir la deformación transversal y longitudinal. Para colocar el aparato en el cilindro, primeramente, se giran los tornillos hacia el exterior de los anillos, después, se coloca el aparato teniendo cuidado de no fracturar el cabeceo, se centra el equipo con la muestra, se nivela horizontal y verticalmente, se prosigue con ajustar los tornillos de manera de dejar centrada la muestra, se presionan los tornillos del anillo inferior y superior, se ajustan el anillo central ajustando los tornillos sin hacer presión en la muestra ya que estos tornillos miden la deformación horizontal, se extraen las barras que soportan los anillos superior e inferior, posteriormente, se coloca en el equipo de ensaye a compresión, se revisa que los micrómetros estén en ceros, antes de aplicar la carga del 60% se aplican cargas al 10% para que el sistema se ajuste. Se aplica la carga uniforme hasta el 60% y se obtiene la deformación longitudinal y transversal de la muestra, la prueba descrita se contempla en la norma ASTM C469 (Figura



4). Durante la aplicación de la carga al elemento se toman videos para obtener las lecturas de deformación y carga. Se retira el dispositivo para el módulo de elasticidad y se procede al ensaye a compresión del mismo cilindro para conocer su resistencia a compresión, según el proceso descrito anteriormente.



Figura 4 Colocación de dispositivo deformímetro extensómetro para determinar el módulo de elasticidad.

En el cálculo del módulo de elasticidad, es necesario tener en cuenta datos del dispositivo a usar como la distancia en el plano vertical del pivote y el micrómetro al punto de los tornillos en los anillos, si la distancia es igual la deformación será la mitad de la lectura, caso contrario, se empleará una fórmula para la obtención de la deformación.

Ec. 9
$$d = ge_r / (e_r + e_g)$$

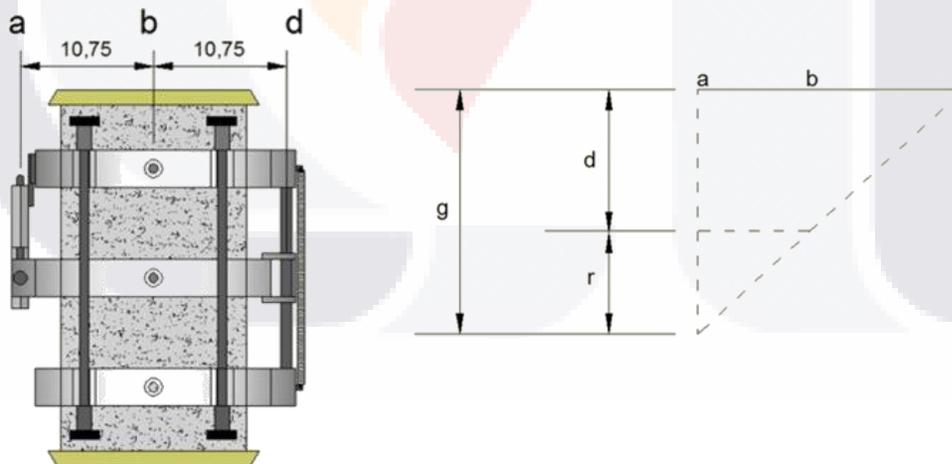


Figura 5 Representación esquemática de instalación de dispositivos para determinar módulos de Elasticidad y de Poisson

Donde:

d = desplazamiento debido a la deformación del espécimen

r = desplazamiento debido a la rotación del apoyo del anillo



- a = ubicación del micrómetro
- b = punto de apoyo del anillo
- c = ubicación de la varilla pivote
- g = lectura del micrómetro

Después de realizar la aplicación de carga a no más del 70% con el dispositivo (ver Figura 5) y obtener los datos de carga-deformación, se grafican y se identifica la tensión correspondiente al 40% de la carga última S_2 y la tensión longitudinal a 0.00005 S_1 , la deformación longitudinal producto de la tensión ϵ_2 y utilizar la fórmula para el cálculo del módulo de elasticidad:

$$\text{Ec. 10} \quad E = \frac{S^2 - S^1}{\epsilon_2 - 0.000050}$$

En el cálculo de la relación de Poisson, se obtiene a partir de la deformación en el sentido horizontal denominada ϵ_{t2} y la deformación vertical identificada como ϵ_{t1} , además de la deformación longitudinal producto de la tensión ϵ_2 . La fórmula para el cálculo de la relación de Poisson es la siguiente:

$$\text{Ec. 11} \quad \nu = \frac{\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1}}{\epsilon_2 - 0.000050}$$

Tenacidades

La absorción de energía o tenacidad se define como el área bajo la curva carga-deformación según la ASTM C1018 a partir de una prueba de flexión en vigas. Calculada en cuatro puntos específicos de desplazamiento: una previa al pico (δ) y tres puntos después del mismo (3δ , 5.5δ y 10.5δ). Véase Figura 6. La tenacidad en el valor δ ocurre a la aparición de la primera grieta, conocida como tenacidad elástica o pre-pico, mientras que el resto de las tres son las post-pico en 3δ , 5.5δ y 10.5δ respectivamente.

T_δ = Tenacidad correspondiente a δ = área OAB

$T_{3\delta}$ = Tenacidad correspondiente a 3δ = área OACD

$T_{5.5\delta}$ = Tenacidad correspondiente a 5.5δ = área OAEF

$T_{10.5\delta}$ = Tenacidad correspondiente a 10.5δ = área OAGH

Luego entonces es posible determinar los índices de tenacidad correspondientes obteniendo su relación entre las tenacidades post-pico y la pre-pico.

$$I5 = T3\delta / T\delta$$

$$I10 = T5.5\delta / T\delta$$

$$I20 = T10.5\delta / T\delta$$

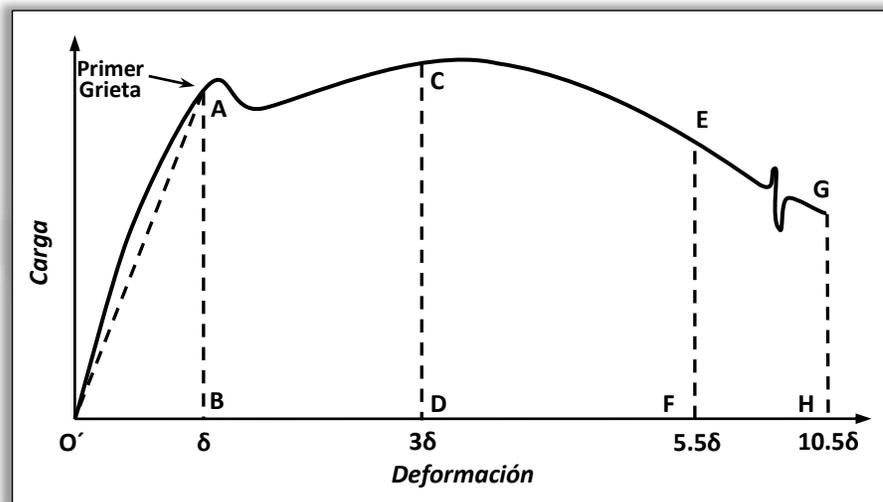


Figura 6 Representación curva carga-deformación con tenacidades

2.3.1.2. Módulo de Ruptura en probetas prismáticas

El proceso se realizó de acuerdo a la norma ASTM C78, Observese la (Figura 7)



Figura 7 Secuencia de trabajos, colocación de riel de apoyo, adaptación de micrómetro y colocación de espécimen

Posteriormente, ya alineado el espécimen en el aparato se inicia la aplicación de la carga a una velocidad uniforme de 8.8 a 12.3 kg/cm² por min. Durante este proceso de aplicación de carga se toma video de la lectura del micrómetro y video de la aplicación de la carga, tomando registro de la carga final y el esfuerzo residual. Inmediatamente después de llevar a la falla el espécimen se ubica en que tercio cae la falla, el cual nos ayudará para obtener el cálculo del módulo de ruptura y finalmente se cuenta el número de fibras expuestas.

El cálculo del módulo de ruptura, si la fractura se presenta dentro del tercio medio, se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ec. 12} \quad MR = \frac{PL}{bd^2}$$

Dónde:

MR= Modulo de ruptura

P= Carga máxima aplicada

L= Distancia entre apoyos

b= ancho promedio del espécimen

d= Peralte promedio del espécimen

En caso en que la fractura se presente fuera del tercio medio, en no más del 5% de su longitud se calcula el módulo de ruptura como sigue:

$$\text{Ec. 13} \quad MR = \frac{3Pa}{bd^2}$$

Dónde:

a = es la distancia promedio entre la línea de fractura y el apoyo más cercano en la superficie de la viga en mm.

2.3.1.3. Esfuerzo Residual

Para el caso del esfuerzo residual, existen dos métodos para su obtención. Se utilizó el método explicado en norma ASTM C1018. Según la nota 2 de la norma ASTM C1399, Banthia y Dubey compararon resultados usando los dos métodos de ensayo, con igual cantidad de fibra y proporciones de volumen de 0.1, 0.3 y 0.5 %, reportando la prueba del método C1399 un promedio de 6.4 % inferior a la del método C1018.

El método en cuestión para obtener el esfuerzo residual consta en el comportamiento que se presenta inmediatamente después de la primera grieta, registrándose en una gráfica de carga-deformación, obteniendo los índices de tenacidad, que indican la capacidad de absorción de energía de la muestra, estos índices se determinan como resultado del cociente el área bajo la curva hasta una deflexión establecida, por el área bajo la curva considerada a la primera grieta.

Para el cálculo del índice de tenacidad, primero determinamos el área hasta la primera grieta, que corresponde al triángulo identificado como O'AB de la siguiente Figura 6, obtenemos el área bajo la curva hasta la deformación con valor 3, reconociendo el área como O'ACD en la Figura 6. Continuando con la división de la anterior área por el área O'AB a la primera grieta y de esta manera obtenemos el índice de tenacidad I_5 redondeado al 0.1.

Se determina el área bajo la curva hasta la deformación con valor de 5.5, área O'AEF Figura 6, se divide el área obtenida por el área O'AB a la primer grieta, el resultado se denomina Índice de tenacidad I_{10} , redondeado a 0.1.

Cuando se requiere, se determina el área bajo la curva de la deformación 10.5, Área O'AGH en la Figura 6, se divide entre el área bajo la curva hasta la grieta O'AB y se obtiene el Índice de tenacidad I_{20} .

Para determinar el factor de esfuerzo residual $R_{5,10}$ como 20 ($I_{10}-I_5$), y cuando sea necesario el factor de resistencia residual $R_{10,20}$ como 10 ($I_{20}-I_{10}$).



El Japanese Concrete Institute (JCI-SF4, 1983) propone otro método para obtener un parámetro de edición de esfuerzo residual (que es lo que la mayoría de fabricantes de fibra utiliza), usando una viga apoyada a 450 mm y sección de 150 mm x 150 mm y carga en un tercer punto en el control de desplazamiento.

$$\text{Ec. 14} \quad f_{ct} = P_{max} \frac{L}{bh^2}$$

La falla después de la grieta se explica por el empleo de $f_{3,e}$ que es la capacidad de esfuerzo derivada de la carga ($P_{e,3}$), la cual se determina de dividir el área bajo la curva carga-deflexión por $L/150$ que es la deformación máxima permitida. La fórmula para obtener $f_{3,e}$, es como sigue:

$$\text{Ec. 15} \quad f_{e,3} = P_{e,3} \frac{L}{bh^2}$$

Finalmente el diseño de la resistencia a flexión se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Ec. 16} \quad f_d = f_{ct} + f_{e,3}$$

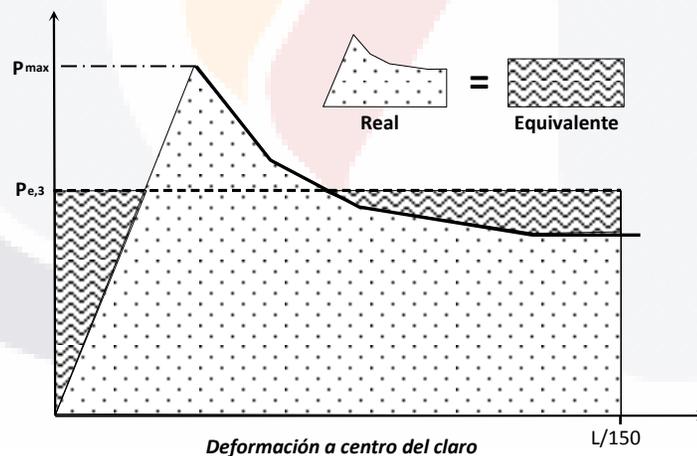


Figura 8 Gráfica de curva carga-deflexión para una viga cargada en tres puntos.



2.4. Fase II Experimentación y Estudio de las dos fibras seleccionadas

2.4.1. Motivo

En la industria de la construcción en particular los pisos industriales el concreto ha presentado mejoras importantes en el comportamiento durante su fabricación, colocación y estado de servicio, sin embargo, se siguen teniendo problemas, uno de estos problemas es la contracción en estado fresco, los cuales disminuyen la durabilidad de los pisos ya que se vuelve una estructura permeable, lo que conlleva a un alto riesgo de corrosión y desfragmentación del concreto.

Un efecto que se genera a partir de la contracción en pisos industriales es la aparición de grietas plásticas en pisos industriales. Como respuesta a estos problemas, se han diseñado fibras que adheridas al concreto mejoran además las propiedades mecánicas del concreto. En esta etapa de la investigación se logró seleccionar 2 fibras cuyas características mecánicas, de costo y trabajabilidad han sido mejores en comparación con todas las fibras que se analizaron en la anterior etapa.

2.4.2. Metodología de la Experimentación

Esta selección fue en base a los resultados de la elaboración de cilindros y vigas, a los cuales se les caracterizó por su trabajabilidad, resistencia a compresión y flexión. Existe una ampliación de metas, se ve la necesidad de tener un método de diseño más cercano a la realidad, sin el uso de tantas tablas y monogramas (como lo realiza actualmente el ACI), por lo que se requiere realizar el análisis y diseño de los pisos con elementos finitos, por lo que se realizan las pruebas para obtener los módulos de elasticidad, relación de Poisson, y además se obtienen los esfuerzos residuales de las vigas sometidas a flexión.

2.5. Fase III Experimentación de Losas

2.5.1. Motivo

Uno de los principales objetivos es el de diseño de pisos o losas de tipo industrial, el cual utiliza ecuaciones para obtener el momento admisible en pisos, propuesto por el ACI, y se complementa con un análisis de elemento finito, para no estar limitados a los casos marcados por el ACI, evitar el uso de nomogramas y tablas, y principalmente la ventaja de poder modelar el tipo de carga o tipos de carga que deseemos, en la posición que se requiera.

Con el uso de la hoja de cálculo del proceso de diseño, se obtiene la siguiente comparación de resistencia de pisos, relacionando el espesor del mismo, su costo y el costo y aportación mecánica de la fibra añadida, obteniendo los indicadores de relación de costo mostrados:

Se puede apreciar que podemos obtener un concreto más económico con la misma resistencia aumentando el espesor de la sección, con una disminución en costo de materiales de alrededor de 14%, Se sugiere el cambio por fibra sintética debido a las siguientes razones:

- Se puede mantiene el costo actual.
- Se tiene un proveedor local.
- Existe una considerable disminución en peso; ahorro en fletes.
- Menos mano de obra para el dosificado con el concreto.
- Al no ser metálico se evita la oxidación, y manchas por la misma en los pisos.
- No se despostilla, al realizar el corte, como la fibra metálica (mejor aspecto).

También se encuentra el apartado de las pruebas realizadas en campo para validar el proceso de diseño propuesto.



CAPÍTULO 3. RESULTADOS

En este apartado, se muestran los resultados producto de la campaña experimental donde se obtienen los parámetros que tienen que ver con el comportamiento mecánico: módulo de ruptura (MR), módulo de elasticidad (E), esfuerzo residual ($f_{e,3}$), relación de Poisson (ν), índices de tenacidades y el parámetro también importante que tiene que ver con la trabajabilidad como lo es el revenimiento. En la siguiente Tabla 3 muestra un concentrado de probetas utilizadas en las campañas experimentales y de obtención de datos paramétricos que se utilizarán en el capítulo referente al diseño de una losa.

Tabla 3 Concentrado de Probetas utilizadas en toda la etapa experimental

MATRIZ DE PROBETAS			
<i>No.</i>	<i>FIBRA</i>	<i>VIGAS</i>	<i>CILINDROS</i>
1	de Control Sin Fibra	15	15
2	TECNOR 05-25	112	112
3	RAMGRA ONDULADA	16	16
4	RAMGRA CON ESTRIBOS	16	16
5	FIBRACERO	16	16
6	DRAMIX BEKAERT	112	112
7	EUCLID- TUF-STRAND SF	112	112
8	MASTER FIBER STR	112	112
9	MASTER FIBER (Microfibra)	16	16
10	NYCON SERIE 1	16	16
11	NYCON SERIE 2	16	16
12	MAC MATRIX	16	16
<i>SUBTOTAL</i>		<i>575</i>	<i>575</i>
<i>TOTAL</i>			<i>1,150</i>

3.1. De Fase I Experimentación y análisis de las once fibras

En la Tabla 4 se muestra un concentrado de los datos ya analizados después de la campaña de experimentación de las once fibras. Ejemplos de ello se encuentra en el ANEXO “A”

Tabla 4 Comparativa De Resultados

<i>Fibra</i>	<i>Resist. Compresión</i>	<i>Mód. de ruptura</i>	<i>Mód. Elástico</i>	<i>Rel. Poisson</i>
	f_c (kg/cm ²)	M.R. (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	ν (adim.)
SIN FIBRA	320.0	44.1	N/A	N/A
TECNOR 05-25	307.0	46.0	493,552	0.17
RAMGRA ONDULADA	276.7	48.5	498,338	0.18
RAMGRA CON ESTRIBOS	333.5	51.9	460,191	0.22
FIBRACERO	328.1	47.2	473,819	0.21
DRAMIX BEKAERT	334.6	53.8	460,778	0.39
EUCLID- TUF- STRAND SF	317.0	50.1	489,807	0.19
MASTER FIBER STR	330.0	47.2	467,776	0.22
MASTER FIBER (Microfibra)	320.8	48.5	480,563	0.31
NYCON SERIE 1	313.5	43.6	473,115	0.28
NYCON SERIE 2	340.7	48.9	426,690	0.39
MAC MATRIX	308.4	48.5	496,200	0.26

Para mostrar la información de la anterior tabla se ofrecen las siguientes gráficas.

En la Figura 9 denota la resistencia a la compresión simple obtenida.

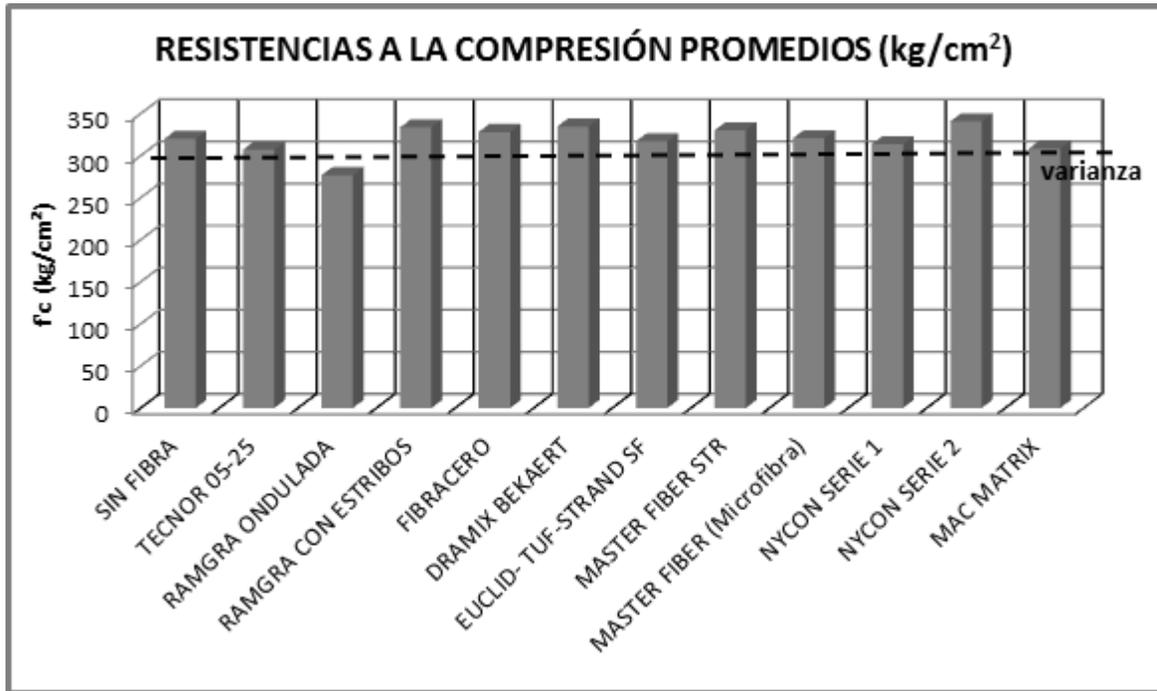


Figura 9 Resistencia a la compresión promedio mostrando la varianza de los resultados

En la Figura 10 se muestra los resultados de Módulo de Ruptura promedio obtenidos para cada fibra.

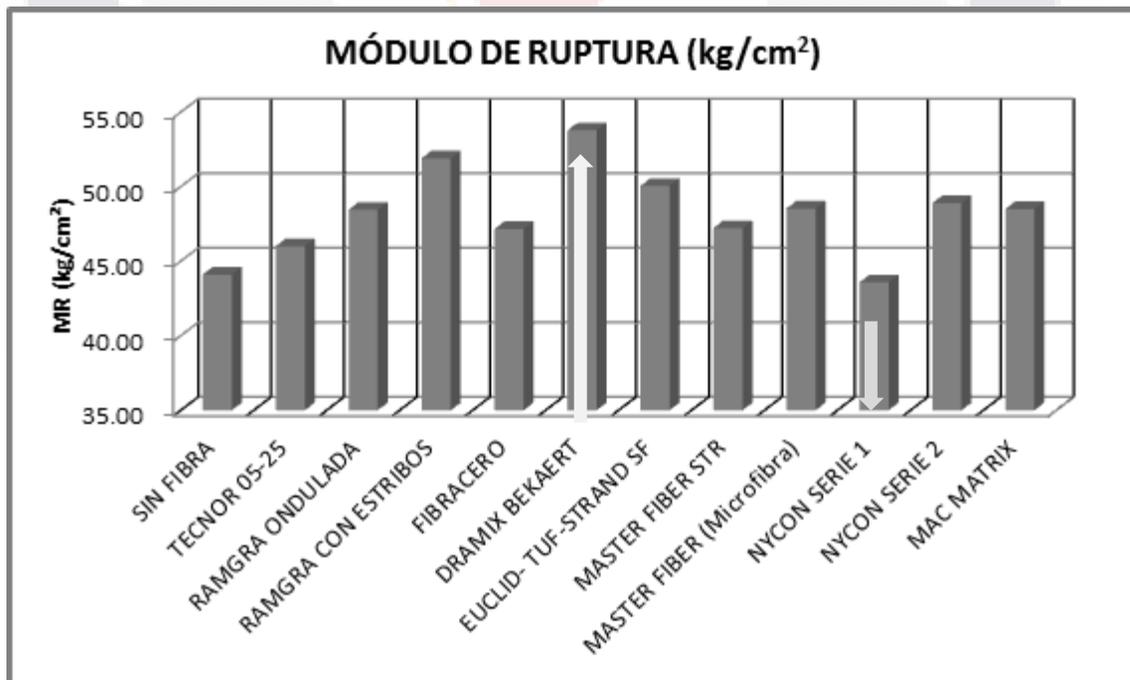




Figura 10 Módulo de Ruptura de las fibras

En la siguiente Figura 11 se muestra los resultados promedio obtenido del Módulo Elástico o de Elasticidad. Para este parámetro no se experimentó con concreto sin adición de fibras.



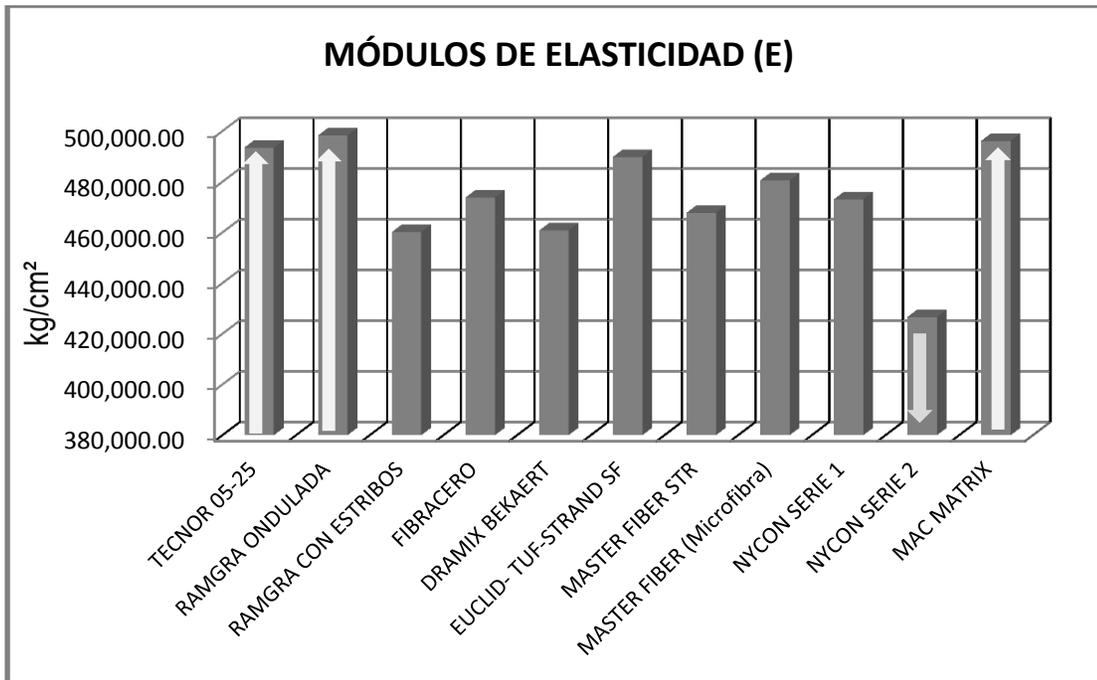


Figura 11 Módulos de Elasticidad Promedio obtenidos de las fibras



En cuanto a la Relación de Poisson contenida en la última columna de la Figura 12. Tampoco se determinaron las relaciones de Poisson en el caso del concreto sin fibras.

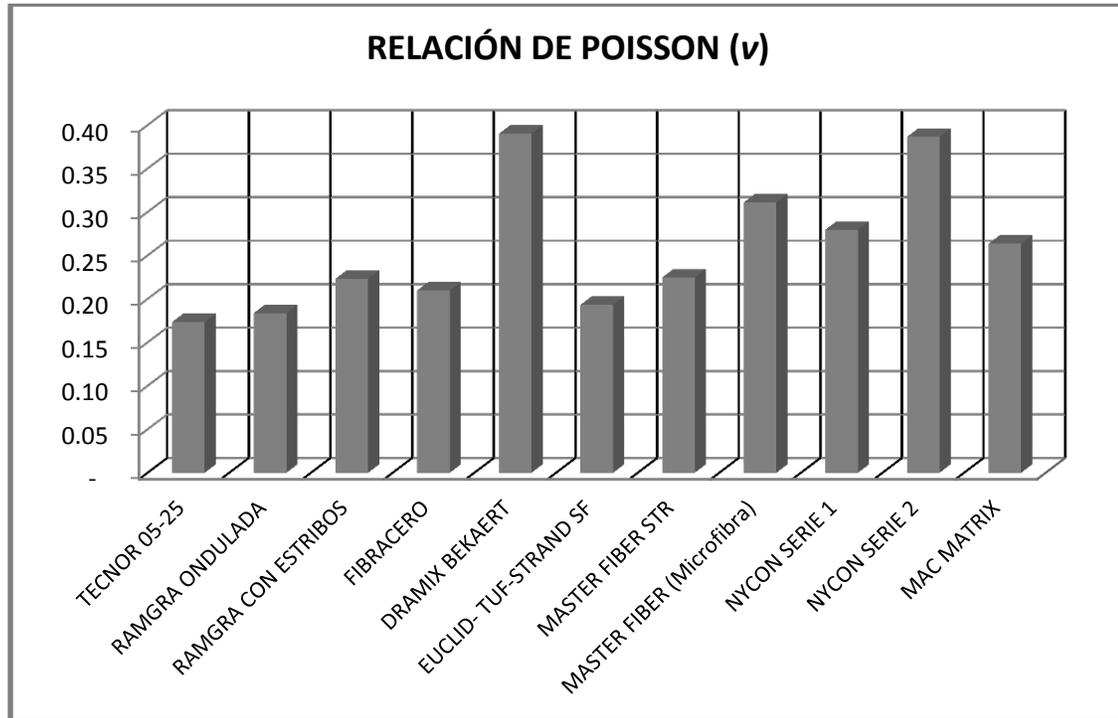


Figura 12 Relación de Poisson Promedio obtenidos de las fibras



En la Figura 13 se muestra el Esfuerzo Residual obtenido según lo establece el JCI en su norma. Nótese que no aparecen las el total de las 11 fibras, esto es, debido a que las tres restantes no mostraron ningún aporte a este parámetro y, por tanto este concreto se comporta como si no presentara adición de fibras.

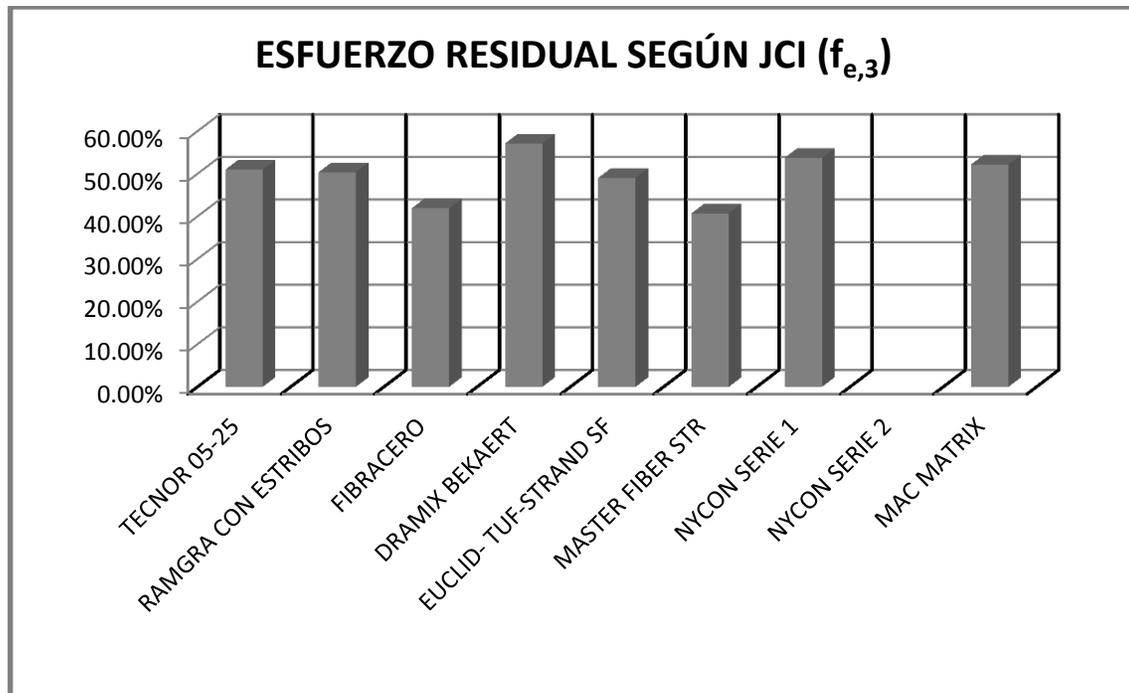


Figura 13 Esfuerzo Residual obtenidos de las fibras



En la siguiente tabla se muestran las tenacidades has 5δ dado que en 10.5δ no se adquirieron datos en ninguna de las probetas debido a que ya no existía energía residual para seguir absorbiendo energía. Tres fibras* presentaron cero aportación de esfuerzo residual.

Tabla 5 Comparativa De Resultados

<i>Fibra</i>	<i>Tenacidades</i>			<i>Esf. Residual</i>
	<i>d</i> (kg)	<i>3d</i> (kg)	<i>5d</i> (kg)	<i>f_{e,3}</i> (%)
TECNOR 05-25	1,805	5,785	7,330	51.0%
*RAMGRA ONDULADA	N/A	N/A	N/A	N/A
RAMGRA CON ESTRIBOS	1,820	6,542	10,830	50.4%
FIBRACERO	1,281	4,009	6,624	41.9%
DRAMIX BEKAERT	1,753	7,505	12,672	57.1%
EUCLID- TUF-STRAND SF	1,593	5,316	8,125	49.1%
MASTER FIBER STR	1,668	4,752	6,877	40.7%
*MASTER FIBER (Microf.)	N/A	N/A	N/A	N/A
NYCON SERIE 1	1,747	7,499	14,078	53.8%
*NYCON SERIE 2	1,460	N/A	N/A	N/A
MAC MATRIX	2,002	6,351	8,167	52.2%

*.- No aporta esfuerzo residual



La siguiente Tabla 14 muestra los resultados a la primer fisura δ , a 3 δ y a 5 δ .

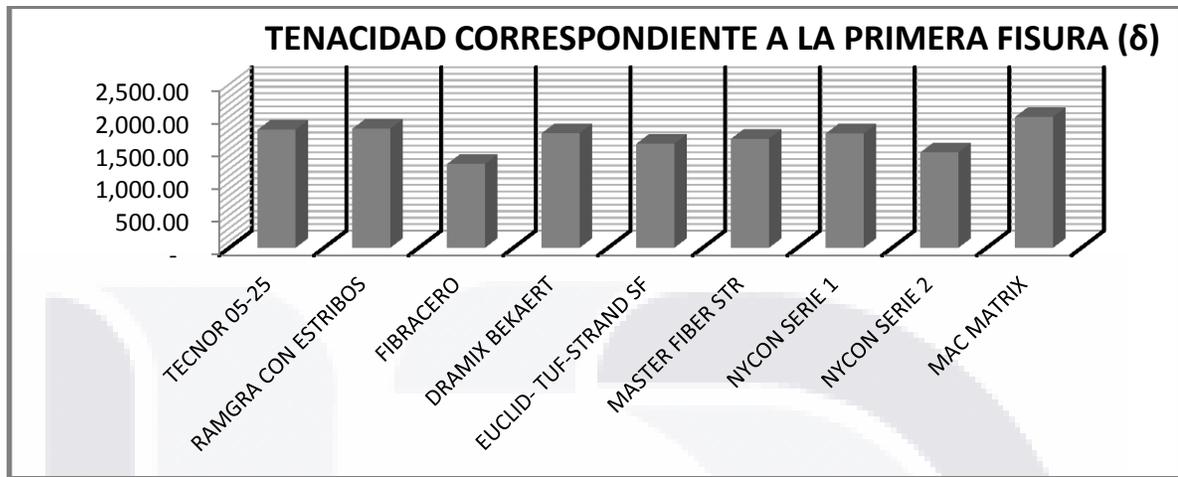


Figura 14 Tenacidad correspondiente a la primer fisura (δ)

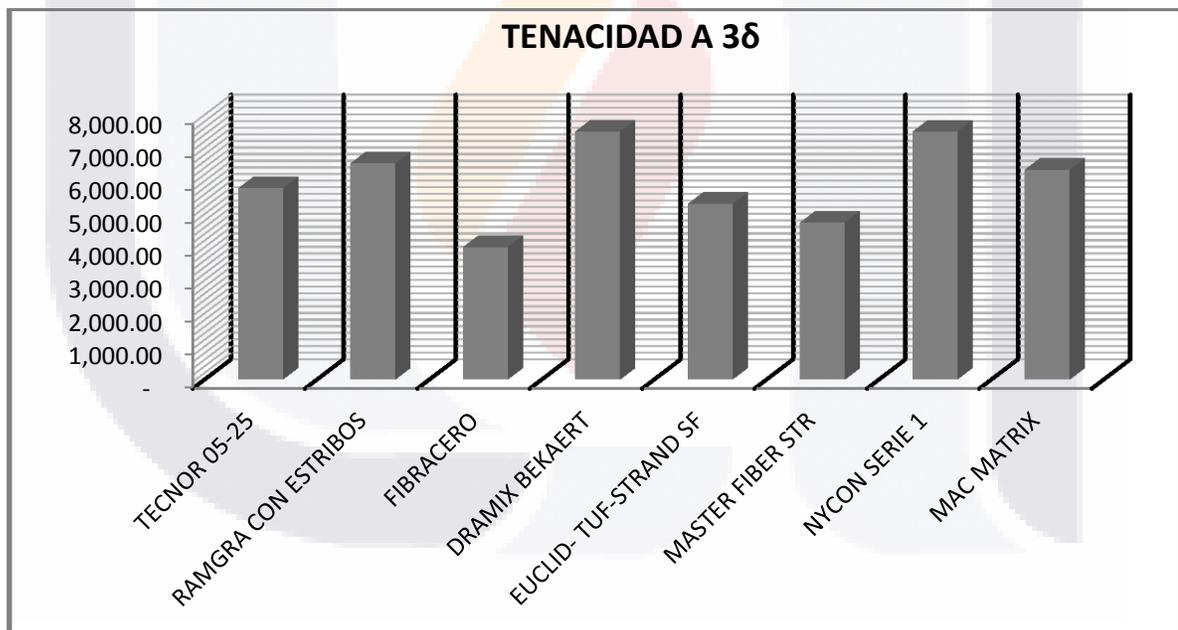


Figura 15 Tenacidad a 3 δ

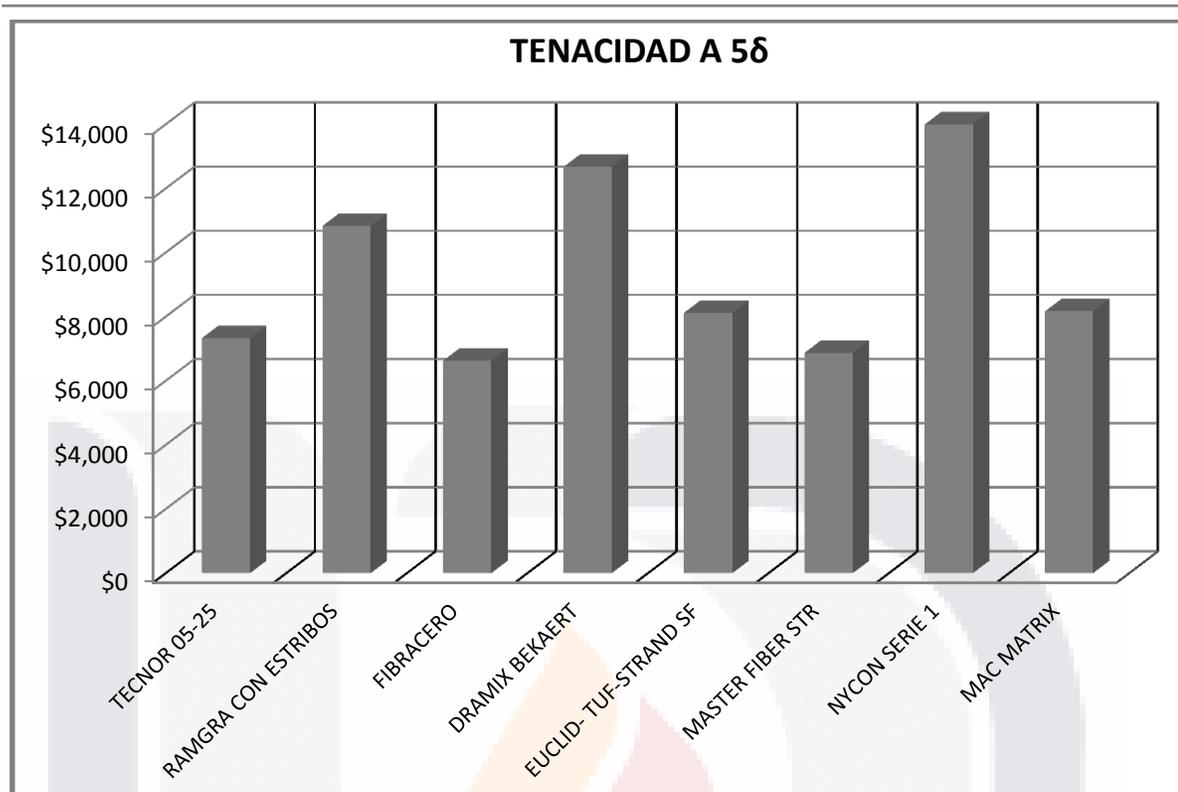


Figura 16 Tenacidad a 5δ

3.2. De Fase II Dosificación Óptima y selección de las mejores fibras

En esta fase se analiza y experimenta nuevamente los parámetros anteriormente calculados pero con el objeto de obtener menor dispersión de resultados aumentando el número de ensayos y así lograr una mayor confiabilidad de resultados. A esta etapa y siguiente la reconoceremos en este documento como la fase o etapa de “Repetibilidades” esto es por el hecho de que se vuelven a repetir las pruebas pero ahora concentrándose en las cuatro seleccionadas.

