

ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

Estado del Arte: Desarrollos del concreto a nivel de transportabilidad y propiedades mecánicas para su uso en edificios de gran altura.

Johan Andrés Caro González

Escuela Colombiana de Ingeniería

Posgrado en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2021

Estado del Arte: Desarrollos del concreto a nivel de transportabilidad y propiedades mecánicas para su uso en edificios de gran altura.

Johan Andrés Caro González

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título

de:

Magister en Ingeniería Civil

Director (a):

PhD. Nancy Torres Castellanos

Línea de Investigación:

Comportamiento de materiales de construcción

Grupo de Investigación:

Estructuras y Materiales

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Posgrado en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2021

A mis padres; Magda y Fernando, y a mis hermanos; Juan y Daniel, que son la fuente de motivación de todo lo que hago.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a la Escuela Colombiana de Ingeniería por ser el lugar en el que aprendí todos mis conocimientos básicos en el pregrado y también en el posgrado, con su ayuda fue posible la obtención y la recopilación de la información con las herramientas disponibles en sus plataformas digitales y el grupo de profesores que tuve durante el posgrado. También agradezco el papel de colaboración y de supervisión en este trabajo a la Ingeniera Nancy Torres Castellanos que con su comprensión y conocimiento hizo posible que se plasmara de manera correcta la información suministrada en este documento.

Resumen

Con el rápido desarrollo de la economía mundial y el crecimiento de la población, se construirán edificios cada vez más altos en todo el mundo, el concreto como material estructural ofrece adecuadas propiedades mecánicas suficientes y ventajas constructivas para la construcción de rascacielos, por lo que en las últimas décadas la manufactura de edificios totalmente de acero ha disminuido de más del 90% en 1970 a un 20% en la actualidad. Al posicionarse el concreto como el material que ha hecho parte de rascacielos a nivel mundial, ha permitido que la tecnología del concreto avance en búsqueda de lograr mejores propiedades en estado fresco y endurecido. A su vez son importantes otras propiedades del concreto como el módulo elástico, la durabilidad y la trabajabilidad para facilitar las etapas constructivas y de funcionamiento en los edificios de gran altura. En ese orden de ideas, también será importante tener en cuenta constructivamente los sistemas de suministro de concreto como el bombeo que es uno de los medios más frecuentes utilizados para llevar el concreto hasta el lugar de encofrado, especialmente en los rascacielos donde los trayectos de transporte son más largos y altos. Adicionalmente, en el último tiempo se han implementado sistemas de monitoreo estructural en los rascacielos para supervisar durante la etapa de construcción y funcionamiento la salud estructural del edificio. De modo que el objetivo de esta investigación es un resumen del estado del arte sobre avances que se han hecho a nivel mundial en la construcción de rascacielos con concreto reforzado.

Palabras clave: Rascacielos, Módulo Elástico, Resistencia a la Compresión, Edificios de Gran Altura, Bombeo de Hormigón, Trabajabilidad, Durabilidad, Sistema de Monitoreo Estructural, Estado del Arte.

Abstract

With the rapid development of the world economy and population growth, taller and taller buildings will be built all over the world, concrete as a structural material offers adequate mechanical properties and sufficient construction advantages for the construction of skyscrapers, so that in recent decades the manufacture of all-steel buildings has decreased from more than 90% in 1970 to 20% today. The positioning of concrete as the material that has become part of skyscrapers worldwide has allowed concrete technology to advance in the search for better properties in the fresh and hardened state. At the same time, other concrete properties such as elastic modulus, durability and workability are important to facilitate the construction and operation stages of high-rise buildings. In that order of ideas, it will also be important to constructively consider the concrete supply systems such as pumping, which is one of the most frequent means used to take concrete to the formwork site, especially in skyscrapers where the transport routes are longer and higher. Additionally, structural monitoring systems have recently been implemented in high-rise buildings to supervise the structural health of the building during the construction and operation stage. Thus, the objective of this research is to summarize the state of the art on advances that have been made worldwide in the construction of skyscrapers with reinforced concrete.

Keywords: Skyscrapers, Elastic Modulus, Compressive Strength, High-Rise Buildings, Pumping Concrete, Workability, Durability, Structural Monitoring System, State of the art.

Contenido

Resumen	IX
Abstract	X
Contenido	XI
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XIV
Introducción	1
Objetivos	1
1. Propiedades mecánicas en el concreto	3
1.1 Módulo elástico y resistencia a la compresión del concreto.....	8
1.1.1 Agregados en el concreto	12
1.1.2 Adiciones y aditivos en el concreto.	19
1.1.3 Fibras de refuerzo en el concreto.	28
1.1.4 Relación entre la resistencia a compresión y módulo elástico.....	39
1.2 Durabilidad en el Concreto.	44
1.2.1 Contracción.	47
1.2.2 Fluencia.	57
2. Bombeo y transportabilidad en el Concreto	63
2.1 Aspectos del bombeo en el Concreto.	69
2.1.1 Componentes del concreto y su interacción con el proceso de bombeo.	74
2.2 Efectos del proceso de bombeo sobre el Concreto.	77
3. Sistemas de monitoreo en edificios de concreto	83
3.1 Etapa de Construcción.	86
3.2 Etapa de Funcionamiento.....	90
Conclusiones	95
Recomendaciones	97
BIBLIOGRAFIA	99

Lista de figuras

Figura 1.1 Módulos elásticos del concreto con agregados de diferente origen.....	14
Figura 1.2 Comparación de módulos elásticos de rocas y concretos con los agregados derivados	15
Figura 1.3 Esfuerzo a compresión vs. Deformación de Rocas y Concretos con Agregados derivados	17
Figura 1.4 Comparación de propiedades de concreto con distintos agregados finos	19
Figura 1.5 Comparación resistencia a la compresión y modulo elástico en ensayo de cubos	23
Figura 1.6 Resistencia a compresión usando diferentes superplastificantes	27
Figura 1.7 Comparación de resultados de ensayos de corte en vigas con diferentes contenidos de fibra.....	30
Figura 1.8 Comparación de viga con estribos y viga sin estribos con fibras de refuerzo.....	31
Figura 1.9 Resultados de resistencia a flexión en vigas compuestas	33
Figura 1.10 Curvas de histéresis de ensayo de muros de corte.....	35
Figura 1.11 Imagen de SEM de los nanotubos de carbono.....	36
Figura 1.12 Comparación de uso de nanotubos de carbono en el concreto	37
Figura 1.13 Comparación de mezclas de concreto con la adición de nanotubos de carbono.....	38
Figura 1.14 Comparación histórica de resultados obtenidos de modulo elástico y resistencia a compresión	43
Figura 1.15 Diagrama esquemático de la tensión capilar del agua	48
Figura 1.16 Influencia del humo de sílice en la contracción autógena	49
Figura 1.17 Efecto del contenido de fibras en la contracción.....	51
Figura 1.18 Resistencia a la compresión en el concreto con la inclusión de piedra pómez	55

Figura 1.19 Efecto de la piedra pómez en la contracción autógena	56
Figura 1.20 Comportamiento de la Fluencia en el concreto.....	58
Figura 1.21 Deformación por fluencia con diferentes contenidos de ceniza de cascara de arroz.....	60
Figura 1.22 Imágenes SEM de los poros de concreto con la adición de cenizas de cascara de arroz.....	61
Figura 2.1 Flujo de concreto dentro de una tubería.....	65
Figura 2.2 Modelo de Bingham.....	66
Figura 2.3 Tribómetro portable para obras.....	67
Figura 2.4 Esquema de funcionamiento de una bomba para concreto	68
Figura 2.5 Circuitos de bombeo para ensayos.....	68
Figura 2.6 Relación entre el caudal de suministro y las pérdidas de presión.	69
Figura 2.7 Modelo bilineal de pérdidas de presión según el perfil de velocidades ..	70
Figura 2.8 Prueba de ultrasonido para una tubería con concreto.	71
Figura 2.9 Espesor de la capa de deslizamiento con diferentes tramos de bombeo.	72
Figura 2.10 Comparación de pérdidas de presión con diferentes diámetros de tuberías.	73
Figura 2.11 Dosificación de HRWRA para diferentes contenidos de Humo de sílice	75
Figura 2.12 dosificación de HRWRA con diferentes contenidos de Cenizas Volantes	76
Figura 2.13 Comparación de presiones de bombeo requeridas para los sistemas de bombeo.	77
Figura 2.14 Presiones de bombeo de concreto con diferentes longitudes de tubería.	79
Figura 2.15 Imágenes de BSE par análisis de porosidad en la zona de transición con el agregado.....	81
Figura 3.1 Sensores para el monitoreo de estructuras	86
Figura 3.2 Etapas constructivas del Ping-An Finance Center.....	87
Figura 3.3 Longitudes reservadas para la deformación vertical Ping-An Finance Center.....	89
Figura 3.4 Comparación de la deformación real y la deformación estimada	89

Figura 3.5 Funcionalidad en el tiempo con un sistema de monitoreo estructural ... 92

Lista de tablas

Tabla 1.1 Compendio de edificios de gran altura	5
Tabla 1.2 Proporciones de mezcla en ensayo de cubos	23
Tabla 1.3 Dosificación de superplastificantes	26
Tabla 1.4 Ecuaciones de correlación entre el módulo elástico y la resistencia a la compresión.	41
Tabla 1.5 Separación media en función del contenido de fibras.....	52
Tabla 1.6 Contenidos de piedra pómez en el concreto	54
Tabla 2.1 Propiedades reológicas del concreto antes y después del bombeo.	79
Tabla 2.2 Proporciones de mezcla de concreto de ensayo.....	80
Tabla 2.3 Propiedades mecánicas del concreto en estado endurecido en diferentes alturas de bombeo	82

Introducción

El crecimiento de la población en las ciudades y desarrollo económico a nivel mundial han generado que los espacios urbanos sean cada vez más limitados, por eso el crecimiento urbano ha cambiado su forma de manera horizontal a manera vertical, esto ha impulsado a la construcción de edificios más altos donde se busca sacar el máximo provecho a superficie en un terreno limitado y resulta trayendo beneficios económicos importantes en el sector de la construcción (Taranath, 2010). Al mismo tiempo, el costo del terreno urbano aumenta, ya que se tiene un espacio limitado para una demanda creciente. Según Brand (2020), en Colombia las nuevas propuestas en el sector de la construcción son espacios cada vez más pequeños, el fenómeno está influenciado por la disminución del número de personas por hogar en Colombia, ya que en 2005 era 3.9 mientras que hoy en día es de 3.1, por lo cual la población ha reducido el número de hijos o incluso los hogares están pasando a ser unipersonales. Además, agregó el autor que otro factor que influye es que las personas prefieren ubicación a espacio debido a los insuficientes medios de transporte. Por lo tanto, con el rápido desarrollo de la economía mundial se construirán edificios cada vez más altos en todo el mundo, al punto que, hoy en la actualidad casi se han triplicado la cantidad de estructuras de este tipo en los últimos 10 años (Sinn, 2018).

En primer lugar, es necesario aclarar el concepto de edificación alta para entender qué conjunto de características reúne este tipo de edificios. Según Taranath (2010) las estructuras no pueden definirse por el número de pisos o altura total que posea un edificio ya que para una persona puede depender de su entorno, en una ciudad pequeña los edificios de 5 pisos pueden parecer altos, pero en otras partes del mundo los edificios altos alcanzan los 50 pisos o más. Más bien si se quisiera

unificar un concepto de Edificio Alto, desde un punto de vista estructural, es aquel en el que las cargas laterales (el viento) toman relevancia en sus análisis y diseños. Aunque otro concepto propuesto por Tianyuan (2017) sugiere que en medio oriente y China son considerados rascacielos los edificios que superan una altura de 200 metros, ya que son pocos los que pueden alcanzar esas alturas en las zonas consideradas como centros financieros. Pero también coincide en que son las magnitudes de cargas; por acción de fuerzas horizontales, las que diferencian este tipo de estructuras de las demás, por lo que es necesaria una rigidez adecuada en los elementos estructurales junto con la correcta elección del sistema estructural para evitar enormes deflexiones laterales.

Los sistemas estructurales que suelen utilizarse en este tipo de edificios están compuestos por columnas perimetrales y núcleos con columnas interiores o muros de corte (Q. Li et al., 2017). Hay que tener en cuenta que al manejar sistemas estructurales combinados en este tipo de edificaciones implica que se tengan que mejorar las propiedades mecánicas y dinámicas de diferentes tipos de elementos estructurales como: muros de corte, columnas, vigas, etc. Por lo que no son edificaciones que se limiten a usar solo un sistema estructural predeterminado para cumplir los requerimientos de deflexión lateral. Sin embargo, se puede decir que en la elección del material del sistema estructural sí será determinante para cumplir con las exigencias de la normativa. En relación con el material, el concreto es el material que en los últimos años está siendo más utilizado y las principales razones pueden decirse que son la economía (dependiendo de la región), la capacidad de vaciado, la durabilidad, la resistencia al fuego y la eficiencia energética (Sinn, 2018); razón por la cual, en las últimas décadas la construcción de edificios totalmente de acero ha disminuido de más del 90% en 1970 a un 20% (Tianyuan, 2017). Desde el 11 de septiembre de 2001 ha habido cierto escepticismo respecto a la construcción de edificios altos, pero seguirán construyéndose debido a sus importantes beneficios económicos en el uso de suelo urbano denso, por esto también se ha posicionado el concreto para la construcción de estos (Ali & Moon, 2007).

Al contrario de la construcción de edificios de acero, donde es preponderantemente un sistema más mecánico y de encaje de piezas, en la construcción de edificios en concreto se debe tener en cuenta no solo el estado endurecido de la mezcla de concreto, sino que también el estado fresco, ya que se debe pensar en un transporte adecuado de la mezcla hasta las niveles superiores sin que haya segregación de los componentes y en un tiempo en el que no se alcance las primeras etapas de fraguado, por lo que se ha recurrido al proceso de bombeo donde el concreto se transporta como un fluido a través de una tubería (M. Choi et al., 2015). En el caso de las edificaciones de gran envergadura, los trayectos son más largos en las etapas finales de construcción, ya que será mayor el número de niveles en los que se tiene que transportar el concreto y por consiguiente se aumenta la probabilidad de segregación o que se alcance el fraguado de la mezcla durante el trayecto (Jang & Choi, 2019). Por estas razones es importante considerar en el diseño de las mezclas el uso de adiciones y aditivos que ayuden a mejorar no solo el tiempo de fraguado, sino que también facilite el transporte del concreto a través de la tubería y lograr un mejor desempeño durante el proceso.

Otro aspecto fundamental es la durabilidad del concreto, en los edificios de gran envergadura, el concreto debe cumplir no solo con las sollicitaciones que tendrá a lo largo de su vida útil, sino que también tendrá que enfrentar los problemas de fluencia y contracción. La fluencia o creep en el concreto obedece a una deformación permanente que se obtendrá bajo la acción de una carga sostenida (Z. hai He et al., 2017) , este factor es de vital consideración, ya que la magnitud de las cargas estáticas en los edificios de gran envergadura es mayor a las de un edificio convencional. Mientras tanto la contracción en el concreto son las deformaciones o cambios volumétricos asociados a la auto desecación del concreto (Liu et al., 2019), factor de igual importancia, ya que debido a los altos contenidos de material cementante y el bajo contenido de agua en la mezcla de los concretos de alto desempeño que se requieren en la construcción de estos edificios, hace que sea aún más propenso a que se presente este fenómeno en el concreto por la mayor contenido de pasta de cemento que se incorpora en las

mezclas. Por lo que el concreto no solo debe satisfacer una especificación de diseño, sino que también debe proporcionar una durabilidad suficiente en la que no se presente el deterioro en los elementos estructurales de la edificación, ni tampoco cambios volumétricos que generen deformaciones excesivas que puedan inducir nuevos esfuerzos o sollicitaciones a los elementos estructurales. Adicionalmente se han implementado sistemas de monitoreo estructural que permiten mantener una vigilancia constante y en tiempo real del estado de los elementos estructurales (Su et al., 2020) que permiten vigilar el estado del concreto y controlar los fenómenos como la fluencia o creep y la contracción, durante las etapas de construcción y funcionamiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, el concreto es un material compuesto formado por material granular incrustado en una matriz cementante que rellena los espacios entre las partículas de agregado, en el cual es probable desarrollar un tipo de propiedades mecánicas superiores, ajustando los componentes dentro de la mezcla o las proporciones entre ellos y que permita garantizar en igual medida propiedades adecuadas en estado fresco para facilitar su transporte y su uso en edificaciones de gran envergadura.

Dado el impacto que se presenta a nivel mundial en el área de los rascacielos y de la función que cumple el concreto como material de construcción en este tipo de edificaciones, se desarrolló el presente trabajo de grado, cuyo objetivo es mostrar los avances del concreto a nivel mundial en cuanto a propiedades mecánicas, durabilidad y transporte a través del bombeo para la construcción de edificaciones de gran envergadura.

Objetivos

- **OBJETIVO GENERAL:**

Realizar una revisión bibliográfica de los desarrollos del concreto a nivel de avances, propiedades mecánicas y transportabilidad requeridos para su uso en edificios de gran altura.

- **OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- 1.) Identificar los avances en las propiedades mecánicas y transportabilidad del concreto para su uso en edificios de gran envergadura hasta la fecha, teniendo en cuenta casos de estudio que ya se hayan desarrollado o estén por finalizarse.
- 2.) Identificar características que influyen en el comportamiento del concreto para su uso como material estructural en edificaciones de gran envergadura.
- 3.) Realizar una búsqueda de requisitos constructivos y avances normativos a nivel mundial sobre el uso de concreto como material estructural en edificios de gran envergadura.
- 4.) Investigar acerca de ensayos en el concreto característicos para el tipo de estructuras en estudio.

1. Propiedades mecánicas en el concreto.

En la construcción de edificaciones de gran altura en las que se utiliza el concreto reforzado como material principal en su estructura, es importante tener en cuenta que por ser un material compuesto se debe analizar la influencia de sus componentes y la proporción de estos, ya que el comportamiento del concreto no solo depende de la respuesta individual de cada uno, sino también de la interacción entre ellos. Por consiguiente, los investigadores han hecho énfasis en estudiar cada uno de los factores que inciden en el comportamiento y las propiedades mecánicas del concreto en estado fresco y en estado endurecido, por lo que para alcanzar un mejor desempeño del concreto se ha incurrido en la optimización de los agregados, la adición de materiales cementantes y compuestos químicos; que ayudan a remplazar parcialmente el cemento y modifican su comportamiento en estado fresco, junto con un diseño de mezcla adecuado.

En la actualidad, los concretos se pueden diferenciar a partir de las prestaciones o propiedades intrínsecas, entre ellos están: concretos de resistencias normales (NSC, normal strength concrete, por sus siglas en inglés), que son concretos por lo general con resistencias a compresión inferiores a los 42 MPa (Kovacevic & Dzidic, 2018). Luego están los concretos de alta resistencia (HSC, high strength concrete, por sus siglas en inglés), que van hasta los 60 MPa utilizando o no adiciones que replacen parcialmente el cemento (Nehdi, 2013). Si se requiere un concreto de mayor resistencia y con un desarrollo de prestaciones como la durabilidad y el perfeccionamiento del proceso constructivo, se tiene que recurrir a los concretos de altas prestaciones (Benavides, 2014) (HPC, high performance concrete, por sus siglas en inglés), alcanza resistencias a compresión hasta de 90 MPa. Lo siguen los concretos con ultra altas prestaciones (UHPC, ultra high performance concrete, por sus siglas en inglés), que exhiben las propiedades de un HPC, pero pueden

alcanzar un alto modulo elástico, debido a que contienen una cantidad mayor de adiciones y de aditivos en su mezcla; estos pueden alcanzar resistencias a compresión hasta los 150 MPa. También existen los concretos reforzados con fibras que pueden ser de ultra alto desempeño (UHPFRC, ultra high performance fiber reinforced concrete, por sus siglas en inglés) aparte de ofrecer una alta resistencia a la compresión, también ofrece un alto modulo módulo elástico con una ductilidad adquirida gracias a las adiciones de fibras (Wille et al., 2014). Por último, existen los concretos autocompactantes, que ofrecen una fluidez suficiente para no necesitar un proceso de vibrado para su encofrado (SCC, self compacting concrete, por sus siglas en inglés) (Feys et al., 2013).

Los criterios estructurales de diseño como la deflexión lateral y límites de aceleración bajo la acción del viento suelen ser los aspectos que predominan en los análisis para el diseño de edificios de gran altura. Por lo que un edificio alto puede definirse como aquel que, debido a su altura, se ve afectado por las cargas laterales debidas a las acciones del viento o de los terremotos hasta el punto de que desempeñan un papel importante en el diseño estructural (Tianyuan, 2017). Aunque el concepto anterior también aplica para edificios bajos, en este caso el comportamiento y el diseño estructural, estará gobernado por el control de las deformaciones de los elementos estructurales y no tanto por la capacidad de carga de estos (Taranath, 2010).

Siendo el concreto reforzado el material más utilizado en la construcción de edificaciones, se ha comprobado que como material estructural proporciona un mejor amortiguamiento debido a su masa y su rigidez, esto implica una reducción de las fuerzas debidas a cargas laterales como las sísmicas o el viento y también es muy resistente al fuego por lo que puede ser preferido sobre otros tipos de material para las edificaciones de gran altura (Taranath, 2010). Teniendo en cuenta lo anterior, cuando se plantea y se desarrolla un análisis estructural en edificaciones de gran envergadura, el ingeniero estructural a través de un software de diseño calcula las propiedades que requiere, como la resistencia a la

compresión y el módulo elástico, buscando un determinado comportamiento en la estructura, es allí donde crece la necesidad de obtener un concreto con mayor resistencia y mejor desempeño, ya que las solicitaciones tanto ante cargas laterales y cargas verticales serán mayores que las de un edificio normal. En consonancia con lo anterior, se puede decir que el concreto reforzado ofrece al ingeniero diseñador un mejor comportamiento intrínseco para efectos de dinámica estructural, siempre y cuando este logre cumplir con los parámetros requeridos en el diseño estructural.

Para tener un panorama claro de las propiedades que se han manejado en el concreto en algunas de las edificaciones más altas a nivel mundial, a continuación, se muestra un compendio de las características que se encontraron en la literatura durante el desarrollo de este documento con las investigaciones de: Peronto et al. (2017) , Sinn (2018), Aldred (2010), Jiang et al. (2014), Park & Oh (2018), Jung et al. (2022), Chrzanowski et al. (2021).

Tabla 1.1 Compendio de edificios de gran altura

EDIFICIO	Altura (m)	Planta	Año	E (GP)	f'c (MPa)	Adiciones o Aditivos	Fibras de Refuerzo	Particularidad
Jeddah Tower	1000	-	En construcción	43	85	Ceniza Volante	No	Sistema de Muros de Corte
Burj Khalifa	828	163	2010	43	80 y 60	Ceniza Volante (13%-20%); Humo de Silice (5%-10%); HRWRA	No	Agregados gruesos tamaño máximo de 20mm
Shanghai Tower	632	121	2015	37	60	Ceniza Volante y Humo de sílice (a/c= 0.21)	-	Sistema Estructural de Núcleo con muros y columnas perimetrales

Makkah Clock Royal Tower	601	120	2012	33	60	-	-	Sistema estructural de porticos
Ping An Finance Center	598	115	2017	33	60	Ceniza Volante	No	Columnas con perfiles de acero embebidos en concreto

Como pudo observarse en la tabla anterior (Tabla 1.1), Aldred (2010) y Peronto et al. (2017) mencionan algunos de los retos que se tuvo con el concreto reforzado como material estructural en un caso de estudio en específico como el Burj Khalifa, donde se usó una línea de bombeo con un diámetro de 150 milímetros requiriendo para este proyecto que el tamaño máximo nominal de los agregados debía ser de 20 mm, el uso de agregados finos para la mezcla fue aproximadamente un 50%, se utilizaron también materiales en remplazo parcial del cemento como ceniza volante en una proporción de remplazo de 13% a 20% y humo de sílice en 5% a 10%. Adicionalmente, para el proyecto en específico se desarrolló un superplastificante en búsqueda de mantener la manejabilidad del concreto y un alcance temprano en la resistencia. Por otra parte, también se muestra que en el Burj Khalifa el concreto alcanzó un módulo elástico de 43 GPa y resistencias a compresión empezando en los primeros pisos de 80 MPa y luego pasando a 60 MPa.

Otro de los proyectos que se pueden destacar en la tabla 1.1, aunque aún se encuentra en construcción, es el proyecto de la torre Jeddah; Peronto et al. (2017) y Park & Oh (2018) explican cómo debido a la complejidad del proyecto junto con los desafíos que presentará por su envergadura y la meta de alcanzar el kilómetro de altura, el programa de ensayo de pruebas sobre el concreto utilizado fue enfocado a los siguientes aspectos: Resistencia a la compresión al menos de 85 MPa en los pisos inferiores, un promedio de módulo elástico en condición estática de 43 GPa, predicción del creep y deformación por contracción, calor de hidratación, fluidez y la habilidad del material para ser bombeado. Las propiedades mecánicas del

concreto para este proyecto desde su etapa de diseño fueron especificadas con base en los máximos desempeños obtenidos utilizando los agregados locales disponibles, para minimizar el peso propio de la estructura y maximizar el módulo elástico del material.

Actualmente, en Colombia los concretos frecuentemente utilizados tienen una resistencia a compresión que oscila entre los 21 MPa y 35 MPa, si se recurre la norma sismorresistente (NSR-10) (2010), que se aplica a la fecha de desarrollo de este documento, el cálculo del módulo elástico de estos concretos oscilaría entre valores de 21.5 GPa y 27.8 GPa. Si estos se comparan con los valores de las edificaciones de gran altura de la tabla 1.1 se encuentra que los concretos que se utilizan en Colombia a penas alcanzan un 66% del rendimiento de los usados en estos proyectos.

La importancia de las propiedades mecánicas del concreto se resalta desde los cursos básicos de la ingeniería estructural junto con el estudio de los materiales más usados en la construcción, también se estudia el cómo obtener un mejor desempeño en estas propiedades donde según algunos valores de referencia, especialmente de resistencia a la compresión, se habla de concretos de normal resistencia, alta resistencia y ultra alta resistencia. Se ha planteado diferentes conceptos frente a las propiedades del concreto, por ejemplo, los términos como: concretos de alta resistencia y concreto de alto rendimiento se utilizaban comúnmente como sinónimos cuando no había suficiente desarrollo en el concreto. Hoy en día los términos son totalmente diferentes, el concreto de alta resistencia hace referencia a un aumento en la resistencia a la compresión, mientras que el concreto de alto rendimiento o desempeño es un aumento de todas las propiedades intrínsecas como la durabilidad, la trabajabilidad, la permeabilidad, entre otros. Lo que representa mucho más que un simple aumento en la resistencia (Kovacevic & Dzidic, 2018). En resumen, los desarrollos en el concreto no solamente buscan valores objetivo de un módulo elástico o resistencia a la compresión, sino también una mayor durabilidad y un mejor comportamiento a lo largo de la vida útil de las

edificaciones, en este capítulo se hará énfasis en presentar algunos de los avances en el concreto reforzado que se han requerido para ser usado en edificaciones de gran envergadura.

1.1 Módulo elástico y resistencia a la compresión del concreto

Para la construcción de edificaciones de gran altura, la importancia de un mejor desempeño del concreto podría decirse que se resume en dos aspectos. En cuanto al módulo elástico, los diseñadores de los edificios altos suelen especificar un módulo de elasticidad elevado para limitar las deformaciones laterales y garantizar el confort de los ocupantes y la protección de los elementos no estructurales (Shah & Konsta-Gdoutos, 2017). Por otra parte, un aumento en la resistencia en la compresión conlleva a reducción del tamaño de elementos estructurales y también a la reducción de la cuantía de refuerzo longitudinal en los elementos que trabajan principalmente a compresión, logrando columnas más delgadas con una mayor resistencia y un mejor rendimiento. Es así como estos efectos se traducen en luces más grandes entre vanos y la disminución de las secciones transversales en vigas y columnas (Kovacevic & Dzidic, 2018). Adicionalmente, si se analiza de manera estructural los edificios como los rascacielos, se puede decir que las cargas gravitacionales y las cargas laterales tienen una mayor magnitud si se compara con las edificaciones que tradicionalmente pueden encontrarse en casi todas las ciudades, de modo que las solicitaciones de los elementos estructurales y del concreto serán mayores, es por eso que existe el interés de obtener concretos con mejores prestaciones que permitan construir edificios altos garantizando su funcionalidad a lo largo de su vida útil.

Actualmente, frente al desafío de las deformaciones laterales, la experiencia hasta la fecha en el diseño estructural plantea que, para este tipo de edificaciones, en cuanto a cargas laterales, es más eficaz aumentar la rigidez del concreto (módulo

elástico) que aumentar la sección transversal de los elementos (Tianyuan, 2017). Para efectos prácticos el comportamiento de los edificios altos, estos pueden asemejarse como una viga en voladizo vertical que se somete a cargas verticales que son las gravitacionales y las horizontales que son las cargas laterales, bien sea por viento o sismo (Lai et al., 2021). Entonces, el ingeniero diseñador debe tener en cuenta que, para las estructuras de varios pisos, el momento de vuelco y la deriva lateral serán proporcional al número de pisos. Por ejemplo, Tianyuan (2017), indica que para un edificio con “n” pisos, el momento de vuelco es proporcional a $n^2/2$ y la deriva lateral n^2 . Por lo que entre más alto y más pisos tenga una edificación, mayor será su momento de vuelco y su deriva lateral. El mismo autor plantea que para controlar o incluso reducir las deformaciones de los edificios altos una de las medidas es aumentar el módulo elástico del concreto, a continuación, se mostrará como el autor llega a esta conclusión:

- En la ecuación (1) se describe de manera práctica el desplazamiento lateral de un entrepiso de una estructura en una dirección teniendo en cuenta todos los elementos que le proporcionan rigidez, donde los dos primeros términos son los desplazamientos laterales en una dirección de los elementos verticales que componen el entrepiso y el tercer término es la deformación lateral correspondiente al giro en los nodos de los elementos:

$$\delta_i = \frac{Q_i h_i^2}{E \sum (I_g/L)} + \frac{Q_i h_i^2}{E \sum (I_c/h_i)} + h_i \theta_{ib} \quad (1)$$

$$\Delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (2)$$

La deriva superior o total de la edificación, en la ecuación (2) se explica como la suma de los desplazamientos individuales de cada planta. En términos generales, si se aumenta el módulo elástico del material estructural, en este caso del concreto, la deriva total se reducirá significativamente debido a su

relación directa entre el número de plantas y el desplazamiento lateral de cada una de ellas.

- Por otro lado, la estructura de núcleo con muros de corte o portantes es uno de los tipos de estructura comúnmente utilizada en el diseño de edificios altos. Este componente estructural es el encargado de soportar las cargas de torsión que en la realidad existen de manera frecuente producto de: la asimetría en la forma estructural, la excentricidad de fuerzas resultantes ocasionadas por el viento o, en el caso de fuerzas sísmicas, hace que el centro de masa no coincida con el centro de rigidez. Por lo cual, la reducción de las deformaciones de alabeo por torsión es la principal preocupación al diseñar este tipo de estructuras, la torsión aportada por las fuerzas de corte es descrita de la siguiente manera:

$$T_w(z) = -EI_w \frac{d^3\theta}{dz^3} \quad (3)$$

Donde en la ecuación (3) el término I_w es el momento de inercia de alabeo, como se puede apreciar, la resistencia a la torsión de alabeo en el núcleo de muros de corte incrementará a medida que aumente el módulo elástico del concreto.

