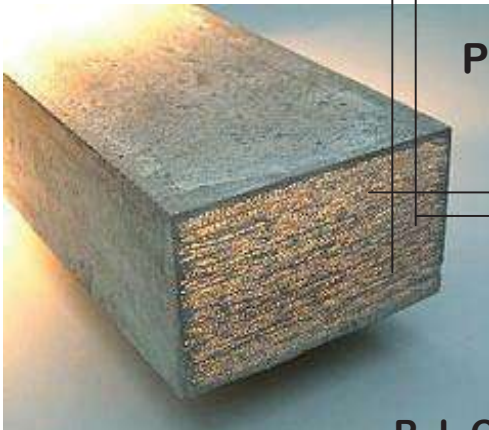


U. M. S. N. H.

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



“SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE UN COMPOSITE ELABORADO A PARTIR DE MATRICES POLIMÉRICAS INORGÁNICAS”



TESIS
Para obtener el Título de
INGENIERO CIVIL

Presenta:
P. I. C. Mario Alberto Cira González.

Asesor de Tesis:
C. DR. José Carlos Rubio Avalos.



Morelia, Mich. Enero del 2008.

INDICE

1. INTRODUCCION.....	1.
2. ESTADO DEL ARTE.....	3.
2.1. MATERIALES COMPUESTOS (COMPOSITES).....	4.
2.2. FIBRAS PARA COMPOSITES.....	5.
2.2.1. Fibras de vidrio para el reforzado de composites.....	5.
2.2.2. Producción de fibras de vidrio.....	7.
2.2.3. Estructura.....	7.
2.2.4. Propiedades y aplicaciones.....	9.
2.2.5. Fibras de carbono para el reforzado de composites.....	12.
2.2.6. Fibras de aramida para el reforzado de composites.....	13.
2.2.7. Comparación de propiedades mecánicas de fibras de carbono, aramida y vidrio para el refuerzo de materiales compuestos.....	15.
2.3. MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS.....	16.
2.3.1. Materiales Matriz para Composites reforzados con fibras.....	16.
2.3.2. Materiales compuestos reforzados con fibra.....	20.
2.4. HORMIGON.....	21.
2.4.1. El cemento Pórtland.....	25.
2.4.2. Función del yeso.....	25.
2.4.3. Tipos de cementos Pórtland.....	26.
2.5. PROBLEMAS DE LOS SULFATOS Y CLORUROS EN EL CONCRETO.....	27.
2.5.1. El proceso y sus agentes.....	29.
2.5.2. Efectos en el concreto.....	32.
2.5.3. Efectos en el acero de refuerzo.....	33.

2.5.4. Incidencia del agrietamiento.....	34.
2.5.5. Durabilidad del concreto.....	37.
2.5.6. Potencial de cloruros en el aire.....	38.
3. SINTESIS DEL COMPOSITE INORGANICO.....	40.
4. PROPIEDADES FISICAS.....	41.
4.1. Prueba de flamabilidad.....	43.
4.2. Densidad (peso/volumen).....	44.
4.3. Absorción.....	45.
4.4. Granulometrías.....	46.
5. PROPIEDADES MECANICAS.....	47.
5.1. Esfuerzo de compresión.....	66.
6. PROPIEDADES MICROESTRUCTURALES.....	69.
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71.
8. BIBLIOGRAFIA.....	73.

1. INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN.

Un material compuesto o composite es una combinación de dos ó más constituyentes los cuales se dividen desde el punto de vista de la ingeniería en: micro estructural o macro estructural un ejemplo del micro estructural es una aleación entre metales en donde sus constituyentes solo pueden ser observados desde un microscopio óptico, a diferencia del macro estructural como el hormigón en el cual sus constituyentes son apreciables a simple vista.

El hormigón es el material compuesto más empleado en la actualidad en el campo de la ingeniería por su buen comportamiento en condiciones normales pero cuando es sometido a situaciones extremas como el ataque de cloruros y sulfatos presenta agrietamiento y transformación en su estructura molecular por esa razón se han realizado diferentes investigaciones con el fin de disminuir los problemas del hormigo, también se han desarrollado nuevos materiales compuestos los cuales tienen mejores propiedades que el hormigón tal es el caso del composite desarrollado en este artículo.

Una de las maneras para aumentar la resistencia del composite es agregando fibra de vidrio, basáltica, aramida, carbono (FC), entre otras. En el caso del composite inorgánico desarrollado, se utilizaron dos tipos: Fibra de vidrio y fibra basáltica.

Después de tiempo de investigación para desarrollar la síntesis del composite inorgánico se obtuvieron buenos resultados ya que se llegó a la estabilización entre la solución, agregado y fibra.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. MATERIALES COMPUESTOS (COMPOSITES)

¿Qué es un material compuesto? Desafortunadamente no existe una definición que sea ampliamente aceptada sobre lo que es un material compuesto. El diccionario define un compuesto como algo constituido de distintas partes (o constituyentes). A nivel atómico, algunos materiales poliméricos y aleaciones metálicas pudieran ser considerados materiales compuestos puesto que constan de diferentes y distintas agrupaciones de átomos. A un nivel micro estructural (alrededor de 10^{-4} a 10^{-2} cm.) una aleación metálica tal como un acero al carbono ordinario conteniendo ferrita y perlita pudiera ser llamado material compuesto, puesto que ferrita y perlita son constituyentes distinguibles a simple vista con sólo observarles en un microscopio óptico. A nivel macro estructural (alrededor de 10^{-2} cm. o superiores) un plástico de fibra de vidrio reforzado, en el que las fibras de vidrio se pueden reconocer a simple vista, pudiera ser considerado un material compuesto. Con esto, vemos que la dificultad en definir un material compuesto radica en las limitaciones de tamaño que imponemos a los componentes de los que está hecho el material. En ingeniería de diseño se entiende normalmente por material compuesto aquel material formado por constituyentes en el rango de tamaño micro a macro, e incluso favoreciendo el rango del macro tamaño, la siguiente es una definición idónea de material compuesto:

Un *material compuesto* es un sistema material integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macro constituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre si.

La importancia que, bajo el punto de vista de la ingeniería, tienen materiales compuestos es que dos o más materiales distintos se combinan para formar un material compuesto con propiedades superiores o, en algún modo, más importantes que las de sus componentes considerados individualmente. Dentro de esta categoría sólo trataremos de los más importantes materiales compuestos usados en ingeniería, como los composites reforzados con fibra, el hormigón el asfalto, la madera, y diversos tipos de materiales compuestos.¹

2.2. FIBRAS PARA COMPOSITES

Son tres los tipos de fibras sintéticas que, fundamentalmente, se utilizan en para reforzar composites: el vidrio, la aramida, y el carbono. El vidrio es, con mucho, la fibra más utilizada para el refuerzo de composites siendo además la de más bajo precio. La aramida y el carbono son fibras consistentes y de baja densidad, por lo que tienen múltiples aplicaciones particularmente en el ámbito aerospacial, a pesar de su elevado precio.

La fibra de aramida es un polímero aromático de poliamida con una estructura molecular muy rígida.²

2.2.1. Fibras de vidrio para el reforzado de composites

Fibras de vidrio Las fibras de vidrio se usan para reforzar composites y así formar compuestos estructurados y productos moldeados. Los composites reforzados con fibra de vidrio, tienen las siguientes características: buena relación resistencia/peso, buena estabilidad dimensional, buena resistencia al calor, al frío, a la corrosión y a la humedad; buenas propiedades aislantes de la electricidad, fáciles de fabricar y relativamente baratos.

Las plantas modernas producen fibras de vidrio directa por el dibujo. En las imágenes se muestran algunas formas en las que la fibra de vidrio está disponible en el comercio.²



Fig. 1⁵

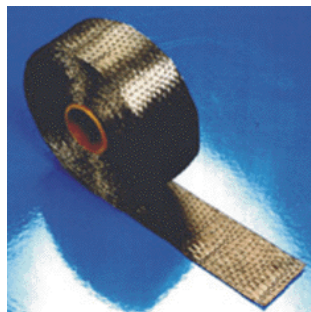


Fig. 2⁶



Fig. 3⁷



Fig. 4⁸

Fig. 1. *Carretes de Fibra de Vidrio*, Fig. 2. *FC en la presentación de cinta*, Fig. 3 *es un textil que combina Fibra de Vidrio y FC* y la Fig. 4 *es Fibra Basáltica con una presentación de carrete.*

2.2.2. Producción de fibras de vidrio

Las fibras de vidrio se producen mediante el estirado de mono filamentos de vidrio que provienen de un horno que contiene vidrio fundido; reuniendo un elevado número de esos filamentos se forma un cordón de fibras de vidrio. Los cordones son posteriormente utilizados para hacer hebras de fibra de vidrio o mechas que constan de una colección de haces e filamentos continuos. Las mechas pueden darse en forma de cordones continuos o entretejidos para formar mechas urdidas. Las mallas para reforzar las fibras están hechas de cordones continuos o cortados. Dichos cordones están generalmente unidos por una sustancia resinosa. Las mallas combinadas están hechas con mechas entrelazadas químicamente enlazadas a las mallas de cordones cortados.

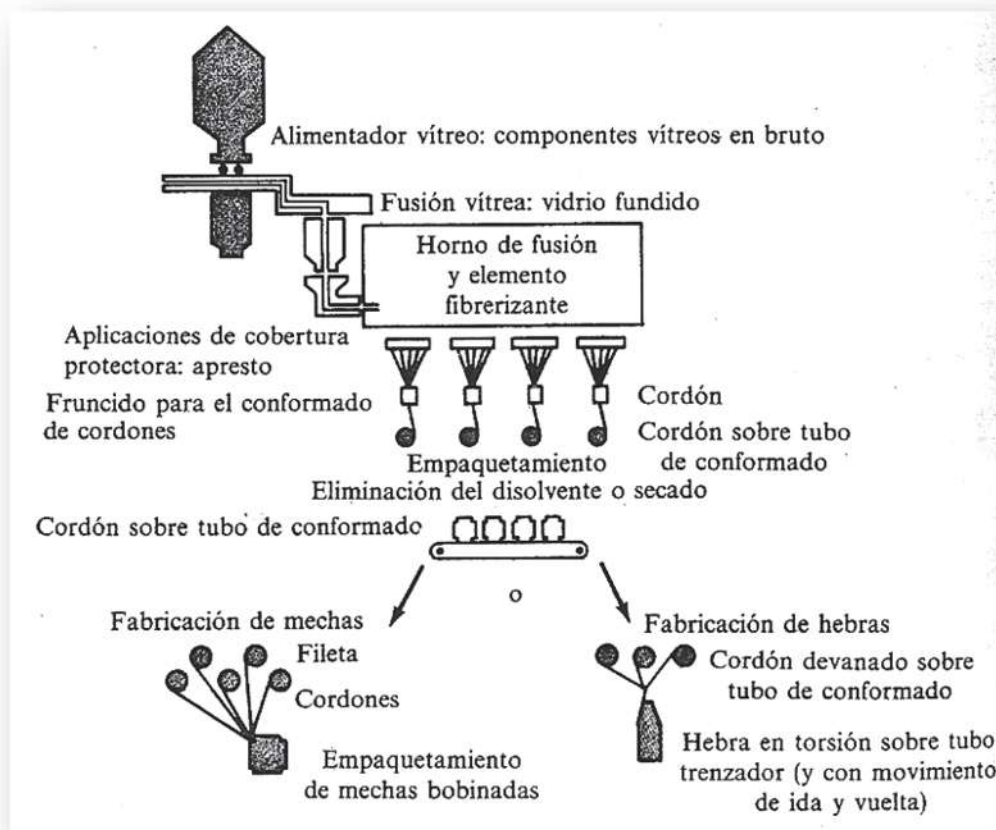


Fig. 5 *Procesos para la elaboración de la fibra de vidrio.*¹

Filamentos de vidrio son fácilmente dañados por la introducción de defectos superficiales. Para minimizar este y para hacer la manipulación fácil de estas fibras, un se

da un trato dimensionado. El tamaño, o de revestimiento, protege y ata a los filamentos en un soporte. ¹

2.2.3. Estructura

Inorgánicos, vidrios base-sílice son análogos a los polímeros orgánicos vidriosos en el sentido de que son amorfos, i.e., carente de cualquier orden de largo alcance que es característica de un material cristalino. Sílice cristalino puro se funde a 1800 ° C.

Sin embargo, mediante la adición de algunos óxidos metálicos, podemos romper el enlace Si-O y obtener una serie de vidrios amorfos con temperatura baja de transición vítrea. Figura (a) muestra una red de dos dimensiones de vidrio de sílice. Cada poliedro se compone de átomos de oxígeno enlazados covalente al silicio. ¿Qué sucede con esta estructura cuando Na₂O se añade a la estructura de vidrio? se muestra en la Figura (b), iones Sodio están vinculados con oxígeno pero no unirse a la red de baldosas directamente. Demasiado Na₂O deteriorará la tendencia para la formación vidriosa de la estructura. La adición de otros tipos de óxido de metal sirve para modificar la estructura de red y la vinculación, por lo tanto, las características. Observe el isotrópico, en tres dimensiones de la estructura de la red de vidrio; Esto lleva más o menos a las propiedades isotrópicas de las fibras de vidrio. Esto es, para la fibra de vidrio, el módulo de Young y coeficientes de expansión térmica son los mismos a lo largo de la fibra y el eje perpendicular a ella. Esto es a diferencia de muchas otras fibras, como la aramida y carbono, que son altamente anisotrópicas.²

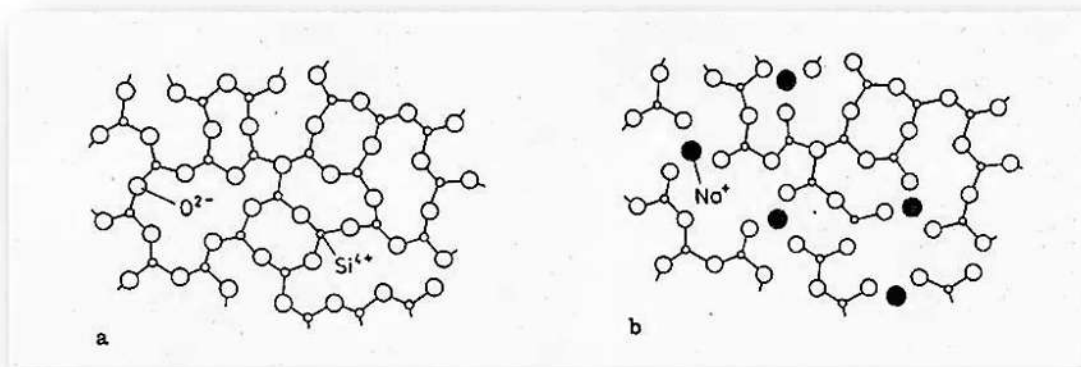


Fig. 6. Estructura amorfa del cristal: (a) una representación de dos dimensiones de la red de cristal del silicio y (b) una red modificada es el resultado cuando Na₂O se agrega a (a).

Observe que el ion Na está ligado a O²⁻ pero no ensambla la red directamente.²

2.2.4. Propiedades y aplicaciones

Las dos clases más importantes de vidrio utilizadas para fabricar fibras para materiales compuestos son los *vidrios E (eléctricos)* y los *vidrios S (de alta resistencia)*.

Los *vidrios E* son de utilización más común en la fabricación de fibras continuas. Básicamente, el vidrio *E* es un vidrio boro-silicato de aluminio y calcio con contenidos de potasio y sodio muy próximos o iguales a cero. La composición básica de los vidrios E es de un 52-56 por 100 de

SiO_2 , un 12-16 por 100 de Al_2O_3 , un 16-25 por 100 de CaO y un 8-13 por 100 de B_2O_3 . El vidrio E posee una resistencia a la tensión en torno a los 500 ksi (3,44 GPa) en estado virgen y un módulo de elasticidad de 10.5 Msi (72.3 GPa).

El *vidrio S* tiene una relación resistencia/peso más alta y es más caro que el vidrio E; se utiliza fundamentalmente para aplicaciones aeroespaciales y militares. La resistencia a la tensión del vidrio S está por los 650 ksi (4,48 GPa), su módulo de elasticidad está sobre los 12,4 Msi (85,4 GPa). Una composición usual del vidrio S es aproximadamente del 65 por 100 en SiO_2 , el 25 por 100 en Al_2O_3 y el 10 por 100 en MgO .

Tenga en cuenta que la densidad es muy baja y la fuerza es bastante alta; El módulo de Young, sin embargo, no es muy alto. ²

Density (g cm^{-3})	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Coefficient of thermal expansion (K^{-1})
2.55	1750	70	4.7×10^{-6}

Fig. 7. *Propiedades mecánicas típicas de las fibras de vidrio E.*²

Así, mientras la fuerza y peso de las fibras de vidrio es muy alta, el módulo y peso es sólo moderado. Es esta última característica la que llevó a la industria aeroespacial a otras supuestas fibras avanzadas (por ejemplo, boro, carbono, Al_2O_3 , y SiC). Las fibras de vidrio se siguen utilizando para el refuerzo de poliéster, epoxi, y resinas fenólicas. Es bastante barato, y se encuentra disponible en una variedad de formas. Los filamentos

continuos son un grupo de 204 fibras individuales; un cordón es un grupo de filamentos paralelos; Las fibras tajadas consisten en el filamento o cordón tajado a las longitudes entre 5 y 50 milímetros. Las fibras de vidrio también están disponibles en la forma de telas tejidas o de esteras no tejidas.

La humedad disminuye la fuerza de fibra de vidrio. Las fibras de vidrio son también susceptibles a lo que se denomina fatiga estática; Es decir, cuando estén sometidas a una carga constante durante un largo período de tiempo, las fibras de vidrio pueden sufrir crecimiento de grieta subcritical. Esto conduce a la falla en un cierto plazo en las cargas que pudieron ser seguras, al considerar carga instantánea.

Resinas reforzadas de fibra de vidrio son ampliamente utilizados en la construcción y la industria de la construcción. Normalmente, estos son llamados de vidrio reforzado de plástico, o GRP. Se utilizan en forma de revestimiento de otros materiales estructurales o como parte integrante de una estructurales o no con capacidad de carga del panel de pared; Marcos de las ventanas, tanques, unidades de baño, tuberías, conductos, son ejemplos comunes. Cascos de barco, desde mediados de los 1960s, han sido principalmente de GRP. El uso de GRP en la industria química (por ejemplo, como tanques de almacenamiento, los gasoductos, y el proceso de buques) es bastante habitual. El ferrocarril y el transporte por carretera y la industria aeroespacial industria son otros grandes usuarios de GRP. ¹

2.2.5. Fibras de carbono para el reforzado de composites

Las fibras de carbono o fibras de carbón (**FC**) son sólidos que presentan una morfología fibrosa en forma de filamentos, o una trenza de éstos, y con un contenido mínimo en carbono del 92 % en peso. Las FC se obtienen por carbonización (1200–1400 °C) de fibras orgánicas naturales o sintéticas, o de fibras procedentes de precursores orgánicos. En la mayoría de los casos, las fibras de carbono permanecen como carbón no grafitico. Por tanto en término de fibras de grafito solo está justificado cuando las fibras de carbono (siempre y cuando sean grafitizables) han sido sometidas a un tratamiento térmico de grafitización (2000–3000 °C) que les confiere un orden cristalino tridimensional que puede observarse mediante difracción de rayos X.

Las primeras fibras de carbono utilizadas industrialmente se deben a Edison, el cual preparó fibras de carbono por carbonización de filamentos de fibras de bambú (celulosa) y fueron utilizadas en la preparación de filamentos para lámparas incandescentes. Con posterioridad habría que esperar hasta 1960 hasta que *Union Carbide* desarrollo un procedimiento industrial de obtención de fibras continuas de carbono de alto módulo de Young a partir de fibras de rayón. En 1966 fibras de carbono de alto módulo y tensión de ruptura fueron obtenidas a partir de fibras de PAN (poliacrilonitrilo). En esta época también se desarrollaron FC obtenidas a partir de breas de carbón y petróleo y de resinas fenólicas, sin embargo estas FC presentan propiedades mecánicas inferiores y se comercializan como fibras de carbono de uso general. En los años 1980s se preparan FC a partir de breas de meso fase de ultra-alto módulo que se utilizan en un número limitado de aplicaciones que requieren fibras de muy altas prestaciones.

Aunque existe una gran variedad de FC basadas en los distintos precursores, procesos químicos y tecnológicos, su preparación conlleva las siguientes etapas comunes:

- (I) Hilado de las fibras a partir de una disolución o fundido:
- (II) Estabilización de las fibras hiladas mediante pre-oxidación o estabilización térmica, para evitar que la fibra se funda en el posterior proceso de carbonización
- (III) Carbonización en atmósfera inerte (1200 – 1400 °C).

