

1. Título

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

Caro González, Johan Andrés – Torres Castellanos, Nancy Ph.D

2. 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.

3. 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). 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.

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. 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). 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).

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.

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.

4. 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, 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, que van hasta los 60 MPa utilizando o no adiciones que remplacen 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), alcanza resistencias a compresión hasta de 90 MPa.

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 4.1 Compendio de edificios de gran altura

EDIFICIO	Altura (m)	Plantas	Año	E (Gpa)	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 silice (Relacion a/c=0,21)	-	Sistema Estructural de Nucleo 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

4.1 Modulo elástico y resistencia a la compresión

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 (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 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).

4.1.1 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.

Por ejemplo, para la construcción del Burj Khalifa, el concreto para ser bombeado debía diseñarse con un contenido reducido de agregados gruesos con el propósito de evitar taponamientos en la tubería, lo que no favorece la obtención de un mayor módulo elástico (Bester, 2013). Por lo que se tendría que usar agregados más resistentes y rígidos, aunque el uso de estos agregados aumenta el desgaste de la tubería. 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. 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 1.1. 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.

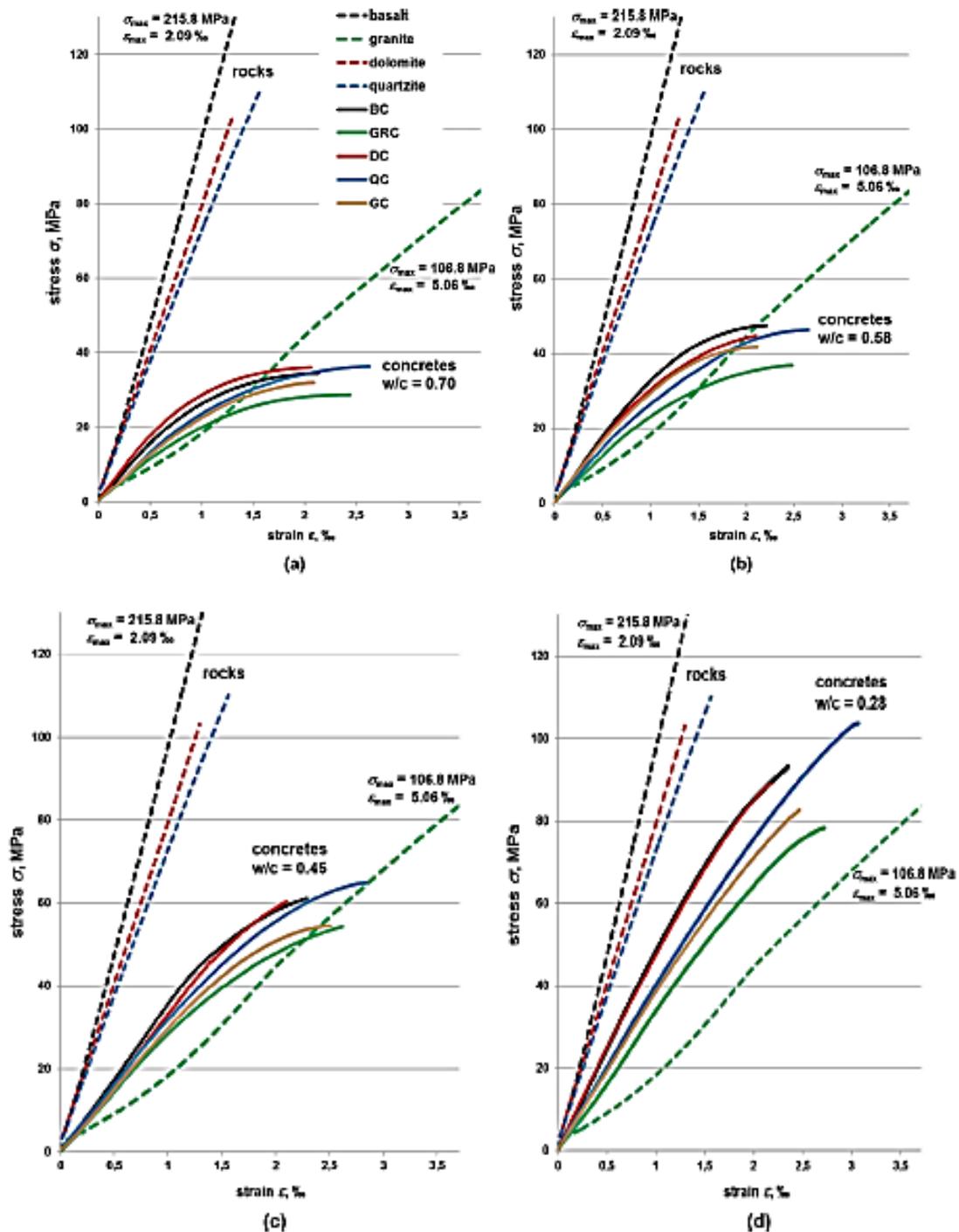


Figura 1.1 Esfuerzo a compresión vs. Deformación de Rocas y Concretos con Agregados derivados

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

4.1.2 Adiciones y aditivos

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), 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. 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 (Torres et al., 2020). 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.