- Las estructuras que solo están compuestas por muros de corte también suelen ser comunes en edificios altos, los muros actúan como un miembro portador de cargas gravitacionales y proporcionan la resistencia ante cargas laterales. En este caso, en los sistemas estructurales compuestos únicamente por muros, el cortante resultante (4) y el momento resultante (5) en un muro j en el nivel i , en estructuras sin torsión, son:

$$V_{ji} = V_i \frac{(EI)_{ji}}{\sum (EI)_i} \quad (4)$$

$$M_{ji} = M_i \frac{(EI)_{ji}}{\sum (EI)_i} \quad (5)$$

Entonces, para estructuras de este tipo en las que no se presenta torsión, el esfuerzo de corte y el momento resultante pueden reducirse si se aumenta el módulo elástico del concreto.

- Por último, existen edificios donde se combinan los sistemas estructurales de pórticos rígidos y muros de corte donde se pueden alcanzar a diseñar estructuras de 50 pisos o más. Para esta alternativa, la deformación lateral está gobernada por la siguiente ecuación (6):

$$y^{(4)} - \alpha^2 y'' = \frac{\omega}{EI} \quad (6)$$

donde se puede ver que la deflexión lateral está relacionada con el valor del módulo elástico del material estructural. Siendo más específicos, la solución general para este caso, la ecuación gobernante de la deflexión lateral está dada por:

$$y(x) = \frac{w_0 H^4}{EI(\alpha H)^4} \left[\frac{\alpha H \sin(\alpha h + 1)}{\cos(\alpha h H)} \cos(\alpha h x - 1) - \alpha H \sin(\alpha h x) + (\alpha H)^2 \left(\frac{x}{H} - \frac{x^2}{2H^2} \right) \right]$$

La anterior solución muestra que el módulo elástico es el único factor, con respecto al material estructural, que podría influir en la deflexión lateral. El aumento de esta propiedad reducirá directamente el desplazamiento lateral de la estructura. También es importante la consideración de la inercia de la sección transversal, pero es un componente asociado al sistema estructural y los elementos que lo componen.

En el análisis anterior de los diferentes tipos de analogías planteadas por Tianyuan (2017), se puede decir que son consideraciones válidas en el análisis de un edificio de gran altura y concluye que, la mejora del módulo elástico del concreto es un factor con influencia directa para reducir la deflexión lateral.

Teniendo claro la importancia de mejorar las propiedades del concreto, el siguiente paso es cómo lograr los resultados deseados en el concreto considerando las

necesidades que puede tener cada proyecto en específico. Se han planteado diferentes aspectos en los cuales se han enfocado los investigadores como la optimización de los agregados y el estudio de su procedencia, la zona de transición o interfase entre los agregados y la calidad de la pasta de cemento, el uso de materiales que remplazan parcialmente el cemento (adiciones minerales), el uso de productos que modifican las propiedades reológicas (aditivos químicos), la relación agua-cemento, la inclusión de fibras de refuerzo, entre otros.

En este capítulo se presentarán algunos avances que se han realizado hasta la fecha en cada uno de los aspectos que componen el concreto con el fin de obtener mejores propiedades y desempeños en el concreto estructural para su uso en edificaciones de gran altura.

1.1.1 Agregados en el concreto

Hacen parte de los componentes principales para la elaboración del concreto, y los principales elementos de estudio para modificar sus propiedades mecánicas, como se había mencionado anteriormente la respuesta individual de cada componente influye en el comportamiento final en estado endurecido del concreto.

- **Agregados Gruesos:**

El mayor porcentaje de volumen en el concreto corresponde a los agregados, por ello la selección de estos debe ser óptima buscando el mayor beneficio para la mezcla, los factores relevantes para tener en cuenta son la densidad, el tamaño, la forma y la textura que ofrecen. Para la producción de concreto de alta resistencia los agregados rugosos y angulosos permiten una mejor unión mecánica la pasta de cemento (Kovacevic & Dzidic, 2018).

Debido a que el tipo de agregados a usar será un factor determinante en el módulo elástico del concreto y más aún si este es un requerimiento especial de la estructura

Taranath (2010), indica que es importante identificar los factores en relación con los agregados que influyen en la respuesta estructural del concreto. En la mayoría de los proyectos de construcción de edificios de concreto reforzado utilizan materia prima de origen local, con el fin de tener mayor agilidad en la producción y evitar sobrecostos. En consecuencia, si se tiene conocimiento de los agregados disponibles en el entorno local se pueden lograr mayores beneficios en el concreto y ofrecer mayor claridad al ingeniero diseñador de los concretos que pueden fabricarse de acuerdo con la ubicación del proyecto.

Se han realizado estudios que permiten analizar los factores que afectan el módulo de elasticidad del concreto, incluidos los tipos de agregado fino y grueso, la proporción de arena, el humo de sílice, la proporción de agua cemento, la clasificación de la arena, la proporción agregados-cemento y los aditivos minerales; es así como Tianyuan (2017) planteó un análisis experimental donde obtuvo dos tipos de concreto, uno de ellos con roca volcánica como agregado grueso y arena de río como agregado fino, el otro con roca de granito como agregado grueso y piedra triturada como agregados finos. El resultado fue que la primera combinación obtuvo una mayor rigidez en el concreto a los 28 días ambos con una proporción de 10% de remplazo de cemento con humo de sílice, que resultó siendo el valor más conveniente para obtener un mayor módulo elástico en el concreto. En la Figura 1.1 se muestran algunos de los resultados obtenidos en la investigación, la comparativa de los agregados incluye la variación de la relación agua-cemento ($1=0.43$; $2=0.33$; $3=0.28$), con el objetivo de analizar también la influencia del contenido de agua y material cementante en el módulo elástico. De hecho, se puede observar que el módulo elástico aumenta con el contenido de material cementante en la pasta de cemento, en una relación bilineal y presentando un mayor módulo los realizados con relación de 0.3 ó 0.28.

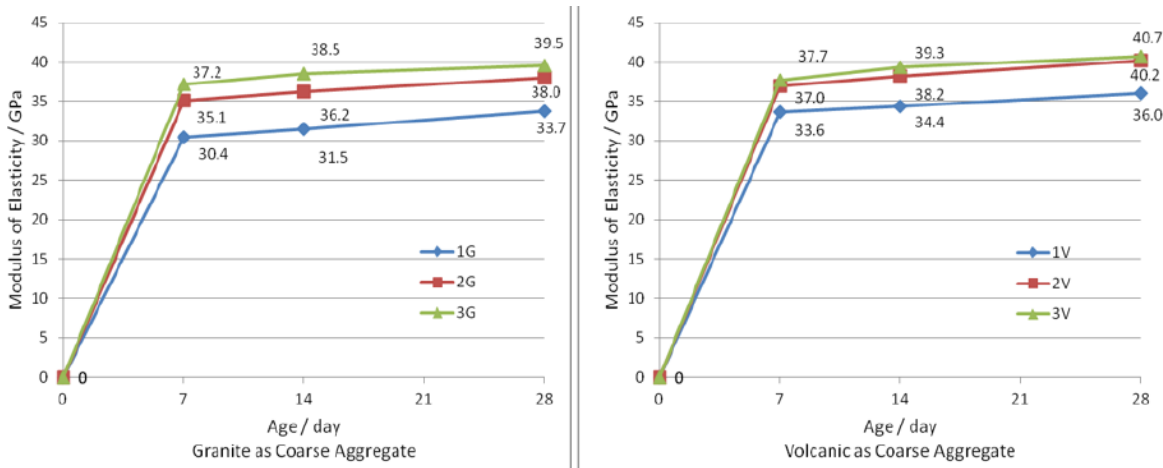


Figura 1.1 Módulos elásticos del concreto con agregados de diferente origen

Fuente: Tianyuan, F. (2018). *Development of high modulus concrete for tall buildings*.

En la misma investigación se planteó el análisis de la relación agregado- cemento comparando los resultados obtenidos para el módulo elástico y la resistencia a la compresión. Con el aumento de valores de agregado-cemento de 3.03 y 3.34, se presentó una reducción de resistencias a compresión y módulo elástico a los 28 días, del orden de 3.6% y 1.1%, según el autor, esto repercute en tener una matriz más fragmentada por un mayor contenido de agregados, lo que hace que sea un concreto menos compacto y rígido.

En otro estudio, Piasta et al. (2017) hicieron énfasis en la influencia de las rocas madre de los agregados gruesos, que puede dividirse en dos: 1.) Propiedades mecánicas de la roca y los agregados gruesos, 2.) La composición mineral de los agregados que está relacionado con la unión de la pasta y los agregados. En este estudio, se compararon los módulos elásticos de 4 diferentes tipos de roca (Basalto, Granito, Dolomita y Cuarzita) de concretos fabricados con los agregados gruesos derivados de las rocas en estudio, calculado de dos maneras: uno a partir de las mediciones realizadas durante el experimento y otro según los lineamientos del Euro-Código 2 (Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1 : General Rules and Rules for Buildings, 1992). A continuación (Figura 1.2) se presenta los resultados

en una gráfica para su comparación, hay que resaltar que aquí también se pudo realizar la comparación entre diferentes relaciones agua-cemento.

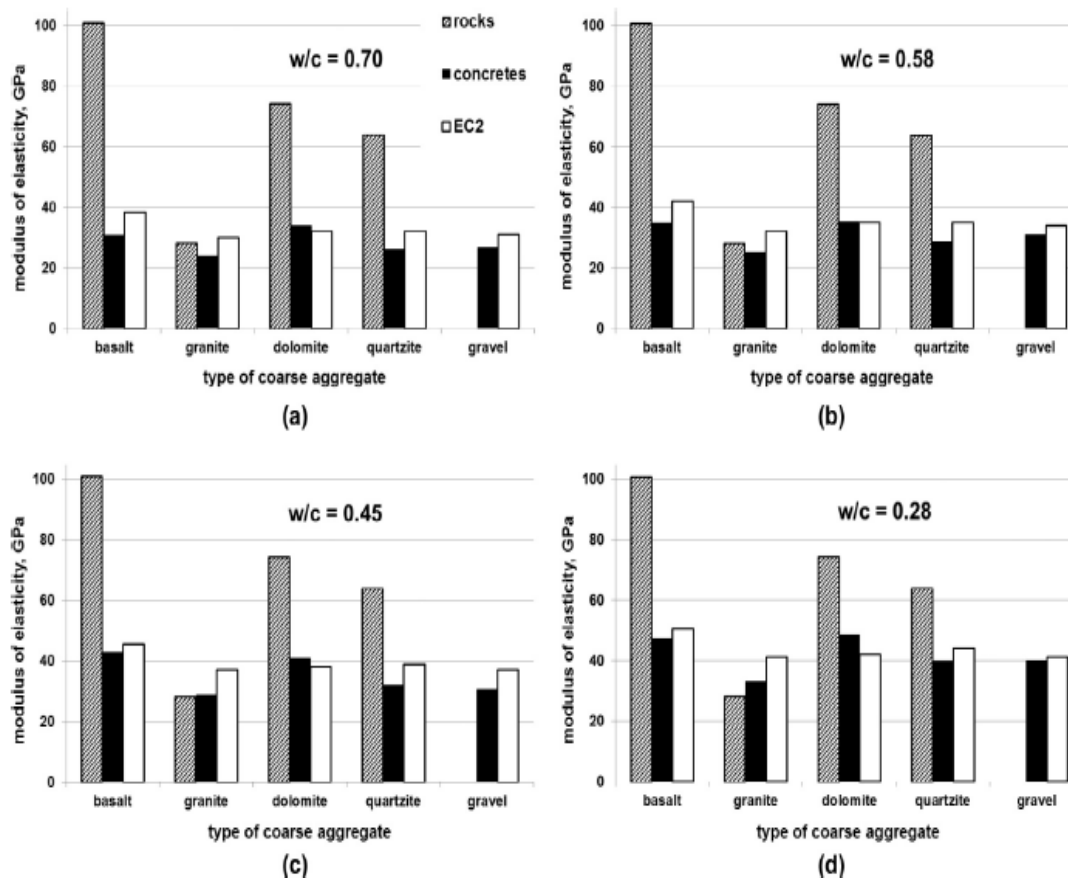


Figura 1.2 Comparación de módulos elásticos de rocas y concretos con los agregados derivados

Fuente: Piasta et al. (2017). Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and ordinary and high performance concretes.

Una de las conclusiones de la investigación es que se confirma que las deformaciones del concreto tienen una relación directa con el módulo elástico desarrollado y la composición mineral de las rocas. De otro lado, si se hace un análisis de las rocas madre y se comparan con el comportamiento del concreto fabricado con los agregados derivados de las mismas como se muestra en la Figura 1.3, se puede observar una mejor correlación en el comportamiento. El beneficio en las propiedades obtenidas con el uso de agregado proveniente de la dolomita

está relacionado con la acción de fases de carbonato en la microestructura de la pasta en la zona de interfase (Piasta et al., 2017).

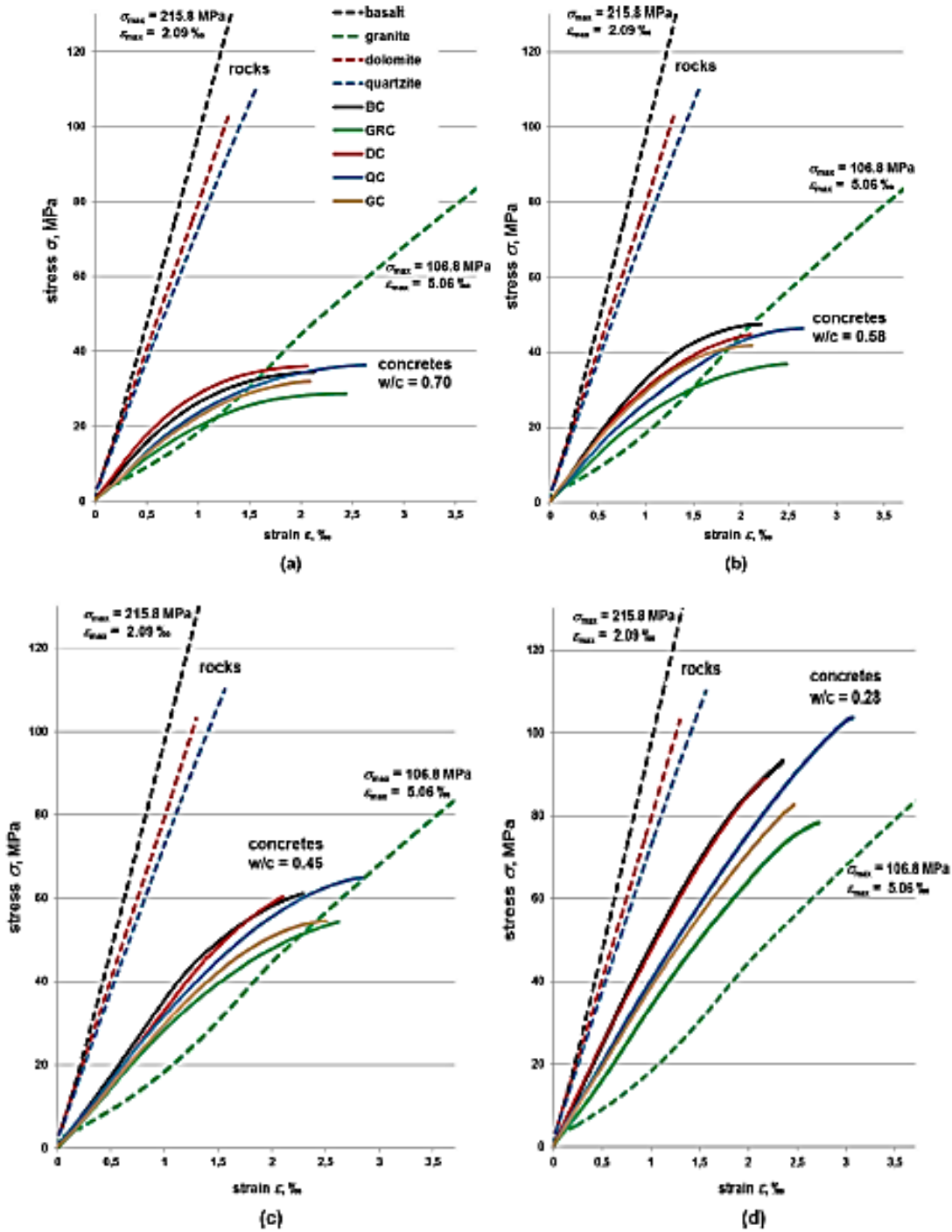


Figura 1.3 Esfuerzo a compresión vs. Deformación de Rocas y Concretos con Agregados derivados

Fuente: Piasta et al. (2017). Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and ordinary and high performance concretes.

De lo anterior se puede concluir que la influencia de los agregados gruesos en las propiedades del concreto es un aspecto para tener en cuenta para el desarrollo y construcción de edificios de gran envergadura. Como se hacía mención anteriormente este aspecto será determinante según la región o la ubicación del desarrollo del proyecto porque por razones de facilidad en la producción del concreto, siempre será conveniente usar los agregados derivados de las rocas disponibles en la zona. Hay que decir que las propiedades de la roca de donde se extraen los agregados gruesos, no pueden ser base para predecir las propiedades que estos brindan en el concreto. La identificación de la composición mineral de la roca madre de los agregados será un indicador más fiable para seleccionar el agregado óptimo (Piasta et al., 2017). Incluso, los altos valores de resistencia a la compresión de rocas como la dolomita no determinan la resistencia del concreto, como se pudo apreciar en la Figura 1.3. En síntesis, el cambio en los agregados gruesos, según su origen y su composición, tuvieron mayor influencia en los módulos elásticos que en los valores de resistencia a compresión obtenidos.

Por otra parte, en el Eurocódigo (Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, 1992), la ecuación para el cálculo del módulo elástico en un concreto es:

$$E_{cm} = 22(0.1 f'_{cm})^{0.3}$$

Donde f'_{cm} es la resistencia a la compresión del concreto en MPa: En esta ecuación se indica que para los agregados de basalto; el resultado debe incrementarse un 20%, mientras que para los agregados de caliza y arenisca el valor debe reducirse en un 10% y 30%, respectivamente, hay que decir que esta ecuación aplica para concretos hasta una resistencia de 90 MPa. Al observarse la figura 1.3.(d), que es

donde más se puede diferenciar la influencia de los agregados con una baja relación agua-cemento, no hay una diferencia del orden del 20% en el módulo elástico del concreto usando los agregados de basalto, identificando que en este caso la propiedad del concreto se sobreestima, lo cual puede ser un falso incremento de rigidez en el concreto.

- **Agregados Finos:**

Para este tipo de agregados también se han realizado estudios para conocer que influencia tienen en el desarrollo de propiedades en el concreto. En la actualidad se pueden usar dos alternativas de agregado fino para la fabricación de concreto, una de ellas se obtiene de manera directa de la naturaleza que es la arena de río, la otra alternativa es roca triturada que podría decirse surge como alternativa a raíz de una carencia de la primera alternativa en los entornos locales para la producción de concreto (Tianyuan, 2017).

Los ensayos de concretos, considerando estas alternativas y manejando un mismo asentamiento para el diseño de la mezcla, han mostrado que los agregados finos toman aún más relevancia en la rigidez que en la resistencia a la compresión (Figura 1.4). Tianyuan (2017) plantea dos causas que contribuyen al aumento de la rigidez que proporciona el uso de arena de río como agregado fino, la primera es su principal componente, el dióxido de silicio, que resulta beneficioso para la mejora en la rigidez. La segunda causa es la morfología que en las dos alternativas es distinta, la mayoría de las partículas de la arena de río son esféricas, cúbicas e irregulares, mientras que las partículas de la roca triturada son planas, con forma de aguja o prismáticas que en comparación con las otras son menos resistentes y resultan ser más frágiles por su poca capacidad de carga. Adicionalmente, el proceso de obtención de los agregados puede ocasionar micro fisuras en las partículas que también pueden reducir su resistencia.

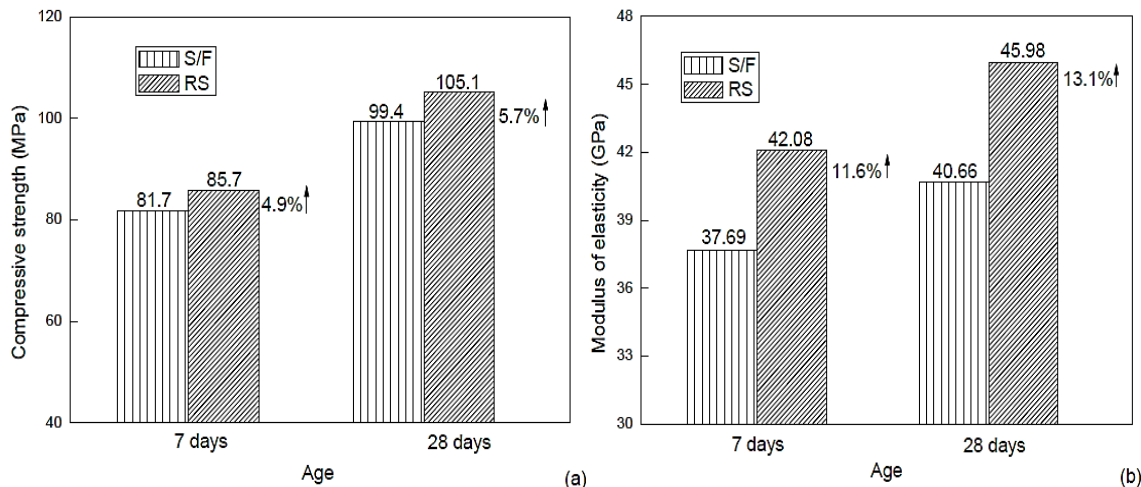


Figura 1.4 Comparación de propiedades de concreto con distintos agregados finos (arena de río (RS) y roca triturada (S/F))

Fuente: Tianyuan, F. (2018). Development of high modulus concrete for tall buildings.

En el estudio desarrollado por Kovacevic & Dzidic (2018), evidenciaron que el uso de la arena de río (River Sand: RS) tuvo una influencia positiva y de magnitud considerable en la rigidez del concreto, logrando un incremento rápido a los 7 días comparado con la roca triturada. Los autores concluyeron que para la optimización de los materiales que componen el concreto y obtener un mejor desempeño, no solo los agregados gruesos influyen en la rigidez del concreto según su procedencia. Al conocer este aspecto en los agregados finos podría deducirse que morfología tendrán y si aportan a una mayor rigidez a la pasta de cemento. Adicionalmente se podría decir que la morfología adecuada contribuye a un mejor empaquetamiento en la mezcla de concreto y hace que sea menos poroso en estado endurecido.

1.1.2 Adiciones y aditivos en el concreto.

El concepto de aditivo o adición se refiere a un material que es distinto del agua, agregados, cemento hidráulico o refuerzo de fibra que se utiliza como componente de una mezcla cementante para modificar sus propiedades en estado fresco, y en estado endurecido y que se añade antes o durante su mezcla (ASTM C125-21, 2021). El uso de estas adiciones surge a partir de la necesidad de producir un concreto de

alta resistencia y con mejores prestaciones haciendo énfasis en la reducción de la relación agua-cemento, como se ha observado anteriormente (Figura 1.1, Figura 1.2 y Figura 1.3), las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y el módulo elástico aumentan si en la proporción de la mezcla hay un mayor contenido de material cementante y a la vez un menor contenido de agua. Con el uso de las adiciones, que remplazan parcialmente el cemento, es posible llegar a las cantidades de material cementante que demanda el concreto de alta resistencia y altas prestaciones para su uso en edificios de gran altura.

El cemento Portland como materia prima ha demostrado ser adecuado para la producción de concretos con una resistencia hasta de 60 MPa a los 28 días de edad optimizando la mezcla y sus componentes. Sin embargo, es necesario diseñar y estudiar las reacciones entre los aditivos químicos y minerales si se quiere lograr una mayor resistencia y un mejor desempeño con una buena trabajabilidad (Kovacevic & Dzidic, 2018). En efecto, la adherencia de los agregados a la pasta y la resistencia al fisuramiento de la pasta aumentan con la disminución de la relación agua/cemento, lo que se asocia con la reducción del ancho y porosidad de la zona de transición interfacial. Aunque allí también influyen factores como la microestructura de la zona de transición interfacial y la adhesión de los agregados a la pasta, que dependen de la rugosidad de la superficie y de la composición mineral del agregado (Piasta et al., 2017). Es decir, si se quiere lograr mayores resistencias y mayor rigidez en el concreto una de las variaciones en la mezcla a realizar será reducir la relación agua-cemento. La modificación de este parámetro siempre resulta ser beneficioso para el estado endurecido del concreto, pero hay aspectos en los que algunas adiciones no resultan favorables, como es el caso de la fluidez de la mezcla en el estado fresco, lo que implica mayor trabajo constructivo en obra para lograr el transporte al sitio de vaciado del concreto y el encofrado dentro de las formaletas.

Por esta razón se ha implementado el uso de adiciones que no solamente contribuyan a mejorar las propiedades del concreto, sino que también permitan manejar relaciones agua cemento bajas sin sacrificar la trabajabilidad del concreto en estado fresco. Los componentes adicionales que pueden incorporarse al concreto pueden dividirse en dos grupos, los aditivos que contribuyen a un mejor comportamiento en estado endurecido de concreto y las adiciones químicas que buscan modificar las propiedades reológicas en estado fresco para la trabajabilidad y alcanzar resistencias tempranas (Torres et al., 2020).

Las adiciones pueden ser consideradas como subproductos industriales que se utilizan para reemplazar parcialmente el cemento y al incorporarlas se reutiliza y valoriza un residuo para producir un material con excelente desempeño (Agustin et al., 2018). La mezcla de estos materiales tiene como ventaja una menor tasa de desarrollo de calor de hidratación, mayor resistencia y durabilidad combinado con una baja tasa de permeabilidad. Los más usados son los materiales silíceos y de alúmina que con la adición de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio, como resultado se obtienen mejores propiedades cementantes (Kovacevic & Dzidic, 2018).

Con el uso de las adiciones también se ha planteado el uso de agregados y arenas bien gradadas para contribuir a un mejor empaquetamiento de las partículas en la mezcla, aunque no es tan práctico producir en masa arenas bien gradadas, el complemento con las adiciones minerales contribuyen para obtener mejores rendimientos en el concreto (Shah & Konsta-Gdoutos, 2017). Según los estudios sobre el rendimiento del concreto autocompactante utilizado para el Burj Khalifa, la porosidad de la pasta de cemento y la zona de transición interfacial debía reducirse para lograr una alta resistencia, esto se logra incrementando la densidad y el empaquetamiento de los componentes de la mezcla junto con una menor relación agua-aglutinante y el uso de superplastificantes con materiales cementantes suplementarios como el humo de sílice y Ceniza Volante (Aldred, 2010; Nehdi, 2013). El uso de humo de sílice aumenta el módulo elástico del concreto incrementando

la densidad de la interfaz pasta-agregado, por ejemplo, el beneficio que ofrece el uso de humo de sílice en la mezcla es el fortalecimiento de la unión entre los agregados gruesos y la pasta de cemento junto con la reducción parcial de cemento, 1 kg de humo de sílice puede sustituir de 2 a 5 kg de cemento, generalmente el remplazo de cemento con humo de sílice es del 10%, esto es totalmente eficiente para la producción de concretos de alta resistencia que demanda de grandes cantidades de cemento, aunque es importante considerar su impacto desde lo económico por su costo. El humo de sílice está disponible en el mercado, en diferentes presentaciones como lechada a base de agua, densificado o paletizado, la forma más común de añadir a la mezcla de concreto es en polvo densificado, las partículas de este producto son casi 100 veces más pequeñas que las de cemento Portland (0.1 a 0.3 micrómetros) (Kovacevic & Dzidic, 2018), lo que puede requerir un mayor porcentaje de agua afectando factores como la fluidez y otras propiedades deseadas, los bajos contenido de agua es algo característico en los concretos de alta resistencia. Además, la inclusión de reductores de agua, también llamados como superplastificantes (aditivos químicos), no solo ayudan en un incremento del módulo elástico de la pasta en el concreto, sino que permiten no afectar la fluidez del concreto con los grandes contenidos de material cementante y de agregados en la mezcla.

Los investigadores han hecho uso de este tipo de adiciones en el concreto y han comparado los resultados obtenidos en los ensayos con ecuaciones de referencia de las normas de diseño. Como puede apreciarse en la Figura 1.5, en este caso de estudio, la ecuación de referencia utilizada fue la proveniente del código de prácticas de Hong Kong para el concreto de uso estructural.

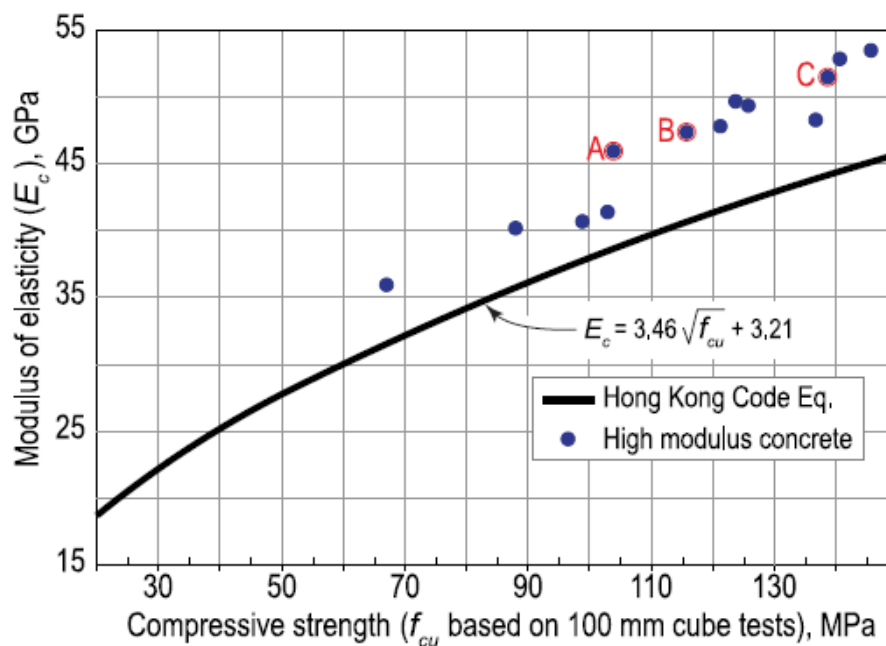


Figura 1.5 Comparación resistencia a la compresión y modulo elástico en ensayo de cubos

Fuente: Shah & Konsta-Gdoutos (2017). *Uncoupling Modulus of Elasticity and Strength*.

Aunque la ecuación es válida para concretos con peso normal y resistencia a compresión entre 20 MPa y 100 MPa, proporciona un límite bastante inferior si se compara con las probetas de ensayo A, B y C descritas en la Tabla 1.1.

Tabla 1.2 Proporciones de mezcla en ensayo de cubos

Fuente: Shah & Konsta-Gdoutos (2017). *Uncoupling Modulus of Elasticity and Strength*.