3.2.1. Repetibilidades

En esta fase se ensayó para cada serie de fibra.

Tabla 6 Resumen de resultados

	<i>SIN FIBRA</i>	<i>DRAMIX</i>	<i>EUCLID</i>	<i>TECNOR</i>	<i>MASTERFIBER STR</i>
Tenacidad correspondiente a la primera fisura (δ)	N/A	1,949.88	1,751.28	1,813.83	1,738.86
Tenacidad correspondiente a 3δ	N/A	7,181.31	5,444.19	5,546.55	5,889.50
Tenacidad correspondiente a 5.5δ	N/A	11,457.22	8,828.67	6,954.33	7,379.87
Esfuerzo Residual ($f_{e,3}$)	N/A	54%	48%	47%	49%
Módulo de elasticidad del concreto (E)	490,169.97	494,358.66	493,843.89	504,397.33	481,153.03
Relación de Poisson del concreto (ν)	0.23	0.19	0.45	0.20	0.40
Módulo de Ruptura (MR)	45.83	49.89	46.72	47.42	46.79

Muestra ejemplo de gráfica para módulo de elasticidad de DRAMIX se encuentra en ANEXOS “B”.

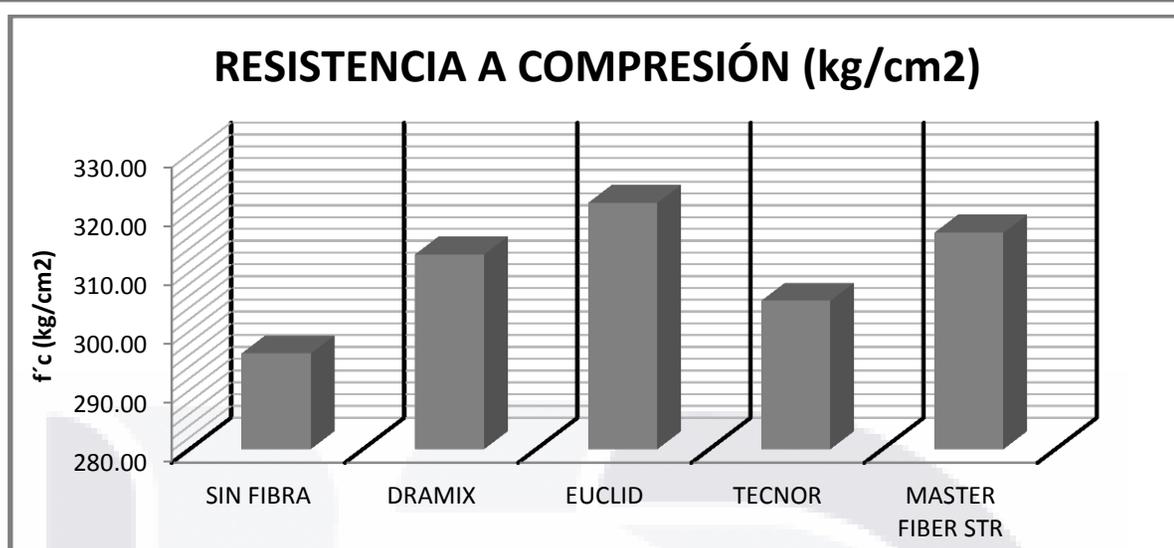


Figura 17 Resistencia a la compresión

De la Figura 17 es notoria el aporte de las fibras donde la de menor valor fue para TECNOR y, en contra punto, EUCLID.

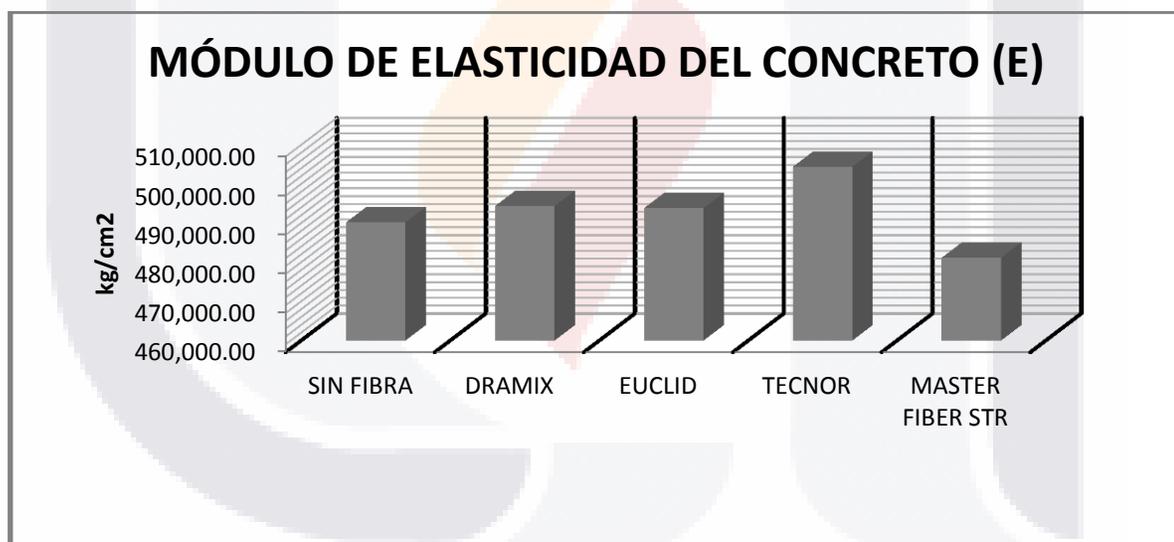


Figura 18 Modulo de elasticidad del concreto

En lo que se refiere a la Figura 18 se denota que TECNOR fue la de mayor valor mientras que Dramix y Euclid lo mantuvieron prácticamente sin cambios. MASTER FIBER STR obtuvo en este parámetro el de menor valor pero aún así está dentro de lo esperado.

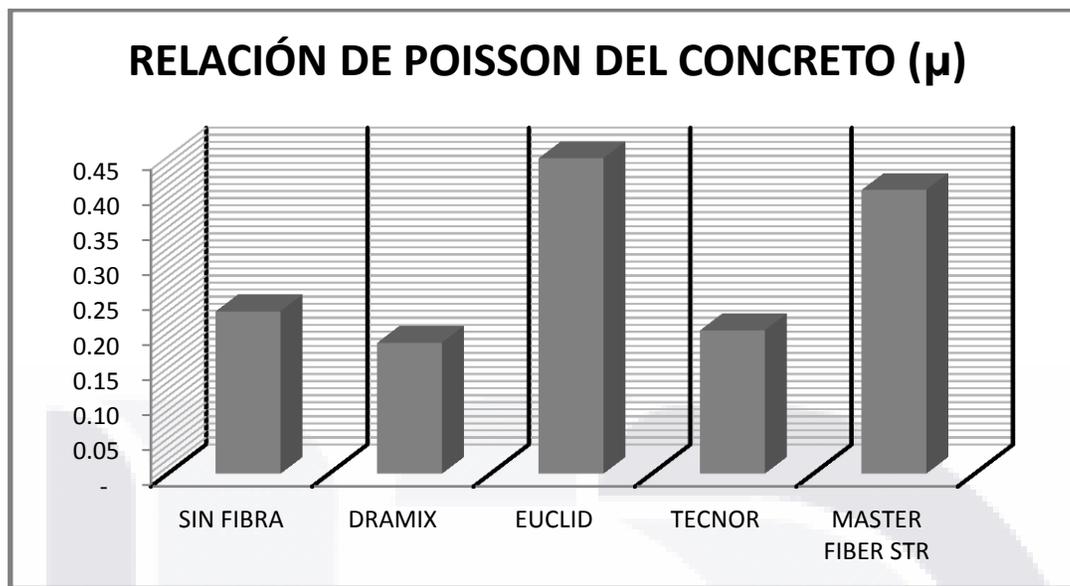


Figura 19 Relación de Poisson del concreto (μ)

Tal vez, la relación de Poisson es el valor más disperso, aunque se esperan valores un tanto altos o valores que representen la deformabilidad de un material, dos de ellos EUCLID y MASTER FIBER STR dan valores considerablemente altos y coinciden por el tipo en que están conformadas las fibras (sintéticas) y tomando en cuenta este mismo parámetro de la FASE I ver Figura 12, también se tiene dispersión de resultados. Así que se sugiere tomar estos valores con discreción, que de hecho para fines de utilizarlos en la siguiente etapa se consideraron los teóricos o esperados.

A continuación se muestran las tenacidades correspondientes a δ , 3δ , 5.5δ de las Figuras 20, 21 y 22 respectivamente. Donde DRAMIX obtuvo los mejores resultados en las tres gráficas y de en segundo lugar EUCLID. Y por ende, por la correlación existente entre las tenacidades y el esfuerzo residual, éste último obtuvo un porcentaje de 55% aproximadamente y para el resto no hubo notable diferencia entre ellas en alrededor de un 47%.

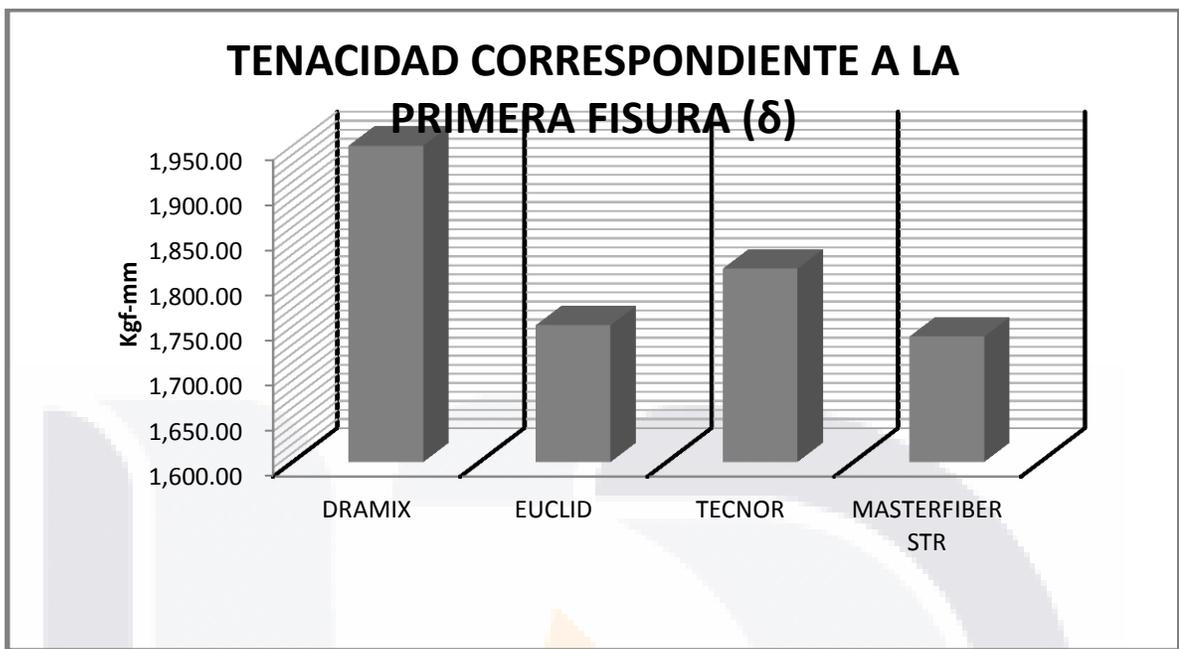


Figura 20 Tenacidad correspondiente a la primer fisura (δ)

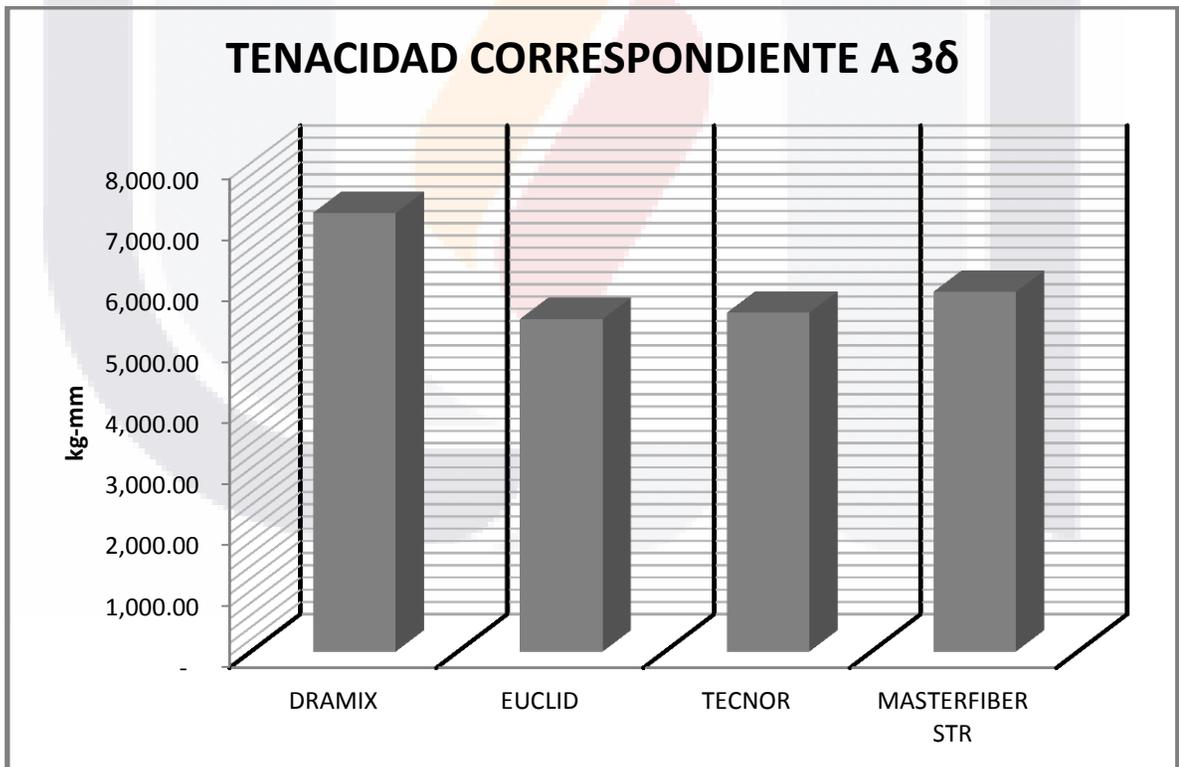


Figura 21 Tenacidad correspondiente a 3δ

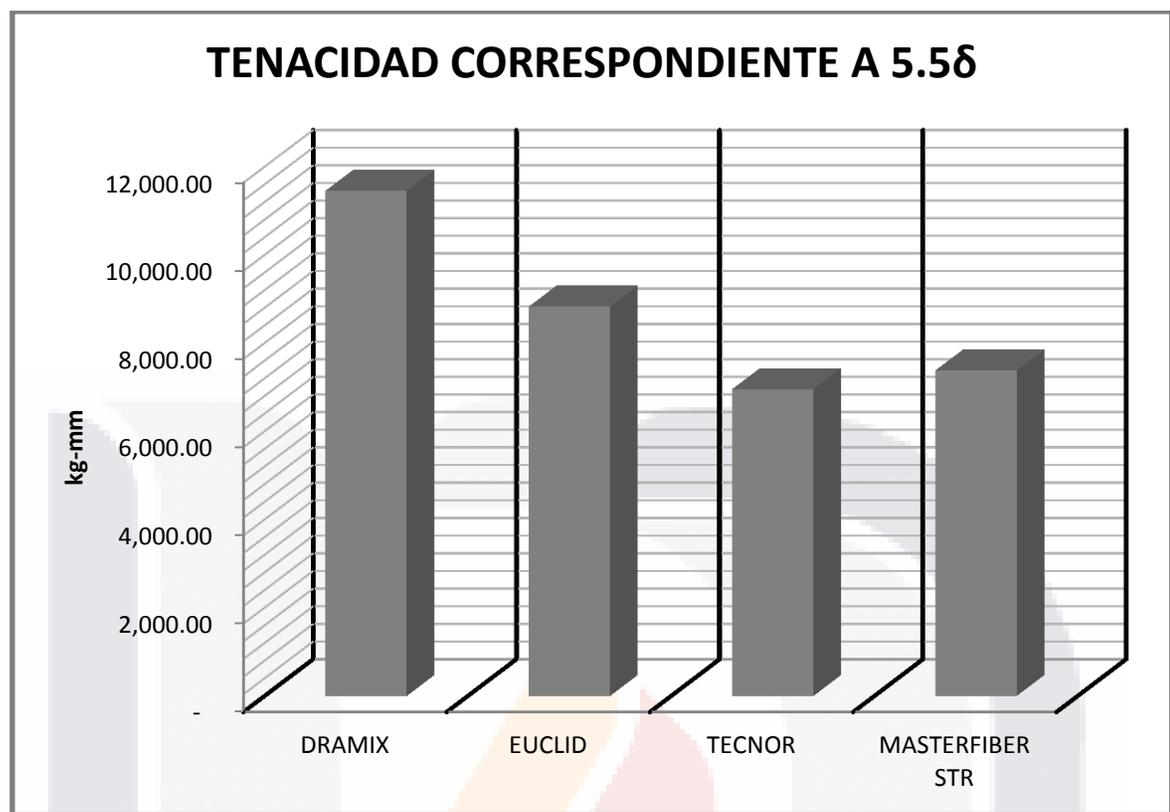


Figura 22 Tenacidad correspondiente a 5.5δ

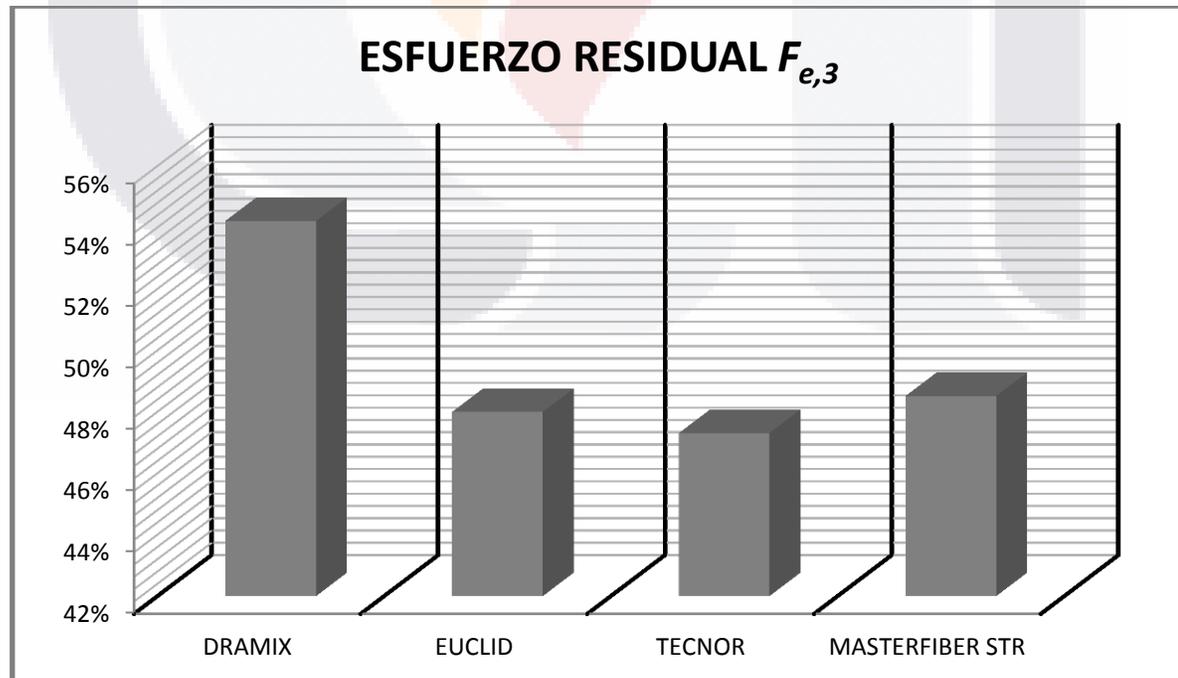


Figura 23 Esfuerzo residual ($f_{e, 3}$)



3.2.1.1. Carga-Deformación

Resumen Diagramas Carga-Deformación

Muestras Dramix

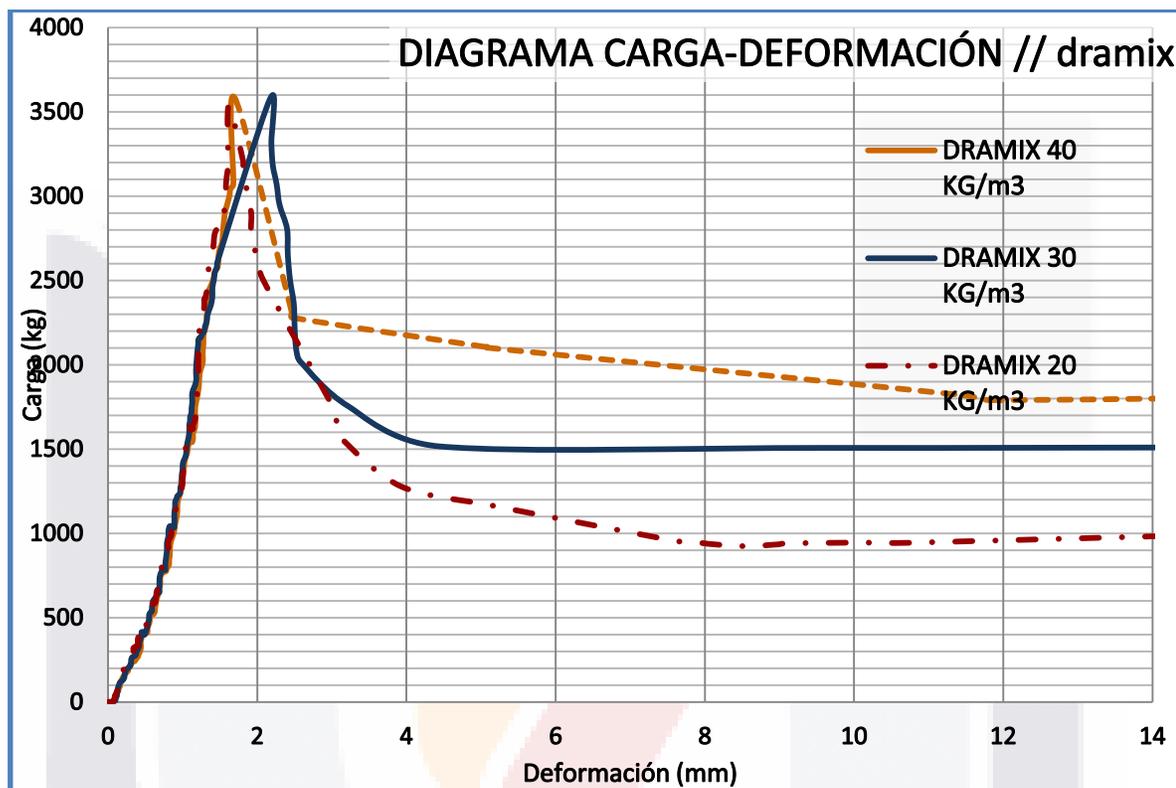


Figura 24 Diagrama carga- deformación Dramix



3.2.1.2. Carga-Deformación

Resumen Diagramas Carga-Deformación

Muestras Euclid

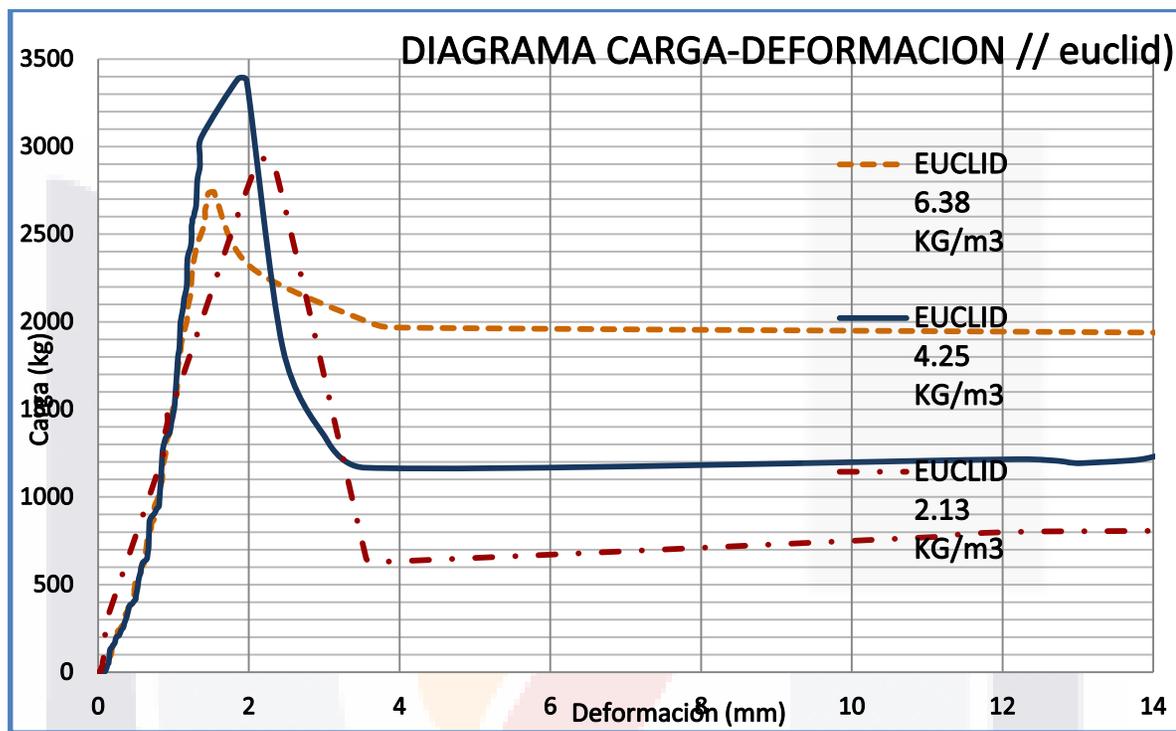


Figura 25 Diagramas carga deformación Euclid



A continuación se muestra gráficamente, una comparativa directa entre las dosificaciones seleccionadas y comparadas. En lo que respecta al módulo elástico no hay cambio significativo entre las diversas dosificaciones, salvo un decremento importante para EUCLID de la segunda dosificación

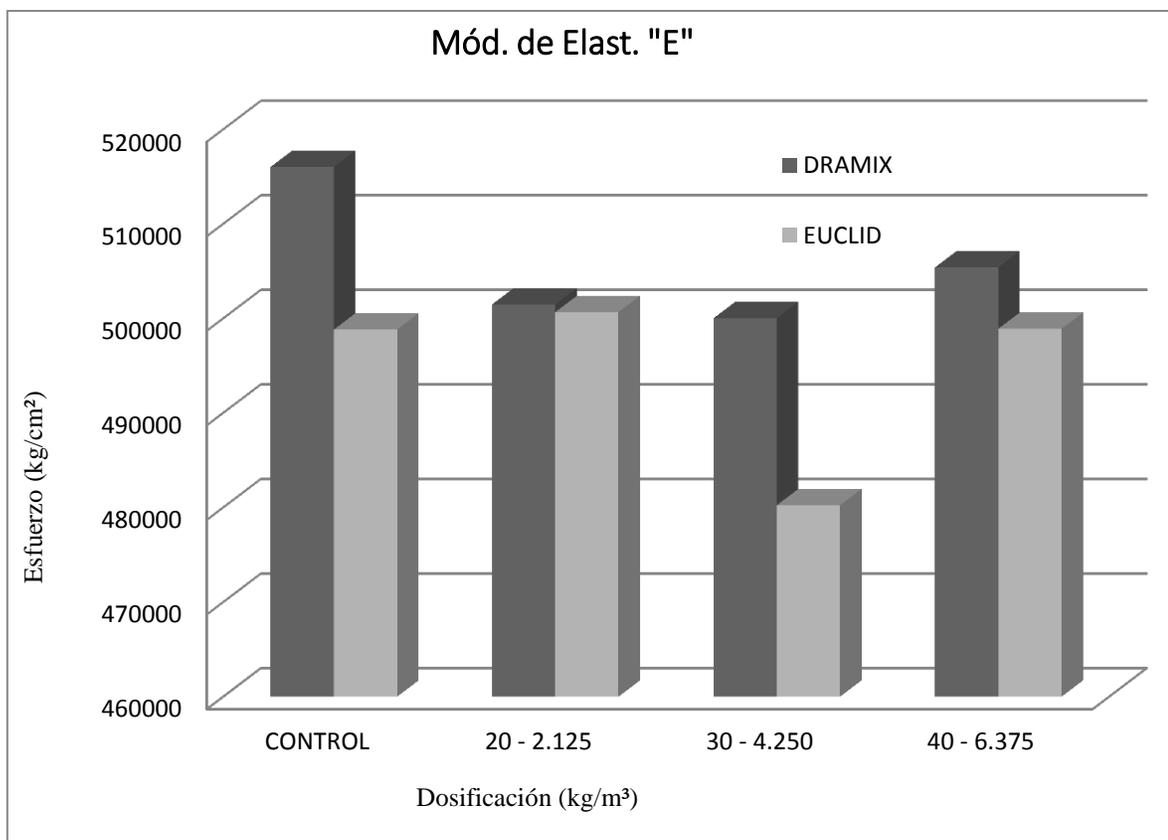


Figura 26 Módulo de elasticidad



En cuanto a la resistencia a la compresión se refiere, en DRAMIX es notorio su incremento en la segunda dosificación y un comportamiento total como lo establece el estado de arte

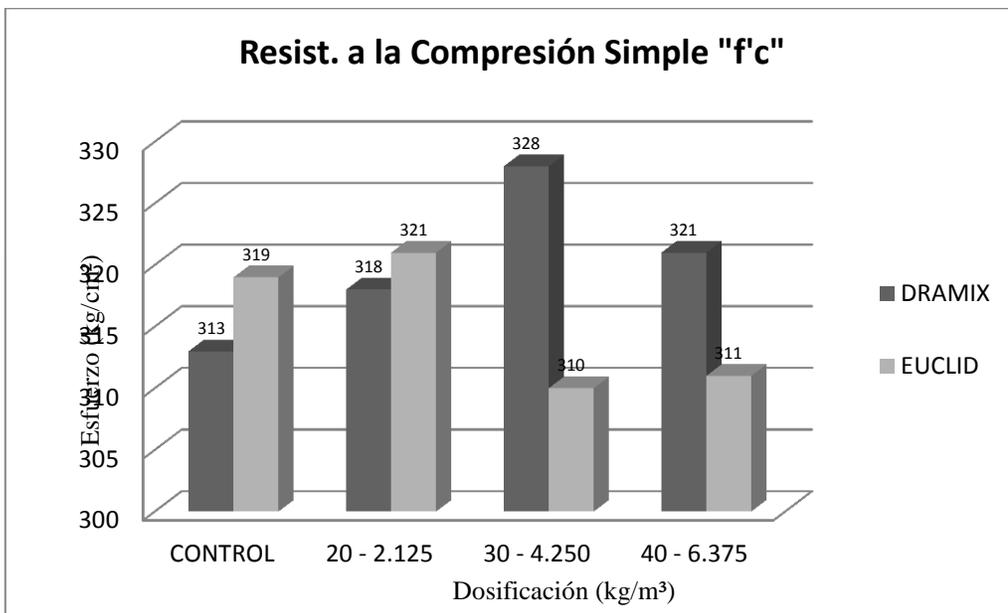


Figura 27 Resistencia a la compresión simple

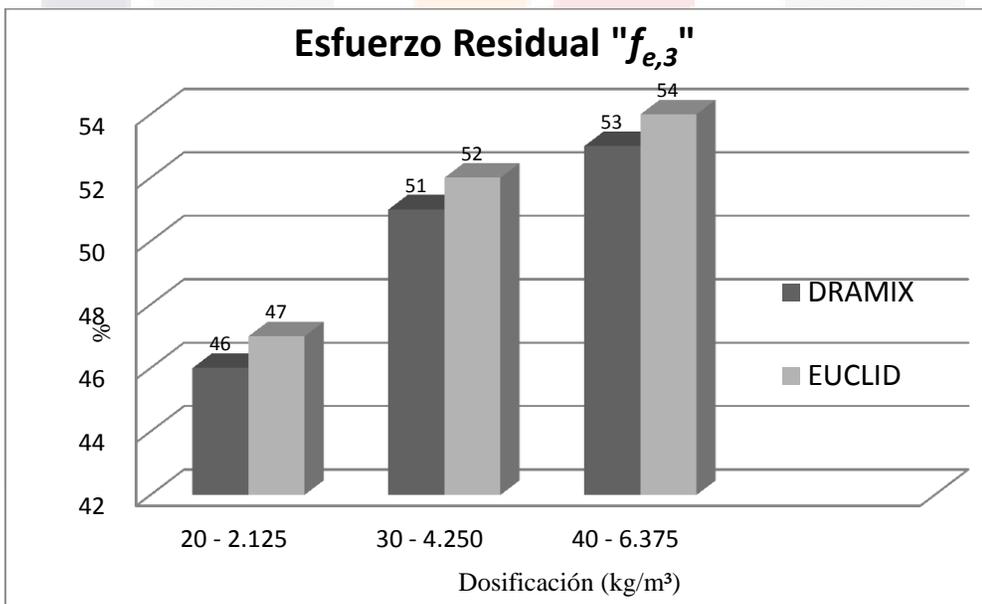


Figura 28 Esfuerzo residual (Fe,3)

P_{δ} = Carga resistente cuando se presenta la primer grieta en elementos de concreto sometidos a flexión o a módulo de ruptura.



$f_{p\delta}$ = Esfuerzo resistente cuando se presenta la primer grieta en elementos de concreto sometidos a flexión o a módulo de ruptura.



DOSIFICACION (kg/m ³)	P _δ (kg.f)
20	3,355
30	3,267
40	3,039

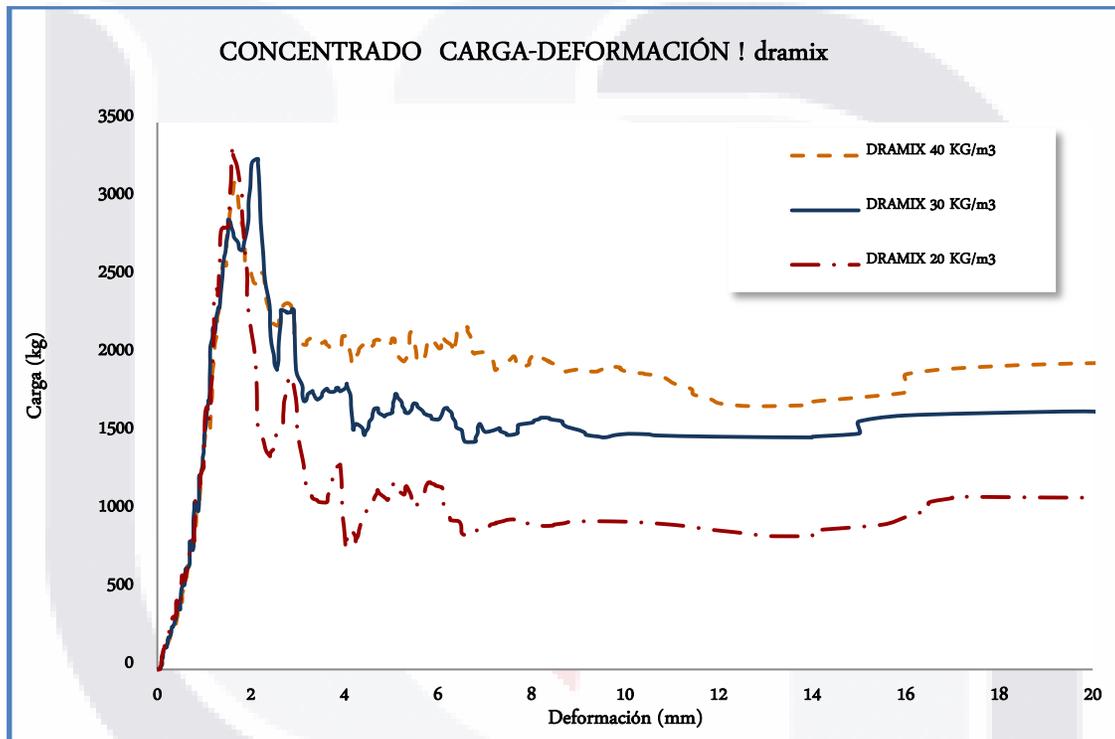


Figura 29 Concentrado carga deformación Dramix

A partir de la gráfica anterior, se observa una secuencia de comportamiento esperada a simple vista, donde a mayor dosificación de fibra se obtiene un incremento en el esfuerzo residual y de manera inversa la resistencia a la carga cuando se presenta la primera grieta P_δ.

