



Resistencia y deformación de concretos elaborados con agregados disponibles en el Valle de México

O. Hernández-Castañeda y A.L. Fuentes-González

División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM e Instituto de Ingeniería, UNAM.

E-mails: ohcastaneda@correo.unam.mx y afug@pumas.iingen.unam.mx

(recibido: enero de 2002; aceptado: julio de 2002)

Resumen

Esta investigación tiene el objetivo de analizar el comportamiento y respuesta de concretos fabricados con distintos tipos de agregados disponibles en el Valle de México, con el fin de determinar su influencia en las propiedades del concreto y su mejor aplicación en la industria de la construcción.

Se analiza el desarrollo de la resistencia a compresión y la deformabilidad a largo plazo (flujo plástico) de los concretos investigados. Los datos experimentales muestran la importancia y el efecto del agregado en la resistencia y deformación del concreto.

Adicionalmente, se proponen ecuaciones de flujo plástico para los concretos investigados, indispensables en el diseño estructural. La consideración del flujo plástico o deformación diferida del concreto en el diseño estructural, permite aumentar la vida útil y minimizar el costo de mantenimiento de aquellas estructuras elaboradas con este noble material.

Descriptores: concreto, agregado, resistencia a compresión, deformación, flujo plástico.

Abstract

This research project has the main objective of analyzing the behavior and response of concretes made from different types of disposable aggregates available in the Valley of Mexico. Our purpose is to determine their influence on the properties of concrete and their most suitable applications in the construction industry.

We analyze the development of compressive strength and creep of the different concretes in question. The experimental results show the importance and effect of a given aggregate on the strength and creep of concrete.

Additionally, creep equations for these concretes are proposed, as they are indispensable on structural design. Taking into account creep factors in the structural design phase can help to increase the useful life and minimize the maintenance costs of those structures built with concrete.

Keywords: concrete, aggregate, compressive strength, deformation, creep.

Introducción

Para brindar una seguridad estructural óptima es primordial realizar un adecuado diseño estructural, emplear materiales estructurales que cumplan con las especificaciones, así como una adecuada práctica constructiva; sólo con la interacción estrecha de tales elementos es posible brindar una seguridad estructural real.

El concreto estructural es uno de los materiales más empleados en la construcción, por ello, los ingenieros civiles y constructores requerimos conocer su tecnología.

Tradicionalmente, el criterio para la utilización de un concreto ha sido su resistencia a compresión, y es hasta los últimos años, cuando ha surgido un interés por la durabilidad del mismo.

Sin embargo, la deformación del concreto es otro factor importante a considerar en el diseño estructural, para incrementar la vida útil de las estructuras y disminuir su costo de mantenimiento a largo plazo. Entre las deformaciones y cambios volumétricos que presenta el concreto, el flujo plástico - creep, por su nombre en inglés- y la contracción por secado, ocupan un lugar primordial, por lo que en este trabajo se desarrollan ambos aspectos.

Una variable interesante en este estudio es el agregado. Anteriormente se consideraba el papel del agregado en el concreto como secundario; sin embargo, varias investigaciones en diferentes partes del mundo han indicado que esto no es así, y que la función del agregado en el concreto tiene más implicaciones de las que se pensaba inicialmente. Por lo anterior, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, desde hace algunos años ha analizado varios concretos estructurales con los agregados disponibles en el Valle de México. En este trabajo se hace una recopilación de los datos más representativos, donde se confrontan los resultados experimentales de concretos fabricados con diferentes agregados disponibles en el Valle de México, para ello se analizó la resistencia y la deformabilidad, características importantes para la evaluación de un concreto.

Materiales

Para conocer el efecto en el concreto de algunos agregados disponibles en el Valle de México, se elaboraron concretos con varias combinaciones de agregados. Los concretos fabricados comprenden tres tipos de agregados distintos, y por supuesto, una dosificación diferente. Así, las variables a analizar son el tipo de agregado y el consumo de cemento¹. En este artículo se exponen las propiedades de resistencia a compresión y flujo plástico, y en la segunda parte se discutirá la contracción por secado.

Se analizaron 12 mezclas de concreto. Las mezclas se dosificaron con el criterio ACI 211.1-91 (1997), su proporcionamiento y los materiales empleados se muestran en la tabla 1.

Cemento Portland

Para la investigación se emplearon dos tipos de cementos: cemento Portland ordinario y cemento Portland puzolánico, ambos de producción nacional. Se seleccionaron estos tipos de cemento por ser los más empleados en la industria mexicana de la construcción.

Agregados

Antes de los sismos de 1985 se empleaban principalmente agregados pétreos andesíticos para la fabricación de concreto hidráulico en la Ciudad de México, debido a su fácil disponibilidad en la región. Las fallas de estructuras en los sismos de 1985 fueron originadas, entre otras causas, por el contacto entre estructuras con gralean, concretos fabricados con materiales andesíticos. En estudios anteriores (Mendoza, *et al.*, 1993) se ha demostrado que el comportamiento de dichos concretos es satisfactorio en el ámbito de la resistencia mecánica, pero no en el ámbito del flujo plástico, ni en su módulo de elasticidad; comparado con otros agregados el material andesítico presenta un flujo plástico y una contracción por secado, del orden del doble de otros materiales pétreos. Aunado a lo anterior, su

¹ Es preferible considerar una a la vez, las propiedades significativas del concreto, pero en enfoques experimentales esto es difícilmente posible, debido fundamentalmente a que ciertas variables son covariables. Un ejemplo, es que al variar el consumo de cemento cambiamos también la relación agua/cemento y se puede afectar su trabajabilidad. Lo anterior dificulta el análisis del concreto.