Con estas etapas se obtienen las denominadas fibras de carbono de uso general (FCUG). Para obtener fibras de carbono de altas prestaciones (FCAP), fibras de carbono conductoras (FC) o fibras de grafito (FG) es necesario someter las FC a tratamientos térmicos adicionales a temperaturas que pueden variar entre los 2000 y los 3000 °C.

En muchos casos también es necesario someter las fibras a un tratamiento superficial (generalmente de oxidación que generan grupos superficiales oxigenados en la superficie de las fibras que aumentan su mojabilidad) para mejorar la adhesión a la matriz.

Atendiendo a sus propiedades mecánicas las FC pueden clasificarse en:

Fibras de ultra alto módulo (UHM). Son aquellas que presentan un módulo de elasticidad superior a los 500 Gpa (i.e. < 50% del módulo elástico del monocristal de grafito, 1050 Gpa).

Fibras de alto módulo (HM). Presentan un módulo de elasticidad superior a 300 Gpa, pero con una relación resistencia a la tracción/módulo de tensión menor del 1%.

Fibras de alta fuerza (HT). Presentan valores de resistencia a la tensión superiores a 3 Gpa y con relaciones resistencia a la tracción/módulo de 0.015-20.

Fibras de módulo intermedio (IM). Presentan valores del módulo de tensión superiores a 300 Gpa y relaciones de resistencia a la tracción/módulo del orden de 0.01.

Fibras de bajo módulo. Son FC de estructura isótropa, con valores bajos del módulo y resistencia a la tensión. Se comercializan como fibras cortas.

En relación a los precursores utilizados para la obtención de FC las más importantes son: Fibras de carbono a partir de rayón; Fibras de carbono a partir de PAN (poliacrilonitrilo), hoy en día este es el precursor más importante para la fabricación de FC y del que se obtienen la mayoría de las fibras industriales; Fibras de carbono a partir de breas.

Las fibras de carbono activadas, se obtienen mediante carbonización y activación física o química de distintos precursores (breas, rayón, poliacetatos, resinas fenólicas, etc.). Se caracterizan por presentar una gran superficie específica, tamaño de poros muy uniforme y velocidades de adsorción/desorción unas 100 veces superior a la de los carbones activos. Estas fibras también se pueden obtener en forma de telas o fieltros.

Otro tipo de fibras que difiere de las anteriores en cuanto a sus características y método de obtención son las fibras de carbono crecidas en fase de vapor (*vapour ground carbon fibres* VGCF). Estas fibras se obtienen mediante un proceso catalítico de depósito químico en fase de vapor. Aunque de tamaño mucho menor que las anteriores, estas FC presentan una gran variedad de tamaños que van desde unos pocos centímetros hasta las micro y nanofibras.

Las FC presentan un amplio rango de estructuras en lo que se refiere a la orientación de los planos gráficos tanto en la dirección del eje de la fibra como perpendiculares a éste.²

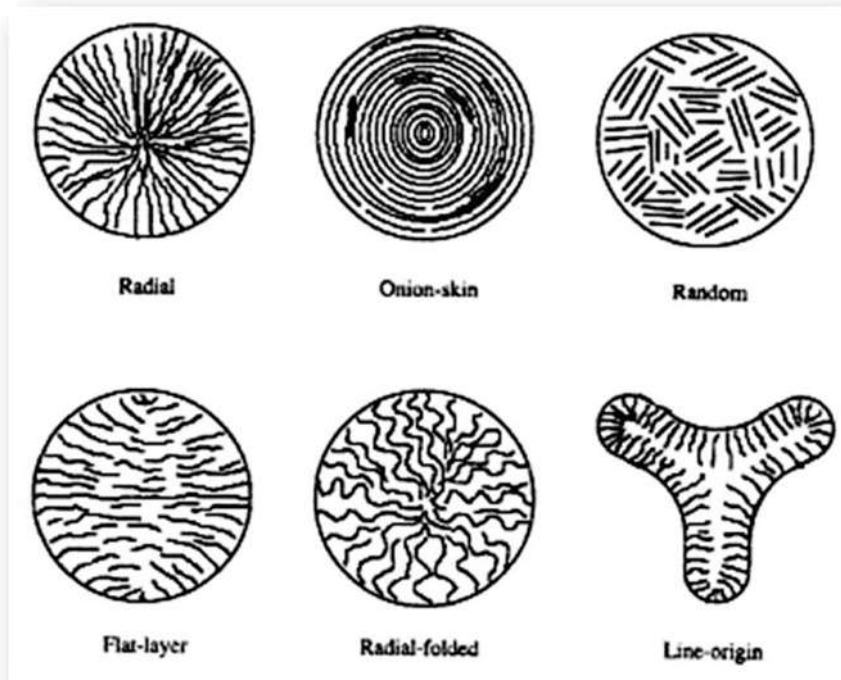


Fig. 8. Algunas estructuras presentadas por las fibras de carbono.²

2.2.6. Fibras de aramida para el reforzado de composites

Fibra de aramida es el nombre genérico de las fibras de poliamida aromáticas. Fueron introducidas comercialmente en 1972 por Du Pont bajo el nombre comercial de Kevlar, y hoy en día existen dos tipos en el mercado: el Kevlar 29 y el Kevlar 49. El primero es de baja densidad y alta solidez y ha sido especialmente diseñado para aplicaciones tales como protección en balística, cuerdas y cables. El Kevlar 49 se caracteriza por tener baja densidad, alta solidez y alto módulo. Las propiedades del Kevlar 49 hacen a su fibras muy útiles para el refuerzo de plásticos en compuestos de interés espacial, en marina, en automoción y otras aplicaciones industriales.

La unidad química que se repite en la cadena del Kevlar es la de una poliamida aromática, mostrada en la Figura 13.7. Los enlaces de hidrógeno mantienen unidas las cadenas poliméricas en posición transversal. Por consiguiente, este tipo de fibras tiene mayor solidez en dirección longitudinal que en dirección transversal. La estructura de anillo aromático proporciona una mayor rigidez a las cadenas poliméricas, haciendo que éstas exhiban una estructura a modo de barra.

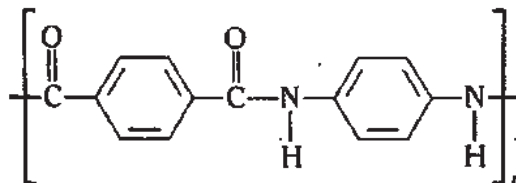


Fig. 9. *Unidad química estructural que se repite en las fibras de Kevlar.*²

La aramida de Kevlar se utiliza para materiales compuestos de elevado funcionamiento en los que son importantes un bajo peso, alta solidez y rigidez, resistencia al daño, resistencia a la fatiga y a la ruptura por tensión. De especial interés es el material Kevlar-epoxi utilizado para diversas partes de la lanzadera espacial.²

2.2.7. Comparación de propiedades mecánicas de fibras de carbono, aramida y vidrio para el refuerzo de materiales compuestos

La siguiente Figura compara los diagramas típicos esfuerzo-deformación para fibras de carbono, aramida y vidrio, pudiendo observarse que la resistencia a la tensión de las fibras varía desde 250 a 500 ksi (1720 a 3440 MPa), mientras la deformación a la fractura oscila desde 10×10^6 a 60×10^6 psi (68.9 a 413 GPa). Las fibras de carbono proporcionan la mejor combinación de alta resistencia, alta rigidez (módulo alto), y baja densidad, pero tienen elongaciones bajas. La fibra de aramida Kevlar 49 posee una combinación de alta resistencia a la tensión, alto módulo (pero no tan elevado como en las fibras de carbono), baja densidad y alta elongación (resistencia al impacto). Las fibras de vidrio poseen resistencias a la tensión y módulos más bajos y densidades más altas. De entre las fibras vítreas, las fibras de vidrio-S tienen mayores resistencias a la tensión y

elongaciones que las fibras de vidrio-E. Debido al menor coste de las fibras de vidrio, su utilización es mucho mayor.¹

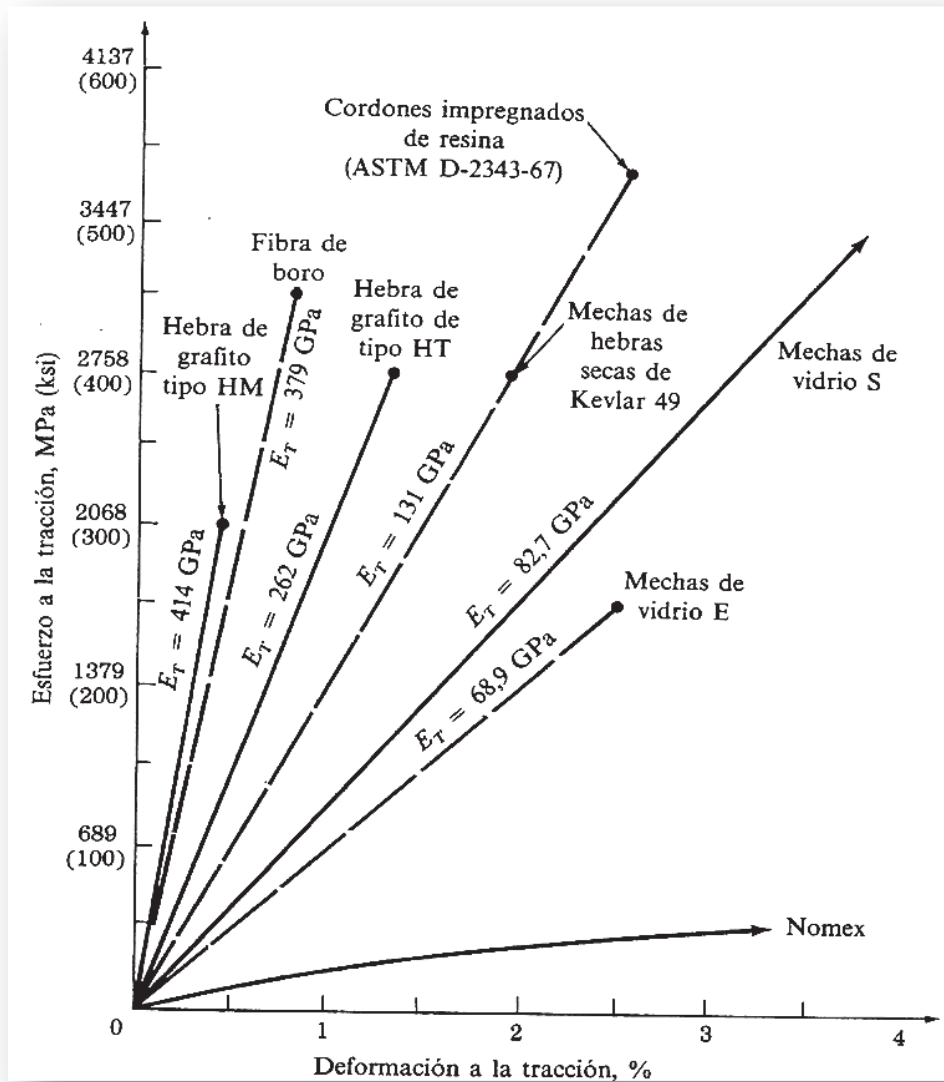


Fig. 10. Comportamiento esfuerzo-deformación de varios tipos de fibras reforzantes. (Según “Kevlar 49 Data Manual”, E. I. du pont de Nemours & Co., 1974).¹

Esta gráfica muestra los destacados cocientes resistencia a la tensión/peso y rigidez/peso de las fibras de carbono y aramida (Kevlar 49) frente al acero y aluminio. Debido a estas propiedades favorables, los materiales compuestos reforzados con fibras de carbono y aramida han reemplazado a los metales en muchas aplicaciones aeroespaciales.

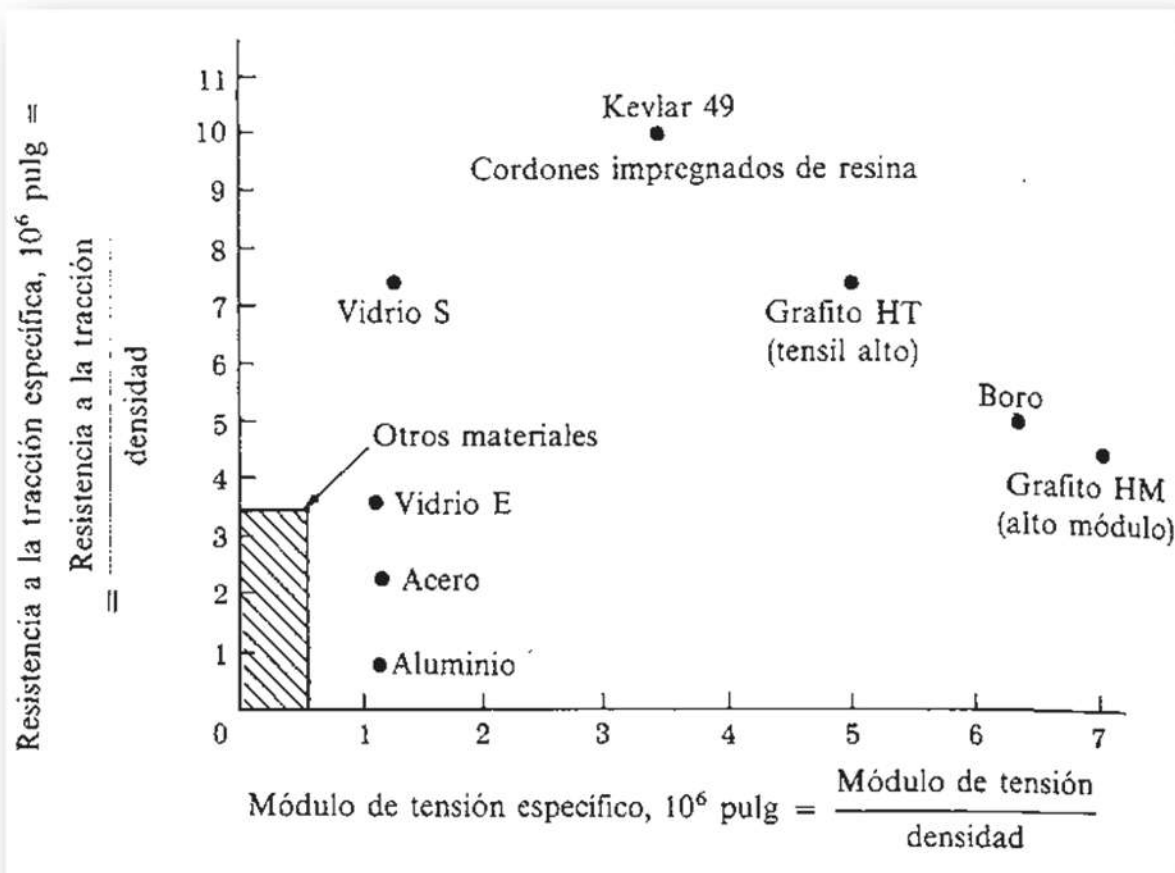


Fig. 11. Se compara la resistencia a la tensión específica y la rigidez (módulo de tensión) específica de varias fibras de refuerzo.¹

2.3. MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS

2.3.1. Materiales Matriz para materiales compuestos reforzados con fibras

De las más importantes resinas plásticas para materiales plásticos reforzables con fibras son las resinas epoxi y poliéster insaturadas. Las reacciones químicas responsables del entrecruzamiento de estas resinas termoestables.

Algunas de las propiedades de las resinas epoxi y poliéster rígidas, coladas sin aditivos se recogen en la siguiente Tabla. ¹

	Poliéster	Epoxi
Resistencia a la tracción, ksi (MPa)	6-13 (40-90)	8-19 (55-130)
Coefficiente de elasticidad, Msi (GPa)	0,38-0,64 (2,0-4,4)	0,41-0,61 (2,8-4,2)
Resistencia al esfuerzo de fluencia, ksi (MPa)	8,5-23 (60-160)	18,1 (125)
Resistencia al impacto (ensayo de Izod de barra dentada), pie · lb/pulg (J/m)	0,2-0,4 (10,6-21,2)	0,1-1,0 (5,3-53)
Densidad (g/cm ³)	1,10-1,46	1,2-1,3

Fig.12. Algunas Propiedades de resinas epoxi y poliéster coladas sin aditivos.¹

Las resinas poliéster son más baratas, pero generalmente no son tan fuertes como las resinas epoxi. Los poliésteres insaturados son de amplia utilización en plásticos reforzados con fibras. Entre las aplicaciones que encuentran estos materiales tenemos su empleo en cascos de buques, paneles de construcción y paneles estructurales para automóviles, aeronaves y accesorios. Las resinas epoxi son más caras pero tienen ventajas especiales tales como buenas propiedades de resistencia a la tensión y más baja contracción después del curado que las resinas poliéster. Las resinas epoxi se utilizan usualmente como materiales matriz para materiales compuestos de fibra de carbono y aramida.¹

2.3.2. Materiales compuestos reforzados con fibra

Resinas poliéster reforzadas con fibra de vidrio. La resistencia a la tracción de plásticos reforzados con fibra de vidrio está relacionada principalmente con el contenido en vidrio del material y la disposición de las fibras de vidrio. En general, a mayor porcentaje en peso de vidrio en el material compuesto, más reforzado resulta el plástico. Cuando están presentes cordones paralelos de vidrio, como puede ser el caso del bobinado de filamentos, el contenido en fibra de vidrio puede ser el 80 por 100 en peso, lo que conduce a una resistencia a la tensión muy alta para el material compuesto. La siguiente Imagen muestra una microfotografía transversal de un material compuesto a base de resma poliéster y fibra de vidrio con fibras unidireccionales.¹

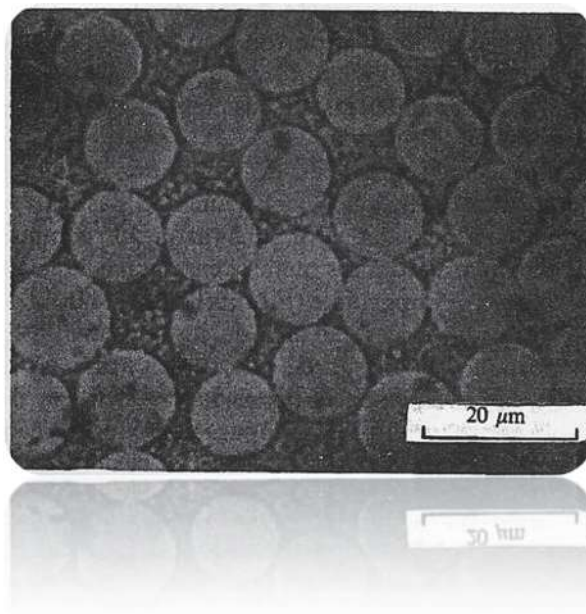


Fig. 13. *Fotografía de una sección transversal de un material compuesto a base de poliéster y fibra de vidrio unidimensional.*¹

Cualquier desviación del alineamiento paralelo de Los cordones de vidrio reduce la resistencia a la tensión mecánica del material compuesto de fibra de vidrio. Por ejemplo, materiales compuestos hechos con fibra de vidrio tejida, debido a su entrelazamiento, poseen más bajas resistencias a la tensión que si todos los cordones de vidrio estuvieran paralelos. Si se deshila la mecha, produciendo una disposición al azar de las fibras de vidrio, la resistencia la tensión es más baja para una dirección específica, pero igual en todas las direcciones.

	Paño entretejido	Mecha cortada	Compuesto moldeado en hojas
Resistencia a la tracción, ksi (MPa)	30-50 (206-344)	15-30 (103-206)	8-20 (55-138)
Coefficiente de elasticidad, Msi (Gpa)	1,5-4,5 (103-310)	0,80-2,0 (55-138)	
Resistencia al impacto barra dentada, ensayo de Izod pie · lb/pulg (J/m)	5,0-30 (267-1600)	2,0-20,0 (107-1070)	7,0-22,0 (374-1175)
Densidad (g/cm ³)	1,5-2,1	1,35-2,30	1,65-2,0

Fig. 14. *Algunas propiedades mecánicas de materiales compuestos a base de poliéster y fibra de vidrio.*¹

Resinas epoxi reforzadas con fibra de carbono. En materiales compuestos con fibra de carbono, las fibras contribuyen aumentando las propiedades a la tracción, como la rigidez y la resistencia, mientras la matriz es el portador para el alineamiento de las fibras y contribuye parcialmente a la resistencia de impacto. Las resinas epoxi son con mucho las matrices de utilización más generalizada cuando se emplean fibras de carbono, pero para determinadas aplicaciones se usan otras resinas como las poliamidas, los sulfuros de polifilileno o las polisulfonas.