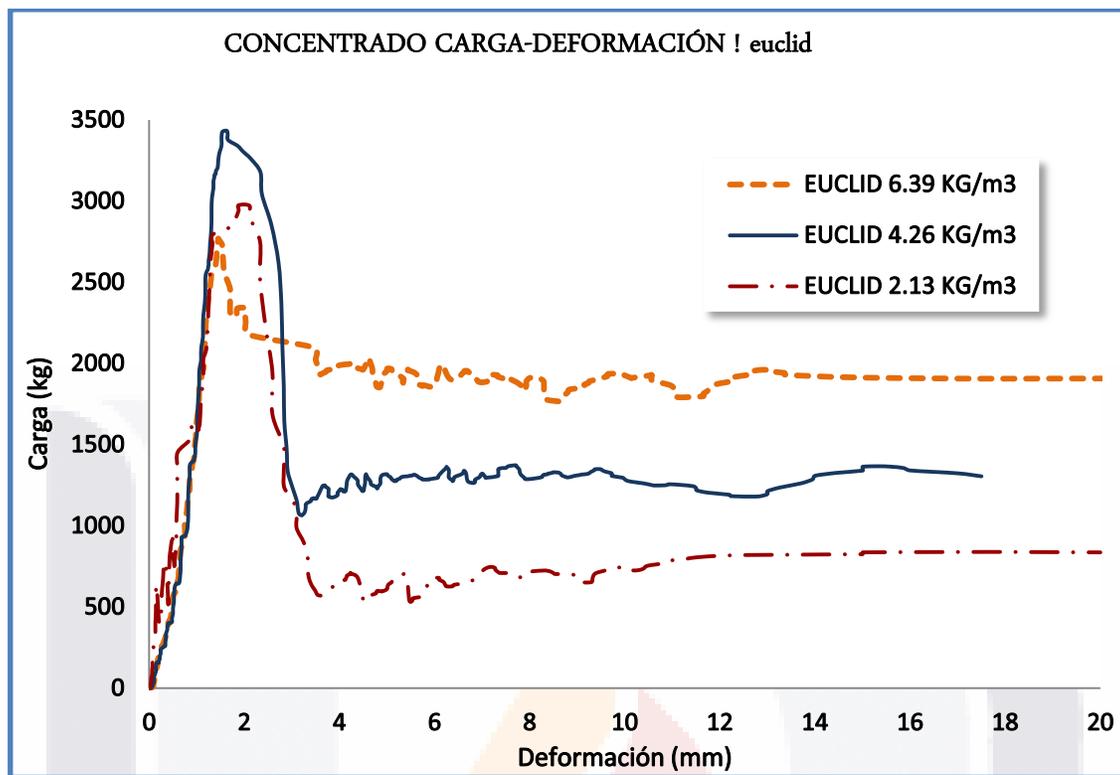


Figura 30 Concentrado carga deformación Euclid

Siguiendo la información de la gráfica mostrada, se deduce el hecho que tiene un comportamiento similar al de la Dramix, donde a menor dosificación de fibra también menor esfuerzo residual más no inversamente proporcional a la carga cuando se presenta la primera grieta por falla a la flexión como en el caso anterior, donde se observa una resistencia significativa con una variación de hasta el 18% de su P_{δ} mayorado.

Tabla 7 Dosificación de fibra

DOSIFICACION (kg/m ³)	P _δ (kg.f)
2.125	2971
4.250	3427
6.365	2794



Como lo establece el ACI 544.1R-96, las fibras de Polipropileno y las sintéticas en general, muestran una alta sensibilidad en el comportamiento de las propiedades el material en su conjunto con la mezcla de concreto cuando se varía el volumen con respecto a la masa del mismo. Los estudios se efectúan en una variabilidad de 0.1 a 10 % del volumen del concreto. Para dosificaciones de entre 0.1 y 2% sobre el volumen del concreto, la resistencia a la compresión no surte efecto significativo. Pero si muestra cambio significativo en el modo de falla en elementos sometidos a compresión donde su modo de falla es más dúctil.

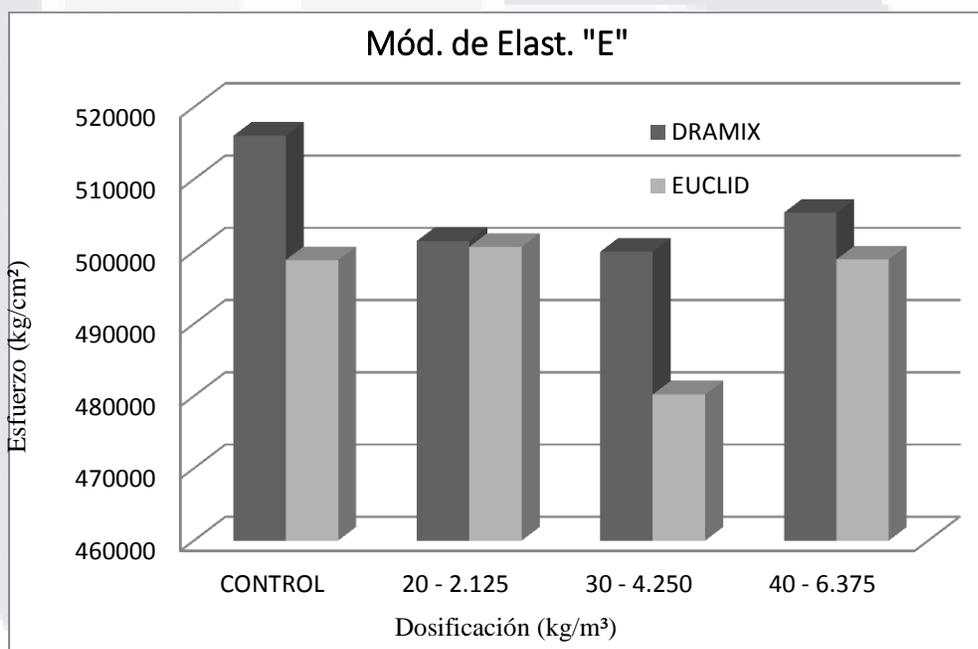


Figura 31 Modulo de elasticidad

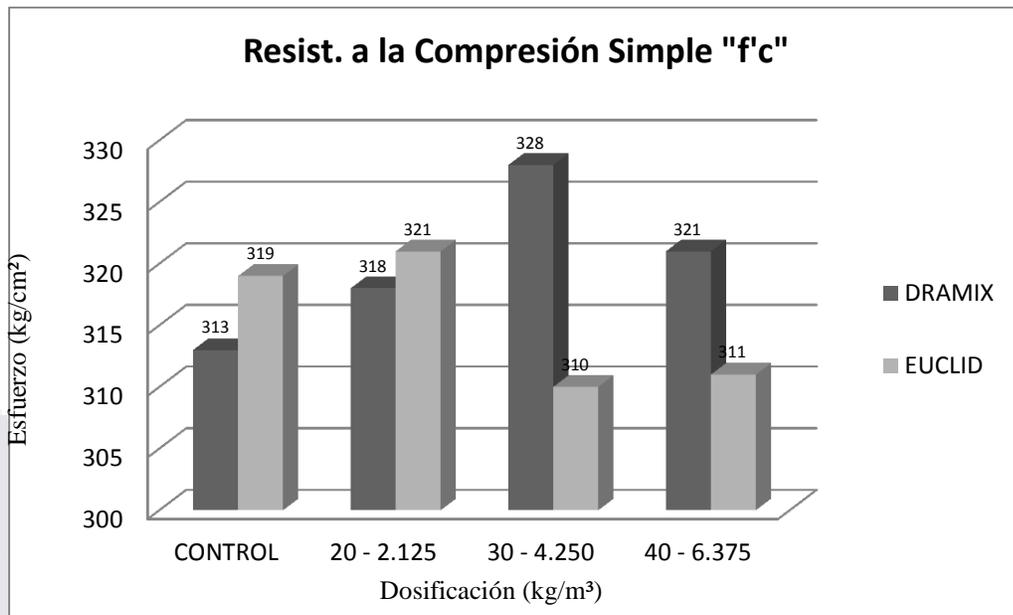


Figura 32 Resistencia a la compresión simple

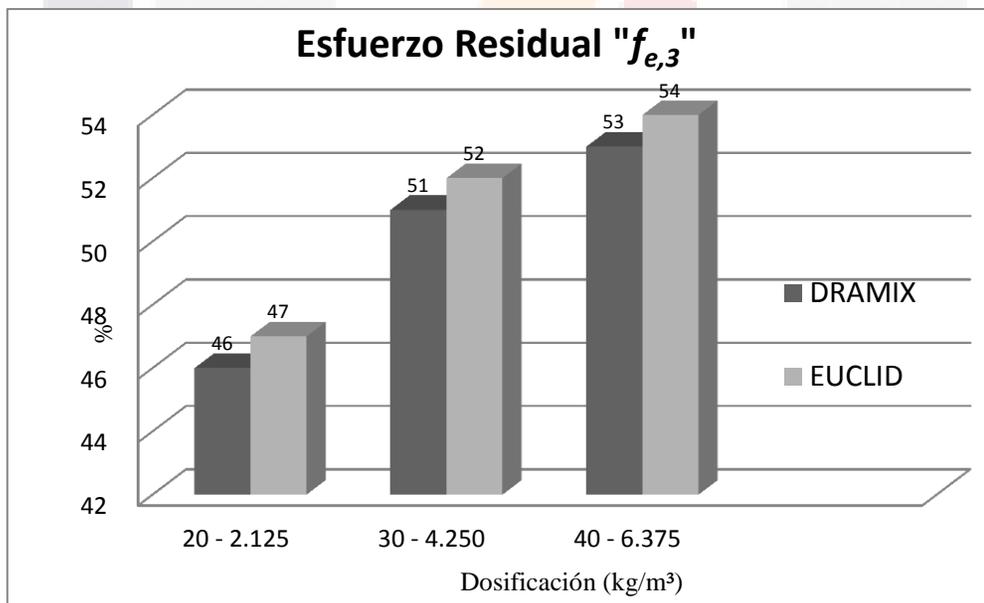


Figura 33 Esfuerzo residual (Fe,3)

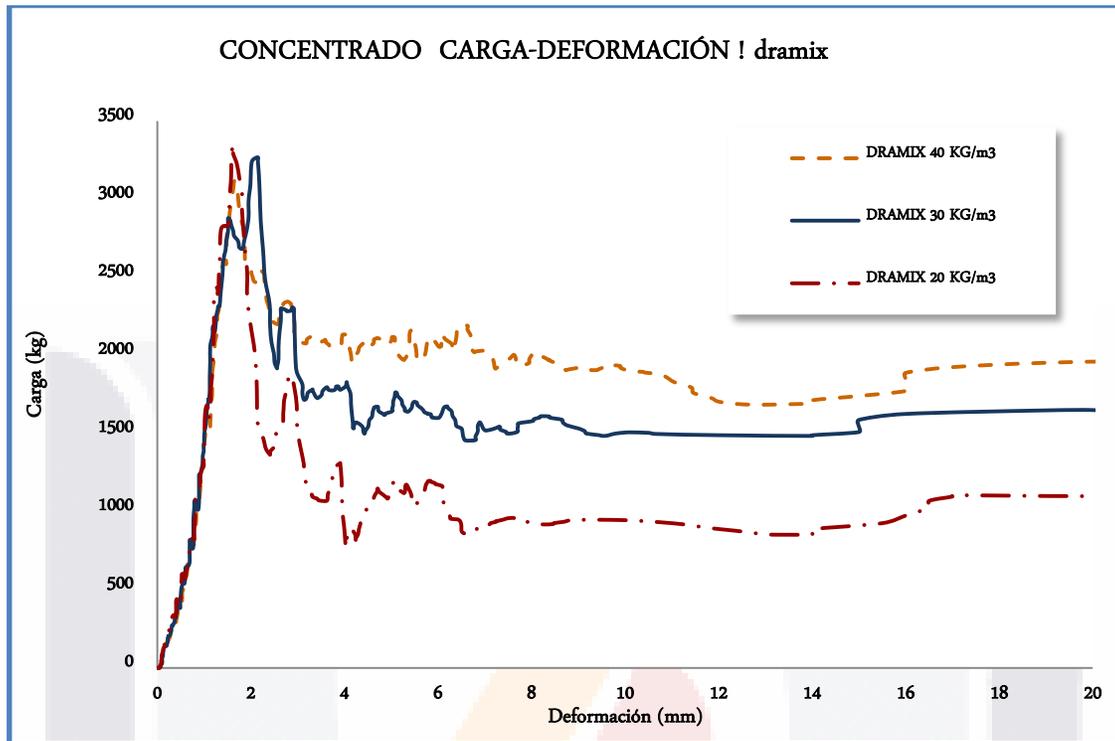


Figura 34 Concentrado carga deformación Dramix

A partir de la gráfica anterior, se observa una secuencia de comportamiento esperada a simple vista, donde a mayor dosificación de fibra se obtiene un incremento en el esfuerzo residual y de manera inversa la resistencia a la carga cuando se presenta la primera grieta P_{δ} .

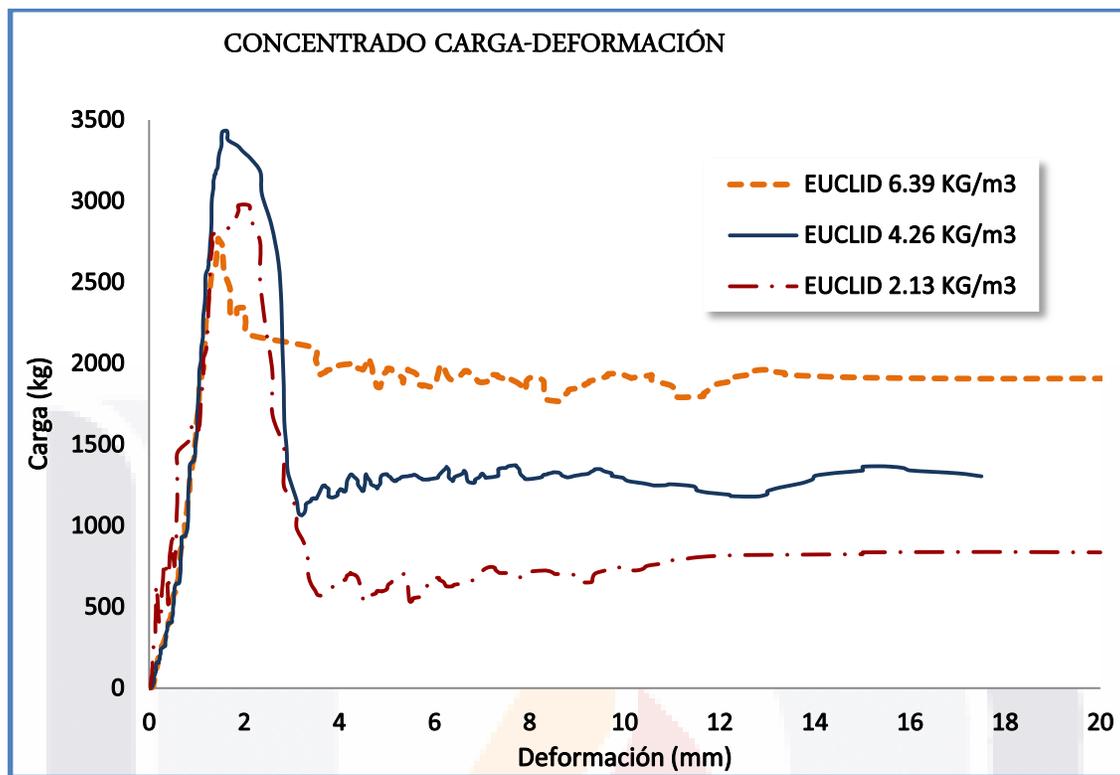


Figura 35 concentrado carga deformación Euclid

Siguiendo la información de la gráfica mostrada, se deduce el hecho que tiene un comportamiento similar al de la Dramix, donde a menor dosificación de fibra también menor esfuerzo residual más no inversamente proporcional a la carga cuando se presenta la primera grieta por falla a la flexión como en el caso anterior, donde se observa una resistencia significativa con una variación de hasta el 18% de su P_{δ} mayorado.

Tabla 8 Dosificación

DOSIFICACION (kg/m ³)	P _δ (kg.f)
2.125	2971
4.250	3427
6.365	2794



Como lo establece el ACI 544.1R-96, las fibras de Polipropileno y las sintéticas en general, muestran una alta sensibilidad en el comportamiento de las propiedades el material en su conjunto con la mezcla de concreto cuando se varía el volumen con respecto a la masa del mismo. Los estudios se efectúan en una variabilidad de 0.1 a 10 % del volumen del concreto. Para dosificaciones de entre 0.1 y 2% sobre el volumen del concreto, la resistencia a la compresión no surte efecto significativo. Pero si muestra cambio significativo en el modo de falla en elementos sometidos a compresión donde su modo de falla es más dúctil.





CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE AEF Y VALIDACIÓN DE DATOS

Determinar experimentalmente el comportamiento de las losas de concreto con y sin fibras metálicas y de polipropileno apoyadas en tres diferentes sustratos de terracería como medios elásticos de soporte. Medir la variación de las cargas y sus deformaciones de dichas losas para validar la modelación realizada.

4.1. Caracterización de Sustratos o Subgrados

Este apartado se refiere al sustrato donde se colocará la losa experimental. Comúnmente es nombrada como “base” pero no cumple la calidad y características de calidad base como lo establece en su normativa la SCT.

4.1.1. Caracterización mecánica de terracerías con métodos indirectos

El principio básico de la exploración sísmica consiste en generar ondas sísmicas y medir la manera en que se propagan a través del subsuelo. Para este estudio las ondas sísmicas se generaron golpeando la superficie del terreno con un marro. Al golpear el suelo se produce el movimiento de las partículas del suelo en forma de onda elástica u onda sísmica. El registro de la manera en que se propaga la onda sísmica a través del subsuelo se realiza mediante un tipo de sismógrafo llamado geófono que se colocan generalmente en una línea recta orientada hacia la fuente de las ondas sísmicas.

Existen diferentes metodologías de exploración sísmica (re-fracción, reflexión, cross hole, down hole, análisis espectral de ondas superficiales, refracción de microtremors, análisis multicanal de ondas superficiales, etc.) que se emplean de acuerdo al problema a resolver, los cuales pueden ser entre otros: la determinación del espesor de estratos, de V_p o V_s , o de las frecuencias y periodos de vibrar del suelo, etc.

El método empleado depende también de la profundidad de exploración exigida y de las condiciones de estratificación del subsuelo del sitio estudiado. Para dar con los resultados deseados, es necesario aplicar la metodología de exploración sísmica apropiada.

En este trabajo el método de exploración sísmica sirvió para determinar la estratigrafía a profundidades donde los métodos de exploración directa resultan técnica o



económicamente inaplicables. Para este trabajo se propuso la implementación de la técnica análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 1D) en su modalidad de fuente activa con la cual se obtienen perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) con los cuales es posible inferir la configuración de los diferentes estratos a profundidad.

Además de la estratigrafía, uno de los objetivos de este trabajo fue la de la caracterización del material de los diferentes estratos, para lo cual se implementó la técnica de refracción sísmica convencional con la cual se obtienen datos de la velocidad de ondas compresionales (V_p), las cuales en conjunto con la velocidad de las ondas de corte (V_s) son datos de entrada para calcular las constantes elásticas dinámicas del material de cada uno de los estratos, además es posible correlacionar los valores de V_p y V_s con la densidad promedio del subsuelo y el número (N) de golpes de la SPT

4.1.2. Cálculo de los módulos elásticos

Para calcular el módulo de elasticidad E y la relación de Poisson ν , de los estratos identificados se usaron las ecuaciones de la elasticidad que relacionan la velocidad V_p y V_s con las constantes de Lamé (μ y λ) de acuerdo con Swain (1962), Grant and West (1965) y Sheriff y Geldart, (1991). Las ecuaciones son las siguientes:

$$\text{Ec. 17} \quad v_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$$

$$\text{Ec. 18} \quad v_s = \sqrt{\mu / \rho}$$

Donde ρ es la densidad que se puede calcular con la expresión propuesta por Gardner (1974)

$$\text{Ec. 19} \quad \rho = 0.31 V_p^{\frac{1}{4}}$$

Con ρ en gr/cm^3 y V_p en m/s .

Una vez conocidas las constantes de Lamé es posible calcular las constantes elásticas del material del subsuelo con las ecuaciones siguientes:

$$\text{Ec. 20} \quad E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}$$

$$\text{Ec. 21} \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$



En la Tabla 9 se presentan las constantes elásticas dinámicas para cada material interpretado.

$$\text{Ec. 22} \quad k = \frac{4E}{\pi D(1-\nu^2)}$$

Tabla 9 Método sísmico

Material	E_{stat} (kg/cm ²)	k (kg/cm ³)	n
Terreno Natural	304.8	25.9	0.46
Terraplen suelo -cal	114.2	9.9	0.48
Terraplen suelo-cemento	774.1	67.2	0.48
Terraplen simple	284.6	23.4	0.43



4.1.3. Selección del lugar de prueba, preparativos y caracterización del terreno.

4.1.3.1. Localización del Terreno de Pruebas.

Se ubicó el lugar de ensaye en la cercanías de los importantes fraccionamientos de tipo industrial para la ciudad de Aguascalientes, ya que en este tipo de fraccionamientos es donde se construyen la mayoría de las estructuras de este tipo, como lo muestra la Figura 36, es notable una ubicación idónea del terreno de pruebas, se asume que no existe diferencia significativa de los terrenos de la zona en términos de propiedades mecánicas del suelo. Además debe cumplir con las condiciones que permitan realizar, instalar, mover, maniobrar, y de todo lo que implique la etapa de experimentación debidamente controlada

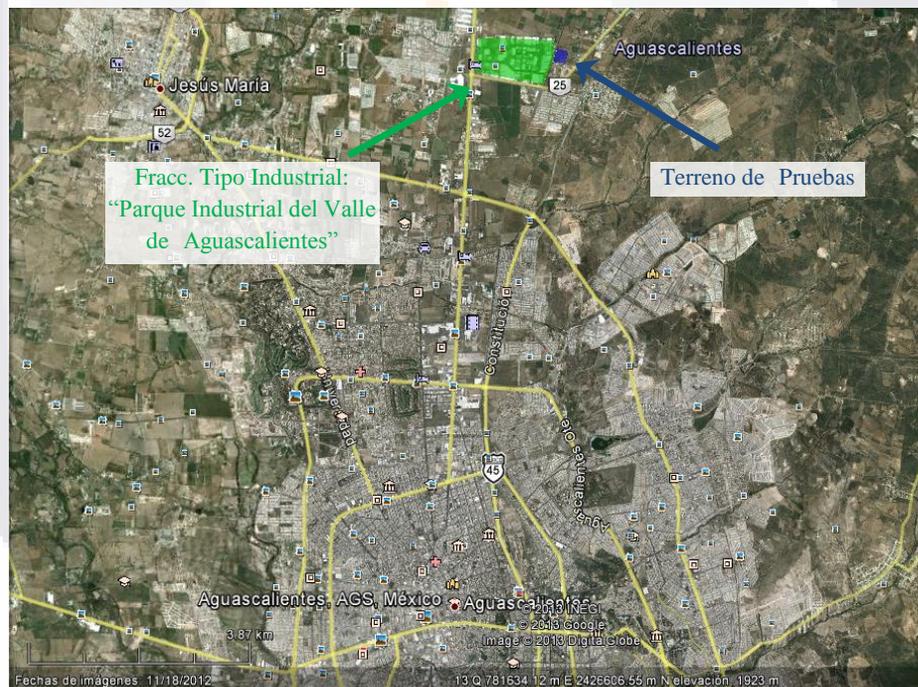


Figura 36 Localización del Terreno de Pruebas



4.1.3.2. Preparación de Terreno de Pruebas y Conformación de terracerías.

Consistió en hacer un corte en cajón 12x20 m, donde se retiró el material vegetal hasta llegar al nivel de terreno firme, presentó un promedio de 65 cm de profundidad como se muestra en la Figura 37



Figura 37 Cajón en Corte

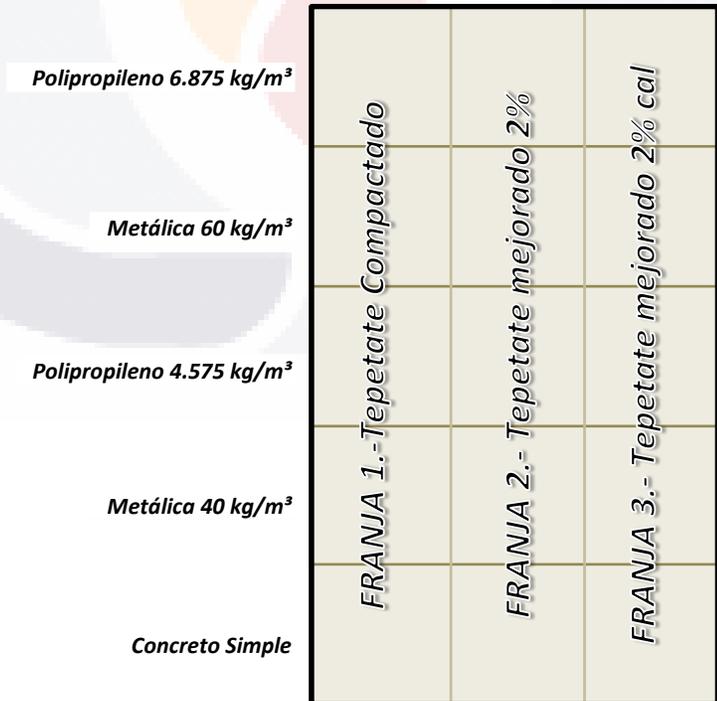


Figura 38 Disposición de losa experimental que muestra franjas diferentes sustratos



Después se preparó un área donde se alojaron los tres diferentes tipos de sustratos (Figura 38) denominadas en lo sucesivo como franjas. Estas franjas fueron trabajadas ordinaria-mente; se conforman las terracerías, relleno y compactando el cajón de apertura en capas de 20 cm. El material utilizado producto de banco para la conformación de los estratos presenta buenas características de calidad y típicas de la zona, una franja la constituye con este material, otra con la mezcla de cemento portland al 2% de su peso volumétrico y la tercer franja mezclada con el 2% de contenido de cal sobre su peso volumétrico pero con material producto de excavación del corte del cajón.



Figura 39 Prueba Penetración Estándar (SPT).



Figura 40 Pruebas Métodos Sísmicos.

4.1.3.3. Caracterización Geofísica de los Sustratos.

Se efectuaron otras alternativas de prueba para determinar los anteriores parámetros, que para el caso de módulo de reacción y capacidad de carga se acudió a una caracterización de las propiedades mecánicas de las terracerías con métodos geofísicos aplicados a cada una de los diferentes estratos de terracerías. Estos métodos consisten básicamente en la exploración que genera ondas sísmicas inducidas por un impacto como medio de fuerza incitadora, donde se miden la manera en que se propagan estas ondas a través del subsuelo.

Existen diferentes metodologías de exploración sísmica. Para dar con los resultados deseados, es necesario aplicar la metodología de exploración sísmica apropiada (Figura 40). Donde la profundidad de exploración requerida y de las condiciones de estratificación del



subsuelo del sitio estudiado son las condiciones que ayudaron a seleccionar el método de exploración apropiado. Dicho método seleccionado es la técnica de análisis multicanal de ondas superficiales en su modalidad de fuente activa (MASW-1D) y se obtienen perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) con los cuales se infiere una composición estratigráfica a profundidad. Además se implementó la técnica de refracción sísmica convencional con la cual se obtienen datos de la velocidad de ondas compresionales (V_p), las cuales en conjunto con la velocidad de las ondas de corte (V_s) son datos de entrada para calcular las constantes elásticas dinámicas del material de cada uno de los estratos, además es posible correlacionar los valores de V_p y *versus* con la densidad promedio del subsuelo y el número (N) de golpes de la SPT (Prueba de Penetración Estándar) como lo muestra la Figura 39.

Tabla 10 Módulos de Reacción

	Módulo de Reacción ($kg/cm^2/cm$)	Cap. De Carga (kg/cm^2)	Relación Poisson (%)
Con 2% cemento	66.45	3.58	0.25
Con 2% cal	26.58	3.58	0.25
Tepetate Comp.	12.08	3.58	0.25



Figura 41 Método Exploración Sísmica

4.2. Construcción de Losas de Ensaye



Figura 42 Acabado de Losas



Figura 43 Construcción de Losas

En esta etapa se efectuó el colado de las losas (Figura 43). Con un peralte constante de 10 cm, y modulación ortogonal de 3 m con corte total del espesor a base de disco para garantizar la no transmisión de esfuerzos entre losas para el momento del ensaye. El concreto utilizado es un M.R. 40 kg/cm², T.M.A. 40 mm, de baja contracción, curado con membrana base agua, acabado pulido (Figura 42). Todo esto con la intención de recrear las características y condiciones típicamente utilizadas en cuanto a materiales, mano de obra y proceso constructivo.

4.2.1. Ensayo de Losas de Concreto mediante camiones de carga

En esta etapa se realizó el primer ensayo para determinar la relación carga-deformación. (Figura 44).



Figura 44 Muestra de los camiones para transferir carga por medio de una viga IR

También se monitoreo las deformaciones generadas. Para los ensayos en esta etapa se utilizó los siguientes instrumentos.

- 2 camiones de 20 toneladas
- Sistema hidráulico de 25 toneladas

La aplicación de la carga sobre las losas se realizó al centro con un máximo esfuerzo aplicado de 28.83 kg/cm^2 con un área de contacto de 546.85 cm^2 con una velocidad de aplicación de carga aproximada de 3.8 ton/min . Se obtuvieron los siguientes datos de deformación por cada una de las losas como lo muestra la siguiente Tabla 11.



Tabla 11 Obtención de datos producto de experimentación en campo

CONDICIÓN DE LOSAS		LOSAS No	DEF. EN CAMPO (mm)
Sin Fibra	Tepetate	Losa 1	1.06175
	Cemento 2%	Losa 2	0.6395
	Cal 2%	Losa 3	0.369
Metálica 40 kg/m ³	Tepetate	Losa 4	1.29
	Cemento 2%	Losa 5	0.3915
	Cal 2%	Losa 6	0.641
Sintética 4.56 kg/m ³	Tepetate	Losa 7	0.895
	Cemento 2%	Losa 8	0.25705
	Cal 2%	Losa 9	0.7005
Metálica 60 kg/m ³	Tepetate	Losa 10	0.937
	Cemento 2%	Losa 11	0.283
	Cal 2%	Losa 12	0.477
Sintética 6.9 kg/m ³	Tepetate	Losa 13	1.7535
	Cemento 2%	Losa 14	0.6295
	Cal 2%	Losa 15	0.712

Estos datos de la Tabla 11, se extienden en el ANEXO “D”

4.2.2. Diseño de losas

El presente documento muestra el procedimiento sugerido para el diseño de losas, utilizando hojas de cálculo y software de elemento finito. En los ANEXOS “C” se encuentra imágenes de las hojas de cálculo utilizadas para facilitar los cálculos ya que generalmente estos procesos son iterativos.

4.2.2.1. Datos de entrada del diseño

Los factores a considerar en el diseño de la losas se pueden subdividir en: caracterización del suelo en campo, acciones sobre las losas y las características del material para validar la geometría propuesta de losa. Los parámetros de cada uno de los rubros se listan a continuación.

Caracterización del suelo en campo

- Módulo de reacción del suelo (k)
- Nivel freático
- Estratigrafía
- Capacidad de carga del suelo.

Acciones sobre las losas

- Cargas por racks
- Cargas por montacargas
- Cargas uniformemente repartidas

Características del material

- Módulo de ruptura del concreto (M_R)
- Módulo de reacción del concreto (E)
- Relación de Poisson (μ)
- Relación de esfuerzo residual equivalente ($R_{e,3}$)
- Geometría propuesta de losa y cargas
- Espesor de la losa (h)

- Área de aplicación de carga (A)

4.2.2.2. Procedimiento

Paso 1: El procedimiento de diseño inicia con la hoja de cálculo donde se aplican la siguiente ecuación para determinar el momento máximo permisible (M). (ACI 360R-10).

Para el caso de carga en el centro de la losa:

$$\text{Ec. 23} \quad M = \left(1 + \frac{Re,3}{100}\right) \left(\frac{(MR)(h)^2}{6}\right)$$

Para el caso de carga en la orilla de la losa:

$$\text{Ec. 24} \quad M = \left(\frac{(MR)(h)^2}{6}\right)$$

La norma ACI no establece el área de aplicación de cada uno de estos casos, pero se propone las siguientes áreas ver Figura 45. (dimensiones en centímetros).

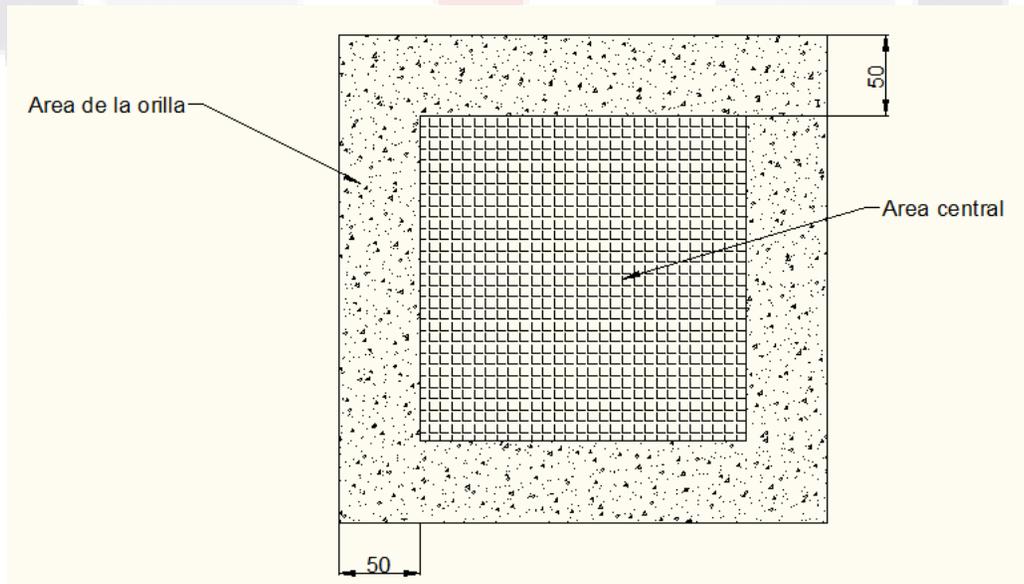


Figura 45 Áreas propuestas para la losa

Paso 2: Uso del software de elemento finito para realizar el modelo y revisar el momento máximo proyectado.

Paso 2.1: Proponer las acciones de carga mencionadas con anterioridad, para lo cual se hacen las siguientes consideraciones.

Cargas por Montacargas

- Colocarlas en forma distribuida de acuerdo al área de apoyo dada por el fabricante.
- Área real de contacto.
- Espacio entre rodado.
- Carga máxima por eje.

Cargas por Racks

- Colocarlas en forma puntual.
- Espaciamiento mayor entre apoyos.
- Espaciamiento menor entre apoyos.
- Carga máxima por apoyo.

Dimensiones de la Losa

- Largo.
- Ancho.
- Espesor.

Paso 2.2: Generar geometría del piso, con las siguientes características:

- Usar elementos tipo placa.
- Con un mallado cuadrículado con dimensiones recomendadas de 0.1 metros.
- Introducir valores característicos del concreto. Donde se intrducen los datos obtenidos de la etapa experimental.
- Se propone espesor y distancia entre juntas de las losas de acuerdo al diagrama mostrado en el diagrama de la Figura 46.

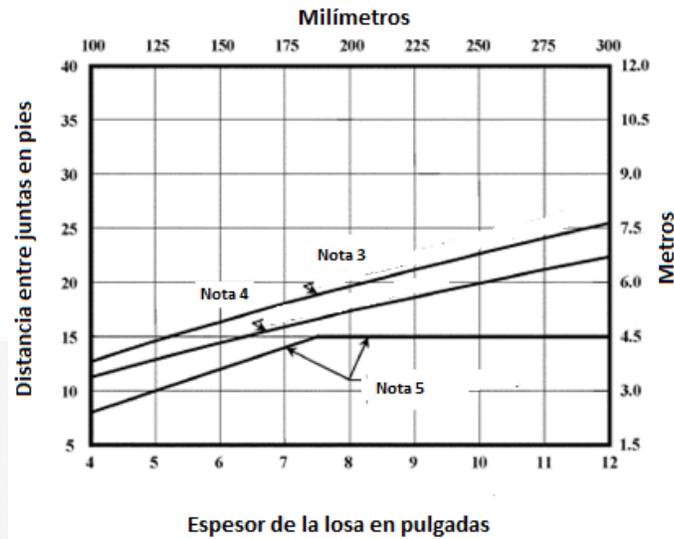


Figura 46 Distancia entre los pasajuntas. ACI 360R-22

Nota: Verificar en ficha técnica del concreto a adquirir las millonésimas de contracción, para poder usar adecuadamente esta tabla.

- 1.- Las recomendaciones de espaciamiento entre juntas está basada en reducir el esfuerzo cortante y el fisurado en el panel medio Warker-Holland 2001. Para agregados inter-ligados ver sección 6.2.
- 2.- El criterio de espaciamiento de 36 a 24 veces el espesor de la losa ha sido utilizado en el pasado.
- 3.- Para el concreto de compactación baja, con una compactación en seco menor al 520 millonésimas partes con respecto a un material seco.
- 4.- Para el concreto típico, con una compactación en seco de 520 a 780 millonésimas partes con respecto a un material seco.
- 5.- Para el concreto con alta compactación, con una compactación en seco menor a 780 a 1100 millonésimas partes con respecto a un material seco.

Paso 2.3: Generar las placas simulando la unión con pasajuntas, considerar lo siguiente:

- Se recomiendan nueve placas.
- En el caso del software STAAD los pasa juntas se pueden modelar liberando los nodos correspondientes momentos en x, y, z y la fuerza normal.
- En el SAP se separan los nodos una distancia de 1 milímetro y se unen los por un elemento tipo barra en los nodos aledaños. Como se muestra en las Figura 47 y Figura 48.

