



Influencia de los componentes del concreto reforzado con fibras en sus propiedades mecánicas.

Luis Octavio González Salcedo
Profesor Asociado

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE PALMIRA

Palmira – 2013

Resumen.

El concreto es un material de construcción y estructural por excelencia, elaborado con cemento, agua, agregados, adiciones minerales y aditivos químicos. Sin embargo, es conocido también como un material quebradizo, característica que es contrarrestada con la incorporación de un volumen de fibra como reforzamiento de su matriz basada en cemento. La incorporación de fibra hace que se denomine como concreto reforzado con fibra, o simplemente fibrorreforzado, y se caracteriza como un material cuasi-dúctil, con una ganancia en el aumento de la mayoría de sus propiedades mecánicas, y de la capacidad de resistir cargas más allá de la aparición de la primera grieta, capacidad que llamada tenacidad. En el presente documento, se hace una revisión investigativa de las principales características del concreto reforzado con fibras, a partir de los diferentes aportes que realizan sus componentes (cemento, agregados, adiciones en general, y fibra) sobre sus propiedades mecánicas.

Palabras Claves: Concreto, Fibras, Concreto Fibrorreforzado, Material de Construcción, Material Estructural, Materiales Cerámicos, Propiedades Mecánicas.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es indudablemente uno de los materiales de construcción más ampliamente usado en el mundo, con una amplia expectativa hacia el futuro, de tal manera que investigaciones sustanciales y actividades de desarrollo han sido tomadas en el área de la ingeniería y tecnología del concreto para investigar e innovar sobre las propiedades del material, el comportamiento estructural y sus aplicaciones, así como sobre las prácticas de construcción con el concreto; esto ha resultado en nuevas generaciones de concretos siendo constantemente improvisado y desarrollado en el sentido de encontrar el continuo incremento de la demanda para una manejabilidad y propiedades mecánicas y de durabilidad superiores, y que han sido utilizadas exitosamente en numerosas aplicaciones de la ingeniería estructural y de la construcción de obras civiles [Raman et al. 2007].

El concreto reforzado con fibras es un concreto elaborado principalmente de cemento, agregados y reforzamiento con fibras discretas, cuyo papel de éstas en una forma discreta, discontinua y aleatoriamente distribuidas es el de crear un puente a través de las grietas que desarrolla el concreto cuando es cargado o cuando es sometido a cambios ambientales extremos; el concreto reforzado con fibras esta hoy en día firmemente establecido como un material de construcción, y uno de sus grandes beneficios es alcanzar una utilidad a largo plazo de la estructura, entendiéndose la utilidad como la disponibilidad de la estructura específica para mantener su resistencia e integridad, y proveer su función diseñada sobre la vida útil proyectada [Saif Eldeen & Taniguchi 2007].

En la determinación de la dosificación de las mezclas de concreto se encuentran incertidumbres alrededor de los materiales, la temperatura, las situaciones ambientales del sitio, ventajas y desventajas de la mano de obra, y errores en los procesos de cálculo y ensayo, razón por la cual los correspondientes ajustes deben hacerse para una apropiada dosificación, haciendo entonces del diseño de mezclas del concreto algo complicado, con consumo de tiempo y tareas inciertas (Oh et al. 1997). Aún muchos factores oscuros influyen el diseño de mezclas de concreto y sus relaciones mutuas son también complicadas de tal manera que esto es imposible para formular modelos matemáticos que expresen sus acciones y reacciones mutuas (Oh et al. 1997). Los ajustes son siempre desarrollados teniendo en cuenta la información de las pruebas de control de calidad del

concreto y otras investigaciones disponibles, y por la experiencia y asesoría de los expertos, sin embargo al final las dosificaciones de las mezclas a través de los ajustes es aún una estadística conteniendo las diversas incertidumbres y errores (Oh et al. 1997).

Desde que el diseño de mezclas razonable y su ajuste es ciertamente algo complicado, consume tiempo, y tareas tediosas que son fáciles para ser negligentes en ejecutarse y así como esto muchas veces no es posible para ser ayudadas por expertos, existen entonces esfuerzos para desarrollar sistemas expertos aplicados al diseño de mezclas de concretos, incluyendo los ajustes, como una herramienta valiosa (Oh et al. 1997). En estos sistemas expertos se trata de ayudar al usuario del diseño de mezclas de concreto, pero esto es aún imposible para los vacíos de los errores personales, físicos y mecánicos, y las incertidumbres encontradas en los materiales, ambientes de los ensayos, ambientes en la construcción, y otros factores como el transporte, la colocación y las condiciones climáticas (Oh et al. 1997). Se hace entonces necesario desarrollar herramientas que permitan reducir las incertidumbres y los errores que son aún vacíos en el diseño de las mezclas de concretos y sus respectivos ajustes necesarios. Un punto de partida es el conocimiento relacionado con la influencia de los diversos materiales componentes de una mezcla de concreto, sobre sus propiedades mecánicas.

En este documento una revisión general sobre información se realiza sobre la influencia de los materiales en las propiedades mecánicas, relacionadas con las propiedades mecánicas (resistencia a compresión, resistencia a tracción, resistencia a cortante, resistencia a flexión, e índices de tenacidad flexural); la construcción de información se realiza a partir de una consideración inicial de que la resistencia de los concretos reforzados con fibras, depende de la resistencia del mortero (mezcla de cemento, agua y arena) y los efectos que sobre ésta tienen el agregado grueso y la interface entre estos dos compuestos, el contenido de aire, las adiciones minerales, y la adición de fibra como refuerzo de la matriz cementicia [Karam 1997; Maruyama et al. 2001; Noguchi et al. 2003; Van Chanh 2005; Richardson 2006].

2. VARIABLES DE INFLUENCIA SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS (RESISTENCIAS A ESFUERZOS) DEL MORTERO (MATERIAL CEMENTANTE, AGREGADO FINO Y AGUA)

De acuerdo con Maruyama et al. 2001; Noguchi et al. 2003, la resistencia del mortero depende del tipo de cemento, y de las cantidades de agua y cementante (la totalidad de cemento y adiciones minerales puzolánicas). Para diversos Autores [ASOCRETO 1997; Sánchez 2000; Latorre 2008], en Colombia se

producen once tipos de cemento, acorde con la norma NTC30, de los cuales se comercializan principalmente cinco: de uso general (Tipo I), de moderado calor de hidratación y de resistencia moderada a los sulfatos (Tipo II), de altas resistencias a temprana edad (Tipo III), de bajo calor de hidratación (Tipo IV), y de alta resistencia a los sulfatos (Tipo V). Maruyama et al. 2001; Noguchi et al. 2003, consideran cuatro tipos de cementos: Portland ordinario (OPC), de bajo calor de hidratación (LHC), de moderado calor de hidratación (MCH), y de altas resistencias a temprana edad (HESC). Basado en la anterior se pueden considerar dos clasificaciones, tipo y clase respectivamente, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla A.4.1. Consideración de la clasificación del cemento como variable de entrada.

Variable	Cemento*
Tipo de cemento	Tipo I, de uso general, OPC. Tipo II, de moderado calor de hidratación y de resistencia moderada a los sulfatos, MCH. Tipo III, de altas resistencias a temprana edad, HESC. Tipo IV, de bajo calor de hidratación, LCH. Tipo V, de alta resistencia a los sulfatos.
Clase de cemento	Tipo I, de uso general, OPC. Tipo II, de moderado calor de hidratación y de resistencia moderada a los sulfatos, MCH, Tipo IV, de bajo calor de hidratación, LCH. Tipo III, de altas resistencias a temprana edad, HESC Tipo V, de alta resistencia a los sulfatos.

*La clasificación "tipo", corresponde al cemento producido por la Industria de Colombia.

3. EFECTO DE LOS AGREGADOS

Para Maruyama et al. 2001; Noguchi et al. 2003, el efecto del agregado grueso sobre la resistencia del concreto depende de su cantidad, su rango de tamaños (diferencia entre el tamaño máximo y el tamaño mínimo) y su origen desde el punto de vista de producción, diferenciando entre el agregado triturado y de canto rodado, así como la relación agua cementante empleada en la mezcla de concreto. Alsayed & Amjad 1996; Chan et al. 2003, Vu et al. 2011, han discutido que no solamente la resistencia del agregado (que depende de su origen geológico) afecta la resistencia del concreto, y que otras características también pueden afectar, siendo ellas el tamaño, la forma, la textura de superficie y mineralogía, puesto que influyen en las características de la zona de transición.

Para Alsayed & Amjad 1996; Chan et al. 2003, Vu et al. 2011, en la interrelación mecánica entre la matriz y el agregado grueso, la adherencia es una consecuencia de la textura superficial; al respecto, la roca triturada produce una adherencia superior comparado con la grava de canto rodado. De igual manera, han discutido el efecto del tamaño máximo y la cantidad del agregado, así como la demanda de agua por parte de los mismos que determina el contenido de cemento y pasta para una determinada resistencia del concreto; lo anterior, es concordante con la

consideración hecha por Maruyama et al. 2001; Noguchi et al. 2003; la Tabla 2 muestra la consideración de la fuente de procedencia de los agregados.

Tabla 2. Consideración de la fuente de procedencia de los agregados como variable de entrada.

Variable	Fuente de procedencia
Agregado fino: Arena	Lecho de río o canto rodado. Cantera o triturado.
Agregado grueso: Grava	Lecho de río o canto rodado. Cantera o triturado.

Para Akçaoğlu et al. 2002, Chan et al. 2003, existe una debida importancia en las propiedades y el comportamiento de la zona de interface (ITZ, del inglés *Interfacial Transition Zone*) entre el agregado grueso y el mortero que lo rodea, en razón a que ante la aplicación de cargas en el concreto, el micro agrietamiento se inicia generalmente en dicha zona; y posteriormente en el momento de la falla ante el incremento de las cargas, el patrón de grietas siempre incluye a la interface. La micro estructura de la ITZ es grandemente influenciada por la situación que existe en la cubierta final, donde las partículas de cemento son incapaces de unirse estrechamente con las partículas relativamente grandes del agregado, y en consecuencia, la pasta de cemento endurecida en la ITZ tiene una mayor porosidad mucho mayor que la pasta de cemento endurecida más alejada de las partículas del agregado [Akçaoğlu et al. 2002, Chan et al. 2003]; y bajo este contexto, Akçaoğlu et al. 2002, Chan et al. 2003, consideran la importancia de considerar la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento endurecida que lo rodea, reconociendo a la interface como un elemento de gran importancia en el modelo estructural del concreto. Al respecto, Gardoni et al. 2007, discuten basados en ensayos de microscopía electrónica de barrido SEM, la influencia de las características mineralógicas del agregado en la afectación de la microestructura de la ITZ, concluyendo que la calidad de la ITZ es de importancia y afecta tanto la resistencia como el valor del módulo de elasticidad del concreto.