La principal ventaja de las fibras de carbono es que poseen muy altas resistencias a la tensión y coeficientes de elasticidad combinados con una baja densidad. Por esta razón, los compuestos de fibra de están reemplazando a los metales en algunas aplicaciones en las que la reducción de peso es importante. La siguiente Tabla recoge algunas propiedades mecánicas típicas de uno de los materiales compuestos epox-fibra de carbono que contiene un 62 por 100 en volumen de fibras.¹

Propiedades	Longitudinal, 0°	Transversal, 90°
Resistencia a la tracción, ksi (MPa)	270 (1860)	9,4 (65)
Coefficiente de elasticidad Msi (GPa)	21 (145)	1,36 (9,4)
Deformación a la tensión última, %	1,2	0,70

Fuente: Hercules, Inc.

Fig. 15. Algunas Propiedades mecánicas típicas de un material compuesto unidimensional a base de FC (62 por 100 en volumen) y resina epoxi.¹

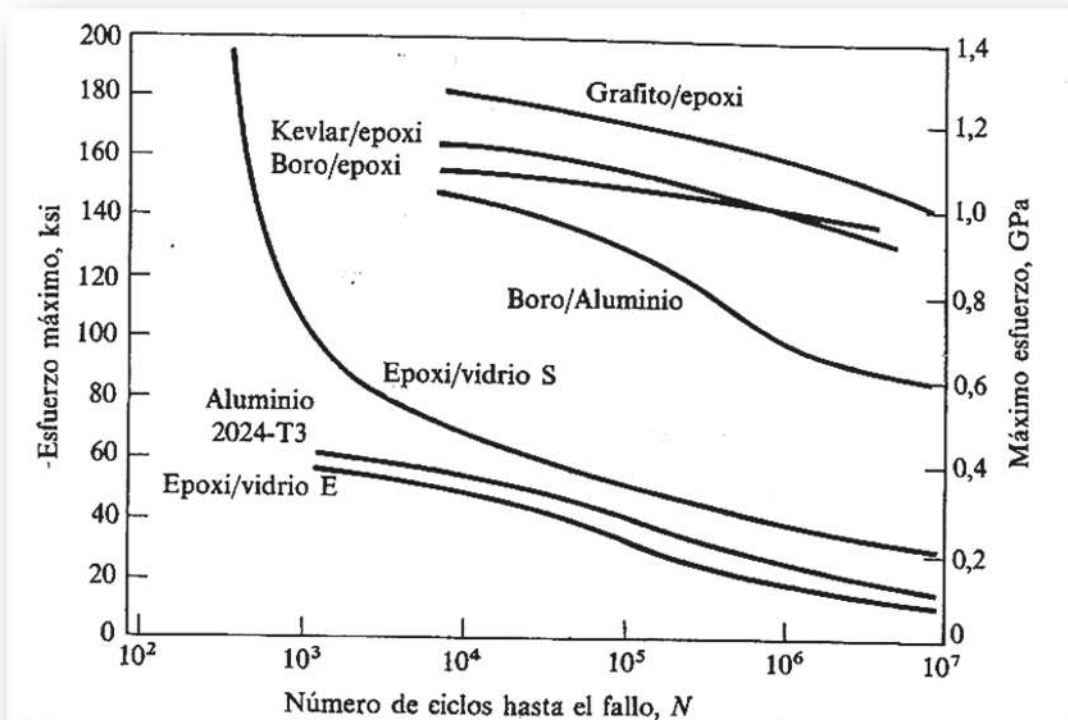


Fig. 16. Muestra las excepcionales propiedades de fatiga de un material compuesto epoxi-carbono (grafito) en comparación con la aleación de aluminio 2024-T3.¹

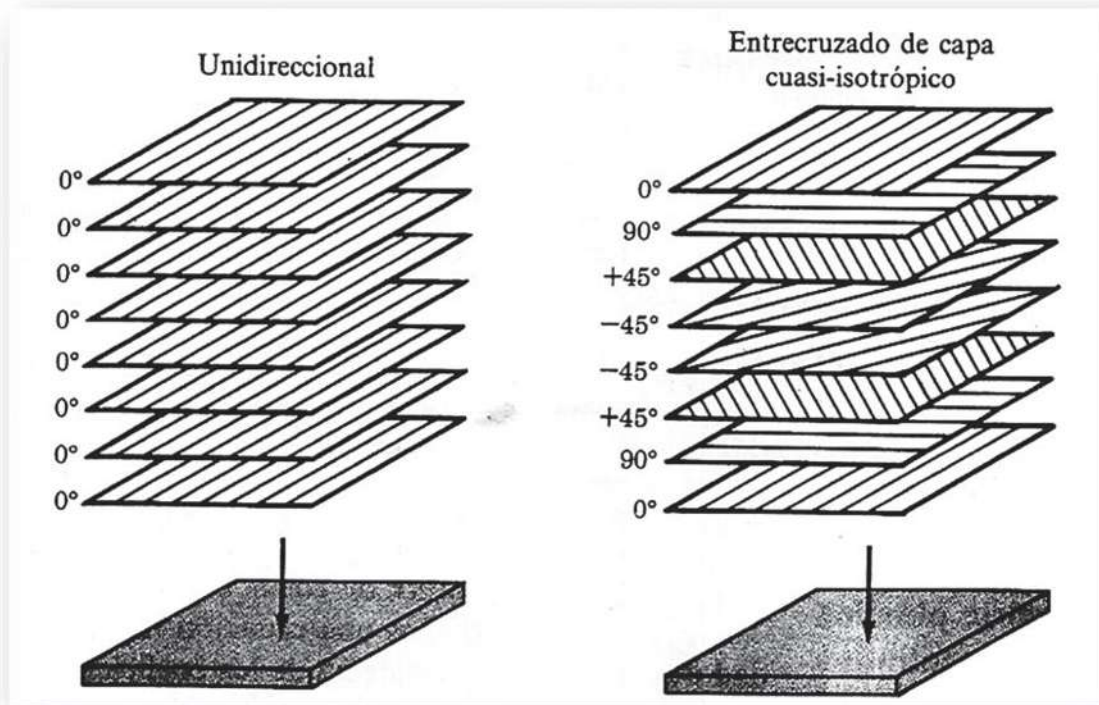


Fig. 17. En estructuras de diseño ingenieril, el material epoxi-fibra de carbono se lamina al objeto de reunir requerimientos de resistencia a la medida.¹

2.4. HORMIGON

El hormigón es un importante material de ingeniería usado para la construcción estructural. Los ingenieros de caminos usan hormigón, por ejemplo, en el diseño y construcción de puentes, edificios, presas, paredes de retención y barreras, y pavimentos de carreteras. En 1982 cerca de 50×10^7 Tm de hormigón fueron producidas en los Estados Unidos, lo cual supone una cantidad considerablemente mayor que las 6×10^7 Tm de acero que fueron producidas en el mismo año. Como material constructivo el hormigón ofrece muchas ventajas, pues posee flexibilidad de diseño (ya que es posible verterlo), es económico, tiene dureza, resistencia al fuego, apariencia estética y la posibilidad de ser fabricado en el sitio. Las desventajas del hormigón desde un punto de vista de ingeniería son su escasa fuerza tensora, baja ductilidad y algo de contracción.

El hormigón es un material compuesto de naturaleza cerámica formado por un material tosco (el agregado) encajado en una dura matriz de una pasta de cemento (el aglutinante) que está normalmente hecha de cemento Portland y agua. Varía considerablemente en composición pero normalmente contiene (en volúmenes absolutos) de 7 a 15 por 100 de cemento Portland, de 14 a 21 por 100 de agua, 1/2 a 8 por 100 de aire, de 24 a 30 por 100 de agregado fino y de 31 a 51 por 100 de agregado tosco. La siguiente Imagen ofrece una sección pulida de un ejemplo de hormigón endurecido. La pasta de cemento actúa el hormigón como un «pegamento») para mantener unidas las partículas del agregado en este material compuesto. Permítasenos ahora observar algunas de las características de los componentes del hormigón y examinar algunas de sus propiedades¹

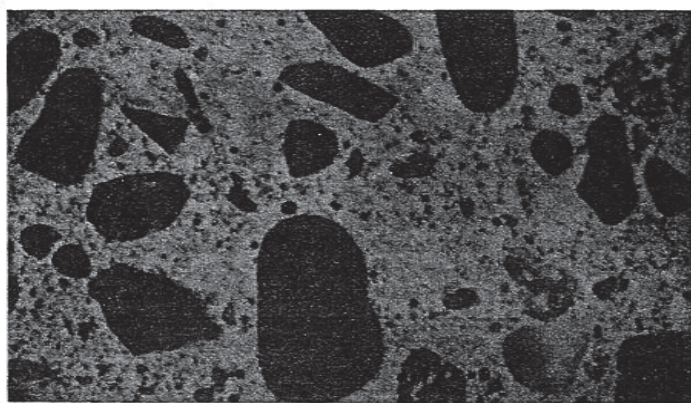


Fig. 18. *Estructura Macroestructural representada por el Hormigón.*¹

2.4.1. El cemento Portland

El cemento Pórtland es el tipo de cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón o concreto.

Fue inventado en 1824 en Inglaterra por el constructor Joseph Aspdin. El nombre se debe a la semejanza en su aspecto con las rocas encontradas en Portland, una isla del condado de Dorset.

La fabricación del cemento Portland se da en tres fases: (I) Preparación de la mezcla de las materias primas; (II) Producción del clinker; y, (III) Preparación del cemento.¹⁰

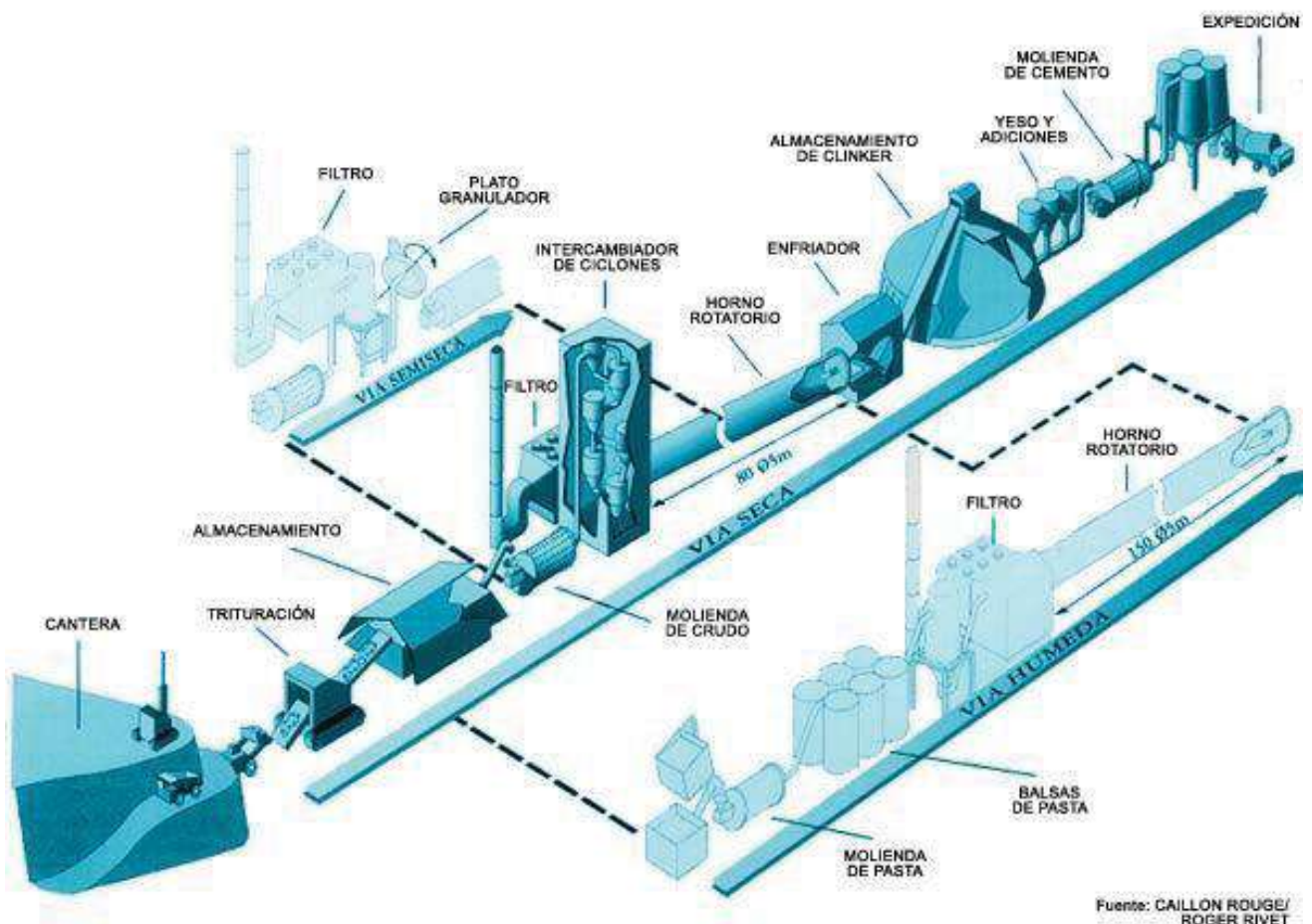


Fig. 19. El proceso de fabricación de cemento.⁹

Las materias primas para la producción del Portland son minerales que contienen:

- óxido de calcio (44%),
- óxido de silicio (14,5%),
- óxido de aluminio (3,5%),
- óxido de hierro (3%) y
- óxido de manganeso (1,6%).

La extracción de estos minerales se hace en canteras, que preferiblemente deben estar próximas a la fábrica, con frecuencia los minerales ya tienen la composición deseada, sin embargo en algunos casos es necesario agregar arcilla o calcáreo, o bien minerales de hierro, bauxita, u otros minerales residuales de fundiciones.

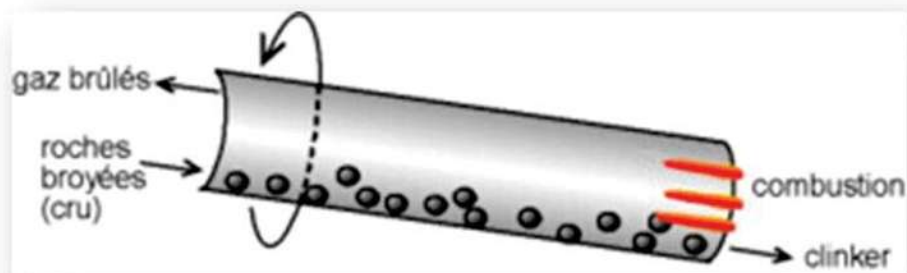


Fig. 20. Esquema de un horno Kilm.¹⁰

La mezcla es calentada en un horno especial, constituido de un inmenso cilindro (llamado *Kilm*) dispuesto horizontalmente con una ligera inclinación, y rodando lentamente. la temperatura crece a lo largo del cilindro hasta llegar a aproximadamente 1400°C; la temperatura es tal que hace que los minerales se combinen pero no se fundan o vitrifiquen.

En la sección de temperatura menor, el carbonato de calcio (calcáreo) se separa en óxido de calcio y bióxido de carbono (CO₂). En la zona de alta temperatura el óxido de calcio reacciona con los silicatos y forma silicatos de calcio (Ca₂Si y Ca₃Si). Se forma también una pequeña cantidad de aluminato tricálcico (Ca₃Al) y Aluminoferrito de tricálcico (Ca₄AlFe). El material resultante es denominado *clinker*. El clinker puede ser conservado

durante años antes de proceder a la producción del cemento, con la condición de que no entre en contacto con el agua.

La energía necesaria para producir el clinker es de aproximadamente 1.700 joules por gramo, pero a causa de las pérdidas de calor el valor es considerablemente más elevado. Esto comporta una gran demanda de energía para la producción del cemento, y por lo tanto la liberación de una gran cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, gas de efecto invernadero.

Para mejorar las características del producto final al clinker se le agrega aproximadamente el 2 % de yeso y la mezcla es molida finamente. El polvo obtenido es el cemento preparado para su uso.

El cemento obtenido tiene una composición del tipo:

- 64% óxido de calcio
- 21% óxido de silicio
- 5,5% óxido de aluminio
- 4,5% óxido de hierro
- 2,4% óxido de magnesio
- 1,6% sulfatos
- 1% otros materiales, entre los cuales principalmente agua.

Cuando el cemento Portland es mezclado con el agua, el producto solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas. El endurecimiento inicial es producido por la reacción del agua, yeso y aluminato tricálcico, formando una estructura cristalina de calcio-aluminio-hidrato, etringita y monosulfato. El sucesivo endurecimiento y el desarrollo de fuerzas internas de tensión derivan de la reacción más lenta del agua con el silicato de tricalcio formando una estructura amorfa llamada calcio-silicato-hidrato. En ambos casos, las estructuras que se forman envuelven y fijan los granos de los materiales presentes en la mezcla. Una última reacción produce el gel de silicio (SiO_2). Las tres reacciones generan calor.

Con el agregado de materiales particulares al cemento (calcáreo o cal) se obtiene el *cemento plástico*, que fragua más rápidamente y es más fácilmente trabajable. Este material es usado en particular para el revestimiento externo de edificios.

La calidad del cemento Portland deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 150.

En el 2004, los principales productores mundiales de cemento Portland fueron Lafarge en Francia, Holcim en Suiza y Cemex en México. Algunos productores de cemento fueron multados por comportamiento monopólico.¹⁰

2.4.2. Función del yeso

El yeso, o aljez, es generalmente agregado al clinker para regular el fraguado. Su presencia hace que el fraguado se concluya aproximadamente en 45 minutos. El yeso reacciona con el aluminato tricálcico para formar una sal expansiva llamada 'ettringita'.



2.4.3. Tipos de cementos Pórtland

Varios tipos de cementos Pórtland pueden ser producidos variando las cantidades de los componentes químicos, en general hay cuatro tipos fundamentales.

El Tipo I es el cemento Pórtland normal para usos generales. Se utiliza allí donde el hormigón no está expuesto a un gran ataque por sulfatos del agua o del suelo, o donde no va a producirse un incremento de temperatura importante debido al calor generado por la hidratación del cemento. Aplicaciones típicas del hormigón de tipo I son aceras, edificios, puentes, alcantarillas y tanques y embalses de hormigón reforzado.

EL Tipo II de cemento Pórtland se utiliza allí donde un moderado ataque por sulfato es importante, como las estructuras de desagüe donde las concentraciones de sulfato en aguas residuales son mayores de las normales. El cemento de tipo II se utiliza normalmente en los meses de verano para estructuras anchas como pilares y gruesas paredes de retención ya que este cemento tiene un moderado calor de hidratación.

El Tipo III es una clase de cemento de resistencia prematura que desarrolla grandes resistencias en un periodo de tiempo corto. Se emplea cuando las formas del

hormigón van a ser eliminadas rápidamente de una estructura que debe ponerse prontamente en uso.

El Tipo IV es un cemento Pórtland de bajo calor de hidratación que se utiliza cuando la cantidad de calor debe ser minimizada. El tipo IV de cemento Pórtland se reserva para estructuras macizas de hormigón tales como presas de gran pesantez donde el calor generado por el endurecimiento del cemento es un factor crítico.

El Tipo V es un cemento sulfato-resistente usado cuando el hormigón está expuesto a severos ataques a sulfato como el hormigón expuesto a suelos y aguas residuales con un alto contenido en sulfato.¹⁰

2.5. PROBLEMAS DE LOS SULFATOS Y CLORUROS EN EL CONCRETO

Por la gran extensión de litoral marítimo con que cuenta México, la corrosión que provoca en las estructuras de concreto el contacto con el agua de mar y la brisa marina es un tema que interesa de manera especial al sector constructivo del país. Así se reconoce en este estudio, cuyo enfoque sitúa el problema en ambientes que no resultan por sí mismos muy claramente agresivos por la acción de los cloruros.

Existe una conciencia general en la práctica constructiva común respecto de las precauciones que deben seguirse en la fabricación de elementos y estructuras de concreto claramente expuestos a ambientes de carácter agresivo, por el deterioro que ocasiona el contacto directo con sustancias naturales en el suelo o en el agua. Dada su elevada concentración de cloruros (más de 20,000 ppm), destaca como medio ofensivo el agua de mar en su estado normal porque favorece la corrosión del acero de refuerzo

No obstante, se presentan en la actualidad serios y veloces deterioros estructurales por el ataque al concreto de cloruros disueltos en el aire, presentes en ambientes marinos con alta humedad relativa y acción constante del viento, tales como las fajas costeras. En algunas circunstancias, el problema se agrava por la presencia de intensa y variada actividad industrial en la zona, como es el caso particular del Golfo de México.