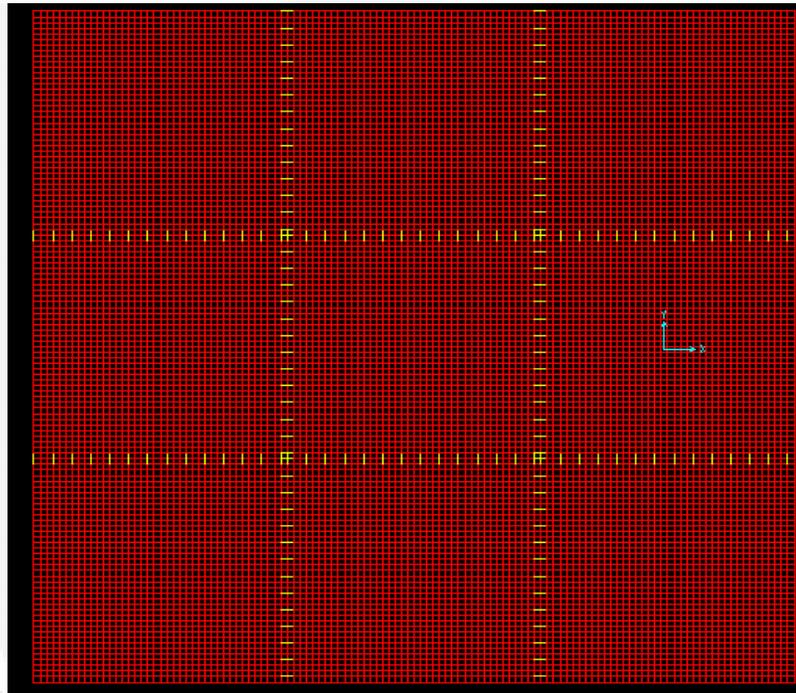


Figura 47 Vista de planta de nueve losas unidas en SAP

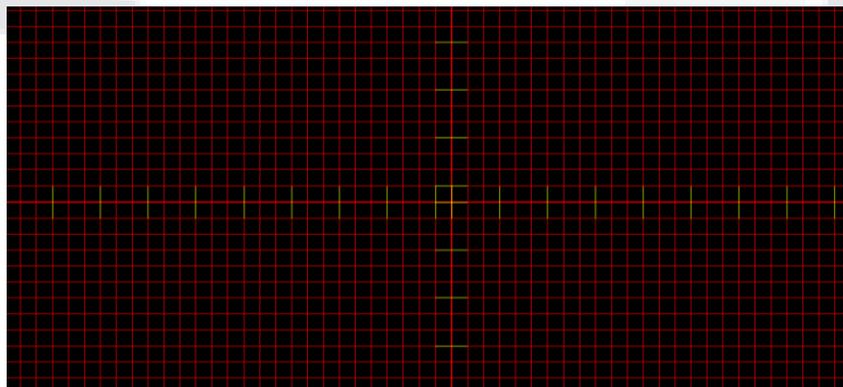


Figura 48 Acercamiento de las uniones efectuadas entre losas en SAP



Paso 2.4: Soportar las losas sobre un elemento tipo resorte asignando el valor correspondiente al módulo de reacción del suelo. El resorte solo deberá trabajar a compresión.

Paso 2.5: Asignar las cargas de los racks y del montacargas, revisando la dirección de las cargas y sus ubicaciones.

En base a simulaciones realizadas en diferentes posiciones de cargas de racks y de montacargas, las condiciones críticas las establecen la posición relativa de los racks con respecto a la losa. Siendo el más crítico cuando los soportes de los racks se encuentran en la orilla de la losa.

Paso 2.6: Realizar la corrida de la simulación.

Paso 2.7: Revisar los momentos en x, y. En las orillas y al centro. Para localizar el momento máximo.

Paso 3: Análisis del diseño.

Paso 3.1: Aplicar al momento máximo del paso 2.7 el factor de seguridad, de acuerdo a las Tabla 12 y Tabla 13

Tabla 12 Factores de seguridad empleados para diferentes tipos de cargas (ACI)

Factores de seguridad empleados para diferentes tipos de cargas		
<i>Tipo de carga</i>	<i>Factor de seguridad comúnmente usada</i>	<i>Factor de seguridad ocasionalmente usada</i>
Montacargas en movimiento	1.7 a 2	1.4 a 2
Cargas por rack	1.7 a 2	mayores a 2 bajo circunstancias especiales
Cargas uniformes	1.7 a 2	1.4 con cargas bajas
Línea de cargas	1.7	2 para diseños conservativos
Cargas de construcción	1.4 a 2	No establecido

Fuente ACI 360R-22

Recomendado 1.7



Tabla 13 Relación de esfuerzo contra ciclos repetidos de carga

Relación de esfuerzo contra ciclos de repetición de carga							
Relación de esfuerzo	Repetición de cargas permisible	Relación de esfuerzo	Repetición de cargas permisible	Relación de esfuerzo	Repetición de cargas permisible	Relación de esfuerzo	Repetición de cargas permisible
Menor a 0.45	Ilimitado	0.59	40,842	0.74	630	0.89	10
0.45	62,790,761	0.60	30,927	0.75	477	0.90	7
0.46	14,335,236	0.61	23,419	0.76	361	0.91	6
0.47	5,202,474	0.62	17,733	0.77	274	0.92	4
0.48	2,402,754	0.63	13,428	0.78	207	0.93	3
0.49	1,286,914	0.64	10,168	0.79	157	0.94	2
0.50	762,043	0.65	7,700	0.80	119	0.95	2
0.51	485,184	0.66	5,830	0.81	90	0.96	1
0.52	326,334	0.67	4,415	0.82	68	0.97	1
0.53	229,127	0.68	3,343	0.83	52	0.98	1
0.54	166,533	0.69	2,532	0.84	39	0.99	1
0.55	124,523	0.70	1,917	0.85	30	1.00	0
0.56	94,065	0.71	1,452	0.86	22	> 1	0
0.57	71,229	0.72	1,099	0.87	17		
0.58	53,937	0.73	832	0.88	13		

Paso 3.2: En caso de ser mayor el momento resultante del paso 3.1 que el del paso 1.

Entonces ciclar el proceso y regresar al paso 2.1 para ajustar el diseño.

Paso 3.3: Verificar que la presión en el suelo no exceda la capacidad de carga.

El procedimiento se basa por el proceso sugerido por la PCA. Ver ANEXO “C”.



4.2.2.3. Datos de entrada de la simulación en software SAP2000 y STAAD Pro

Los parámetros necesarios para la simulación son los siguientes:

Caracterización del suelo en campo

- Módulo de reacción del suelo (k)

Acciones sobre las losas

- Cargas central

Características del material

- Módulo de reacción del concreto (E)
- Relación de Poisson (μ)

Geometría de losa

- Espesor de la losa (h)
- Ancho de la losa (B)
- Largo de la losa (L)

4.2.3. Modelación comparativa entre software de análisis estructural y resultados obtenidos en el ensaye

Se realizó un análisis de elemento finito utilizando dos programas de análisis estructural (STAAD PRO y SAP2000) para analizar el comportamiento de la losa con la carga central soportada en las losas.

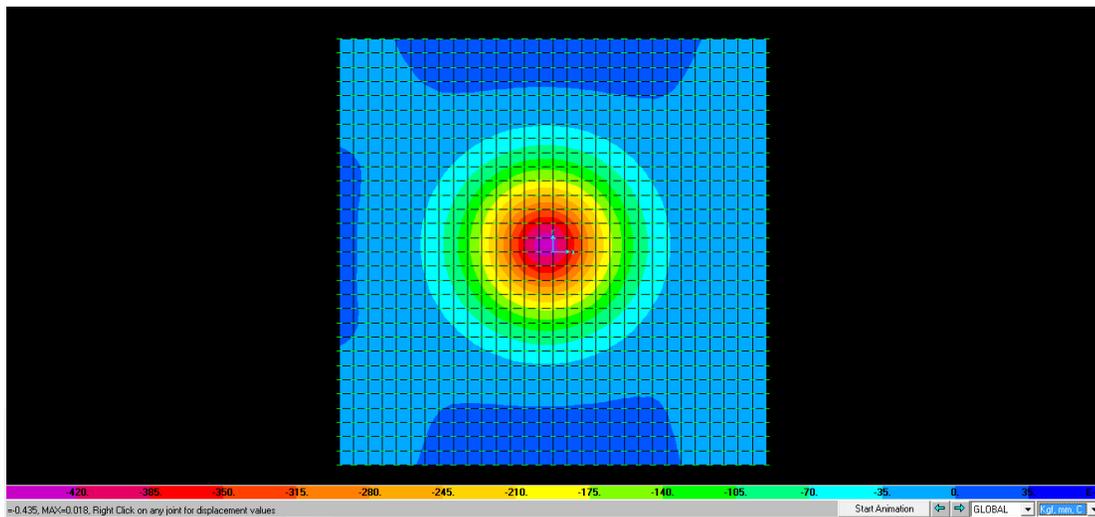


Figura 49 Iso-áreas de deformaciones del SAP2000

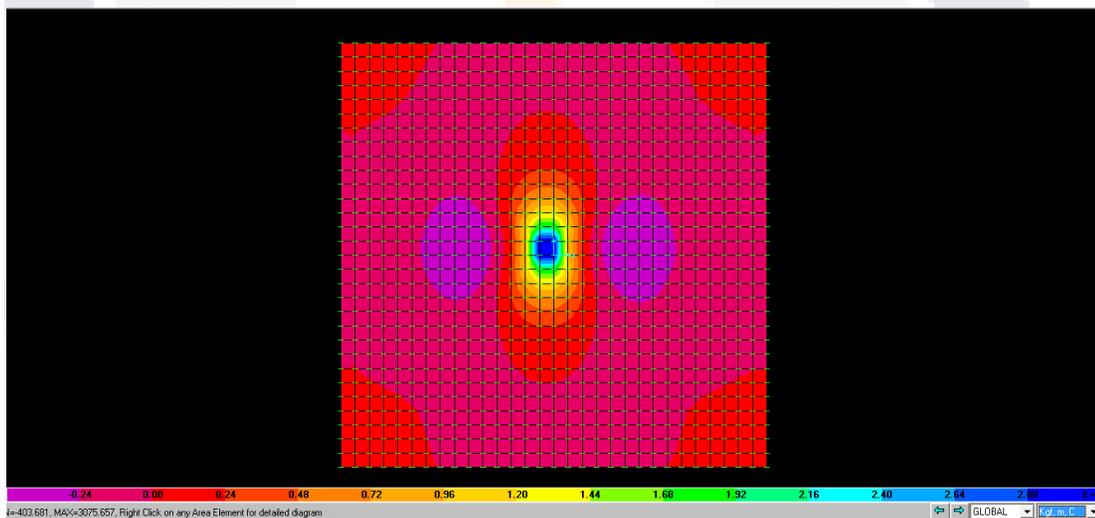


Figura 50 Iso-áreas de Momentos Flectores del SAP2000.

Para el caso de STADD PRO en la Figura 49 se muestra las iso-áreas de las deformaciones de los momentos flectores con un máximo en color rojo de 2,944(kg/m²) y la máxima deformación mostrada es de 0.456 mm al centro de la losa como lo muestra la Figura 50



Se observa que, existe una variación significativa entre los programas en cuanto a la deformación, mas sin embargo, caso contrario cuando se observa las magnitudes de los momentos flectores.

Los resultados muestran una congruencia en las deformaciones medidas en campo con las deformaciones medidas por el modelo de elemento finito. Para el caso de SAP2000 se muestran las iso-áreas de las deformaciones (en mm) y de los momentos flectores (kg/m²) respectivamente. Donde la máxima deformación mostrada es de 0.018 mm y el máximo esfuerzo flector de 3,076 (kg/m²). En campo la deformación presentada fue de 0.025 mm, por lo que se valida el modelo.

4.3. Comparación de Resultados en Losas: Numérica Vs. Experimental

COMPARACIÓN COSTO-RESISTENCIA DE PISOS INDUSTRIALES								
ESPESOR (cm)	M.R. (kg/cm ²)	DOSIFICACION (kg/m ³)	R _{e,3} (%)	COSTO CONCRETO	COSTO FIBRA	COSTO TOTAL	M _o (kg/cm-cm)	
15.00	40	40	53	\$ 150.00	\$ 117.00	\$ 267.00	2410	
15.10	40	30	51	\$ 151.00	\$ 88.34	\$ 239.34	2410	
15.35	40	20	46	\$ 153.50	\$ 59.87	\$ 213.37	2410	
18.60	40	0	N/A	\$ 186.00	\$ -	\$ 186.00	2410	
15.35	40	2.28	47	\$ 153.50	\$ 53.42	\$ 206.92	2410	
Precio Concreto / m ³							\$	1,000.00
Precio Fibra / kg							\$	19.50

LOSAS No	E (kg/cm ²)	Poisson (adim.)	M.R. (kg/cm ² -cm)	MÁX. ESFUERZO APLICADO (kg/cm ²)	ÁREA (cm ²)	DEF. EN CAMPO (mm)	STAAD PRO		SAP2000		RELACIÓN (staad / sap)-1		
							MAX. DEF. (mm)	MOMENTO MAX (kg/mm)	MAX. DEF. (mm)	MOMENTO MAX (kg/mm)	MAX. DEFORMACIÓN (mm)	MOMENTO MAX (kg/mm)	
Losa 1	507421	0.19	23.4	28.83	546.85	1.06175	0.635	2,500.0	0.588	2,536.6	8.0%	1.4%	
Losa 2	507421	0.19	67.2	28.83	100	0.6395	0.073	614.0	0.065	619.5	12.3%	0.9%	
Losa 3	507421	0.19	9.9	28.83	546.85	0.369	1.007	2,823.0	0.951	2,870.8	5.9%	1.7%	
Losa 4	505389	0.19	23.4	28.83	546.85	1.29	0.636	2,498.8	0.589	2,535.2	9.9%	2.2%	
Losa 5	505389	0.19	67.2	28.83	546.85	0.3915	0.363	2,106.0	0.331	2,154.0	9.7%	2.2%	
Losa 6	505389	0.19	9.9	28.83	546.85	0.641	1.002	2,827.0	0.953	2,869.2	5.1%	1.5%	
Losa 7	493131	0.19	23.4	28.83	546.85	0.895	0.643	2,489.2	0.595	2,526.0	8.1%	1.5%	
Losa 8	493131	0.19	67.2	28.83	546.85	0.25705	0.367	2,097.4	0.335	2,145.3	9.6%	2.2%	
Losa 9	493131	0.19	9.9	28.83	546.85	0.7005	1.014	2,817.2	0.963	2,859.2	5.3%	1.5%	
Losa 10	508164	0.19	23.4	28.83	546.85	0.937	0.634	2,500.9	0.587	2,537.2	8.0%	1.4%	
Losa 11	508164	0.19	67.2	28.83	546.85	0.283	0.362	2,108.2	0.331	2,156.0	9.4%	2.2%	
Losa 12	508164	0.19	9.9	28.83	546.85	0.477	1.000	2,828.9	0.950	2,871.4	5.3%	1.5%	
Losa 13	492183	0.19	23.4	28.83	546.85	1.7535	0.644	2,488.7	0.596	2,525.3	8.1%	1.5%	
Losa 14	492183	0.19	67.2	28.83	546.85	0.6295	0.368	2,097.0	0.335	2,144.6	9.9%	2.2%	
Losa 15	492183	0.19	9.9	28.83	546.85	0.712	1.015	2,816.4	0.964	2,858.4	5.3%	1.5%	
											MAX.	12.3%	2.2%
											MIN.	5.1%	0.9%

Figura 51 Comparación costo-resistencia de pisos industriales

Se realizan las comparaciones de cada franja de sustrato distinto y sus concretos con cantidad de fibra variable, y de cada concreto con su cantidad de fibra con sus diferentes sustratos.



CAPÍTULO 5. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se sabe que la utilización de las fibras no tan solo se limita en lo estético y control de la contracción plástica como entre otras propiedades, sino que también adiciona un comportamiento dúctil al elemento. Entonces partiendo desde este punto estructural, por llamarlo así, sería muy interesante continuar y retomar la etapa experimental de las losas llevándolo hasta más allá de la falla y ruptura de la losa para nuevamente validarlo por medio de otros métodos de análisis y modelando el comportamiento ya que, el aporte principal de las fibras en cuestión de comportamiento estructural radica en la capacidad de absorber energía aún después de fracturado el material y correlacionarlo, si existiese, con el aporte del subgrado.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Fase I Experimentación y análisis de las once fibras

1. En la prueba de Resistencia a la Compresión , es notorio observar que la de más baja resistencia la presentó Ramgra Ondulada® con 276.7 kg/cm² donde esto representa un 13.5% menor de resistencia con respecto a si no tuviera fibra. En contra parte Nycon Serie 2® obtuvo un incremento del 6.5%. Hubo una dispersión de 17 kg/cm².
2. Para la prueba de Módulo de Ruptura se observa el de menor magnitud correspondiente a 43.6 kg/cm² para Nycon Serie 1® y la de mayor para Dramix Bekaert® con 53.8 kg/cm². Con respecto a la condición de ausencia de fibra se obtiene una ligera reducción de 1.2% que se considera despreciable, en otras palabras, si no se observa beneficio tampoco perjuicio y en lo que se refiere a la de mayor magnitud del Módulo de Ruptura se presentó un significativo aumento del 21.9%.
3. Para el caso del Módulo de Elasticidad se observó que la de menor magnitud fue Nycon Serie 1® y las 4 de mayor magnitud sin presentar significativa diferencia entre sí fueron Ramgra Ondulada®, Tecnor 05-25®, Mac Matriz® y Euclid Tuf Strand SF®
4. Para el caso del Esfuerzo Residual existe una regular dispersión de resultados, donde el mínimo es para Master Fiber STR® 40.7% y el máximo para Dramix Bekaert® de 57.1%. Pero esto no quiere decir que los porcentajes deban encontrarse, simplemente se denota el hecho de su diferencia de parámetro obtenido.

Fase III

1. No se consideran efectos de segundo orden
2. El enmallado del AEF se tomó teniendo en cuenta recomendaciones cualitativas, donde estas consideran la simetría y coincidencia entre las condiciones de apoyo y los nodos del enmallado así como el número de elementos que lo componen.
3. Como se puede observar que a partir de la fibra de más bajo costo que en este caso fue DRAMIX, aún así es más barato no usar fibra y aumentar el peralte de la losa



incrementado el volumen del concreto. Por tanto también se puede deducir de la siguiente tabla que el utilizar este tipo de fibra encarece en un 14% considerándose que es la más óptima de las once analizadas.

COMPARACIÓN COSTO-RESISTENCIA DE PISOS INDUSTRIALES

ESPESOR (cm)	M.R. (kg/cm ²)	DOSIFICACION (kg/m ³)	R _{e,3} (%)	COSTO CONCRETO	COSTO FIBRA	COSTO TOTAL	relacion con uso actual %	M _o (kg/cm-cm)
15.00	40	40	53	\$ 144.00	\$117.00	\$ 261.00	126.0%	2410
15.10	40	30	51	\$ 144.96	\$ 88.34	\$ 233.30	112.6%	2410
15.35	40	20	46	\$ 147.36	\$ 59.87	\$ 207.23	100.0%	2410
18.60	40	0	N/A	\$ 178.56	\$ -	\$ 178.56	86.2%	2410
15.35	40	2.28	47	\$ 147.36	\$ 59.09	\$ 206.45	99.6%	2410

Precio Concreto / m ³	\$ 960.00
Precio Fibra metálica / kg	\$ 19.50
Precio Fibra sintética / saco 2.28 kg	\$ 384.94

Uso Actual

Sugerido con 1 saco fibra sintética



CONCLUSIONES

Fase I Experimentación y análisis de las once fibras

Los resultados obtenidos de la etapa experimental son acordes conforme a lo estudiado, por lo que se tiene confiabilidad en los mismos. Se demostró que dos fibras no presentan aporte de tenacidad y por ende, ni esfuerzo residual por lo que se recomienda que no utilizarlas dichas fibras con fines de mejora en comportamiento mecánico. Del resto de las fibras pueden utilizarse según convenga en términos de costo, trabajabilidad, disponibilidad, etc.

Se comprobó la dependencia existente entre la capacidad residual a flexión del FRC y la dosificación de fibras utilizada en su elaboración, ya que se observó que para los resultados experimentales, la capacidad de carga residual aumentó según aumentó la dosificación.

Fase II Dosificación Óptima y selección de las mejores fibras

El hecho de seleccionar dos fibras respecto a las cuatro impactó el costo, disponibilidad de las mismas y de apenas una mejora en cuanto al comportamiento mecánico se refiere.

El comportamiento de las fibras EUCLID y DRAMIX no necesariamente obedecen el mismo comportamiento ante una proporcionalidad de dosificación. Por lo que se sugiere realizar un análisis individual para cada fibra y por tanto, mucho menos, extrapolar información que, en un principio se esperaba poder realizarla.

Fue también importante seleccionarlas de diferente material por qué, así se puede elegir una u otra con respecto a sometimientos de trabajo distinto, por ejemplo, para el caso de una losa que interesa mucho el acabado y además va estar sometido a intensas exposiciones de corrosión del acero entonces se optaría por la de polipropileno y caso contrario, si la losa estará expuesta a altas temperaturas se recomendaría la metálica. Solo por mencionar unas de las características diversas que ofrecen entre sí.

Fase III Diseño, Construcción, Experimentación y análisis de Losas

Debido a los porcentajes de esfuerzo residual obtenidos y con base a las fichas técnicas de los fabricantes de las fibras, 9 de las fibras presentaron tal porcentaje mayor al 40% incluso con la dosificación mínima utilizada en la etapa experimental. Esto es importante ya que se puede aplicar o no el aporte estructural que adiciona las fibras al comportamiento mecánico.



No se detectaron fisuras significativas a simple vista, por lo que se asume que no se llegó a la etapa de fractura en ninguna de las losas y se asume el hecho de que solo se experimentó en esta etapa en la etapa elástica, y, como se pudo demostrar, existe tal empatía de deformaciones entre lo analizado por medio del método de elemento finito y lo experimental en la etapa elástica del material.

Es importante el considerar bien las características de los ensayos propuestos y los resultados a obtener de aplicarlos experimentalmente. Como se vio en estos ensayos en particular, no fue sino hasta que se modeló la aplicación de la carga se vio que las mediciones en campo eran acertadas, más no coincidían con la modelación de una carga puntual al centro de los pisos.

La metodología de la PCA, deben ser utilizadas como metodologías para un diseño preliminar; ya que estas poseen muchas restricciones en cuanto a los datos de entrada y además sus nomogramas fueron confeccionados para cargas internas, por lo que las condiciones de orilla y esquina no se revisan confiablemente.



GLOSARIO

Aditivos: son componentes de naturaleza orgánica (resinas) o inorgánica, cuya inclusión tiene como objeto modificar las propiedades de los materiales conglomerados en estado fresco. Se suelen presentar en forma de polvo o de líquido, como emulsiones

Agregados Pétreos: Son las arenas, gravas naturales y piedra triturada utilizadas para formar la mezcla que da origen al concreto, los agregados constituyen cerca del 75% de esta mezcla.

Contracción plástica.- Son las fisuras que se llegan a presentar en la superficie del concreto por las diferencias por cambios bruscos de temperatura o humedad.

Flujo plástico.- Es la propiedad de muchos materiales mediante la cual ellos continúan deformándose a través de lapsos considerables bajo un estado constante de esfuerzo o carga.

Tepetate: suelo inerte. Nombre que recibe un horizonte del suelo endurecido, considerado a veces como un material paralitológico —es decir, similar a las piedras— y característico de las zonas volcánicas de América.



REFERENCIAS

- A., R. J. (Jun de 1964). “*Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement*”. . ACI Journal, Vol. 61(No. 6), pp. 657-671.
- A.C.I. Committee 544. (1997). *Design considerations for steel Fiber Reinforced Concrete*. U.S.A.: ACI 544.4R-88. American Concrete Institute - Farmington Hills.
- ACI Committee 544. (Sept. - Oct. de 1988). *Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*. V. 85(No. 5), 563-580. U.S.A.: ACI Structural Journal.
- ACI Committee 544.1R-96. . (1997). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*. U.S.A.
- B., R. J. (Jun de 1963). “*Mechanics of Crack Arrest in Concrete*”. . Journal of Engineering Mechanics, Vol. 89(No. EM3), pp. 147-168.
- Banthia N., C. K. (1993). “*Fiber Reinforced Cement Based Composites Under tensile Impact*”. Advance Cement Based Materials, Vol1, pp 131-141.
- Banthia N., N. N. (2003). “*Crack Growth Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites*”. *Cement and Concrete Composites*(N° 25), pp 3-9.
- Barros J.A.O., a. F. (November de 1999). “*Flexural Behavior of SFRC : Testing and Modelling*”. *Journal of Materials in Civil Engineering.*, pp 331-339.
- Barros J.A.O., C. A. (January-February de 2005). “*Post Cracking Behaviour of SFRC*”. *Materials and Structures.*, Vol. 38. , pp 47-56.
- Bazant, Z. a. (1983). *Crack band theory for fracture of concrete*. *Materials and Structures*. 155-177. U.S.A.: RILEM.



- Bazant, Z. e. (1995). *Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures - model B3*. Vol. 28(No. 180), 357-365. U.S.A.: Materials and Structures.
- Belletti, B. C. (2008). *Design Aspects on Steel Fiber-Reinforced Concrete Pavements*. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 20(9), 599-607. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:9(599).
- Deaton, J. A. (2005). *A finite element approach to reinforced concrete slab design*. 41-46. Georgia, U.S.A.: School of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology.
- Drüker DC, P. W. (1952). *Soil mechanics and plastic analysis or limit design*. 157-165. Q Appl Math 10:.
- E., N. L. (Jun de 1968). “*Young's Modulus of Composites Filled with Randomly Oriented Fiber*”. . *Journal of Materials*, Vol. 3(No. 2), pp. 352-358.
- FMC., R. T.-5. (1988). “*Determination of the Fracture Energy of Mortars and Concrete by Means of PB Tests on Notched Beams*”. . *Materials and Structures*, Vol. 18 (106), p. 506-513.
- Gardner, G. H. (1974). *Formation velocity and density - the diagnostic basis of stratigraphic traps*. 770-780. *Geophysics* 39,.
- Grant and West 1965 Grant, F. S. (1965). *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. New York, U.S.A.: McGraw-Hill.
- Inazaki, T. (2006). *Relationship between S-Wave velocities and geotechnical properties of alluvial sediments*. 1-8. Seattle, Washington., U.S.A.
- Japan Society of Civil Engineers. . (2008). *Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks.(HPFRCC)*. . Concrete Engineering Series.
- Japanese Society of Civil Engineers. (1984). “*Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of SFRS*”. . Standard JSCE-SF4.

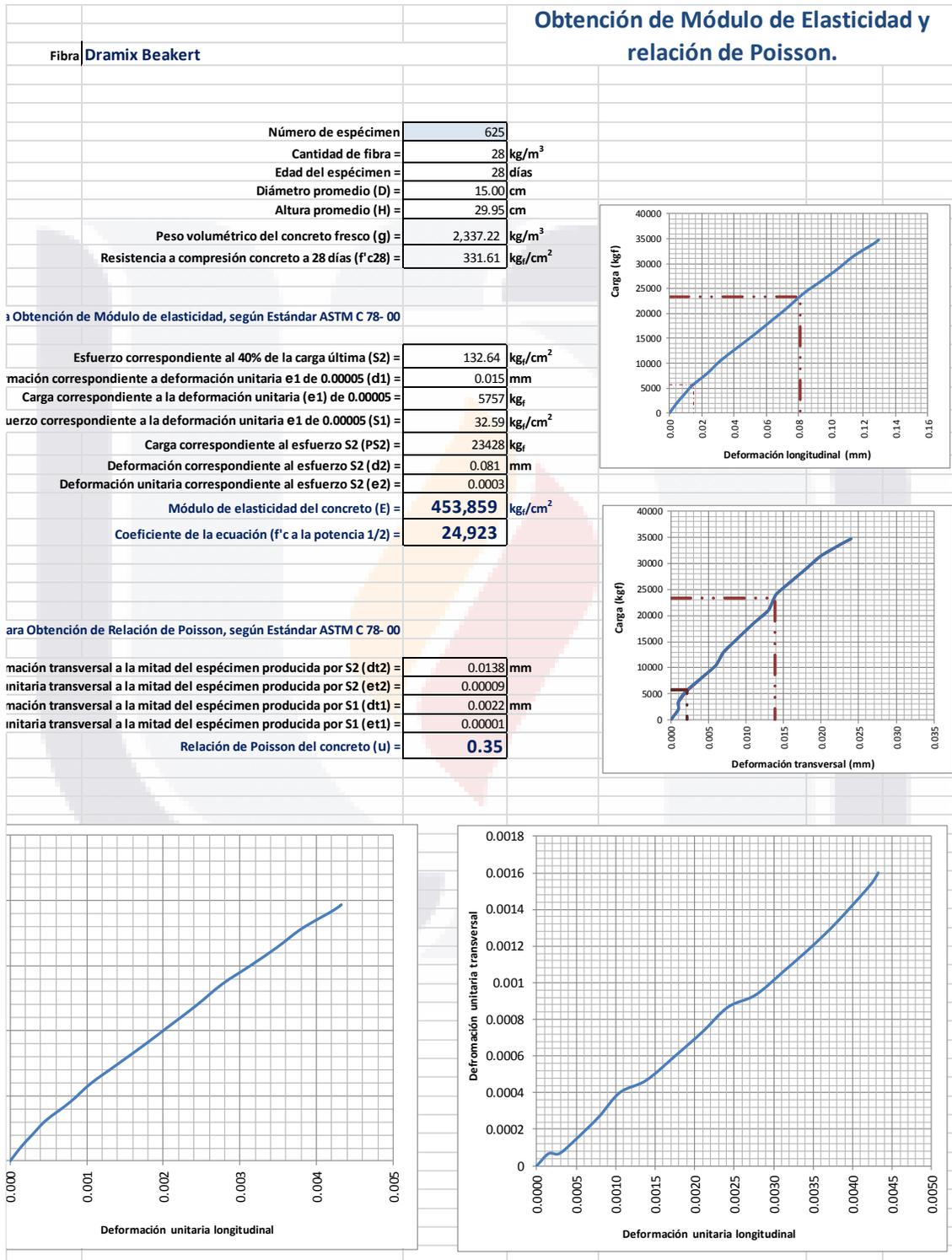


- Louie John N., 2. (April de 2001). *Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), 347-364. Arrays.
- Pedoja Ingold, E. D. (2007). *Análisis no lineal de losas sin vigas de hormigón armado y pretensado*. 66. San Sebastián, Navarra, España: UNIVERSIDAD DE NAVARRA.
- R.J., S. (1962). *Recent techniques for determination “in situ” elastic properties and measurement of motion amplification in layered media*. vol.XXVII.(No. 2.), p.p. 237-241. Geophysics.
- Rilem TC-162 TDF. (2002). “*Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: Bending Test*”. . *Materials and Structures*, Vol. 35, p. 579-582.
- Santana Naranjo, A. (septiembre de 2010). *Modelo Winkler para el Análisis de la Respuesta Dinámica de Estructuras Enterradas*. 50-56. España: SIANI.
- Sheriff, R. E. (1995). *Exploration Seismology*. 2nd Ed. . U.S.A.: Cambridge Univ. Press.397.
- Symposium on Fibre- Reinforced Concretes (FRC) - BEFIB . (20-22 de September de 2004). pp 799-808. Varenna, Italy.
- Westergaard, H. M. (1948). *New formulas for stresses in concrete pavements of airfield*. . *Transactions fo A.S.C.E*.
- Westergaard, H. M. (1926). *Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis*. V. 7(No. 2), *Public Roads*, 25-35.
- Z.P., B. (1984). “*Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal*”. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*.(110), pp 5181-635.





ANEXOS "A"





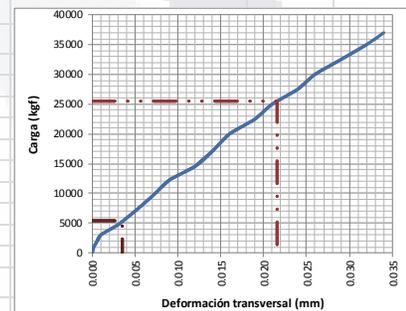
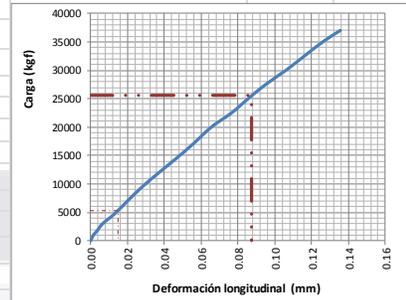
Obtención de Módulo de Elasticidad y relación de Poisson.

Fibra **Dramix Beakert**

Número de espécimen	626
Cantidad de fibra =	28 kg/m ³
Edad del espécimen =	28 días
Diámetro promedio (D) =	15.05 cm
Altura promedio (H) =	30 cm
Peso volumétrico del concreto fresco (g) =	2,323.47 kg/m ³
Resistencia a compresión concreto a 28 días (f' c28) =	358.64 kg/cm ²

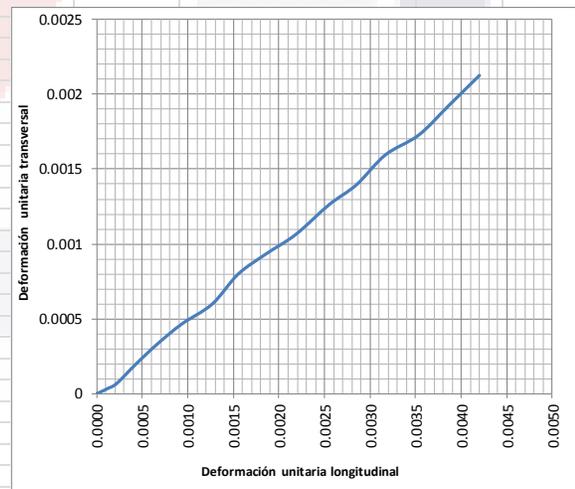
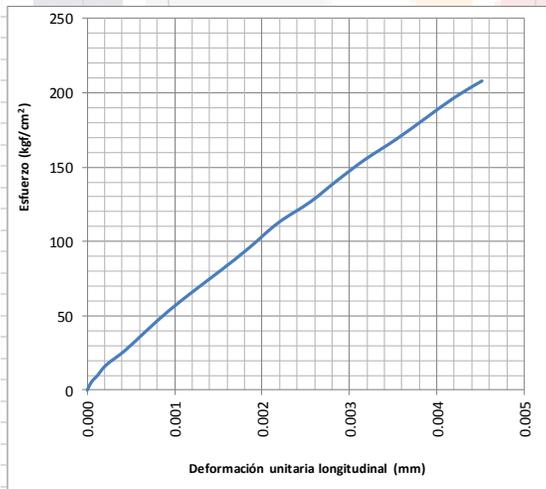
Para Obtención de Módulo de elasticidad, según Estándar ASTM C 78- 00

Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última (S2) =	143.46 kg/cm ²
Deformación correspondiente a deformación unitaria e1 de 0.00005 (d1) =	0.015 mm
Carga correspondiente a la deformación unitaria (e1) de 0.00005 =	5393 kgf
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria e1 de 0.00005 (S1) =	30.33 kg/cm ²
Carga correspondiente al esfuerzo S2 (PS2) =	25507 kgf
Deformación correspondiente al esfuerzo S2 (d2) =	0.087 mm
Deformación unitaria correspondiente al esfuerzo S2 (e2) =	0.0003
Módulo de elasticidad del concreto (E) =	468,578 kg/cm ²
Coefficiente de la ecuación (f' c a la potencia 1/2) =	24,743



Para Obtención de Relación de Poisson, según Estándar ASTM C 78- 00

Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (dt2) =	0.0216 mm
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (et2) =	0.00014
Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (dt1) =	0.0036 mm
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (et1) =	0.00002
Relación de Poisson del concreto (u) =	0.50





Fibra **Dramix Beakert**

Número de espécimen	627
Cantidad de fibra =	28 kg/m ³
Edad del espécimen =	28 días
Diámetro promedio (D) =	15.03 cm
Altura promedio (H) =	30.05 cm
Peso volumétrico del concreto fresco (g) =	2,342.35 kg/m ³
Resistencia a compresión concreto a 28 días (f' c28) =	310.20 kg/cm ²

Para Obtención de Módulo de elasticidad, según Estándar ASTM C 78- 00

Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última (S2) =	124.08 kg/cm ²
Deformación correspondiente a deformación unitaria e1 de 0.00005 (d1) =	0.015 mm
Carga correspondiente a la deformación unitaria (e1) de 0.00005 =	3969 kgf
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria e1 de 0.00005 (S1) =	22.40 kg/cm ²
Carga correspondiente al esfuerzo S2 (PS2) =	21989 kgf
Deformación correspondiente al esfuerzo S2 (d2) =	0.081 mm
Deformación unitaria correspondiente al esfuerzo S2 (e2) =	0.0003
Módulo de elasticidad del concreto (E) =	459,897 kg/cm²
Coefficiente de la ecuación (f' c a la potencia 1/2) =	26,112

Para Obtención de Relación de Poisson, según Estándar ASTM C 78- 00

Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (dt2) =	0.0130 mm
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (et2) =	0.00009
Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (dt1) =	0.0023 mm
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (et1) =	0.00002
Relación de Poisson del concreto (u) =	0.32

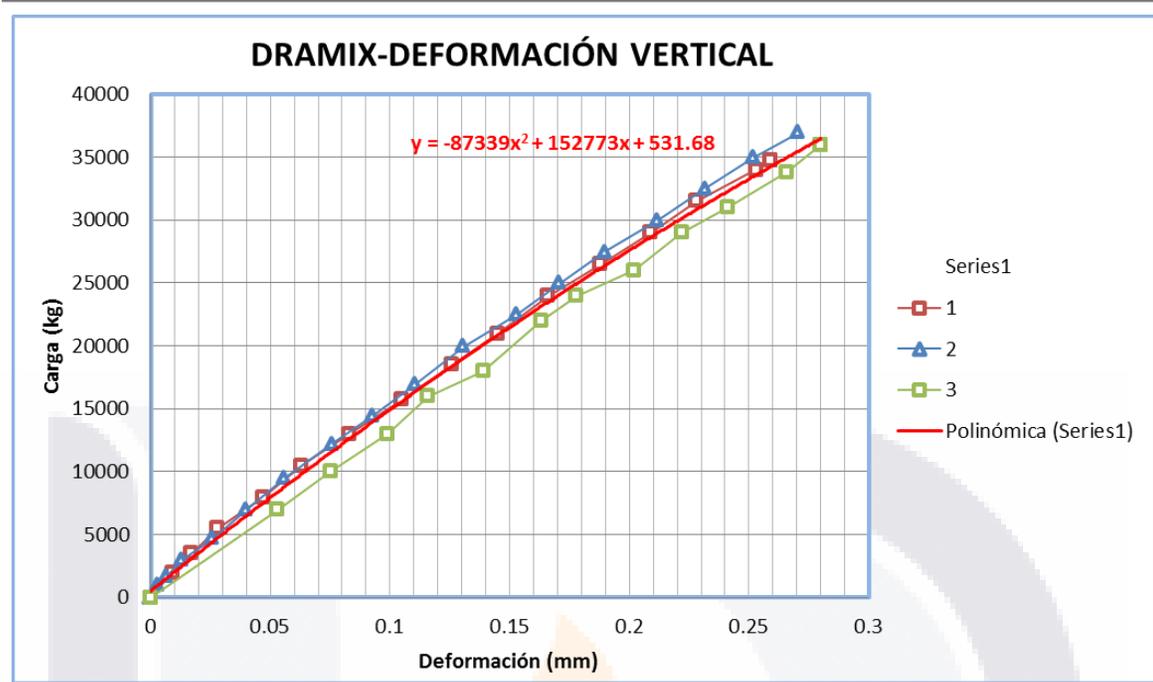
Obtención de Módulo de Elasticidad y relación de Poisson.