Tabla 1. Características analizadas de las mezclas de concreto

DESIGNACIÓN	TIPO DE CEMENTO	ORIGEN GEOLÓGICO DEL AGREGADO		TAM MAX
		Grava	Arena	
A1	Portland Puzolánico	Caliza	Caliza	1"
A2	Portland Puzolánico	Caliza	Caliza	1"
A3	Portland Puzolánico	Caliza	Caliza	1"
A4	Portland Puzolánico	Caliza	Caliza	1 1/2 "
A5	Portland Puzolánico	Caliza	Caliza	1 1/2 "
A6	Portland Puzolánico	Caliza	Caliza	1 1/2 "
B7	Portland, Tipo I	Caliza	Andesita	3/8 "
B8	Portland, Tipo I	Caliza	Andesita	3/8 "
B9	Portland, Tipo I	Caliza	Andesita	3/8 "
C10	Portland, Tipo I	Basalto	Arena de río	3/4 "
C11	Portland, Tipo I	Basalto	Arena de río	3/4 "
C12	Portland, Tipo I	Basalto	Arena de río	3/4 "

DESIGNACIÓN	DOSIFICACIÓN				RELACIONES BÁSICAS	
	Consumo de cemento	Grava	Arena	Agua	Agua/Cemento	Agregado/Cemento
	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	A/C	AG/C
A1	319	960	821	204	0.64	5.58
A2	381	1008	729	208	0.55	4.56
A3	491	993	598	226	0.46	3.24
A4	454	836	812	213	0.47	3.63
A5	364	842	888	207	0.57	4.75
A6	317	842	927	201	0.63	5.58
B7	350	1026	778	169	0.48	5.15
B8	400	1002	758	170	0.43	4.40
B9	493	948	718	166	0.34	3.38
C10	400	952	753	171	0.43	4.26
C11	450	924	731	172	0.38	3.68
C12	500	908	718	150	0.30	3.25
MÍNIMO	317	836	598	150	0.30	3.24
MÁXIMO	500	1026	927	226	0.64	5.58

módulo de elasticidad es del orden de la mitad comparado con otros agregados pétreos (Mendoza *et al.*, 1995).

El sismo de 1985 en la Ciudad de México demostró la deficiencia en los materiales empleados, fue entonces cuando se pensó en mejorar el comportamiento de los agregados con los que se elabora el concreto. Por lo anterior, se estudió y posteriormente se reglamentó el uso de un concreto más rígido (menos

deformable); se propuso fabricar el concreto con un agregado grueso de origen basáltico o calizo (más denso que el andesítico); sin embargo, el agregado fino (arena) de origen andesítico se siguió utilizando.

Este último concreto alcanza razonablemente las condiciones deseables para concreto estructural, pero hay circunstancias donde es conveniente un concreto más denso y más rígido. Por ejemplo, en las cimentaciones total y

parcialmente compensadas, un concreto más denso significa menos volumen de concreto y menos volumen de excavación, entre otros hechos benéficos. Para lograrlo, se propone usar material calizo (2.60 t/m^3) en la arena, en lugar de uno de andesita (2.40 t/m^3).

Por situaciones geológicas, la arena andesita es la de mejor calidad en el Valle de México; transportar una arena de otra región resulta costoso; sin embargo, si los materiales cercanos a la región no satisfacen los requerimientos de calidad, conviene transportar los agregados de regiones lejanas, esto para asegurar la calidad del concreto. Una solución alterna es la trituración de rocas de la región, hasta obtener la granulometría óptima de la arena.

Caliza

La caliza es una roca sedimentaria que por sus características se le considera un excelente material para la construcción. El primer lote de concretos fabricado contiene grava y arena de origen calizo, se tritularon rocas calizas hasta obtener la granulometría de la arena adecuada.

El uso de arenas trituradas tiene consecuencias en el concreto fresco, ya que las mezclas tienden a ser menos trabajables, proclives a la segregación y al sangrado; por ello, resulta útil y de interés estudiar mezclas de concreto elaboradas con agregados triturados calizos, tanto gruesos como finos y conocer sus propiedades en estado fresco y endurecido, así como su comportamiento a través del tiempo.

Andesita

La andesita es una roca ígnea extrusiva, tipo lava, y se localiza en gran parte de la cuenca del Valle de México. Se encuentra en la Sierra Nevada, el Ajusco, las Sierras de las Cruces y Monte Alto, y en gran parte del abanico de origen fluvio - glacial que cubre las faldas de las Sierras del Sur de la Ciudad de México, asimismo, en el Estado de México: al oriente de Texcoco, en los Montes Ocuilan, en Maninalco y en Malitenango. En el estado de Morelos se localiza en las "Lomas" de

Cuernavaca (Rico y Del Castillo, 2000). Para tener un parámetro de comparación con los concretos elaborados con ambos agregados calizos, se elaboraron concretos con agregados pétreos, tales como grava caliza y arena andesita de procedencia local; estudios previos demostraron que estos materiales lograban un concreto estructural satisfactorio, con las salvedades marcadas anteriormente.

Basalto

El basalto es una roca ígnea extrusiva, tipo lava, muy abundante en la República, principalmente en el Valle de México y sus alrededores (Rico y Del Castillo, 2000). El Departamento del Distrito Federal encontró un banco de basalto, el cual por resultar un material viable para producir concreto podría abastecer la demanda de agregado del Valle de México para los próximos 20 años. Su desempeño para la elaboración de concreto se conoce poco en México; se trata de un material poco estudiado y poco empleado para obras importantes de ingeniería civil. De ahí su importancia de investigar su aplicación y desempeño en concretos estructurales.

Ante la necesidad de encontrar materiales sustitutos de los ya escasos y empleados tradicionalmente, el basalto surge como posible material alterno para producir concreto, por lo que su análisis para determinar su viabilidad en concretos estructurales es primordial.

Arena de río

La arena de río puede ser aprovechada cuando se construyen obras que están próximas a un río o una corriente de agua, disminuyendo el costo; tal es el caso de presas que se ubican en cuencas que cuentan con grandes cantidades de arena de río. La Comisión Nacional del Agua (CNA) plantea usar dicho material para canales de descarga, donde es necesario un recubrimiento de concreto resistente al flujo del agua con acabado liso. El empleo de arenas de río para elaborar concreto hidráulico surge como una nueva necesidad, por lo que carece de estudios anteriores, de ahí su interés por

analizar la respuesta de un concreto fabricado con éste agregado. Normalmente se utilizan arenas provenientes de un banco que garantiza la calidad de los materiales; a diferencia de lo anterior, se propone analizar un material que se encuentra *in situ*, de fácil disponibilidad, pero sin antecedentes en su empleo.