En este trabajo se analiza el proceso de afectación del concreto y del acero de refuerzo sometidos a ambientes que no resultan por sí mismos tan claramente agresivos a causa de la acción de los cloruros, a no ser por la evidencia de ataques anteriores que han resultado en su degradación o destrucción.

Revisar y evaluar el potencial de daño en tales circunstancias, sus causas, los agentes que lo favorecen y sus efectos finales sobre las estructuras es el objetivo aquí planteado, para así delinear y establecer procedimientos generales para su prevención, control o reparación.³

2.5.1. El proceso y sus agentes

La corrosión del acero de refuerzo existente dentro del concreto se origina por la presencia exclusiva de oxígeno y humedad en las proximidades de las barras, pero la existencia de cloruros libres en el medio que las rodea es un desencadenante del proceso.

En el agua de mar, en su estado normal, se puede encontrar un amplio rango de concentraciones de sales disueltas, aunque siempre con una proporción constante de un constituyente a otro; las concentraciones son más bajas en las zonas frías o templadas que en las cálidas y resultan especialmente altas en zonas de aguas bajas con tasas excesivas de evaporación diurna.

Debido a su alto contenido de cloruros, el agua de mar representa un elemento ofensivo para el concreto y el acero de refuerzo pues propicia y acelera –una vez que se ha iniciado– el fenómeno de la corrosión. En las franjas costeras, la brisa marina acarrea importantes contenidos de humedad que, naturalmente, lleva en sí cloruros; de esta manera, estructuras que no están en contacto directo con el agua de mar, sufren igualmente sus embates.

Los cloruros se vuelven así un elemento activo en el proceso de daño y degradación de las estructuras de concreto en franjas marítimas. De acuerdo con la concentración con que se presenten en el agua de mar, quedará definido su grado de agresividad, por lo que habrá que esperar que algunas zonas tengan un mayor potencial dañino que otras.

El fenómeno de la corrosión del acero de refuerzo es causa frecuente de que las estructuras de concreto se deterioren prematuramente, aun cuando el concreto, por su alta alcalinidad con un pH promedio de 12.5 y baja conductividad, suele ser un medio que proporciona buena protección al acero contra la corrosión. Sin embargo, dentro de un esquema de ambiente agresivo, esta protección no es suficientemente eficaz y el fenómeno se produce. Pero existen también condiciones que de origen la favorecen y son las siguientes:

- Excesiva porosidad del concreto
- Reducido espesor del recubrimiento de concreto sobre el refuerzo

- Existencia de grietas en la estructura
- Alta concentración de agentes corrosivos en los componentes del concreto ³

2.5.2. Efectos en el concreto

La resistencia a compresión ha sido utilizada por lo regular como un indicador de la durabilidad del concreto; sin embargo, cada día se hace más evidente que por sí misma no determina la durabilidad del concreto. La impermeabilidad y la resistencia química rigen también la vida útil de una estructura, aunque estos factores están a su vez influidos por la composición del cemento y la calidad de la mezcla.

Los cloruros pueden estar presentes desde el inicio en la mezcla de concreto fresco (disueltos en los agregados, en los aditivos o en el agua). Se refieren como *cloruros totales calculados* y se expresan como el porcentaje de ion cloruro respecto al peso de cemento, el que debe limitarse, de acuerdo con la más reciente información, a:

- Tipo de exposición Límite por peso de cemento (%)
- Ambiente agresivo y expuesto a cloruro 0.06
- Ambiente agresivo y no expuesto a cloruro 0.15
- Construcción sobre al suelo y seca permanentemente 1.50

Esto es lo que generalmente especifican diversas normas y reglamentos de construcción en el mundo, aunque suele también limitarse en función de la cantidad de ion cloruro en peso por metro cúbico de concreto, y tiene que ver de manera directa con el umbral de riesgo, de acuerdo con la siguiente tabla:

- Condiciones de exposición Límite por volumen de concreto (Kg. /m³)
- Ambiente agresivo y expuesto a cloruro 0.3
- Ambiente agresivo y no expuesto a cloruro 0.5

Construcción sobre el suelo y seca permanentemente sin limitación

El ion cloruro puede también penetrar posteriormente en el interior del concreto por difusión desde el exterior, en cuyo caso el riesgo de corrosión se incrementa grandemente.



Fig. 21. *Ataque de cloruros y sulfatos contra el concreto.*³

Los cloruros totales en el concreto se pueden subdividir químicamente en ligados y libres. Esta distinción resulta importante ya que son los cloruros libres los responsables de la corrosión del acero de refuerzo.

Los cloruros ligados son los que están íntimamente asociados al cemento hidratado y no son solubles en agua, por lo que no causan corrosión; por lo tanto, los límites en las especificaciones deben aplicarse al contenido de cloruros libres en lugar de al contenido total o soluble en ácido. No obstante, con los datos de las actuales investigaciones no es posible calcular con precisión su proporción en relación con el contenido total de cloruros, ya que varía con los cambios en el contenido de cloruros

totales, aunque, considerando que el cloruro libre es soluble en agua, se lo puede extraer y así determinar su proporción.

En términos de la química del concreto, se asume que el cloruro total es igual a la porción soluble en ácido de los constituyentes del concreto; así su extracción, previa a la determinación del contenido, implica digerir una muestra de concreto endurecido en ácido nítrico.

El procedimiento de extracción para la determinación del contenido de cloruros libres requiere hervir una muestra de concreto endurecido durante cinco minutos y saturar por 24 horas.

Amplias investigaciones indican claramente que el contenido de cloruro soluble en agua proporciona un indicador del riesgo inmediato de corrosión. Comparativamente con los métodos de extracción de agua, los métodos de digestión en ácido extraen una mayor proporción de los cloruros totales presentes en el concreto, por lo que una interpretación apoyada en estos resultados resultará siempre en una sobreestimación del riesgo inmediato de corrosión.

Por otra parte, los niveles de cloruros solubles en ácido pueden resultar más adecuados para evaluar el riesgo extremo de corrosión a largo plazo si el concreto ha sufrido procesos adicionales de carbonatación o sulfatación. La carbonatación libera cloruro ligado, mientras que la presencia de sulfatos la impide hasta cierto punto; la reacción entre el cloruro y el aluminato tricálcico incrementa así los cloruros libres.

El efecto directo más nocivo por acción de cloruros en la mezcla de concreto endurecido está constituido por la cristalización de las sales dentro de sus poros, la cual puede producir rupturas debidas a la presión ejercida por los cristales de sal. Puesto que la cristalización ocurre en el punto de evaporación del agua, este tipo de ataque se produce de manera más acentuada en el concreto que no está permanentemente en contacto directo con el agua. No obstante, debido a que la sal en solución penetra y asciende por capilaridad, el ataque es más intenso cuando el agua o la humedad pueden penetrar en el concreto, de tal suerte que la permeabilidad de este material es un factor de gran importancia, y el clima tropical propio de nuestras franjas costeras actúa como catalizador del proceso.

En el caso del concreto reforzado, la absorción de las sales establece áreas anódicas y catódicas; la acción electrolítica resultante conduce a una acumulación de producción de la corrosión sobre el acero, con la consecuente ruptura del concreto que lo rodea, de tal manera que los efectos se agravan.³

2.5.3. Efectos en el acero de refuerzo

Como ya se ha referido anteriormente, la pasta de cemento no carbonatada tiene un pH mínimo de 12.5 y el acero de refuerzo no se corroe en esa circunstancia, fundamentalmente por la presencia de una película pasivante microscópica de óxido que evita su disolución anódica. No obstante, si el pH disminuye a menos de 10 por la acción de efectos tales como la carbonatación, la corrosión puede iniciarse. El efecto de la carbonatación puede disminuir el pH a niveles de 8 o 9, resultando en corrosión del acero cuando están presentes la humedad y los iones cloruro disueltos en agua en niveles por encima de 0.2 por ciento relativos a la masa de cemento, lo cual acelera la corrosión.

Cabe destacar que, en opinión de diversos autores, la corrosión puede iniciarse por la acción de iones de cloruro sobre el acero de refuerzo, aun en ambientes con un pH superior a 10 u 11, aunque estos casos se relacionan con cloruros presentes de origen en la mezcla por efectos de los agregados, el agua o los aditivos, pues los que penetran del exterior están generalmente asociados con el proceso de carbonatación, el cual incide inmediatamente sobre los niveles de pH en el concreto.

La corrosión electroquímica de los elementos consiste básicamente en la conexión eléctrica o electrolítica entre un cátodo y un ánodo. En relación con el acero embebido en el concreto, las barras de refuerzo actuarán como un conductor eléctrico y el agua en los poros de la pasta actuará como electrolito. Durante el proceso de corrosión, el oxígeno es consumido y genera los productos de corrosión; el agua se necesita para permitir que el proceso de corrosión se mantenga y continúe, su presencia se relaciona con la generación de óxido férrico. Así, el resultado principal y más grave de la acción de los cloruros sobre el acero de refuerzo lo constituye la corrosión acelerada que éste sufre a consecuencia de su acción como catalizador en ese proceso electrolítico.

En muchas estructuras de concreto localizadas en ambientes marinos cercanos a las costas, en las que el daño se ha iniciado a través de una incipiente penetración de cloruros hacia el acero, como consecuencia de una permeabilidad natural excesiva del concreto, su carbonatación o el agrietamiento de las secciones, la acción de la corrosión y del incremento de diámetro de las varillas causan por sí mismas agrietamiento en el recubrimiento del concreto, lo que facilita en gran medida el acceso de humedad, aire y cloruros contenidos en el agua, y acelera así el proceso de ataque, llevando las estructuras a daños irreversibles en periodos notablemente cortos. Así, ante la sospecha de ataque, se deberán incorporar de inmediato programas de reparación y mantenimiento de los elementos afectados.³



Fig. 22. *Resultado de la transformación molecular de la estructura del concreto debido a los cloruros y sulfatos.*³

2.5.4. Incidencia del agrietamiento

La existencia del grietas en el concreto no es condición indispensable para que se produzca corrosión en el acero de refuerzo, pero su presencia favorece la ocurrencia de

este fenómeno, pues la película pasivante en la superficie del acero se rompe en un área estrictamente confinada, lo cual resulta equivalente a un severo ataque por carbonatación en el concreto y genera zonas de máxima vulnerabilidad en la tasa de corrosión. Debido a ello es necesario, para prolongar la vida útil de las estructuras de concreto reforzado, prevenir la formación de grietas o suministrar un tratamiento adecuado de obturación a las que ya se hayan presentado.

Las grietas en el concreto pueden dividirse en dos grandes grupos: las que se producen por esfuerzos debidos al funcionamiento estructural y las que se deben a esfuerzos que se originan en el seno mismo del concreto. Así, la formación de grietas depende de factores tales como el diseño estructural, las características de los materiales, la composición del concreto, las prácticas constructivas, las condiciones ambientales y la manifestación de situaciones anómalas y de eventos extraordinarios.

En el caso de las grietas comunes, asociadas con el propio funcionamiento y naturaleza del concreto, con anchos que fluctúan de 0.15 a 0.35 mm, tienen un comportamiento autosellante en ambientes no agresivos, por efecto de calcificación, polvo y depósitos de óxido. No obstante, en ambientes agresivos colaboran también a la acumulación de sales que pueden agravar esa magnitud de agrietamiento a consecuencia de su cristalización. Asimismo, las grietas que se desarrollan perpendiculares al refuerzo resultan menos peligrosas que las de dirección paralela a éste, por la menor exposición que propician.

Los factores que principalmente pueden vincularse con determinados sitios o regiones geográficas son las características de los agregados y las condiciones ambientales, que influyen sobre los agrietamientos atribuibles a las contracciones – plástica y por secado– y a las reacciones deletéreas que eventualmente se producen entre los álcalis del cemento y algunos agregados.

En la república mexicana, las características de los agregados y las condiciones ambientales son muy variables; existen casos en los que tales características y condiciones se muestran favorables a motivar este tipo de agrietamiento en el concreto. Habría que considerar como riesgo potencial todos aquellos sitios del país donde los agregados contuvieran rocas y minerales reactivos con los álcalis.³

2.5.5. Durabilidad del concreto

Las estructuras de concreto están expuestas durante su vida útil al ataque químico y físico de diferentes agentes. La durabilidad del concreto variará entonces conforme tales factores sean más o menos agresivos, y también de acuerdo con las propiedades de sus componentes, el proporcionamiento de la mezcla y las condiciones de colado y curado que se hayan aplicado en su construcción.

La planeación y el diseño deberán entonces no solamente estar basadas en el uso de la estructura, sino también en las condiciones ambientales y en la vida útil esperada de la misma. Estas definiciones básicas deberán estar reflejadas en los materiales y especificaciones de construcción, y tanto en el concepto como en los detalles estructurales.

En el contexto de la práctica común, se diseña y detalla no sólo para las cargas que actuarán en la vida útil de una estructura, sino también para los efectos de agrietamiento y temperatura; in embargo, sólo se consideran condiciones especiales de exposición para grupos muy particulares de estructuras.

Es muy común que los códigos y normas actuales sólo prescriban las variaciones adecuadas de la relación agua/cemento y del recubrimiento de concreto sobre el acero de refuerzo de acuerdo con una clasificación muy simple de las condiciones de exposición. Sin embargo, en la práctica se encuentran muchas y más diversificadas condiciones de exposición, y no sólo en relación con el medio ambiente, sino también según el uso pretendido de la estructura.

En condiciones de ambientes eminentemente agresivos, las precauciones y los cuidados en la construcción deben realmente extremarse. No obstante, existen condiciones no tan claramente agresivas, por lo que, con el fin de obtener estructuras durables se ha considerar que éstas son afectadas por el viento y la humedad marítima que contienen grandes cantidades de sal, así como por los ciclos de humedecimiento y secado. Se vuelve entonces muy importante la detección y el estudio de las características climáticas más relevantes de la región en la que se ubicará la estructura, es decir, los cambios estacionales de la dirección de los vientos, la temperatura, la

humedad relativa y la precipitación pluvial; inclusive, podría en muchos casos resultar deseable y útil contar con el análisis de la composición química del agua de mar.

Como se mencionó anteriormente, existen dos factores preponderantes en la determinación de la tasa de corrosión: la resistividad eléctrica del concreto y la disponibilidad de oxígeno en el cátodo, los cuales se relacionan con los siguientes factores:

- Contenido de humedad en el concreto. Mientras que un incremento de la humedad en el concreto reduce su resistividad, reduce también la penetración y difusión de oxígeno, que se vuelve mínima para el concreto saturado; de esa forma, el concreto permanentemente sumergido en agua de mar sufre corrosión lenta, mientras que los concretos expuestos a humedecimiento y secado intermitentes son más susceptibles de corroerse.
- Temperatura. Estudios de campo y de laboratorio han mostrado que la corrosión en el acero de refuerzo se acelera con el incremento de la temperatura, en virtud de que ésta afecta directamente la solubilidad del oxígeno y también la movilidad de sustancias tales como los cloruros que participan preponderantemente en el proceso de corrosión. También, los cambios bruscos de temperatura en el aire ambiental pueden resultar en condensación de agua sobre la superficie de concreto y cambiar así su contenido de humedad.
- Presencia de sales. La presencia de sales provoca generalmente dos efectos que resultan opuestos uno al otro: reducen la resistividad del electrolito, incrementando así la velocidad de corrosión, y en concentraciones altas disminuye la solubilidad del oxígeno y puede por lo tanto disminuir la velocidad de corrosión.

El contenido de C_3A en el cemento forma un complejo insoluble, hidrato de cloroaluminato de calcio, el cual inhibe cierta proporción de los cloruros totales y disminuye así el riesgo de corrosión. Sin embargo, en un ambiente con presencia de sulfatos y cloruros, los iones sulfato alteran ese complejo debido a la formación preferencial de hidrosulfoaluminato de calcio, lo que resulta en la liberación de algunos cloruros ligados que quedan así disponibles para la corrosión del acero. Un proceso similar de liberación de cloruros se genera bajo la acción del dióxido de carbono presente en la atmósfera, ya que también puede descomponer los hidratos de cloroaluminato.

El dióxido de carbono puede asimismo penetrar en el concreto, aunque su tasa de penetración se puede controlar eficazmente mediante la impermeabilidad de un concreto de buena calidad. El CO₂, el dióxido de sulfuro y el óxido nítrico, considerados importantes contaminantes del aire, reaccionan también con los hidróxidos en el concreto y los convierten en carbonatos. Así, todos ellos, en condiciones naturales de exposición, dan lugar a procesos de carbonatación del concreto, por lo que la carbonatación es hoy su mecanismo dominante de neutralización.³

2.5.6. Potencial de cloruros en el aire

a) Aire marítimo. Estudios realizados en otros países indican una gran diversidad de componentes químicos en el agua de mar, con una amplia gama de concentraciones. Resulta entonces improductivo generalizar una presencia promedio de elementos nocivos para el buen comportamiento de las estructuras de concreto. Podemos citar como ejemplo una reciente investigación en Japón, que detectó una variación en cloruros del agua de mar que osciló entre 0.01 y 0.20 mg de cloruro de sodio por cm². Otro estudio encontró concentraciones particularmente elevadas del ion cloruro, las cuales variaban alrededor de 21,700 ppm.. Asimismo, se detectaron contenidos de sulfatos sobre 3800 ppm, y los más altos valores de sulfitos registrados en el mundo.

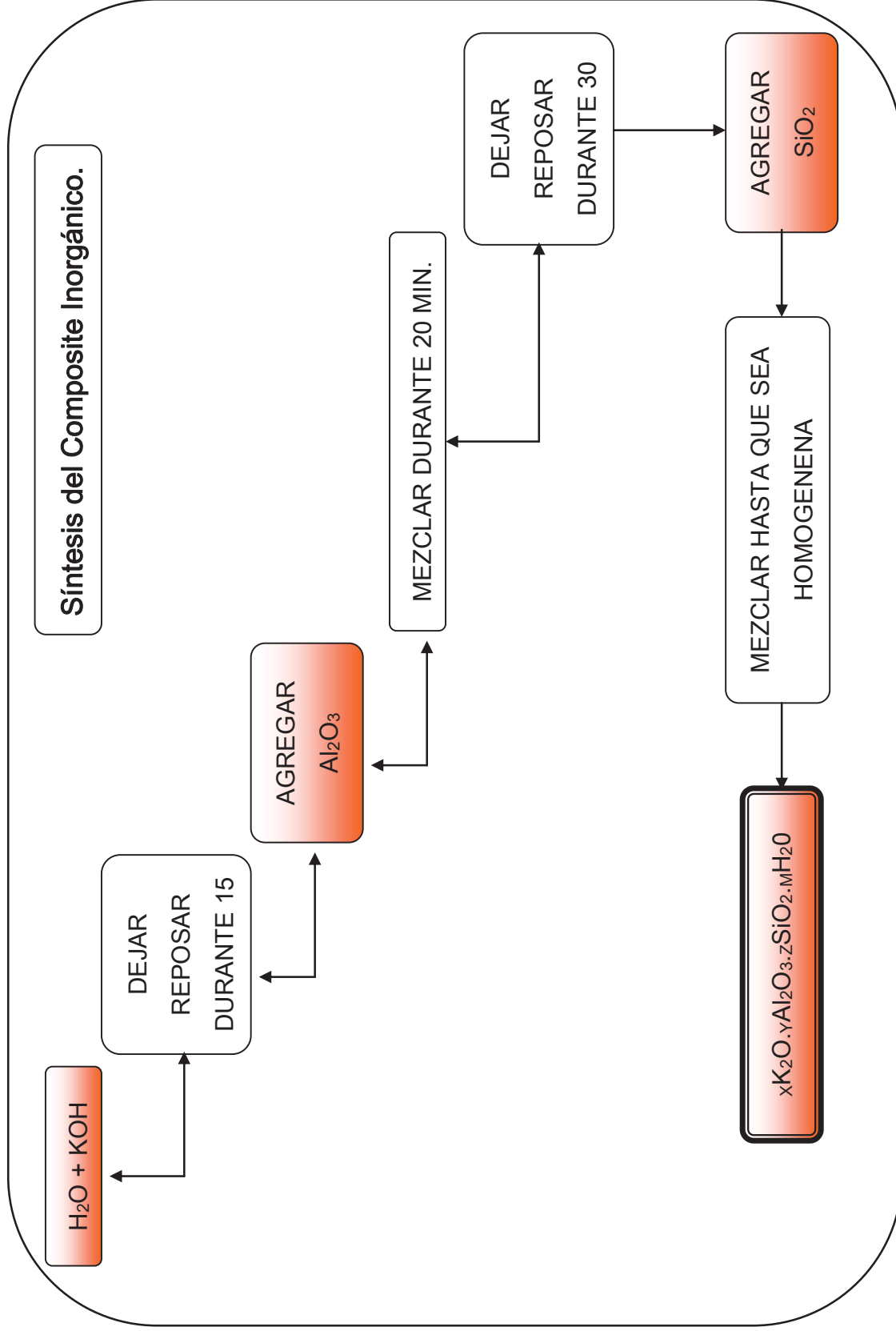
Aun cuando en nuestro país no se conocen datos concretos, resulta evidente la presencia de sulfitos, carbonatos y cloruros en el agua de mar, los cuales necesariamente resultan dañinos para las estructuras de concreto. Así, con el agravante de la acción de la temperatura, casi constante en todo el año, asociada al clima tropical de nuestros litorales y a la acción de los vientos también propios de estas zonas, se conjuntan todos los factores que generan ambientes altamente propicios para que se produzca la corrosión en el acero de refuerzo de las estructuras de concreto, tal y como se refirió al describir la incidencia de cada uno de esos aspectos en el proceso general.

b) Zonas industriales. La presencia de contaminantes en el medio ambiente, generados por la emisión de las industrias, provoca una diversidad de componentes químicos (con diferentes grados de concentración cada uno) mayor de la que se podría observar en un ambiente marítimo natural, aunque es altamente probable la

preponderancia del óxido de carbono, algunos sulfatos y nitratos que, como se refiere, inciden en la disminución del pH natural del concreto y en procesos de carbonatación que favorecen la entrada de humedad y agentes corrosivos hacia el acero de refuerzo.