En las expresiones tradicionales para el cálculo del módulo de elasticidad del concreto [Karam 1997; ACI 318 2005; NSR-10 2010], ninguna de ellas considera la adherencia (plano de pegado) entre el agregado y la pasta endurecida de cemento cercana a la partícula, y la adherencia depende de la micro estructura de la ITZ [Akçaoğlu et al. 2002, Chan et al. 2003]; adicional a la adherencia, la forma de las partículas del agregado grueso y sus características superficiales, así como su tamaño máximo, influyen también en el valor del módulo de elasticidad del concreto, y en la curvatura de la gráfica que representa la relación esfuerzo – deformación, de donde puede ser calculado dicho módulo [Akçaoğlu et al. 2002, Chan et al. 2003]. Investigaciones exploratorias, han mostrado que para iguales diseños de mezclas conducentes a una resistencia de diseño, el uso de diversas procedencias geológicas conllevan a obtener una diferenciación en las propiedades mecánicas (tanto en la resistencia a compresión como en el módulo

de elasticidad), relacionadas directamente con la resistencia del agregado grueso

usado [Folino et al. 2007; Will et al. 2008], lo cual es concordante con las discusiones realizadas por Akçaoğlu et al. 2002, Chan et al. 2003.

En esta revisión que hace en este documento, el Autor a partir de relación existente entre la resistencia del concreto y su respectivo módulo de elasticidad, adapta como un parámetro del agregado grueso el tipo litológico que permita representar su tipo de mineral y origen geológico, de acuerdo con la afectación de las propiedades mecánicas (resistencia y módulo de elasticidad). Esta adaptación se inicia a partir del análisis en diversas investigaciones [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; Nemati et al. 2008; Noguchi et al. 2009], que muestran, como en la figura 1, que no sólo la densidad del agregado es influyente, sino también el origen geológico y el tipo de mineral de agregado usado.

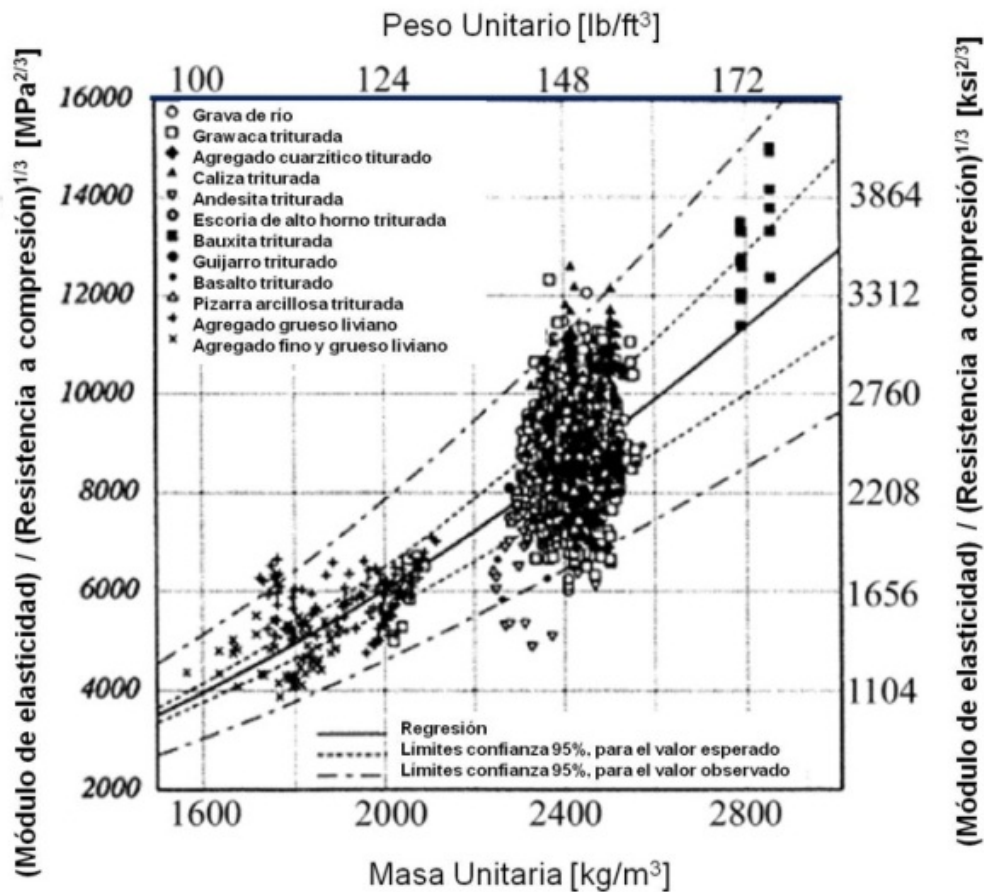


Figura 1. Relación entre la densidad o el peso unitario del agregado y la relación (módulo de elasticidad) / (resistencia a compresión)^{1/3}, haciendo distinción en el origen geológico y tipo de mineral del agregado usado [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; Nemati et al. 2008; Noguchi et al. 2009].

Estas investigaciones también muestran que el origen geológico y el tipo de mineral, representados en lo que se denominará como el tipo litológico, debe ser

considerado como un parámetro del agregado grueso que afecta las propiedades

mecánicas del concreto [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; Nemati et al. 2008; Noguchi et al. 2009], como se muestra en la figura 2, en la cual la relación entre los valores estimados (con ecuaciones tradicionales) y medidos experimentalmente del módulo de elasticidad, define un rango donde estos valores requieren ser ajustados mediante un factor de corrección, mínimo y máximo, entre 0.9 y 1.2, respectivamente.

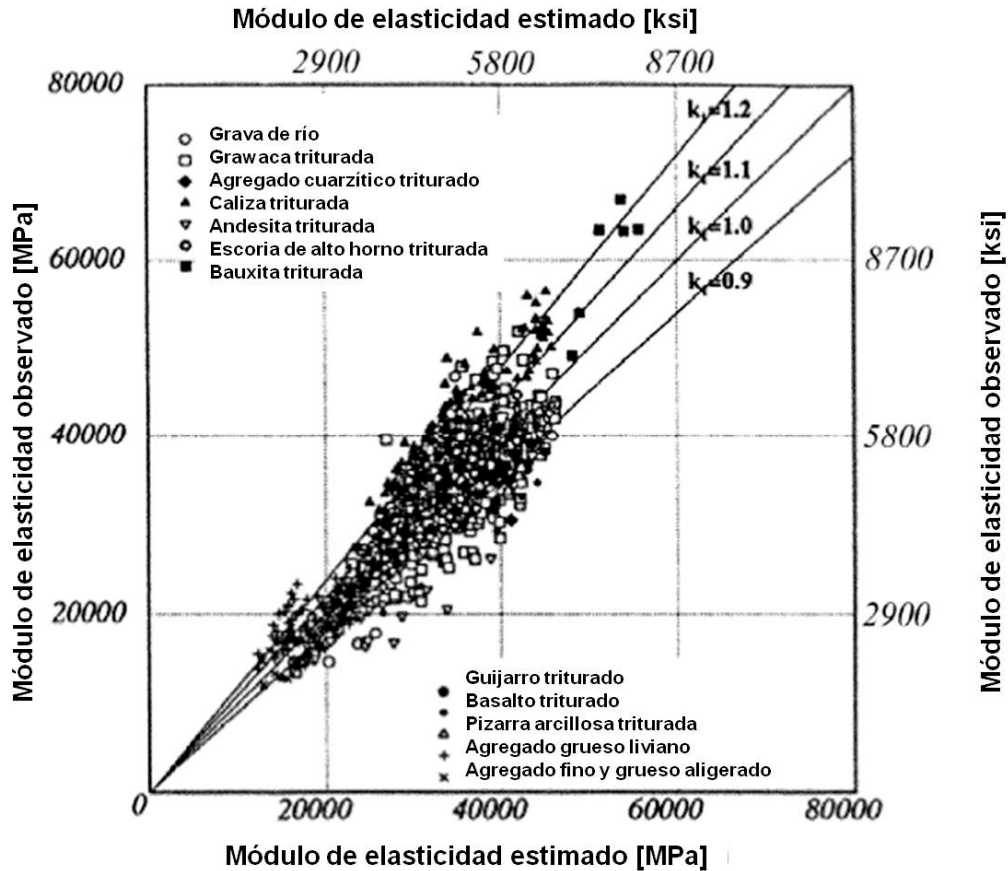


Figura 2. Módulo de elasticidad estimado versus módulo de elasticidad experimental, haciendo distinción en el tipo litológico del agregado usado [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; Nemati et al. 2008; Noguchi et al. 2009].

En otras palabras, para cada tipo litológico de agregado grueso, es necesario considerar un factor para corregir la estimación del módulo de elasticidad para acercarse a su valor real cuando éste es calculado con expresiones tradicionales. Para el Autor de este documento, se interpreta que al calcular el módulo de elasticidad en el concreto mediante las expresiones tradicionales conocidas, el valor obtenido difiere del real, en razón a que dichas expresiones no consideran la afectación del tipo litológico del agregado en la propiedad mecánica, y la propiedad puede ser incrementada o disminuida, del valor esperado. De igual manera, la interpretación conduce, a adaptar el factor mencionado, como un coeficiente de afectación de la propiedad mecánica del concreto (incremento o

disminución). Estos coeficientes son mostrados en la Tabla 3 [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; Nemati et al. 2008; Noguchi et al. 2009].

Tabla 3. Coeficientes de afectación de propiedad mecánica, para agregados gruesos usados en el concreto [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; Nemati et al. 2008; Noguchi et al. 2009].

Tipo de agregado	Coefficiente de afectación
Grava de río	1.005
Grawaca triturada	1.002
Agregado cuarzítico triturado	0.931
Caliza triturada	1.207
Andesita triturada	0.902
Basalto triturado	0.922
Pizarra arcillosa triturada	0.928
Guijarro triturado	0.955
Escoria de alto horno	0.987
Bauxita calcinada	1.163
Agregado grueso de bajo peso	1.035
Agregado fino y grueso de bajo peso	0.989

De acuerdo con la Tabla 3, el efecto del tipo litológico del agregado grueso sobre la propiedad mecánica puede ser clasificado dentro de tres grupos: a.- un primer grupo, donde el agregado usado produce un efecto de incremento en la propiedad mecánica, e incluye caliza triturada y bauxita calcinada, b.- un segundo grupo, donde el agregado usado produce un efecto de disminución en la propiedad mecánica, e incluye agregado cuarzítico triturado, andesita triturada, guijarro triturado, basalto triturado y pizarra arcillosa triturada, y finalmente c.- un tercer grupo, donde el agregado usado no afecta la propiedad mecánica, e incluye grava de río y grawaca triturada; esta clasificación es mostrada en la Tabla 4 [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; Nemati et al. 2008; Noguchi et al. 2009].

Tabla 4. Clasificación del agregado grueso en grupos de tipos litológicos [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; Nemati et al. 2008; Noguchi et al. 2009].

Agregado grueso	Tipo litológico
Caliza triturada, bauxita calcinada	I
Agregado cuarzítico triturado, andesita triturada, basalto triturada, pizarra arcillosa triturada, piedra cobble triturada	II
Otro tipo de agregado grueso	III

Para ASOCRETO 1997, Sánchez 2000, la clasificación de los agregados más difundida y basada en su origen es la Norma Británica BS 812 (*Método para muestreo y ensayo de agregados minerales, arenas y rellenos*). A partir de esta clasificación, y en concordancia con lo mencionado en los párrafos anteriores, en la Tabla 5 se muestra la consideración del origen geológico y tipo mineral del agregado grueso representado en el tipo litológico del agregado grueso.