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 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 (Mardani-Aghabaglou et al., 2013). 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% (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. 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 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 1.2) 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.

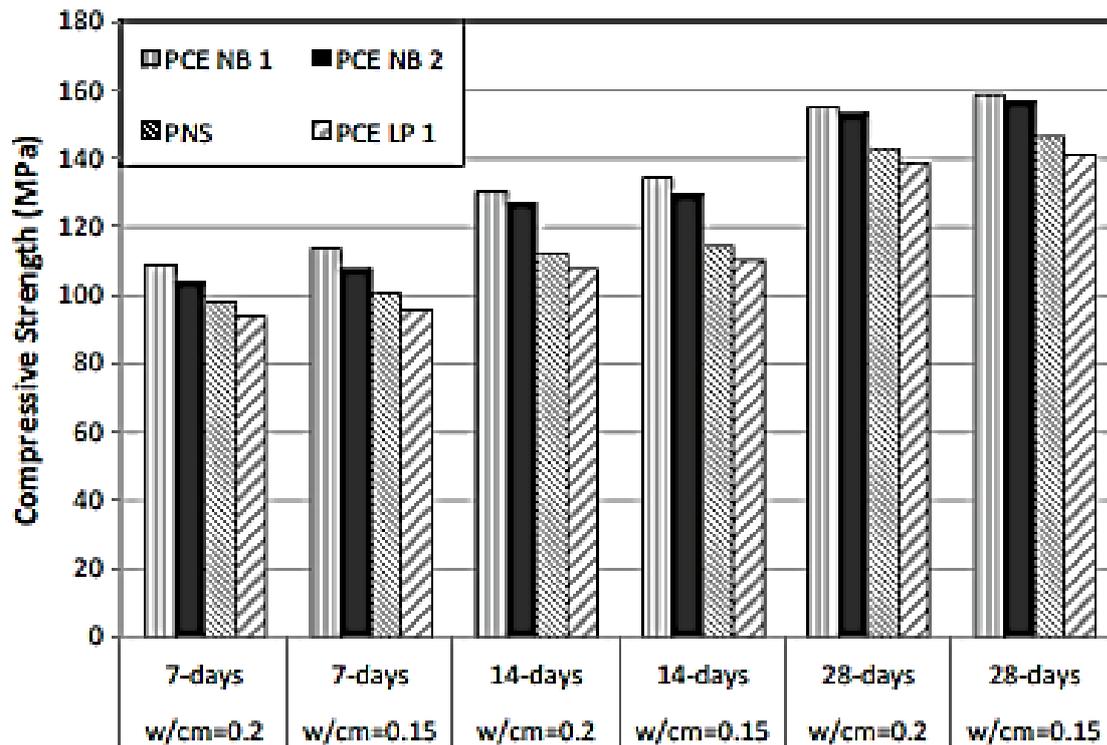


Figura 1.2 Resistencia a compresión usando diferentes superplastificantes.

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

4.1.3 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, estos pueden distribuirse en la mezcla de concreto fresco. 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 cuando estos se ven sometidos a esfuerzos límites de trabajo. 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 proporciona 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).

Existen otro tipo de adición como los nanotubos que, a pesar de no tener las dimensiones de las fibras de refuerzo generalmente usadas (Figura 1.3), 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.