Como se señaló en el inciso anterior, las zonas costeras cuentan con condiciones que propician la corrosión del acero de refuerzo por los componentes químicos que flotan en el aire. Por lo tanto, la emisión de contaminantes de zonas industriales en esas áreas viene a agudizar la problemática, pues la gran aleatoriedad en la presencia de cada componente impide el establecimiento de normas o recomendaciones en cuanto a cuidados específicos y hace necesario el estudio de cada caso en particular, con el apoyo del conocimiento que pueda proporcionar el estado del arte actual en cuanto a tecnología del concreto.³

3. SINTESIS DEL COMPOSITE INORGANICO.



4. PROPIEDADES FISICAS.

4.1. Prueba de Flamabilidad

La prueba de flamabilidad se realizó con el fin de obtener un comparativo respecto a la resistencia al fuego o combustibilidad de los mismos.

Para realizar esta prueba se utilizaron diferentes tipos de materiales como:

1 bloque Madera. Fig. 22 y Fig. 23. Como era predecible se aprecia en las figuras una alta combustibilidad ya que el bloque de madera es una material de procedencia orgánica.



Fig. 22.



Fig. 23.

1 cubo de mortero. Fig. 24 y Fig. 25. Al someter el mortero al fuego se observó que tiene nula combustibilidad ya que el mortero es un material inorgánico.



Fig. 24.



Fig. 25.

1 cubo del composite inorgánico desarrollado. Fig. 26, Fig. 27, Fig. 28 y Fig. 29. En este caso se observó que el composite desarrollado es inmune a la combustibilidad por el hecho que es un material inorgánico.



Fig. 26



Fig. 27



Fig. 28



Fig. 29

4.2. Densidad (Peso/Volumen).

El objetivo es determinar el peso de la unidad de las diferentes muestras del composite inorgánico.

$$\text{Densidad} = W / V$$

Tipo de Muestra:	W(gr.)	Volumen(cm3)	Densidad
MORTERO CPO	267	125	2.136
POLIMERO INORGANICO AL 0% FIBRA.	255	125	2.04
POLIMERO INORGANICO AL 2% F. DE VIDRIO	258	125	2.064
POLIMERO INORGANICO AL 4% F. DE VIDRIO	261	125	2.088
POLIMERO INORGANICO AL 6% F. DE VIDRIO	261	125	2.088
POLIMERO INORGANICO AL 2% F. BASÁLTICA	265	125	2.12
POLIMERO INORGANICO AL 4% F. BASÁLTICA	241	125	1.928
POLIMERO INORGANICO AL 6% F. BASÁLTICA	234	125	1.872

4.3. Absorción polímero inorgánico.

Para realizar esta prueba se utilizaron muestras representativas de los composites inorgánicos con sus variantes de fibra.

La prueba consistió en colocar las muestras en un horno a 100°C durante 24 hr. para obtener el peso seco, después se colocaron en un recipiente con agua para saturar las muestras durante 5 días, ya transcurrido este tiempo se obtuvo su peso húmedo, consecuentemente se realizaron los cálculos correspondientes para conocer el porcentaje de absorción.

	Con 0% Fibra		Con 2% F. Vidrio			Con 4% F. Vidrio			Con 6% F. Vidrio			
Peso Húmedo (Pw) gr.	269	275	148.67	157.74	144.21	155.74	154.63	101.78	124.52	146.44	145.49	142.55
Peso Seco (Pa) gr.	251	253	144.40	146.04	133.92	144.83	144.23	95.64	115.96	135.62	134.99	131.97
Absorción de Agua (Pw-Pa) gr.	18	22	4.27	11.70	10.29	10.91	10.40	6.14	8.56	10.82	10.50	10.58
Absorción $[(Pw-Pa)/Pa]*100$ %	7.17	8.70	2.96	8.01	7.68	7.53	7.21	6.42	7.38	7.98	7.78	8.02
PROMEDIO	7.93		6.22			7.05			7.79			

	Con 2% F. Basáltica			Con 4% F. Basáltica		Con 6% F. Basáltica
Peso Húmedo (Pw) gr.	149.57	136.39	130.06	143.27	84.67	164.21
Peso Seco (Pa) gr.	138.24	125.94	120.85	132.77	78.37	155.74
Absorción de Agua (Pw-Pa) gr.	11.33	10.45	9.21	10.50	6.30	8.47
Absorción $[(Pw-Pa)/Pa]*100$ %	8.20	8.30	7.62	7.91	8.04	5.44
PROMEDIO	8.04			7.97		5.44

4.4. Granulometría.

Durante toda la experimentación se empleo como agregado marmolina de la cual se obtuvo esta granulometría utilizando 5 kg. De un saco de 10 kg.

Malla No.	Abertura(mm)	Peso Retenido(gr.)	% Retenido	% Acumulado	% que pasa
14	1.410	1108.76	22.175	22.175	77.825
16	1.180	1094.60	21.892	44.067	55.933
30	0.590	2745.02	54.900	98.968	1.032
40	0.420	4.49	0.090	99.057	0.943
50	0.279	21.81	0.436	99.494	0.506
100	0.149	1.92	0.038	99.532	0.468
200	0.074	1.24	0.025	99.557	0.443
charola	0.000	22.16	0.443	100.000	0.000
$\Sigma =$		5,000			

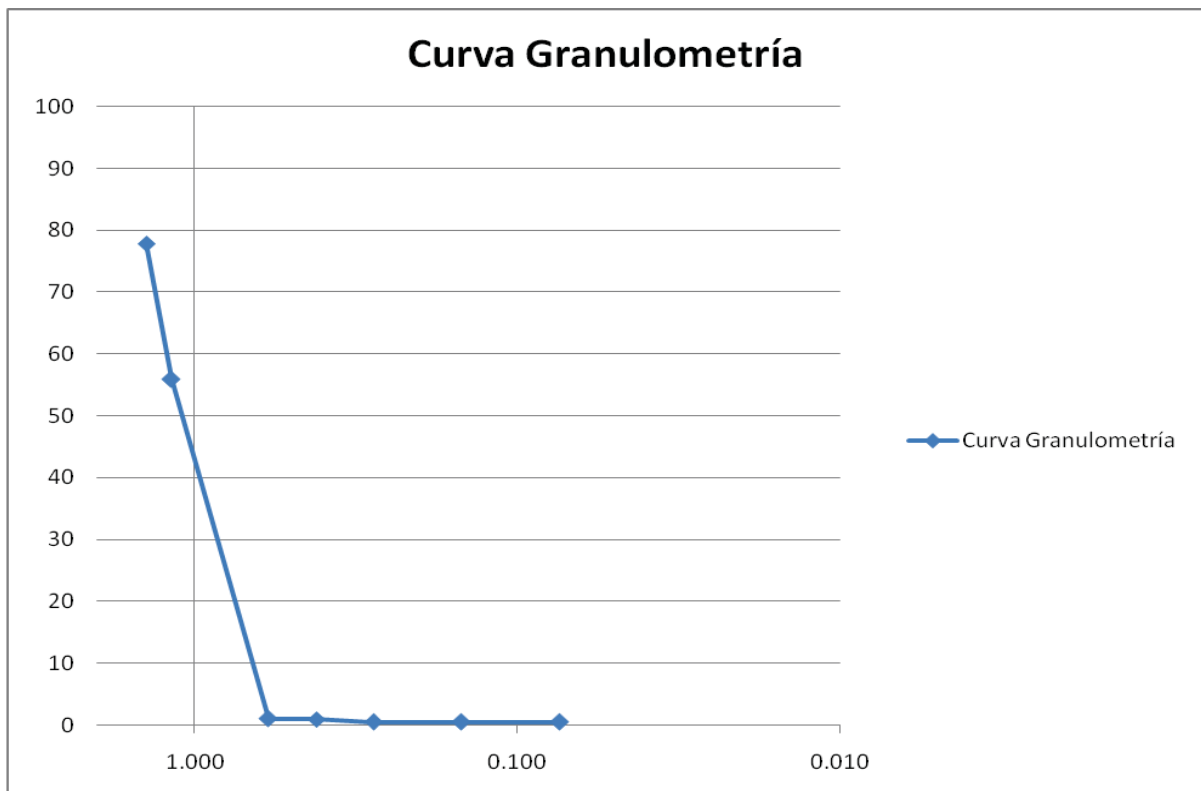


Fig. 30. En la grafica semi-logarítmica interviene el % que pasa y la abertura de las mallas y de esta manera es apreciable el diámetro de partícula predominante.

5. PROPIEDADES MECANICAS.

5.1. ESFUERZO DE COMPRESION.

Composición:

- »Cemento
- »Agua Rel. 1:0.333
- »AGREG. Rel. 1:2.5

Muestra:	Fecha de Elab.:	Días a Probar:	Fecha de Prueba:
1	07-Ago-07	3	10-Ago-07
2	07-Ago-07	3	10-Ago-07
3	07-Ago-07	3	10-Ago-07
4	07-Ago-07	14	21-Ago-07
5	07-Ago-07	14	21-Ago-07
6	07-Ago-07	14	21-Ago-07
7	07-Ago-07	45	21-Sep-07
8	07-Ago-07	45	21-Sep-07
9	07-Ago-07	45	21-Sep-07

Muestra:	Propiedades Físicas								Propiedades Mecánicas			
	Cara Superior(in):		Cara Inferior(in):		h(in):	Área(in ²)	Carga Total(lb.):	Carga Total(kg.):	Esfuerzo (lb./in ²)	Esfuerzo (Kg./cm ²)		
1	2.01	x	2.00	2.00	x	1.99	2.00	4.00	5399.11	2449.00	1349.77	94.90
2	1.91	x	1.96	1.96	x	2.01	2.00	3.84	2937.66	1332.50	765.72	53.84
3	2.00	x	2.00	2.01	x	2.00	2.00	4.01	4117.13	1867.50	1027.26	72.22
4	1.99	x	2.02	2.00	x	2.00	2.00	4.01	5506.04	2497.50	1372.48	96.50
5	1.96	x	2.04	2.02	x	1.97	1.97	3.98	3185.68	1445.00	799.77	56.23
6	1.98	x	1.97	1.97	x	1.97	1.97	3.89	2783.33	1262.50	716.13	50.35
7	2.01	x	2.00	1.98	x	1.99	1.97	3.97	3428.18	1555.00	862.97	60.67
8	2.00	x	2.00	1.99	x	1.98	2.24	3.97	4260.43	1932.50	1073.54	75.48
9	2.00	x	2.01	2.00	x	2.00	2.00	4.00	5803.66	2632.50	1449.49	101.91



Fig. 31



Fig. 32



Fig. 33

Fig. 31, Fig. 32 y Fig. 33 muestran la prueba y falla de la muestra de mortero al esfuerzo de compresión.

Mortero sin fibra	
Días	Carga Final(lb./in2)
3	1047.58 lb./in2
14	962.79 lb./in2
45	1128.66 lb./in2

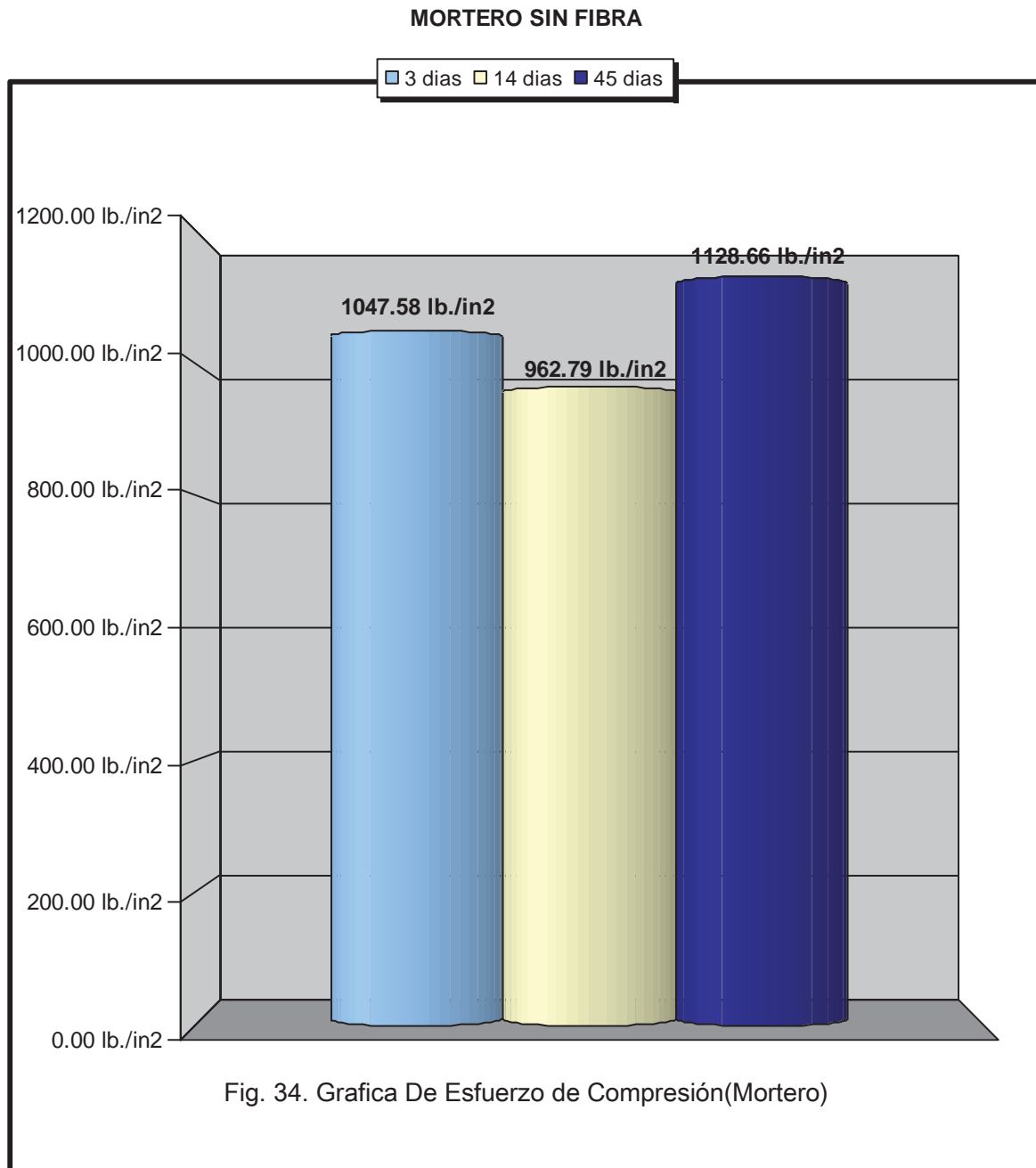


Fig. 34. Grafica De Esfuerzo de Compresión(Mortero)

Composición:
»Solución
»Marmolina con una relac. 1:2.5

Muestra:	Fecha de Elab.:	Días a Probar:	Fecha de Prueba:	Molaridad:
1	02-ago-07	3	05-ago-07	14
2	02-ago-07	3	05-ago-07	14
3	02-ago-07	3	05-ago-07	14
4	02-ago-07	14	16-ago-07	14
5	02-ago-07	14	16-ago-07	14
6	02-ago-07	14	16-ago-07	14
7	02-ago-07	45	16-sep-07	14
8	02-ago-07	45	16-sep-07	14
9	02-ago-07	45	16-sep-07	14

Muestra:	Propiedades Físicas								Propiedades Mecánicas			
	Cara Superior(in):		Cara Inferior(in):			h(in):	Área(in ²)	Carga Total (lb.):	Carga Total (Kg.):	Esfuerzo (lb./in ²)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	
1	1.96	x	1.91	1.92	x	1.97	2.00	3.76	13916.66	6312.50	3706.04	260.56
2	1.99	x	1.94	2.00	x	1.97	2.00	3.89	11353.79	5150.00	2915.66	204.99
3	2.00	x	1.96	2.00	x	1.94	2.00	3.89	15614.22	7082.50	4009.92	281.93
4	1.98	x	1.97	2.00	x	1.96	1.95	3.91	15790.59	7162.50	4038.78	283.95
5	1.98	x	1.93	1.98	x	1.93	1.97	3.81	15145.74	6870.00	3972.45	279.29
6	1.99	x	1.96	1.98	x	1.96	2.01	3.89	18347.95	8322.50	4711.56	331.26
7	1.96	x	1.98	2.01	x	2.01	1.96	3.95	8868.08	4022.50	2243.26	157.72
8	1.98	x	1.97	1.98	x	1.96	1.98	3.89	16716.53	7582.50	4292.50	301.79
9	1.98	x	2.00	1.98	x	1.98	1.99	3.94	11882.90	5390.00	3018.06	212.19



Fig. 35



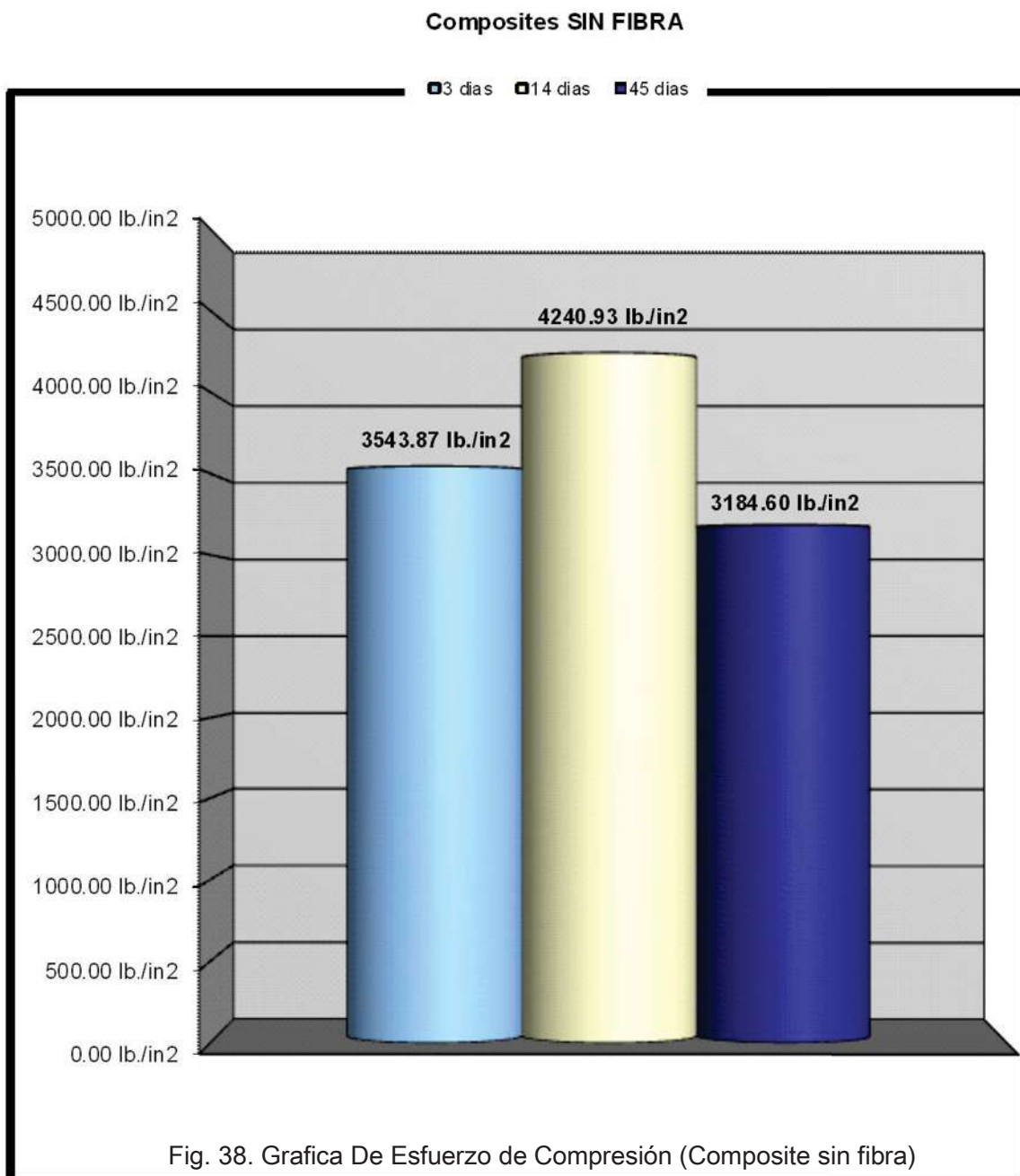
Fig. 36



Fig. 37

Fig. 35, Fig. 36 y Fig. 37 muestran la prueba y falla de la muestra del composite al esfuerzo de compresión.