Tabla 5. Consideración del origen geológico y tipo de mineral del agregado grueso, representado en el tipo litológico del agregado grueso [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; ASOCRETO 1997; Sánchez 2000; Nemati et al. 2008; Noguchi et al. 2009].

Variable	Origen del agregado
Tipo litológico I	Caliza: dolomita, caliza, mármol.
Tipo litológico II	Basáltico: andesita, basalto, porfiritas básicas, diabasa, doleritas, epidiorita, lamprófico, cuarzo-dolerita, espilita. Cuarzoso: arcilla refractaria, cuarcita cristalizada. Esquistoso: filita, esquisto, pizarra, rocas fracturadas (guijarros).
Tipo litológico III	Granítico: gneis, granito, granodiorita, granulita, pegmatita, cuarzo-diorita, sienita. Arenisca: arcosa, grawaca, arenilla, arenisca, tufa.

4. EFECTO DE LAS ADICIONES MINERALES

En el presente documento, las adiciones minerales consideradas son la adición de humo de sílice, la adición de cenizas volantes, y la adición de escorias de alto horno; estas adiciones son tenidas en cuenta como reemplazo de una parte de la cantidad del cemento, es decir que éstas y el cemento, se consideran entonces como material cementante. Para Maruyama et al. 2001; Noguchi et al. 2003, cada adición influye en la resistencia del concreto, en razón a que afecta la resistencia del mortero (mezcla de cemento, agua y arena).

De acuerdo con Maruyama et al. 2001; Noguchi et al. 2003, las adiciones minerales afectan la resistencia de diseño del concreto, y cuyo efecto está relacionado con la relación de reemplazo de cemento por la adición mineral dentro del material cementante. Con respecto al humo de sílice el incremento en la resistencia está relacionado directamente con la proporción de reemplazo, la cual es limitada hasta un valor del 20% (algunas investigaciones han fijado este valor límite entre el 15-18% [Siddique & Khan 2011]), no consiguiendo mayores efectos después de dicho límite; otras investigaciones [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; Nemati et al. 2008; Noguchi et al. 2009] fijan el límite del reemplazo hasta el 10% (algunas normas prescriben que no se debe adicionar humo de sílice al concreto en una cantidad superior al 10% como reemplazo del cemento [Alaejos & Fernández 1999]), y que entre el 10-20% no se logran aumentos adicionales, y por encima del 20% el efecto es desfavorable. Este efecto desfavorable no solo ha sido investigado para la resistencia a compresión, sino también para la resistencia a tensión y flexión, como se muestra en las figuras 3-4 [Siddique & Khan 2011].

Con respecto a las cenizas volantes, reemplazos hasta del 45% afectan la resistencia, pero no solo depende de dicho reemplazo, sino también de la relación agua/cementante y de parámetros relacionados con la clase o tipo de ceniza volante utilizada, como se muestra en la figura 5 (de acuerdo con la clasificación ASTM C 618: clases C, F y N [ASTM C 618 1993; Kosmatka et al. 2003; Siddique

& Khan 2011]), y reemplazos mayores del 45% no tienen efecto sobre la resistencia del concreto [Maruyama et al. 2001; Noguchi et al. 2003]; otras investigaciones [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; Nemati et al. 2008; Noguchi et al. 2009] son concordantes con la ganancia de resistencia, pero no fijan el límite de la relación del reemplazo; sin embargo, Siddique & Khan 2011, muestran que con adiciones superiores al 45%, las propiedades mecánicas de diseño (es decir a una edad de 28 días) en el concreto tienen un leve incremento, siendo concordante con lo expuesto por Maruyama et al. 2001; Noguchi et al. 2003, como se muestra en las figuras 6-8.

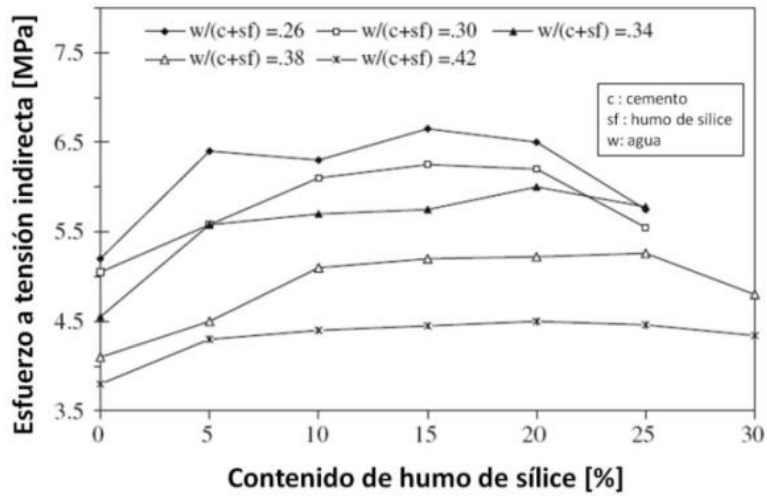


Figura 3. Relación entre el esfuerzo a tensión indirecta (28 días) y la proporción de reemplazo con sílice de humo, en concretos de mediana y alta resistencia [Siddique & Khan 2011].

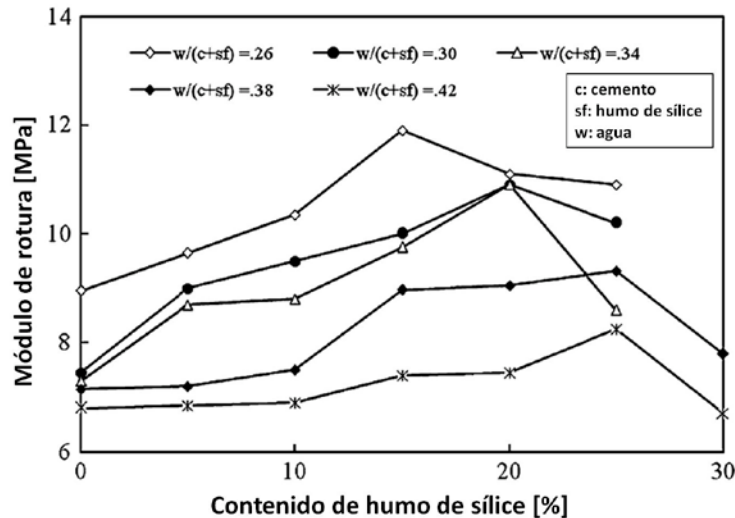


Figura 4. Relación entre el esfuerzo de flexión, como módulo de rotura (28 días) y la proporción de reemplazo con sílice de humo, en concretos de mediana y alta resistencia [Siddique & Khan 2011].

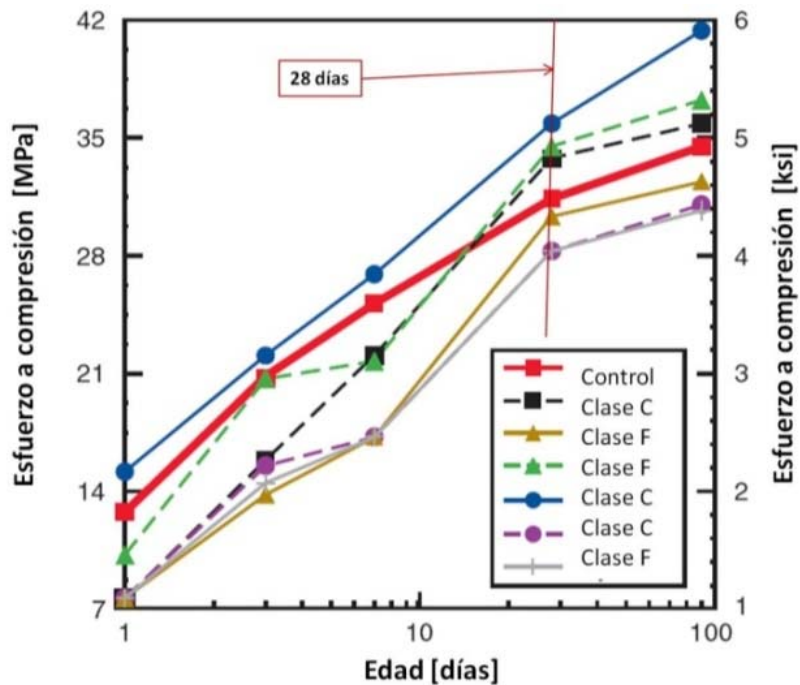


Figura 5. Resistencia a compresión desarrollada a diferentes edades, de mezclas de concreto conteniendo 307 kg/m^3 de cemento (mezcla de control) y reemplazo del 25% con cenizas volantes C y F, y diferentes dosificaciones de agente entrador de aire [Kosmatka et al. 2003].

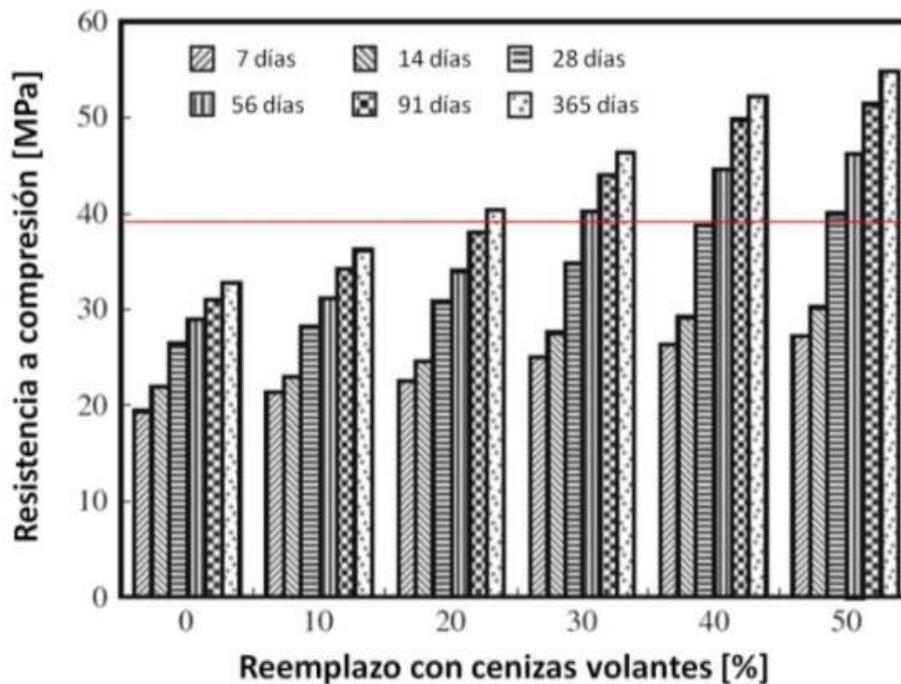


Figura 6. Resultados de resistencia a compresión, para diferentes edades, en concretos con reemplazo del cemento por cenizas volantes Clase F [Siddique & Khan 2011].