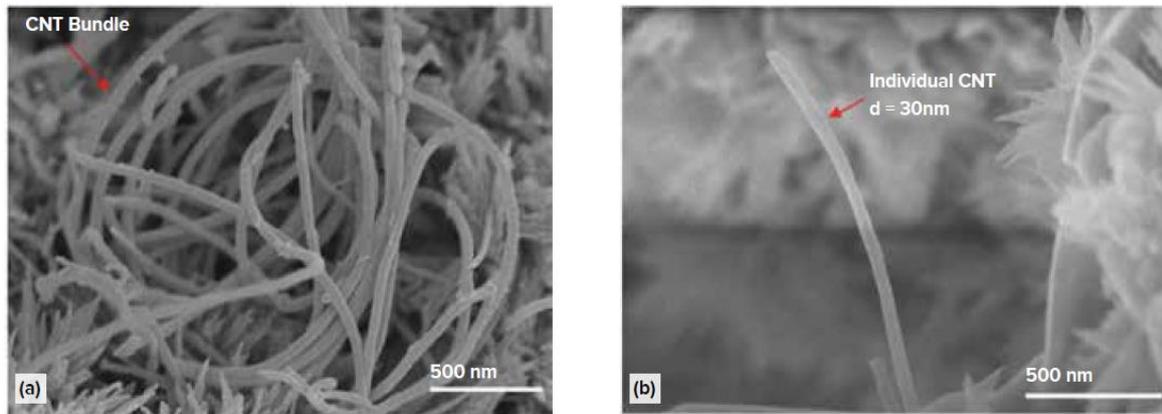


Figura 1.3 Imagen de SEM de los nanotubos de carbono

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

4.1.4 Relación entre la resistencia a la compresión y modulo 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 (Alsalmán 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. 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.

Por esa razón, el ACI-363 propuso una nueva ecuación para estimar el módulo elástico en los concretos de alta resistencia (Alsalmán 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 y los concretos de ultras altas prestaciones reforzados con fibras, 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. A continuación, se muestra un resumen de las ecuaciones más relevantes para la estimación del módulo elástico tomado del estudio de Alsalmán et al (2017).

Tabla 1.2 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	Ecuacion (E en MPa)	Nota
ACI comité 318-14 (2014)	$E_c = 4730\sqrt{f'_c}$	Concreto Normal de resistencias inferiores a $f'_c \leq 41,4$ MPa y peso $1440 \leq w \leq 2480$ kg/m ³ , f'_c en MPa
ACI Comité 363-10 (2010)	$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900$	Concreto de alta resistencia $f'_c \geq 83$ 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 $f'_c < 80$ MPa, α_B es una variable según el tipo de agregado, f_{cm} es la resistencia a la compresion de cilindros de 150x300mm
	$E_c = 21500\alpha_B \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{\frac{1}{3}}$	Aplica para concretos de $f'_c < 80$ MPa, α_B es una variable según el tipo de agregado, f_{cm} es la resistencia a la compresion de cilindros de 150x300m, a los 28 días.
Norma Noruega NS 3473 (1992)	$E_c = 9500(f'_c)^{0,3}$	Concretos de resistencia $25 \leq f'_c \leq 85$ 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, $150 \leq f'_c \leq 180$ MPa, f'_c en MPa
	$E_c = 21902(f'_c/10)^{1/3}$	Concretos UHPC con agregados gruesos de basalto, $150 \leq f'_c \leq 180$ MPa, f'_c en MPa
Asociacion Francesa de Ingenieria Civil (AFGC) (2002)	$E_c = 9500(f'_c)^{1/3}$	Concretos UHPC curado con calor, $f'_c \geq 140$ MPa, f'_c en MPa
S. Sritharan, B.J. Bristow, V.H. Perry (2003)	$E_c = 4150\sqrt{f'_c}$	Concretos UHPC con $f'_c = 177$ MPa (En promedio), f'_c en MPa
J. Ma, H. Schneider (2002)	$E_c = 11800(f'_c)^{1/3,14}$	Concretos UHPC con $f'_c \geq 140$ MPa, f'_c en MPa
G.A. Kollmorgen (2004)	$E_c = 16365 \ln(f'_c) - 34828$	Concretos de resistencia $34 \leq f'_c \leq 207$ MPa, f'_c en MPa
B. Graybeal (2007)	$E_c = 3840\sqrt{f'_c}$	Concretos de resistencia $126 \leq f'_c \leq 193$ MPa, f'_c en MPa
B. Graybeal (2012)	$E_c = 4069\sqrt{f'_c}$	Concretos de resistencia $97 \leq f'_c \leq 179$ MPa, f'_c en MPa

4.2 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). 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. 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.

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). 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 (Jiang et al., 2014). En el caso del concreto, la fluencia es diferente completamente de la fluencia en otros tipos de materiales como metales o polímeros 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 (Hu et al., 2019). Entonces, en el caso del Burj Khalifa, para reducir el riesgo de fisuramiento y garantizar los requisitos servicio y durabilidad en el concreto, debe presentarse especial atención al curado y emplear procedimientos de curado (Bester, 2013). Los constructores decidieron hacer el vaciado de concreto debía realizarse en las horas de la noche para evitar las altas temperaturas y para determinar los procedimientos óptimos de curado, se realizaron probetas a escala real, como puede verse en la figura 1.4, donde se determinó que los compuestos de curado pulverizados eran el método de curado más eficaz y práctico para los elementos verticales (Bester, 2013).



Figura 1.4 Probetas a escala real en el Burj Khalifa

Fuente: Bester N. (2013). Concrete for high-rise buildings: Performance requirements, mix design and construction considerations.