Composites sin fibra:	
Días	Esfuerzo(lb./in ²)
3	3543.87 lb./in ²
14	4240.93 lb./in ²
45	3184.60 lb./in ²



Composición:
»Solución
»Marmolina con una relac. 1:2.5
»2% de Fibra AR(Zirconia)

Muestra:	Fecha de Elab.:	Días a Probar:	Fecha de Prueba:	Molaridad:
10	03-Ago-07	3	06-Ago-07	14
11	03-Ago-07	3	06-Ago-07	14
12	03-Ago-07	3	06-Ago-07	14
13	03-Ago-07	14	17-Ago-07	14
14	03-Ago-07	14	17-Ago-07	14
15	03-Ago-07	14	17-Ago-07	14
16	03-Ago-07	45	17-Sep-07	14
17	03-Ago-07	45	17-Sep-07	14
18	03-Ago-07	45	17-Sep-07	14

Muestra:	Propiedades Físicas								Propiedades Mecánicas			
	Cara Superior(in):		Cara Inferior(in):			h(in):	Área(in ²)	Carga Total (lb.):	Carga Total (kg.):	Esfuerzo (lb./in ²)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	
10	1.96	x	1.91	1.92	x	1.97	2.00	3.76	13916.66	6312.50	3706.04	260.56
11	1.99	x	1.94	2.00	x	1.97	2.00	3.89	11353.79	5150.00	2915.66	204.99
12	2.00	x	1.96	2.00	x	1.94	2.00	3.89	15614.22	7082.50	4009.92	281.93
13	1.99	x	1.98	2.00	x	1.98	1.97	3.95	18667.62	8467.50	4727.28	332.36
14	1.98	x	2.00	2.00	x	2.02	2.02	4.01	20789.57	9430.00	5187.18	364.70
15	2.00	x	2.00	1.98	x	2.01	2.00	3.99	19466.79	8830.00	4876.41	342.85
16	1.98	x	1.98	1.96	x	1.97	2.01	3.89	19640.96	8909.00	5053.43	355.29
17	1.99	x	2.00	1.98	x	1.98	2.00	3.95	19014.85	8625.00	4815.11	338.54
18	1.98	x	1.98	1.97	x	1.98	1.98	3.92	19367.59	8785.00	4943.55	347.57



Fig. 39

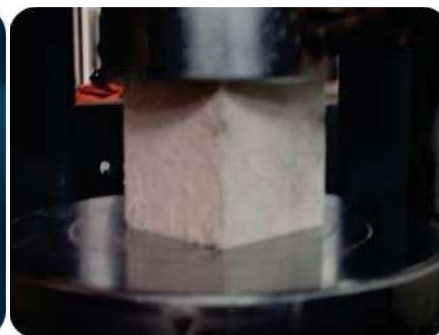


Fig. 40



Fig. 41

Fig. 39, Fig. 40 y Fig. 41 muestran la prueba y falla de la muestra del composite reforzado con fibra AR al esfuerzo de compresión.

2% fibra AR:	
Días	Esfuerzo(lb./in2)
3	3543.87 lb./in2
14	4930.29 lb./in2
45	4937.36 lb./in2

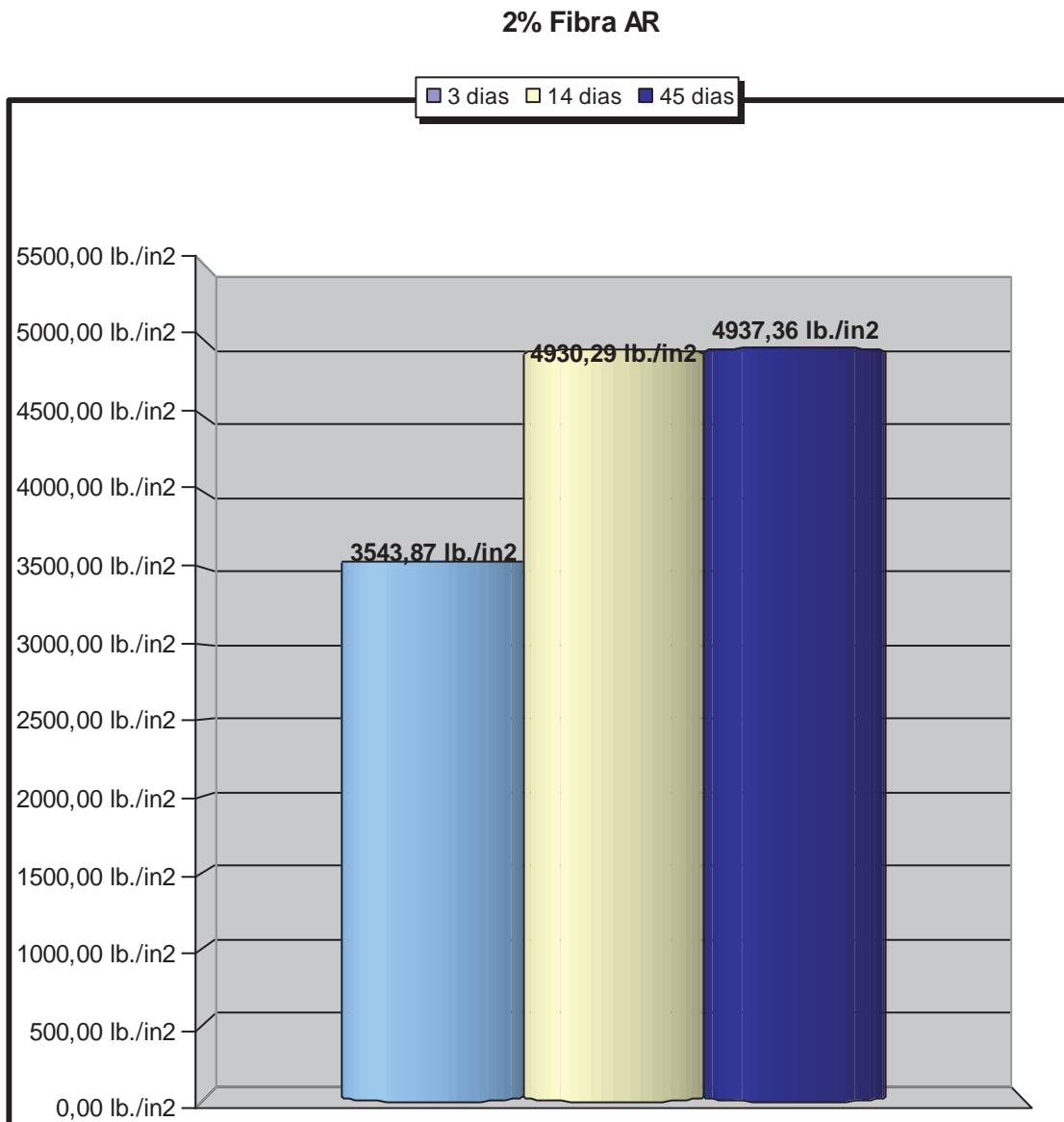


Fig. 42. Grafica De Esfuerzo de Compresión (Composite con 2% F. AR)

Composición:

- »Solución
- »Marmolina con una relac. 1:2.5
- »4% de Fibra AR(Zirconia)

Muestra:	Fecha de Elab.:	Días a Probar:	Fecha de Prueba:	Molaridad:
19	09-Ago-07	3	12-Ago-07	14
20	09-Ago-07	3	12-Ago-07	14
21	09-Ago-07	3	12-Ago-07	14
22	09-Ago-07	14	23-Ago-07	14
23	09-Ago-07	14	23-Ago-07	14
24	09-Ago-07	14	23-Ago-07	14
25	09-Ago-07	45	23-Sep-07	14
26	09-Ago-07	45	23-Sep-07	14
27	09-Ago-07	45	23-Sep-07	14

Muestra:	Propiedades Físicas								Propiedades Mecánicas			
	Cara Superior(in):		Cara Inferior(in):		h(in):	Área(in ²)	Carga Total (lb.):	Carga Total(Kg.):	Esfuerzo (lb./in ²)	Esfuerzo (Kg./cm ²)		
19	1.96	x	1.91	1.92	x	1.97	2.00	3.76	13916.66	6312.50	3706.04	260.56
20	1.99	x	1.94	2.00	x	1.97	2.00	3.89	11353.79	5150.00	2915.66	204.99
21	2.00	x	1.96	2.00	x	1.94	2.00	3.89	15614.22	7082.50	4009.92	281.93
22	2.00	x	2.03	2.00	x	2.04	2.00	4.07	11188.45	5075.00	2748.42	193.23
23	1.98	x	2.03	1.97	x	1.97	1.98	3.95	19654.19	8915.00	4972.00	349.57
24	2.01	x	2.03	2.00	x	2.02	2.01	4.06	22084.78	10017.50	5445.98	382.89
25	1.99	x	2.04	1.98	x	2.03	2.00	4.05	19698.28	8935.00	4867.55	342.22
26	1.98	x	2.00	1.98	x	2.01	1.97	3.97	20651.78	9367.50	5198.91	365.52
27	2.02	x	2.02	2.01	x	2.03	2.01	4.08	22426.50	10172.50	5503.30	386.92



Fig. 43



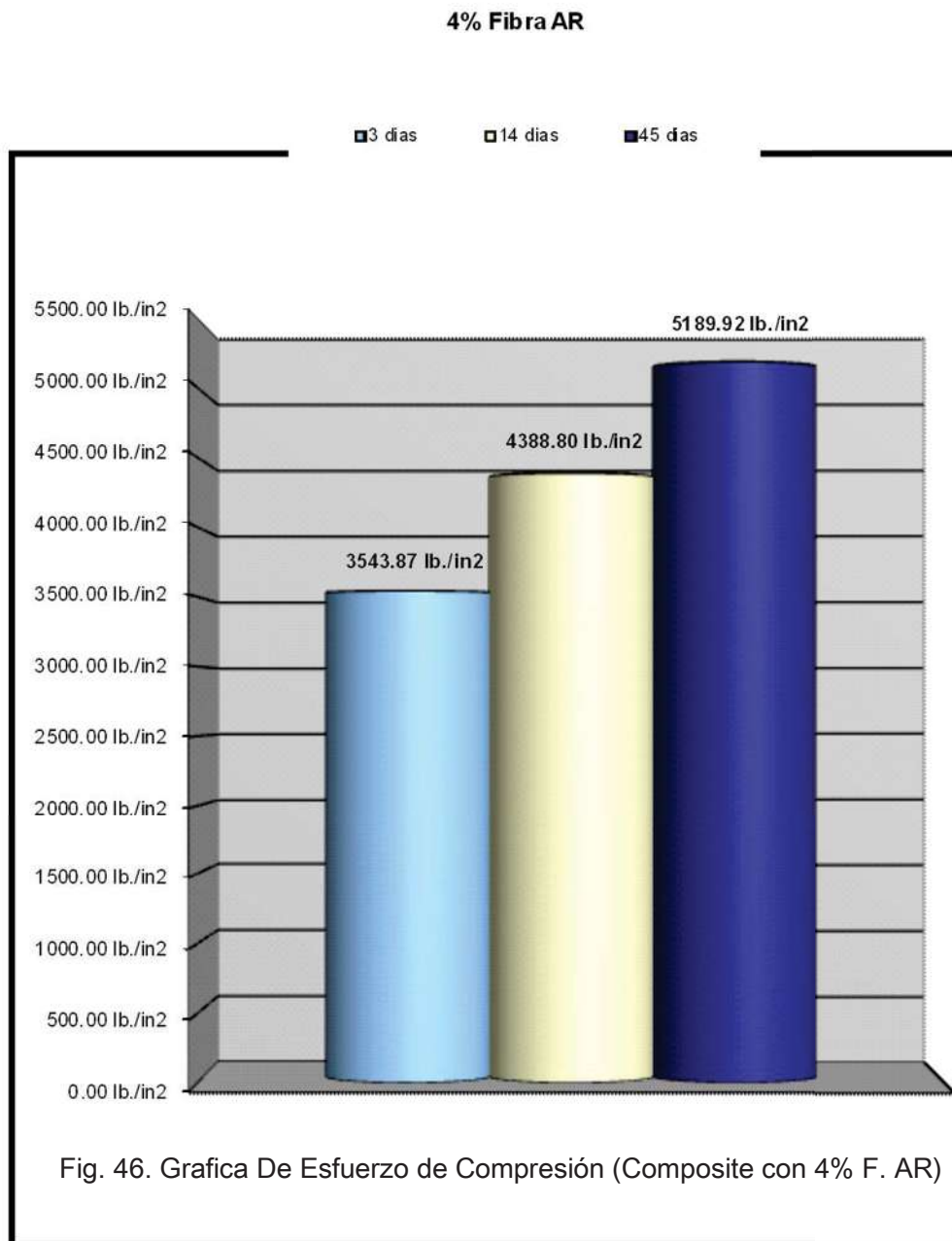
Fig. 44



Fig. 45

Fig. 43, Fig. 44 y Fig. 45 muestran la prueba y falla de la muestra del composite reforzado con fibra AR al esfuerzo de compresión.

4% fibra AR:	
Días	Carga Final(lb./in2)
3	3543.87 lb./in2
14	4388.80 lb./in2
45	5189.92 lb./in2



Composición:
»Solución
»Marmolina con una relac. 1:2.5
»6% de Fibra AR(Zirconia)

Muestra:	Fecha de Elab.:	Días a Probar:	Fecha de Prueba:	Molaridad:
28	14-Ago-07	3	17-Ago-07	14
29	14-Ago-07	3	17-Ago-07	14
30	14-Ago-07	3	17-Ago-07	14
31	14-Ago-07	14	28-Ago-07	14
32	14-Ago-07	14	28-Ago-07	14
33	14-Ago-07	14	28-Ago-07	14
34	14-Ago-07	45	28-Sep-07	14
35	14-Ago-07	45	28-Sep-07	14
36	14-Ago-07	45	28-Sep-07	14

Muestra:	Propiedades Físicas								Propiedades Mecánicas			
	Cara Superior(in):		Cara Inferior(in):		h(in):	Área(in ²)	Carga Total (lb.):	Carga Total(Kg.):	Esfuerzo (lb./in ²)	Esfuerzo (Kg./cm ²)		
28	1.98	x	2.04	1.99	x	2.04	2.01	4.05	13729.27	6227.50	3386.04	238.06
29	1.98	x	2.04	1.99	x	2.03	2.00	4.05	12930.10	5865.00	3195.15	224.64
30	1.99	x	2.03	1.98	x	2.02	2.00	4.02	11805.74	5355.00	2937.21	206.51
31	1.97	x	2.00	1.97	x	2.01	1.96	3.95	12175.01	5522.50	3083.35	216.78
32	2.00	x	2.05	2.00	x	2.08	2.00	4.13	12759.24	5787.50	3092.41	217.42
33	2.02	x	2.05	2.00	x	2.02	2.00	4.09	12814.35	5812.50	3135.37	220.44
34	1.98	x	2.04	1.98	x	2.04	1.96	4.03	13900.13	6305.00	3448.58	242.46
35	2.00	x	2.04	2.01	x	2.04	2.00	4.09	14274.91	6475.00	3489.48	245.34
36	1.97	x	2.02	1.98	x	2.02	1.96	3.99	14247.36	6462.50	3572.85	251.20



Fig. 47



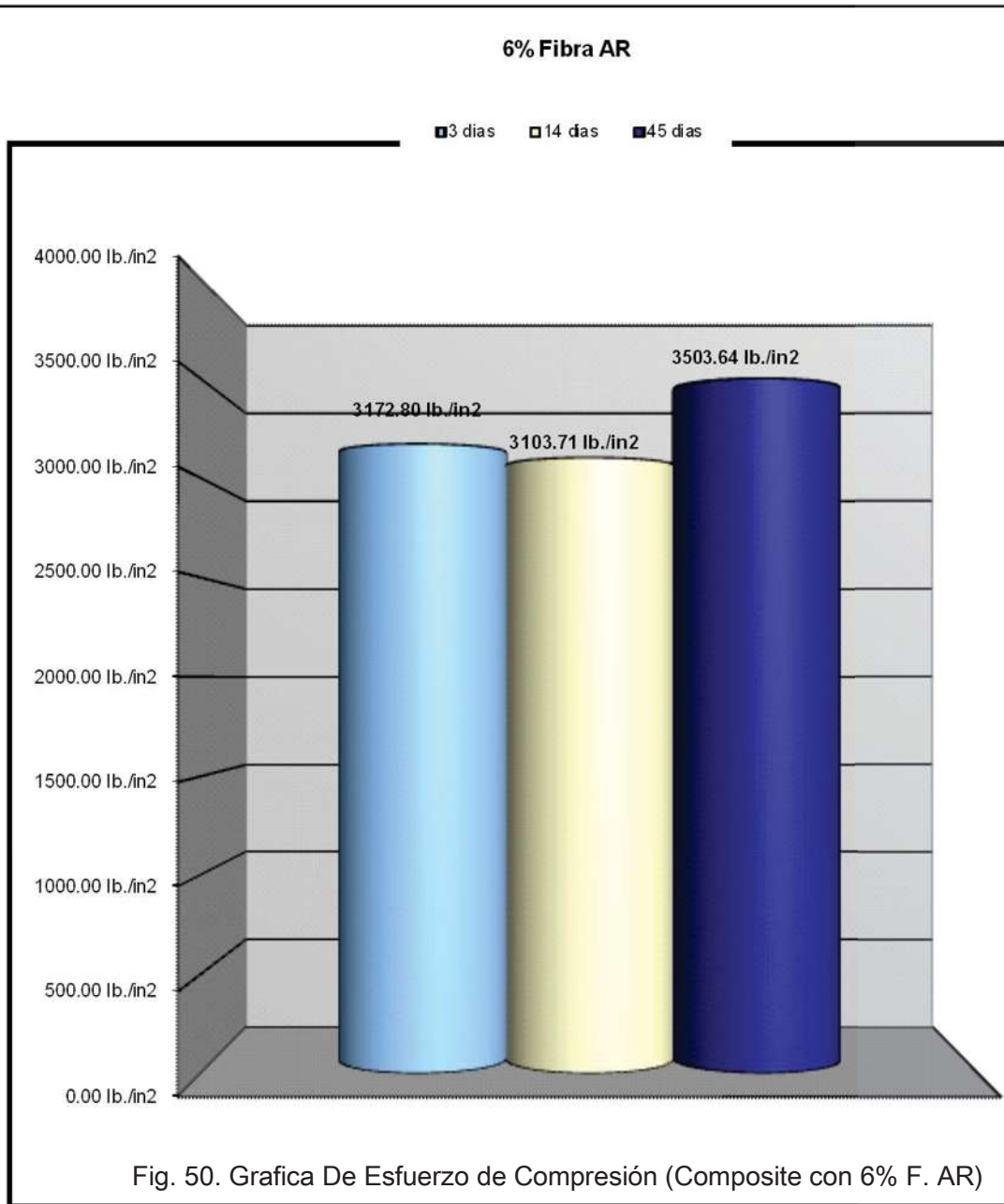
Fig. 48



Fig. 49

Fig. 47, Fig. 48 y Fig. 49 muestran la prueba y falla de la muestra del composite reforzado con fibra AR al esfuerzo de compresión.