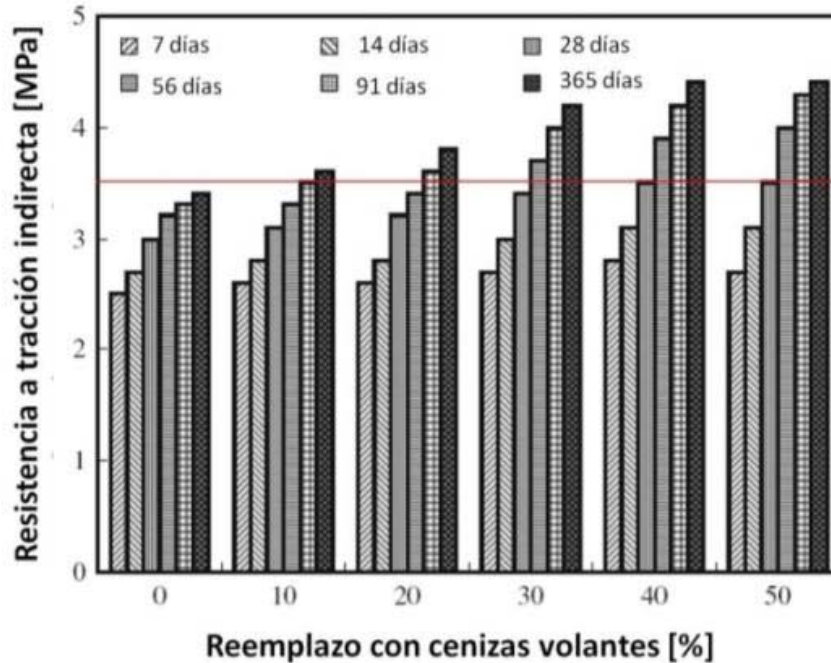


Figura 7. Resultados de resistencia a tensión (tracción indirecta), para diferentes edades, en concretos con reemplazo del cemento por cenizas volantes Clase F [Siddique & Khan 2011].

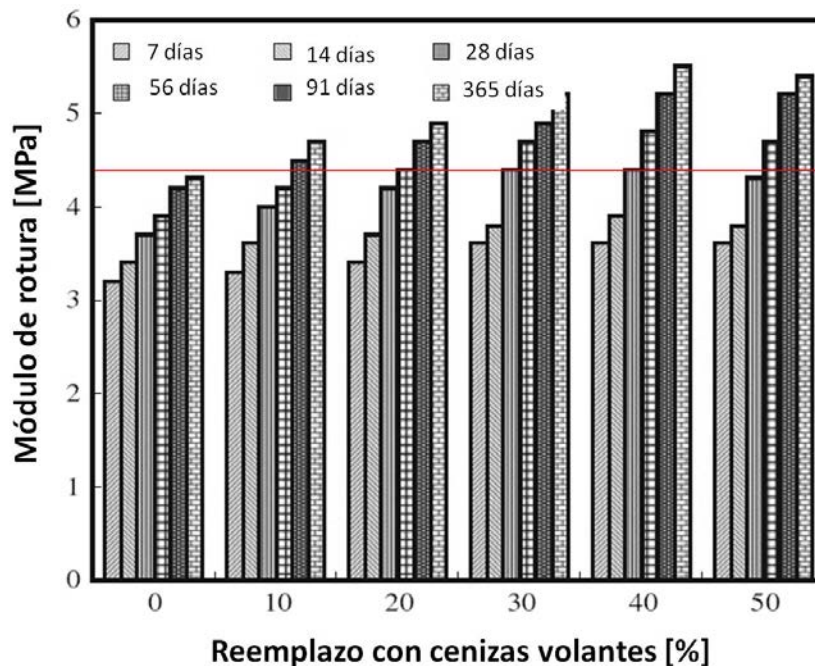


Figura 8. Resultados de resistencia a flexión (módulo de rotura), para diferentes edades, en concretos con reemplazo del cemento por cenizas volantes Clase F [Siddique & Khan 2011].

Con respecto a la escoria de alto horno, reemplazos hasta del 30% afectan la resistencia, que no solo depende de la proporción del reemplazo sino también de la relación agua/cementante y de parámetros relacionados con la escoria utilizada

(entre ellos el área superficial específica) [Maruyama et al. 2001; Noguchi et al. 2003]. Para reemplazos superiores al 30%, Maruyama et al. 2001; Noguchi et al. 2003 consideran una afectación del efecto producido con el valor límite, lo cual es concordante con otras investigaciones [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; Nematí et al. 2008; Noguchi et al. 2009], y como es mostrado en la figura 9, [Siddique & Khan 2011]. Este efecto es el mismo para la resistencia a tensión y flexión [Siddique & Khan 2011].

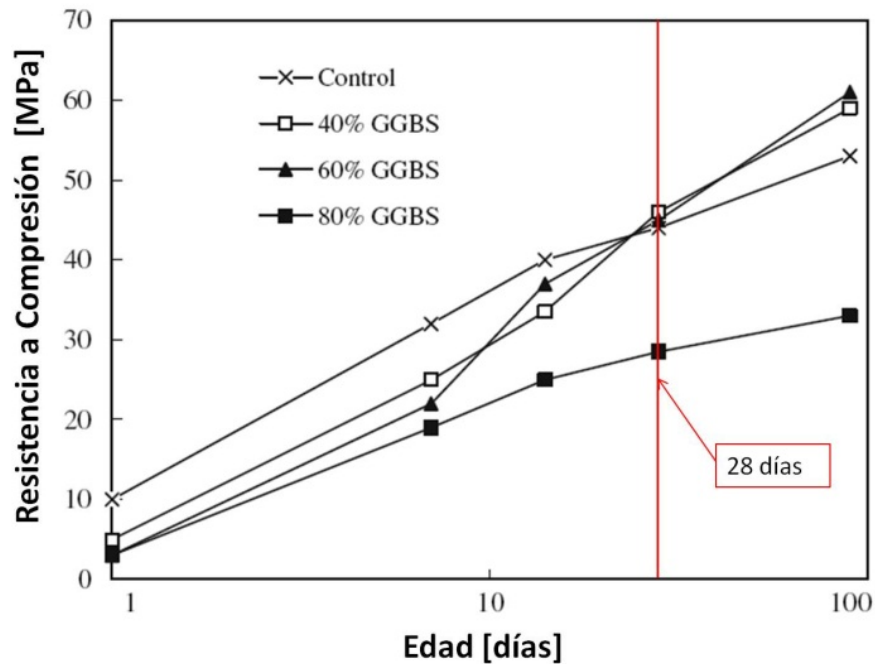


Figura 9. Efecto de la adición de escoria (*Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBS*) en la resistencia a compresión [Siddique & Khan 2011].

Adicionalmente, el efecto del uso de humo de sílice, de cenizas volantes, y de escoria, sobre la resistencia a compresión del concreto, no sólo depende de la relación de reemplazo por cemento con respecto al material cementante, sino también del tipo de agregado empleado, que bien podría ser clasificado dentro de un tipo litológico [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; Nematí et al. 2008; Noguchi et al. 2009]; esta dependencia adicional, fue investigada también para las resistencias a tensión (tracción indirecta) y flexión (módulo de rotura), llegándose a la misma conclusión [Siddique & Khan 2011].

5. EFECTO DEL CONTENIDO DE AIRE

Para Maruyama et al. 2001; Noguchi et al. 2003, el efecto del contenido de aire sobre la resistencia del concreto, adicionalmente de depender del volumen de aire por volumen unitario de concreto, también lo es de la relación agua/cementante, y del tipo de agregado grueso de acuerdo con su clasificación dentro un perfil

litológico [Tomosawa et al. 1990; Tomosawa & Noguchi 1993; Nemati et al. 2008; Noguchi et al. 2009]. En el concreto, el contenido de aire atrapado naturalmente, es afectado por la gradación del agregado grueso, el contenido de agregado fino, el contenido y tipo de cemento, el contenido y tipo de adiciones minerales, el contenido y tipo de aditivo reductor de agua, además de factores asociados al manejo de la mezcla del concreto como la consistencia de la misma, la vibración, la temperatura y la acción de mezclado [PCA 1998; Kosmatka et al. 2003; VDOT 2011].

A partir de la definición del contenido de aire en el concreto, como la porción de poros dentro de la pasta de cemento en estado fresco, que están llenos de aire, se ha aplicado un axioma particular que manifiesta que una reducción en la porosidad incrementa su resistencia, razón por la cual diversos mecanismos de compactación de la mezcla son aplicados [Li 2004]; estudios realizados sobre el efecto de la porosidad en la resistencia de pastas de cemento hidratado y de morteros, muestran que un aumento de la porosidad influyen en la disminución de la resistencia a compresión [Li 2004]. Estudios realizados para el concreto, también muestran una disminución de la resistencia a compresión, tensión y flexión, cuando el contenido de aire aumenta, incluso en mezclas que contienen adiciones minerales [Naik & Singh 1993; Wade et al. 2006; Siddike & Khan 2011].

El contenido de aire atrapado naturalmente, normalmente está entre el 1% y el 2.5% del volumen de la mezcla, mientras que en un concreto con agentes entradores de aire pueden obtenerse contenidos por encima del 3% hasta alcanzar un valor máximo del 8% [ASOCRETO 1997]. Myers 2006, en una mezcla de control sin fibra con un contenido de aire del 2.7% atrapado naturalmente, observó que para diferentes dosificaciones de fibra de diferentes naturalezas, no existe una tendencia definida en el comportamiento de dicho contenido de aire, y aunque si hay una leve disminución del mismo, este se comporta alrededor de un valor constante de 2.5%, como se muestra en la figura 10. Sin embargo, para otros tipos de concretos, como el autocompactado, Miao et al. 2003 encontró que el contenido de aire naturalmente atrapado se incrementa, conforme se incrementa el contenido de fibra, como se muestra en la figura 11.

En el presente documento, la revisión se centra en el contenido de aire obtenido mediante el uso de agentes entradores de aire. Diversas investigaciones muestran que mezclas de concreto diseñadas para resistencias normales a compresión, obtienen un incremento en los valores normales de dichas resistencias, en razón a que el uso del agente entrador de aire, hace la mezcla con una mejor trabajabilidad y se reduce la cantidad de agua, lo que reduce la relación agua/cemento, siendo este beneficio hasta un contenido de aire del 4-5%; sin embargo, estas mismas investigaciones, muestran que en mezclas de concreto diseñadas para altas resistencias a compresión, se obtiene un efecto adverso, y

por cada incremento unitario (en porcentaje) del contenido de aire, se experimenta

una caída en dichos valores de resistencia; estos efectos son similares para las resistencias a tensión y flexión [THE ABERDEEN GROUP 1976; ACI E4 2003; Kosmatka et al. 2003; CAA 2006; Welker & Watson 2007; Row 2010; VDOT 2011].