Las propiedades del concreto con arena de río deben conocerse para poder determinar su viabilidad con fines estructurales, y en especial, para estructuras hidráulicas, como canales de descarga, así como para conocer el proporcionamiento de materiales más adecuado. Por lo anterior, el tercer lote de concretos investigados se realizaron con arena de río. Ante dichas circunstancias, el Instituto de Ingeniería se ha dedicado a este estudio, por ello se ha considerado arena de río para este artículo.

Por la diversidad de materiales existentes y provenientes de bancos del Valle de México, es conveniente identificar la influencia particular de aquellos que se encuentren en mayor volumen, y que sus condiciones geológicas les permitan ser empleados como agregado para producir concreto. Sin olvidar aquellos bancos con materiales alternos y poco conocidos que se pueden ocupar en el futuro para la fabricación de concreto.

En el presente estudio se han incluido los agregados más representativos y más utilizados para la construcción en el Valle de México, así como aquellos que requieren un análisis más amplio para su aplicación.

Se estudiaron concretos elaborados con grava y arena caliza (primer lote), grava caliza y arena andesita (segundo lote), y con grava de basalto y arena de río (tercer y último lote). Con la determinación y comparación de las propiedades del concreto que cada combinación de agregado produce, se determinó la influencia de cada uno y se identificaron las circunstancias en que puedan convenir.

Propiedades del concreto en estado fresco

Los valores promedio obtenidos para el concreto fresco son los indicados en la tabla 2.

Metodología de análisis

Debido a la diversidad de mezclas y a la cantidad de variables a analizar, se eligió como criterio, el consumo de cemento para comparar los concretos elaborados. Los concretos fabricados se dividieron en cinco intervalos, de acuerdo al consumo de cemento que presentan las mezclas; cada uno tiene un 5.0% de variación entre la media y los valores extremos del intervalo en consumo de cemento, lo que facilita la comparación y no afecta significativamente la validez de la comparación (Tabla 3).

Resistencia a compresión

Con el propósito de evaluar la influencia e importancia del agregado y del consumo de cemento en la resistencia mecánica del concreto endurecido, se determinó la resistencia a compresión para varias edades. Las propiedades en estado endurecido de los concretos investigados, se presentan en la tabla 4.

Se puede visualizar en las figuras 1 a 4 (todas las figuras se encuentran al final del artículo), el desarrollo de la resistencia a compresión con los agregados analizados, ahí se aprecia que a mayor consumo de cemento mayor resistencia a la compresión.

La estimación del desarrollo de resistencia a compresión, se realizó con el método propuesto por el Comité ACI 209R-92 (ratificado en 1997) para las condiciones de curado y almacenado de especímenes, y se confronta con los resultados experimentales obtenidos.

En las figuras 5 a 9 se comparan los desarrollos de resistencias a compresión de concretos con un consumo de cemento similar o igual, elaborados con diferentes agregados, donde se muestra la relevante influencia del agregado en la resistencia a compresión, ya que para un mismo o similar consumo de cemento, el concreto presenta diferencias sustanciales en la resistencia a compresión, causadas principalmente por la combinación de los agregados empleados. La mayor diferencia se presenta entre un concreto con la grava de basalto y arena de río y otro con grava caliza y arena caliza sin lavar, que en promedio, es próxima al 89%. La segunda

Tabla 2. Propiedades promedio en estado fresco según el tipo de agregado

TIPO DE AGREGADO	Revenimiento (cm)	Aire incluido [%]	PVF* [kg/m ³]
I. Grava caliza y arena caliza sin lavar	7.1	1.4	2328.7
II. Grava caliza y arena caliza lavada	8.8	2.2	2311.2
III. Grava caliza y arena andesita	13.3	2.0	2336.7
IV. Grava basalto y arena de río	1.4	2.1	2300.2

*PVF. Peso volumétrico fresco

Tabla 3. Intervalos de comparación con base en el consumo de cemento

	Intervalo	Media	Mezclas
1	310 < CC < 326	318	A1, A6
2	348 < CC < 366	366	A5, B7
3	380 < CC < 401	391	A2, B8, C10
4	440 < CC < 460	450	A4, C11
5	481 < CC < 505	493	A3, B9, C12

CC - Consumo de cemento [kg/m³]

Tabla 4. Propiedades analizadas del concreto endurecido de las mezclas

NOMENCLATURA	A2	A3	A4	A8	A9	A10	B12	B14	B16	C20	C21	C25
TIPO DE AGREGADO	GRAVA CALIZA Y ARENA CALIZA SIN LAVAR			GRAVA CALIZA Y ARENA CALIZA LAVADA			GRAVA CALIZA Y ARENA ANDESITA			GRAVA BASALTO Y ARENA DE RÍO		
RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA VARIAS EDADES (DÍAS) [kg/cm²]												
14	201	268	285	326	225	238				487	524	664
	205	273	298	340	260	254				474	539	649
PROMEDIO										446	536	558
	203	270	291	333	243	246				469	533	624
28	220	306	336	357	334	279	411	453	637	501	576	731
	242	281	324	352	307	231			621	527	554	661
	224	293	320	344	325	269				535	554	669
PROMEDIO	229	293	327	351	322	260	411	453	629	521	561	687
56										549	637	733
										595	622	773
										528	554	776
										557	604	760
90	270	328	371	389	354	279	470	563	758	628	598	748
	268	317	394	378	350	301				644	640	775
										615	578	788
PROMEDIO	269	322	382	383	352	290	470	563	758	629	605	770
119							494	534	756			

continúa...