5. Bombeo y transportabilidad en el concreto.

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. S. Choi et al., 2015). 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). 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 (Secrieru 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).

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 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). 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 1.5) 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. 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. S. Choi et al., 2015).



Figura 1.5 Tribómetro portable para obras

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

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 1.6). 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). 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.

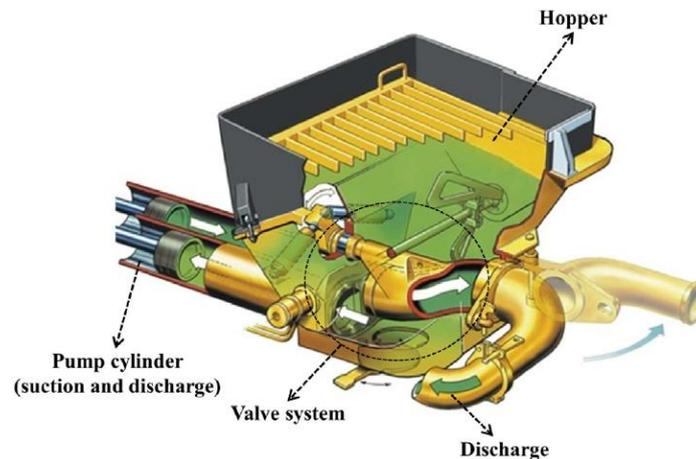


Figura 1.6 Esquema de funcionamiento de una bomba para concreto

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

6. 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 (Y. He 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).

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 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.

6.1 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 (Q. Li et al., 2017).

6.2 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). 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 (Su et al., 2020). 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).

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 1.7) (Shan et al., 2020), 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.

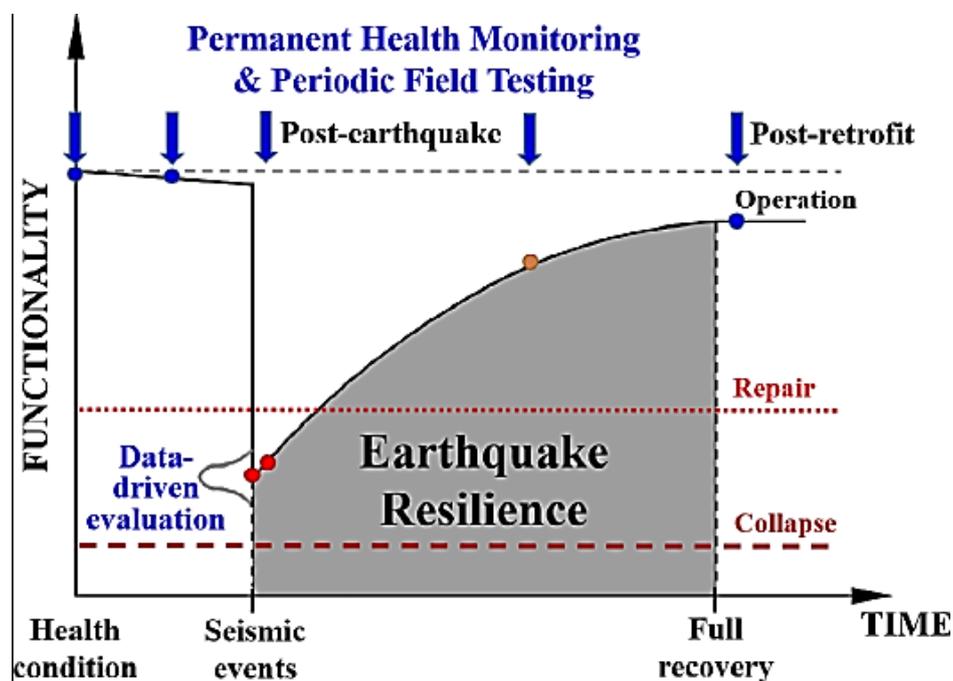


Figura 1.7 Funcionalidad en el tiempo con un sistema de monitoreo estructural

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

7. 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 ayudan a 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.

8. Bibliografía

- Alfred, 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>
- Alsalmán, 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>
- Benavides, R. J. (2014). *Concreto de Alto Desempeño*.
- Bester, N. (2013). *Concrete for high-rise buildings: Performance requirements, mix design and construction considerations*. <https://www.researchgate.net/publication/263889511>
- Bier, T. A. (2015). Influence of Pumping on Fresh Concrete Properties for SCC. *ACI Spring Convention, Web Session*.
- 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>
- 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>
- 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>

- Hu, M., Han, Q., Xu, K., & Du, X. (2019). Impact of corrosion on cyclic behaviors of ultra-high-strength reinforcing bars. *Construction and Building Materials*, 209, 606–618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.182>
- 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>
- 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*.
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- Secrieru, 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>
- 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-Session/ 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>