Deformación longitudinal (mm)

Deformación transversal (mm)

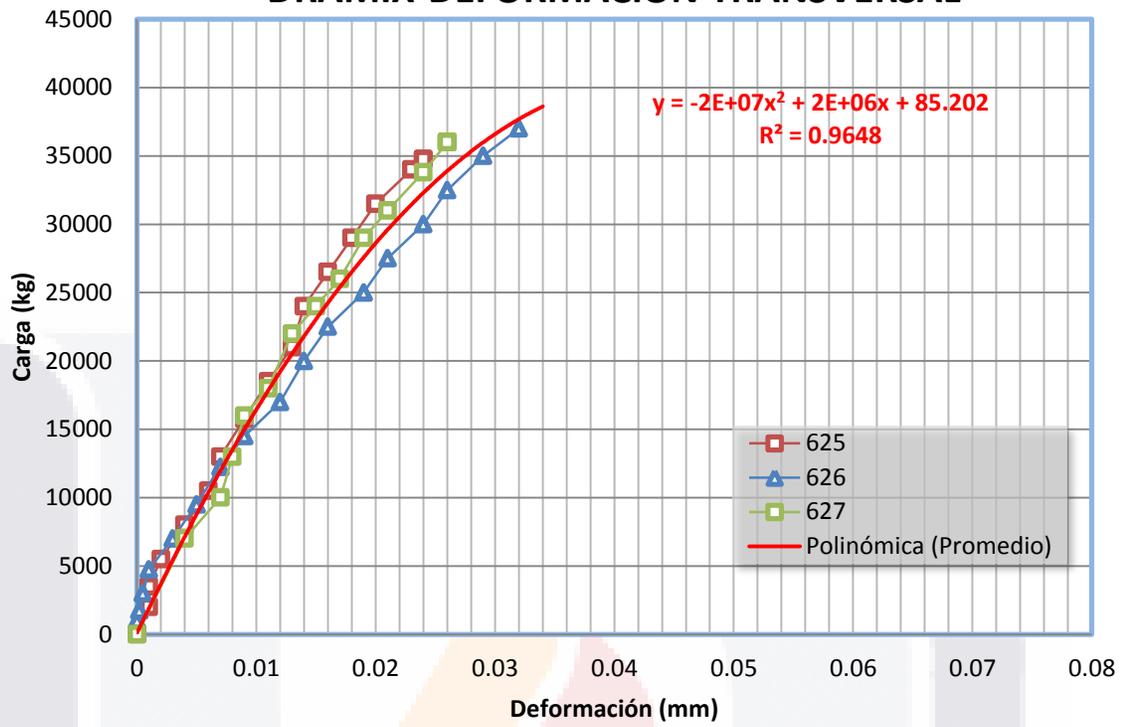
Deformación unitaria longitudinal

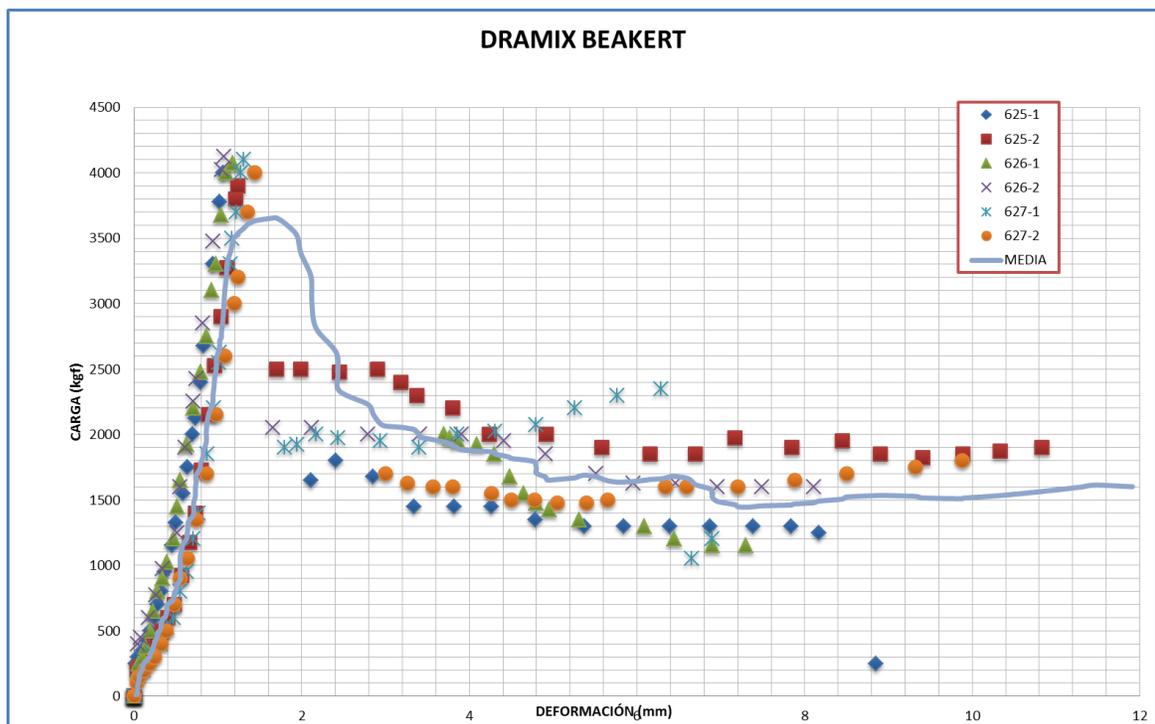
Deformación unitaria longitudinal

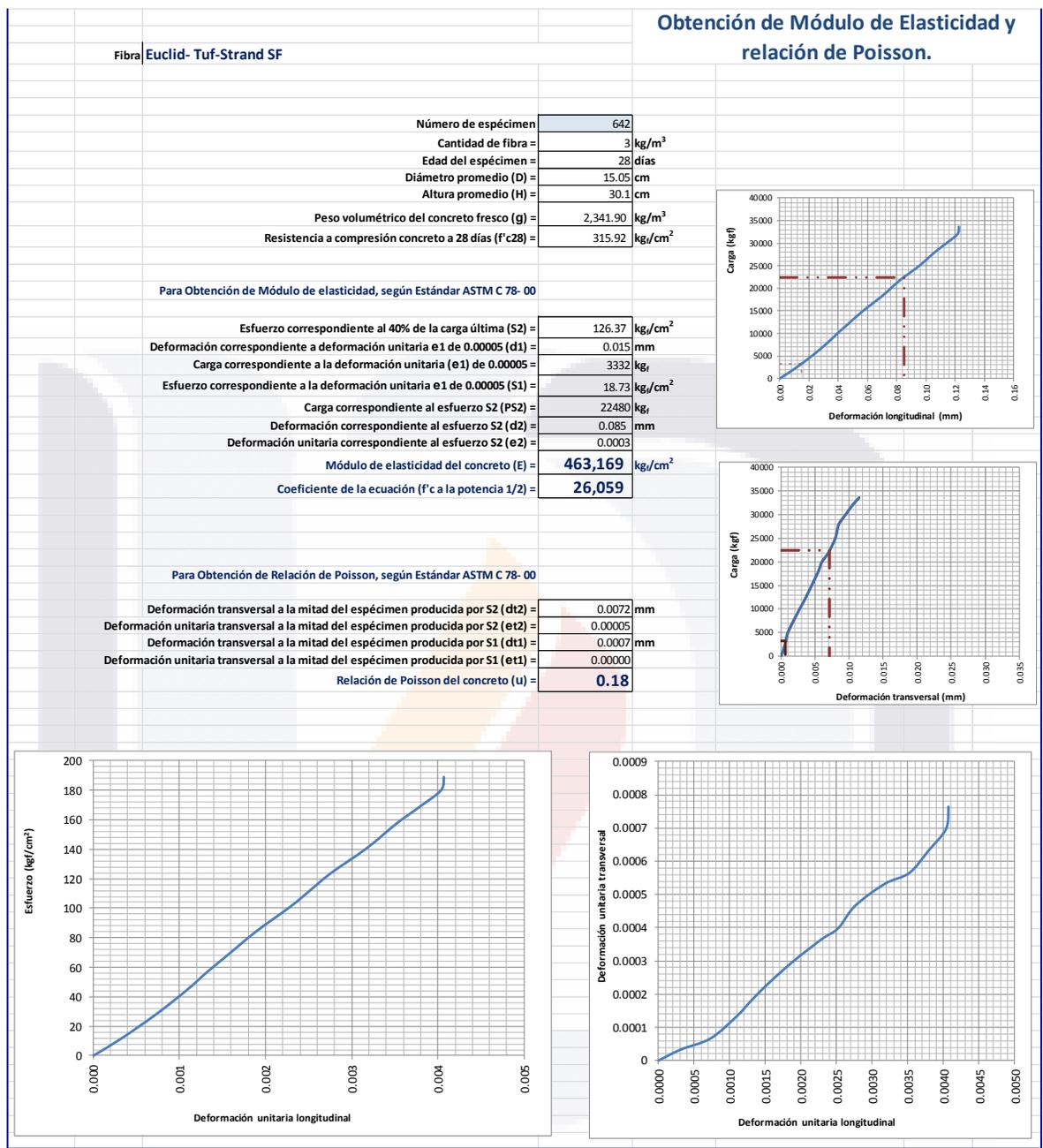


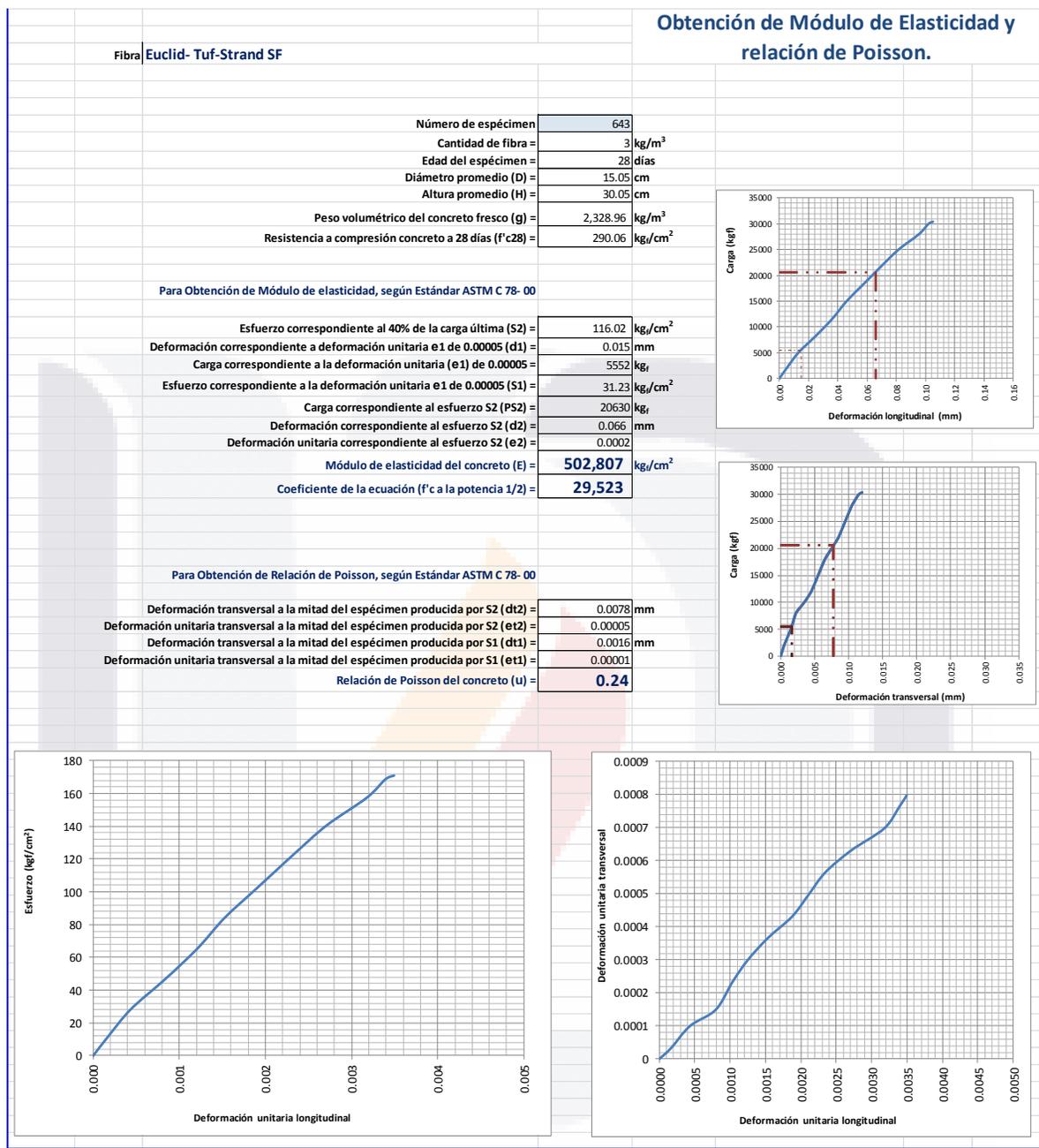


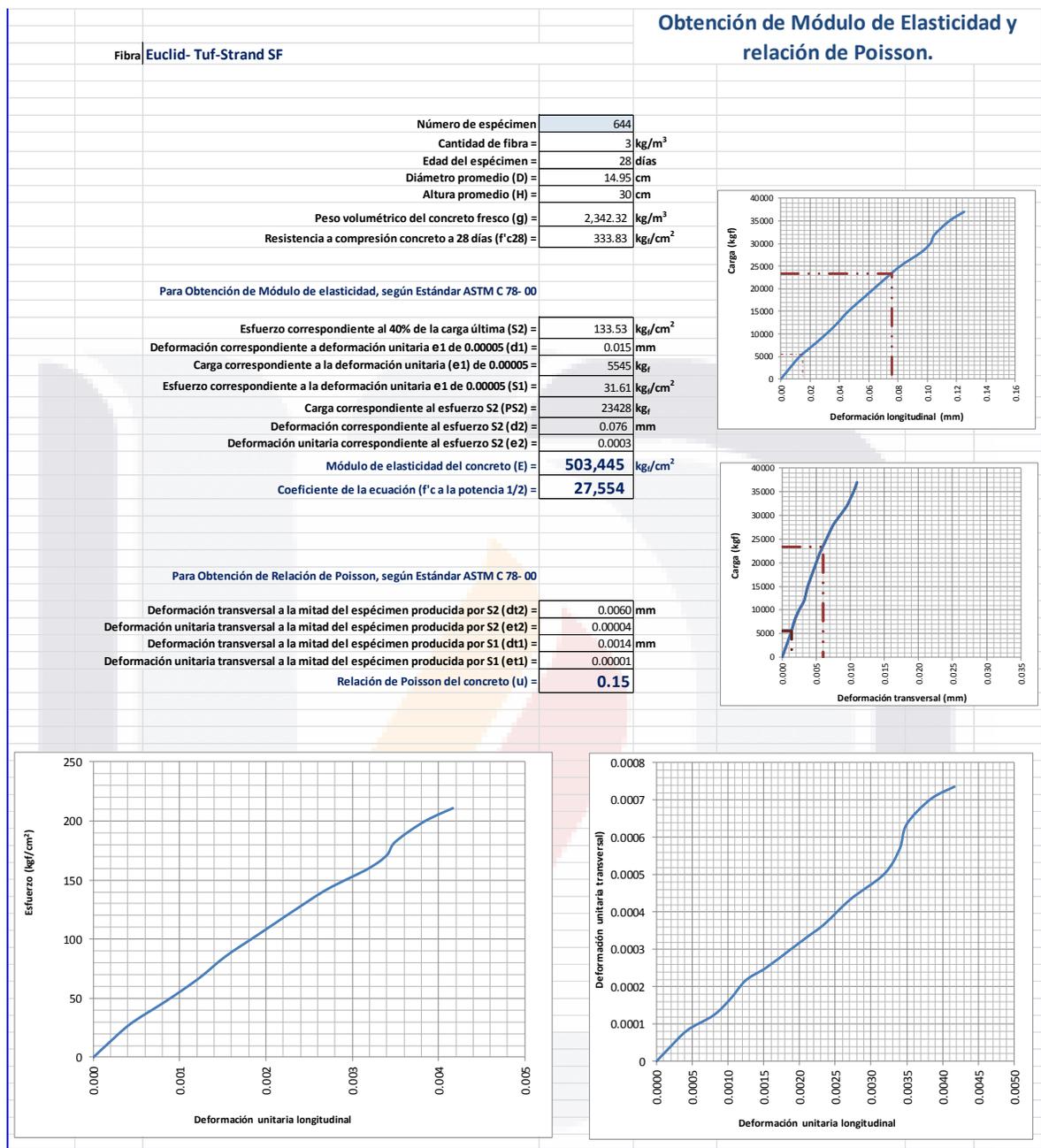
DRAMIX-DEFORMACIÓN TRANSVERSAL





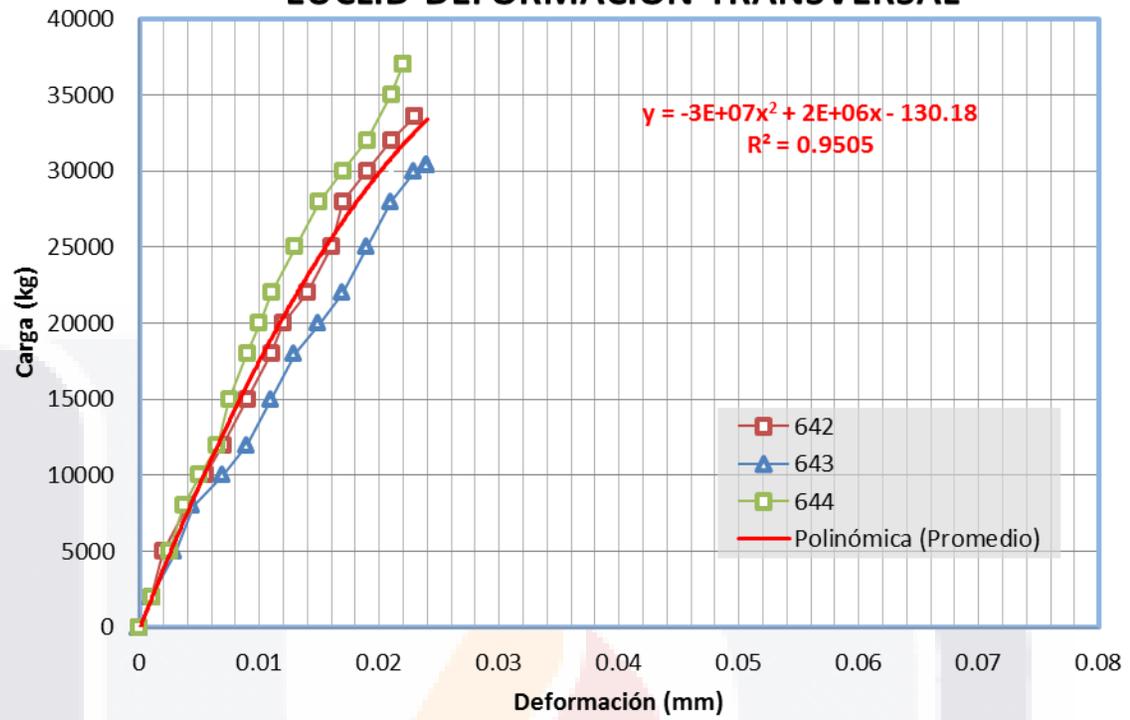






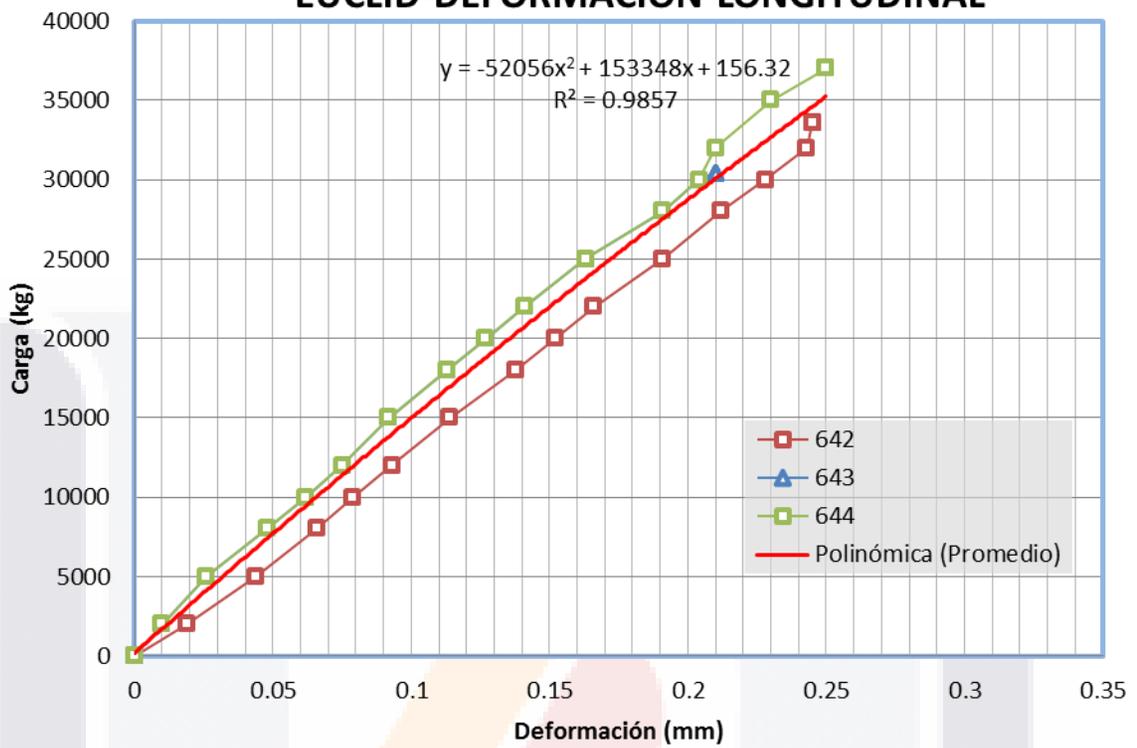


EUCLID-DEFORMACIÓN TRANSVERSAL



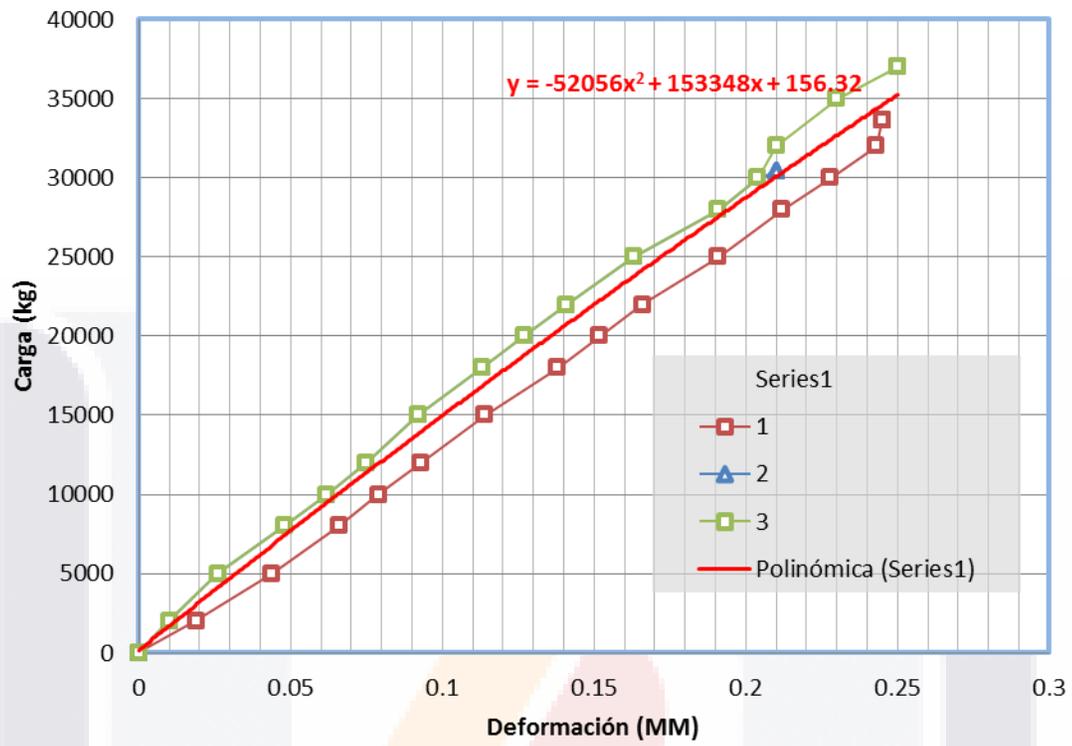


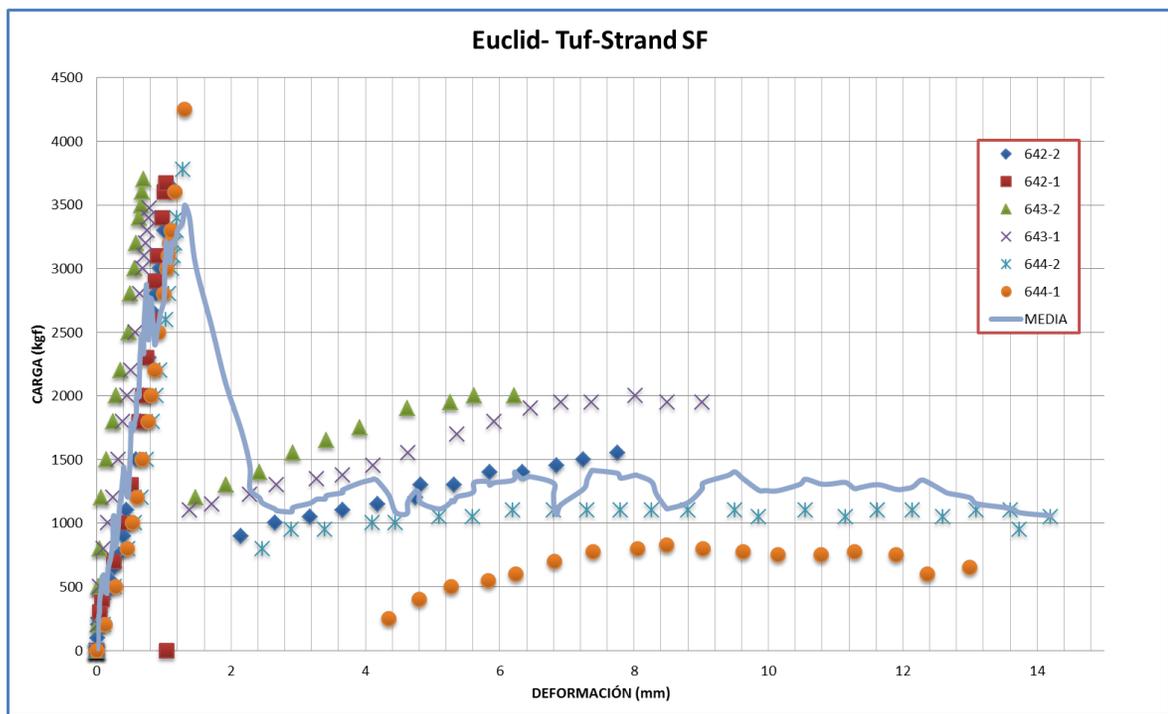
EUCLID-DEFORMACIÓN LONGITUDINAL





EUCLID-DEFORMACION HORIZONTAL







Fibra **Fibracero**

Número de espécimen	600
Cantidad de fibra =	3 kg/m ³
Edad del espécimen =	28 días
Diámetro promedio (D) =	15.00 cm
Altura promedio (H) =	29.9 cm
Peso volumétrico del concreto fresco (g)	2,344.92 kg/m ³
Resistencia a compresión concreto a 28 días (f'c28) =	324.82 kgf/cm ²

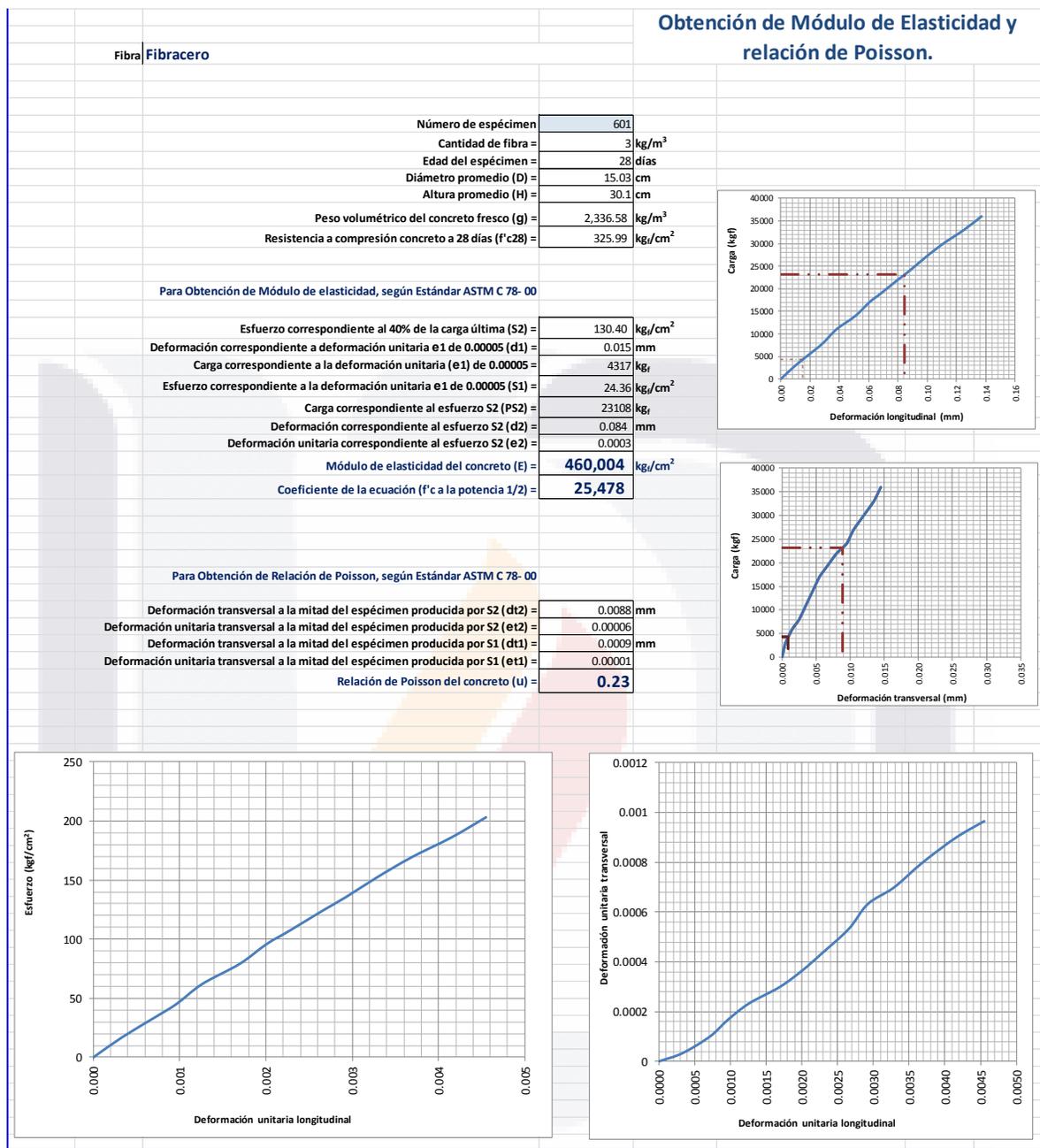
Para Obtención de Módulo de elasticidad, según Estándar ASTM C 78- 00

Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última (S2) =	129.93 kgf/cm ²
Deformación correspondiente a deformación unitaria e1 de 0.00005 (d1) =	0.015 mm
Carga correspondiente a la deformación unitaria (e1) de 0.00005 =	4990 kgf
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria e1 de 0.00005 (S1) =	28.25 kgf/cm ²
Carga correspondiente al esfuerzo S2 (P52) =	22948 kgf
Deformación correspondiente al esfuerzo S2 (d2) =	0.077 mm
Deformación unitaria correspondiente al esfuerzo S2 (e2) =	0.0003
Módulo de elasticidad del concreto (E) =	487,635 kgf/cm²
Coefficiente de la ecuación (f'c a la potencia 1/2) =	27,057

Para Obtención de Relación de Poisson, según Estándar ASTM C 78- 00

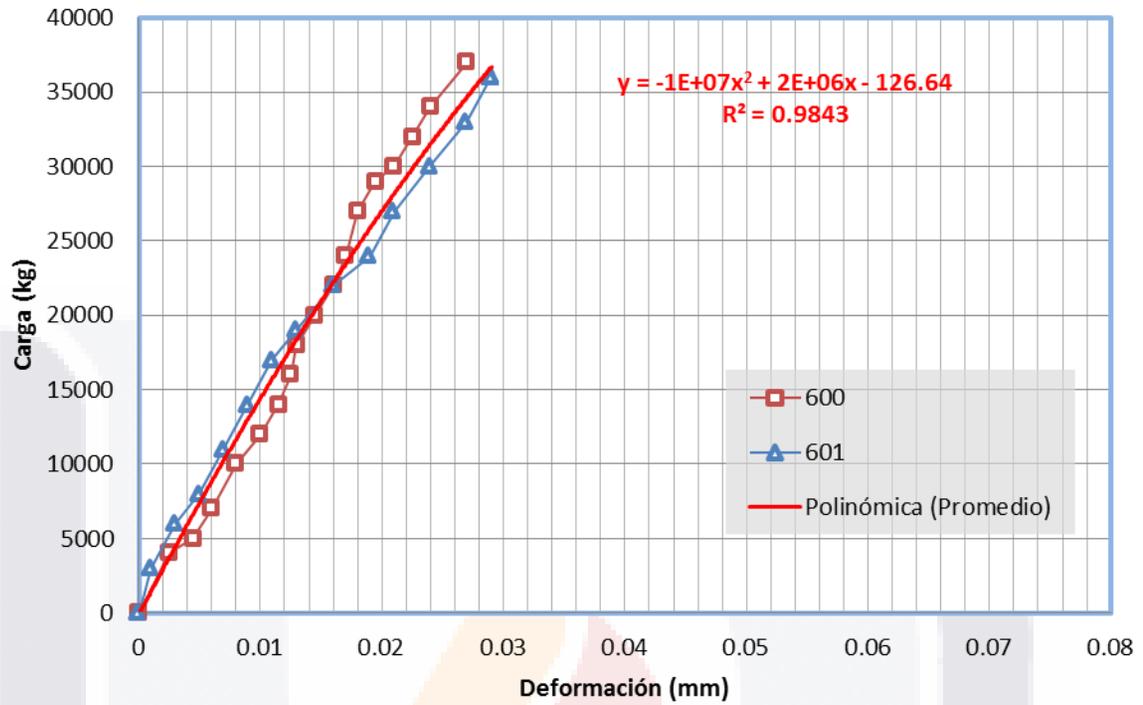
Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (dt2) =	0.0082 mm
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (et2) =	0.00005
Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (dt1) =	0.0022 mm
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (et1) =	0.00001
Relación de Poisson del concreto (u) =	0.19

Obtención de Módulo de Elasticidad y relación de Poisson.