Tabla 4. Propiedades del concreto endurecido (continuación)

NOMENCLATURA	A2	A3	A4	A8	A9	A10	B12	B14	B16	C20	C21	C25
TIPO DE AGREGADO	GRAVA CALIZA Y ARENA CALIZA SIN LAVAR			GRAVA CALIZA Y ARENA CALIZA LAVADA			GRAVA CALIZA Y ARENA ANDESITA			GRAVA BASALTO Y ARENA DE RIO		
MÓDULO DE ELASTICIDAD [kg/cm²]												
28	2909900	323168	325216	312963	316374	305208	306256	320452	338442	264545	255432	292119
90	233944						333503	346694	376174	278690	276590	313487
119							335215	352558	352778			
PROM. [28 días]		313095			311515			321717			270699	
RELACIÓN DE POISSON												
28	0.17	0.2	0.18	0.17	0.17	0.17	0.23	0.19	0.23	0.17	0.19	
CONTRACCIÓN POR SECADO EN VIGAS [E _μ α 10 ⁻⁶]												
28 DÍAS	395	235	311.25	338.75	361.25	312.5	235	166.25	245	287.5	310	271.25
6 MESES	565	395	457.5	541.25	577.5	560	483.75	376.25	445	505	522.5	501.25
1 AÑO	627.5	415	467.5	576.25	611.25	560	528.75	411.25	471.25	555	610	577.5
COEFICIENTE DE FLUJO PLÁSTICO												
28 DÍAS	1.178	1.5184	1.4261	1.1806	1.1746	1.297	0.6497	0.6078	0.7186	0.9357	0.6433	0.7996
6 MESES	2.2712	2.7279	2.5223	20.836	2.4167	2.5451	1.2674	0.9853	1	1.7089	1.1232	1.1146
1 AÑO	2.7585	3.2022	2.9966	2.5209	2.8889	3.1278	1.5802	1.2574	0.2894	1.8904	1.2865	1.208
2 AÑOS	3.0593	3.4853	3.2199	2.6849	3.0574	3.3308	1.8342	1.5098	1.5609			
3 AÑOS	3.1449	3.7647	3.4777	2.881	3.377	3.5489						
4 AÑOS	3.5297	3.9301	3.6873		3.6706	3.6504						
5 AÑOS			3.8179		3.7421	3.7444						
ÚLTIMO	3.4915	3.9743	3.8591		3.8373	3.8271	1.8663	1.5123	1.6627	1.8904	1.2865	1.208

diferencia en magnitud está entre la grava caliza y arena andesítica y la grava caliza y arena caliza sin lavar, con un orden próximo a 73%.

La tabla 5 muestra la diferencia porcentual obtenida en la resistencia a compresión con los agregados seleccionados. El porcentaje de desarrollo promedio de todas las mezclas para 14, 28, 56, 90 y 119 días fue respectivamente igual a 89.2%, 100%, 108.1% (sólo lote C), 115.1%, 118.2% (sólo lote B).

También en la curva de correspondencia entre el consumo de cemento y la resistencia a la compresión (Figura 10) se observa la influencia del consumo de cemento y del agregado en la resistencia del concreto endurecido, ya que el efecto que causa cada combinación de agregados es diferente, además de que la combinación de grava basalto y arena de río, genera la mejor resistencia a la compresión a 28 días, hecho que

posiblemente se deba a que el basalto tiene un mayor módulo de elasticidad, y por lo tanto, mayor resistencia. Esto conduce a que con esta combinación de agregados, se logre un mejor aprovechamiento del consumo de cemento, en comparación con los agregados calizos. Esto se confirma al observar la eficiencia del cemento, con el nivel de resistencia a compresión (Figura 11).

El agregado tiene un papel importante en el concreto convencional ($f'c \leq 400 \text{ kg/cm}^2$) y para el de alta resistencia ($f'c > 400 \text{ kg/cm}^2$) adquiere mayor relevancia todavía.

En las figuras 5 a 9 se observa que para un mismo o similar consumo de cemento, las combinaciones de agregados producen de mayor a menor resistencia, en el siguiente orden (Hernández, 2001):

Intervalo 1 ($310 < CC < 326$):

Tabla 5. Variación de la resistencia a compresión para varios agregados (en porciento)*

	Grava basalto y arena de río	Grava caliza y arena andesita	Grava caliza y arena caliza lavada	Grava caliza y arena caliza sin lavar
Grava basalto y arena de río				
Grava caliza y arena andesita	13%			
Grava caliza y arena lavada	55%	41%		
Grava caliza y arena caliza sin lavar	89%	73%	13%	

* Porcentajes obtenidos con las mezclas analizadas y con la combinación de agregado, la cual genera menor resistencia para un mismo o similar consumo de cemento y una igual relación arena/grava. El presente cuadro, aunque fue obtenido con valores cuantitativos, pretende ser sólo cualitativo. Los valores que genere éste, sólo son valores promedio no predicciones. Por ejemplo, si se obtiene una resistencia a compresión con grava caliza y arena caliza lavada de 300 kg/cm^2 y se desea un valor indicativo de una mezcla con el mismo consumo de cemento, pero con agregado grueso de basalto y fino de río, el valor será $300 \times 1.89 = 567 \text{ kg/cm}^2$.

Mayor resistencia: grava caliza y arena caliza lavada.

Menor resistencia: grava caliza y arena caliza sin lavar

1. Grava basalto y arena de río.
2. Grava caliza y arena andesita.
3. Grava caliza y arena caliza lavada
4. Grava caliza y arena caliza sin lavar

Intervalo 2 ($348 < CC < 366$):

Mayor resistencia: grava caliza y arena andesita.

Menor resistencia: grava caliza y arena caliza lavada.

Se aprecia la diferencia en el desarrollo de la resistencia para dos concretos elaborados con grava caliza, pero diferentes arenas; el primero con arena caliza y el segundo con arena andesítica, en donde presentó mayor resistencia el concreto con arena andesítica.

Intervalo 3 ($380 < CC < 401$):

Mayor resistencia: grava basalto y arena de río.
grava caliza y arena andesita.

Menor resistencia: grava caliza y arena caliza sin lavar.

Hasta ahora se ha discutido solamente el efecto del tipo de agregado en la resistencia a compresión del concreto; a continuación, se plantea el efecto que tiene en la deformabilidad del concreto a corto y largo plazo.

Intervalo 4 ($440 < CC < 460$):

Mayor resistencia: grava basalto y arena de río.

Menor resistencia: grava caliza y arena caliza lavada.

Módulo de Young

Intervalo 5 ($481 < CC < 505$):

Mayor resistencia: grava basalto y arena de río.
grava caliza y arena andesita.

Menor resistencia: grava caliza y arena caliza sin lavar.

Los valores obtenidos se muestran en la tabla 4. En la figura 12 se presenta la relación resistencia a compresión - módulo de Young, donde se aprecia el efecto del tipo de agregado en las propiedades del concreto, y se compara con la relación indicada en el RCDF, para concreto clase 1.