Mixture	OPC, kg/m ³	PFA, kg/m ³	CSF, kg/m ³	Coarse aggregate, kg/m ³		River sand, kg/m ³	Water, kg/m ³	HRWRA, L/m ³	w/cm*
				20 mm	10 mm				
A	405	90	50	525	425	735	150	12	0.28
B	425	90	50	535	435	745	130	18	0.23
C	435	85	55	545	445	755	115	20	0.20

*Excluding water in HRWRA

Las proporciones de mezcla mostraron valores de resistencia a la compresión por encima de los valores de referencia que provee la ecuación del código de Hong Kong, uno de los aspectos más relevantes es la relación agua-cemento en los 3 casos, se encuentra por debajo de 0.30, que es un valor de referencia bajo, incluso llegando a 0.20 que puede considerarse una relación bastante baja. También cabe destacar que el contenido de cemento (OPC) incrementa junto con el humo de sílice (CSF) y cenizas volantes (PFA) solo en la probeta C, donde hay una variación considerable en cuanto a resistencia a la compresión y modulo elástico en contraste con las otras probetas A y B. Mientras que, en las otras dos entre sí se mantiene el mismo contenido de adiciones y se presenta una variación notable solo con la resistencia a la compresión. Esto quiere decir que el módulo elástico del concreto puede verse más influenciado por el contenido de adiciones que por los otros factores, a pesar de que fue gradualmente variado el contenido de agregados y arena junto con el de cemento no se obtuvo una variación o influencia notable.

En comparación con el concreto convencional de resistencias normales, el concreto de alta resistencia posee una relación agua-cemento que oscila entre valores de 0.22 y 0.4 (Kovacevic & Dzidic, 2018; Shah & Konsta-Gdoutos, 2017) y es ahí, donde con la ayuda de los aditivos se mejora el comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido ya que sin ellos el transporte, la colocación y el curado del concreto serían procesos más complejos en la construcción de edificios de gran altura. Por consiguiente, el uso de aditivos en el concreto busca modificar las propiedades reológicas en el concreto para mejorar la fluidez y la trabajabilidad del concreto, según la (ASTM C494/C494M-13a, 2013) existen 7 tipos de aditivos y los clasifica de la siguiente manera:

- 1.) Acelerantes; tienen como objetivo acelerar el fraguado del concreto y buscan un desarrollo temprano en la resistencia.
- 2.) Retardantes; buscan retardar el fraguado del concreto.

- 3.) Reductores de agua; reducen el contenido de agua necesario para producir un concreto con un bajo contenido de agua y sin perder consistencia.
- 4.) Reductores de agua de alto rango; reduce la cantidad de agua requerida para producir un concreto con una consistencia de un 12% o mayor.
- 5.) Reductores de agua y acelerantes; al igual que un reductor de agua busca reducir el contenido de agua en la mezcla y acelera el fraguado del concreto junto con una resistencia temprana.
- 6.) Reductores de agua y retardantes y
- 7.) Reductores de agua de alto rango y retardantes que son combinación de las características anteriores.

Para la producción de concreto de alto desempeño, los aditivos más usados son los reductores de agua de alto rango (HRWRA), como se pudo observar anteriormente (Figura 1.5 y Tabla 1.1) el uso de estos aditivos contribuye a obtener mayor resistencia en el concreto y un módulo elástico alto con la ventaja de modificar a conveniencia propiedades en el estado fresco de la mezcla.

El desarrollo de este tipo de aditivos puede decirse que empezó en los años sesenta en Japón, donde el doctor K. Hattori empleó superplastificantes como los condensados de formaldehído de sulfonatos de beta-naftaleno, los cuales tenían como función principal reducir la demanda de agua en la producción de concreto de alta resistencia hasta en un 30% (Kovacevic & Dzidic, 2018). Con el paso del tiempo, los aditivos químicos se han ido optimizando para lograr mejores resultados y llegar a los comportamientos deseados en el concreto, para lograr cumplir los requerimientos descritos en la normativa ASTM-C494. En la elaboración de estos, suelen usarse varios componentes químicos, por ejemplo, el poli-naftaleno sulfonato (PNS), poli-melamina sulfonato (PMS) y los polímeros basados en el éter de poli-carboxilato (PCE), todos estos productos químicos buscan dispersar las partículas de cemento y aumentar la fluidez (Torres et al., 2020). Por eso es

importante determinar la dosis correcta en la mezcla de concreto para obtener la adecuada manejabilidad de la mezcla de concreto, manteniendo relaciones agua-cemento bajas y garantizando un asentamiento constante.

Varios autores han estudiado el efecto de los diferentes tipos de superplastificantes sobre las propiedades en estado fresco y de resistencia del concreto autocompactante. Por su parte Mardani-Aghabaglou et al. (2013) en su investigación, describe como el mecanismo de dispersión de los superplastificantes a base de PCE está más relacionado con un efecto de impedimento estérico (configuración espacial de los átomos y estructuras moleculares) producido por la presencia de cadenas químicas. Mientras que la dispersión de los superplastificantes del tipo PNS y PMS es causada por la presencia de grupos aniónicos cargados negativamente, estos son responsables de la adsorción de los polímeros en la superficie de las partículas de cemento.

En otro estudio, (Torres et al., 2020) realizaron ensayos de resistencia a la compresión usando 2 tipos de adiciones químicas, PNS y PCE, con diferentes dosificaciones en las muestras (Tabla 1.2) y con unos valores objetivos de relación agua-cemento diferentes. Como era de esperarse la resistencia aumentó con el incremento en la edad de los especímenes y también con la disminución de la relación agua-cemento y la resistencia máxima alcanzada fue de 158.9 MPa de la probeta con PCE NB1 a los 28 días (Figura 1.6) y con una relación agua-cemento de 0.15, mientras que la menor resistencia de 93.6 MPa fue de la probeta con PCE LB a los 7 días y con una relación agua-cemento de 0.20, aunque en el ensayo fue la más baja, hay que resaltar que dicho valor de resistencia es bastante alto si se compara con los valores típicos de un concreto estándar o de resistencia normal. De hecho, la relación agua-cemento está muy por debajo de los valores de referencia en los concretos que normalmente alcanzan resistencias menores a los 45 MPa.

Tabla 1.3 Dosificación de superplastificantes

Fuente: Torres et al. (2020). The effect of various superplasticizers on ultra high strength concrete.

Superplasticizer	w/cm = 0.20 (kg/m ³)	w/cm = 0.15 (kg/m ³)
PCE NB* 1	186.7	201.2
PCE NB* 2	181.6	197.9
PNS	159.3	167.1
PCE LP**	154.2	152.6

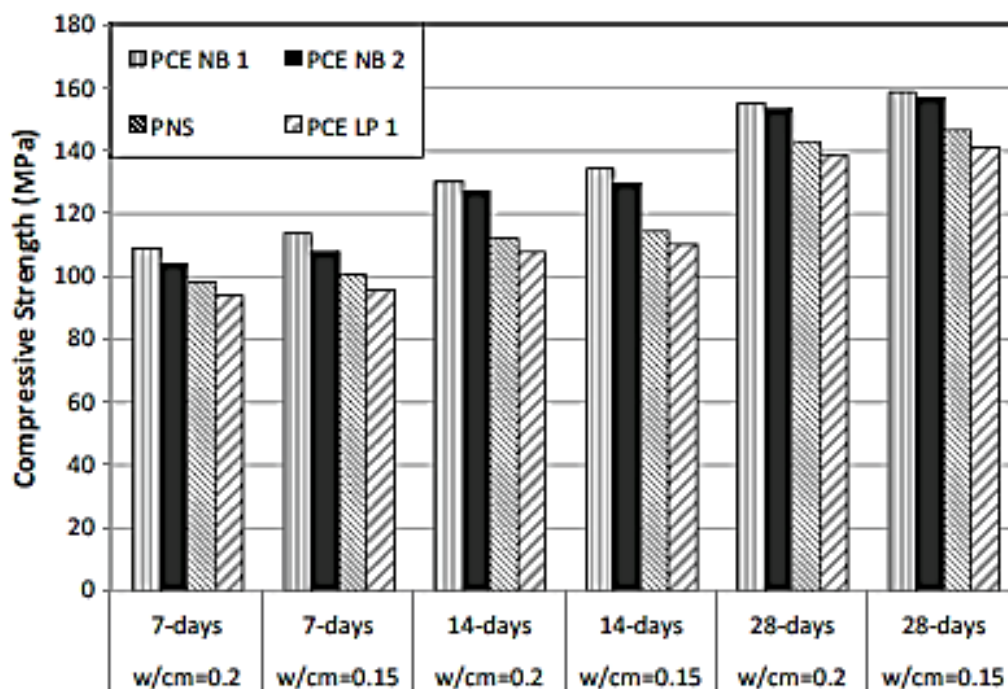


Figura 1.6 Resistencia a compresión usando diferentes superplastificantes.

Fuente: Torres et al. (2020). The effect of various superplasticizers on ultra high strength concrete.

Con base en lo anteriormente expuesto, se puede concluir que la resistencia a la compresión aumenta con el uso de superplastificantes o aditivos químicos que ayudan a disminuir la relación agua-cemento, con el fin de obtener propiedades en estado fresco aptas para su manejo en obra. Como se había mencionado

anteriormente los concretos de alto desempeño con resistencias superiores y módulos elásticos más grandes, requieren una enorme cantidad de material cementante y con la ayuda de los aditivos químicos es posible no solamente tener concretos con altas prestaciones, sino que también mejor manejabilidad y fluidez en estado fresco.

1.1.3 Fibras de refuerzo en el concreto.

La adición de otros componentes para obtener un mejor desempeño en el concreto también ha planteado el uso de fibras de refuerzo en la mezcla con el fin de mejorar la ductilidad y la capacidad de disipación de energía, ya que en el uso de concretos de alta resistencia se ha denotado su fragilidad, lo que reduce el rendimiento sísmico de los elementos (X. Li et al., 2020). Las fibras de refuerzo pueden considerarse como filamentos delgados, que pueden conseguirse según su presentación en fibras individuales, redes, hebras de materiales naturales o manufacturados (polímeros o metálicos), estos pueden distribuirse en la mezcla de concreto fresco (ASTM C125-21, 2021). Con el uso de fibras se busca mejorar la resistencia a la tracción y a las fisuras, lo que terminará reduciendo el daño de los concretos de alta resistencia cuanto estos se ven sometidos a esfuerzos límites de trabajo. De hecho, J. Zhao et al. (2018) estudiaron la proporción de volumen de la fibra de acero utilizada en el concreto, encontrando que un valor adecuado oscila entre el 0.5% y el 2.0% para obtener un óptimo rendimiento sin perder cualidades en la mezcla de concreto en estado fresco y endurecido.

Adicionalmente, el uso de las fibras en el concreto agrega un comportamiento sobresaliente no solo a tracción, sino que también a flexión, lo que hace que cambie totalmente la concepción del comportamiento y consideraciones estructurales que el ingeniero diseñador normalmente tiene en cuenta al diseñar elementos de concreto (Shafieifar et al., 2018). Esto traduce en que los conceptos generales aplicados en el diseño de concreto convencional no rigen el comportamiento de estos concretos reforzados con fibras, existen aportes adicionales que dan las

fibras en el concreto que deben tenerse en cuenta ya que aumentan su capacidad de resistencia y su comportamiento. Siendo así hasta la fecha que muchos estudios se han propuesto como objetivo establecer, a través de ensayos, lineamientos que permitan no subestimar la resistencia de los elementos en los que se use este tipo de concretos reforzados internamente con fibras.

Como se había explicado anteriormente, en la construcción de edificios de gran altura se busca que el material del que están hechos los elementos estructurales tenga un mejor desempeño, con el cual se pueda garantizar la funcionalidad de la edificación y su estabilidad. Por lo que el concreto reforzado con fibras que proporcionan una mayor durabilidad, ductilidad, resistencia a compresión y tracción, tiene el potencial de proporcionar estructuras más económicas; estéticas y duraderas comparado con el concreto convencional (Turker & Torun, 2020). Por ese motivo, es importante conocer la influencia de las fibras en el concreto junto con las consideraciones que deben tenerse en cuenta para su uso en edificaciones de gran envergadura.

El uso de las fibras de refuerzo en el concreto se ha estudiado en diferentes elementos estructurales, por ejemplo, en vigas donde se ha analizado el comportamiento de esfuerzos de corte con ensayos a flexión y la influencia de diferentes porcentajes de contenido de fibras de acero en la mezcla (Mészöly & Randl, 2018). Mészöly & Randl (2018) realizaron especímenes de prueba sin el uso de estribos de refuerzo (Figura 1.7) y se pudo observar que el comportamiento mejora sustancialmente con el aumento del contenido de las fibras, también como se logran mayores deflexiones en las vigas con el uso de fibras si se compara con los especímenes que no tienen fibras en su mezcla, logrando un aumento de 10 mm a casi 30 mm. Cabe mencionar que las resistencias a compresión del concreto en estas mezclas alcanzaron valores de $f'_c=185\text{MPa}$.

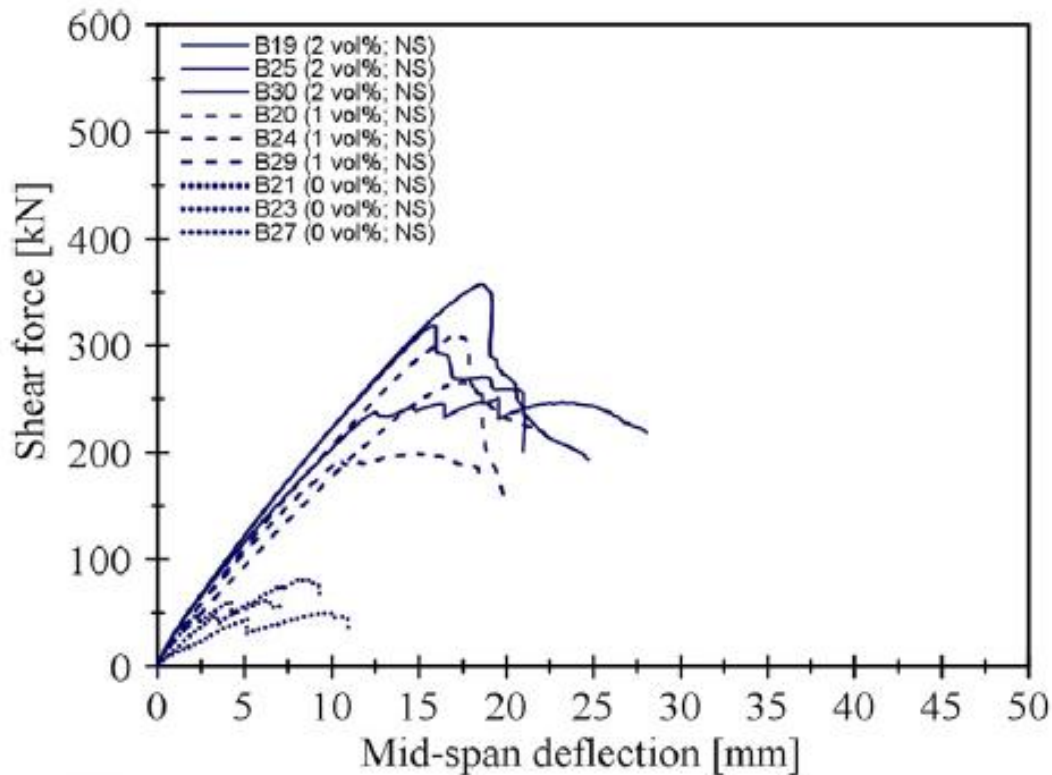


Figura 1.7 Comparación de resultados de ensayos de corte en vigas con diferentes contenidos de fibra –

Fuente: Mészöly & Randl (2018). Shear behavior of fiber reinforced ultra-high performance concrete beams.

Se puede decir que, con el aumento del contenido de fibras de refuerzo en el concreto, también se aumenta su resistencia, en este caso resistencia a esfuerzos de corte, y también se aumenta la ductilidad por su aumento de capacidad a deformarse antes de su falla.

En la misma investigación también se analiza cómo se logra una mayor capacidad de carga para una misma deformación, donde se concluye que realmente existe una mejora en la ductilidad de las vigas con el aumento de contenido de fibras en la mezcla de concreto, pero no solo a través de la comparación de las curvas de esfuerzo-deformación, también a través de la carga límite a partir de la cual

empiezan a aparecer fisuras y como este valor es mayor con el uso de fibras comparado con elementos que cuentan solo con refuerzos de corte con estribos (Figura 1.8) (Contenido de fibras: 2% y separación de estribos: 125 mm). A continuación, la imagen con las vigas que se presenta fue obtenida con un sistema de imagen de correlación digital o DIC (Digital Image Correlation) por sus siglas en ingles.

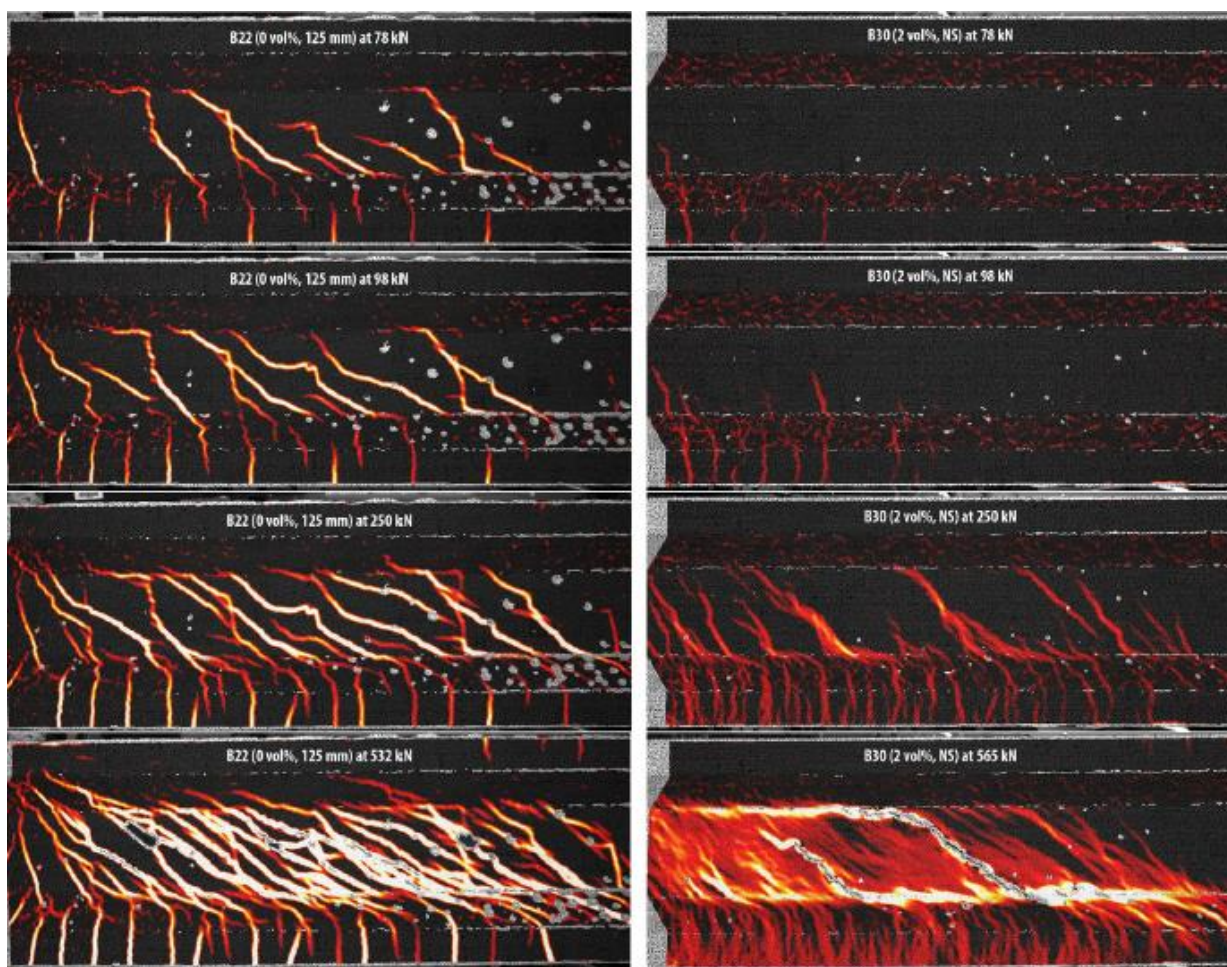


Fig. 5. Crack patterns of beam B22 (left) and beam B30 (right) at 78 kN, 98 kN, 250 kN and at $F_{max.exp} = 532 \text{ kN}/565 \text{ kN}$ (NS = no stirrups).

Figura 1.8 Comparación de viga con estribos y viga sin estribos con fibras de refuerzo

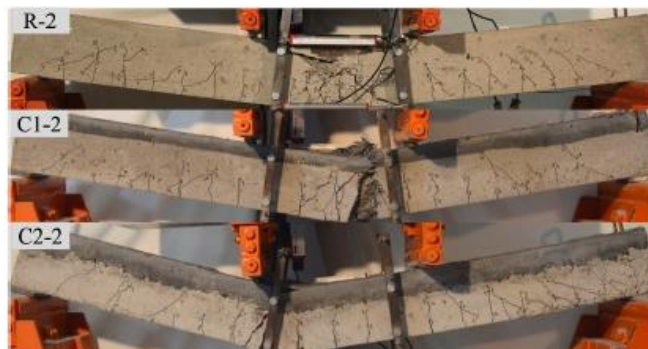
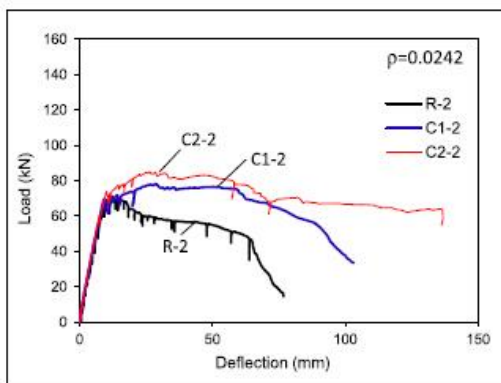
Fuente: Mészöly & Randl (2018). *Shear behavior of fiber reinforced ultra-high performance concrete beams.*

Turker & Torun (2020) afirman como resultado de su investigación que se logra una mejor distribución de las fisuras y también un menor tamaño de estas con el uso

de fibras de refuerzo, lo cual indica un aumento en la ductilidad de este elemento, y para este caso, se requiere una mayor carga para la aparición de microfisuras. Sin embargo, en la figura 1.8 el espécimen que contiene fibras de refuerzo, se puede apreciar el efecto de la aparición de macrogrietas cuando existen esfuerzos de tracción en la sección. Este efecto puede provocar la rotura prematura de la armadura de tracción y la reducción de ductilidad, especialmente en vigas donde haya relaciones bajas de acero de refuerzo.

También se han evaluado alternativas para lograr un menor costo en el uso de este tipo de concretos de altas prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC, por sus siglas en inglés). Las investigaciones han sugerido el uso de elementos compuestos con diferentes concretos, es decir, usar estos concretos donde solamente se requiera y donde no, usar concretos de resistencias normales (Figura 1.9) (Turker & Torun, 2020). En este caso, para vigas compuestas se ha implementado el uso de UHPFRC en el bloque de compresión, en 2 diferentes espesores 30 mm (C1) y 50 mm (C2), junto con una probeta sin franja superior de concreto UHPFRC (R), el restante de sección en la viga se completó con concreto de resistencia normal. Con el uso de UHPFRC en el bloque de compresión de las vigas, se han adquirido ventajas significativas en durabilidad y resistencia a flexión en comparación con la viga hecha solo con concreto de resistencia normal. La principal ventaja de la aplicación de este tipo de distribución de concreto en las vigas es que permite aumentar la cantidad de refuerzo a tracción en la viga. El estudio indicó que era posible aumentar la proporción de refuerzo a tracción hasta en un 5% sin utilizar refuerzo a compresión (Figura 1.9.b). De modo que, se podrían realizar vigas con una alta capacidad a flexión y suficiente ductilidad, esto es un factor muy importante que podría tenerse en cuenta en edificios altos porque permite tener vigas con una mayor capacidad de carga y luces más grandes. Aunque si se compara con una cantidad de refuerzo inferior (Figura 1.9.a) se puede ver como con el aumento del refuerzo se pierde ductilidad en el elemento así este soporte cargas más grandes.

a.



b.

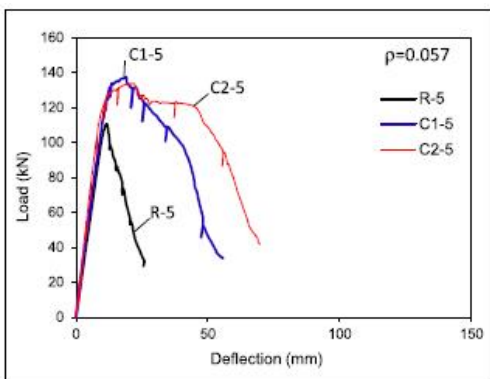


Figura 1.9 Resultados de resistencia a flexión en vigas compuestas

Fuente: Turker & Torun (2020). Flexural performance of highly reinforced composite beams with ultra high performance fiber reinforced concrete layer.

Otra de las ventajas de utilizar vigas compuestas es que se reduce el riesgo de aparición de macrogrietas en la zona de tracción, una vez empleado el concreto de resistencia normal sin el uso de fibras de refuerzo, puede ocurrir que las fisuras no encuentren una zona de concentración de esfuerzos como se pudo apreciar en la investigación anteriormente expuesta (Figura 1.9). Además, puede que exista una zona de transición entre los dos concretos dentro de la sección de la viga, lo que el estudio mostró fue que el refuerzo a cortante en la viga fue más que suficiente para lograr la transmisión de los esfuerzos de corte en la sección de la viga, garantizando

que no se presentara falla prematura en la sección compuesta y la suposición de la sección plana fuese hasta la carga de falla en las vigas de estudio.

En cuanto a elementos verticales, los muros de corte de concreto son uno de los elementos estructurales más importantes para resistir fuerzas laterales en edificios de gran altura. El uso de concreto de alta resistencia en los muros de concreto reforzado puede reducir el espesor de los muros y aumentar la superficie útil de los edificios, lo que resulta en ventajas sociales y económicas (Usta et al., 2019). En la actualidad uno de los edificios más representativos en el uso de muros de corte como sistema principal de resistencia a cargas laterales es la Torre Jeda, ubicada en Arabia Saudí, es un proyecto que tiene como objetivo alcanzar 1 kilómetro de altura (Peronto et al., 2017). Allí se combinó el uso de concreto con un módulo elástico alto (43 GPa) y el sistema estructural de muros de concreto buscando maximizar la resistencia ante cargas laterales (Sinn, 2018). De hecho, para aumentar la resistencia y la ductilidad en los muros de concreto estructurales se han hecho estudios con la implementación de fibras de refuerzo en elementos verticales de concreto de alta resistencia, donde se espera que presenten un comportamiento más dúctil. En ese sentido X. Li et al. (2020), encontraron que el uso de fibras de refuerzo de acero en los muros de corte aumenta la ductilidad en un 32.9%, debido a que la adición de fibras de acero puede reducir el ancho de las grietas y mejorar la capacidad de deformación elástico-plástica, de esta manera se aprovecha mejor todas las ventajas que ofrece el concreto de alta resistencia. En la investigación fueron realizados ensayos sobre muros de corte a escala real, donde se fabricaron con concretos calidad C80 ($f'_c=80\text{MPa}$) y con una relación de carga lateral-carga vertical de 0.4, con volúmenes de fibra de refuerzo de 0% (Figura 1.10.a) y 1% (Figura 1.10.b).

Los resultados mostraron que el espécimen con fibras de refuerzo presentaba una carga de fisuración y carga máxima mayor en comparación del espécimen que no contenía fibras de refuerzo en su mezcla. Después de alcanzar la carga máxima,

la capacidad portante del muro reforzado con fibras disminuyó gradualmente, pero con un aumento del 46.2% en relación del desplazamiento lateral máximo (Figura 1.10). En efecto, los resultados indican que la adición de fibras de acero en el concreto de alta resistencia puede aumentar la tenacidad del concreto y mejorar su capacidad de deformarse aún más. Hay que señalar también que, la adición de fibras en los muros de corte logró un comportamiento de modo que después de la carga de fisuración no se presentaron desprendimientos del espécimen, esto se debe a que las fibras tienen un efecto de resistencia y pueden soportar parte de los esfuerzos internos de corte que se presentan en el elemento en estudio, transmitiéndolos a ambos costados donde se empieza el fisuramiento en el concreto (X. Li et al., 2020). Además, señalan los autores que esto permite garantizar la adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto, lo que se traduce en garantizar una falla del muro más dúctil.

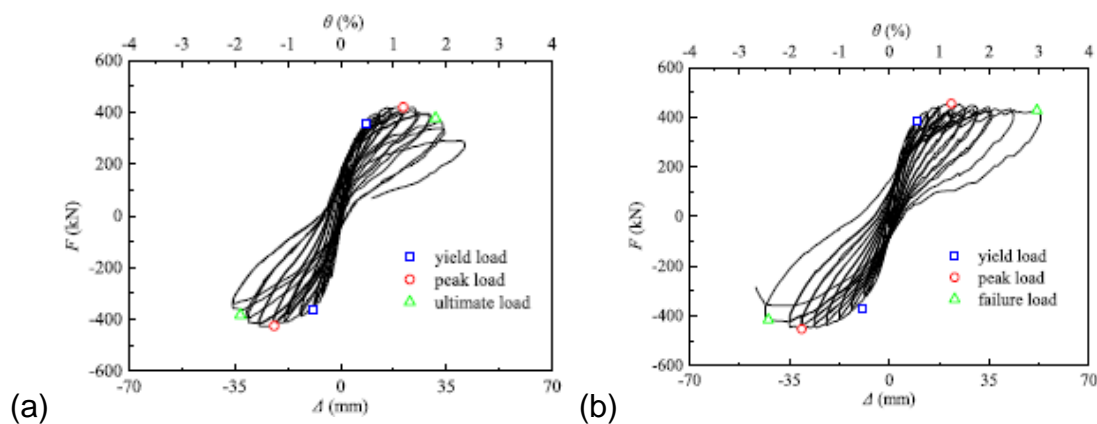


Figura 1.10 Curvas de histéresis de ensayo de muros de corte

Fuente: X. Li et al. (2020). *Hysteretic behavior of high strength concrete shear walls with high strength steel bars: Experimental study and modeling.*

Existen otro tipo de adición como los nanotubos que, a pesar de no tener las dimensiones de las fibras de refuerzo generalmente usadas (Figura 1.11), proporcionan también ventajas en el comportamiento del concreto. El uso de los nanotubos de carbono es una de las alternativas más llamativas ya que poseen módulos elásticos muy altos del orden de 1TPa (1000GPa) (Shah & Konsta-Gdoutos,

2017). De hecho, los autores en mención plantean que entre los factores que impiden su aplicación comercial en el concreto se encuentran: el elevado costo de los nanotubos, problemas de trabajabilidad y la dificultad de obtener una dispersión uniforme en la matriz cementante. A pesar de su alto costo, se cree que estos dos últimos problemas se han resuelto con la inclusión de aditivos químicos como los reductores de alto rango.