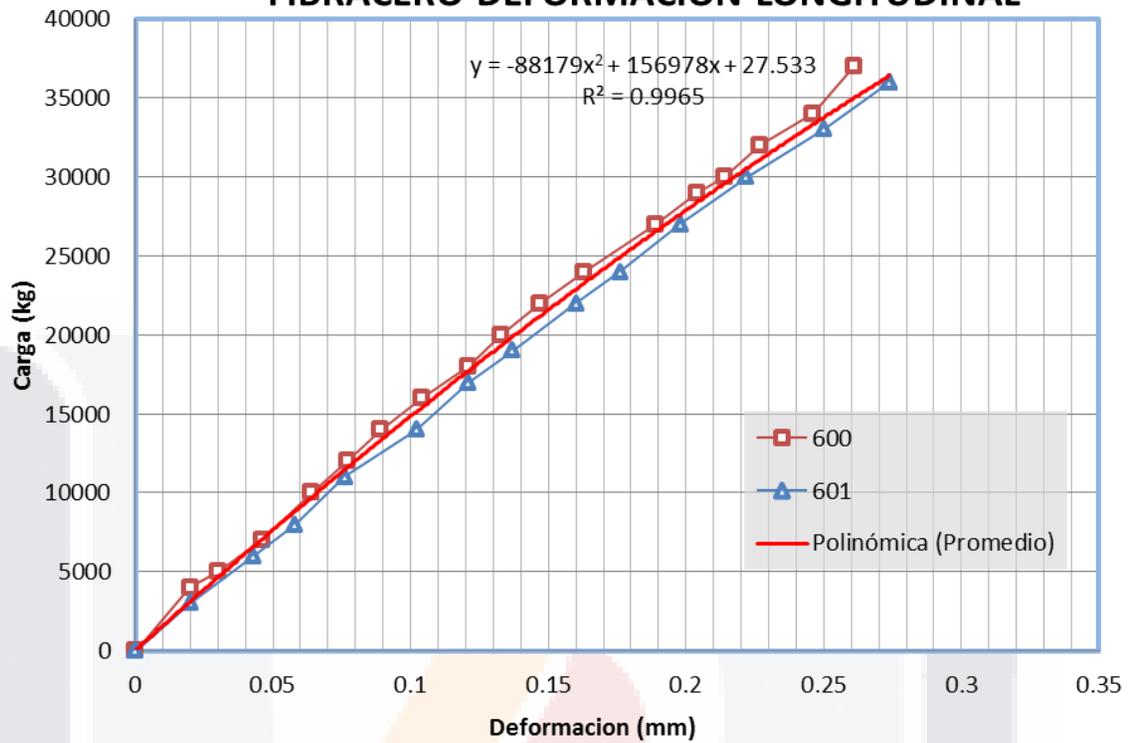


FIBRACERO-DEFORMACIÓN TRANSVERSAL



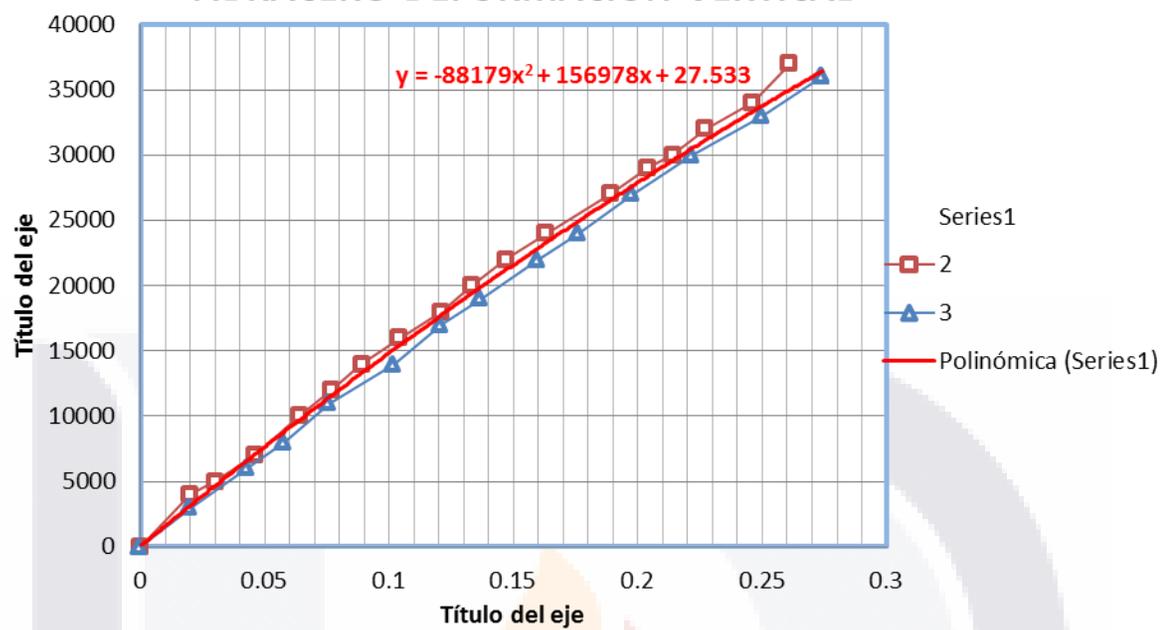


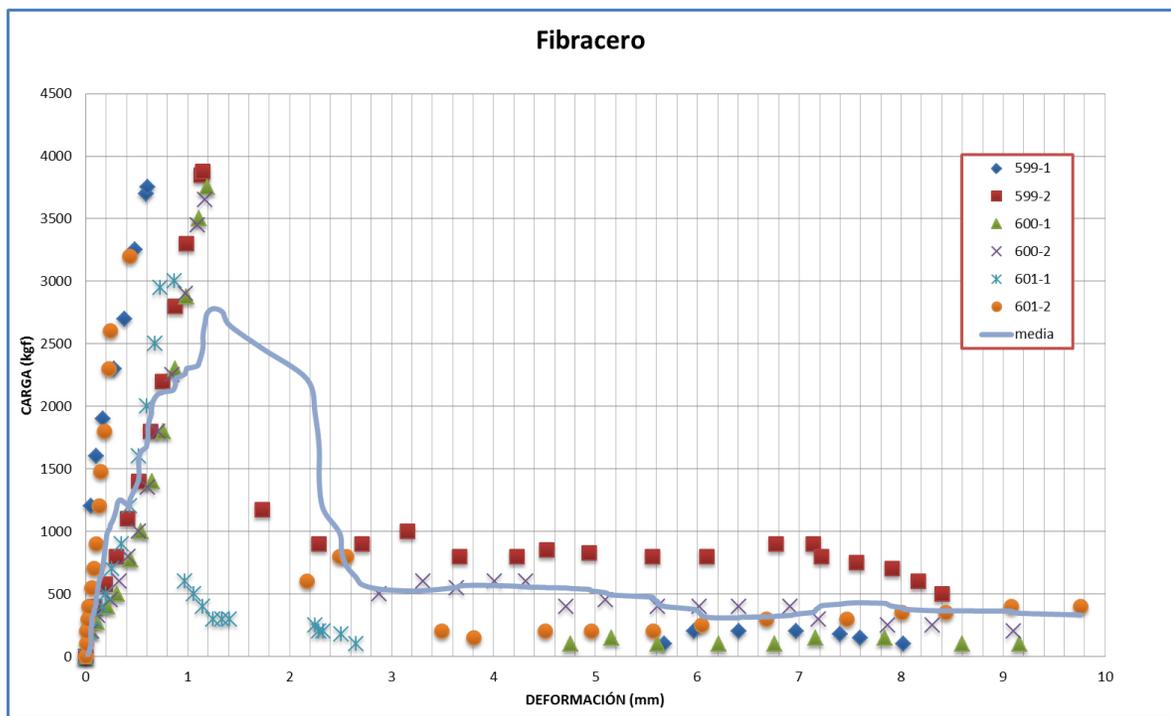
FIBRACERO-DEFORMACIÓN LONGITUDINAL

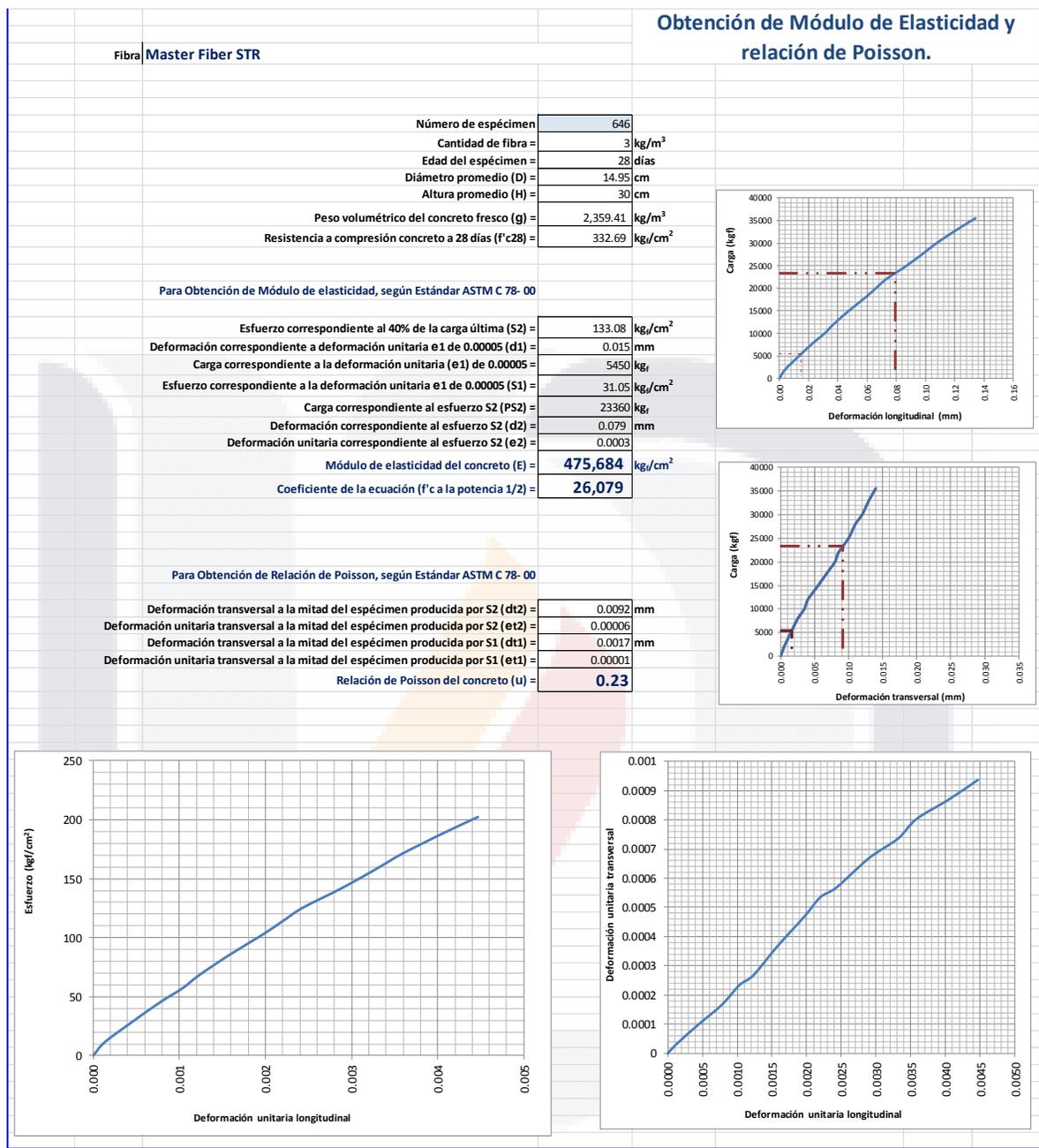


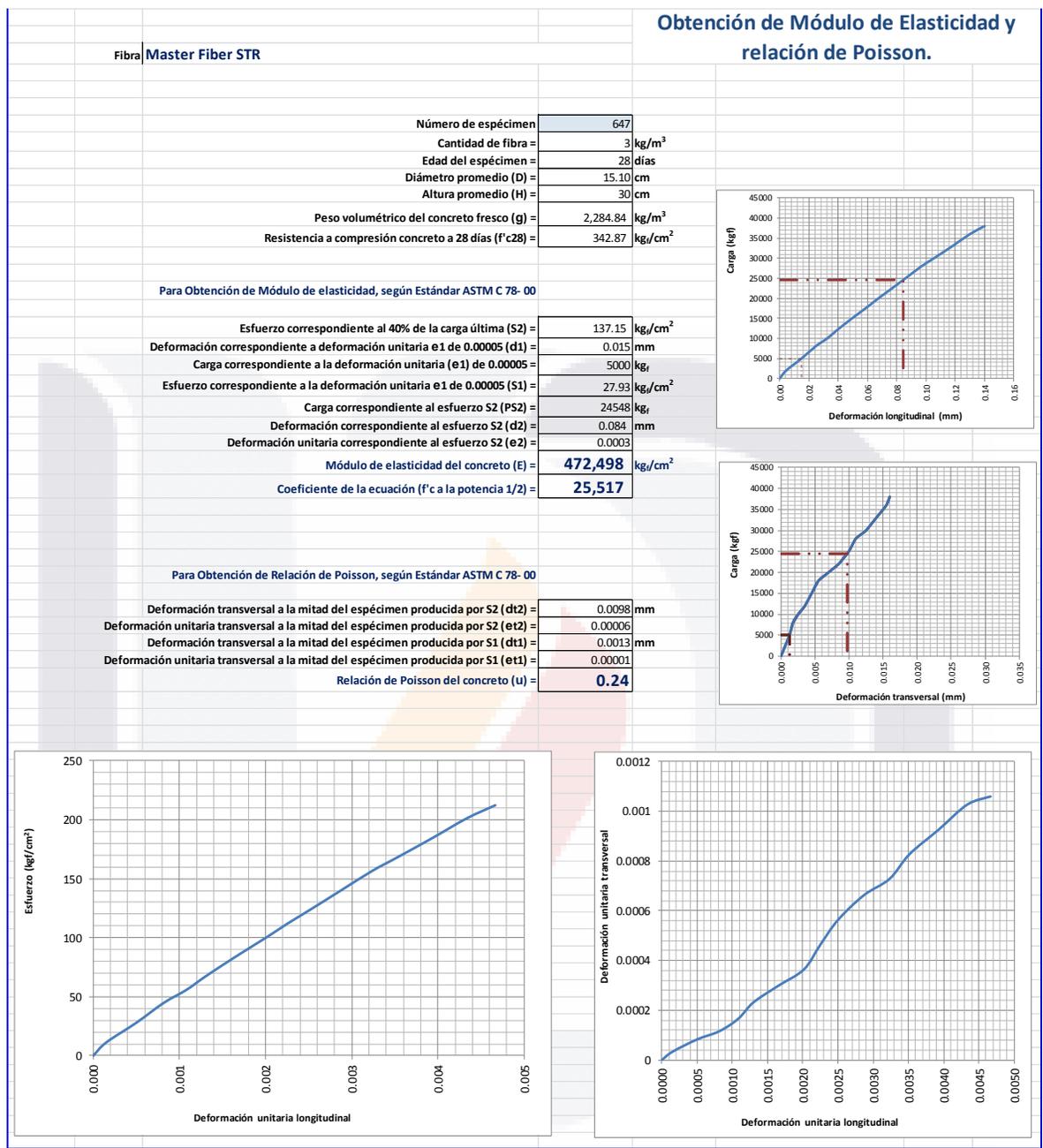


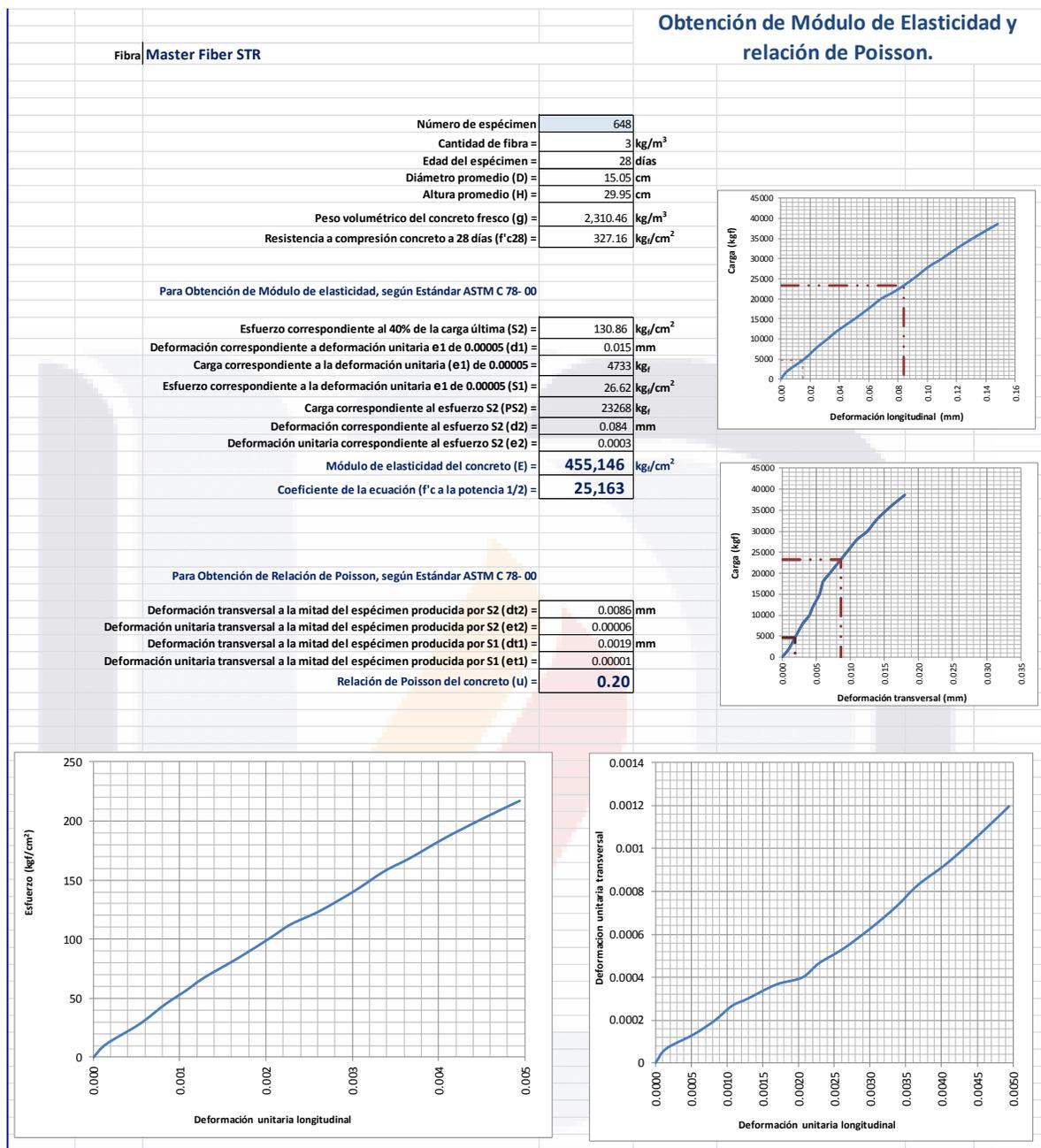
FIBRACERO-DEFORMACIÓN VERTICAL





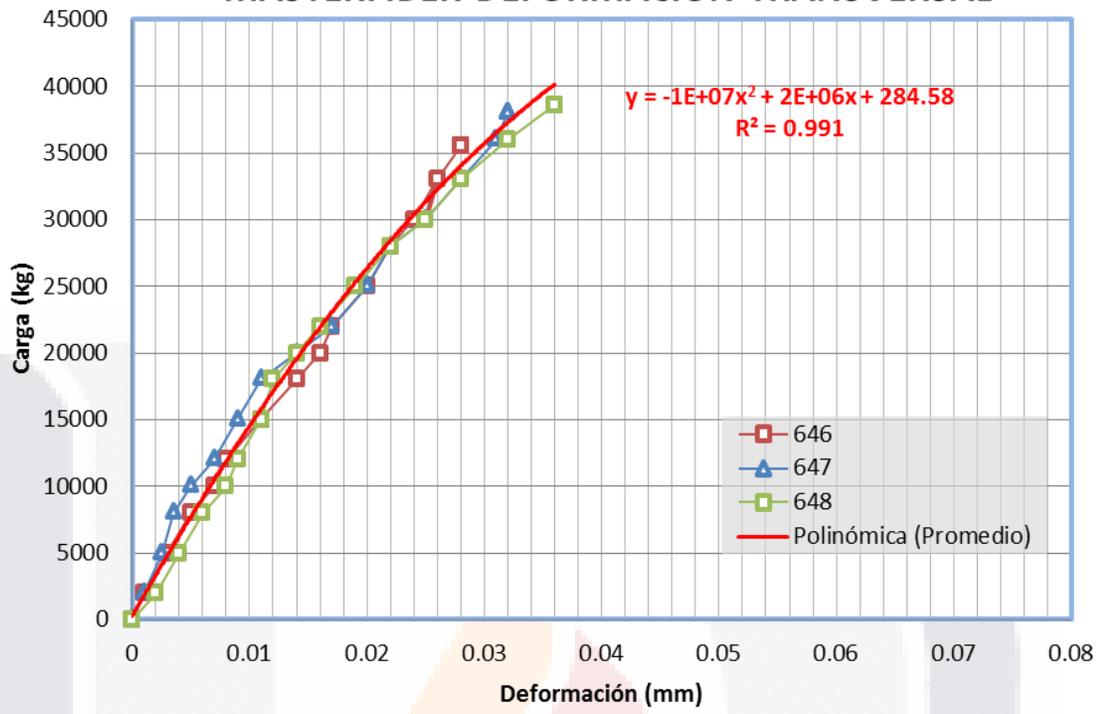






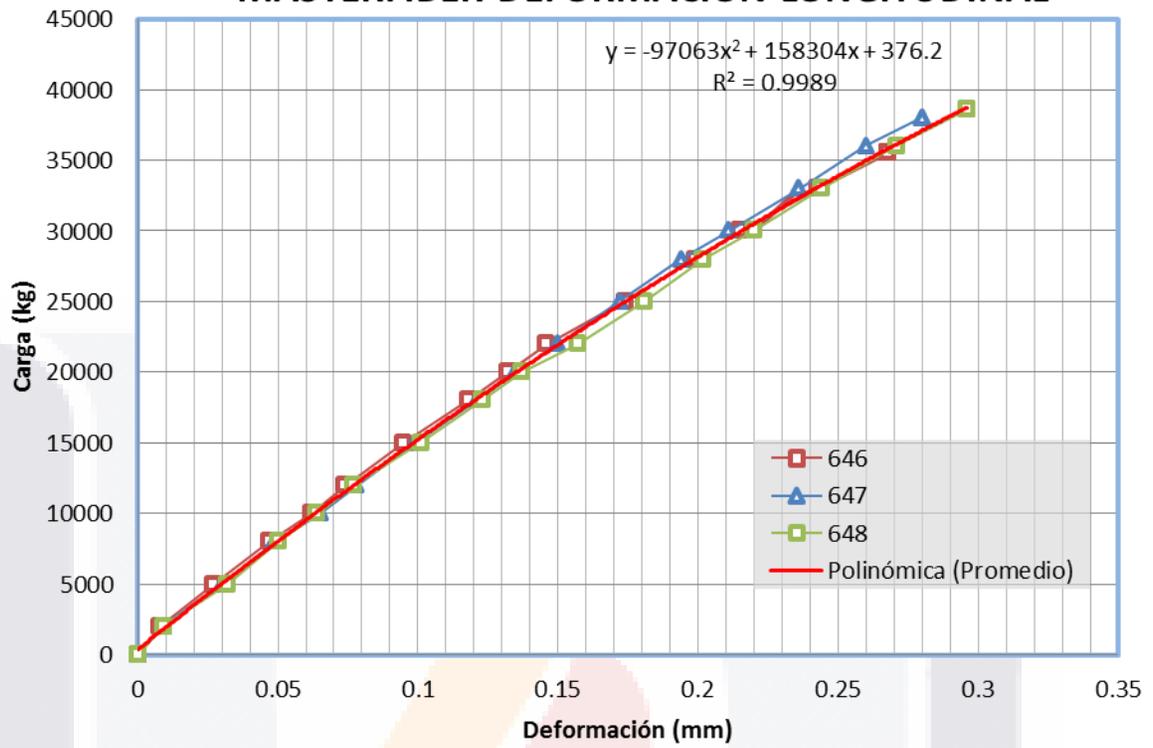


MASTERFIBER-DEFORMACIÓN TRANSVERSAL



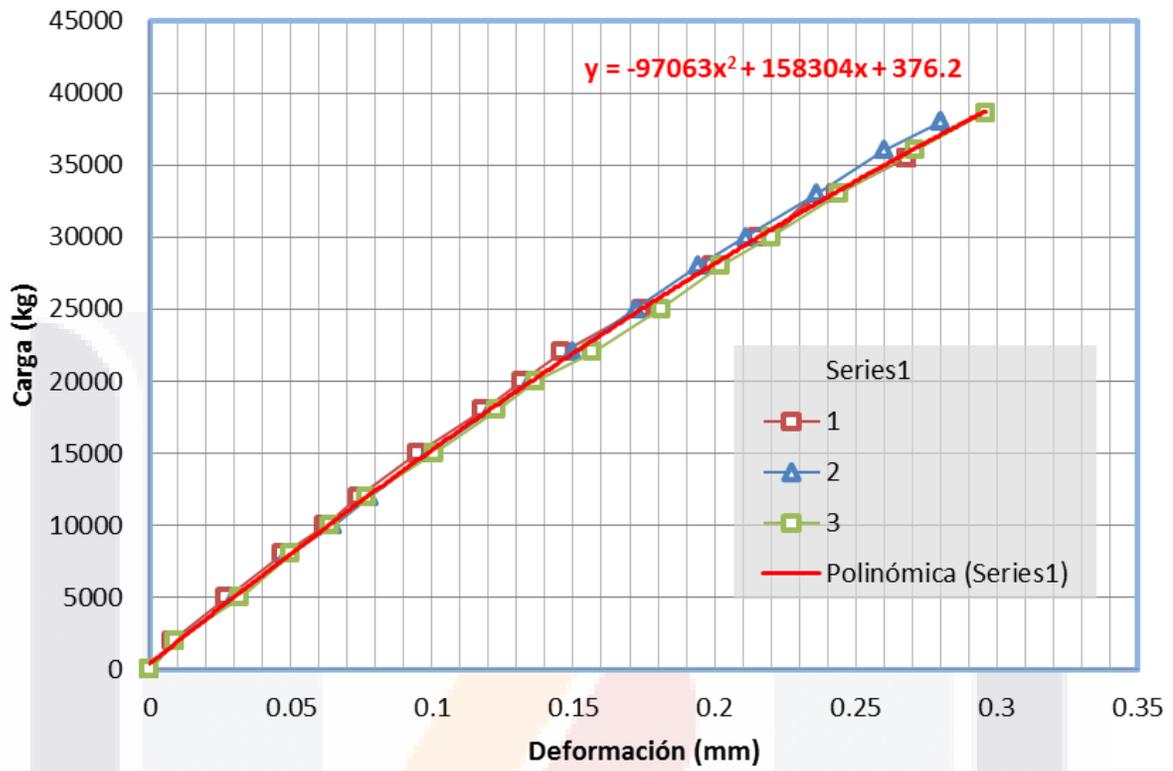


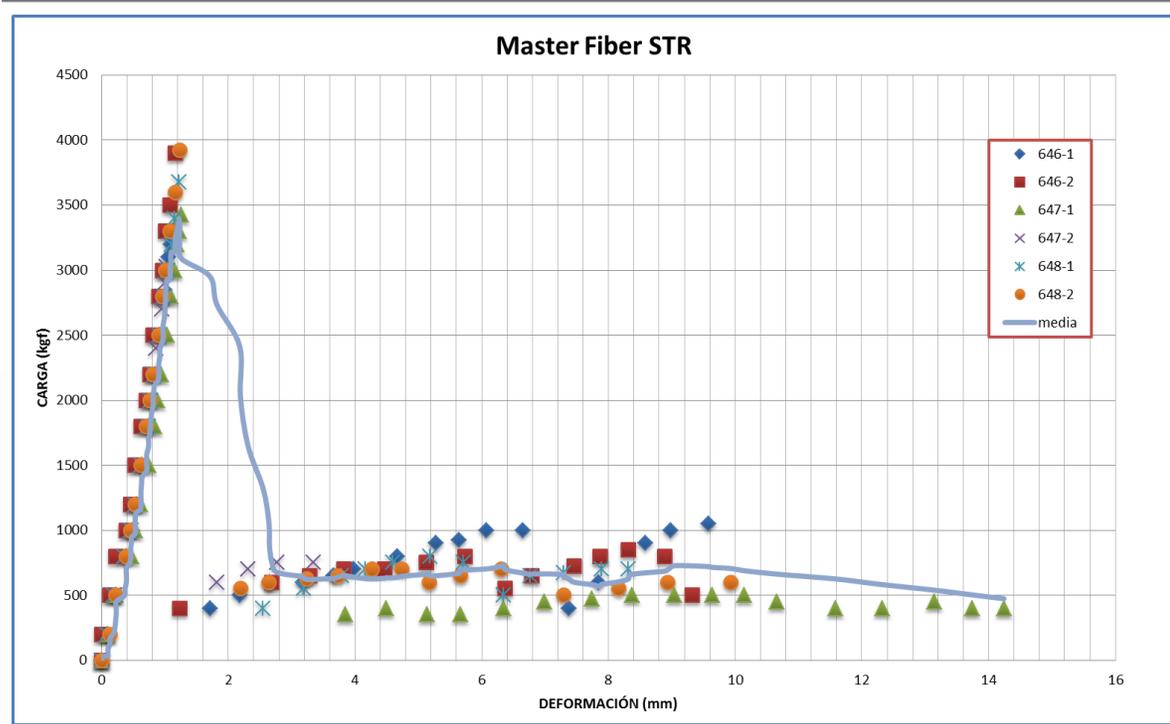
MASTERFIBER-DEFORMACIÓN LONGITUDINAL





MASTERFIBER-DEFORMACIÓN VERTICAL







Fibra Mac Matrix		Obtenci
Número de espécimen	675	
Cantidad de fibra =	3 kg/m ³	
Edad del espécimen =	28 días	
Diámetro promedio (D) =	15.05 cm	
Altura promedio (H) =	29.9 cm	
Peso volumétrico del concreto fresco (g) =	2,329.36 kg/m ³	
Resistencia a compresión concreto a 28 días (f'c28) =	294.56 kg/cm ²	
Para Obtención de Módulo de elasticidad, según Estándar ASTM C 78- 00		
Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última (S2) =	117.82 kg/cm ²	
Deformación correspondiente a deformación unitaria e1 de 0.00005 (d1) =	0.015 mm	
Carga correspondiente a la deformación unitaria (e1) de 0.00005 =	5317 kgf	
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria e1 de 0.00005 (S1) =	29.89 kg/cm ²	
Carga correspondiente al esfuerzo S2 (PS2) =	20960 kgf	
Deformación correspondiente al esfuerzo S2 (d2) =	0.065 mm	
Deformación unitaria correspondiente al esfuerzo S2 (e2) =	0.0002	
Módulo de elasticidad del concreto (E) =	526,805 kg/cm ²	
Coefficiente de la ecuación (f'c a la potencia 1/2) =	30,695	
Para Obtención de Relación de Poisson, según Estándar ASTM C 78- 00		
Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (dt2) =	0.0085 mm	
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (et2) =	0.00006	
Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (dt1) =	0.0011 mm	
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (et1) =	0.00001	
Relación de Poisson del concreto (u) =	0.29	



Fibra Mac Matrix

Número de espécimen	676
Cantidad de fibra =	3 kg/m ³
Edad del espécimen =	28 días
Diámetro promedio (D) =	15.10 cm
Altura promedio (H) =	29.9 cm
Peso volumétrico del concreto fresco (g) =	2,303.69 kg/m ³
Resistencia a compresión concreto a 28 días (f'c28) =	299.31 kg/cm ²

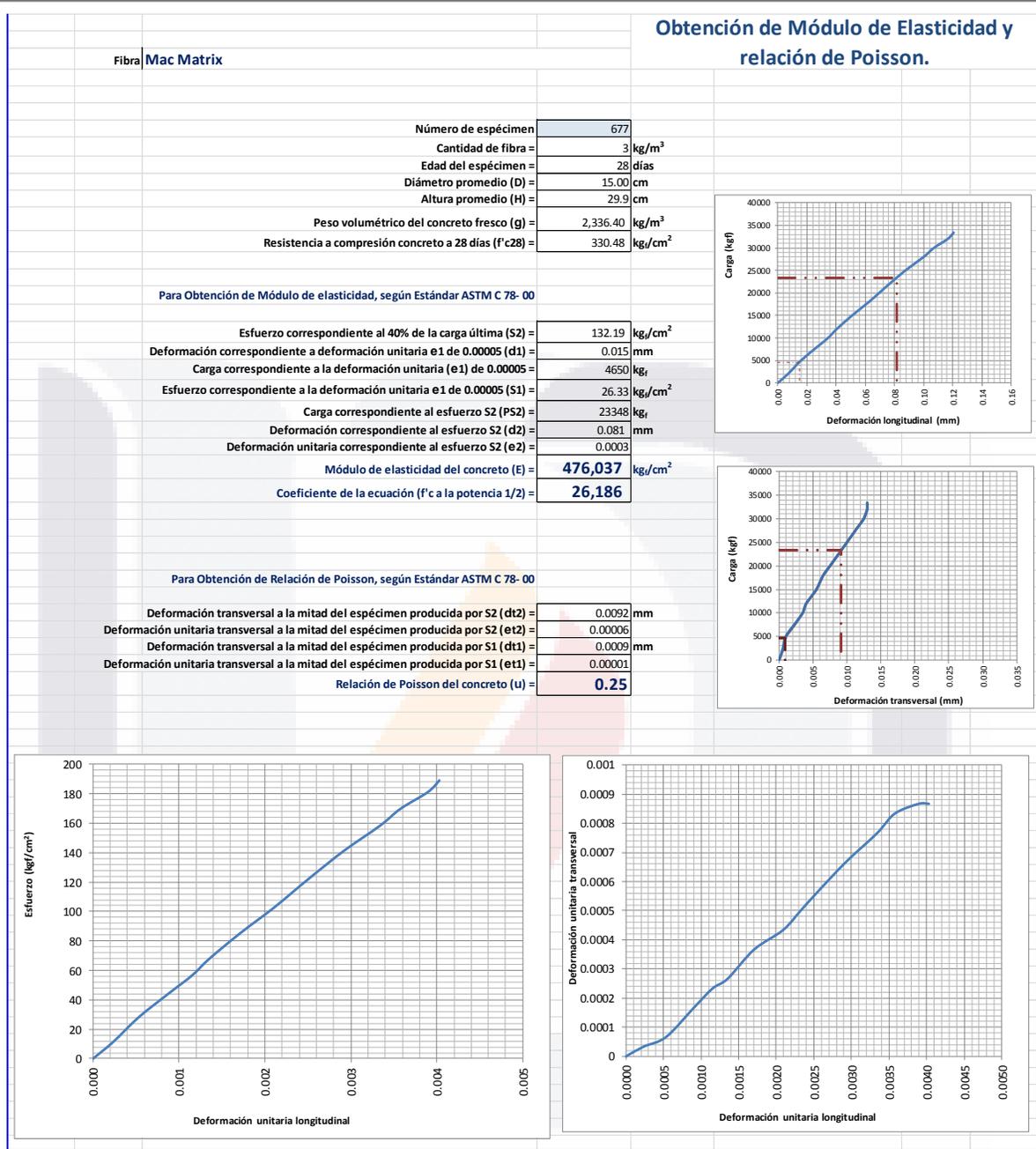
Para Obtención de Módulo de elasticidad, según Estándar ASTM C 78- 00

Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última (S2) =	119.72 kg/cm ²
Deformación correspondiente a deformación unitaria e1 de 0.00005 (d1) =	0.015 mm
Carga correspondiente a la deformación unitaria (e1) de 0.00005 =	6106 kgf
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria e1 de 0.00005 (S1) =	34.12 kg/cm ²
Carga correspondiente al esfuerzo S2 (PS2) =	21429 kgf
Deformación correspondiente al esfuerzo S2 (d2) =	0.068 mm
Deformación unitaria correspondiente al esfuerzo S2 (e2) =	0.0002
Módulo de elasticidad del concreto (E) =	485,760 kg/cm²
Coefficiente de la ecuación (f'c a la potencia 1/2) =	28,078

Para Obtención de Relación de Poisson, según Estándar ASTM C 78- 00

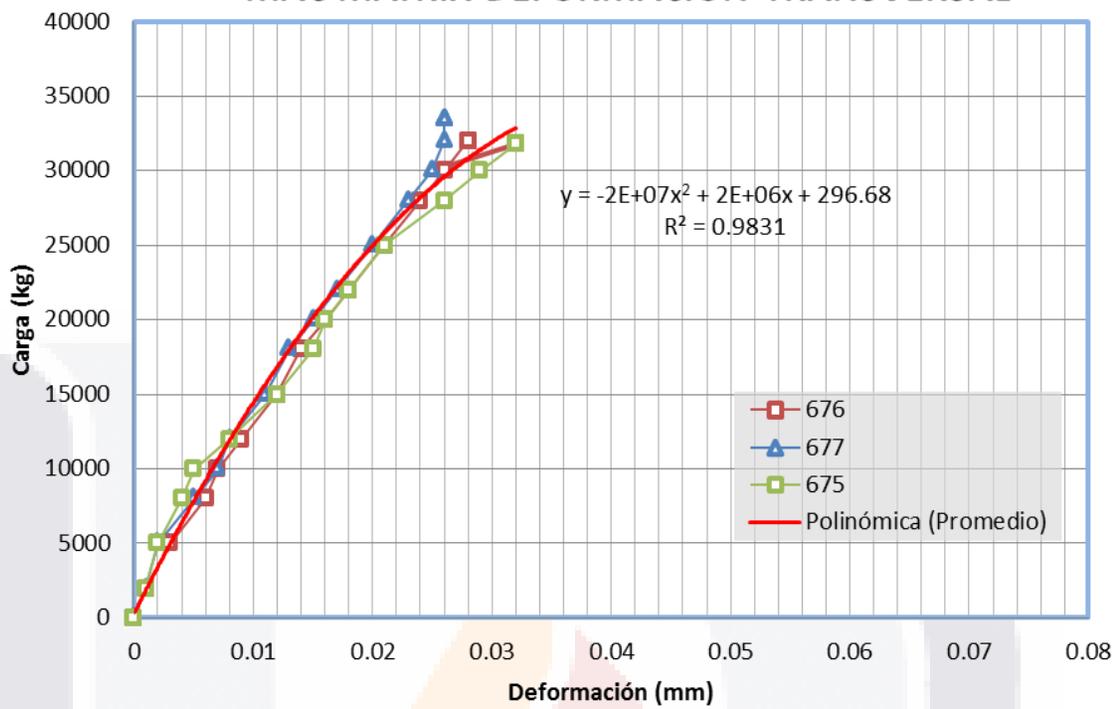
Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (dt2) =	0.0087 mm
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (et2) =	0.00006 mm
Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (dt1) =	0.0021 mm
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (et1) =	0.00001 mm
Relación de Poisson del concreto (u) =	0.25

Obtención de Módulo de Elasticidad y relación de Poisson.