Flujo plástico

En resumen, los agregados presentan un mejor desarrollo de resistencia a compresión en el siguiente orden (de mayor a menor resistencia):

Como la mayoría de los materiales estructurales, el concreto se deforma instantáneamente al

aplicarle una carga por primera vez, pero ante una carga ininterrumpida o constante, el concreto presenta flujo plástico.

El flujo plástico, llamado también deformación diferida, deformación plástica o fluencia, es el incremento de deformación del concreto, debido a una carga sostenida en el tiempo.

Es decir, se presenta un incremento en la deformación bajo un esfuerzo constante e ininterrumpido, que incluye las deformaciones vinculadas con el esfuerzo y excluye las causadas por contracción por secado, deformaciones térmicas y de inflamamiento; por ello, el flujo plástico se considera a partir de la deformación inicial generada por el módulo de Young a la edad de carga.

El concreto presenta una deformación inmediata o inicial [ϵ_i] y otra diferida [flujo plástico, ϵ_d]. La deformación inicial debida a la carga que soporta el concreto, es la deformación instantánea y depende fundamentalmente de la proporción del esfuerzo aplicado, tiene pocos efectos dependientes del tiempo, mientras que la deformación adicional, causada por la misma carga, es la deformación por flujo plástico y depende de la proporción del esfuerzo aplicado y del tiempo de aplicación del esfuerzo.

Por lo tanto, para evaluar la deformación del concreto bajo carga sostenida se debe considerar el tiempo que dura la aplicación de la carga y el descuento en las deformaciones no estructurales, como la contracción por secado, que es una deformación autógena que todo concreto presenta, ante la progresiva pérdida de humedad (Neville, 1992; Neville y Brooks, 1998).

La deformación total de un concreto se debe entonces a la deformación instantánea, al flujo

plástico y a la contracción, como lo indica la ecuación 1.

$$\text{Deformación total } (\epsilon_T) = \text{Deformación instantánea } (\epsilon_E) + \text{Flujo plástico } (\epsilon_{FP}) + \text{Contracción } (\epsilon_c) \quad (1)$$

El flujo plástico no puede observarse en forma directa y sólo se puede determinar al restar la deformación inicial y la deformación por contracción por secado, a la deformación total.

El flujo plástico del concreto bajo carga sostenida es un proceso lento que puede prolongarse indefinidamente, por lo que se considera que está presente en todo la vida del concreto y en cualquier estructura.

Para que el flujo plástico no represente sólo una pequeña deformación de poco interés práctico, se debe hacer notar que una deformación de flujo plástico típica después de un año de carga, es varias veces mayor a la deformación inicial. A continuación, en la tabla 6 se presenta un ejemplo con valores numéricos de deformaciones que son resultado de los tres factores mencionados anteriormente para los valores promedio obtenidos de los especímenes en esta investigación; así como para un espécimen de concreto normal sujeto a 63.3 kg/cm² en compresión.

Con estos valores relativos, se hace evidente que las relaciones esfuerzo-deformación para cargas de corta duración, pierden importancia ante las cargas de larga duración por tener un efecto más dominante en el comportamiento de una estructura.

Tabla 6. Importancia del flujo plástico en la deformación total del concreto

Tipo de deformación	Valores promedio obtenidos de nuestra investigación (varios especímenes sujetos a 0.4fc)	Especimen de concreto normal sujeto a 900 psi (63.3 kg/cm ²) en compresión
Deformación elástica o inmediata	668×10^{-6} m-m	250×10^{-6} in-in
Deformación por contracción al año ϵ_{SH}	562×10^{-6} m-m	500×10^{-6} in-in
Deformación por flujo plástico al año ϵ_{SH}	1296×10^{-6} m-m	750×10^{-6} in-in
Deformación total al año ϵ_T	2526×10^{-6} m-m	1500×10^{-6} in-in

En resumen, la importancia del flujo plástico en el concreto estructural, radica principalmente en que la deformación por flujo plástico tiene un orden mayor de magnitud que la deformación inicial. La determinación del flujo plástico es relevante para el cálculo de esfuerzos cuando ocurre la relajación, por ejemplo, para el concreto presforzado, y para el cálculo de deformaciones y desplazamientos en miembros estructurales.

El flujo plástico se determinó experimentalmente para los tres lotes de concreto, la edad mínima de determinación experimental fue de un año. En la predicción del flujo plástico se utilizan los métodos de Neville y de Fuentes, porque son métodos que se basan en datos experimentales.

El método Neville propone la siguiente ecuación:

$$C_T = \frac{t^{0.6}}{b + t^{0.6}} C_U \quad (2)$$

Por su parte el método Fuentes propone:

$$C_T = \frac{t^a}{b + t^a} C_U \quad (2)$$

Donde:

C_T es el coeficiente de flujo plástico.

C_U es el coeficiente último de flujo plástico,

t es la edad del concreto a partir de que es cargado.

b (en días) y a son constantes propias de cada concreto; son función del tiempo de carga sostenida.

Para determinar las variables a , b y C_U se realiza un análisis estadístico y matemático de las lecturas de deformación registradas en los especímenes colocados en el marco de flujo plástico y de los testigos sin carga, con el equipo whittemore.

Normatividad vigente del flujo plástico

Las Normas Técnicas Complementarias de Estructuras de Concreto del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) establecen que se debe considerar un coeficiente de flujo plástico o deformación diferida final de 2.4 para concretos clase 1 (peso específico mayor a 2.2 t/m³) y de 5 para concreto de clase 2 (peso específico comprendido entre 1.9 y 2.2 t/m³).

Análisis de datos experimentales

Para las doce mezclas de concreto analizadas, se determinó experimentalmente el flujo plástico por un período mínimo de un año y se aplicó el método de predicción señalado. El desarrollo del flujo plástico, real y estimado para las combinaciones de agregado propuestas, se presenta en las gráficas 13 a 16.