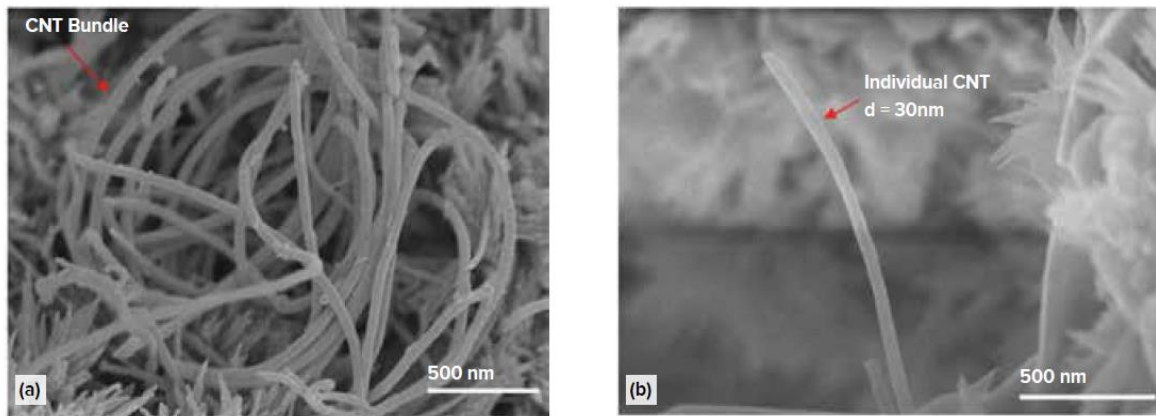


Figura 1.11 Imagen de SEM de los nanotubos de carbono

Fuente: Shah & Konsta-Gdoutos (2017). Uncoupling Modulus of Elasticity and Strength.

Cuando se logra una distribución óptima de los nanotubos en la mezcla de concreto en una dosificación pequeña, se pueden mejorar sustancialmente las propiedades mecánicas del concreto, especialmente el módulo elástico, y reducir la contracción autógena (Shah & Konsta-Gdoutos, 2017), que es un efecto característico en los concretos de alta resistencia. Aunque muchas de las investigaciones han planteado el uso de los nanotubos a partir de mezclas de mortero, entonces se esperaría que los beneficios se vean reducidos con la adición de agregados para convertirse en concreto, pero no ha sido el caso, de acuerdo con los resultados presentados por Shah & Konsta-Gdoutos (2017). donde reportaron una mejora sustancial (Figura 1.12) en el estudio llevado a cabo.

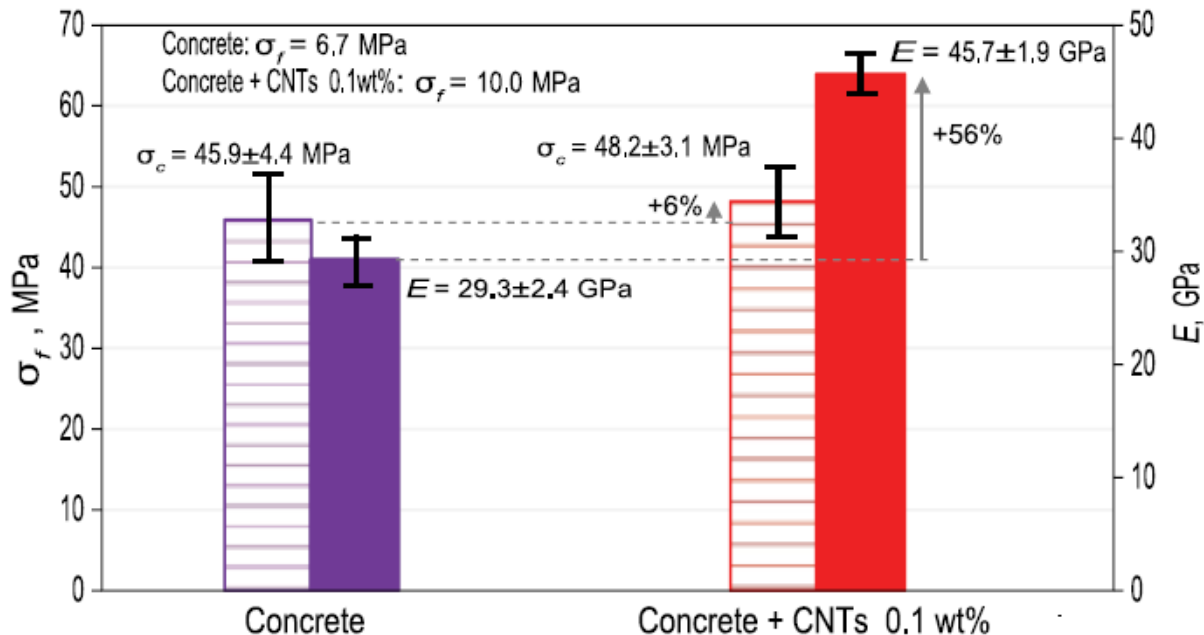


Figura 1.12 Comparación de uso de nanotubos de carbono en el concreto

Fuente: Shah & Konsta-Gdoutos (2017). *Uncoupling Modulus of Elasticity and Strength*.

Los resultados son un poco curiosos, ya que se esperaba que hubiera un aumento en la resistencia a la compresión con la adición de los nanotubos en el concreto y del módulo elástico de manera proporcional, mientras el módulo elástico aumentó en un 56% con la adición de los nanotubos, la resistencia a la compresión tan solo aumento en un 6%. Lo que quiere decir que la adición de este tipo de materiales contribuye a la mejora del módulo elástico en el concreto. Los autores plantean que la adición de los nanotubos altera la nanoestructura del hidrato de silicato de calcio (C-S-H), también han sugerido que los nanotubos de carbono proveen una superficie masiva para la precipitación de hidratos de cemento, posiblemente esto genera un mejor empaquetamiento con aglomerados de C-S-H más densos y con una mayor rigidez, lo que podría explicar un módulo elástico más alto en el concreto. Sin embargo, también es posible que los nanotubos modifiquen la interfaz entre los agregados y la matriz cementante de forma similar a las adiciones minerales como el humo de sílice (Shah & Konsta-Gdoutos, 2017).

En la misma investigación hacen la comparación del resultado obtenido con la adición de nanotubos y las mezclas variando la dosificación de las adiciones y aditivos (Tabla 1.1 y Figura 1.5). En efecto, se logra diferenciar la influencia de los nanotubos de carbono sobre el módulo elástico del concreto, como un concreto de resistencia de 50 MPa tiene un módulo elástico alto de 45 GPa, con un contenido de nanotubos de carbono del 0.1% de proporción del contenido de cemento (Figura 1.13).

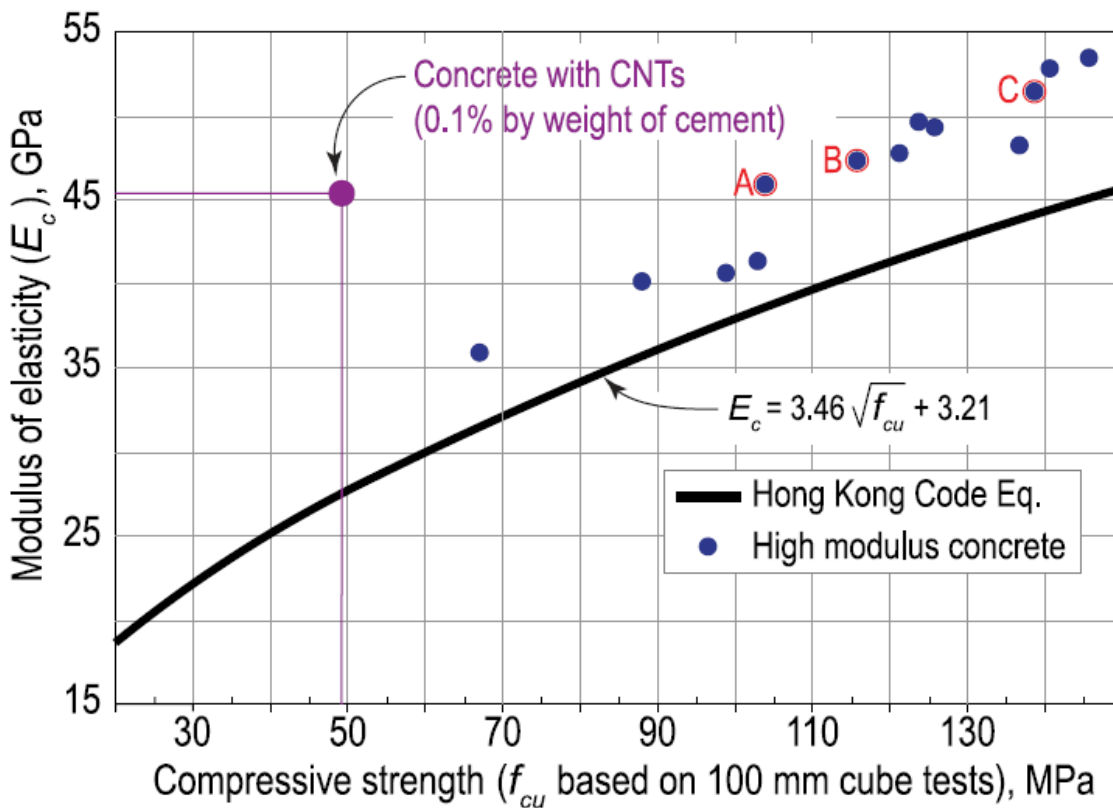


Figura 1.13 Comparación de mezclas de concreto con la adición de nanotubos de carbono

Fuente: Shah & Konsta-Gdoutos (2017). Uncoupling Modulus of Elasticity and Strength.

Puede decirse que, con la adición de nanotubos de carbono en las mezclas de concreto, el rendimiento del concreto frente al módulo elástico puede maximizarse y obtener una mezcla que, sin necesidad de aumentar su resistencia a la compresión, puede alcanzar valores de referencia comparables con concretos con una resistencia a la compresión superior a los 100 MPa.

1.1.4 Relación entre la resistencia a compresión y módulo elástico.

Se han propuesto varias ecuaciones para estimar el módulo elástico del concreto en función de su resistencia a la compresión. Dado que la medición del módulo elástico requiere conocimientos específicos y ensayos especializados, es común correlacionar el módulo y la resistencia a compresión en el concreto para que sea de ayuda a los ingenieros diseñadores cuando no se tiene disponibilidad de datos de modulo elástico en el concreto a usar (Alsalman et al., 2017). Cuando se está estudiando y diseñando el sistema de resistencia de cargas laterales de un edificio de gran envergadura, es importante conocer el módulo elástico en el concreto dado que es un valor de entrada al realizar el modelo computacional. Según el criterio del diseñador, se obtendrán respuestas diferentes en la edificación y como pudo apreciarse anteriormente la influencia del módulo elástico es directamente proporcional a los desplazamientos laterales.

Otro factor importante por el cual es importante conocer el módulo elástico en el concreto son las deformaciones en los elementos estructurales en condiciones normales de uso. En muchos casos es más importante la deformación de un elemento que su capacidad de carga, debido al diseño por estados límites con factores de seguridad parciales para materiales y carga. Los esfuerzos reales en la mayoría de los elementos no suelen superar $0.4f_c$ o $0.55f_c$ y el módulo elástico del concreto en compresión axial normalmente es aplicable hasta $0.33f_c$ o $0.4f_c$, donde aún no se han generado microfisuras en la zona de transición agregado-pasta de cemento (Piasta et al., 2017). Lo que sugiere que, si se conoce el módulo elástico del concreto con una baja incertidumbre, será posible estimar y controlar las deformaciones en los elementos estructurales en una edificación. Por tanto, si en un edificio de gran altura, se reducen las deformaciones en los elementos, se garantizará su funcionalidad y estética aun sabiendo las magnitudes tan grandes de carga que tendrá debido a su tamaño.

En las ecuaciones que se han propuesto para estimar el módulo elástico del concreto está una de las más utilizadas que es la del ACI-318 (Tabla 1.1.4.1). Sin embargo, estudios y ensayos indican que la ecuación sobreestima el módulo elástico de los concretos de alta resistencia (Alsalman et al., 2017). Cuando aumenta la resistencia a la compresión en el concreto, se espera que también aumente el módulo elástico del mismo, pero en los concretos de alta resistencia no sucede al mismo ritmo que en los concretos tradicionales de resistencias normales. Por esa razón, el ACI-363 propuso una nueva ecuación (Tabla 1.1.4.1) para estimar el módulo elástico en los concretos de alta resistencia (Alsalman et al., 2017). Aun así, los miembros del comité recomiendan que se plantee una nueva ecuación que estime el módulo elástico de los concretos de Ultras altas prestaciones (UHPC) y los concretos de ultras altas prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC), ya que la resistencia a la compresión es mayor y los componentes en la mezcla son totalmente diferentes a los concretos solo de alta resistencia (Alsalman et al., 2017). A continuación, se muestra un resumen de las ecuaciones más relevantes para la estimación del módulo elástico tomado del estudio de Alsalman et al. (2017).

Muchas ecuaciones son similares a la propuesta por el ACI 318, por ejemplo, la ecuación propuesta por Graybeal (Tabla 1.3), donde consideró resultados de ensayos con cuatro diferentes regímenes de curado en el concreto con vapor variando la temperatura del vapor con una misma humedad relativa. Además, en su investigación (Graybeal, 2012), también se hicieron pruebas con concretos reforzados con fibras para ver su influencia en el módulo elástico y compararlos con los concretos sin fibras de refuerzo en su interior. Es sabido que, la precisión de las ecuaciones depende del tamaño de los datos y las condiciones de ensayo, pero si se tienen en cuenta todos los tipos de concreto es más fácil identificar patrones de comportamiento mecánico con los diferentes componentes en su mezcla.

Tabla 1.4 Ecuaciones de correlación entre el módulo elástico y la resistencia a la compresión.

Fuente: Alsalman et al. (2017). Evaluation of modulus of elasticity of ultra high performance concrete.

Comité o Investigador	Ecuación (E en MPa)	Nota
ACI comité 318-14 (2014)	$E_c = 4730\sqrt{f'_c}$	Concreto Normal de resistencias inferiores a $f'_c \leq 41,4\text{MPa}$ y peso $1440 \leq w \leq 2480 \text{ kg/m}^3$, f'_c en MPa
ACI Comité 363-10 (2010)	$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900$	Concreto de alta resistencia $f'_c \geq 83\text{MPa}$, f'_c en MPa
FIP-CEB (1990)	$E_c = 21500\alpha_B \left[\frac{f_{cm}}{8} \right]^{\frac{1}{3}}$	Aplica para concretos de $f'_c < 80\text{MPa}$, α_B es una variable según el tipo de agregado, f_{cm} es la resistencia a la compresión de cilindros de 150x300mm
	$E_c = 21500\alpha_B \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{\frac{1}{3}}$	Aplica para concretos de $f'_c < 80\text{MPa}$, α_B es una variable según el tipo de agregado, f_{cm} es la resistencia a la compresión de cilindros de 150x300mm, a los 28 días.
Norma Noruega NS 3473 (1992)	$E_c = 9500(f'_c)^{0,3}$	Concretos de resistencia $25 \leq f'_c \leq 85\text{MPa}$, f'_c en MPa
J. Ma, F. Dehn, N.V. Tue, M. Orgass, D. Schmidt (2004)	$E_c = 19000(f'_c/10)^{1/3}$	Concretos UHPC sin agregados gruesos, $150 \leq f'_c \leq 180 \text{ MPa}$, f'_c en MPa
	$E_c = 21902(f'_c/10)^{1/3}$	Concretos UHPC con agregados gruesos de basalto, $150 \leq f'_c \leq 180 \text{ MPa}$, f'_c en MPa
Asociación Francesa de Ingeniería Civil (AFGC) (2002)	$E_c = 9500(f'_c)^{1/3}$	Concretos UHPC curado con calor, $f'_c \geq 140 \text{ MPa}$, f'_c en MPa
S. Sritharan, B.J. Bristow, V.H. Perry (2003)	$E_c = 4150\sqrt{f'_c}$	Concretos UHPC con $f'_c = 177 \text{ MPa}$ (En promedio), f'_c en MPa
J. Ma, H. Schneider (2002)	$E_c = 11800(f'_c)^{1/3,14}$	Concretos UHPC con $f'_c \geq 140 \text{ MPa}$, f'_c en MPa
G.A. Kollmorgen (2004)	$E_c = 16365 \ln(f'_c) - 34828$	Concretos de resistencia $34 \leq f'_c \leq 207 \text{ MPa}$, f'_c en MPa
B. Graybeal (2007)	$E_c = 3840\sqrt{f'_c}$	Concretos de resistencia $126 \leq f'_c \leq 193 \text{ MPa}$, f'_c en MPa
B. Graybeal (2012)	$E_c = 4069\sqrt{f'_c}$	Concretos de resistencia $97 \leq f'_c \leq 179 \text{ MPa}$, f'_c en MPa

Se ha sugerido que las ecuaciones existentes pueden no representar con exactitud las mezclas de concreto UHPC o UHPFRC en las que se contiene arena natural sin gradar o cenizas volantes como material fino. En este sentido Alsalman et al. (2017), realizaron un acople de las mediciones de los autores de la Tabla 1.3 junto con los ensayos realizados con probetas de ensayo de UHPC y UHPFRC. A partir de allí, los autores plantearon una ecuación con una incertidumbre del $\pm 10\%$ (Figura 1.15). La ecuación propuesta es la siguiente:

$$E_c = 8010(f'_c)^{0.36}$$

Donde la resistencia a la compresión y el módulo elástico están en MPa.

En la figura 1.14 se puede apreciar la enorme dispersión de datos obtenidos en anteriores investigaciones y como gran parte de ellos pueden encajar en el rango de dispersión del 10% de la ecuación propuesta por los autores. Entonces se puede decir que la ecuación es válida para predecir el módulo elástico de las mezclas de concreto de UHPC, siempre y cuando se tenga en cuenta en el diseño estructural una dispersión del módulo elástico por debajo del valor de referencia.

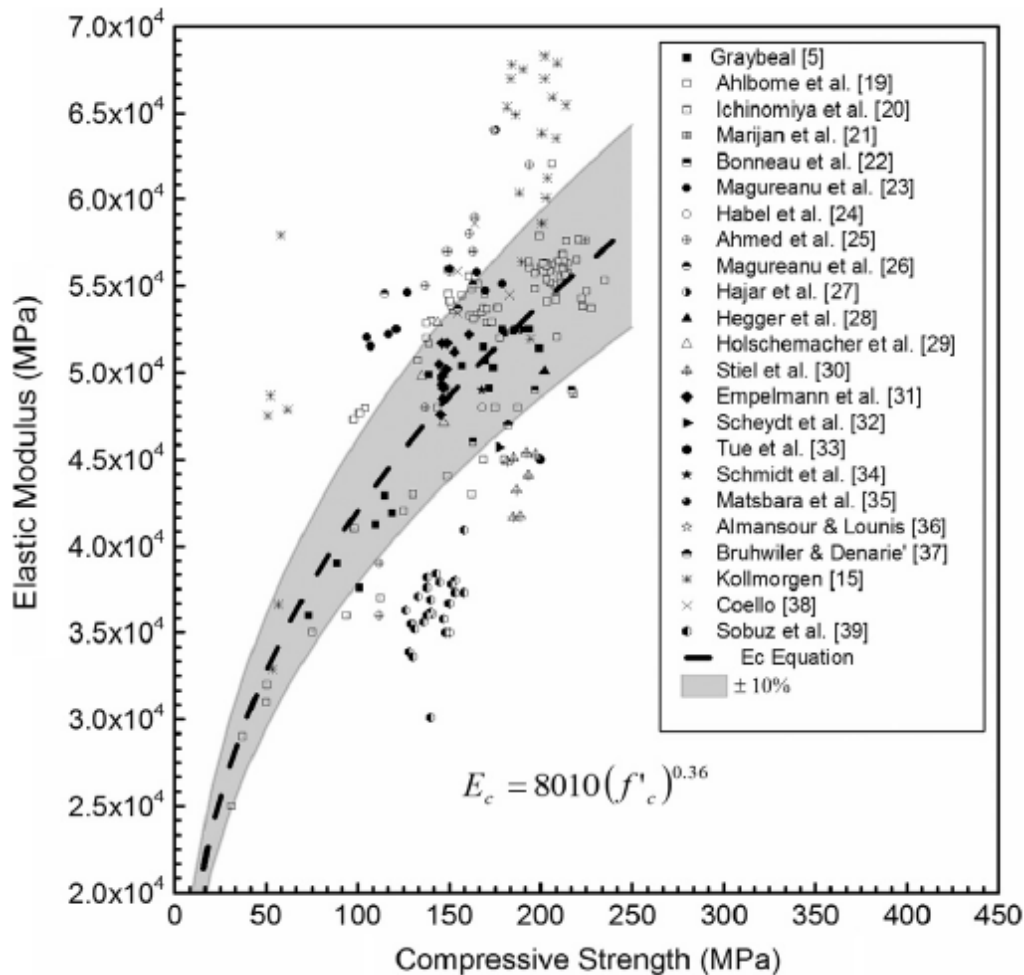


Figura 1.14 Comparación histórica de resultados obtenidos de módulo elástico y resistencia a compresión

Fuente: Alsalman et al. (2017). Evaluation of modulus of elasticity of ultra high performance concrete.

Como pudo apreciarse en secciones anteriores la influencia de los componentes también debe tenerse en cuenta para la predicción del módulo elástico en una determinada mezcla de concreto. Es por eso, que algunas normativas como la europea (Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, 1992) o estudios llevados a cabo como el de Ma. Et al. en 2004 (Tabla 1.3), señalan las consideraciones a tener en cuenta según el tipo de agregado a usar en la mezcla de concreto para la edificación. Por ejemplo, la normativa

europea señala que los agregados gruesos son más influyentes en la deformación del concreto y su resistencia a compresión, tanto en concretos convencionales y concretos de alta resistencia y desempeño. La ecuación para el cálculo del módulo elástico en un concreto es:

$$E_{cm} = 22(0.1 f'_{cm})^{0.3}$$

Donde f'_{cm} es la resistencia a la compresión del concreto en MPa, para los agregados de basalto; el resultado debe incrementarse un 20%, mientras que para los agregados de caliza y arenisca el valor debe reducirse en un 10% y 30%, respectivamente, hay que decir que esta ecuación aplica para concretos hasta una resistencia de 90 MPa.

A la fecha (2021) en Colombia, la norma sismorresistente (NSR-10. Título C.8.5) señala que, si se usa un concreto con un peso convencional conocido, en los comentarios se indica que se debe tener en cuenta el factor de origen de los agregados gruesos a utilizar en la mezcla de concreto y lo relaciona junto con la resistencia a la compresión. Donde se clasifican en tres: origen sedimentario, metamórfico e ígneo.

1.2 Durabilidad en el Concreto.

En los edificios de gran altura no solo es importante utilizar un concreto que brinde el módulo elástico requerido o una resistencia mínima a compresión, a pesar de ser un material duradero, en muchos casos estará sometido a intensas agresiones ambientales, ya que en algunos casos los elementos estructurales podrían estar más expuestos a la intemperie según el diseño arquitectónico (P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro, 2014). Por eso, daños como grietas, desprendimientos o desintegración de la matriz pueden aparecer debido a varias razones como la carbonatación, ciclos de congelación o descongelación o reacciones químicas internas (Courard et al., 2021). En síntesis, el funcionamiento y la vida útil de la

edificación puede verse reducida por factores externos a la edificación de no garantizarse la durabilidad del concreto.

La durabilidad del concreto está relacionada una a matriz densa y compacta con baja porosidad, esto garantiza que no se permita la entrada de agentes externos detonantes del deterioro en el concreto y en el acero de refuerzo. Como pudo verse anteriormente, para obtener un módulo elástico o una resistencia a la compresión superior en el concreto, uno de los aspectos para tener en cuenta es obtener una matriz cementante más densa y consistente, junto con una adherencia óptima a los agregados, lo que genera un mejor empaquetamiento de las partículas que componen el concreto. Por lo cual, un desarrollo óptimo de la resistencia a compresión y un alto módulo elástico garantizará que el concreto tenga una mejor durabilidad si se compara con un concreto ordinario. Podría decirse que no solo se habla de un concreto con propiedades mecánicas superiores, sino también de altas prestaciones (UHPC por sus siglas en inglés).

Las causas del deterioro del concreto en las edificaciones están de manera directa o indirectamente relacionadas con la presencia de agua o de infiltraciones en el concreto. Por ejemplo, un proceso de degradación muy perjudicial en el concreto es la penetración de dióxido de carbono (CO_2) y su reacción con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y/o los hidratos de silicato de calcio (C-S-H); estos últimos dos son los compuestos que proporcionan las propiedades mecánicas en el concreto, esta reacción química forma principalmente carbonato de calcio (CaCO_3) (Auroy et al., 2013), induciendo una disminución del pH (de 12.5 a 8.3) en la zona completamente carbonatada, lo que implica un proceso de corrosión en el acero de refuerzo. Es por esto que, para mantener la durabilidad en el concreto, es necesario reducir o impedir que se generen fisuras en los elementos, lo cual es una medida para impedir la entrada de agentes nocivos dentro del concreto (Courard et al., 2021).

Para la producción de concreto para edificios de gran altura es necesario que; para llegar a la resistencia a la compresión y/o modulo elástico requerido, se maneje

una relación extremadamente baja entre el agua y el cemento, lo que demanda grandes cantidades de cemento ($600-1000 \text{ kg/m}^3$) (Zhang et al., 2019). Esto provoca un rápido agotamiento de la humedad y una desecación excesiva en los poros internos, lo que da lugar a presiones negativas que se ejercen sobre las paredes de estos y se manifiesta en forma de contracción volumétrica de la matriz cementante (P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro, 2014), convirtiéndose en una de las principales causas de la aparición de fisuras en el concreto. Esto puede llegar a ser peligroso para la estabilidad dimensional y la integridad de los elementos estructurales con la formación de microfisuras, lo que a su vez facilita la entrada de agentes nocivos y comprometen la durabilidad del concreto.

Mientras que el creep o la fluencia se considera como la deformación de una estructura bajo una carga sostenida, específicamente en el caso del concreto se origina en el C-S-H de la pasta cementante endurecida (Z. hai He et al., 2017). En el caso del concreto, la fluencia es diferente completamente de la fluencia en otros tipos de materiales como metales o polímeros (Xu et al., 2016) donde la velocidad de fluencia del concreto aumenta con el esfuerzo aplicado. La subestimación de la fluencia en el concreto a lo largo del tiempo puede dar lugar a deformaciones excesivas en los elementos de una estructura, que a su vez pueden ser mayores que las deformaciones en el corto plazo inicial de construido (Z. hai He et al., 2017).

Sin embargo, hay factores en la mezcla que también pueden influir en la fluencia y la contracción del concreto, es por eso por lo que se han planteado aspectos relacionados con la elaboración del concreto y su puesta en uso como el contenido del agua, las condiciones de curado, la humedad relativa de curado, la proporción de agregados en la mezcla y el tamaño de las muestras de estudio, como factores importantes a ser considerados. A continuación, se presentan algunas investigaciones y avances sobre estos dos temas.

1.2.1 Contracción.

La contracción del concreto puede medirse con base en los cambios de volumen, pero independiente del método de ensayo, la medida es una combinación de varios tipos de contracción que se presentan en el concreto, por ejemplo, la contracción autógena, la contracción por secado y la contracción química (Wu et al., 2017). De hecho, se ha encontrado que, en el concreto de alta resistencia, el fenómeno de la contracción es un proceso complejo en el que pueden influir diferentes factores como la finura del cemento, el tipo de cemento, las adiciones minerales, los agregados, las fibras de refuerzo, la relación agua cemento, los aditivos o adiciones químicas y el curado del concreto. Dado que muchos factores en mención también fueron relevantes en partes anteriores de este documento, especialmente en la obtención de un concreto con mejores prestaciones para edificios de gran envergadura, puede decirse que el diseño del concreto es integral en la búsqueda de valores objetivo para el comportamiento de la estructura (Módulo Elástico y Resistencia a Compresión) y la durabilidad de la edificación.

Existen dos etapas en la contracción del concreto: las edades tempranas del concreto y las edades posteriores al fraguado inicial. La primera etapa se delimita como la duración en la que el concreto está fraguando y la fase inicial del endurecimiento (primeras 24 horas). Mientras que la segunda etapa, se refiere a la edad más allá de las 24 horas iniciales del concreto (Wu et al., 2017). Donde en la primera etapa se presentan 3 tipos de contracción: autógena, por secado y térmica, cuyos mecanismos en el concreto son completamente diferentes. Por otro lado, en la segunda etapa se añade la contracción por carbonatación, aunque se ha demostrado que, en el acumulado de la deformación, la contracción autógena representa el cambio de volumen más significativo (Wang et al., 2015).

La contracción autógena en el concreto puede explicarse desde diferentes mecanismos en el concreto, por ejemplo, un enfoque puede ser la tensión capilar que se basa en la estructura de poros presente en la matriz de concreto, la humedad relativa, el grado de hidratación y la interfase de pasta-agregado (Ye &

Radlińska, 2016). En efecto, con el tiempo el agua libre en la matriz disminuye gradualmente con la hidratación progresiva de las partículas de cemento, lo que genera que la humedad relativa también disminuya. Terminan generándose un gran número de poros en la pasta de cemento endurecida y la saturación de los poros disminuye, esto lleva a que la superficie cóncava del poro se vea sometida a una presión interna (Figura 1.15). Para que la superficie llegue a un estado de equilibrio, la tensión capilar aumenta y produce la contracción autógena. Entonces la contracción autógena podría definirse como la reducción del volumen macroscópico de los materiales cementantes cuando el cemento se hidrata después del fraguado inicial. Aunque se ha considerado que la influencia de este tipo de contracción solo se limita a los concretos de alta resistencia y de alto rendimiento, ya que debido a la elevada cantidad de materiales cementantes presentes en la mezcla junto con la baja relación agua-cemento, es mucho más factible que se presente este tipo de contracción en el concreto (Wu et al., 2017).

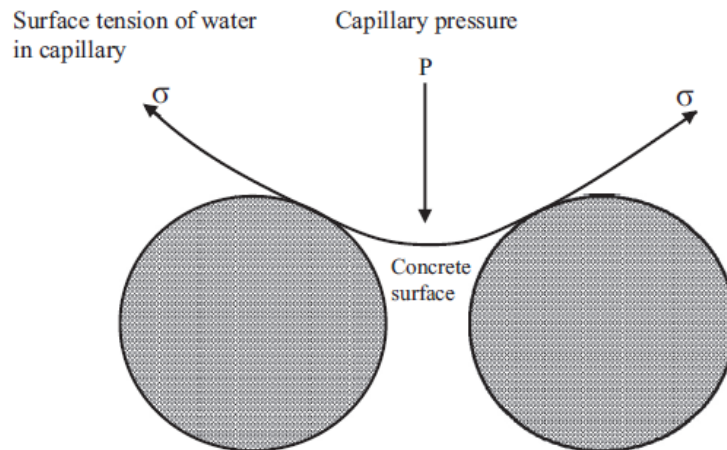


Figura 1.15 Diagrama esquemático de la tensión capilar del agua

Fuente: Wu et al. (2017). *Autogenous shrinkage performance of high performance concrete: a review.*

Se ha estudiado la influencia de algunos componentes en común que tienen los concretos de alta resistencia y de alto desempeño en la contracción autógena. En el caso de los materiales cementantes, (Ghafari et al., 2016) hicieron varios ensayos

con humo de sílice en diferentes proporciones y diferentes relaciones agua cemento, se encontró que la contracción autógena aumentó con el contenido de humo de sílice (Figura 1.16), además se vio aún más afectado con las relaciones agua cemento más bajas. Los autores señalan que se podrían tener dos causas que expliquen este comportamiento: 1.) El alto contenido de humo de sílice contribuyó a refinar aún más la estructura de los poros, lo cual hace que los poros sean cada vez más pequeños y se contribuye a la acción capilar que desencadena la contracción autógena. 2.) Durante el proceso de hidratación, la adición del humo de sílice siendo una adición mineral superfina puede acelerar el proceso de hidratación, y a la vez la superficie específica de las partículas del humo de sílice puede aumentar la escasez del agua dentro de la mezcla. Esto lleva a que se intensifique el proceso de auto desecación.