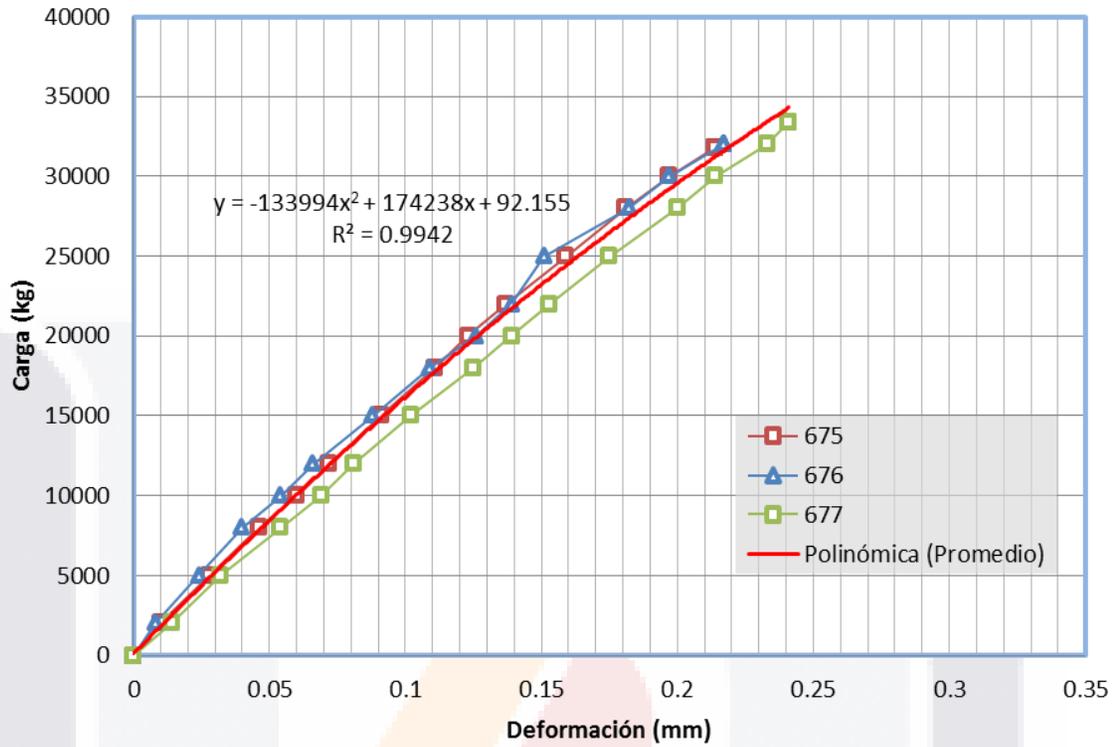


MAC MATRIX-DEFORMACIÓN TRANSVERSAL



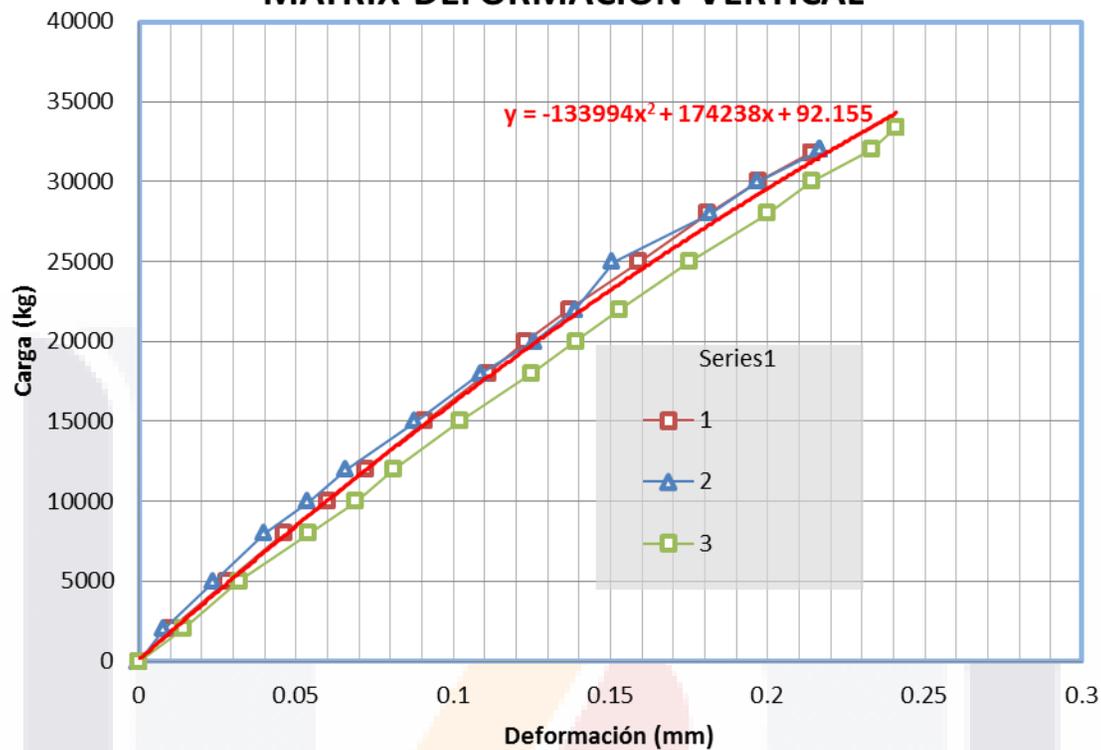


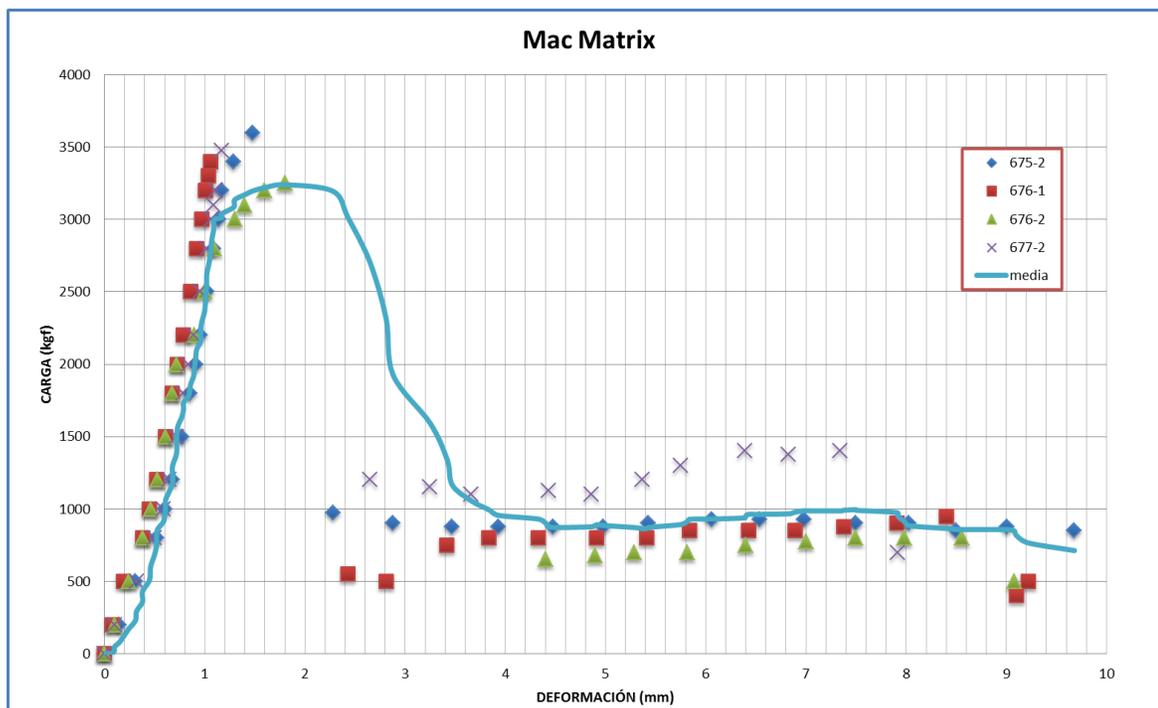
MAC MATRIX-DEFORMACIÓN LONGITUDINAL

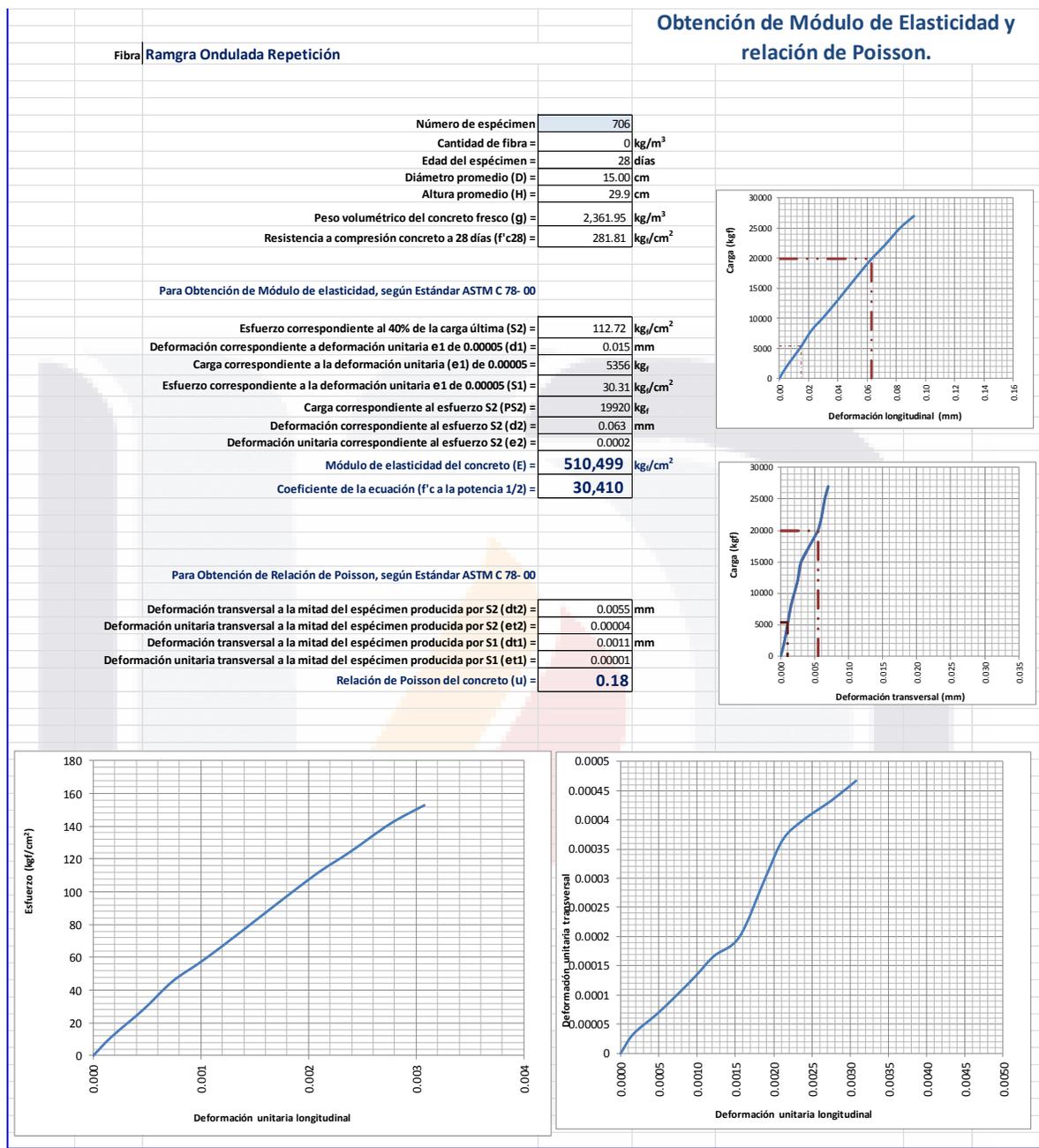




MATRIX-DEFORMACIÓN VERTICAL









Fibra Ramgra Ondulada Repetición

Número de espécimen	707
Cantidad de fibra =	0 kg/m ³
Edad del espécimen =	28 días
Diámetro promedio (D) =	15.03 cm
Altura promedio (H) =	29.975 cm
Peso volumétrico del concreto fresco (g) =	2,362.32 kg/m ³
Resistencia a compresión concreto a 28 días (f'c28) =	283.13 kgf/cm ²

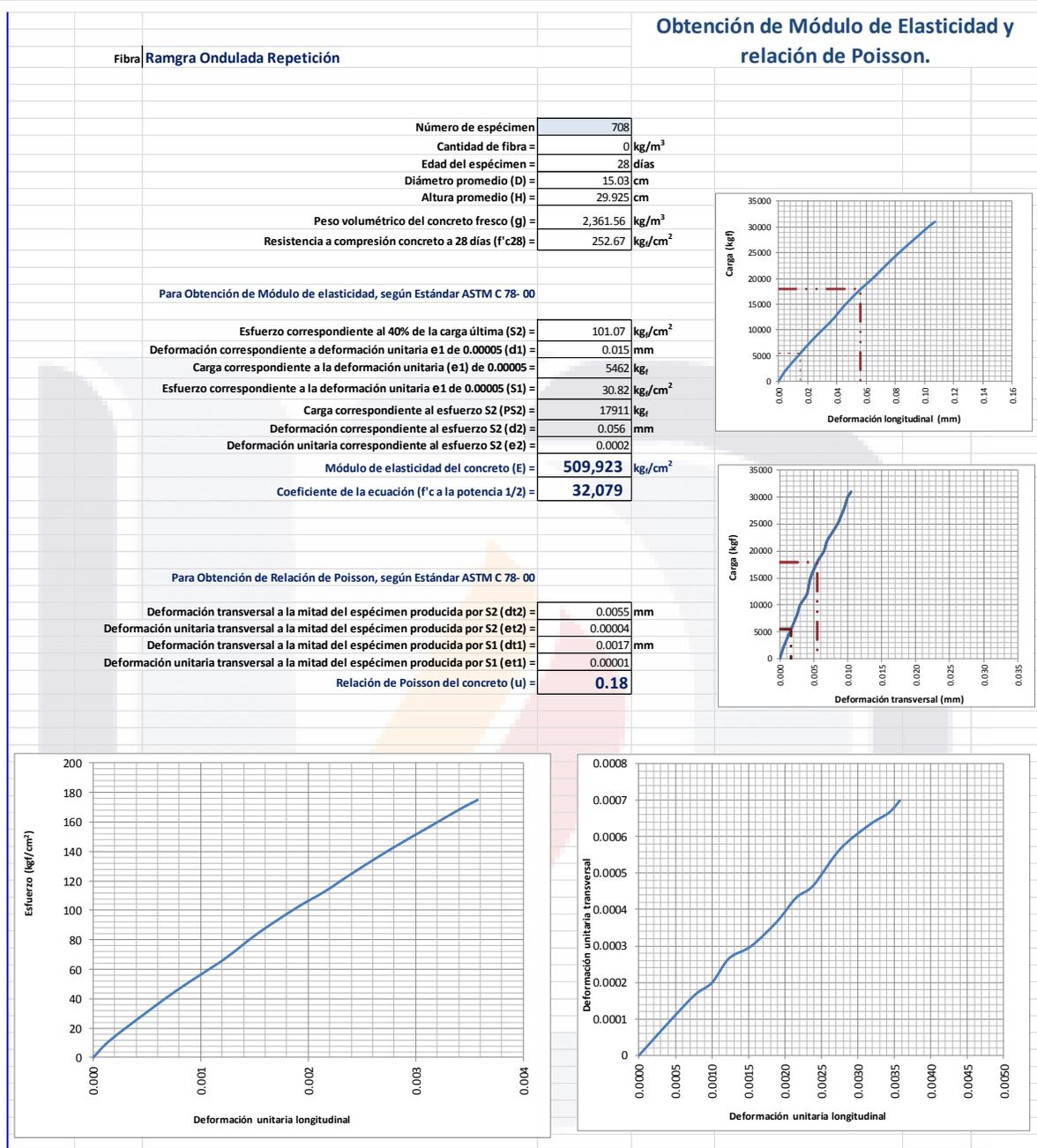
Para Obtención de Módulo de elasticidad, según Estándar ASTM C 78- 00

Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última (S2) =	113.25 kgf/cm ²
Deformación correspondiente a deformación unitaria e1 de 0.00005 (d1) =	0.015 mm
Carga correspondiente a la deformación unitaria (e1) de 0.00005 =	4696 kgf
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria e1 de 0.00005 (S1) =	26.50 kgf/cm ²
Carga correspondiente al esfuerzo S2 (PS2) =	20070 kgf
Deformación correspondiente al esfuerzo S2 (d2) =	0.070 mm
Deformación unitaria correspondiente al esfuerzo S2 (e2) =	0.0002
Módulo de elasticidad del concreto (E) =	474,591 kgf/cm ²
Coefficiente de la ecuación (f'c a la potencia 1/2) =	28,205

Para Obtención de Relación de Poisson, según Estándar ASTM C 78- 00

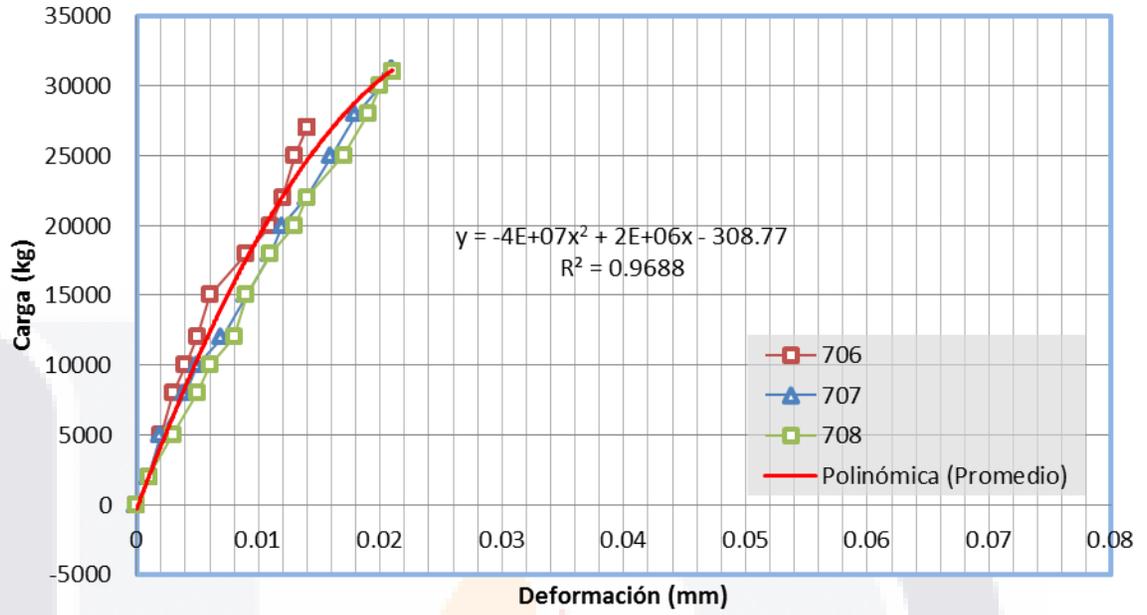
Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (dt2) =	0.0060 mm
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (et2) =	0.00004
Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (dt1) =	0.0009 mm
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (et1) =	0.00001
Relación de Poisson del concreto (U) =	0.19

Obtención de Módulo de Elasticidad y relación de Poisson.



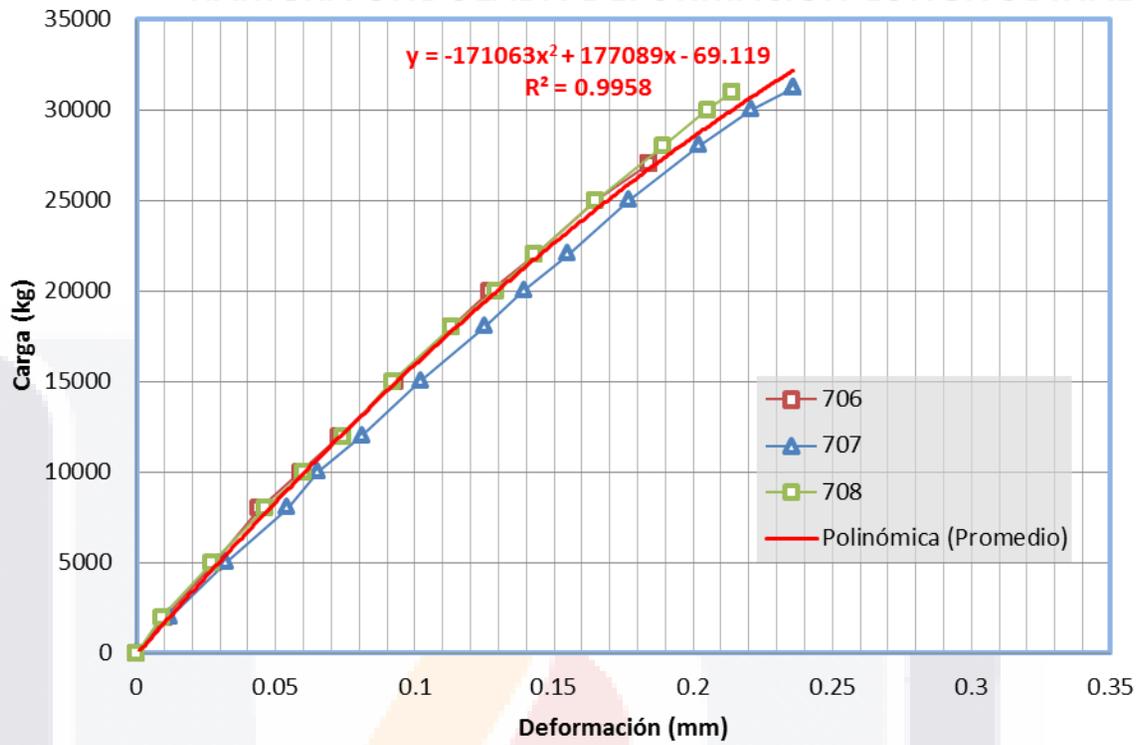


RAMGRA ONDULADA-DEFORMACIÓN TRANSVERSAL



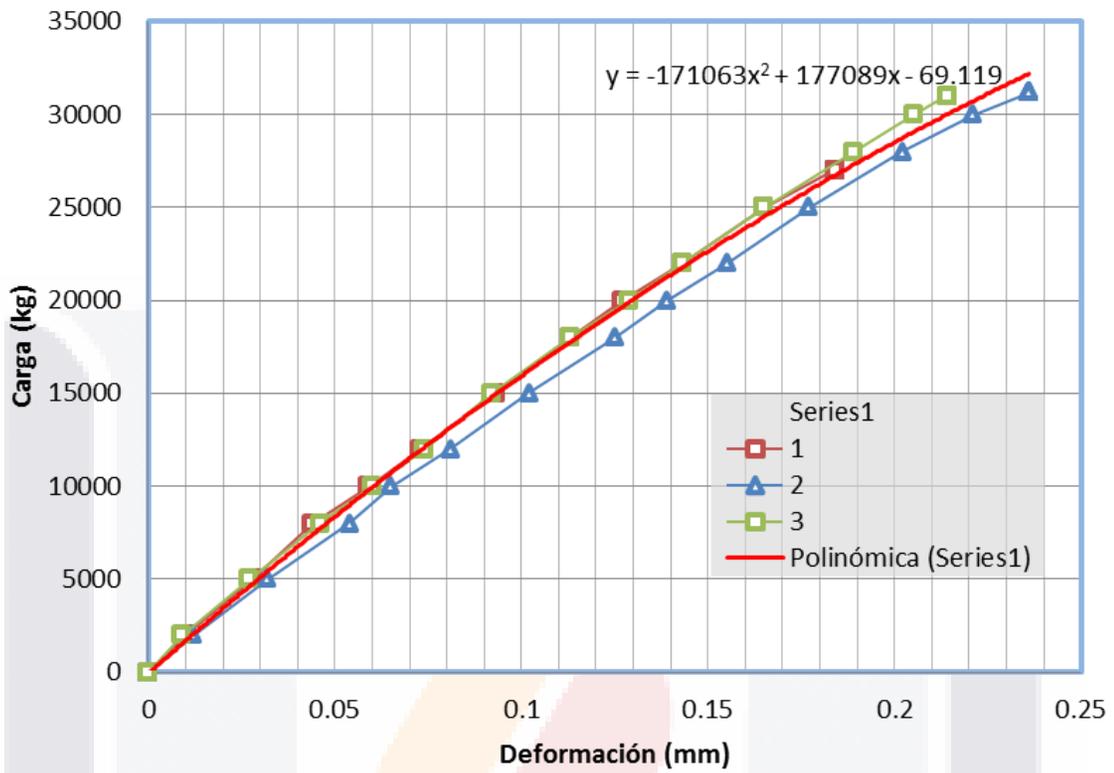


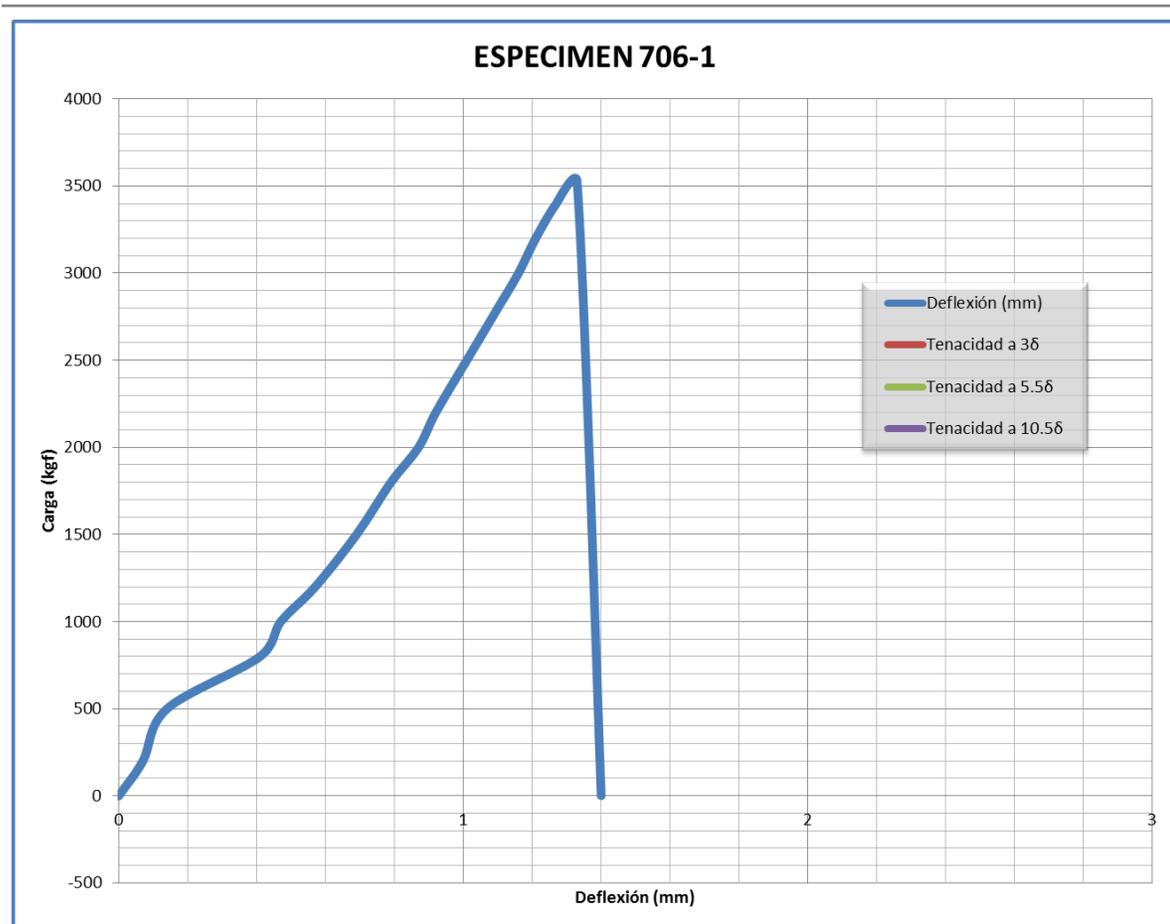
RAMGRA ONDULADA-DEFORMACIÓN LONGITUDINAL

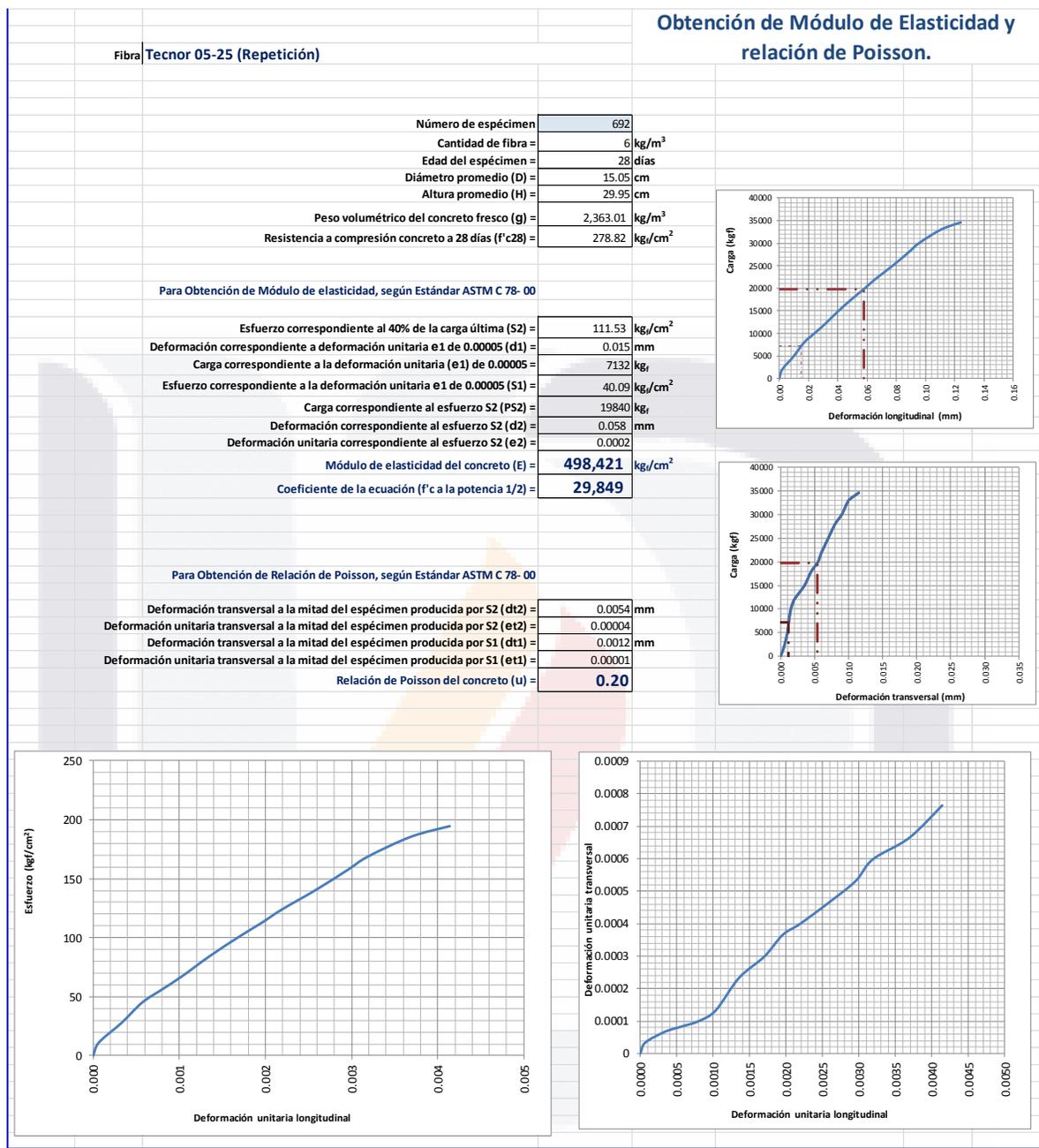




RAMGRA ONDULADA-DEFORMACIÓN VERTICAL









Fibra Tecnor 05-25 (Repetición)

Número de espécimen	693
Cantidad de fibra =	6 kg/m ³
Edad del espécimen =	28 días
Diámetro promedio (D) =	14.95 cm
Altura promedio (H) =	29.95 cm
Peso volumétrico del concreto fresco (g) =	2,358.59 kg/m ³
Resistencia a compresión concreto a 28 días (f'c28) =	311.04 kgf/cm ²

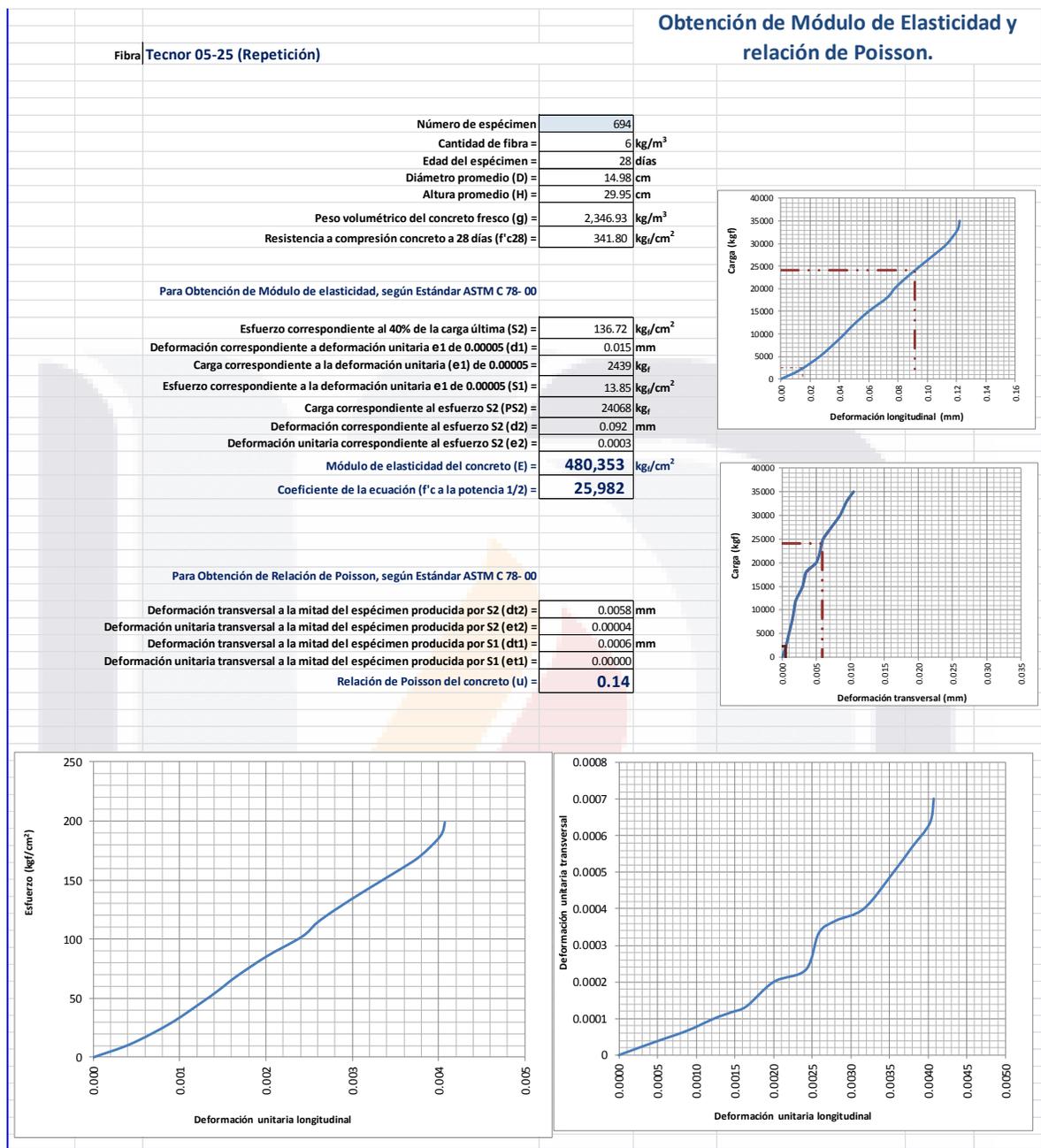
Para Obtención de Módulo de elasticidad, según Estándar ASTM C 78- 00

Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última (S2) =	124.42 kgf/cm ²
Deformación correspondiente a deformación unitaria e1 de 0.00005 (d1) =	0.015 mm
Carga correspondiente a la deformación unitaria (e1) de 0.00005 =	5893 kgf
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria e1 de 0.00005 (S1) =	33.59 kgf/cm ²
Carga correspondiente al esfuerzo S2 (PS2) =	21829 kgf
Deformación correspondiente al esfuerzo S2 (d2) =	0.069 mm
Deformación unitaria correspondiente al esfuerzo S2 (e2) =	0.0002
Módulo de elasticidad del concreto (E) =	504,470 kgf/cm²
Coefficiente de la ecuación (f'c a la potencia 1/2) =	28,604

Para Obtención de Relación de Poisson, según Estándar ASTM C 78- 00

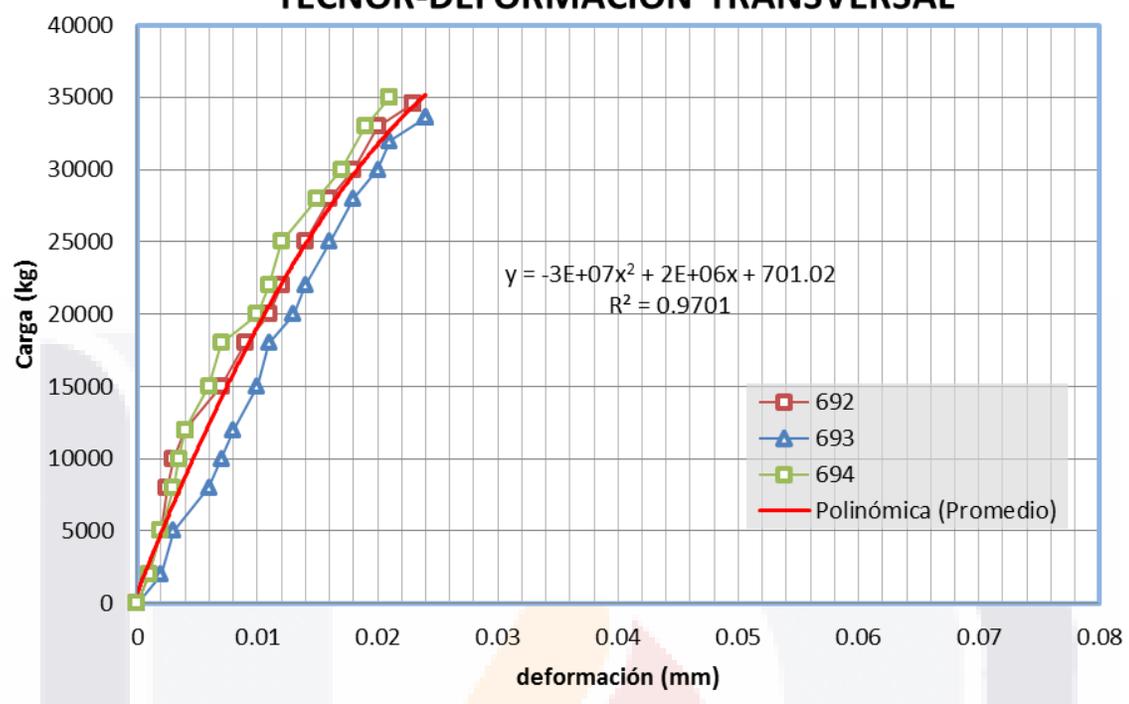
Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (dt2) =	0.0070 mm
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S2 (et2) =	0.00005
Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (dt1) =	0.0019 mm
Deformación unitaria transversal a la mitad del espécimen producida por S1 (et1) =	0.00001
Relación de Poisson del concreto (u) =	0.19

Obtención de Módulo de Elasticidad y relación de Poisson.