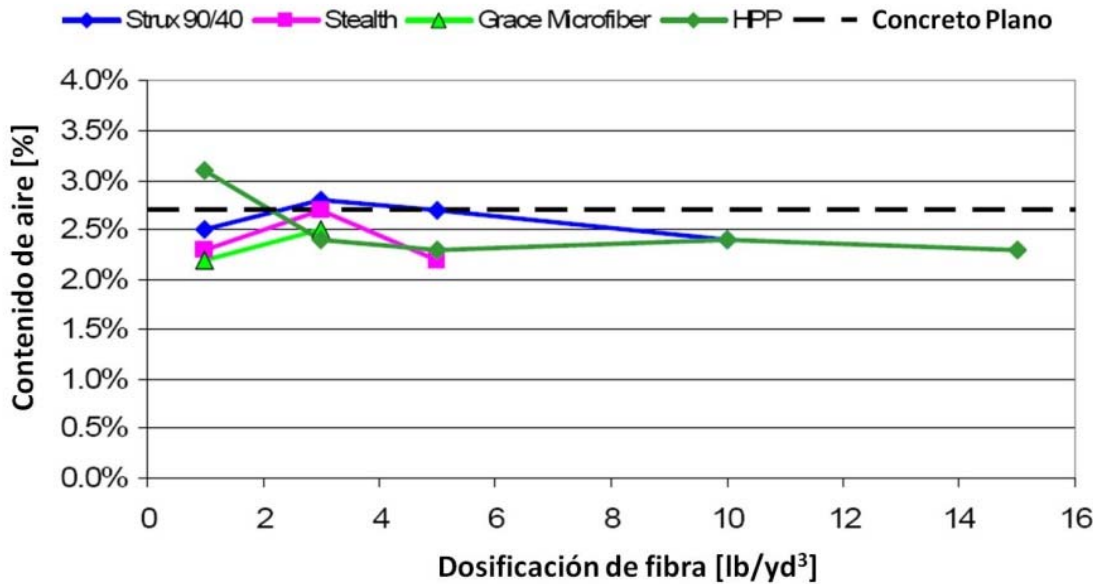


Figura 10. Efecto de la dosificación de fibra sobre el contenido de aire, naturalmente atrapado [Myers 2006].

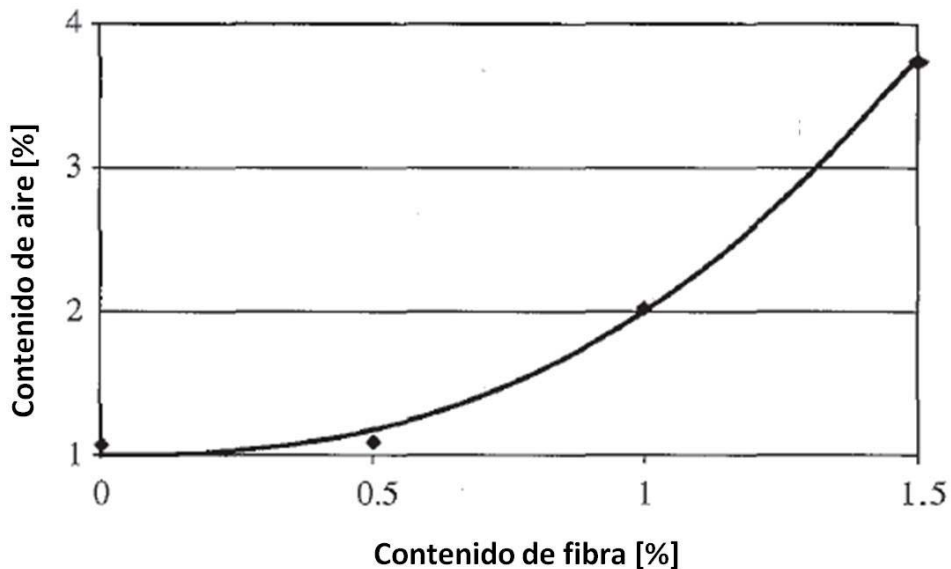


Figura A.4.11. Efecto de la dosificación de fibra sobre el contenido de aire, naturalmente atrapado, en concretos autocompactados [Miao et al. 2003].

El aire incluido mediante el uso del agente entrador de aire en diseños de mezclas de concreto, afecta también las cantidades de cemento y adiciones minerales

(principalmente el uso de cenizas volantes), y el contenido del aditivo reductor de agua [PCA 1998; Siddike & Khan 2011].

6. EFECTO DEL ADITIVO REDUCTOR DE AGUA

La presencia de fibras, especialmente en dosificaciones altas, provoca una reducción apreciable de la docilidad del concreto, siendo entonces recomendable compensar dicho decremento con la utilización de aditivos reductores de agua, especialmente superfluidificantes; esto permite, no aumentar el agua de amasado con el fin de evitar el descenso en la resistencia para la cual se diseñó la mezcla [Martínez 2008]. Los superfluidificantes sirven para mejorar la docilidad del concreto de igual relación agua/cemento, o bien permiten reducir ésta manteniendo la docilidad, alcanzando la resistencia y la durabilidad deseada; sin embargo, por lo general su uso y dosificación son controlados mediante la realización de ensayos previos y característicos [Martínez 2008].

Con el uso de aditivos reductores de agua se hace más fácil la compactación del concreto para un volumen de fibras dado, y permite igualmente aumentar el volumen de fibras manteniendo constante la docilidad; sin embargo, su uso no permite sobrepasar el volumen máximo de fibras que puede admitir un determinado concreto, debido a que el aditivo reductor de agua no evita la segregación del concreto ni el efecto adverso de formación de bolas de pasta de cemento – fibra [Martínez 2008].

El efecto de los aditivos reductores de agua sobre las resistencias del concreto (compresión, tensión y flexión), se basa en el concepto de la Ley de Abrams, según la cual la resistencia a la compresión del concreto es inversamente proporcional a la relación agua/cemento del mismo [ASOCRETO 1997]. La adición del aditivo reductor de agua en la mezcla de concreto, dispersa las partículas de cemento, mediante la reducción de la atracción entre ellas evitando su aglutinación, con lo cual se logra una mejor fluidez de la pasta, y esto permite reducir la cantidad de agua necesaria para una determinada manejabilidad; entonces, una de las consecuencias del menor consumo de agua, es una mayor resistencia mecánica [ASOCRETO 1997]. Los aditivos reductores de agua, han sido clasificados en la Norma ASTM C494/C494M 11, como plastificantes (Tipos A, D y E) y superplastificantes (Tipos F y G). La Tabla 6 muestra la diferenciación del aditivo reductor de agua en plastificante y superplastificante.

Tabla 6. Consideración del tipo de aditivo reductor de agua.

Variable	Descripción
Aditivo reductor de agua	Plastificante, Tipos A, D y E. Superplastificante, Tipos F y G.

7. EFECTO DE LA FIBRA

La fibra ejerce un mecanismo de puenteo, con el fin de transmitir esfuerzos en el concreto agrietado y proporcionarle capacidad de seguir recibiendo carga aun en una condición agrietada, sin fallar; además de este mecanismo de puenteo, la longitud de la fibra tiene una acción diferenciada en el control de la micro fisura y la macro fisura (figura 12) [Pujadas 2008; Plaza 2010]. Las fibras hacen poco para aumentar la resistencia a compresión, con incrementos del orden del 25%, incluso en elementos estructurales con reforzamiento convencional, la adición de fibras tiene poco efecto sobre la resistencia a compresión; sin embargo, las fibras hacen sustancialmente un incremento de la ductilidad post-agrietamiento o absorción de energía del material [Van Chanh 2005].

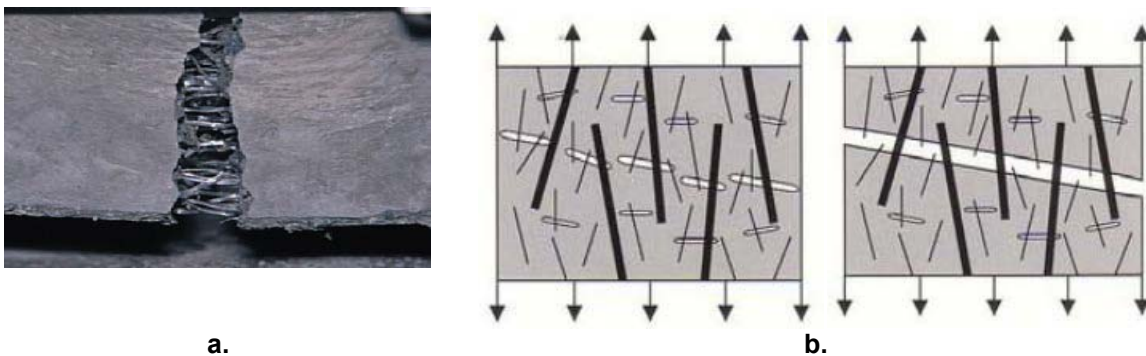


Figura 12. Efecto del reforzamiento de la matriz cementicia con fibras, en el concreto endurecido: a.- Mecanismo de Puenteo [Plaza 2010]; b.- Control de la micro fisura y la macro fisura [Pujadas 2008].

Con respecto a los esfuerzos de tracción, las fibras alineadas en la dirección del esfuerzo de tensión pueden brindar un incremento alto en el esfuerzo a tracción directa, con valores hasta del 150%; para distribuciones aleatorias, el incremento es menor, pero puede alcanzar valores importantes del 60%, y cuyos resultados son similares para la tracción indirecta [Van Chanh 2005]. Un aporte importante en esta acción mecánica, es la tenacidad mostrada en el comportamiento post-agrietamiento; es en la flexión desde el punto de vista mecánico donde las fibras tienen un efecto agregado mayor que en la compresión y la tracción, donde han sido reportados incrementos mayores al 100% [Van Chanh 2005].

Para las diferentes acciones mecánicas, los incrementos de resistencia son sensibles al volumen de fibra, y en particular para las resistencias a tracción y flexión, son influyentes también la relación de aspecto (longitud de la fibra/diámetro de la fibra) y la geometría y morfología de la fibra (rectitud de su longitud, rugosidad en su longitud, y anclajes en los extremos) [Miao 2003]. Diversos reportes de investigación [Wafa 1990; Miao 2003], en ensayos a compresión, muestran que a partir de cierta cantidad de fibra se obtiene un valor máximo de resistencia (denominado volumen óptimo de fibra), y partir de allí se

experimenta una caída en dicho valor, como se aprecia en la figura 13; sin embargo, para una cantidad, y características geométricas y morfológicas fijas de la fibra, como es de esperarse, la resistencia a compresión es influenciada por la relación agua/cementante (figura 14-a), mientras que para una cantidad y características morfológicas fijas de la fibra, la resistencia es influenciada por la relación de aspecto (figura 14-b) [Tsai et al. 2009].