Tabla 7. Valores experimentales y ecuaciones promedio de flujo plástico

TIPO DE AGREGADO	T = 1 año			T = 2 años		
	Neville	Fuentes	C_T	Neville	Fuentes	C_T
Grava basalto y arena de río	$C_T = \frac{t^{0.6}}{10.2 + t^{0.6}} 2.0$	$C_T = \frac{t^{0.66}}{13.4 + t^{0.66}} 1.9$	1.5	$C_T = \frac{t^{0.6}}{8.7 + t^{0.6}} 1.6$	$C_T = \frac{t^{0.6}}{13.7 + t^{0.6}} 1.8$	1.6
Grava caliza y arena andesita	$C_T = \frac{t^{0.6}}{17.6 + t^{0.6}} 2.1$	$C_T = \frac{t^{0.72}}{20.2 + t^{0.72}} 1.8$	1.4	$C_T = \frac{t^{0.6}}{21.1 + t^{0.6}} 2.3$	$C_T = \frac{t^{0.65}}{23.5 + t^{0.65}} 2.1$	1.6
Grava caliza y arena caliza lavada	$C_T = \frac{t^{0.6}}{22.5 + t^{0.6}} 4.8$	$C_T = \frac{t^{0.72}}{23.0 + t^{0.72}} 3.6$	2.8	$C_T = \frac{t^{0.6}}{19.73 + t^{0.6}} 4.4$	$C_T = \frac{t^{0.75}}{24.8 + t^{0.75}} 3.6$	3.0
Grava caliza y arena caliza sin lavar	$C_T = \frac{t^{0.6}}{17.0 + t^{0.6}} 4.4$	$C_T = \frac{t^{0.68}}{17.4 + t^{0.68}} 3.8$	3.0	$C_T = \frac{t^{0.6}}{16.2 + t^{0.6}} 4.3$	$C_T = \frac{t^{0.7}}{18.6 + t^{0.7}} 3.8$	3.3

En la tabla 7 se muestran los valores experimentales y los parámetros de predicción para los métodos de flujo plástico.

Para los concretos elaborados con distintos tipos de agregados la forma de la curva de flujo plástico resultó muy similar.

Al comparar las mezclas de concreto elaboradas con el mismo tipo de agregado, pero diferente consumo de cemento y relación agua/cemento, se aprecia que no necesariamente hay una relación entre consumo de cemento y flujo plástico o relación agua/cemento - flujo plástico para las mezclas analizadas. Tanto el consumo de cemento, como la relación agua/cemento, tienen un doble efecto en el desarrollo del flujo plástico. Por un lado, a mayor consumo de cemento o menor relación agua/cemento, se tiene un concreto con mayor resistencia y menor deformabilidad, lo que tendría por consecuencia una disminución del flujo plástico; por otro lado, al tener mayor consumo de cemento o menor relación agua/cemento, se logra un mayor volumen de la pasta de cemento, que es la fuente del flujo plástico, por lo que se incrementaría éste último. En este sentido, se encontró una relación sólo para los concretos con grava basáltica y arena de río, donde a mayor consumo de cemento y menor relación agua/cemento se obtienen un menor coeficiente de flujo plástico.

El efecto del consumo de cemento en el coeficiente de flujo plástico se muestra en la figura 17, donde se señalan las diferencias de emplear un agregado u otro, de modo que un concreto con 400 kg/m^3 denotará un menor coeficiente de flujo plástico si lo constituyen agregados gruesos de basalto y finos de río, o grava caliza y arena andesita, por lo que presentará un mayor coeficiente si contiene

arena y grava caliza. Por su parte, las deformaciones totales del concreto son afectadas por el tipo de agregado (tabla 8).

Los valores anteriores se muestran en la figura 18, en la cual se confronta la deformación total contra el consumo de cemento y permite apreciar como los agregados gruesos calizos restringen en mayor magnitud la deformación total que el agregado basalto. Así, los concretos con ambos agregados calizos tienen coeficientes de flujo plástico altos, pero deformaciones totales moderadas, mientras que un concreto con agregado fino de río y grueso de basalto desarrolla deformaciones totales de mayor magnitud y coeficientes de flujo plástico bajos.

En primera instancia, los resultados anteriores parecen contradictorios; sin embargo, tienen una explicación perfectamente lógica: los agregados calizos en el concreto provocan deformaciones elásticas de baja magnitud y los concretos con grava de basalto y arena de río provocan deformaciones iniciales del orden del doble que los calizos.

Los concretos con grava caliza y arena andesítica desarrollan deformaciones iniciales intermedias de las combinaciones de agregados anteriores, la deformación elástica adquiere relevancia porque el coeficiente de flujo plástico está en función de ella.

Al utilizar los mismos intervalos de consumo de cemento señalados al principio, se comparó el efecto del agregado en el flujo plástico, para un mismo o similar consumo de cemento.

En las gráficas 19 a 23 se presenta dicha comparación, donde se observa que la combinación de agregados restringe el desarrollo del flujo plástico del concreto de la siguiente manera (Hernández, 2001):

Tabla 8. Deformación total de acuerdo al tipo de agregado

Agregado en el concreto	Deformación total promedio (1 año)
Grava caliza y arena caliza sin lavar	2252.9×10^{-6}
Grava caliza y arena caliza lavada	2277.3×10^{-6}
Grava caliza y arena andesita	2245.1×10^{-6}
Grava basalto y arena de río	3322.4×10^{-6}

Intervalo 1:

Menor fp: grava caliza y arena caliza sin lavar

Mayor fp: grava caliza y arena caliza lavada

Intervalo 2:

Menor fp: grava caliza y arena andesita

Mayor fp: grava caliza y arena caliza lavada

Intervalo 3:

Menor fp: grava caliza y arena andesita

grava basalto y arena de río

Mayor fp: grava caliza y arena caliza sin lavar

Intervalo 4:

Menor fp: grava basalto y arena de río

Mayor fp: grava caliza y arena caliza lavada

Intervalo 5:

Menor fp: grava basalto y arena de río

grava caliza y arena andesita

Mayor fp: grava caliza y arena caliza sin lavar

En donde fp es Flujo plástico.