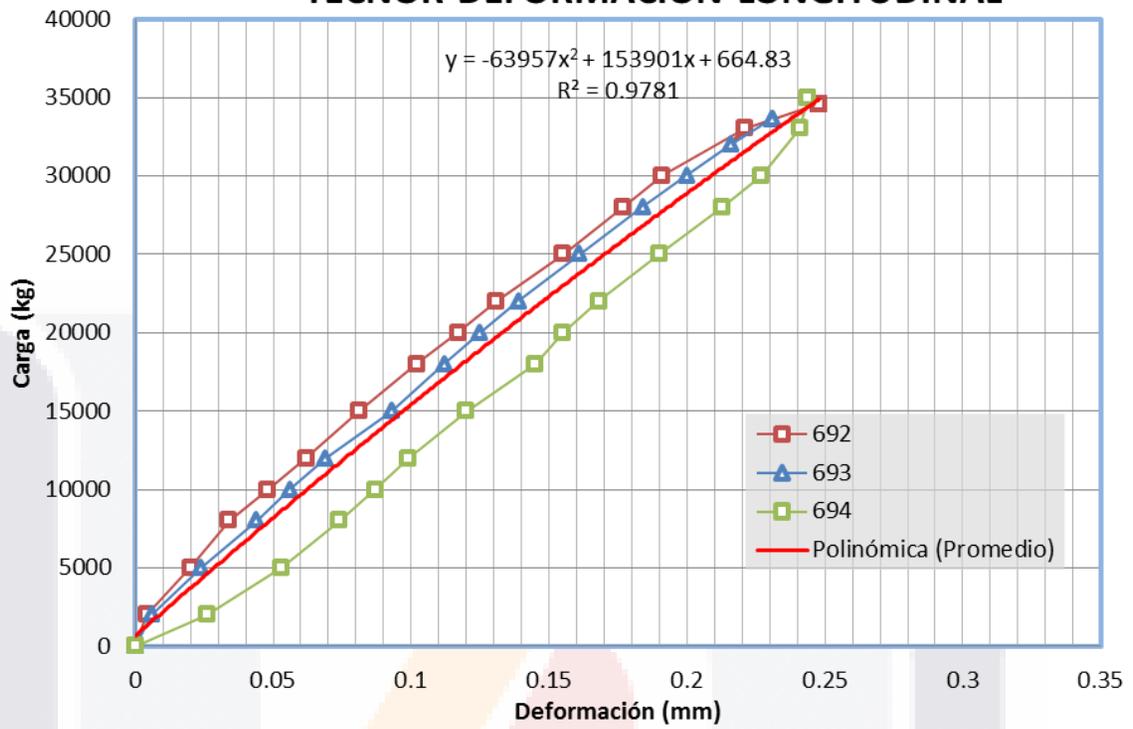


TECNOR-DEFORMACIÓN TRANSVERSAL



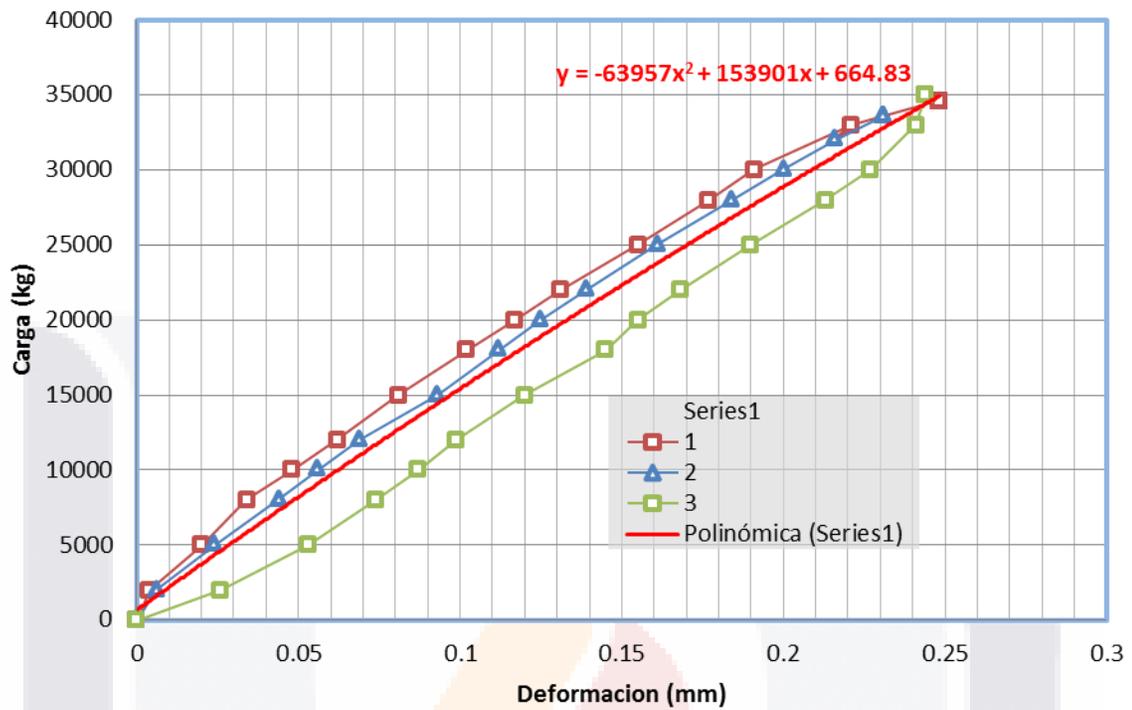


TECNOR-DEFORMACIÓN LONGITUDINAL





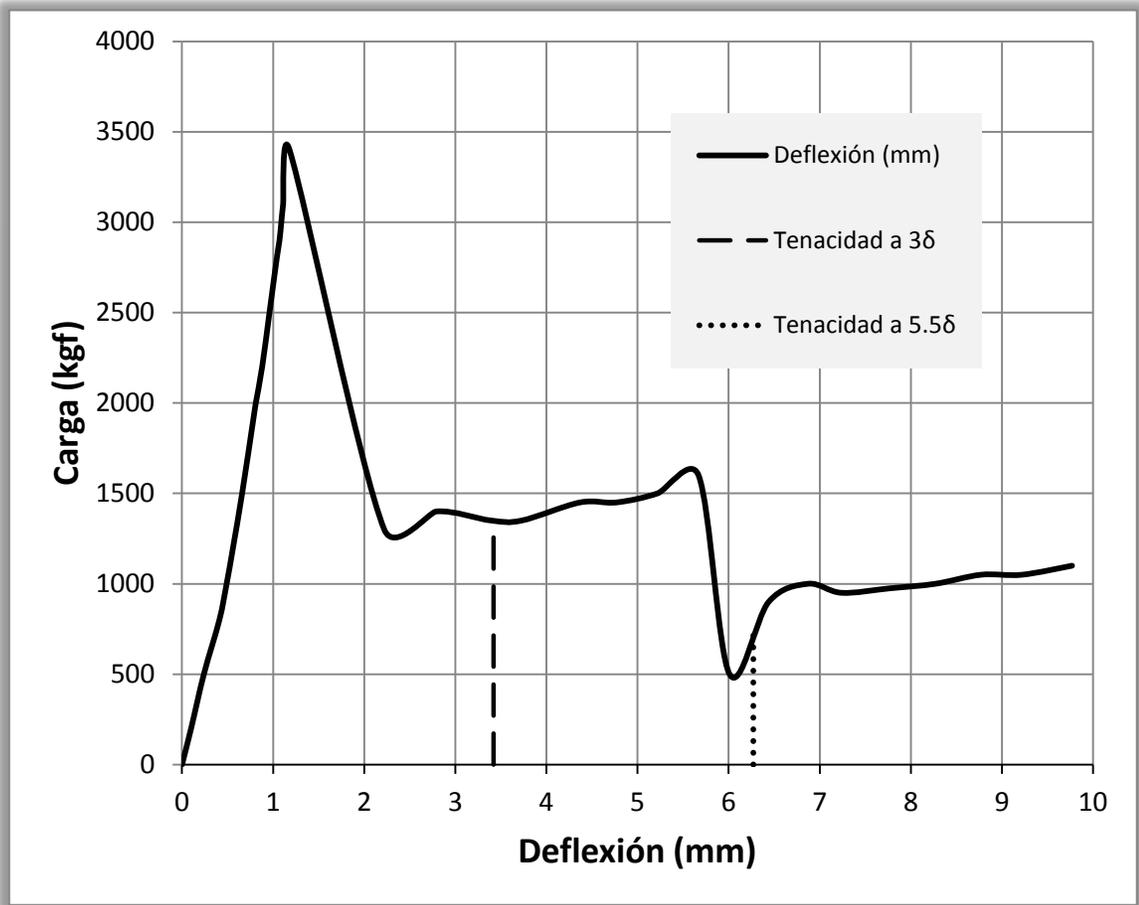
TECNOR-DEFORMACIÓN VERTICAL





ANEXOS "B"

Ejemplo de cálculo de $f_{e,3}$, del espécimen 764-3 para la fibra Dramix





ANEXOS “C”

DISEÑO DE LOSAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO		
AUTOR: Luc Lemoyne		
ARTÍCULO: STEEL FIBERS REINFORCED CONCRETE FOR SLABS ON GROUND: FROM		
EMPRESA:		
FECHA:		
Datos de entrada para el diseño		
Parámetros	Unidades	Valor
Contenido de fibra en mezcla concreto en estado fre	Kg/m ³	28
Esfuerzo por flexión del concreto obtenido (MR)	Kg/cm ²	44.967
Longitud de fibra (L)	mm	60
Diámetro de la sección de la fibra (d)	mm	0.9
Datos de Calculados		
Relación de aspecto (L/d)	66.6666667	
Datos de tabla		
Valor del esfuerzo residual bajo norma japonesa JSCE SF4	62	
Resultados		
Esfuerzo estimado por flexión del concreto reforzado con fibras de acero	72.84654	Kg/cm ²
Tablas		
Ecuaciones del diseño		
$F_d = F_{ct} * \left(1 + \frac{R_{e,3}}{100} \right)$		

Hoja de Cálculo por método JSCE-SF4



DISEÑO DE LOSAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO
AUTOR: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 360R-10
Caso 1: Aplicación cuando se tenga una carga central en la losa
Guide to Design of Slabs-on-Ground, 2010.

EMPRESA:
 FECHA:

Datos de entrada para el diseño

<i>Parámetros</i>	<i>Unidades</i>	<i>Valor</i>
Espesor del piso (h)	cm	18.6
Resistencia a compresión del concreto (f'c)	Kg/cm ²	281.22
Módulo de ruptura del concreto (MR)	Kg/cm ²	42
Módulo de elasticidad del concreto (E)	Kg/cm ²	253105
Relación de Poisson (μ)	adimensional	0.15
Módulo de reacción del suelo (K)	Kg/cm ³	2.767
Valor del esfuerzo residual bajo norma japonesa JSCE SF4 (R _{e,3})	%	0

Datos Calculados

El momento último (Mo)	2421.72	Kg-cm
------------------------	---------	-------

Ecuaciones del diseño

$$M_o = M_n + M_p = \left[1 + \frac{R_{e,3}}{100} \right] \times \frac{f_r \times b \times h^2}{6}$$

Hoja de Cálculo criterio ACI Caso Carga Central



DISEÑO DE LOSAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO
AUTOR: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 360R-10
Caso 3: Aplicación cuando se tenga una carga en el perímetro de la losa
Guide to Design of Slabs-on-Ground, 2010.

EMPRESA:
 FECHA:

Datos de entrada para el diseño

Parámetros	Unidades	Valor
Espesor del piso (h)	cm	15
Resistencia a compresión del concreto (f'c)	Kg/cm ²	281.22
Módulo de ruptura del concreto (MR)	Kg/cm ²	38.67
Módulo de elasticidad del concreto (E)	Kg/cm ²	253105
Relación de Poisson (μ)	adimensional	0.15
Módulo de reacción del suelo (K)	Kg/cm ³	2.767
Base de la placa	cm	15.24
Largo de la placa	cm	10.16
Valor del esfuerzo residual bajo norma japonesa JSCE SF4 (R _{e,3})	%	29.162

Datos Calculados

El momento último (Mo)	1450.125	Kg-cm
------------------------	----------	-------

Ecuaciones del diseño

$$M_o = M_n = \frac{f_r \times b \times h^2}{6}$$

Hoja de Cálculo criterio ACI Caso Carga en el Perímetro



DISEÑO DE PISO SIN REFUERZO			
GUIDE TO DESIGN OF SLABS-ON-GROUND (ACI 360R-10)			
CHAPTER 7, APPENDIX 1 (ACI 360R-10)			
METODO: PCA (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION)			
PROYECTO: DISEÑO DE PISO			
SETEX			
POR CARGA DEBIDA A MONTACARGAS			
Datos:			
Montacargas CAT 2PC4000 ruedas de carga sencillas			
Dimension de ruedas de carga	21"x7"X15"		
suponiendo d=	15.00	cm	5.91 in
Área de contacto rueda (o par en su caso)	180.64	cm ²	28.00 in ²
Área de contacto efectiva de una rueda	187.10	cm ²	29.00 in ²
Espacio entre rodado (S)	71.12	cm	28.00 in
Espacio entre ruedas (Sd)	-	cm	- in
Carga por eje	6.50	ton	14.33 kips

Hoja de Cálculo Método PCA para losas sin refuerzo (continúa siguiente hoja)



factor equivalente de carga	1.00	rueda sencilla		
Carga equivalente por rodado	6.50	ton	14.33	kips
Módulo de reacción del suelo (k)	3.00	kg/cm ³	108.39	lb/in ³
Material: Concreto				
Módulo de ruptura (Mr)	42.00	kg/cm ²	597.38	psi
Factor de seguridad	1.70			
Esfuerzo permisible	24.71	kg/cm ²	351.40	psi
Esfuerzo permisible/ 1000 carga simple	3.80		24.52	
Esfuerzo permisible/ 1000 carga simple	24.52	-		
Área de contacto efectiva de una rueda	29	in ²		
Espacio entre rodado (S)	28	in		
Módulo de reacción del suelo (k)	108.39	lb/in ³		
DE FIG. A1.1 ESPESOR:	15.24	cm	6.00	in
ESPESOR A UTILIZAR:	15.00	cm		

Hoja de Cálculo Método PCA para losas sin refuerzo

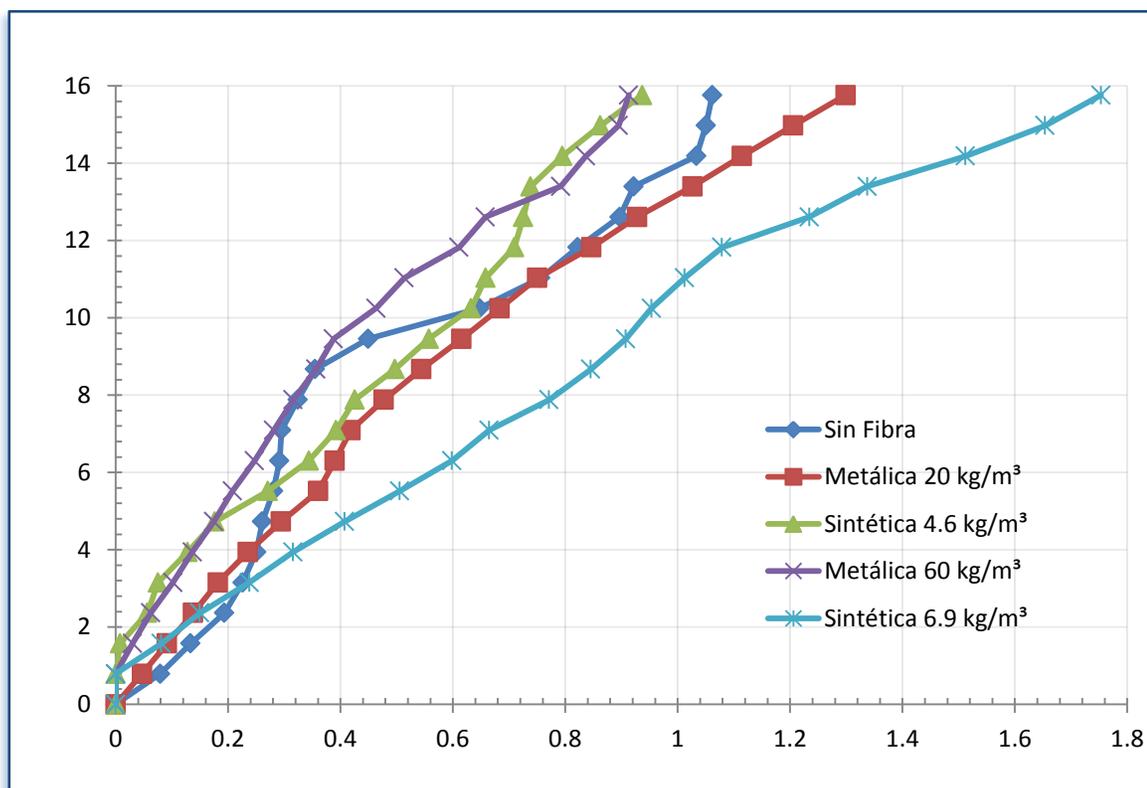


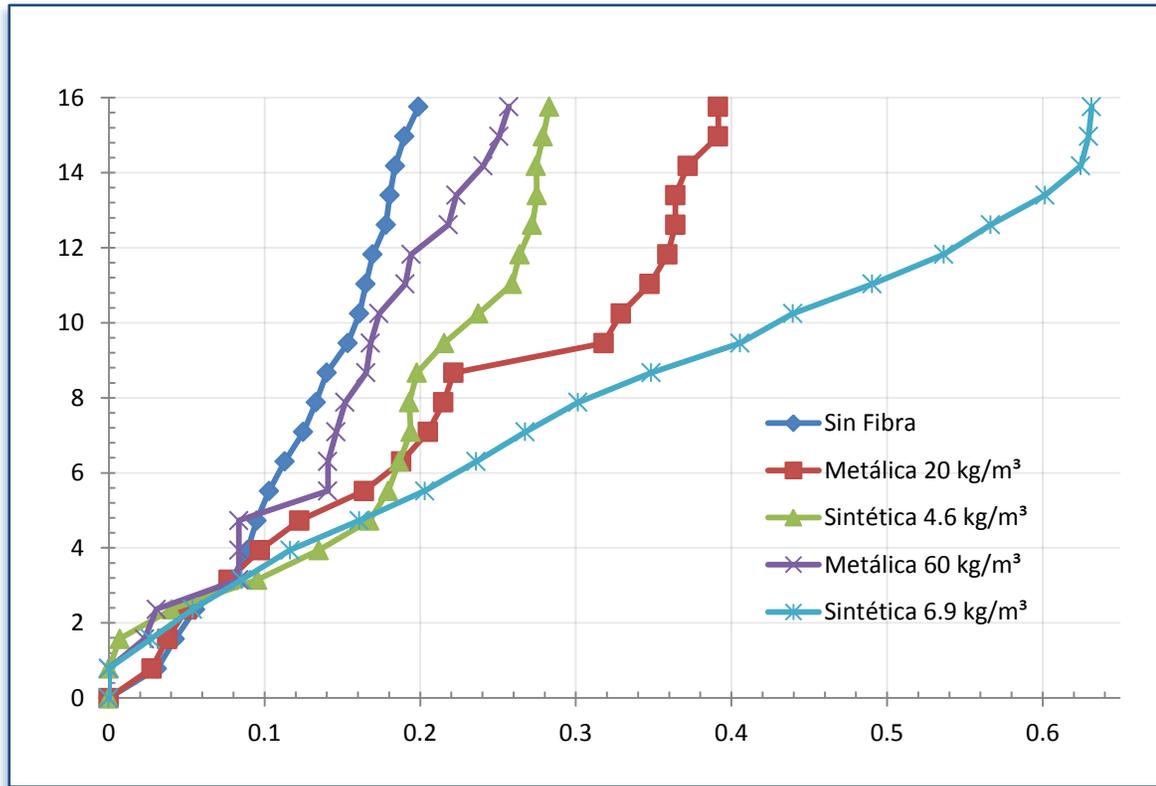
GUIDE TO DESIGN OF SLABS-ON-GROUND (ACI 360R-10)					
DISEÑO DE PISO CON FIBRAS METÁLICAS					
CHAPTER 11.3, APPENDIX 6 (ACI 360R-10)					
METODO: LINEA DE CEDENCIA					
A6.2					
h	6.00	in	15.24	cm	Espesor del piso.
f'c	4,000.00	psi	281.23	kg/cm ²	Resistencia a compresión del concreto.
f_r	550.00	psi	38.67	kg/cm ²	Módulo de ruptura del concreto.
E	3,600,000.00	psi	253,105	kg/cm ²	Módulo de elasticidad del concreto.
v	0.15				Relación de Poisson.
k	100.00	lb/in ³	2.77	kg/cm ³	Módulo de reacción del suelo.
P	15.00	kips	6,804	kg	Peso en rack
placa base 4 x 6 in					
A_{pb}	24	in ²	154.84	cm ²	Área de placa base
F.S.	1.5				factor de seguridad
La relación de rigidez relativa es dada por:					
L	28.53	in	72.48	cm	
S	6.00	in ³ /in	38.71	cm ³ /cm	Módulo de seccion del piso
El radio equivalente de contacto es el radio de un círculo con área igual a la placa base.					
a	2.76	in	7.02	cm	
Una carga concentrada aplicada a una distancia considerable de los limites del piso no deberá exceder la resistencia de carga última					
La resistencia mínima del momento flexionante (con F.S. incluido) para la carga aplicada es:					
M_p+M_n	3.14	kips.in/in	1,424.93	kg.cm/cm	
El esfuerzo debido a la contracción y alabeo puede ser substancial.					
Se escoge:	200	psi	14.06	kg/cm ²	
Momento adicional M_n	1.20	kips.in/in	544.31	kg.cm/cm	
Re₃ ≥	31.56		31.56		factor de carga residual a revisar según fabricante de fibras para determinar la cantidad de fibra en la mezcla.

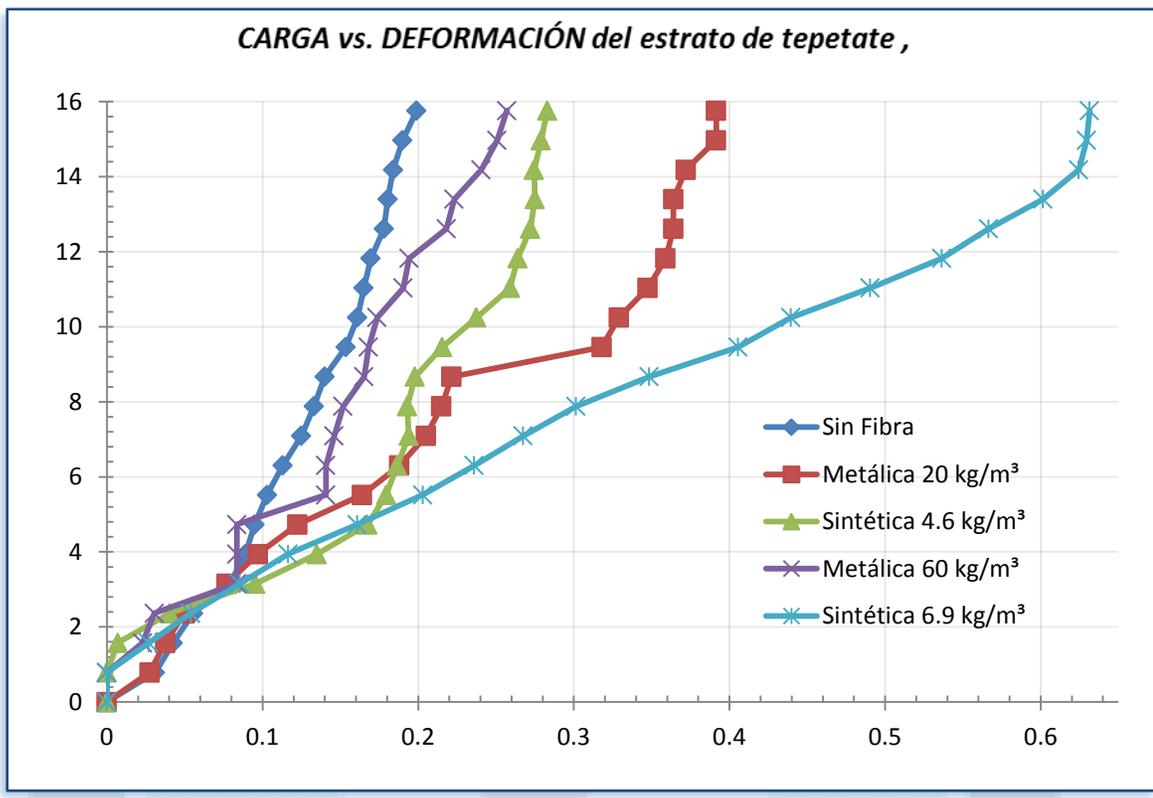
Hoja de Cálculo para diseño con fibras metálicas criterio ACI

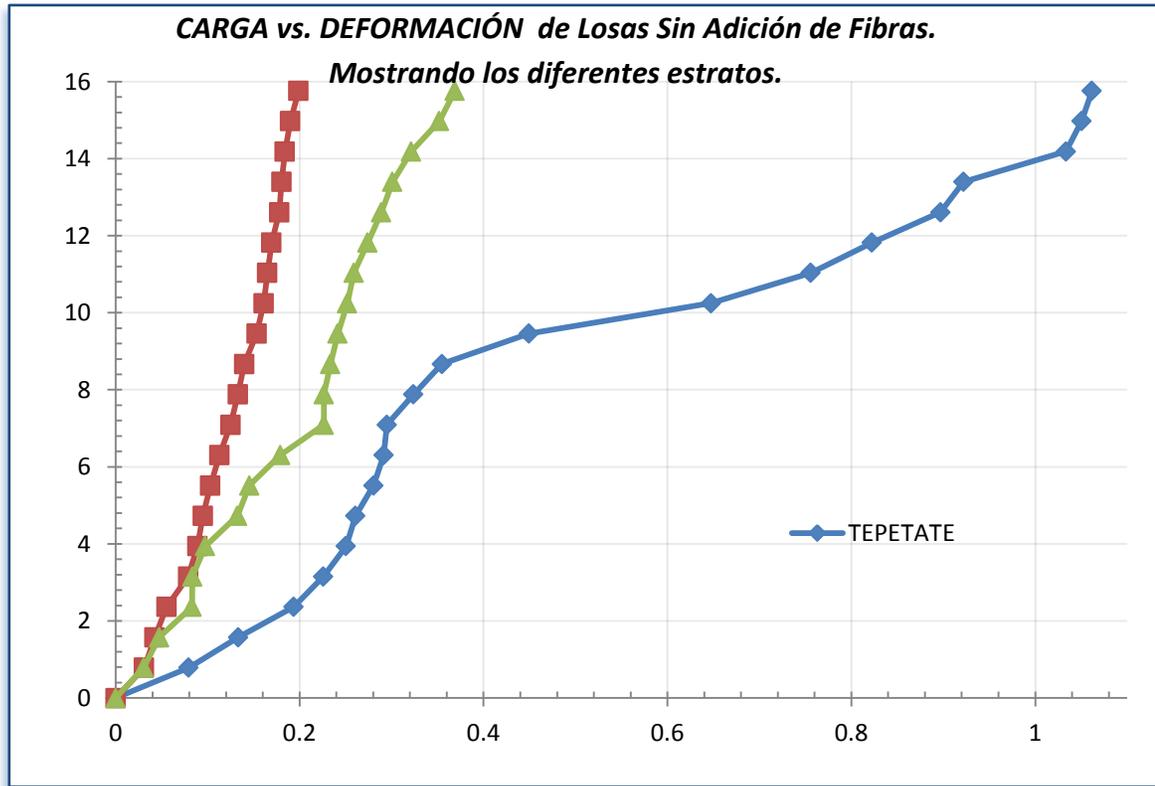


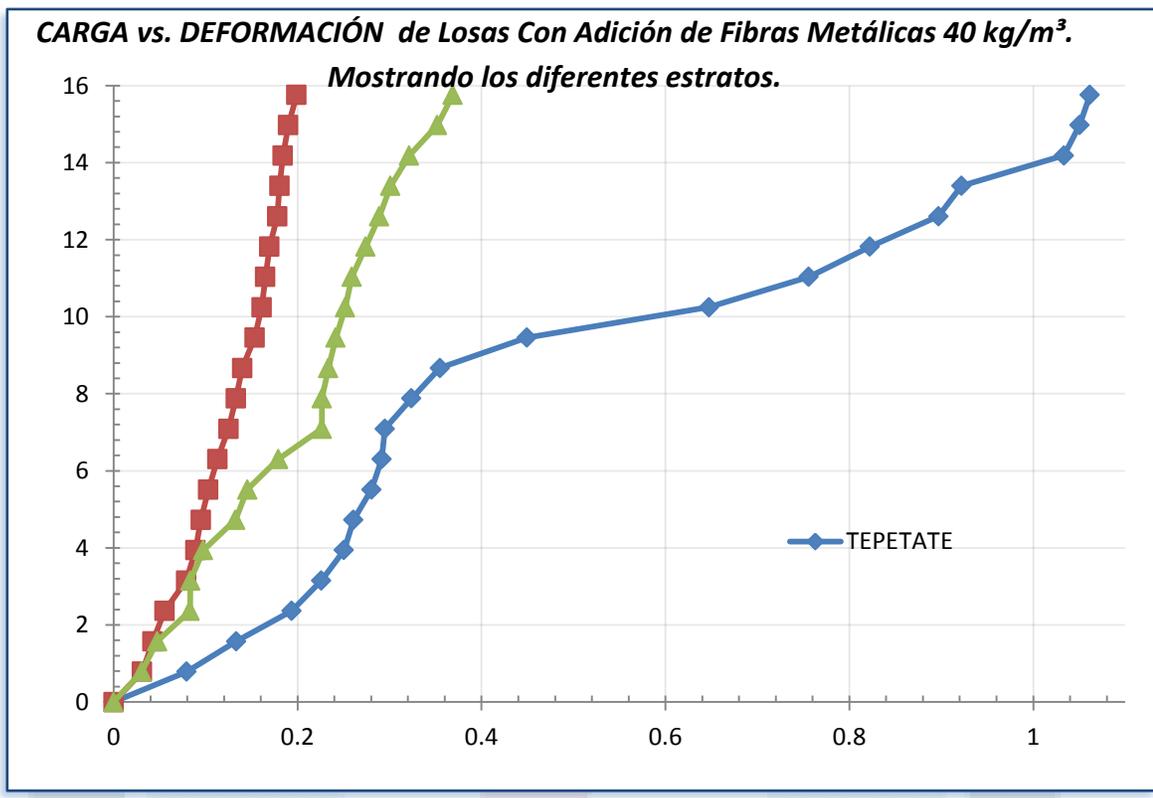
ANEXOS "D"

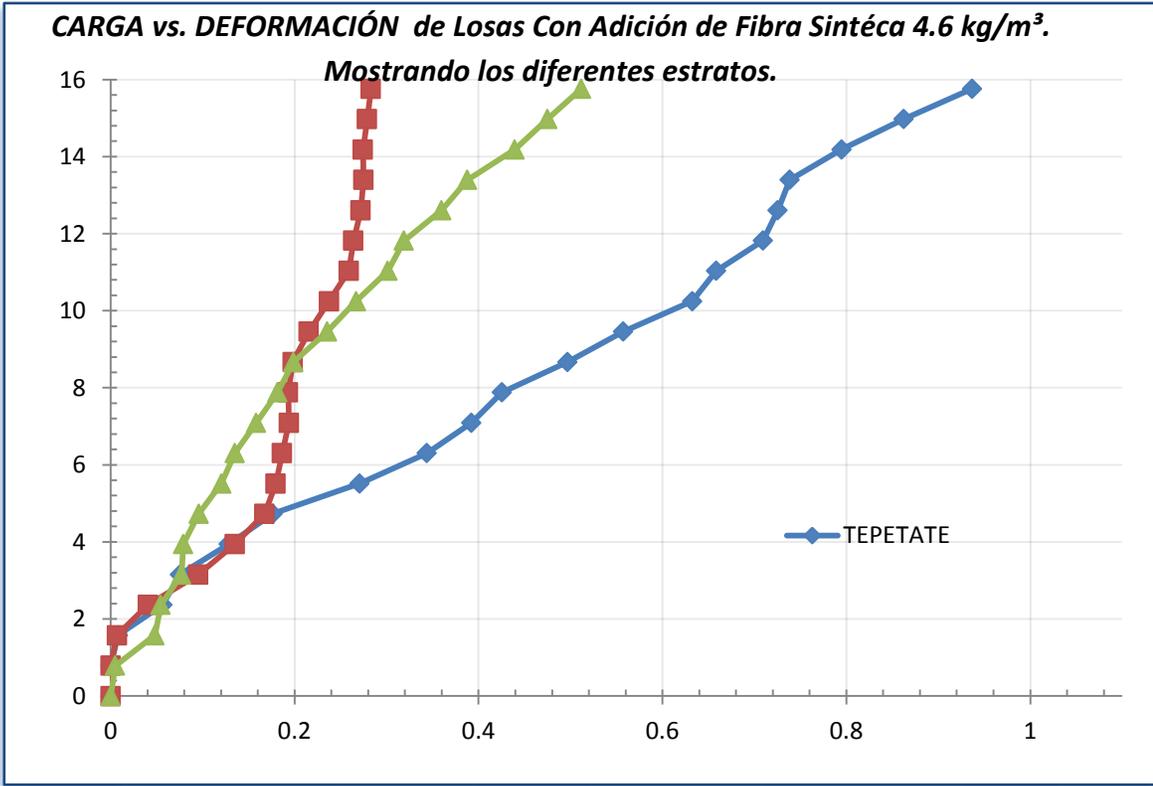


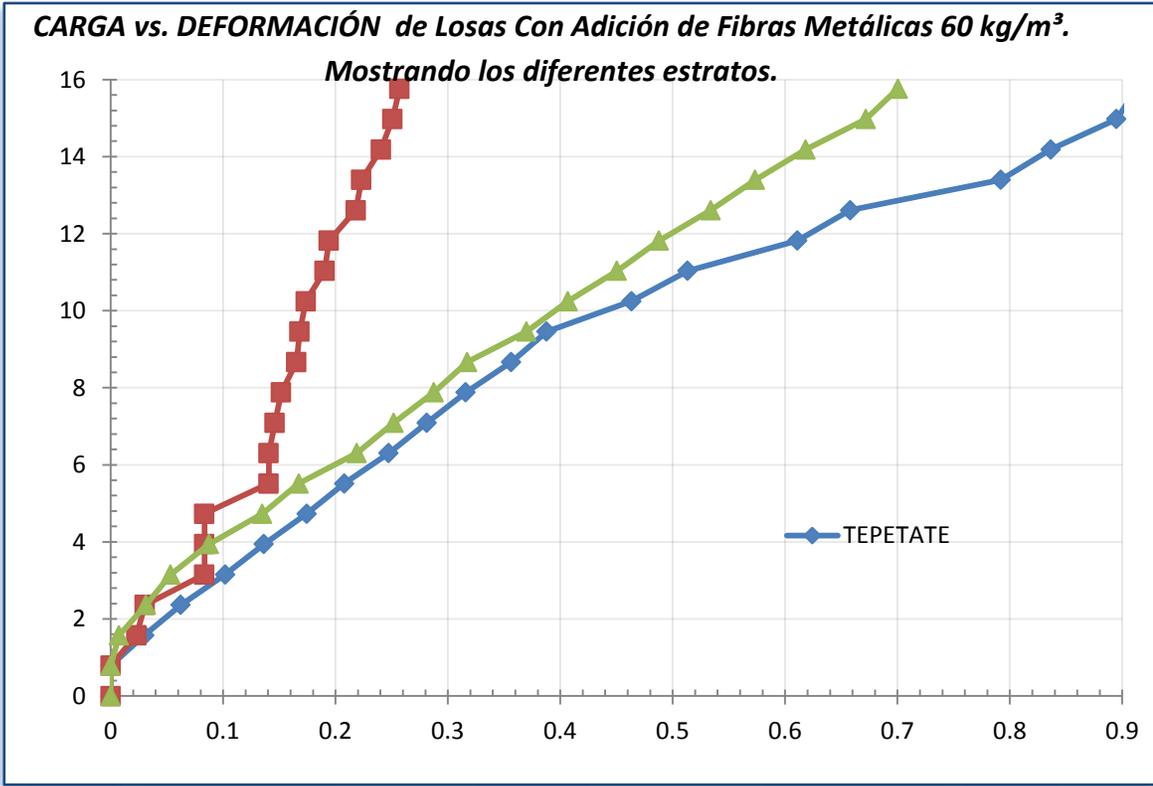


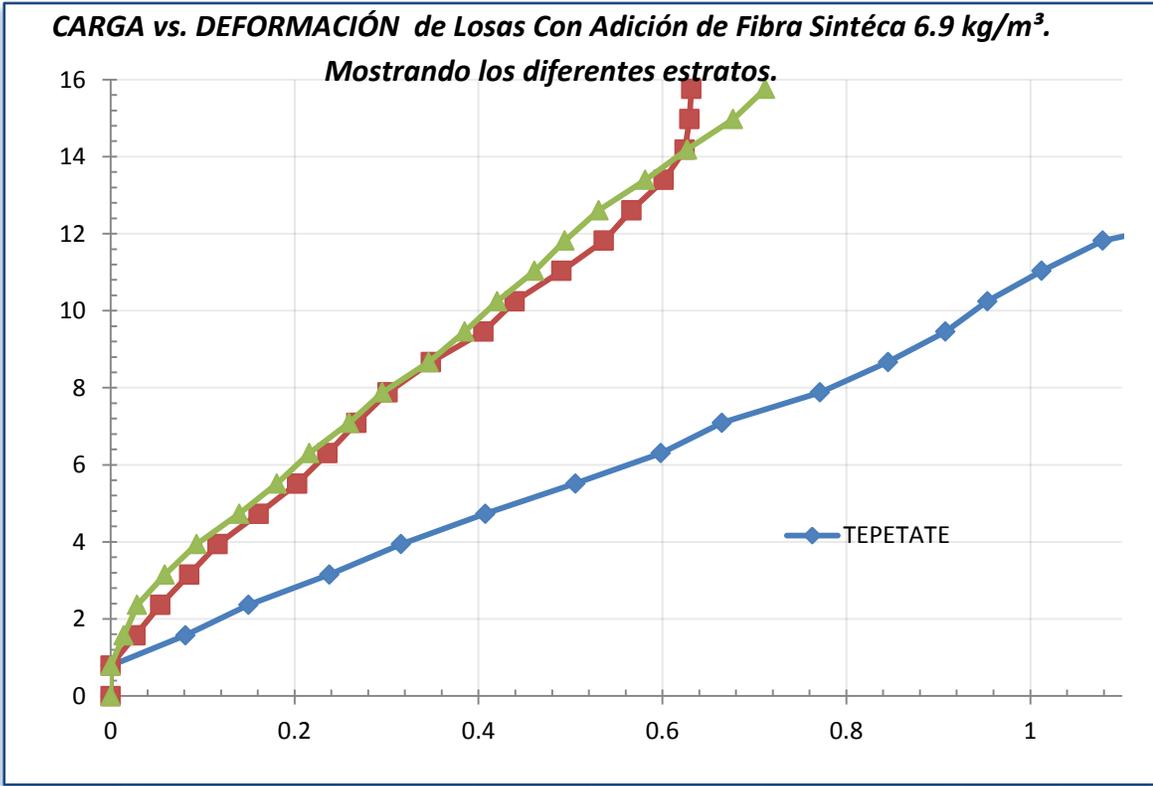














ANEXOS “E”

DEFORMACIONES MÁXIMAS

		campo	staad pro	sap2000	Promedio STAAD - SAP2000	DIF. EN %/mm
TEPETATE	losa 1	1.06175	0.96	0.9455	0.95275	11%
CEMENTO 2%	losa 2	0.6395	0.342	0.3313	0.33665	30%
CAL 2%	losa 3	0.369	0.486	0.47112	0.47856	11%
TEPETATE	losa 4	1.29	0.962	0.9472	0.9546	34%
CEMENTO 2%	losa 5	0.3915	0.363	0.331	0.347	4%
CAL 2%	losa 6	0.641	0.484	0.4721	0.47805	16%
TEPETATE	losa 7	0.895	0.972	0.9574	0.9647	7%
CEMENTO 2%	losa 8	0.25705	0.367	0.335	0.351	9%
CAL 2%	losa 9	0.7005	0.489	0.4774	0.4832	22%
TEPETATE	losa 10	0.937	0.959	0.945	0.952	1%
CEMENTO 2%	losa 11	0.283	0.362	0.331	0.3465	6%
CAL 2%	losa 12	0.477	0.482	0.4709	0.47645	0%
TEPETATE	losa 13	1.7535	0.973	0.9582	0.9656	79%
CEMENTO 2%	losa 14	0.6295	0.368	0.335	0.3515	28%
CAL 2%	losa 15	0.712	0.49	0.4778	0.4839	23%

DISPERCIÓN PROMEDIO
(SOFTWARE vs. CAMPO)

TEPETATE	26%
CEMENTO 2%	16%
CAL 2%	14%

NOTA: LAS DEFORMACIONES SON PARA UNA CARGA DE 28.83 kg/cm² EN UN ÁREA DE 547 cm².