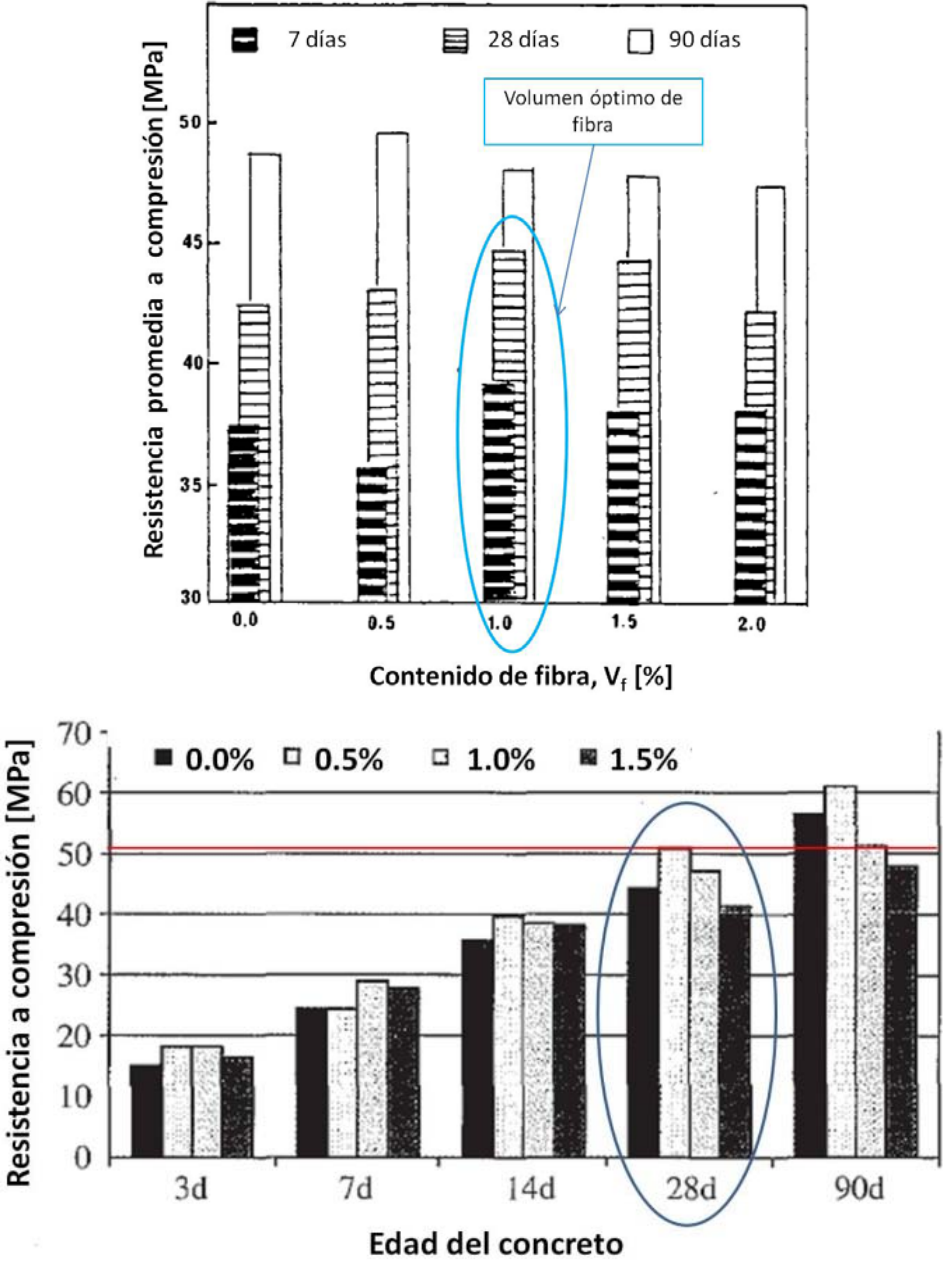
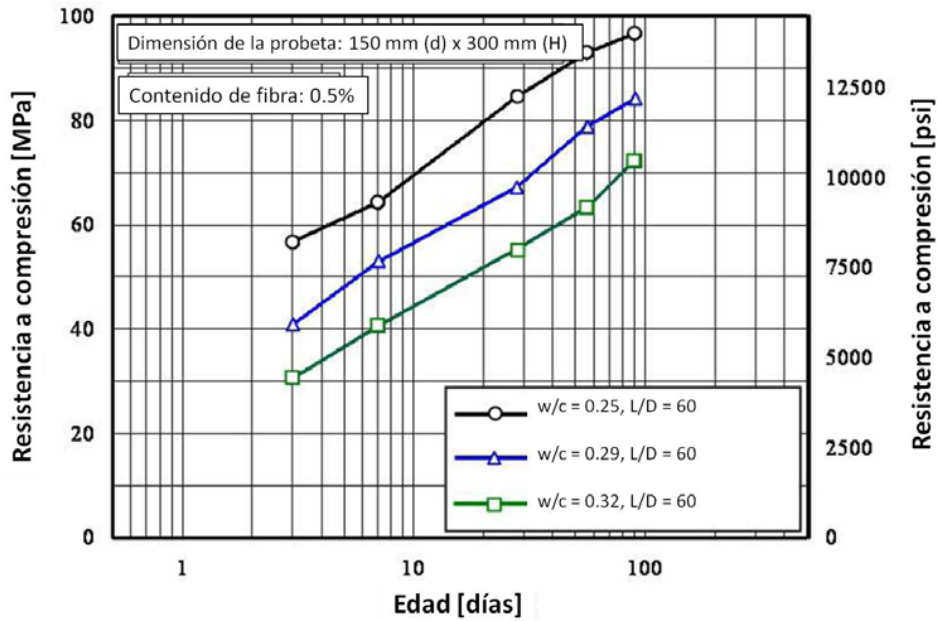
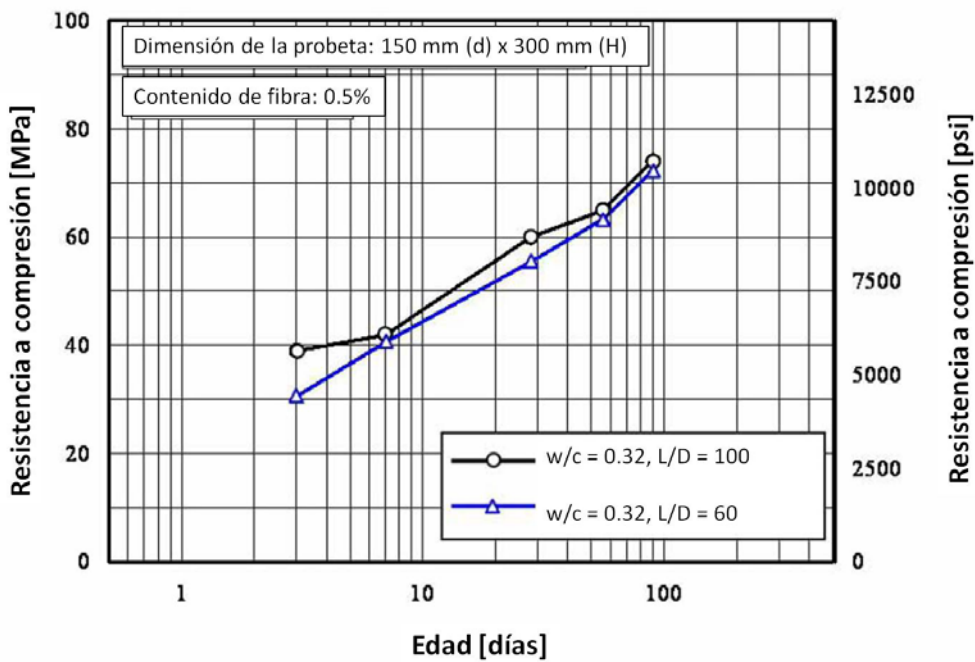


Figura 13. Ejemplos del comportamiento de la resistencia a compresión del concreto, para diferentes volúmenes de fibra en la mezcla, para un mismo tipo de fibra y relación agua/cementante [Wafa 1990; Miao 2003].



a.



b.

Figura 14. Influencia de la relación agua/cemento y de la relación de aspecto L/D, sobre la resistencia a compresión [Tsai et al. 2009]: a.- Influencia de la relación agua/cemento; b.- Influencia de la relación de aspecto L/D.

Con respecto a las resistencias de tracción y de flexión, éstas se incrementan con el incremento de la cantidad de fibra (figura 15), sin embargo, valores cercanos al 2% como fracción de volumen de fibra, generan una caída de los valores de resistencia, para cantidades y características geométricas y morfológicas fijas de

la fibra [Miao 2003]. Diversas investigaciones [Van Chanh 2005; Holschemacher & Müller 2007; Plaza 2010] reportan que altas relaciones de aspecto, proporcionan altos incrementos de las resistencias, y también, es reportado que las fibras deformadas muestran los mismos tipos de incrementos con bajos volúmenes debido a las características de adherencia, como se muestra en la figura 16.

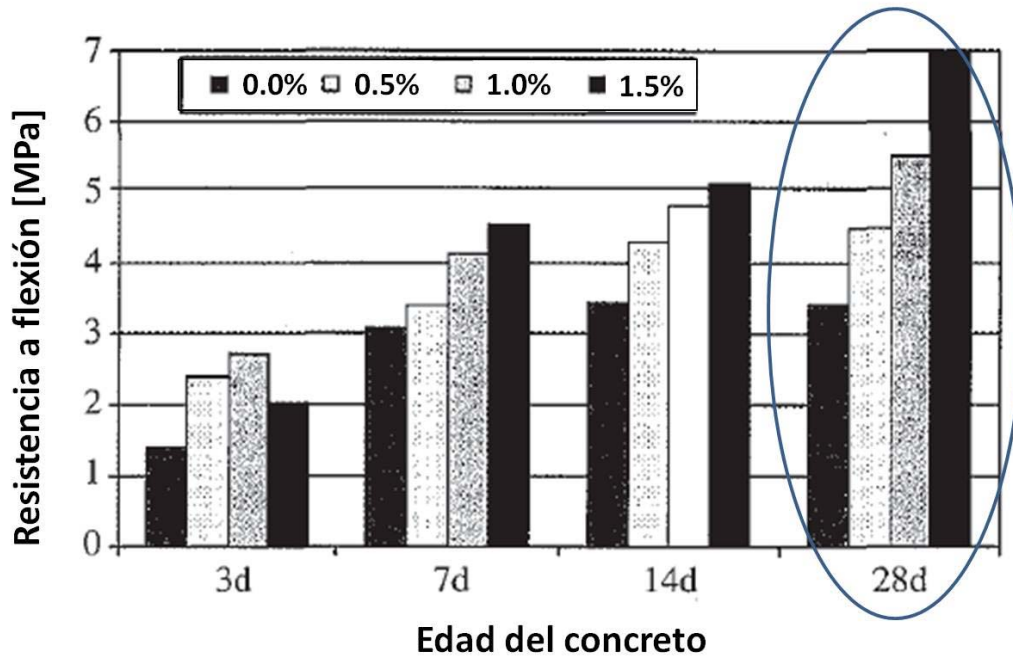
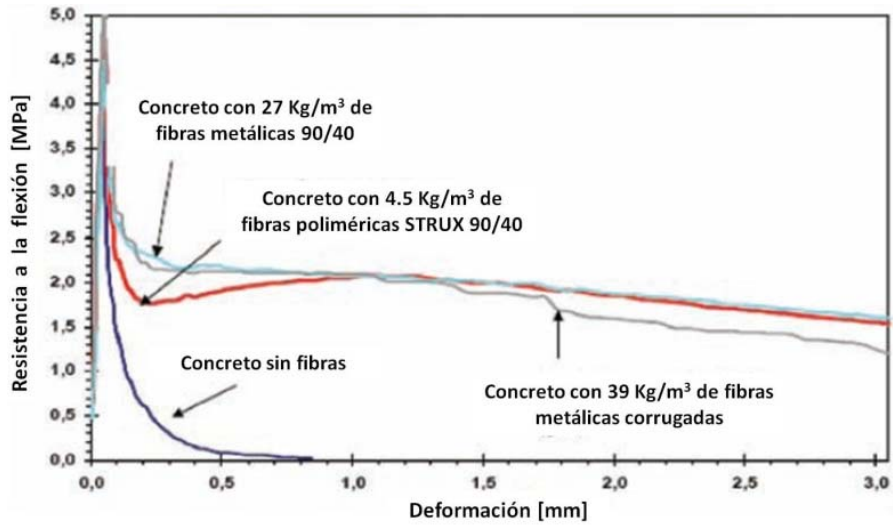
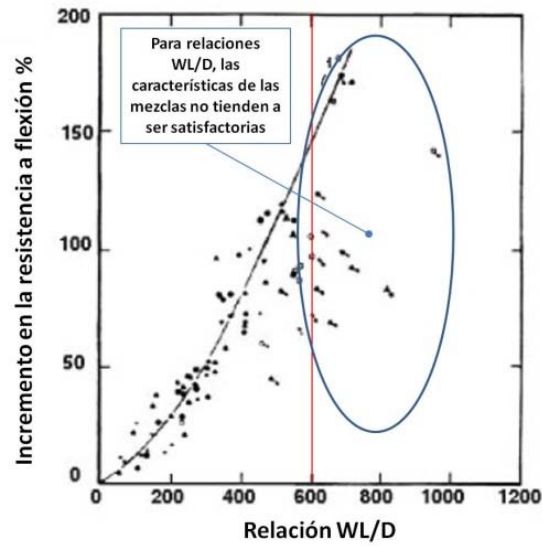


Figura 15. Comportamiento de la resistencia a flexión del concreto, para diferentes volúmenes de fibra usadas en la mezcla, para un mismo tipo de fibra y relación agua/cementante [Miao 2003].