En términos generales los agregados restringen al flujo plástico del concreto en el siguiente orden (de menor a mayor flujo plástico generado):

1. Grava basalto y arena de río.
2. Grava caliza y arena andesita.
3. Grava caliza y arena caliza lavada
4. Grava caliza y arena caliza sin lavar

La restricción que ejercen la combinación basalto-arena de río y caliza-andesita, tiende a valores similares del coeficiente del flujo plástico, y muestra una ligera ventaja en la combinación basalto-arena de río. El efecto del lavado en arenas calizas es mínimo en el flujo plástico.

Determinar el efecto del agregado en el flujo plástico implica mayor dificultad, debido a la variedad de factores que actúan activamente en el flujo plástico: En general, el agregado grueso de basalto y la arena de río, así como la grava caliza y la arena andesita restringen en mayor magnitud flujo plástico, en comparación con aquellos con agregados calizos.

Conclusiones

El empleo del agregado en el concreto es de suma importancia, debido a que influye activamente para un mejor comportamiento: genera mayores resistencias a la compresión que para un mortero. El agregado grueso restringe al flujo plástico y a la contracción por secado, así que en términos generales, a mayor volumen de agregado, menor flujo plástico y contracción por secado.

Según sea el tipo y calidad del agregado, el concreto tendrá mejores propiedades de resistencia, módulo de Young, flujo plástico y contracción por secado. Por ello, es importante considerar el tipo de agregado en la proporción de las mezclas.

El incremento de resistencia es proporcional al incremento de consumo de cemento, pero dicho incremento depende también del tipo de agregado empleado.

Los concretos con ambos agregados calizos muestran un desarrollo moderado de resistencia, entre 229 y 352 kg/cm² a 28 días, para consumos de cemento de 317 a 491 kg/m³, y un coeficiente alto de flujo plástico, que varía entre 2.52 y 3.12 y una contracción por secado de 447 a 563 X10⁻⁶ al año, por lo que su aplicación debe enfocarse a estructuras de baja tecnología, donde no se requieren altas resistencias a compresión o tensión (edificios de poca altura y/o edificaciones en zonas de bajo riesgo sísmico).

Los concretos elaborados con grava de basalto y arena de río presentan un excelente desarrollo de resistencia, ya que con consumos de cemento entre 400 y 500 kg/m³ se obtienen resistencias entre 521 y 687 kg/cm², coeficientes de flujo plástico al año entre 1.28 y 1.89 y una contracción por secado importante (entre 707 y 817 X10⁻⁶).

Con tales características, el concreto con grava basáltica y arena de río puede aplicarse a estructuras donde se requiera alta resistencia, y se consideren las medidas adecuadas para restringir en lo posible la contracción por secado. Su aplicación en estructuras hidráulicas es perfectamente viable, por su resistencia y porque en estructuras hidráulicas como canales de descarga no hay cargas sostenidas (no se presentará flujo plástico), y porque con un adecuado curado y con el flujo por el canal de agua

(aunque este sea ocasional) se restringe la contracción por secado. Una buena práctica es humedecer el concreto en temporadas con altas temperaturas ambientales.

El agregado grueso de basalto y la arena de río, han mostrado en este estudio ser agregados alternos viables para la producción de concreto; es necesario investigar a fondo su viabilidad para estructuras de gran importancia. Con sus características benéficas encontradas en el ámbito de resistencia del concreto y sus características de deformabilidad, resulta ser una combinación alterna de agregados perfectamente utilizable para estructuras de baja y media tecnología. Para su aplicación en estructuras de mayor importancia, donde se requiere un grado tecnológico considerable, es necesario encontrar una solución para emplear grava de origen basáltico y obtener un concreto con baja deformabilidad.

Los concretos con grava caliza y arena andesita poseen un buen desarrollo de resistencia a compresión (entre 411 y 629 kg/cm²) para consumos de cemento que oscilan entre 350 y 493 kg/m³ y un moderado coeficiente flujo plástico (entre 1.25 y 1.58 para un año) y una contracción por secado entre 407 y 537 X10⁻⁶, por lo que su aplicación es universal, ya que ofrece resistencias altas con consumo de cementos relativamente moderados y baja deformabilidad a largo y corto plazo; de hecho es la combinación de agregados que ofrece menor deformabilidad total y un bajo coeficiente de flujo plástico, algo similar sucede en la contracción por secado, donde presenta menor promedio; en suma, es un concreto con muy buenas características de resistencia y deformabilidad, por lo que es una excelente opción para elaborar concreto en el Valle de México.

Existe un mejor aprovechamiento del incremento de consumo de cemento, tanto para la grava basáltica y la arena de río, como para la grava caliza y la arena andesítica para ambos agregados calizos.

Tanto el agregado grueso basáltico y la arena de río como el agregado grueso calizo y fino de andesita, generan mayores resistencias que la

grava y arena caliza para un mismo consumo de cemento.

El flujo plástico es una propiedad importante del concreto de largo plazo que debe investigarse con mayor profundidad. Es un nexo entre las propiedades de resistencia y deformabilidad con poco desarrollo; así como una escasa normatividad en México. En la medida que las estructuras y miembros de concreto incluyan este factor, se incrementará la confiabilidad de las estructuras y se evitarán efectos dañinos.

El RCDF propone sólo dos valores generales, según sea la clase de concreto, sin incluir una estimación abierta y por lo tanto más adecuada para concretos con características particulares, como concretos de alto desempeño, masivos, ligeros o para concretos cargados a distintas edades, compactados y curados con distintos métodos, así como para diversas condiciones de servicio.

Es conveniente realizar una revisión cuidadosa y a detalle, con el fin de proponer un modelo confiable de predicción del flujo plástico en el concreto, que considere todas las variables involucradas en este singular fenómeno, presente en prácticamente cualquier estructura de concreto. En la medida que nuestra normatividad técnica, conocimiento y práctica constructiva sean compatibles, se podrá aspirar a mejorar la ingeniería civil mexicana.

Es necesario y de vital importancia para la ingeniería mexicana, buscar agregados alternos, así como incentivar su investigación y posterior empleo en el concreto.

El conocimiento del efecto del agregado en el concreto, proporciona al ingeniero civil, ya sea diseñador estructural o ingeniero constructor, una valiosa herramienta para determinar las propiedades de resistencia y deformabilidad del concreto. Con la publicación de este artículo se pretende hacer un llamado a los ingenieros civiles para que conozcan y posean un conocimiento más amplio de lo que es fabricar y construir profesionalmente con concreto.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería, UNAM. Agradecemos al Maestro C.J. Mendoza, así como al personal directivo y operativo por su colaboración para realizar esta investigación.