6% fibra AR:	
Días	Carga Final(lb./in2)
3	3172.80 lb./in2
14	3103.71 lb./in2
45	3503.64 lb./in2



Composición:
»Solución
»Marmolina con una relac. 1:2.5
»2% de Fibra Basáltica

Muestra:	Fecha de Elab.:	Días a Probar:	Fecha de Prueba:	Molaridad:
37	15-Ago-07	3	18-Ago-07	14
38	15-Ago-07	3	18-Ago-07	14
39	15-Ago-07	3	18-Ago-07	14
40	15-Ago-07	14	29-Ago-07	14
41	15-Ago-07	14	29-Ago-07	14
42	15-Ago-07	14	29-Ago-07	14
43	15-Ago-07	45	29-Sep-07	14
44	15-Ago-07	45	29-Sep-07	14
45	15-Ago-07	45	29-Sep-07	14

Muestra:	Propiedades Físicas								Propiedades Mecánicas			
	Cara Superior(in):		Cara Inferior(in):		h(in):	Área(in ²)	Carga Total (lb.):	Carga Total (kg.):	Esfuerzo (lb./in ²)	Esfuerzo (Kg./cm ²)		
37	2.00	x	2.03	2.00	x	2.02	2.00	4.05	16407.88	7442.50	4054.09	285.03
38	2.00	x	2.02	2.03	x	2.02	2.00	4.07	16077.19	7292.50	3952.89	277.92
39	2.00	x	2.02	2.01	x	2.01	2.00	4.04	16810.23	7625.00	4161.56	292.59
40	1.97	x	1.97	1.97	x	1.99	1.97	3.89	10974.60	4978.00	2818.06	198.13
41	1.99	x	2.02	1.99	x	2.05	2.00	4.04	13189.14	5982.50	3262.24	229.36
42	2.01	x	2.02	2.00	x	2.04	1.99	4.08	14638.68	6640.00	3588.86	252.32
43	1.98	x	1.98	1.96	x	1.97	2.01	3.89	10328.64	4685.00	2657.46	186.84
44	1.99	x	2.00	1.98	x	1.98	2.00	3.95	12224.62	5545.00	3095.63	217.64
45	1.98	x	1.98	1.97	x	1.98	1.98	3.92	15018.97	6812.50	3833.57	269.53



Fig. 51



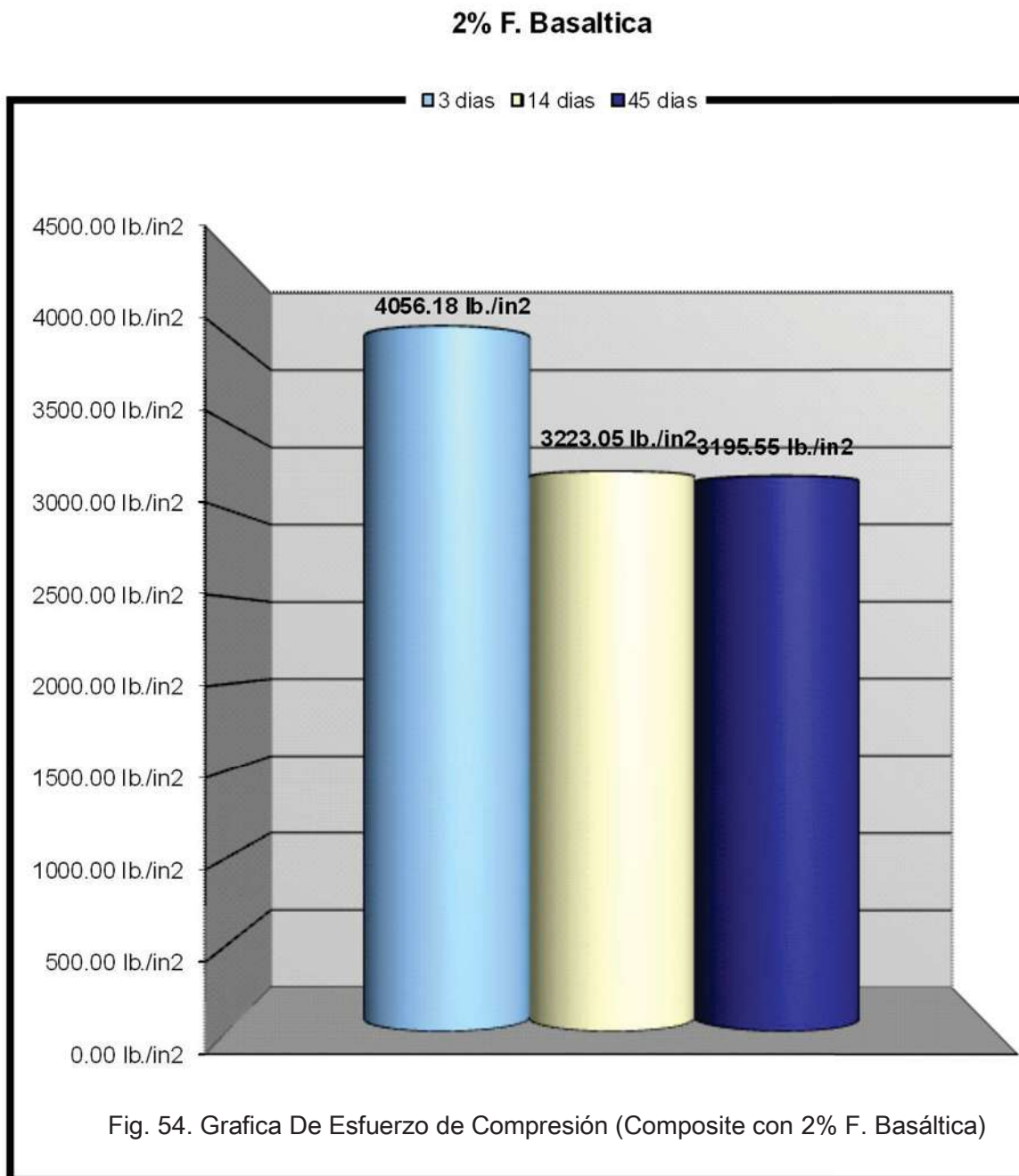
Fig. 52



Fig. 53

Fig. 51, Fig. 52 y Fig. 53 muestran la prueba y falla de la muestra del composite reforzado con fibra basáltica al esfuerzo de compresión.

2% fibra Basáltica:	
Días	Carga Final(lb./in2)
3	4056.18 lb./in2
14	3223.05 lb./in2
45	3195.55 lb./in2



Composición:
»Solución
»Marmolina con una relac. 1:2.5
»4% de Fibra Basáltica

Muestra:	Fecha de Elab.:	Días a Probar:	Fecha de Prueba:	Molaridad:
46	23-Ago-07	3	26-Ago-07	14
47	23-Ago-07	3	26-Ago-07	14
48	23-Ago-07	3	26-Ago-07	14
49	23-Ago-07	14	06-Sep-07	14
50	23-Ago-07	14	06-Sep-07	14
51	23-Ago-07	14	06-Sep-07	14
52	23-Ago-07	45	07-Oct-07	14
53	23-Ago-07	45	07-Oct-07	14
54	23-Ago-07	45	07-Oct-07	14

Muestra:	Propiedades Físicas								Propiedades Mecánicas			
	Cara Superior(in):		Cara Inferior(in):		h(in):	Área(in ²)	Carga Total (lb.):	Carga Total(Kg.):	Esfuerzo (lb./in ²)	Esfuerzo (Kg./cm ²)		
46	1.96	x 1.98	1.95	x 2.01	1.97	3.90	12610.43	5720.00	3231.94	227.23		
47	1.97	x 1.97	1.96	x 2.00	1.98	3.90	10604.22	4810.00	2720.33	191.26		
48	1.96	x 2.01	1.96	x 2.02	2.00	3.95	11425.44	5182.50	2893.87	203.46		
49	2.04	x 2.01	2.01	x 2.01	2.01	4.07	19995.90	9070.00	4911.61	345.32		
50	2.01	x 2.01	2.01	x 2.00	2.01	4.02	20458.87	9280.00	5089.65	357.84		
51	2.05	x 2.00	2.01	x 2.05	2.01	4.10	19279.40	8745.00	4699.37	330.40		
52	1.99	x 1.98	1.97	x 1.97	2.00	3.91	10708.94	4857.50	2741.60	192.75		
53	1.96	x 2.01	1.98	x 2.01	2.00	3.96	8074.42	3662.50	2038.78	143.34		
54	1.95	x 1.96	1.97	x 2.00	2.01	3.88	12852.93	5830.00	3310.16	232.73		



Fig. 55

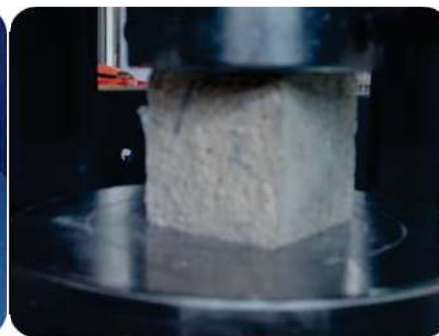


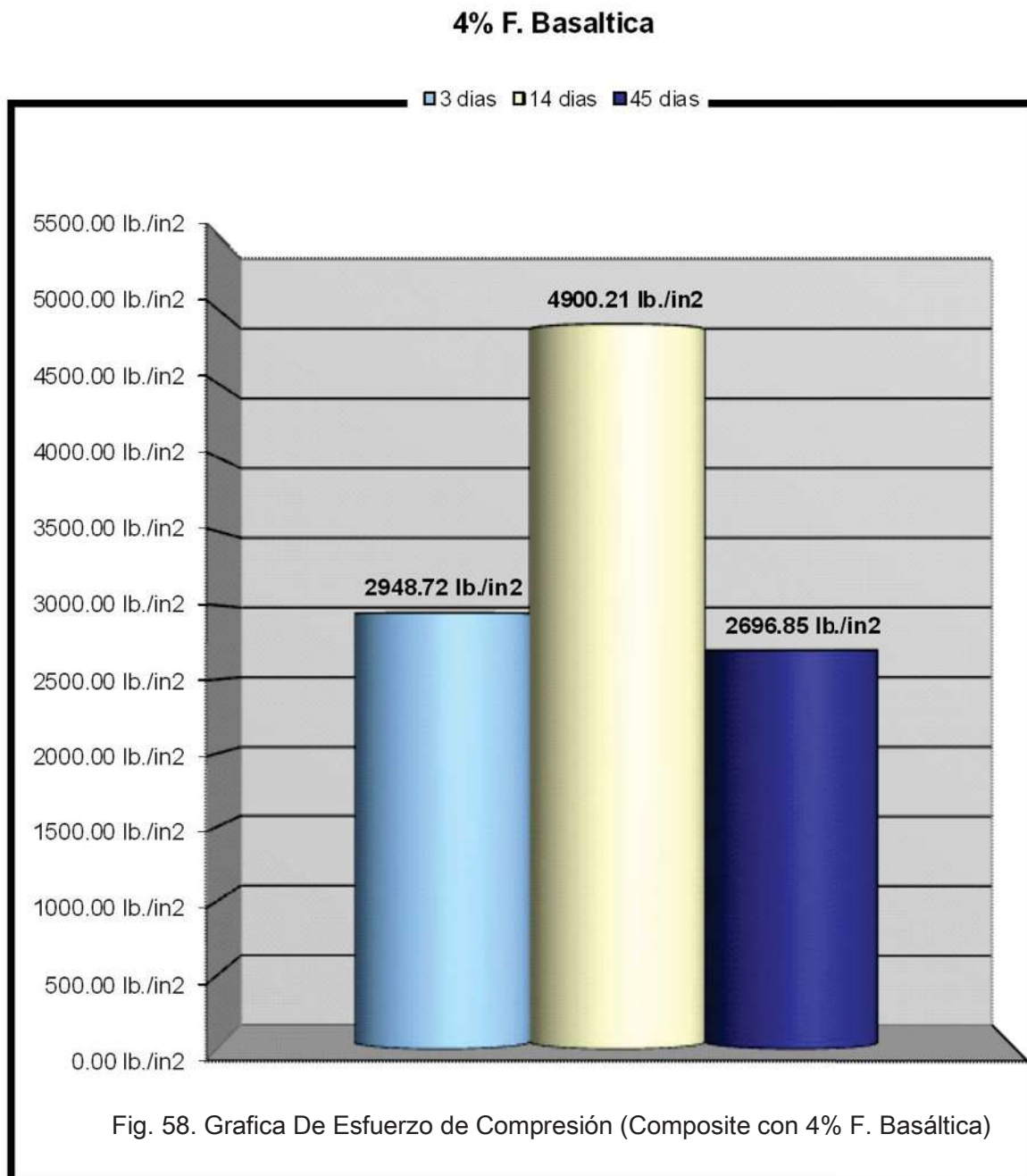
Fig. 56



Fig. 57

Fig. 55, Fig. 56 y Fig. 57 muestran la prueba y falla de la muestra del composite reforzado con fibra basáltica al esfuerzo de compresión.

4% fibra Basáltica:	
Días	Carga Final(lb./in2)
3	2948.72 lb./in2
14	4900.21 lb./in2
45	2696.85 lb./in2



Composición:

- »Solución
- »Marmolina con una relac. 1:2.5
- »6% de Fibra Basáltica

Muestra:	Fecha de Elab.:	Días a Probar:	Fecha de Prueba:	Molaridad:
55	03-Ago-07	3	06-Ago-07	14
56	03-Ago-07	3	06-Ago-07	14
57	03-Ago-07	3	06-Ago-07	14
58	03-Ago-07	14	17-Ago-07	14
59	03-Ago-07	14	17-Ago-07	14
60	03-Ago-07	14	17-Ago-07	14
61	03-Ago-07	45	17-Sep-07	14
62	03-Ago-07	45	17-Sep-07	14
63	03-Ago-07	45	17-Sep-07	14

Muestra:	Propiedades Físicas								Propiedades Mecánicas			
	Cara Superior(in):		Cara Inferior(in):		h(in):	Área(in ²)	Carga Total (lb.):	Carga Total(Kg.):	Esfuerzo (lb./in ²)	Esfuerzo (Kg./cm ²)		
55	1.98	x	1.98	1.96	x	1.97	2.01	3.89	11644.80	5282.00	2996.10	210.65
56	2.01	x	2.00	2.00	x	1.99	1.99	4.00	9587.89	4349.00	2394.60	168.36
57	1.97	x	1.97	1.98	x	1.98	2.00	3.90	10872.08	4931.50	2786.15	195.89
58	1.99	x	1.98	1.98	x	1.99	1.97	3.94	13933.20	6320.00	3538.82	248.80
59	1.96	x	1.95	1.96	x	1.96	2.01	3.84	12737.19	5777.50	3320.13	233.43
60	1.98	x	2.04	1.98	x	2.04	1.96	4.03	14104.06	6397.50	3499.17	246.02
61	2.01	x	2.00	1.99	x	1.98	1.98	3.98	14565.92	6607.00	3659.40	257.28
62	1.97	x	1.97	1.97	x	1.98	2.01	3.89	13829.58	6273.00	3551.13	249.67
63	1.95	x	1.96	1.97	x	1.98	1.98	3.87	13108.67	5946.00	3389.60	238.31



Fig. 59



Fig. 60

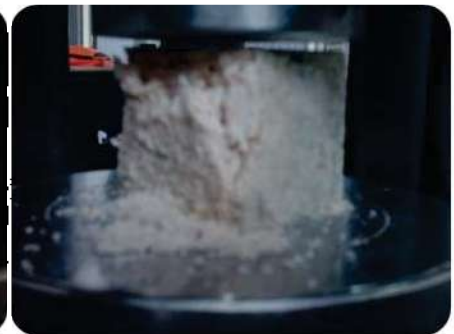
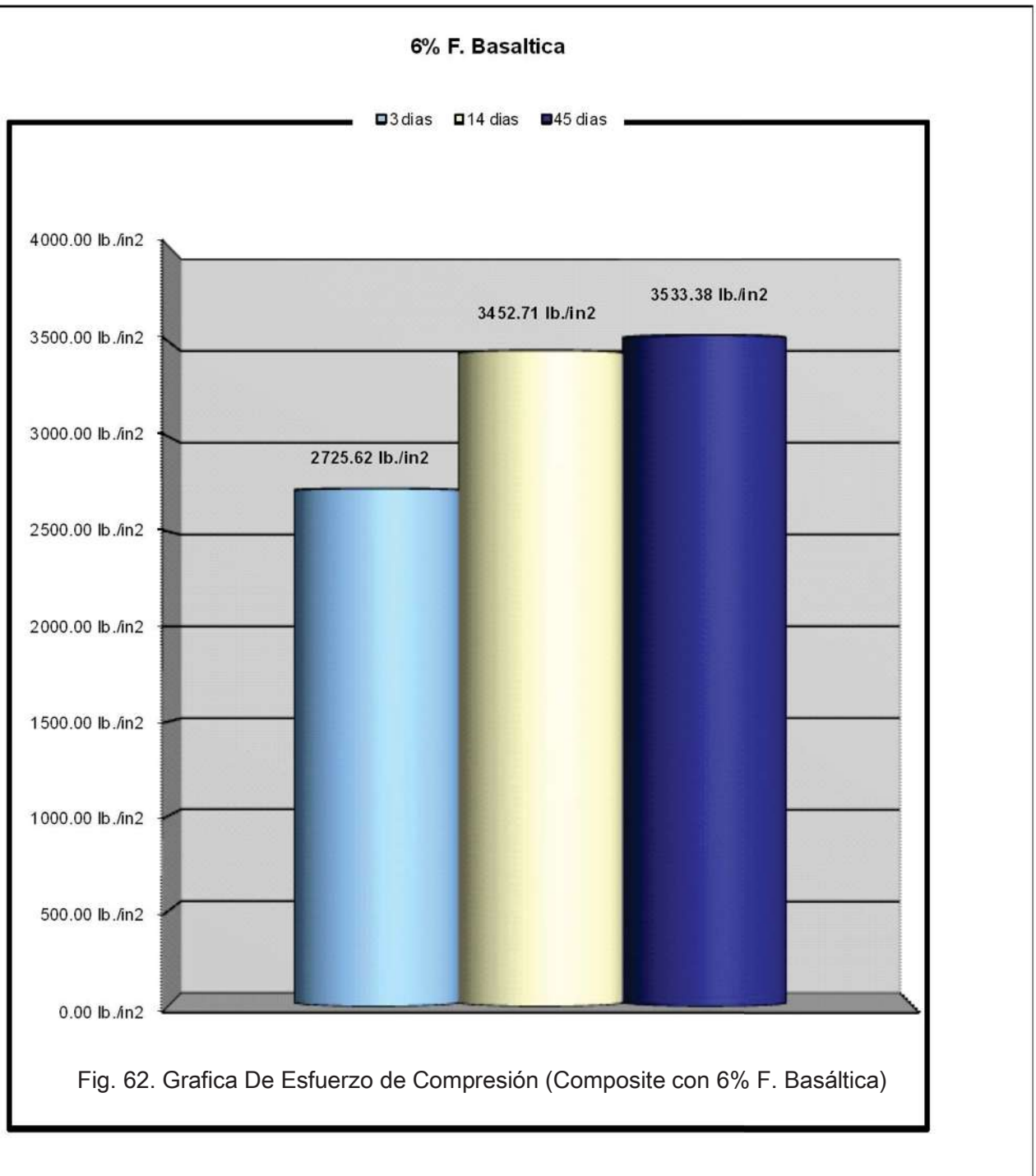


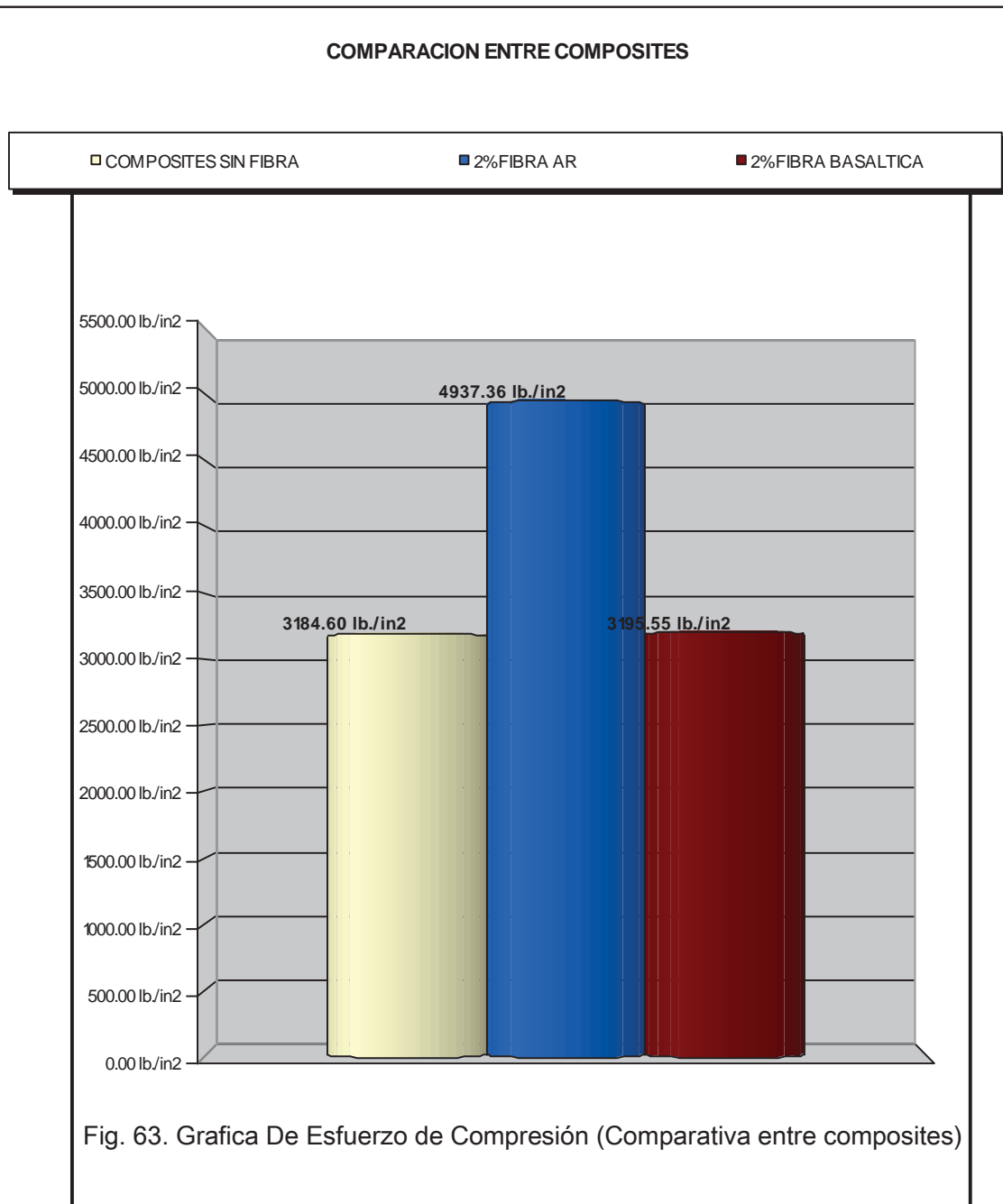
Fig. 61

Fig. 59, Fig. 60 y Fig. 61 muestran la prueba y falla de la muestra del composite reforzado con fibra basáltica al esfuerzo de compresión.