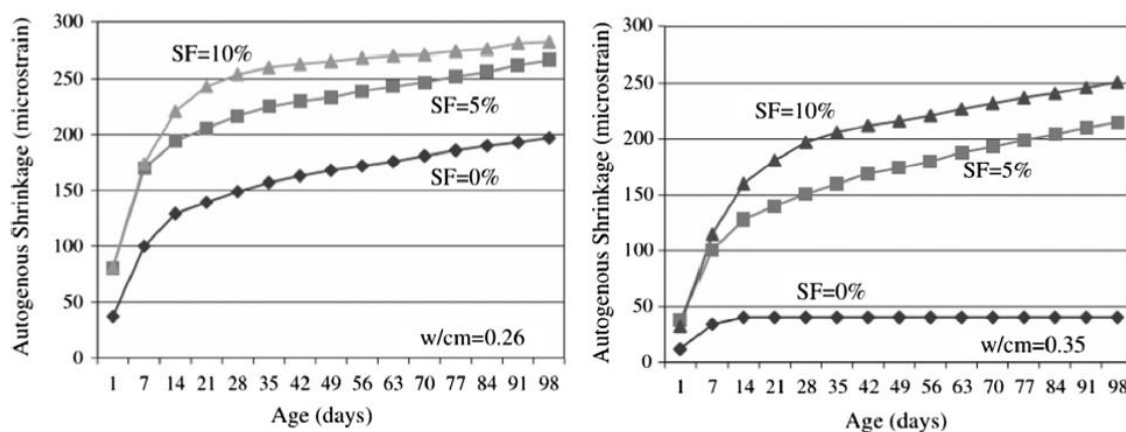


Figura 1.16 Influencia del humo de sílice en la contracción autógena

Fuente: Wu et al. (2017). Autogenous shrinkage performance of high performance concrete: a review.

También se ha analizado la influencia de otros tipos de adiciones minerales como la escoria de alto horno, que contribuye al igual que el humo de sílice, al desarrollo de la contracción autógena. Wu et al. (2017) encontraron que cuando aumenta la finura de las partículas, la contracción autógena también. Es decir, si la finura de las partículas, en términos de superficie específica era superior a $400 \text{ m}^2/\text{kg}$, la contracción del concreto era proporcional a la cantidad usada en la mezcla. Sin

embargo, si se compara el efecto sobre la contracción que proporciona el uso de la escoria de horno con el de humo de sílice, resulta ser menor ya que la escoria contribuye a que el volumen de poros gruesos sea mayor en la matriz, esto se traduce en una menor presión capilar en la pasta y una contracción autógena menor (Ghafari et al., 2016).

En cuanto al uso de cenizas volantes, se encontró que contribuían a la desaceleración de la reducción de humedad interna en el concreto. De hecho, con una sustitución elevada de cemento con cenizas volantes se logra reducir la contracción autógena con relaciones agua-cemento bajas. La razón radica en la lenta hidratación de las cenizas volantes en comparación con los otros materiales cementantes (Wu et al., 2017).

Para mitigar la contracción en el concreto se han hecho ensayos con el uso de fibras de acero de refuerzo en la mezcla de concreto UHPC, donde se pudo observar que el concreto con un contenido del 1% de volumen de fibra de acero puede reducir las deformaciones por contracción en un 30%-35% (Zhang et al., 2019) (Figura 1.17). De hecho, se puede decir que para este caso la reducción de la contracción es proporcional al aumento del contenido de fibras en la mezcla. Además, se ha propuesto que el principal mecanismo de acción de las fibras de acero frente a la contracción puede atribuirse a la unión entre la fibra y la matriz cementante.

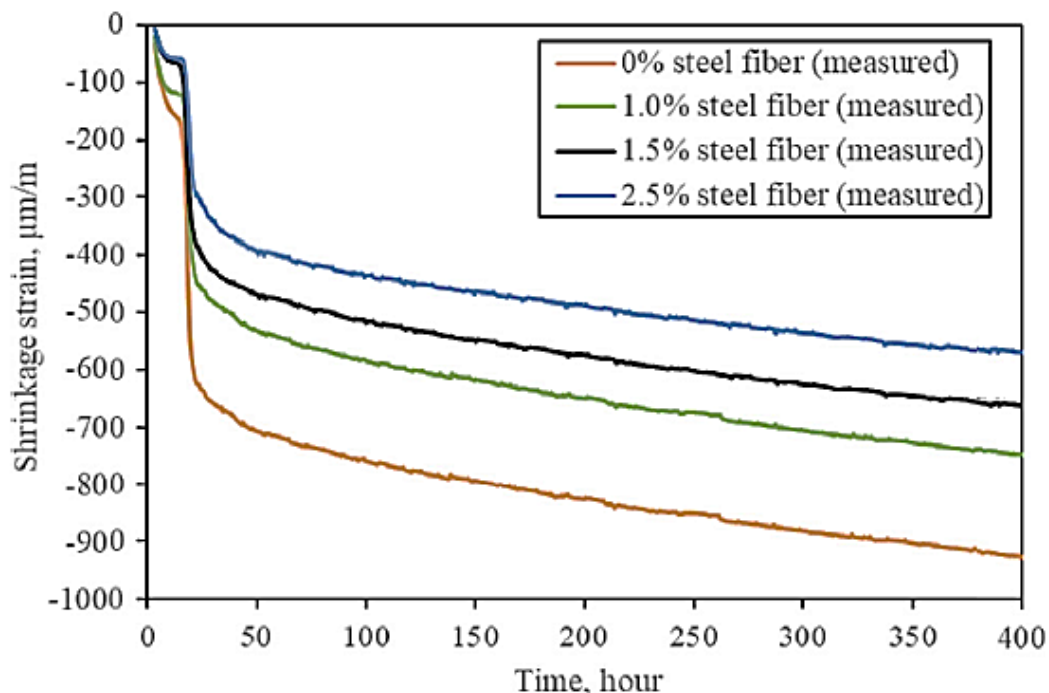


Figura 1.17 Efecto del contenido de fibras en la contracción

Fuente: Zhang et al. (2019) *Autogenous shrinkage behavior of ultra high performance concrete*.

Por esa razón, se ha desarrollado un modelo analítico para la contracción por secado de materiales con contenido de fibra de acero (Zhang et al., 2019). Según el autor, el modelo supone una fibra de acero alineada aleatoriamente dentro de una matriz cementante que impide la acción de deslizamiento a lo largo de la longitud efectiva de la fibra (Ecuación 7). A partir de esto se puede calcular el esfuerzo de contracción en la matriz reforzada (Ecuación 8).

$$\varepsilon_f \left(\frac{\eta l}{2} + \frac{s}{2} \right) = \varepsilon_m \left(\frac{\eta l}{2} + \frac{s}{2} \right) - \tau \pi d * \frac{\eta l}{2} * \frac{\eta l}{2} * \frac{1}{AE} \quad (7)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m - \frac{2\tau d \eta^2 l^2}{Es^2(\eta l + s)} \quad (8)$$

Donde ε_m y ε_f son los esfuerzos de contracción de la matriz lisa y reforzada, respectivamente. l , d y s hacen relación a las características de la fibra de acero

(l =longitud, d = diámetro y s = Separación de las fibras). η es el factor de orientación de las fibras. A y E son el área y el módulo elástico de la matriz circundante, respectivamente, donde $A=\pi s^2/4$. T es la resistencia media de la unión interfacial. Para determinar el valor de ϵ_f es necesario conocer la separación media de las fibras “ s ” y se calcula en función del contenido de fibras en la mezcla (Tabla 1.4).

Tabla 1.5 Separación media en función del contenido de fibras

Fuente: Zhang et al. (2019) Autogenous shrinkage behavior of ultra high performance concrete.

Average fiber spacing for UHPC mixes of different fiber contents.

Fiber content, %	1.0	1.5	2.5
Fiber spacing, mm	2.31	1.93	1.54

En cuanto al factor de orientación de la fibra “ η ” depende del contenido de fibras en la mezcla, existen varios estudios como el de Wille et al. (2014) donde a partir de resultados experimentales se han obtenido correlaciones que permiten acercarse a los valores de esfuerzos de contracción en la matriz cementante reforzada.

Otro método eficaz para tratar la contracción del concreto es retrasar la auto desecación dentro del concreto con un curado interno (Liu et al., 2019). En la actualidad, los materiales que se usan para proporcionar el curado interno en los concretos de alto desempeño son: polímeros superabsorbentes, la ceniza de cascarilla de arroz y varios agregados ligeros. Los polímeros superabsorbentes compensan de forma válida la humedad relativa en el concreto, lo que reduce notablemente la contracción autógena (Kang et al., 2018). La ceniza de cascarilla de arroz proporciona un efecto de microagregado y actividad puzolánica gracias a su estructura biológica porosa fina, lo que también puede usarse para reducir la contracción (Liu et al., 2019). En cuanto al uso de los agregados ligeros, después de un proceso de pre-humectación pueden reducir significativamente la contracción en los concretos de alto desempeño, especialmente la contracción autógena. Por ejemplo, la pizarra expandida puede promover la hidratación continua en el sistema

del concreto de alto desempeño después de 28 días (Meng & Khayat, 2017), según el autor, el mejor efecto se logra cuando el contenido es de un 25% en la mezcla, donde se lograron resistencias del concreto a 91 días de 168 MPa y una contracción autógena baja a los 28 días. Respecto al uso de polímeros superabsorbentes y la ceniza de cascarilla de arroz los autores hicieron mención que la adición de estos materiales en la mezcla afecta el rendimiento del concreto en cuanto a resistencia a la compresión.

Un material que puede ser usado como agregado ligero en el concreto es la piedra pómez, que gracias a su estructura de poros se ha usado como agente de curado interno en el concreto ordinario y de alta resistencia (Liu et al., 2019). El autor en mención ha desarrollado una investigación donde se estudió la influencia del uso de la piedra pómez como agregado en diferentes porcentajes de volumen en contenido (10%-20%-30%) y en diferentes tamaños (0.6 mm-1.25 mm) (Tabla 1.5); donde pudo concluir que la introducción de la piedra pómez a la mezcla de concreto puede afectar el desarrollo temprano de la resistencia del concreto de alto desempeño, pero hay un efecto positivo evidente en el desarrollo de la resistencia a compresión después de 28 días y 56 días, donde se acerca a los valores de referencia o los supera dependiendo de la mezcla. Según el autor, este efecto puede explicarse en dos fases: En la fase inicial de la hidratación, el agua introducida a la mezcla por la piedra pómez pre humedecida conduce a un aumento de la relación agua-cemento de diseño, lo que afecta los productos iniciales de hidratación e impide la resistencia temprana en el concreto. En la segunda fase, el agua liberada con la inclusión de la piedra pómez promueve aún más la hidratación continua de productos no hidratados, como el cemento y las adiciones minerales, logrando así la función de compensar el desarrollo de la resistencia posterior y contribuir a que no aumente la contracción autógena en el concreto. Se puede decir que la inclusión de estos productos para actuar frente a la contracción del concreto, no afectan la resistencia final del concreto. En el caso que se quieran resistencias tempranas en el concreto no serán convenientes. A continuación, se muestra la

distribución de las partículas de piedra pómez en las mezclas de concreto agrupando el tamaño de partículas de 0mm a 0.6mm de 0.6mm a 1.25mm, variando el contenido en términos de porcentaje de volumen desde 10% a 30%. Después se muestra el contenido de absorción de agua en términos de porcentaje y la demanda adicione agua para tener el mismo asentamiento.

Tabla 1.6 Contenidos de piedra pómez en el concreto

Fuente: Liu et al (2019). Optimization of autogenous shrinkage and microstructure for Ultra-High Performance Concrete (UHPC) base don appropriate application of porous pumice.

Group	Diameter (mm)	Admixture (vol. %)	Absorption (wt. %)	Extra water (kg/m ³)
E0	0	0	0	0
E1	0-0.6	10%	19.0%	5.9
E2		20%		11.8
E3		30%		17.7
E4	0.6-1.25	10%	77.9%	0.96
E5		20%		1.92
E6		30%		2.88
E7	0-0.6	10%	66.6%	24.3
E8		20%		48.6
E9		30%		72.9
E10	0.6-1.25	10%		3.35
E11		20%		6.7
E12		30%		10.05

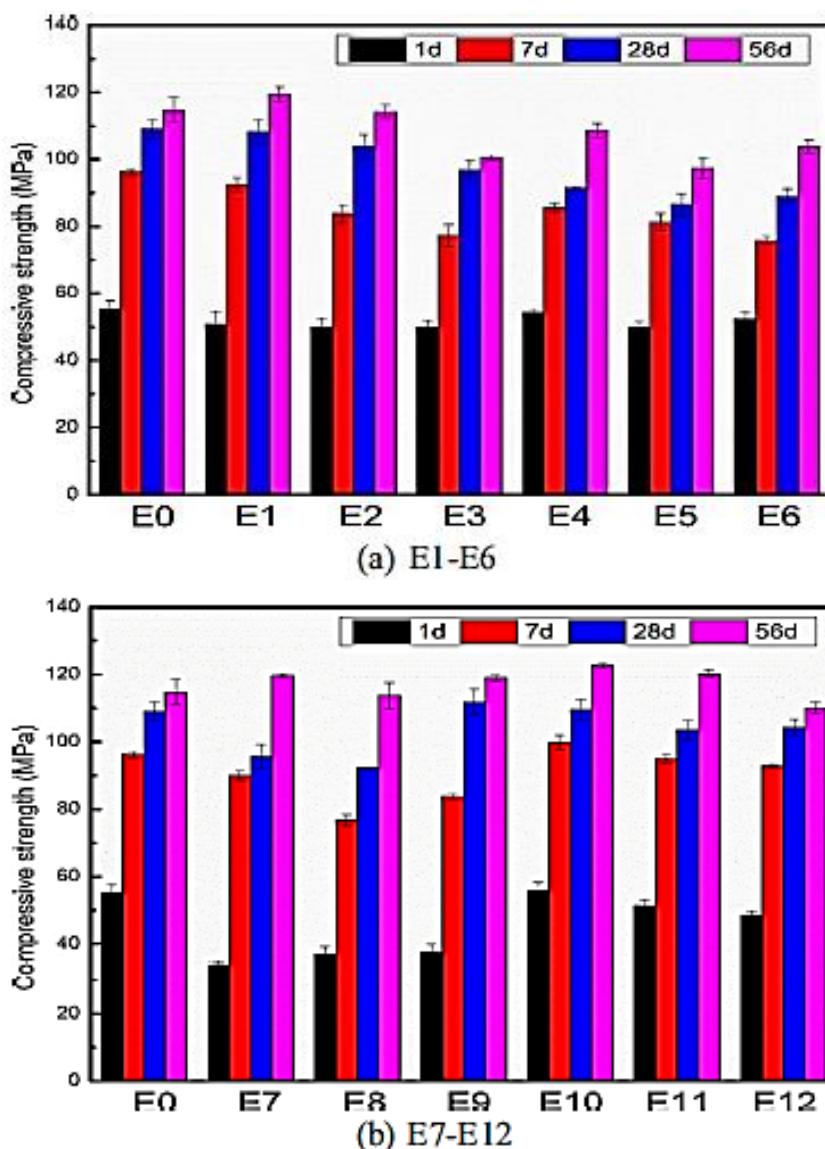


Figura 1.18 Resistencia a la compresión en el concreto con la inclusión de piedra pómez
Fuente: Liu et al (2019). Optimization of autogenous shrinkage and microstructure for Ultra-High Performance Concrete (UHPC) base don appropriate application of porous pumice.

En el caso específico de la contracción autógena, el comportamiento del concreto con la adición de la piedra pómez es igual al que se esperaría en los concretos de alto desempeño, aunque con una deformación más restringida (Figura 1.18). El comportamiento de la deformación puede dividirse en tres etapas: Crecimiento rápido, retroceso y crecimiento moderado. Con la condición del agua introducida al

sistema por la piedra pómez, la cantidad de deformación por contracción en la etapa de crecimiento es más limitada. Del mismo modo en el periodo de crecimiento moderado, la contracción sigue con un comportamiento continuo y trata de estabilizarse gracias a la cantidad de agua introducida que permite controlar el proceso de auto desecación en el concreto (Liu et al., 2019).

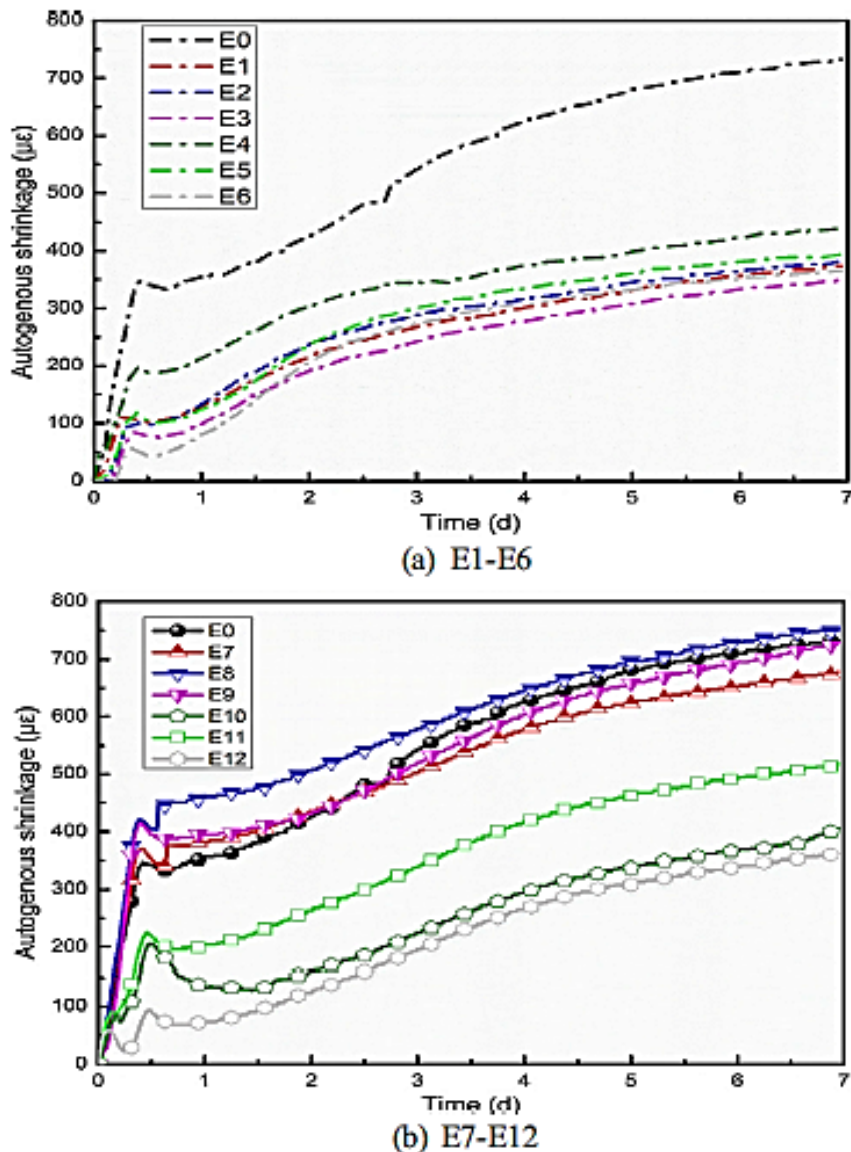


Figura 1.19 Efecto de la piedra pómez en la contracción autógena

Fuente: Liu et al (2019). Optimization of autogenous shrinkage and microstructure for Ultra-High Performance Concrete (UHPC) base don appropriate application of porous pumice.

En síntesis, mediante el método de curado interno con la inclusión de la piedra pómez, el comportamiento del concreto solo se ve afectado con la dificultad en obtener una resistencia temprana, pero con el beneficio de obtener resistencias finales superiores gracias a la inclusión adicional de agua en la mezcla, lo que implica un mayor tiempo en la obtención de las resistencias requeridas en el concreto y podría decirse que sería un efecto a tener en cuenta en la programación de construcción de edificaciones de gran altura. De la igual manera, el efecto limitador de la deformación por contracción que trae la inclusión de agua adicional a través de la piedra pómez resulta ser totalmente beneficioso y brinda una mejor durabilidad en el concreto lo que a su vez se traduce en durabilidad para la edificación.

1.2.2 Fluencia.

En el acero la respuesta a un esfuerzo o la deformación de un elemento es independiente del tiempo, lo que no es igual en el caso del concreto. Cuando se aplica una carga constante en el concreto la deformación de este continuará desarrollándose en el tiempo después de una deformación inmediata a la aplicación de la carga (Tianyuan, 2017) (Figura 1.20). La deformación por fluencia crece rápidamente con aplicación de una carga en el concreto y su velocidad disminuye de manera gradual. Se ha encontrado que más del 80% de la deformación residual en el concreto se puede producir en el primer año y el 50% en el primer mes (Z. hai He et al., 2017). Sin embargo, hay que decir que se deben tener en cuenta la magnitud de la carga con respecto a la resistencia, la edad de carga y las brechas de edad en los elementos de concreto. Según lo anterior, la fluencia en el concreto estructural de una edificación de gran altura puede traducirse en acortamiento vertical, lo que podría causar problemas en los sistemas hidráulicos, sistemas eléctricos, ascensores, etc. (X. Zhao & Wang, 2020). Por lo que la fluencia en el concreto debe controlarse para que no cause problemas en una edificación y predecir de manera correcta la deformación residual del concreto en las consideraciones de diseño de una estructura.

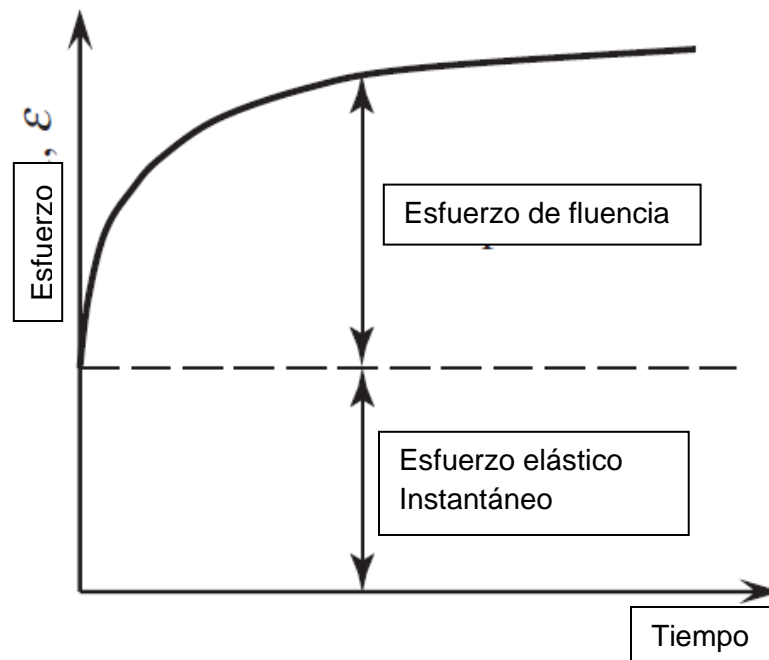


Figura 1.20 Comportamiento de la Fluencia en el concreto

Fuente: Z. hai He et al. (2017). Creep analysis to concrete containing rice husk ash. (Traduced)

El mecanismo bajo el cual se presenta la fluencia en el concreto puede explicarse como la reorganización de partículas bajo la acción de una carga aplicada, las moléculas de agua que son absorbidas por el gel C-S-H tienen que reordenar sus posiciones y da lugar a la fluencia (Tianyuan, 2017). La velocidad de la fluencia en el concreto puede aumentar con el esfuerzo aplicado, donde existe una relación lineal con la temperatura cuando existe un esfuerzo de trabajo inferior al 50% de la resistencia última, pero este cambia cuando el nivel de esfuerzo es superior al 50%, donde la curva deja de ser lineal y pasa a volverse de carácter exponencial, por lo que el nivel de esfuerzo en los elementos estructurales de concreto suele ser inferior al 40% de su resistencia última cuando se está realizando el diseño estructural (Z. hai He et al., 2017; Tianyuan, 2017).

Al igual que la contracción, la fluencia solo se presenta en la pasta de cemento, pero no en el agregado. Sin embargo, el agregado proporciona un efecto de restricción en la matriz de cemento y el uso de agregados más rígidos puede

generar este efecto con mayor restricción (Tianyuan, 2017). Podría decirse que, el uso de agregados más rígidos en el concreto con el fin de buscar mejores propiedades mecánicas puede terminar también contribuyendo a reducir la fluencia en el concreto.

En los últimos años se ha venido implementando el uso de ceniza de cáscara de arroz en el concreto como material cementante suplementario. Se ha encontrado que puede llegar a usarse hasta en un 30% de sustitución del cemento en concreto (Zain et al., 2011), con el fin de mejorar la durabilidad del concreto en términos de resistencia a cloruros y resistencia a la corrosión del acero de refuerzo. En el caso de la fluencia tampoco es la excepción. Se ha investigado que el uso de las cenizas de cascarilla de arroz en el concreto puede ser beneficioso si se quiere reducir la fluencia en el concreto. Z. hai He et al. (2017) llevaron a cabo una investigación, donde se usó este material en diferentes proporciones; encontrando que no solamente puede contribuir a un menor efecto de fluencia, sino que también en la obtención de un mejor comportamiento mecánico en el concreto (Resistencia a la compresión y módulo elástico). Pero a decir verdad la influencia del contenido de la ceniza de cáscara de arroz como material cementante suplementario parece ser muy desigual y limitada, ya que con la adición de 10%, 15% y 20% en la mezcla de concreto reduce la fluencia a los 60 días en un 17%, 30% y 33%, respectivamente (Figura 1.21). Esto indica que es limitado con un comportamiento que no es proporcional el efecto que puede contribuir este material y se podría decir que con un contenido del 15% puede lograrse una muy buena reducción de la deformación por fluencia en el concreto.

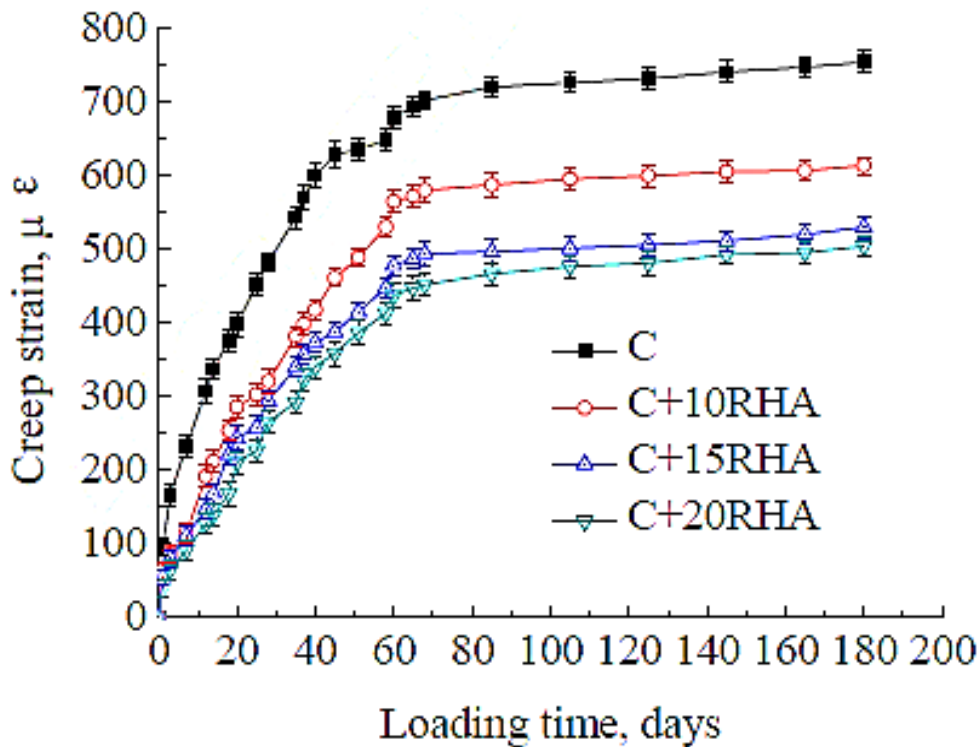


Figura 1.21 Deformación por fluencia con diferentes contenidos de ceniza de cáscara de arroz

Fuente: Z. hai He et al. (2017). Creep analysis to concrete containing rice husk ash.

Según el autor, el efecto de la ceniza de cáscarilla de arroz en la fluencia se debe a que los microporos de las partículas de la ceniza pueden absorber y retener agua, lo que implica un aumento en la humedad interna del concreto y la hidratación de la matriz cementante. Además, se sabe que la fluencia del concreto es inducida en gran medida por el cambio en la humedad relativa interna de la mezcla. Teniendo en cuenta que la humedad relativa interna del concreto no solo es importante para la hidratación, sino que también para la durabilidad del concreto, la ceniza de cáscara de arroz juega un papel importante en la liberación de agua cuando se presente la auto desecación del concreto.

En cuanto a la estructura de poros, es sabido que la pasta de cemento formada por las reacciones de hidratación contiene poros interconectados de diferentes

tamaños y diferentes orígenes, los poros de gel dentro del C-S-H, los poros capilares y los vacíos de aire. La adición de la ceniza de cáscara de arroz el tamaño de los poros capilares reduce su tamaño, ya sea porque están rodeados y/o rellenos de poros de gel C-S-H producto de la hidratación del cemento y la reacción puzolánica de la ceniza. En su investigación, Z. hai He et al. (2017) pudieron observar en sus resultados que, con un mayor contenido de ceniza de cascarilla de arroz en el concreto, menor era el tamaño de los poros capilares (Figura 1.22).