Con respecto a la morfología de la fibra metálica, Holschemacher & Müller (2007) manifiestan que las propiedades mecánicas del concreto, principalmente la resistencia a flexión se ve afectada por la variación de la geometría (longitud, diámetro), forma (recta o deformada, con o sin anclajes en sus extremos), y las propiedades de la superficie (lisa, rugosa o deformada); de igual manera, expresan que hay una amplia variación en dichas propiedades geométricas en las fibras metálicas comerciales disponibles, pudiéndose encontrar una variedad de alrededor de once tipos [Holschemacher & Müller 2007; Martínez 2008; Haamed 2010, Mármol 2010]. A partir de una recopilación y revisión de alrededor de 60 catálogos comercialmente disponibles para fibra metálica [Benavides & González 2012a], se puede observar que la variedad de la fibra puede ser agrupada de manera resumida en clases, como se muestra la figura 17, y que ha sido propuesta con anterioridad en diferentes reportes [Martínez 2008; Pujadas 2008; Mármol 2010]. De igual manera, la *ASTM A 820* provee una clasificación en cuatro tipos de acuerdo con su fabricación, y la *JSCE* las clasifica en tres grupos de acuerdo con la forma de su sección transversal [ACI Committee 544 2002].



a.



b.

Figura 16. Efecto del tipo de fibra en la resistencia a flexión del concreto: a.- influencia del tipo de fibra (metálica o plástica), la dosificación y la relación de aspecto [Plaza 2010]; b.- influencia del parámetro WL/D (W peso en %, y L/D relación de aspecto de la fibra), en la ganancia de resistencia a flexión [Van Chanh 2005].

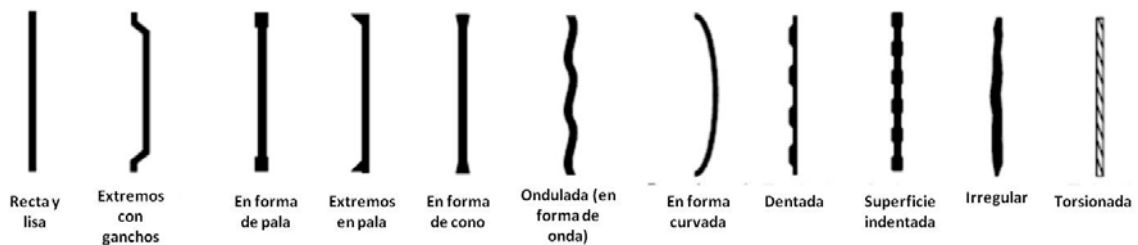


Figura 17. Tipos de fibras de acero, comercialmente disponibles [Holschemacher & Müller 2007; Martínez 2008; Pujadas 2008; Haamed 2010; Mármol 2010].

Entonces para representar la geometría y anclaje de la fibra, se adaptan cuatro grupos como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Consideración de la geometría y anclaje de la fibra metálica.

Variable	Descripción
Tipo 1	Recta con ganchos en los extremos (<i>end-hooks</i>).
Tipo 2	Recta con anclajes en los extremos, diferente a <i>end-hooks</i> (<i>paddles, end-knobs, coned</i>).
Tipo 3	De superficie ondulada o rugosa (<i>crimped o wave shaped, toothed, surface indented, irregular, twisted</i>).
Tipo 4	De superficie lisa, sin anclajes en los extremos (<i>straight o smooth, bow shaped</i>).

Con respecto a la morfología de la fibra de polipropileno, en diversos reportes [ACI Committee 544 2002; Pujadas 2008; Mármol 2010] se establece que de acuerdo con su proceso de fabricación se clasifican en dos tipos principales, monofilamentos extruidos y láminas fibriladas (formando mallas), y también ha aparecido con gran aceptación en el mercado en reemplazo de las variedades de monofilamentos, la fibra multifilamento (disponible en cintas) debido a su mayor adherencia dentro de la matriz [Pujadas 2008; Mármol 2010]. A partir de una recopilación y revisión de alrededor de 50 catálogos comercialmente disponibles para fibra de polipropileno [Benavides & González 2012b], se puede observar que la variedad de la fibra puede ser agrupada como se muestra la figura 18, y que ha sido propuesta con anterioridad en diferentes reportes [ACI Committee 544 2002; Pujadas 2008; Mármol 2010]. Adicionalmente, las fibras de polipropileno pueden ser lisas o de forma ondulada, y diversos estudios reportan la influencia de esta característica en las propiedades mecánicas [Richardson 2006; Myers et al. 2008; Richardson & Landless 2009]. Entonces para representar el tipo y anclaje de la fibra se adaptan cinco grupos, como se muestra en la tabla 8.



Figura 18. Tipos de fibras de polipropileno, comercialmente disponibles [ACI Committee 544 2002; Pujadas 2008; Mármol 2010].

Tabla 8. Consideración del tipo y anclaje de la fibra de polipropileno.

Variable	Descripción
Tipo de fibra	Monofilamento
	Fibrilada
	Multifilamento
Anclaje de la fibra	Lisa
	Ondulada

8. CONCLUSIONES

La revisión de información para la definición de variables que influyen en la resistencia de diseño del concreto (compresión, tensión, cortante, y flexión), muestra cómo cada una de estas variables influyen en la propiedad mecánica, pero la influencia se hace en compañía de otras variables consideradas; esto demuestra una alta dependencia entre ellas, lo cual hace compleja una modelación gobernada por una función o expresión matemática. La figura 19, muestra esquemáticamente, las diferentes interrelaciones entre las variables que influyen en las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras.

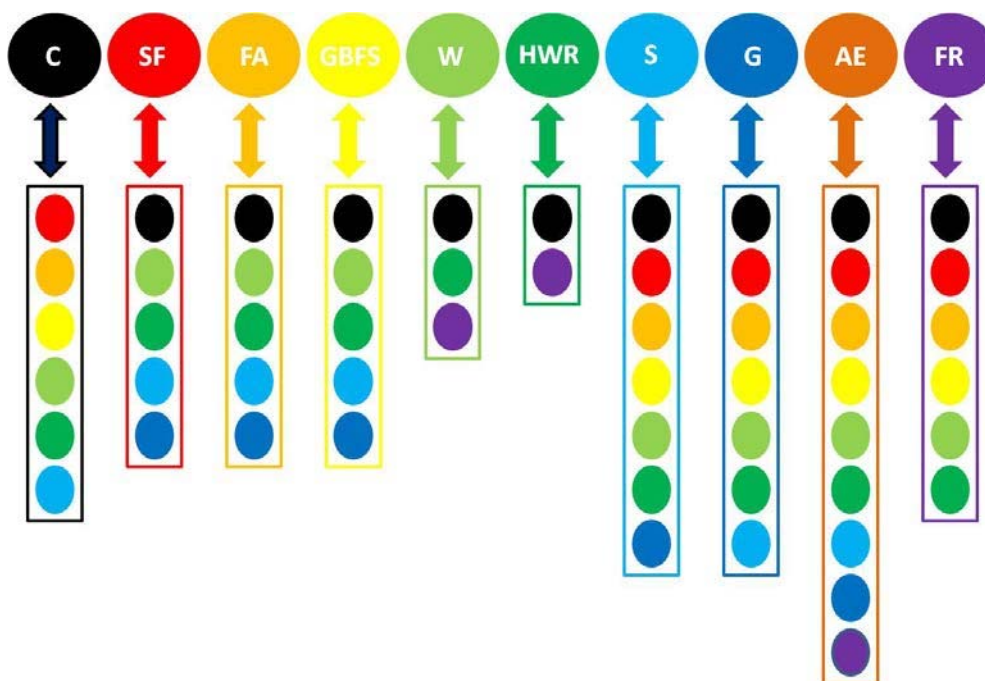


Figura 19. Esquema de interrelación de las variables que influyen en las propiedades mecánicas en el concreto reforzado con fibras: cemento, humo de sílice, cenizas volantes, escoria, agua, reductor de agua, arena, grava, inclusor de aire, y fibra, respectivamente [Elaboración propia].

REFERENCIAS

- [1] **ACI E4**; (2003). *Chemical admixtures for concrete*. ACI Education Bulletin E4-03, American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, USA, 12p.
- [2] **ACI 318**; (2005). *Requisitos del Reglamento para concreto estructural (ACI 318S-05) y comentario (ACI 318SR-05)*. Comité ACI 318, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 495p.
- [3] **ACI Committee 544**; (2002). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*. ACI 544.1R-96.
- [4] **ALAEJOS G., M.P.; FERNÁNDEZ C., M.**; (1999). *El coeficiente de eficacia del humo de sílice*. *Materiales de Construcción*, 49 (253, Enero-Marzo): 57-63.
- [5] **AKÇAOĞLU, T.; TOKYAY, M.; ÇELİK, T.**; (2002). *Effect of coarse aggregate size on interfacial cracking under uniaxial compression*. *Material Letters*, 57 (December): 828-833.
- [6] **ALSAYED, S.H.; AMJAD, M.A.**; (1996). *Strength, water absorption and porosity of concrete incorporating natural and crushed aggregate*. *Journal of King Saud University, Engineering Science*, 8 (1): 109-120.
- [7] **ASOCRETO**; (1997). *Tecnología y propiedades*. Colección básica del concreto, Tomo 1. Instituto del Concreto, ASOCRETO, Santafe de Bogotá, 215p.
- [8] **ASTM C 618**; (1993). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete*. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, USA.
- [9] **BENAVIDES C., W.; GONZÁLEZ S., L.O.**; (2012a). *Fibras de acero para reforzamiento de matrices cementicias: Una recopilación sobre fibras comercialmente disponible*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira, 73p.
- [10] **BENAVIDES C., W.; GONZÁLEZ S., L.O.**; (2012b). *Fibras de polipropileno para reforzamiento de matrices cementicias: Una recopilación sobre fibras comercialmente disponibles*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira, 66p.
- [11] **CAA**; (2006). *Admixture Sheet – ATS 5: Concrete air-entraining admixtures*. Cement Admixture Association, Knwole, UK, 4p.
- [12] **CHAN Y., J.L.; SOLÍS C., R.; MORENO, E.I.**; (2003). *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*. *Ingeniería*, 7 (2): 39-46.
- [13] **FOLINO, P.C.; WILL, A.; FLORES, F.; DIAZ, W.; ETSE, G.**; (2007). *Uso de redes neuronales y ANFIS para predecir la resistencia uniaxial a compresión de hormigones de alta resistencia*. *En: ENIEF 2007 – XVI Congreso sobre métodos numéricos y sus aplicaciones*, Córdoba, Argentina, Octubre. Publicado en: ELASKAR, S.A.; PILOTTA, E.A.; TORRES, G.A.; (Editores, 2007, Mecánica Computacional, 27 (16): 1413-1426. Disponible en Internet: <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/1149>, [http://www.famaf.unc.edu.ar/~torres/trabajosparapublicacion/14-mecanica de solidos/14-mecanica de solidos-06.pdf](http://www.famaf.unc.edu.ar/~torres/trabajosparapublicacion/14-mecanica%20de%20solicos/14-mecanica%20de%20solicos-06.pdf) [Mayo 2012]
- [14] **GARDONI, P.; NEMATI, K.M.; NOGUCHI, T.**; (2007). *Bayesian statistical framework to construct probabilistic models for the elastic modulus of concrete*. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (10): 898-905. Disponible en