6% fibra Basáltica:	
Días	Carga Final(lb./in2)
3	2725.62 lb./in2
14	3452.71 lb./in2
45	3533.38 lb./in2



Comparativa de los composites:	
Tipo	Carga Final(lb./in2)
Composites(0% Fibra)	3184.60 lb./in2
2% Fibra AR	4937.36 lb./in2
2% Fibra Basáltica	3195.55 lb./in2



Comparativa de los composites:	
Tipo	Carga Final(lb./in2)
Composites(0% Fibra)	3184.60 lb./in2
4% Fibra AR	5189.92 lb./in2
4% Fibra Basáltica	2696.85 lb./in2

COMPARACION ENTRE COMPOSITES

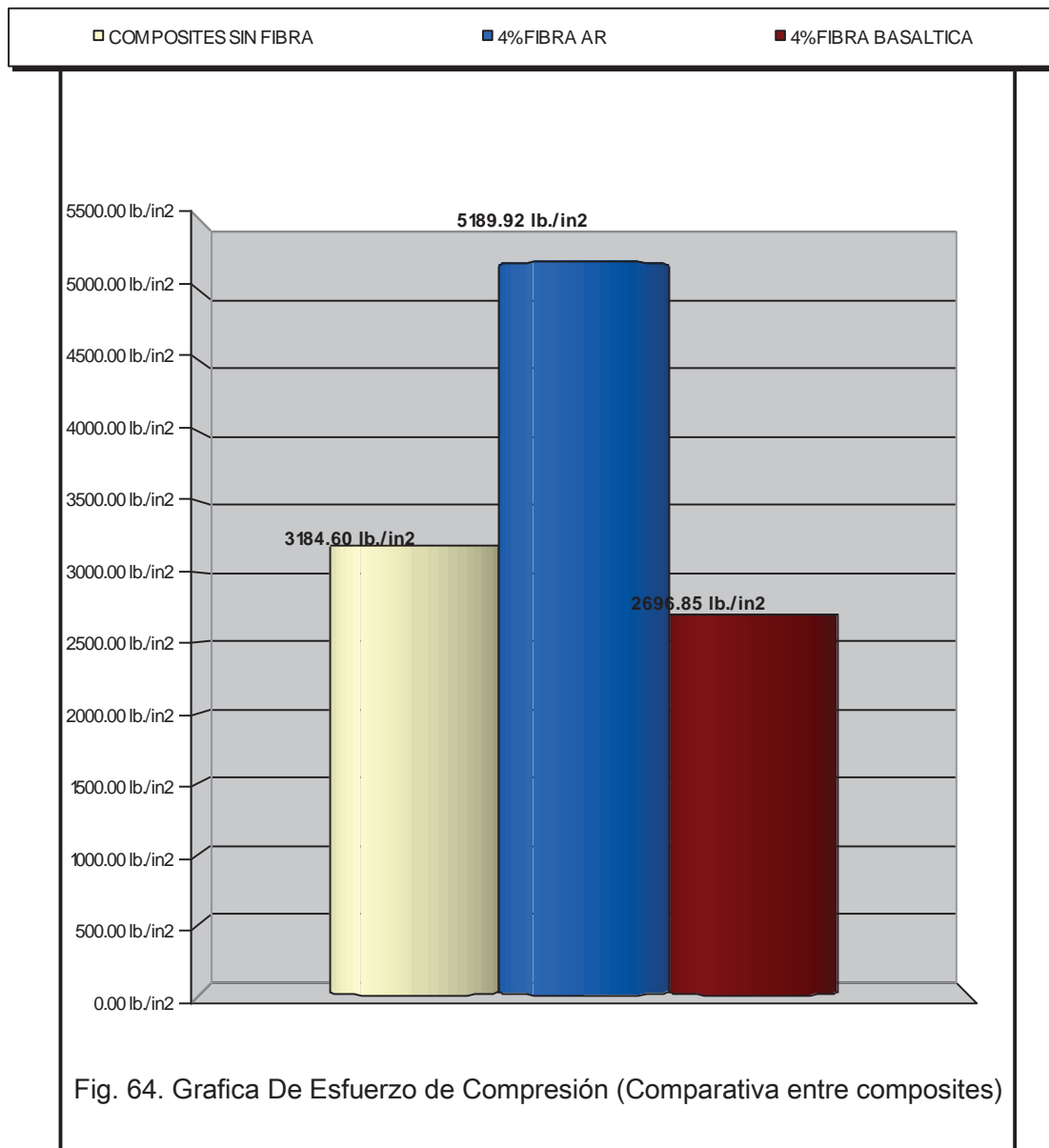


Fig. 64. Grafica De Esfuerzo de Compresión (Comparativa entre composites)

Comparativa de los composites:	
Tipo	Carga Final(lb./in2)
Composites(0% Fibra)	3184.60 lb./in2
6% Fibra AR	3503.64 lb./in2
6% Fibra Basáltica	3533.38 lb./in2

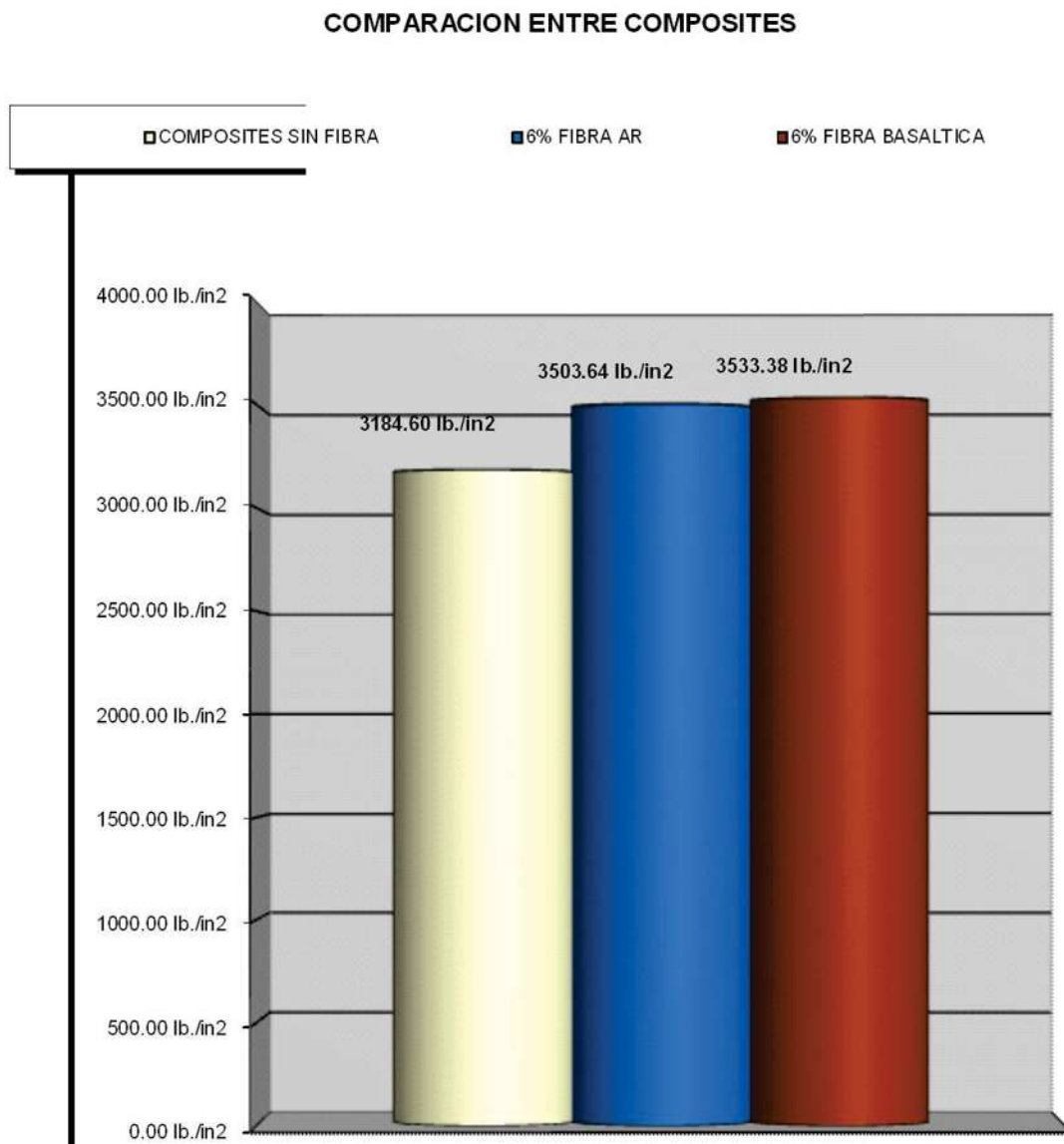


Fig. 65. Grafica De Esfuerzo de Compresión (Comparativa entre composites)

6. PROPIEDADES MICRO ESTRUCTURALES.

6. PROPIEDADES MICRO ESTRUCTURALES.

La micro estructura del composite inorgánico rige las propiedades macro estructurales (esfuerzo de compresión, flexión, etc.). Por está razón se realizó microscopía electrónica de barrido en las muestras del composite inorgánico. En la figura a, se muestra el composite reforzado con fibras AR se ve la cantidad de fibras de refuerzo de la matriz y se aprecia que la matriz es de naturaleza amorfa.

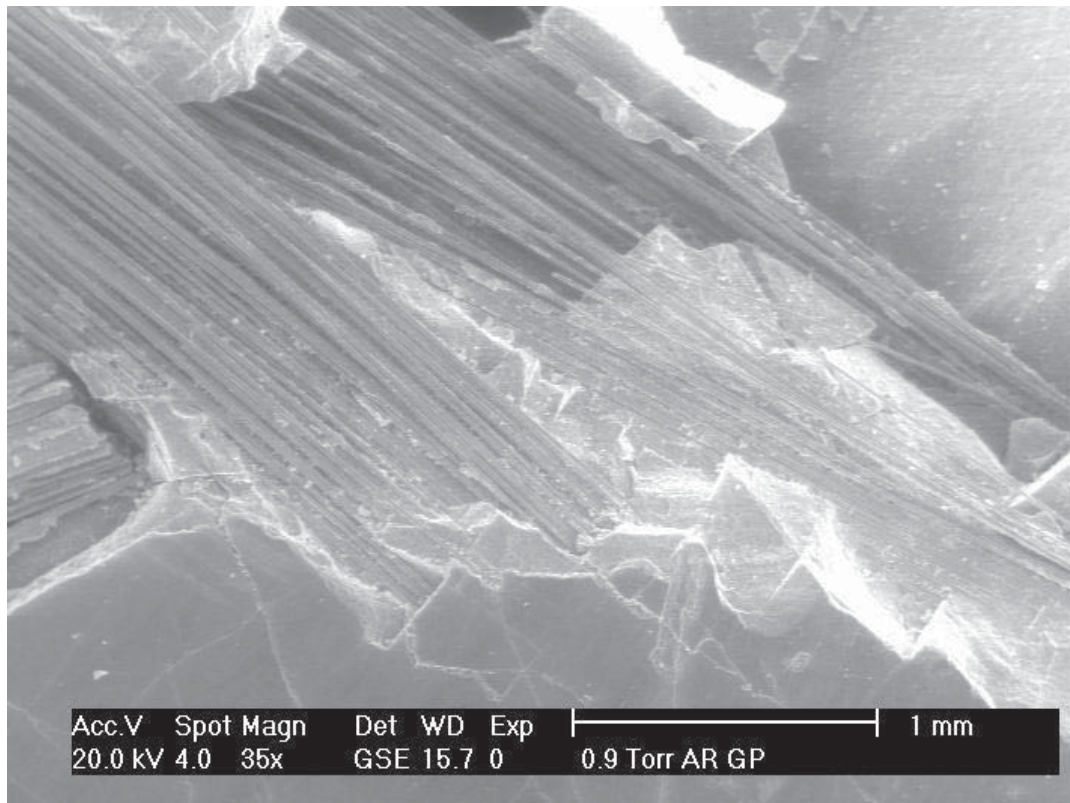


Figura a. *composite inorgánico reforzado con fibras AR.*

En la figura b se aprecia el composite inorgánico reforzado con las fibras basálticas. Observe su distribución en la matriz inorgánica. La matriz formada por aluminosilicatos potásicos hidratados presentan una estructura amorfa, imposible de visualizar perfectamente por medio de ésta técnica. Para una apreciación más profunda se requiere del análisis de las muestras por medio de microscopía electrónica de transmisión. Adicionalmente, se aprecia claramente que cada fibra inter-actúa con la matriz generando un efecto de micro-refuerzo en la pasta inorgánica. La cual por ser de origen nano-métrico presenta una micro estructura densa y cerrada similar a los vidrios, pero con una resistencia altamente superior.

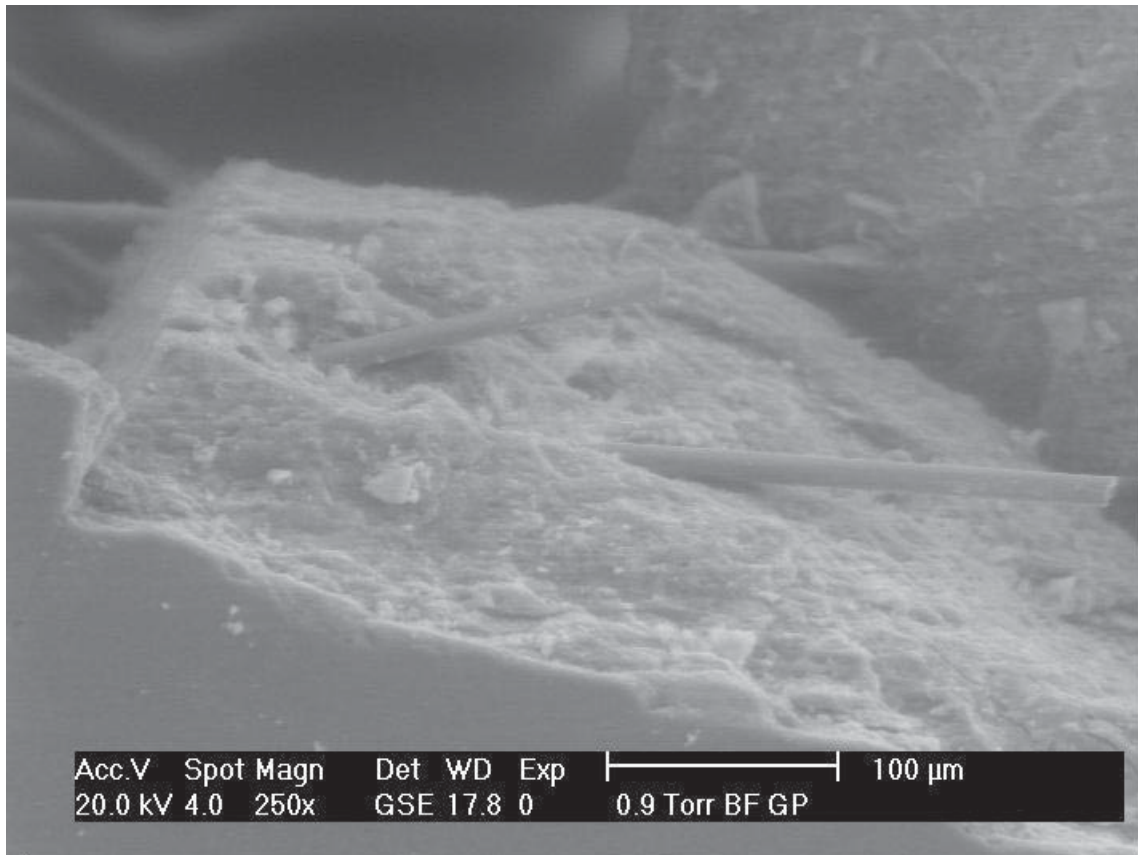


Figura b, *composite inorgánico reforzado con fibras basálticas.*

7. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN.

7. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN:

1. El proyecto de investigación realizado arrojó resultados y conclusiones muy interesantes ya que el composite inorgánico resultó ser estable y de muy buen desempeño mecánico y si a esto se añade, que la matriz formada por aluminosilicatos potásicos se reforzó con marmolina gruesa como agregado y dos tipos de fibra como son: la fibra de vidrio y basáltica. Dando como resultado una mayor resistencia al esfuerzo de compresión con ambas fibras, pero siendo a su vez superior la fibra de vidrio, debido a su estructura cerrada y rígida.

2. En relación a la prueba de absorción se determinó que el composite inorgánico desarrollado tiene una absorción alta esto debido a que su densidad es muy baja y por lo que parece porosa, además no se contempla que halla absorción por parte de las fibras y la marmolina ya que posee una densidad alta y sin porosidad.

3. La prueba de flamabilidad demostró que composite inorgánico desarrollado presentó un desempeño excelente ya tiene una resistencia al fuego total por el hecho de que no afectó su apariencia física e integridad esto debido a que su estructura molecular es inorgánica.

4. A través de la micro estructura se pudo apreciar claramente que tanto las fibras basálticas como de vidrio incrementan las propiedades mecánicas debido a una excelente interfase fibra-matriz. Estas fibras actúan como pequeñas varillas (microscópicas) embebidas y distribuidas en forma aleatoria en la matriz mejorando la transmisión de esfuerzos a través del sólido.

5. Se recomienda continuar con los trabajos de investigación en el área de composites inorgánicos para obtener resultados más completos que puedan llevar a una aplicación industrial y/o social.

8. BIBLIOGRAFÍAS.

8. BIBLIOGRAFÍAS:

- 1.- Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales de William F. Smith;
Edit. Mc Graw Hill.
- 2.- Composite Materials “Science and Engineering” de Krishn K. Chawla; Edit Springer.
- 3.- El texto de este artículo fue tomado de la tesina presentada por el autor Ingeniero Humberto Alejandro Girón Vargas en el Diplomado de Obras de Concreto que imparten la Facultad de Arquitectura de la UNAM y el IMCYC.
- 4.- <http://www.imcyc.com/revista/1998/oct/ataque.htm>
- 5.- www.plasticosbacino.com.ar
- 6.- www.texiglass.com.br/imagens/carbono.gif
- 7.- www.fibertex.com.br/plastico_reforzado.htm
- 8.- www.ukrindustrial.com
- 9.- www.ieca.es/fabcemento.php
- 10.- <http://es.wikipedia.org/wiki/Cemento>