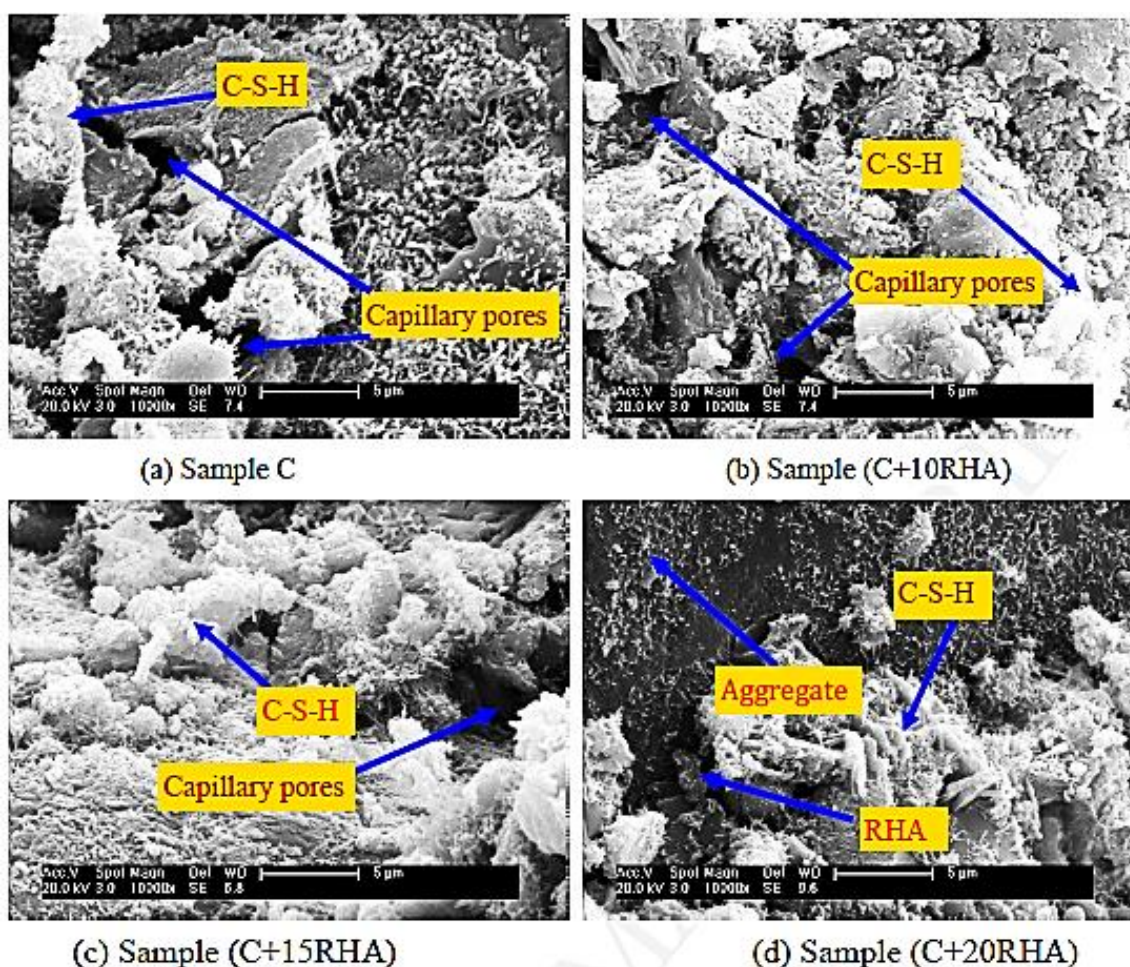


Figura 1.22 Imágenes SEM de los poros de concreto con la adición de cenizas de cascaras de arroz

Fuente: Z. hai He et al. (2017). Creep analysis to concrete containing rice husk ash

Lo que se puede decir es que la adición de las cenizas de cascarilla de arroz en general reduce la porosidad del concreto, a través de la reducción de los poros

capilares en la matriz, esto contribuye a mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto. Lo que puede explicar cómo se reduce la deformación por fluencia a través de una mayor tasa de humedad relativa en la mezcla. Además, las partículas de la ceniza de cascarilla de arroz son muy reactivas, ya que al incorporarse en la mezcla de concreto reaccionan con el hidróxido de calcio originado por la hidratación del cemento y se logra contribuir a reducir las zonas de transición interfacial con el agregado y la porosidad relacionada con los poros de gel (Z. hai He et al., 2017).

2. Bombeo y transportabilidad en el Concreto.

La transportabilidad en el concreto está directamente relacionada a la manera en que se hace llegar el concreto desde la planta hasta su lugar de encofrado, donde se busca que transcurra el menor tiempo posible en el proceso y que la mezcla fresca no pierda sus propiedades a lo largo de los diferentes medios en los que se transporte. Sin embargo, la investigación sobre la transportabilidad del concreto es escasa, ya que en el proceso se requieren camiones mezcladores de concreto, bombas y tuberías (M. Choi et al., 2015). Adicionalmente, la gran cantidad de material e instrumentación hace que sea un tema difícil de explorar totalmente; por lo tanto, en este documento se hará énfasis en el bombeo del concreto y los estudios de diferentes autores al respecto.

El bombeo del concreto se introdujo por primera vez en la década de 1930 y se ha convertido en la alternativa más utilizada en el transporte del concreto, ya que permite transportar el concreto a los encofrados y moldes para construir los elementos estructurales, al mismo tiempo que aumenta la velocidad de entrega y acceder a zonas de difícil acceso (M. Choi et al., 2015). De igual manera, su uso sigue creciendo debido al aumento de la demanda de superestructuras de concreto reforzado, como edificios de gran altura y otras estructuras elevadas.

El proceso de bombeo de concreto en edificios de gran altura consiste en que el concreto fluye a través de una tubería que tiene que pasar por un periodo de alta presión de bombeo, por lo que el bombeo puede considerarse un caso especial de dinámica de fluidos en tuberías, donde el principal enfoque es estudiar el comportamiento del concreto dentro de la tubería (Feys et al., 2016). Dado que el

concreto puede considerarse como un fluido complejo, la predicción de su flujo requiere un conocimiento detallado de sus propiedades reológicas (M. Choi et al., 2015). Es decir, la facilidad de bombeo del concreto no es una característica intrínseca del concreto, sino que es más bien el resultado de un enfoque integral que implica la mejora de la composición del concreto (Secieru et al., 2018).

A mediados del siglo pasado, las investigaciones enfocadas en obtener un mejor bombeo en el concreto se centraban en obtener las presiones de bombeo adecuadas para suministrar el concreto de manera que no hubiese interrupciones, considerando la fricción como el aspecto principal en el flujo de concreto (Feys et al., 2016). Después, se investigó acerca de la segregación dinámica de los agregados gruesos que se producía en el concreto, esto condujo a la definición de una capa de lubricación, que es una capa que se forma cerca de la pared de la tubería, donde ya no se supone que la fricción dicta el comportamiento del flujo de concreto en una tubería, sino que son las complejas variaciones en la composición del concreto y propiedades reológicas a diferentes distancias de la pared (Jang & Choi, 2019). Teniendo en cuenta lo anterior, hay que señalar que cuando se planifica y se construye una edificación de gran altura, debe evaluarse cuidadosamente el comportamiento de la línea de bombeo teniendo en cuenta las longitudes previstas (casi siempre van por el espacio del ascensor) antes de empezar a ejecutarse el transporte del concreto mediante el bombeo, ya que las propiedades del concreto pueden cambiar después de experimentar un transporte largo en la tubería. La pérdida de consistencia, el asentamiento y la variación del contenido de aire durante el bombeo son algunos de los inconvenientes que más se presentan (Bier, 2015).

El flujo en una tubería de concreto puede decirse que depende de la presión aplicada, el radio de la tubería y la viscosidad del fluido que contiene. En el caso del concreto, es un fluido más complejo porque contiene agregados con una amplia gama de tamaños, los cuales interactúan con las paredes de la tubería y entre sí,

lo que da lugar a secciones no homogéneas dentro del flujo (M. Choi et al., 2015). Estas secciones no homogéneas pueden dividirse en 3 partes (Figura 2.1): la capa de deslizamiento, la capa de esfuerzos de corte y la región de flujo de concreto o tapón.

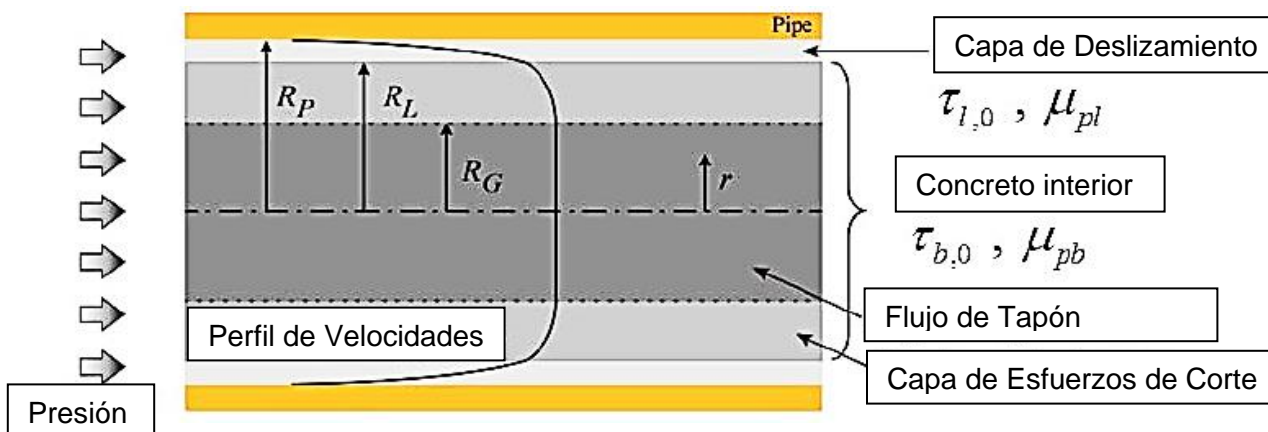


Figura 2.1 Flujo de concreto dentro de una tubería

Fuente: M. Choi et al. (2015). *Research needs to advance concrete pumping technology.*

El espesor de la capa de deslizamiento depende de la tribología del material adyacente al de la tubería (M. Choi et al., 2015), la tribología es la ciencia que se ocupa de las superficies que interactúan en un movimiento, incluyendo la fricción, la lubricación, el desgaste y la erosión (ASTM G40-21, 2021). El espesor y el perfil de velocidad de la capa donde se presentan los esfuerzos de corte dependen de la viscosidad y el límite elástico, mientras que el grosor de la capa interior en el flujo de tapón depende únicamente del límite elástico (M. Choi et al., 2015). La capa de deslizamiento contiene principalmente pasta de cemento y posiblemente partículas de arena muy pequeñas, mientras que las capas interiores contienen agregados gruesos en su mayoría, donde puede darse la segregación de la mezcla de concreto.

Para determinar los parámetros reológicos como el límite elástico y la viscosidad de una mezcla de concreto existen varios modelos, pero uno de los que mejor se ajusta es el propuesto por Bingham (Figura 2.2). Donde el límite elástico se refiere

a la cantidad de esfuerzo necesario para iniciar el flujo en el material y la viscosidad plástica la define como la resistencia interna al flujo del material (Cu et al., 2020).

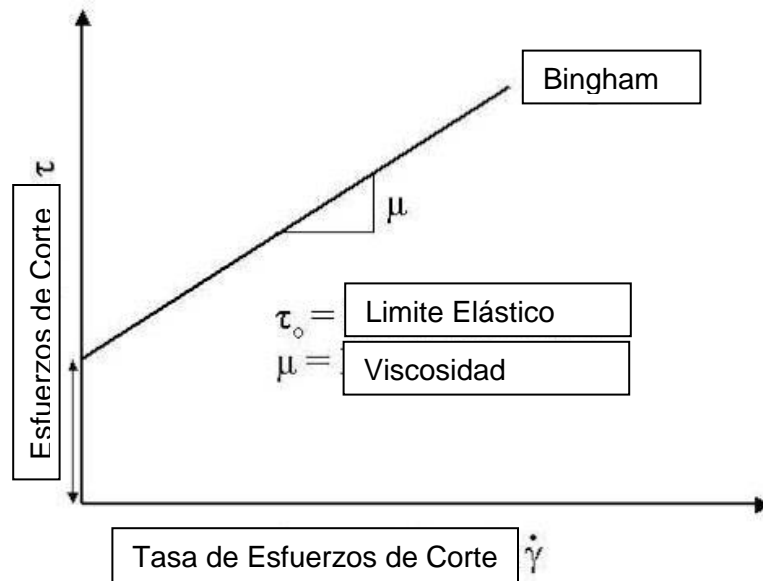


Figura 2.2 Modelo de Bingham

Fuente: Cu et al. (2020) Relationship between workability and rheological parameters of self-compacting concrete used for vertical pump up to supertal buildings

Donde a partir de ensayos en circuitos de bombeo o con tribómetros es posible calcular estas propiedades en una mezcla de concreto. El tribómetro (Figura 2.3) es un dispositivo en el que se puede reproducir las condiciones de bombeo y generar la capa de deslizamiento, es similar a un reómetro de concreto, pero mientras que en un reómetro se evita la formación de la capa de deslizamiento, un tribómetro tiene una superficie lisa para provocar la segregación de la mezcla (Feys et al., 2016).



Figura 2.3 Tribómetro portable para obras

Fuente: Feys et al. (2016). Development of a tribometer to characterize lubrication layer properties of self-consolidating concrete

En cuanto a la segregación del concreto, esta puede no verse cuando esté en reposo el concreto, pero puede sufrirla durante el bombeo a través de una serie de fenómenos: 1.) Los agregados gruesos se desplazan hacia el centro de la tubería, donde el perfil del flujo muestra que la velocidad es menor. 2.) Los agregados se desplazan por delante del concreto circundante. 3.) El agua presente en la mezcla es empujada fuera del concreto, ya sea desplazándose hacia las paredes de la tubería o por delante del concreto en el flujo (M. Choi et al., 2015).

Un factor importante en la segregación es el proceso de bombeo y el tipo de bomba utilizado, las más comunes son las de pistón (Figura 2.4). Se caracterizan por un ciclo de pistón que tiene dos fases: en la primera el pistón retrae y cierra la válvula de salida mientras se abre la entrada y el material llena la cama delante del pistón, en la segunda fase la válvula de entrada se cierra cuando el pistón empuja el material hacia delante a través de la cámara (Jang & Choi, 2019).

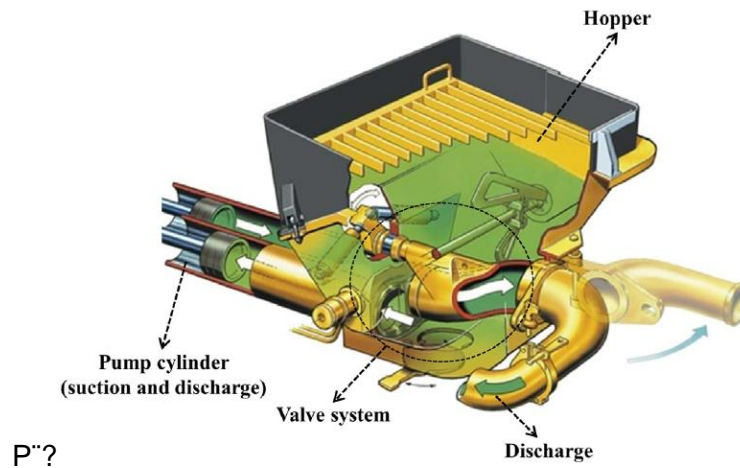


Figura 2.4 Esquema de funcionamiento de una bomba para concreto

Fuente: Jang & Choi (2019). How affect the pipe length of pumping concrete circuit on concrete pumping

Durante la fase 2, el mortero y los agregados avanzan, pero después de entrar en la tubería el material empujado hacia delante se detiene durante la retracción del pistón en la parte inicial de la tubería. El efecto consiste en que se ha observado que por inercia los agregados siguen avanzando respecto a la pasta (M. Choi et al., 2015). Hay que mencionar que, para los ensayos de bombeo de concreto, se desarrolla un circuito de bombeo con el objetivo de tratar de simular las condiciones de bombeo en obra como puede verse a continuación (Figura 2.5)



Figura 2.5 Circuitos de bombeo para ensayos

Fuente: Jang & Choi (2019). How affect the pipe length of pumping concrete circuit on concrete pumping

2.1 Aspectos del bombeo en el Concreto.

Uno de los aspectos importantes en la construcción de edificaciones de gran altura es el caudal del concreto suministrado en el proceso de bombeo, ya que si no se tiene un suministro constante y eficiente se puede incurrir en atrasos en el cronograma de construcción. Es por esa razón que varios investigadores han hecho énfasis en conocer de manera exacta las relaciones entre las presiones de bombeo y los diámetros de la tubería con el caudal que se suministra en obra. Por ejemplo, Feys et al.(2016) determinaron que la relación entre las pérdidas de presión en un sistema de bombeo es directamente proporcional al caudal suministrado, realizando ensayos en circuitos de bombeo con diferentes mezclas de concreto y diámetros internos de tubería de 125 mm. Aunque la relación al igual que en otros fluidos se puede decir que es casi lineal (Figura 2.6).

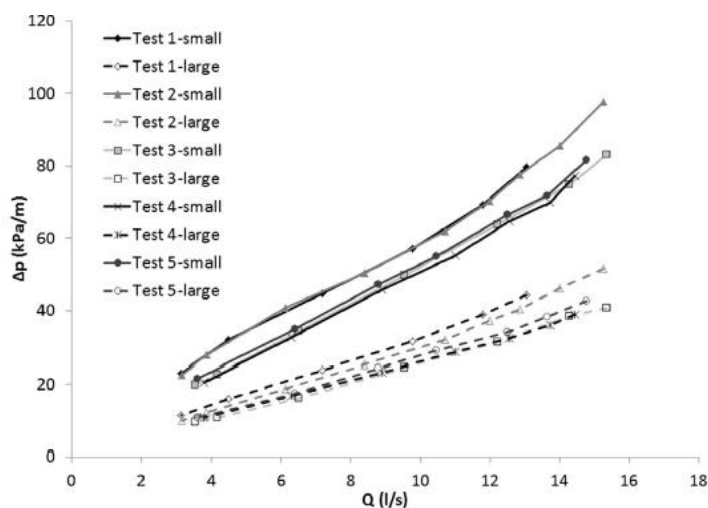


Figura 2.6 Relación entre el caudal de suministro y las pérdidas de presión.

Fuente: Feys et al.(2016) How do concrete rheology, tribology, Flow rate and pipe radius influence pumping pressure?

El hecho que la pérdida de presión esté influenciada por el caudal no es nuevo, pero si se quiere tener una predicción más precisa de las pérdidas de presión en el bombeo de concreto, se deben tener en consideración los parámetros de la capa

de deslizamiento presente en el proceso. Dependiendo de cómo sean los parámetros reológicos en el concreto la relación de las pérdidas con el caudal se vuelve bilineal (Feys et al., 2016); donde según el modelo propuesto por Kaplan (Kaplan, 2001) los perfiles de velocidad cambian en ese modelo bilineal (Figura 2.7)

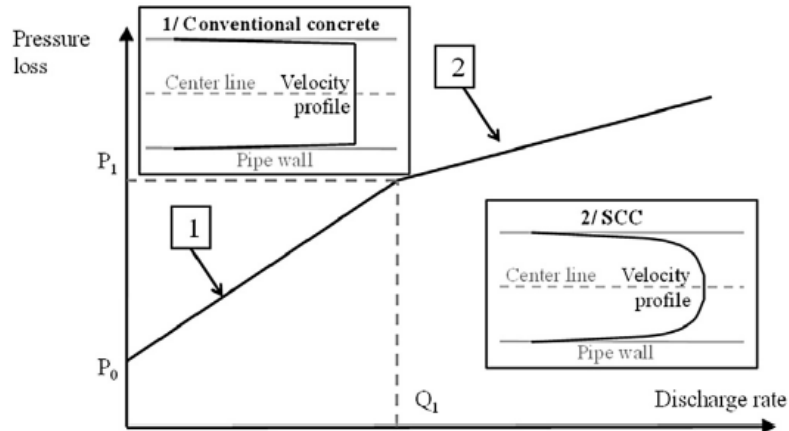


Figura 2.7 Modelo bilineal de pérdidas de presión según el perfil de velocidades

Fuente: Feys et al. (2016) *How do concrete rheology, tribology, Flow rate and pipe radius influence pumping pressure?*

En otra investigación llevada a cabo por Jang & Choi (2019) determinaron que conociendo las propiedades reológicas del concreto y de la capa de deslizamiento, el caudal de suministro de un sistema de bombeo de concreto puede determinarse con la siguiente ecuación (1):

$$Q = 3600 \frac{\pi}{24\mu_L\mu_C} [3\mu_C\Delta P(R_p^4 - R_L^4) - 8\tau_L\mu_C(R_p^3 - R_L^3) + 3\mu_L\Delta P(R_L^4 - R_G^4) - 8\tau_C\mu_L(R_L^3 - R_G^3)]$$

Donde, Q es el caudal (m³/h), ΔP es la presión por unidad de longitud (Pa/m), R_p es el radio de la tubería utilizada para el bombeo (m), R_L es la distancia desde el centro de la tubería a la capa de deslizamiento (m), R_G es el radio en el que comienzan los esfuerzos de corte en el flujo de concreto (m). μ_L y τ_L son la

viscosidad (Pa.s) y el límite elástico (Pa) de la capa de deslizamiento, respectivamente. μ_C y τ_C son la viscosidad (Pa.s) y el límite elástico (Pa) del concreto, respectivamente. Sin embargo, dado que R_L este asociado a la capa de deslizamiento durante el proceso de bombeo, no tiene un rango valores de referencia, entonces para medir o tener un espesor aproximado de la capa en la misma investigación los autores plantean la medición a través de una prueba de ultrasonido, en el cual se podrá determinar de manera muy aproximada el perfil de velocidades y determinar el espesor de la capa (Figura 2.8).

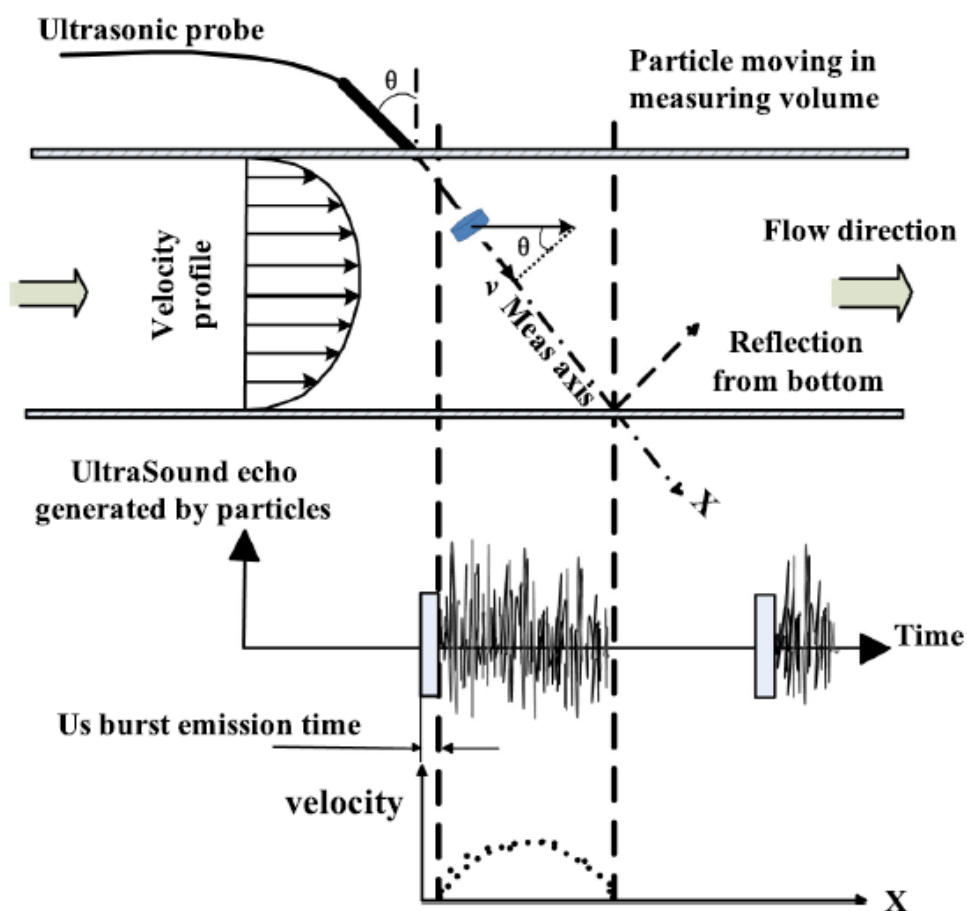


Fig. 4. Schematic illustration of Ultrasonic velocity profiler (UVP).

Figura 2.8 Prueba de ultrasonido para una tubería con concreto.

Fuente: Jang & Choi (2019). How affect the pipe length of pumping concrete circuit on concrete pumping

A pesar de los ensayos en el circuito simulando diferentes longitudes de trayecto de bombeo, la capa de deslizamiento no presentó variaciones significativas. La tendencia de los perfiles de velocidad fue similar y el espesor de la capa de deslizamiento fue de casi 2.0 mm, lo que coincidió conociendo las demás variables y despejando el valor de R_L en la ecuación 1 (Figura 2.9).

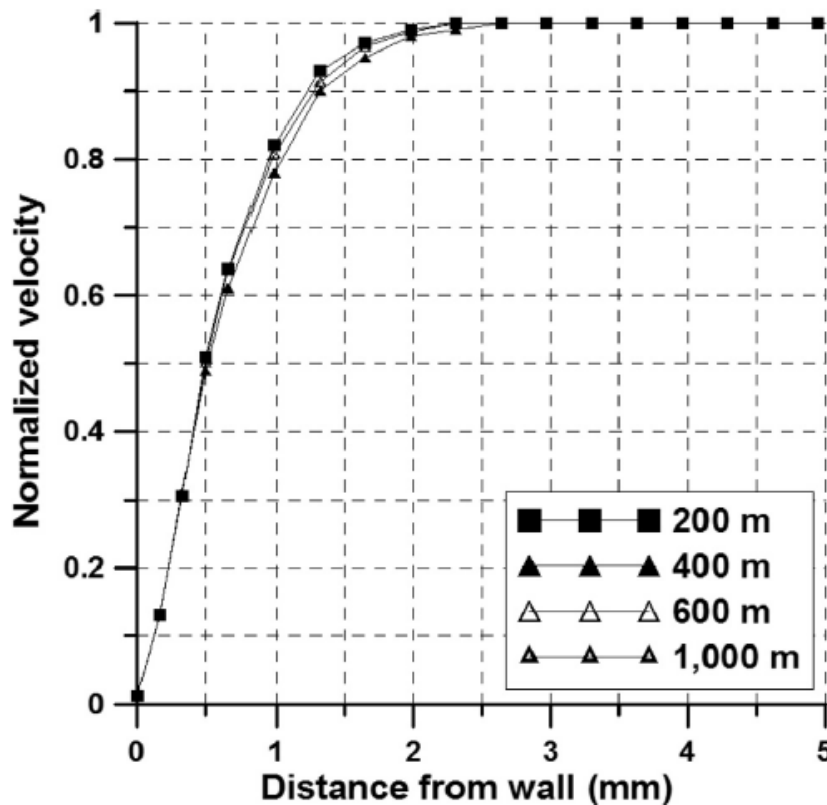


Figura 2.9 Espesor de la capa de deslizamiento con diferentes tramos de bombeo.

Fuente: Jang & Choi (2019). *How affect the pipe length of pumping concrete circuit on concrete pumping*

En cuanto al diámetro de la tubería a usar en el sistema, Feys et al. (2016) encaminaron también su investigación, al análisis de la influencia del radio de la tubería en las pérdidas de presión durante el proceso de bombeo. Basándose en la ecuación propuesta por Poiseuille en 1840, la pérdida de presión es inversamente proporcional al radio elevado a la 4. Esto implica que la reducción del

radio en un factor de 2 conduciría a un aumento de la pérdida de presión en un factor de 16. A continuación, se muestra la ecuación propuesta por Poiseuille:

$$Q = \frac{1}{8} \frac{\pi R^4 \Delta p}{\eta L}$$

De este modo, los autores en mención hicieron una comparación utilizando los mismos concretos, los mismos caudales y las mismas presiones variando los diámetros de la tubería en un mismo circuito de bombeo en serie. Los diámetros de tubería utilizados fueron 100 mm y 125 mm. Los resultados mostraron que, de manera aproximada, las pérdidas en el tramo de tubería con menor diámetro eran 2.27 veces mayores que las pérdidas de presión en los tubos de mayor diámetro.

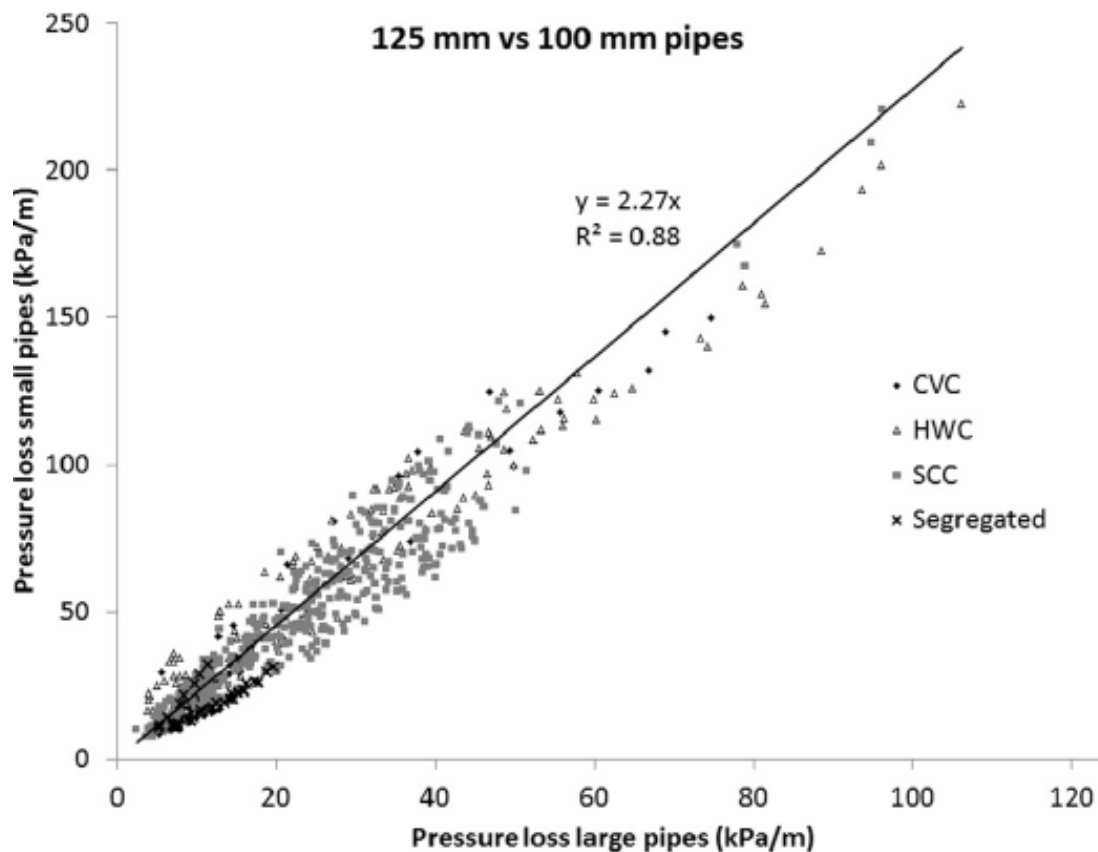


Figura 2.10 Comparación de pérdidas de presión con diferentes diámetros de tuberías.
 Fuente: Jang & Choi (2019). *How affect the pipe length of pumping concrete circuit on concrete pumping*

Se puede decir que los parámetros para tener en cuenta en los sistemas de bombeo de concreto son similares a los que se realizan con otros tipos de fluidos, ya que la relación entre los caudales, las pérdidas de presión y las dimensiones de la tubería son estrechos y pueden cuantificarse de tal manera que pueda predecirse y diseñarse para un suministro eficiente en las edificaciones de gran altura.