Internet: http://bme.t.u-tokyo.ac.jp/papers/pdf/2007/2007_Bayesian%20Elastic.pdf
[Mayo 2012]

[15]HAMEED, R.; (2010). *Apport d'un renfort de fibres sur les performances des structures en béton armé pour les applications parasismiques*. Thèse (Doctorat: Genie Civil), L'Université de Toulouse III – Paul Sabatier, Toulouse, La France, 6 de Octóbre, 383p.

[16]HOLSCHEMACHER, K.; MÜLLER, T.; (2007). *Influence of fibre type on hardened properties of steel fibre reinforced concrete*. *Modern Building Materials, Structures and Techniques*. In: 9th Conference International, May 16-18, Vilnius, Lithuania. Disponible en Internet:

http://leidykla.vgtu.lt/conferences/MBM_2007/1pdf/Holsemak.pdf [Enero 2012]

[17]KARAM, J.R.; (1997). *Influence of constituents' properties on the fracture properties of high strength concrete*. Thesis (MSc. Civil and Environmental Engineering). Massachusetts Institute of Technology, January, 148p.

[18]KOSMATKA, S.H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W.C.; (2003). *Design and control of concrete mixtures*. EB001, 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 119p.

[19]LATORRE C., A.; (2008). *La industria del cemento en Colombia. Determinantes y comportamiento de la demanda (1996-2005)*. Tesis (Economista). Pontifica Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias Económicas, Santafé de Bogotá, Colombia, Mayo, 53p.

[20]LI, G.; (2004). *The effect of moisture content on the tensile strength properties of concrete*. Thesis (Master of Engineering), University of Florida, 107p.

[21]MARTÍNEZ P., D.; (2008). *Hormigones de altas prestaciones*. Proyecto Fin de Carrera (Ingeniería Técnica Civil: Arquitectura Técnica), Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, 502p.

[22]MÁRMOL S., P.C.; (2010). *Hormigones con fibras de acero – características mecánicas*. Tesis (Máster en Ingeniería de Estructuras, Cimentaciones y Materiales), Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 81p.

[23]MARUYAMA, I.; KANEMATSU, M.; NOGUCHI, T.; TOMOSAWA, F.; (2001). *Optimization of Mix of Concrete under Various Severe Conditions by Applying the Genetic Algorithm*. The 3rd International Conference on Concrete under Severe Conditions of Environment and Loading (CONSEC'01), Vancouver: 1400-1407.

[24]MIAO, B.; CHERN, J.C.; YANG, C.A.; (2003). *Influences of fiber content on properties of self-compacting steel fiber reinforced concrete*. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 26 (4): 523-530.

[25]MYERS, D.S.; (2006). *Fiber-reinforced concrete and bridge deck cracking*. Thesis (MSc.), University of Oklahoma, Norman, OK, USA, 261p.

[26]NAIK, T.R.; SINGH, S.S.; (1993). *Effects of air content and fly ash on properties of concrete*. Report No., REP-226, Center for By-Products Utilization, The University of Wisconsin – Milwaukee, Milwaukee, WI, USA, December, 44p.

[27]NEMATI, K.M.; GARDONI, P.; NOGUCHI, T.; (2008). *On modulus of elasticity of high-strength concrete*. In: International Conference on Construction and Building Technology – ICCBT 2008, C (14): 159-172.

[28]NOGUCHI, T.; MARUYAMA, I.; KANEMATSU, M.; (2003). *Performance based design for concrete mixture with multi-optimizing Genetic Algorithm*. In: The

11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC): "Cement's

contribution to the development in the 21st Century”. Cement & Concrete Institute. Proceedings, GRIEVE, G.; OWENS, G.; (Editors), Published by Tech Books International, Durban, South Africa, May 11-16: 1921-1930.

[29]NOGUCHI, T.; TOMOSAWA, F.; NEMATI, K.M.; CHIAIA, B.M.; FANTILLI, A.P.; (2009). *A practical equation for elastic modulus of concrete*. ACI Structural Journal, 106 (5): 690-696.

[30]NSR-10; *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10: Título C – Concreto Estructural*. Decreto 926, del 19 de marzo, de 2010, por el cual se establecen los requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismo resistentes NSR-10, del Ministerio de Ambiente, Vivienda, y Desarrollo Territorial. Publicado por: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Santafé de Bogotá, Colombia.

[31]OH, J.W.; LEE, G.W.; LEE, I.W.; (1997). *The proportioning of concrete mixture using Artificial Neural Networks*. Seventh International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, August 19-21, Seoul, Korea, pp.1507-1512.

[32]PCA; (1998). *Control of air content in concrete*. Concrete Technology Today, 19 (1, April): 1-3. KOSMATKA, S.; (Editor), Portland Cement Association, Skokie, IL, USA.

[33]PLAZA, J.; (2010). *Hormigón armado con macrofibras poliméricas STRUX 90/40*. Obras Urbanas, Junio: 90-93.

[34]PUJADAS A., P.; (2008). *Durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno*. Trabajo de Grado (Ing. Civil), Universitat Politècnica de Catalunya, 200p.

[35]RAMAN, S.N.; JUMAAT, M.Z.; MAHMUD, H.; ZAIN, M.F.; (2007). *Fibre reinforced concrete and high performance fibre reinforced cementitious composites: An Overview*. JURUTERA, July: 32-35.

[36]RICHARDSON, A.E.; (2006). *Compressive strength of concrete with polypropylene fibre additions*. Structural Survey, 24 (2): 138-153.

[37]RICHARDSON, A.E.; LANDLESS, S.; (2009). *Synthetic fibres and steel fibres in concrete with regard to bond strength and toughness*. Nothumbria Built Environment Research Papers, 2 (2): 128-140.

[38]ROW, J.r.; (2010). *Benefits of air-entrained concrete*. Bright Hub Inc, 2p. Disponible en Internet:

<http://www.brighthub.com/engineering/civil/articles/84326.aspx> [Mayo 2012].

[39]SAIF ELDEEN, S.A.; TANIGUCHI, T.; (2007). *Two dimensional homogenized models of steel fiber reinforced concrete*. Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology, 12 (1), March: 63-70.

[40]SÁNCHEZ D.G., D.; (2000). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bhandar Editores, Santafé de Bogota, Colombia, 349p.

[41]SIDDIQUE, R.; KHAN, M.I.; (2011). *Supplementary Cementing Materials*. Springer, Berlin, 390p.

[42]THE ABERDEEN GROUP; (1976). *Air entrainment and concrete*. Publication C760105, 6p.

[43]TOMOSAWA, F.; NOGUCHI, T.; ONOYAMA, K.; (1990). *Investigation of fundamental mechanical properties of high-strength concrete*. Summaries of

Technical Papers of Annual Meeting of Architectural Institute Japan, Tokyo, Japan, October: 497-498.

[44]TOMOSAWA, F.; NOGUCHI, T.; (1993). *Relationship between compressive strength and modulus of elasticity of high-strength concrete*. In: Proceedings of the Third International Symposium on Utilization of High-Strength Concrete, Lillehammer, Norway, 2: 1247-1254.

[45] TSAI, C.T.; LI, L.S.; CHANG, C.C.; HWANG, C.L.; (2009). *Durability design and application of steel fiber reinforced concrete in Taiwan*. The Arabian Journal for Science and Engineering, 34 (1B, April): 57-79.

[46]VAN CHANH, N.; (2005). *Steel fiber reinforced concrete*. In: Proceedings of JSCE – VIFCEA Joint Seminar on Concrete Engineering in Vietnam and Workshop, Ho Chi Minh City University of Technology. SAKAI, K.; VAN CHANH, N.; (Editors), Ho Chi Minh City, Vietnam, December 8-9, 2005: 108-116. Published on line by Concrete Committee, Japan Society Civil Engineering, Newsletter, no. 5, April, 2006, Tokyo, Japan. Disponible en Internet: http://www.refwin.com/Final_ed/UploadFile/2011820153554520.pdf, <http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter05/8-Vietnam%20Joint%20Seminar%28CHANH%29.pdf> [Mayo 2012]

[47]VDOT; (2011). *Chapter 1: Components of Concrete*. In: Concrete plant and field certification study guide. Virginia Department of Transportation, Richmond, VA, USA, Version 2011.v1.0: 1.1-1.17. Disponible en Internet: http://www.virginiadot.org/business/resources/Materials/MCS_Study_Guides/bu-mat-ConcreteCh1.pdf [Mayo 2012]

[48]VU, X.H.; DAUDEVILLE, L.; MALECOT, Y.; (2011). *Effect of coarse aggregate size and cement paste volume on concrete behavior under high triaxial compression loading*. Construction and Building Materials, 25: 3941-3949.

[49]WADE, S.A.; SCHINDLER, A.K., BARNES, R.W.; NIXON, J.M.; (2006). *Evaluation of the maturity method to estimate concrete strength*. Research Report No. 1, ALDOT Research Project 930-590, Auburn University, Auburn, AL, USA, May, 307p.

[50]WAFI, F.F.; (1990). *Properties and Applications of Fiber Reinforced Concrete*. JKAU: Eng. Sci., 2: 49-63.

[51]WELKER, C.H.; WATSON, D.; (2007). *Precision air entrainment for high-performance concrete*. Concrete in Focus, Summer: 58-62.

[52]WILL, A.; FOLINO, P.; BÁLZAMO, H.; ETSE, G.; (2008). *Acerca de la conveniencia del uso de Algoritmos Genéticos como herramienta para la dosificación de hormigones*. En: ENIEF 2008 – XVII Congreso sobre métodos numéricos y sus aplicaciones, San Luis, Argentina, Noviembre 10-13, 2008. Publicado en: CARDONA, A.; STORI, M.; ZUPPA, C., (Editores), 2008, Mecánica Computacional, 27 (12): 865-880. Disponible en Internet: <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/1457>, <http://www.fi.uba.ar/archivos/157> [Mayo 2012]