2.1.1 Componentes del concreto y su interacción con el proceso de bombeo.

Los concretos de alta resistencia y altas prestaciones son la primera opción en la construcción de edificaciones de gran altura, sin embargo, dichos concretos suelen tener una viscosidad más alta en comparación con los concretos convencionales, lo que implica una mayor presión de bombeo, adicionalmente los trayectos de bombeo durante la construcción de este tipo de edificaciones son más largos, dado que estos factores terminan haciendo aún más complejo el proceso de transporte para el encofrado del concreto en obra, por lo que se ha incurrido en el estudio de las propiedades reológicas de los concretos analizando la influencia de los componentes que requieren para tener propiedades mecánicas óptimas en estado endurecido, como lo son las adiciones o aditivos.

Se ha planteado el uso de concretos autocompactantes con asentamientos del orden de 58 cm o 66 cm, donde las mezclas no presentan segregación (M. Choi et al., 2015). Sin embargo, el uso de concretos autocompactantes implica un límite elástico muy bajo y una viscosidad inadecuada, lo que podría conducir a una presión de bombeo muy elevada debido a una alta concentración y bloqueo de partículas de agregados gruesos en los giros con los aditamentos de tubería o en la salida de la misma (Kwon et al., 2016), lo que quiere decir que un mayor asentamiento en el concreto no siempre conduce necesariamente a un mejor flujo del concreto dentro de la tubería sin segregación, aunque el objetivo en las investigaciones es obtener un asentamiento que permita la fluidez del concreto dentro de la tubería.

En el estudio de Jeong et al. (2016) acerca de la influencia de las adiciones en la reología del concreto se indicó que para lograr una alta fluidez en el concreto de alta resistencia, las adiciones como el humo de sílice dentro de la mezcla de concreto requieren una mayor cantidad de reductores de agua de alto rango (HRWRA) para lograr un asentamiento de 60 cm y que a medida que mayor sea su porcentaje de remplazo de cemento dentro de la mezcla de concreto (10%-20%), mayor será la cantidad de demanda de HRWRA en porcentaje de volumen de mezcla. A continuación, se muestran los resultados (Figura 2.11), hay que decir que en comparación con la muestra que no contenía humo de sílice, en este caso la demanda de HRWRA fue mayor por parte de las muestras con humo de sílice para obtener el mismo asentamiento en estado fresco.

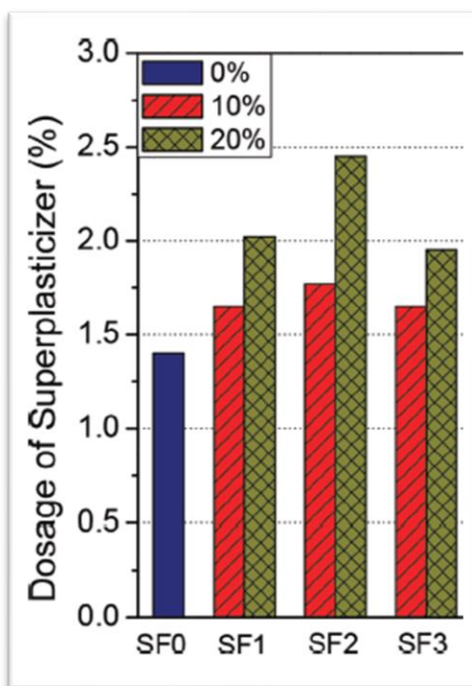


Figura 2.11 Dosificación de HRWRA para diferentes contenidos de Humo de sílice
Fuente: Jeong et al. (2016). *Effect of admixtures on pumpability for high-strength concrete.*

Dentro de la misma investigación se hicieron los ensayos de mezclas de concreto con cenizas volantes como material de sustitución de cemento. Para lograr un

asentamiento de 60 cm, en este caso los resultados mostraron que con el aumento del contenido de cenizas volantes se requiere una menor cantidad de HRWRA, esto quiere decir que el uso de cenizas volantes como material de sustitución en el concreto proporciona una mejor fluidez y garantiza mejores propiedades reológicas para facilitar el bombeo sin tener que usar grandes cantidades de agentes reductores de agua, esto debido a la forma esférica de las partículas de ceniza volante. A continuación, se muestran los resultados (Figura 2.12).

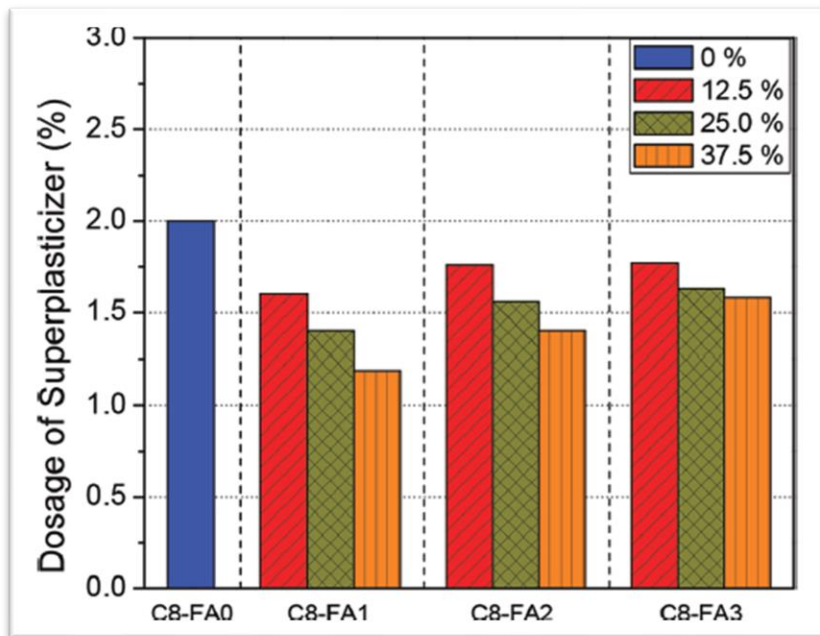


Figura 2.12 dosificación de HRWRA con diferentes contenidos de Cenizas Volantes

Fuente: Jeong et al. (2016). Effect of admixtures on pumpability for high-strength concrete.

Con la intención de comprobar el efecto de las adiciones minerales en el proceso de bombeo de concreto, M. S. Choi et al. (2015) realizaron una investigación donde compararon las presiones necesarias en una tubería de concreto para obtener determinados caudales de suministro dentro del sistema de bombeo variando los materiales de sustitución de cemento en las mezclas de concreto. Los resultados obtenidos comprobaron lo anteriormente expuesto, que con el uso de humo de sílice en el concreto se requieren mayores presiones en el sistema de bombeo para

lograr mayor viscosidad y un mayor caudal de suministro; mientras que con el uso de ceniza volante las presiones requeridas resultan ser menores para lograr los mismos caudales de suministro. Aunque con el aumento del contenido de las adiciones minerales las presiones van aumentando, en el caso del humo de sílice la separación de las curvas de bombeo es más grande, lo que dice que la variación en las presiones de bombeo requeridas es más sensible con el contenido de humo de sílice que con las cenizas volantes. Lo que indica que el desempeño del sistema de bombeo puede verse afectado de manera fácil con leves variaciones en el contenido de humo de sílice. A continuación, se muestran las curvas de bombeo con diferentes contenidos de cada material suplementario (Figura 2.13).

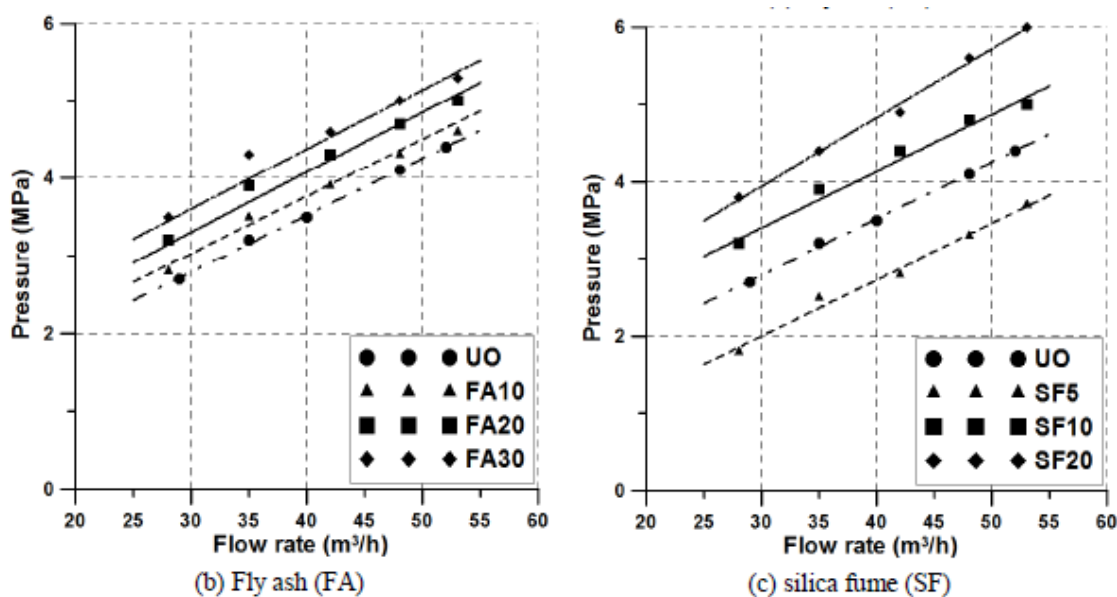


Figura 2.13 Comparación de presiones de bombeo requeridas para los sistemas de bombeo.

Fuente: M. S. Choi et al. (2015). *Effect of the mineral admixtures on pipe Flow of pumped concrete*

2.2 Efectos del proceso de bombeo sobre el Concreto.

En el caso de edificios de gran altura, los concretos que se usan para su construcción tienen una baja relación de agua cemento, se podría decir que es un concreto que no tiene una fluidez suficiente en la pasta de cemento o mortero (Jang & Choi, 2019), lo que implica que la presión de bombeo tenga que aumentar de

manera exponencial con la longitud de la tubería. En el caso opuesto, con un concreto que logre tener una mayor saturación de pasta de cemento, se evitará el contacto directo entre partículas de agregados y se tendrá una capa de deslizamiento suficiente donde la presión aumenta o disminuye linealmente con la longitud de la tubería, adicionalmente unas pérdidas constantes en una sección recta con un diámetro constante (Feys et al., 2013). Por lo que se puede decir que la capa de deslizamiento entre el concreto y la pared de la tubería que se forma durante el proceso de bombeo cumple un papel importante, ya que cuando se tiene concreto no del todo saturado, esta facilita el deslizamiento del material dentro de la tubería (Jang & Choi, 2019).

En general, tras el proceso de bombeo, la viscosidad disminuye y el límite elástico aumenta, es decir, el concreto se vuelve menos pegajoso y presenta un mayor comportamiento de fluidez. Debido a esto, Jang & Choi (2019) decidieron estudiar la influencia en las propiedades reológicas del concreto con un bombeo de diferentes longitudes. Se encontró que, utilizando una mezcla de concreto de resistencia nominal a compresión de 50 MPa, las relaciones entre las presiones de bombeo y las longitudes de la tubería eran lineales (Figura 2.14). Según los autores esto se debe a que la viscosidad, que está directamente relacionada con la fricción con la tubería, permanece casi constante durante el proceso de bombeo, pero las propiedades reológicas del concreto cambian en proporción a la longitud de la tubería (Tabla 2.1).

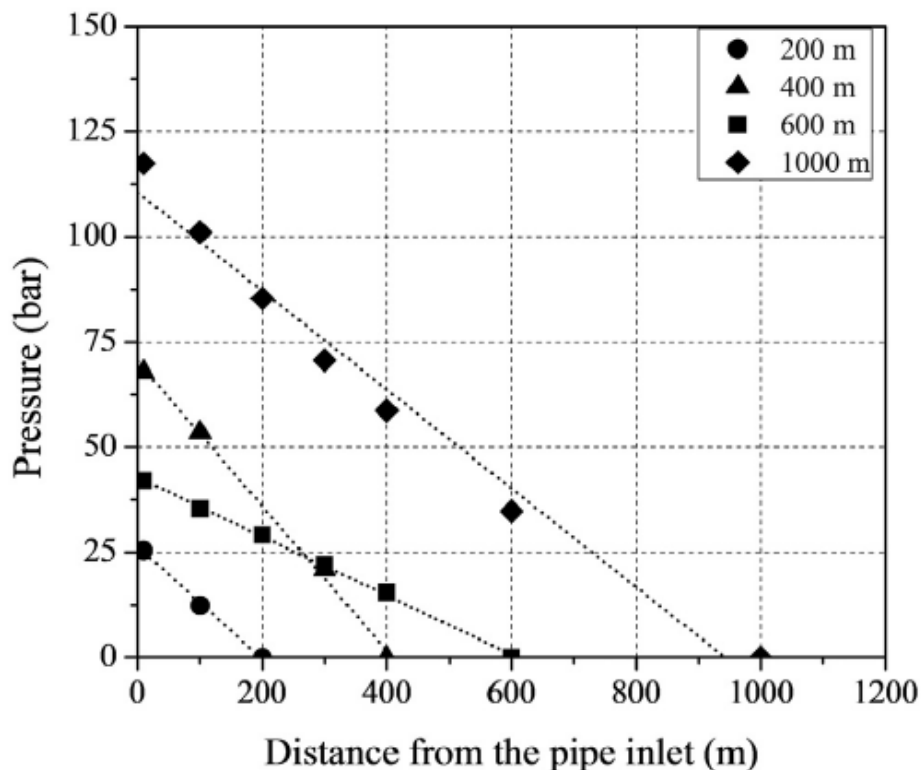


Figura 2.14 Presiones de bombeo de concreto con diferentes longitudes de tubería.

Fuente: Jang & Choi (2019) How do affect the pipe length of pumping circuit on concrete pumping

Tabla 2.1 Propiedades reológicas del concreto antes y después del bombeo.

Fuente: Jang & Choi (2019) How do affect the pipe length of pumping circuit on concrete pumping

Pipe Length (m)	Item	Concrete	
		Before	After
200	Plastic viscosity (Pa·s)	33	26
	Yield stress (Pa)	60	225
	Slump or slump flow (mm)	600	240
400	Plastic viscosity (Pa·s)	29	22
	Yield stress (Pa)	80	315
	Slump or slump flow (mm)	580	190
600	Plastic viscosity (Pa·s)	31	19
	Yield stress (Pa)	70	330
	Slump or slump flow (mm)	680	205
1000	Plastic viscosity (Pa·s)	32	11
	Yield stress (Pa)	60	380
	Slump or slump flow (mm)	570	240

Otra investigación llevada a cabo por Y. Li et al. (2021) tuvo como fin evaluar en una construcción de un edificio real, donde se evaluaron las propiedades en estado endurecido del concreto con los procesos de bombeo a siete diferentes alturas (200 m, 247 m, 301 m, 326 m, 351 m, 407 m y 500 m). El concreto que se usó para esta edificación tenía las siguientes proporciones de mezcla:

Tabla 2.2 Proporciones de mezcla de concreto de ensayo

Fuente: Y. Li et al. (2021) Influence of ultra high rise pumping on microstructure and multiscale mechanical properties of concrete base on X-ray CT and 3D mesoscopic numerical simulation

Proporciones de mezcla del concreto bombeado (kg/m³): Tabla extraída del documento en inglés.

w/c	Water	Cement	Fly Ash	Slag	Silica Fume	Sands	Gravel	HRWRA
0,3	181,5	320	150	100	35	780	890	14,7

Según los autores, la influencia del proceso de bombeo fue positiva, ya que el módulo elástico y la resistencia a la compresión aumentaron a medida que se aumentaba la altura de bombeo. Esto puede darse debido a la reducción de la porosidad de la pasta de cemento en la zona de transición con el agregado, los autores determinaron a partir del análisis de imágenes BSE (Backscattered electrons por sus siglas en inglés, en un microscopio electrónico de barrido) a las muestras de concreto antes y después del proceso de bombeo. Mediante el criterio de umbrales de porosidad en la pasta determinaron sitios donde se iba de una mayor porosidad a menor porosidad desde la pared del agregado. A continuación, puede verse el análisis de imágenes de BSE a muestras antes del bombeo (P-0) y después del bombeo a una altura de 407m (P-407) (Figura 2.1.3)

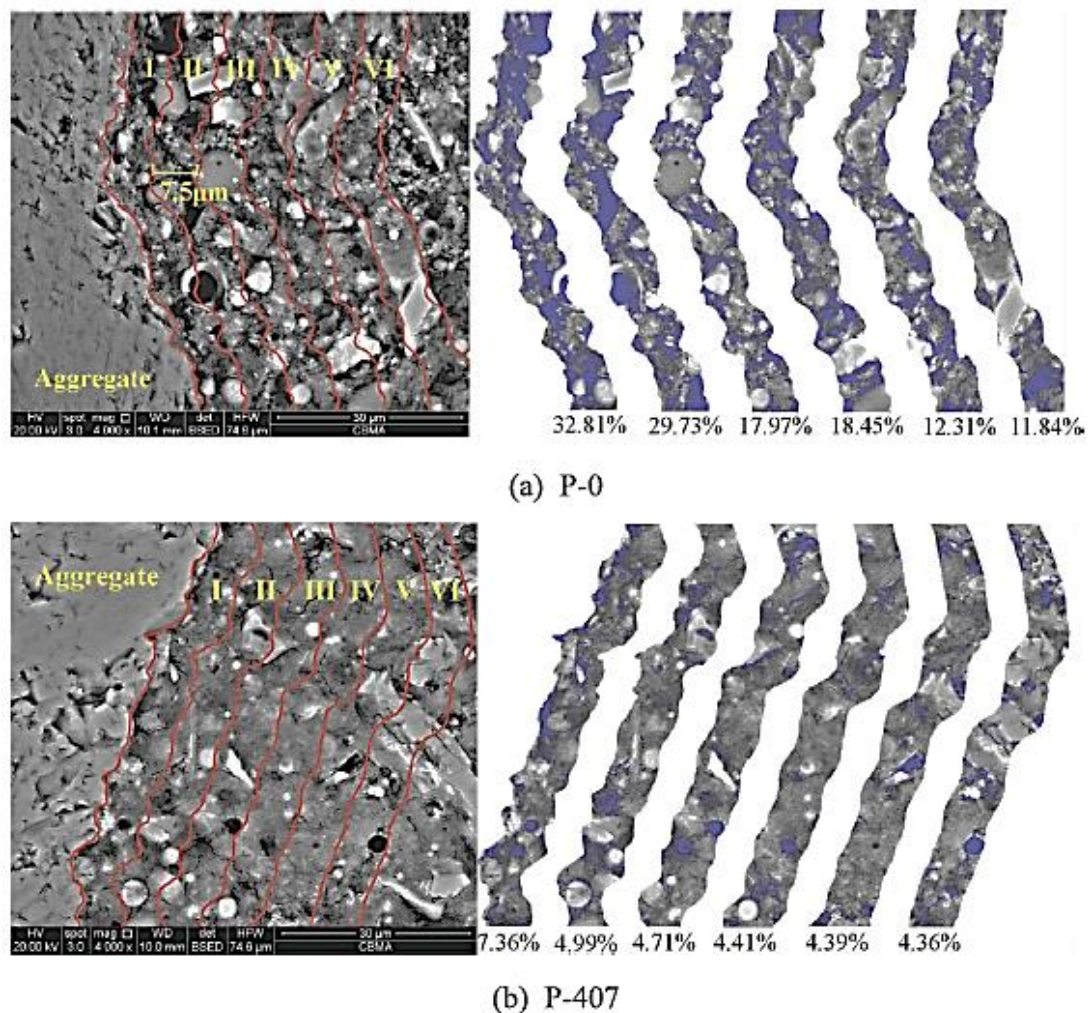


Figura 2.15 Imágenes de BSE para análisis de porosidad en la zona de transición con el agregado

Fuente: Y. Li et al. (2021) *Influence of ultra high rise pumping on microstructure and multiscale mechanical properties of concrete base on X-ray CT and 3D mesoscopic numerical simulation*

En la figura anterior se puede observar como el porcentaje de poros disminuye después de someter el concreto a un proceso de bombeo, como se había mencionado en capítulos anteriores, para la construcción de edificios de gran altura es necesario tener concretos con muy buenas prestaciones y propiedades mecánicas, adicionalmente se mencionó que la reducción de la porosidad en la pasta y específicamente en la zona de transición con los agregados es uno de los principales objetivos para obtener un mejor desempeño del concreto. Entonces se

puede decir que el bombeo como medio de transporte de concreto para edificaciones de gran altura tiene una influencia positiva, ya que se ha comprobado que se tienen propiedades mecánicas superiores a medida que aumenta la altura o el tiempo durante el cual se ve sometido a las presiones de bombeo. De hecho, en la misma investigación muestran el efecto, aunque puede ser limitado, si se dan mejores propiedades el concreto a medida que aumentó la altura de bombeo (Tabla 2.3).

Tabla 2.3 Propiedades mecánicas del concreto en estado endurecido en diferentes alturas de bombeo

Fuente: Y. Li et al. (2021) Influence of ultra high rise pumping on microstructure and multiscale mechanical properties of concrete base on X-ray CT and 3D mesoscopic numerical simulation

	P-0	P-200	P-243	P-301	P-326	P-351	P-407	P-500
E (Gpa)	39,9	41,2	41,7	42,2	42,5	42,6	43,3	44,3
f'c (MPa)	45,6	47,6	48	48,8	49,1	49,5	49,9	50,7

3. Sistemas de monitoreo en edificios de concreto

Con la construcción de edificios cada vez más altos en las principales ciudades del mundo, se han propuesto sistemas de monitoreo estructural que permiten la supervisión en tiempo real del rendimiento y evaluación de la integridad estructural, junto con la capacidad de servicio en fase de construcción y en fase terminado (Q. Li et al., 2017). Estos sistemas incluyen también la medición de las respuestas estructurales locales y la monitorización de los movimientos fuertes que permiten obtener la respuesta global de una edificación y el diagnóstico de posibles daños estructurales. Algunos sistemas también permiten detectar anomalías durante la construcción, por lo que se han instalado sistemas de monitoreo en más de 150 edificios en los Estados Unidos, aproximadamente 100 en Japón y casi 40 edificios en Taiwán a la fecha de la investigación desarrollada por Shan et al. (2020).

Se puede decir que durante la fase de diseño y en el proceso de construcción de un edificio se han llevado a cabo numerosos análisis numéricos y experimentos de laboratorio. Sin embargo, es un hecho que las cargas, el entorno y las respuestas reales de las estructuras de gran altura difieren de las de los modelos numéricos y de laboratorio, debido a las suposiciones adoptadas en el modelo numérico y al efecto del tamaño de las pruebas de laboratorio (Su et al., 2020). Por eso los propósitos con los que se ha implementado los sistemas de monitoreo de salud estructural en los edificios, principalmente en rascacielos, según los autores Shan et al. (2020). podrían dividirse en:

- Comprensión del comportamiento real de los edificios altos y flexibles sometidos a efectos ambientales, cargas operacionales y riesgos internos o externos.
- Validación de hipótesis de diseño como: Modelaciones en fases previas de elementos finitos, modelos estructurales a escala (ensayos en túneles de viento) y ensayos de laboratorio.
- Evaluación de daños estructurales, seguridad y fiabilidad en relación con el deterioro estructural, la influencia de la fluencia y cargas no contempladas en el diseño.
- Asistencia y gestión del mantenimiento estructural para preservar la vida útil de la edificación.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede decir que con la ayuda de los sistemas de monitoreo estructural se puede llegar a tener una mejor predicción del comportamiento de las estructuras con datos obtenidos en campo y obtener modelos computacionales más precisos para el desarrollo de futuras edificaciones. Sin embargo, un factor importante será la sensibilidad de cada uno de los instrumentos de medición que componen el sistema, las edificaciones de gran altura se caracterizan por tener un periodo largo de vibración y son relativamente flexibles comparadas con las estructuras tradicionales, se ha encontrado que los sensores que manejen un amplio rango de percepción serán más eficientes para la toma de datos (Shan et al., 2020).

Una vez terminada la construcción de un edificio, es posible tener en tiempo real las condiciones y el estado en el que están los elementos que componen el sistema estructural, si se quisiera hacer una analogía, sería similar al diagnóstico que un médico emite a un paciente con los resultados de un examen, se puede ser más específico y detectar problemas a tiempo en la salud de su paciente, por lo cual estos sistemas facilitarían el trabajo de rehabilitación en caso de requerirlo.

La aplicación de estos sistemas de monitoreo se hace mediante sensores ubicados en partes estratégicas en la estructura para la obtención eficiente de datos. Acorde con Shan et al. (2020) los sensores pueden dividirse en 3 grupos: 1.) sensores cinemáticos, encargados de medir las vibraciones dinámicas como la aceleración y el desplazamiento. 2.) sensores mecánicos, sirven para medir los esfuerzos estructurales, la inclinación y las deformaciones en condición estática. 3.) sensores ambientales, cuyo trabajo es registrar las cargas como el viento y acciones por temperatura.

A continuación, se muestran algunos de los sensores puestos en obra (Figura 3.1): a.) Estación meteorológica, b.) Anemómetro, c.) Sismógrafo, d.) Sensores de rejilla de fibra de Bragg empotrados (medición de esfuerzos internos), e.) Sensores montados en superficie (medición de esfuerzos internos) y f.) Sistema de posición global de sensores (Q. Li et al., 2017).



Figura 3.1 Sensores para el monitoreo de estructuras

Fuente: Q. Li et al. (2017) Monitoring and time-dependent analysis of vertical deformations of the tallest building in China

Para mostrar la influencia y el potencial de estos sistemas de monitoreo estructural, en este trabajo se hará énfasis en dos etapas específicas del desarrollo de un edificio de gran altura, la primera será la etapa de construcción y la segunda será la etapa de funcionamiento de una edificación:

3.1 Etapa de Construcción.

Generalmente estos edificios altos en sus sistemas estructurales están compuestos por columnas perimetrales y núcleos de columnas o muros de corte (Taranath, 2010). En las fases de construcción de estos sistemas estructurales, en la parte externa los encofrados pueden ser diferentes, casi que manuales, mientras que en la parte interna los encofrados pueden ser trepantes y da lugar a brechas de edad en la construcción de elementos de concreto de una misma planta, esto se traduce en deformaciones axiales diferenciales (Q. Li et al., 2017).

Existen modelos numéricos que permiten hacer una mejor correlación de las deformaciones de los sistemas estructurales, por ejemplo, Bazant y Wittmann propusieron en 1982 una modelación paso a paso del proceso de construcción completo donde se dividía en pasos temporales segmentados. El modelo resulta ser muy útil, pero demanda un tiempo de cálculo considerable y una complejidad informática enorme para edificios de gran altura (Taranath, 2010). Luego Kim y Shin en 2011 decidieron agrupar varios pisos en una unidad constructiva y se asume que esa unidad se construye a la vez, por lo que el proceso total de construcción de un edificio se compone de varias unidades constructivas de abajo hacia arriba. También sugirieron que para que exista una correlación correcta de los datos obtenidos y los resultados, un edificio debe tener al menos 15 fases constructivas (Q. Li et al., 2017). De hecho, en el Burj Khalifa, para tener un control de las

deformaciones axiales diferenciales dividieron la secuencia de construcción en 15 etapas consecutivas desde el cimiento hasta la parte superior (Aldred, 2010). Existe otro caso como el edificio Ping-An Finance Center en China donde se realizaron modelos con 25 etapas constructivas (Figura 3.2) (Q. Li et al., 2017).

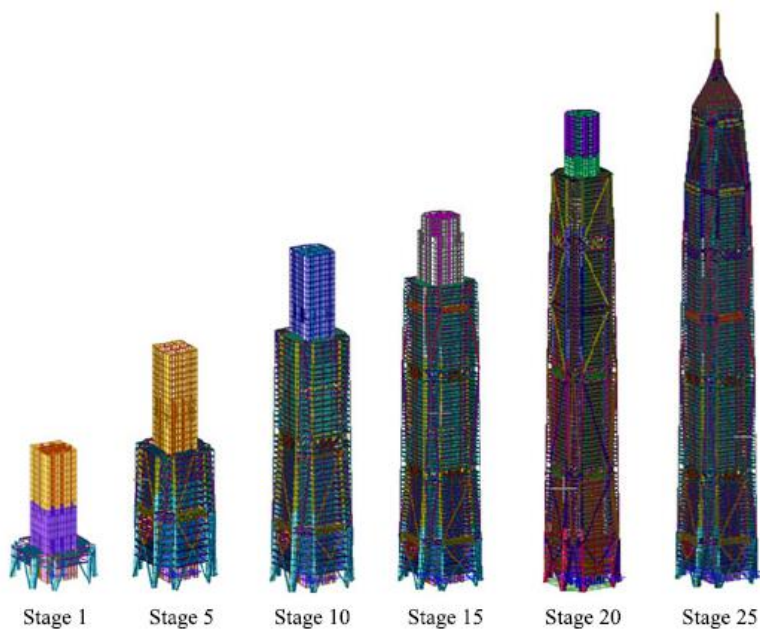


Figura 3.2 Etapas constructivas del Ping-An Finance Center

Fuente: Q. Li et al. (2017) Monitoring and time-dependent analysis of vertical deformations of the tallest building in China

Los ingenieros en el Ping-An Finance Center para poder monitorear las etapas de construcción y servicio de la edificación emplearon 548 sensores, de los cuales 120 fueron empleados en la cimentación y 428 en la superestructura (Q. Li et al., 2017). Los principales elementos de control en fase de construcción fueron los siguientes:

- Monitoreo del Clima: Se instaló una estación meteorológica en la parte superior de la torre y se elevaba a medida que la estructura se levantaba durante el proceso constructivo. Se recopilaban datos de la temperatura, humedad, precipitaciones y presión.
- Vigilancia de la Cargas Externas: Se pusieron sismógrafos en el sótano para vigilar las excitaciones sísmicas o de tráfico. Se instalaron anemómetros en la parte superior para monitorear las cargas de viento.

- Desplazamientos Horizontales: Se equipó un GPS en la cima de la torre para saber los desplazamientos de la super estructura.
- Inclinación: Se instalaron sensores de fibra óptica para controlar la inclinación del edificio durante la fase constructiva.
- Deformación Vertical: Se incrustaron sensores en el núcleo compuesto por los muros y en las columnas perimetrales para conocer sus deformaciones verticales.

Después de realizado el análisis computacional del proceso constructivo se determinó que, para compensar las deformaciones verticales de la superestructura durante el proceso de construcción, se aplicó la estrategia de reservar ciertas longitudes en los componentes estructurales verticales. Se esperaba que la longitud reservada de cada piso fuera equivalente a la correspondiente deformación vertical acumulada un año después de construido el edificio, donde se consideraron efectos como la contracción y fluencia junto con la secuencia de construcción. Se determinó que la deformación vertical sería mayor en el núcleo central que en las columnas perimetrales (Figura 3.3), por lo que se construyeron los elementos con longitudes reservadas, esto quiere decir que se calcularon las deformaciones considerando los efectos de la contracción, la fluencia y la aplicación de las cargas, y ese valor fue agregado a la longitud de los elementos para prever las deformaciones diferenciales en una misma planta.

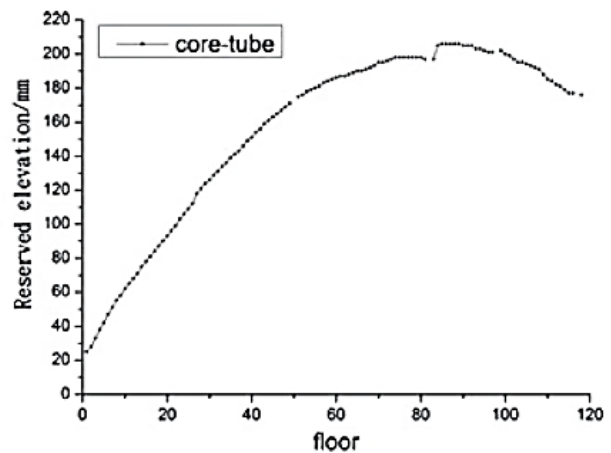
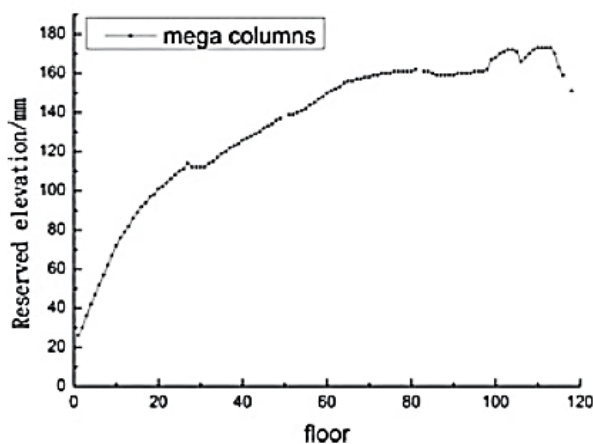


Figura 3.3 Longitudes reservadas para la deformación vertical Ping-An Finance Center
 Fuente: Q. Li et al. (2017) *Monitoring and time-dependent analysis of vertical deformations of the tallest building in China*

Una vez concluida la etapa de construcción se pudo determinar que los efectos de la contracción, la fluencia y la secuencia de construcción son significativos. Las deformaciones en el núcleo central, en las columnas perimetrales y sus diferencias pueden subestimarse en gran medida si no se tienen en cuenta y su relación con el tiempo (Figura 3.4).

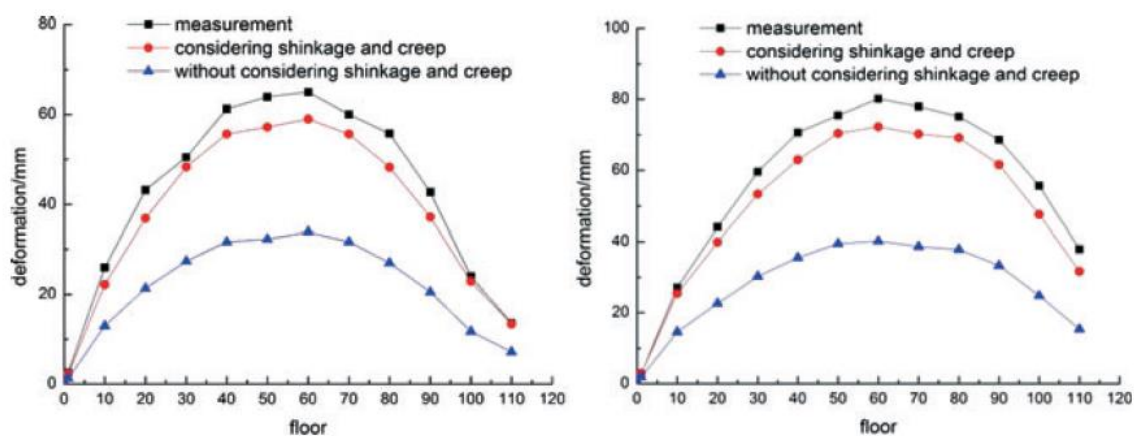


Figura 3.4 Comparación de la deformación real y la deformación estimada
 Fuente: Q. Li et al. (2017) *Monitoring and time-dependent analysis of vertical deformations of the tallest building in China*

Es de resaltar que aun teniendo en cuenta los efectos de la contracción y la fluencia en el concreto, no se logra estimar completamente la deformación residual de los elementos y su estructura. También se puede decir que el comportamiento de las deformaciones crece a medida que va aumentando el número de pisos en una edificación, pero se estabiliza cuando se empieza a llegar a los pisos superiores, esto indica que la deformación se concentra en los primeros pisos y en los pisos intermedios. Por lo cual los sistemas de monitoreo son una herramienta poderosa para validar todos los conceptos y las estimaciones que se hacen en una edificación de gran altura, tanto en su fase de diseño como también durante su etapa constructiva.

3.2 Etapa de Funcionamiento.

Una vez ya entrado en uso el edificio, empieza la etapa de funcionamiento donde los datos iniciales obtenidos con el sistema de monitoreo tras la construcción del edificio resultan ser como un “certificado de nacimiento de la estructura” lo cual es de gran interés para la gestión durante todo el periodo de vida útil de la edificación, ya que de esta manera es posible identificar el deterioro estructural a medida que avance su uso (Shan et al., 2020).

Los sistemas de monitoreo estructural en la etapa de funcionamiento tienen como objetivo medir el entorno de carga y los mecanismos de respuesta ante fuertes vientos y sismos (Su et al., 2020). Teniendo en cuenta que la fase de construcción de una estructura compleja de gran altura puede ser más crítica que la fase de servicio, se puede decir que son condiciones y parámetros totalmente diferentes que hacen que no exista relación entre una y otra. Aunque se hace énfasis en que las imperfecciones que se den en la fase constructiva generarán esfuerzos adicionales y deformaciones permanentes que deberán tenerse en la fase de servicio para evaluar la integridad estructural en periodos futuros (Xia et al., 2011).

Los rascacielos modernos con alturas cada vez mayores tienen propiedades dinámicas como amortiguación y frecuencias naturales más bajas, son más sensibles a las excitaciones provocadas por el viento (Su et al., 2020). Por lo que se han empezado a implementar algunas nuevas metodologías para utilizar eficazmente los datos poco precisos y garantizar una precisión de medición adecuada. Por ejemplo, se ha propuesto un algoritmo que con el seguimiento en tiempo real y la ubicación de los sensores, puede definirse los alcances de las degradaciones bruscas de la rigidez de la estructura mediante el uso de las respuestas de aceleración medida por el sensor (Lei et al., 2016). Otro caso es el del edificio Ping-An Finance Center, donde pudieron estimarse las frecuencias naturales y los coeficientes de amortiguación utilizando un método de análisis que aumentaba la magnitud y potenciaba los datos obtenidos de los sensores, con el

fin de poder analizar frecuencias más grandes donde se evidenciara el decremento oscilatorio en el tiempo (Y. He et al., 2017). También hay que resaltar que en el caso del Burj Khalifa donde el sistema de monitoreo estructural ayudó a comprender el comportamiento del sistema estructural y de cimentación, el programa tuvo como fin vigilar los esfuerzos de los elementos estructurales verticales, el asentamiento de los cimientos, el acortamiento vertical de los elementos debido a las cargas, efectos de contracción y la fluencia del concreto después de culminada la construcción, adicionalmente también permitió estudiar los desplazamientos laterales de la edificación (Aldred, 2010; Su et al., 2020). Su et al. (2020) informaron que con la ayuda del monitoreo del movimiento lateral de la torre se garantizó la verticalidad de la estructura durante la construcción y se evitaron imperfecciones.

Otro de los objetivos del sistema de monitoreo estructural de una estructura de gran altura es mejorar la comprensión del comportamiento y el potencial de los daños debido a un evento sísmico. En caso de eventos donde ocurran daños al sistema estructural, estos sistemas ayudan a la evaluación posterior al evento en tiempo real con un diagnóstico y cuantificación de los daños de manera rápida, esto puede explicarse a través del concepto de la resiliencia sísmica (Figura 3.5), que se ha propuesto para reducir los desastres y la gestión del sistema estructural, haciendo énfasis en la recuperación acelerada de la funcionalidad y el rendimiento de las estructuras en general (Shan et al., 2020).

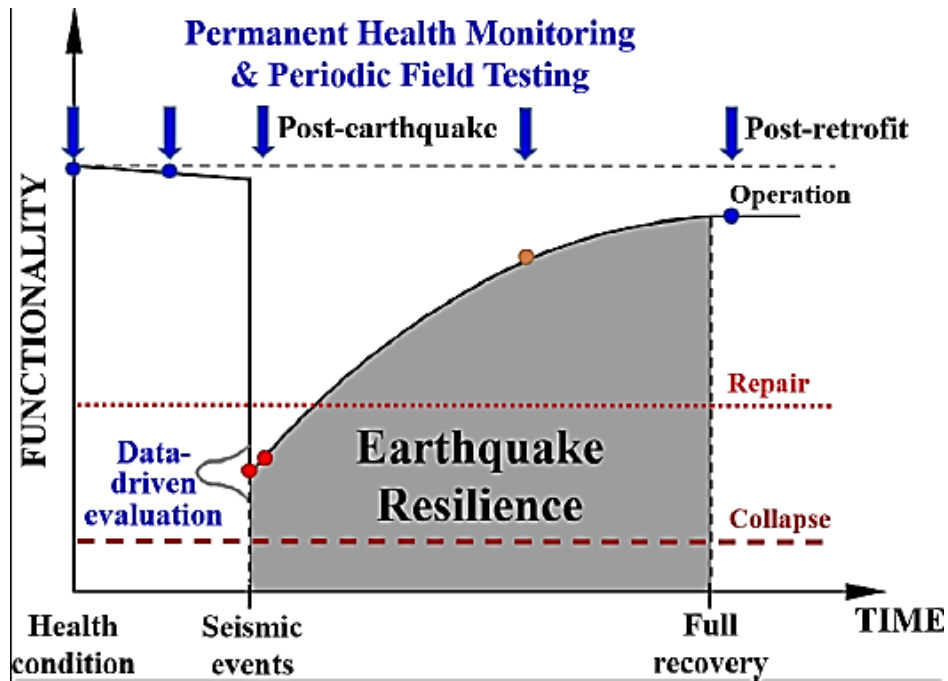


Figura 3.5 Funcionalidad en el tiempo con un sistema de monitoreo estructural

Fuente: Shan et al. (2020) *Health monitoring and field-testing on high-rise buildings: a review*

Según lo anterior (Figura 3.5), la funcionalidad de un edificio puede evaluarse de manera cuantitativa con los sistemas de monitoreo estructural. En primer lugar, los datos de registro con la culminación de la fase constructiva serán los datos de inicio de la curva de funcionalidad. Después, esa funcionalidad de la estructura se verá reducida de manera progresiva por el uso, factores como la fluencia y la contracción en el concreto también aportarán en ese decremento. En caso de presentarse un evento sísmico que cause daños fuertes, la funcionalidad de la edificación se reducirá y se podrá evaluar cualitativamente con la ayuda del sistema de monitoreo estructural. Enseguida se procederá con la reparación y rehabilitación de la edificación de manera más rápida y ágil, ya que con la ayuda del sistema de monitoreo será mucho más fácil identificar los daños y vigilar de manera constante que no existan sobreesfuerzos en los elementos del sistema estructural en el proceso. Posteriormente, se dará lugar a la restauración de operación de la edificación con la certeza que la edificación está totalmente restaurada y fueron plenamente reparados todos los daños en el evento sísmico.

En la actualidad, en los Estados Unidos se han instalado varios sistemas de monitoreo estructural en edificios ubicados en zonas sísmicas para registrar los movimientos del suelo y las respuestas sísmicas con el fin de evaluar las hipótesis y procedimientos de diseño sísmico (Kovacevic & Dzidic, 2018). En California (Estados Unidos) específicamente, el programa de instrumentación de movimientos fuertes de California ha instalado estaciones de respuesta del terreno en aproximadamente 160 edificios, con el fin de proporcionar información sobre los movimientos del terreno y mejorar el diseño estructural basándose en la respuesta de la salud estructural sometida a los diferentes movimientos del terreno (Su et al., 2020).

Teniendo en cuenta la importancia y relevancia de estos sistemas de monitoreo, se abre un campo completamente nuevo e importante en la rehabilitación y restauración de estructuras; ya que este tipo de sistemas son capaces de proporcionar la suficiente información para que el ingeniero pueda llevar a cabo un trabajo más acertado y correcto, durante todas las etapas de la edificación, desde la construcción de los cimientos hasta el final de la vida útil de las edificaciones. En la actualidad, en Colombia no se tiene mucho conocimiento de este tipo de sistemas, el objeto de la incorporación de los sistemas de monitoreo estructural no solamente es aplicable a edificios de gran altura, por el contrario, es una tecnología que invita a llevarse a la mayoría de las edificaciones diferentes a los rascacielos, ya que es una herramienta poderosa para supervisar aspectos como: la construcción, la entrada en funcionamiento, el deterioro de la estructura, la gestión del mantenimiento y reparación de los elementos estructurales. Aunque debe tenerse en cuenta su impacto económico y contextualizarlo en el medio local (Colombia) parece ser poco probable la implementación de estas herramientas más allá de los casos especiales que lo sustenten económicamente.

Para concluir, la construcción en Colombia de este tipo de edificaciones es una realidad, ya se cuentan con casos como los de las torres Atrio (Proyectos y Diseños

SAS, 2019) o el BD Bacatá (Proyectos y Diseños SAS, 2014), que buscan ser el faro en los desarrollos tecnológicos en la ingeniería colombiana siendo la misma razón de este documento. Se espera que este texto sirva y sea de interés para profundizar en cada uno de los aspectos mencionados, con el fin de seguir desarrollando el concreto como material estructural en el medio local, con el estudio de las adiciones, de los aditivos, de las fibras y de todos los factores que involucra un concreto para uso de edificaciones de gran altura. Lo que prueba que el concreto a pesar de haber sido desarrollado hace más de 100 años, sigue evolucionando y moldeándose a las necesidades que surgen en sus aplicaciones.

Conclusiones

- 1.) Se identificó que el estudio de los componentes del concreto tiene un rol importante para tener en cuenta en la construcción de edificios rascacielos, desde su origen hasta su proporción en la mezcla. Igualmente, el estudio de estos componentes no debe solo tenerse en cuenta para la obtención de propiedades en estado endurecido, sino que también deberán tenerse en cuenta para el transporte y el encofrado en obra.
- 2.) El uso de adiciones, aditivos o fibras de refuerzo también son factores importantes en el diseño, ya que la adición de estos materiales puede aumentar aspectos como la resistencia, la ductilidad, la durabilidad y la manejabilidad del concreto para la construcción de edificios de gran envergadura.
- 3.) Con base a la literatura, se identificaron algunas ecuaciones que buscan establecer una relación entre el módulo elástico y la resistencia a la compresión en concretos de alto desempeño y de alto desempeño reforzados con fibras, cuyo fin es brindar una mejor predicción del comportamiento de los Rascacielos.
- 4.) Se constató que el estudio de la reología del concreto y la implementación de herramientas como el tribómetro que permite evaluar las propiedades del concreto en estado fresco, lo cual es importante para brindar un mejor desempeño en el proceso de transporte de concreto a través del bombeo.
- 5.) A partir de la literatura, se evidenció que hay una influencia del proceso de bombeo en las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto, y que esos cambios son lo suficientemente significativos para tenerlos en cuenta en el diseño de la estructura.
- 6.) En cuanto a la durabilidad en las edificaciones de gran envergadura, se corroboró que las propiedades más importantes influyen en el concreto para tener en cuenta es la fluencia o creep y la contracción. Además, permiten reducir estos efectos sin

que ocasionen problemas en las edificaciones, de igual manera las herramientas como los sistemas de monitoreo estructural que facilitan la supervisión de los elementos estructurales durante su construcción y en la etapa de funcionamiento.

- 7.) Los ensayos de predicción de la fluencia y la contracción del concreto tienen un rol importante en la correcta predicción de las deformaciones de los elementos estructurales, lo cual es importante para la planificación constructiva de los edificios de gran envergadura.
- 8.) No se encontraron requisitos constructivos o de diseño de este tipo de edificaciones en alguna normativa, pero si se encontró que en la implementación de concretos de alto desempeño para la construcción edificios de gran envergadura, se deben tener en cuenta las etapas de construcción en el diseño con una correcta correlación y predicción de las deformaciones de los elementos estructurales que pueden ser debido a efectos como la fluencia, contracción o por aplicación de la carga.
- 9.) Con base a la literatura, se evidenció que la implementación de los sistemas de monitoreo estructural es una herramienta útil para supervisar la etapa constructiva de los rascacielos, para monitorear la etapa de funcionamiento y también para corroborar las hipótesis de diseño sobre este tipo de edificaciones.

Recomendaciones

1. Con los resultados de la búsqueda bibliográfica se recomienda hacer un análisis en la realidad colombiana e identificar si se están implementando algunos de los desarrollos descritos en este documento. Aunque la construcción de rascacielos en el país aún es muy limitada por lo que no hay casos de estudio suficientes, siempre será hacer comparativas entre diferentes alternativas en un mismo medio económico y social.
2. En el contexto local, no son muy frecuentes las investigaciones académicas que busquen mejorar el proceso de bombeo en las edificaciones, por lo que se invita a realizar investigaciones que tengan como fin analizar y de pronto dar recomendaciones de las buenas prácticas en los procesos de suministro de concreto en las obras colombianas, teniendo en cuenta que son aspectos relevantes en las etapas de construcción de edificios.
3. Dados los múltiples sistemas de monitoreo estructural que se están implementando en las edificaciones alrededor del mundo y que son herramientas que proporcionan información suficiente para supervisar no solo la construcción sino también toda la vida útil de una edificación, nacen nuevas oportunidades de investigación para correlacionar las hipótesis de diseño y nuevas técnicas de recolección de datos en la rehabilitación estructural.
4. Uno de los objetivos de este documento era mostrar algunas características de las edificaciones, en la literatura no se pudo encontrar suficiente información específica sobre el concreto usado en edificios de gran altura, específicamente en temas de deformaciones ocasionadas por la contracción, la fluencia y reología de los materiales implementados. Por lo que, se sugiere profundizar en esta línea de investigación mostrando y comparando los diferentes números a los que se han

enfrentado en diferentes partes del mundo, con el fin de dar un orden de magnitud a los ingenieros de todos los aspectos tratados en este documento a la hora de construir este tipo de estructuras.

BIBLIOGRAFIA

- Agustin, R., Dario, F., & Irassar, D. (2018). *Incidencia de adiciones minerales frente al ataque por sulfatos. 1*. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/10926>
- Aldred, J. (2010). Burj Khalifa - A new high for high- Performance concretej. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering*, 163(2), 66–73. <https://doi.org/10.1680/cien.2010.163.2.66>
- Ali, M. M., & Moon, K. S. (2007). Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. *Architectural Science Review*, 50(3), 205–223. <https://doi.org/10.3763/asre.2007.5027>
- Alsaman, A., Dang, C. N., Prinz, G. S., & Hale, W. M. (2017). Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 153, 918–928. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.158>
- ASTM C125-21. (2021). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. *ASTM International, West Conshohocken, PA, C*, 1–4. <https://doi.org/10.1520/C0125-10a.2>
- ASTM C494/C494M-13a. (2013). Historical Standart: Especificacion Normalizada de Aditivos Quimicos para Concreto. *ASTM International, 04*, 1–9.
- ASTM G40-21. (2021). ASTM G40-21, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*, www.astm.org.
- Auroy, M., Poyet, S., le Bescop, P., & Torrenti, J. M. (2013). Impact of carbonation on the durability of cementitious materials: Water transport properties characterization. *EPJ Web of Conferences*, 56, 1–10. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20135601008>
- Benavides, R. J. (2014). *Concreto de Alto Desempeño*.
- Bier, T. A. (2015). Influence of Pumping on Fresh Concrete Properties for SCC. *ACI Spring Convention, Web Session*.
- Brand, C. (2020, February 24). ¿Por qué compramos viviendas cada vez más pequeñas? *RCN Radio*. <https://www.rcnradio.com/recomendado-del-editor/por-que-compramos-viviendas-cada-vez-mas-pequenas>

- Choi, M., Ferraris, C. F., Martys, N. S., Bui, V. K., Hamilton, H. R. T., & Lootens, D. (2015). Research Needs to Advance Concrete Pumping Technology. *NIST Technical Note 1866*, 1–31. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.1866.pdf>
- Choi, M. S., Park, S. B., & Kang, S. T. (2015). Effect of the mineral admixtures on pipe flow of pumped concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13(11), 489–499. <https://doi.org/10.3151/jact.13.489>
- Chrzanowski, M., Odenbreit, C., Obiala, R., Bogdan, T., & Degée, H. (2021). Effective bending stiffness of steel-concrete composite columns with multiple encased steel profiles. *Journal of Constructional Steel Research*, 181, 106607. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106607>
- Courard, L., Zhao, Z., & Michel, F. (2021). Influence of hydrophobic product nature and concentration on carbonation resistance of cultural heritage concrete buildings. *Cement and Concrete Composites*, 115(October 2020), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103860>
- Cu, Y. T. H., Tran, M. v., Ho, C. H., & Nguyen, P. H. (2020). Relationship between workability and rheological parameters of self-compacting concrete used for vertical pump up to supertall buildings. In *Journal of Building Engineering* (Vol. 32). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101786>
- Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings, Edict of G (1992).
- Feys, D., de Schutter, G., & Verhoeven, R. (2013). Parameters influencing pressure during pumping of self-compacting concrete. *Materials and Structures*, 46(4), 533–555. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9912-4>
- Feys, D., Khayat, K. H., & Khatib, R. (2016). How do concrete rheology, tribology, flow rate and pipe radius influence pumping pressure? *Cement and Concrete Composites*, 66, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.002>
- Ghafari, E., Ghahari, S. A., Costa, H., Júlio, E., Portugal, A., & Durães, L. (2016). Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 43–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.123>
- Graybeal, B. A. (2012). Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, 104(2). <https://doi.org/10.14359/18577>
- He, Y., Li, Q., Zhu, H., Han, X., He, Y., & Li, X. (2017). Monitoring of structural modal parameters and dynamic responses of a 600m-high skyscraper during a typhoon.

- The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27.
<https://doi.org/10.1002/tal.1456>
- He, Z. hai, Li, L. yuan, & Du, S. gui. (2017). Creep analysis of concrete containing rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*, 80, 190–199.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.03.014>
- Jang, K. P., & Choi, M. S. (2019). How affect the pipe length of pumping circuit on concrete pumping. *Construction and Building Materials*, 208, 758–766.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.023>
- Jeong, J. H., Jang, K. P., Park, C. K., Lee, S. H., & Kwon, S. H. (2016). Effect of admixtures on pumpability for high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, 113(3), 323–333. <https://doi.org/10.14359/5168864>
- Jiang, H. J., Lu, X. L., Liu, X. J., & He, L. S. (2014). Performance-Based Seismic Design Principles and Structural Analysis of Shanghai Tower. *Advances in Structural Engineering*, 17(4), 513–527. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.4.513>
- Jung, C., Awad, R., & Awad, J. (2022). A study of optimal design process for complex-shaped skyscrapers' structural systems in United Arab Emirates. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5), 101683.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101683>
- Kang, S.-H., Hong, S.-G., & Moon, J. (2018). Shrinkage characteristics of heat-treated ultra-high performance concrete and its mitigation using superabsorbent polymer based internal curing method. *Cement and Concrete Composites*, 89, 130–138.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.003>
- Kaplan, D. (2001). *Pumping of concretes*. Ph-D dissertation (in French), Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.
- Kovacevic, I., & Dzidic, S. (2018). HIGH-STRENGTH CONCRETE (HSC) -MATERIAL FOR HIGH-RISE BUILDINGS. *12th Scientific/Research Symposium with International Participation "METALLIC AND NONMETALLIC MATERIALS" B&H, 19th-20th April 2018, May*.
- Kwon, S. H., Jang, K. P., Kim, J. H., & Shah, S. P. (2016). State of the Art on Prediction of Concrete Pumping. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(3), 75–85. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0150-y>
- Lai, X., He, Z., & Wu, Y. (2021). Elastic inter-story drift seismic demand estimate of super high-rise buildings using coupled flexural-shear model with mass and stiffness non-uniformities. *Engineering Structures*, 226(June 2020), 111378.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111378>

- Lei, Y., Zhou, H., & Lai, Z. (2016). A Computationally Efficient Algorithm for Real-Time Tracking the Abrupt Stiffness Degradations of Structural Elements: A computationally efficient algorithm. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31, 465–480. <https://doi.org/10.1111/mice.12217>
- Li, Q., He, Y., Wang, H., Zhou, K., & Yan, B. (2017). Monitoring and time-dependent analysis of vertical deformations of the tallest building in China. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(7). <https://doi.org/10.1002/stc.1936>
- Li, X., Zhang, J., & Cao, W. (2020). Hysteretic behavior of high-strength concrete shear walls with high-strength steel bars: Experimental study and modelling. *Engineering Structures*, 214(April), 110600. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110600>
- Li, Y., Hao, J., Wang, Z., Guan, Z., Liu, J., & Jin, C. (2021). Influence of ultra-high-rise pumping on microstructure and multi-scale mechanical properties of concrete based on X-ray CT and 3D mesoscopic numerical simulation. *Construction and Building Materials*, 267(xxxx), 120980. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120980>
- Liu, K., Yu, R., Shui, Z., Li, X., Guo, C., Yu, B., & Wu, S. (2019). Optimization of autogenous shrinkage and microstructure for Ultra-High Performance Concrete (UHPC) based on appropriate application of porous pumice. *Construction and Building Materials*, 214, 369–381. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.089>
- Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., Yilmaz, G., Ariöz, Ö., & Ramyar, K. (2013). Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1020–1025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.105>
- Meng, W., & Khayat, K. (2017). Effects of saturated lightweight sand content on key characteristics of ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 101, 46–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.018>
- Mészöly, T., & Randl, N. (2018). Shear behavior of fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams. *Engineering Structures*, 168(October 2017), 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.075>
- Nehdi, M. L. (2013). Only tall things cast shadows: Opportunities, challenges and research needs of self-consolidating concrete in super-tall buildings. *Construction and Building Materials*, 48, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.051>
- P. Kumar Mehta, Ph. D., & Paulo J. M. Monteiro, Ph. D. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Fourth Edition* (4th ed.). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071797870>

- Park, H. S., & Oh, B. K. (2018). Real-time structural health monitoring of a supertall building under construction based on visual modal identification strategy. *Automation in Construction*, 85, 273–289.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.025>
- Peronto, J., Sinn, R., & Huizinga, M. (2017). Vertical Shortening Considerations in the 1 km Tall Jeddah Tower. *International Journal of High-Rise Buildings*, 6(1), 21–31.
<https://doi.org/10.21022/ijhrb.2017.6.1.21>
- Piasta, W., Góra, J., & Budzyński, W. (2017). Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and of ordinary and high performance concretes. *Construction and Building Materials*, 153, 728–739. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.167>
- Proyectos y Diseños SAS. (2014). *BD Centro Bacatá*. <https://pyd.com.co/project/bd-bacata/>
- Proyectos y Diseños SAS. (2019). *ATRIO*. <https://pyd.com.co/project/atrio/>
- Secieru, E., Cotardo, D., Mechtcherine, V., Lohaus, L., Schröfl, C., & Begemann, C. (2018). Changes in concrete properties during pumping and formation of lubricating material under pressure. *Cement and Concrete Research*, 108(October 2017), 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.018>
- Shafieifar, M., Farzad, M., & Azizinamini, A. (2018). A comparison of existing analytical methods to predict the flexural capacity of Ultra High Performance Concrete (UHPC) beams. *Construction and Building Materials*, 172, 10–18.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.229>
- Shah, S. P., & Konsta-Gdoutos, M. S. (2017). Uncoupling Modulus of Elasticity and Strength. *Concrete International*, 39(11), 37–42.
<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/51701246>
- Shan, J., Zhang, H., Shi, W., & Lu, X. (2020). Health monitoring and field-testing of high-rise buildings: A review. *Structural Concrete*, 21(4), 1272–1285.
<https://doi.org/10.1002/suco.201900454>
- Sinn, R. C. (2018). A Tall Building Engineer's Perspective on Specifying Modulus of Elasticity (MOE). In *Web-Sesion/ ACI Spring 2018 Convention*.
- Su, J., Xia, Y., & Weng, S. (2020). Review on field monitoring of high-rise structures. In *Structural Control and Health Monitoring* (Vol. 27, Issue 12).
<https://doi.org/10.1002/stc.2629>
- Taranath, B. S. (2010). *Reinforced Concrete Design of Tall Buildings*. Taylor and Francis Group, LLC.

- Tianyuan, F. (2017). *Development of High Modulus Concrete for Tall Buildings* (Issue August; Hong Kong).
- Torres, A., Aguayo, F., Allena, S., & Ellis, M. (2020). The Effect of Various Superplasticizers on Ultra High Strength Concrete. In *RILEM Bookseries* (Vol. 22). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22034-1_19
- Turker, K., & Torun, I. B. (2020). Flexural performance of highly reinforced composite beams with ultra-high performance fiber reinforced concrete layer. *Engineering Structures*, 219(April), 110722. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110722>
- Usta, M., Alhmoody, A., Carrillo, J., Cladera, A., Laughery, L., Pujol, S., & Puranam, A. (2019). Shear Strength of Structural Walls Subjected to Load Cycles. *Concrete International*, 41(5).
- Wang, D., Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Huang, Z., & Fang, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*, 96, 368–377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095>
- Wille, K., Tue, N. V., & Parra-Montesinos, G. J. (2014). Fiber distribution and orientation in UHP-FRC beams and their effect on backward analysis. *Materials and Structures*, 47(11), 1825–1838. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0153-y>
- Wu, L., Farzadnia, N., Shi, C., Zhang, Z., & Wang, H. (2017). Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 149, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.064>
- Xia, Y., Ni, Y.-Q., Zhang, P., Liao, W., & Ko, J. (2011). Stress Development of a Supertall Structure during Construction: Field Monitoring and Numerical Analysis. *Comp.-Aided Civil and Infrastruct. Engineering*, 26, 542–559. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00714.x>
- Xu, M., Hallinan, B., & Wille, K. (2016). Effect of loading rates on pullout behavior of high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 70, 98–109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.03.014>
- Ye, H., & Radlińska, A. (2016). A Review and Comparative Study of Existing Shrinkage Prediction Models for Portland and Non-Portland Cementitious Materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2418219. <https://doi.org/10.1155/2016/2418219>
- Zain, M. F. M., Islam, M. N., Mahmud, F., & Jamil, M. (2011). Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material. *Construction and*

- Building Materials*, 25(2), 798–805.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.003>
- Zhang, X., Liu, Z., & Wang, F. (2019). Autogenous shrinkage behavior of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 226, 459–468.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.177>
- Zhao, J., Cai, G., Si Larbi, A., Zhang, Y., Dun, H., Degée, H., & Vandoren, B. (2018). Hysteretic behaviour of steel fibre RC coupled shear walls under cyclic loads: Experimental study and modelling. *Engineering Structures*, 156(December 2017), 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.006>
- Zhao, X., & Wang, L. (2020). Vertical shortening prediction for super-tall buildings considering enclosure effect and coupling effect. In *Structural Design of Tall and Special Buildings* (Vol. 29, Issue 2). <https://doi.org/10.1002/tal.1685>