Al M.I. Francisco Téllez Granados por la revisión técnica del escrito y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo moral y económico al primer autor.

Referencias

- ACI 209R - 92 (Reapproved 1997). *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures*. ACI. Manual of Concrete Practice 2000, Part 1, Materials and General Properties of Concrete.
- Hernández-Castañeda O. (2001). Actualización de ecuaciones de flujo plástico para diversos concretos. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México.
- Mendoza C.J., Carmona C.M., Fuentes G.A. (1995). *Concretos fabricados con arenas y gravas calizas disponibles en el DF*. Informe preparado para la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal. Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Mendoza C.J., Fuentes G.A. y Aire U.C. (1993). *Concretos estructurales con agregados basálticos*. Informe preparado para Grupo Corporativo Interestatal SA de CV. Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Neville A.M. y Brooks J.J. (1998). *Tecnología del concreto*. Traducción de Concrete Technology. Ed. Trillas, México.
- Neville A.M. (1992). *Tecnología del concreto*, traducción de Properties of Concrete. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto AC, México.
- Rico-Rodríguez A. y Del Castillo H. (2000). *La Ingeniería de suelos en las vías terrestres*. Ed. Limusa, México.

Bibliografía sugerida

- ACI 211.1-91 *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. ACI. Manual of Concrete Practice 2000, Part 1, Materials and General Properties of Concrete.
- Aitcin P.C. (2001). The Future of the Cement and Concrete Industry at the Dawn of the Century. Cátedra Cemex. Ponencia sustentada en la Facultad de Ingeniería, UNAM. Abril.
- Aitcin P.C. (1998). *High-Performance Concrete, Modern Concrete Technology* 5. E & F. Spon, Usa & Canada.
- Alexander M.G. (1996). Aggregate and the Deformation Properties of Concrete. *ACI Materials Journal*, V.93, No.6, November-December.
- ASTM Volume 04.02 Concrete and Concrete Aggregates, Annual Book of Astm Standards (1998). American Society for Testing and Materials.
- ASTM Volume 04.03 Cement and Gypsum 1998, Annual Book Of Astm Standards (1998). American Society for Testing and Materials.
- Bazant Z.P. y Baweja. S. (1994). Concrete Creep and Shrinkage Prediction Models for Design Codes. En: *Concrete Technology: New Trends, Industrial Applications*. (Proceeding Of The International RILEM Workshop (26). E & F. Spon, Barcelona, España.
- Cetin A. y Carrasquillo R.L. (1998). High-Performance Concrete: Influence of Coarse Aggregates on Mechanical Properties. *ACI Materials Journal*, V.95, No.3, May-June.
- Collins T.M. (1989). Proportioning High-Strength Concrete to Control Creep and Shrinkage. *ACI Materials Journal*, V.86, No.6, November-December.
- Comisión Federal de Electricidad-Instituto de Ingeniería, UNAM. (1994). *Manual de tecnología del concreto*, Sección 3. Ed. Limusa, México.
- Departamento de Ingeniería Experimental-Secretaría de Recursos Hidráulicos (1970). *Manual de Concreto*. Parte 2. México.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal (1996). *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto del reglamento de construcciones para el Distrito Federal*, Marzo.

- Gardner N.J. y Zhao J.W. (1993). Creep and Shrinkage Revisited. *ACI Materials Journal*, V.90, No.3, May-June.
- Kosmatka S.H. (1999). Concrete Construction for the Next Millenium. Primer Congreso Interamericano del Cemento y del Concreto, Ciudad de México, Septiembre.
- Kosmatka S.H. y Panarese W.C. (1992). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association. Edición y traducción al español del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto AC, México.
- Mendoza Carlos J., Aire U.C., Contreras P. y Fuentes G.A.(1998). *Concretos de alto desempeño con materiales comunes en el Distrito Federal*. Informe preparado para la Secretaria General de Obras del Departamento del Distrito Federal. Instituto de Ingeniería, UNAM, Diciembre, México.
- Nawy E.G. (1988). *Concreto reforzado, un enfoque básico*. Prentice Hall, México.
- Neville A. (2000). Tecnología del concreto, un elemento esencial del diseño estructural. *Construcción y Tecnología*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto AC.
- Neville A. (1997). Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete. *ACI Materials Journal*, V.94, No.1, January-February.
- Neville A.M. (1970). *Creep Of Concrete: Plain, Reinforced and Prestressed*. North Holland Publishing Company. Amsterdam.
- Popovics S. (1990). Analysis of the Concrete Strength Versus Water-Cement Ratio Relationship. *ACI Materials Journal*, V.87, No.5, September-October.
- Ross A.D.(1958). Creep of Concrete Under Variable Stress. *Journal of the American Concrete Institute*, V.29, No.9, Proceedings V. 54, March.

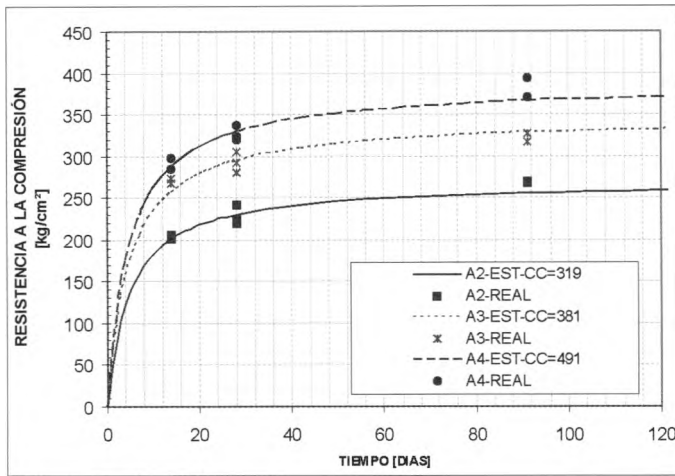


Figura 1. Desarrollo de la resistencia a la compresión de concretos con grava caliza y arena caliza sin lavar

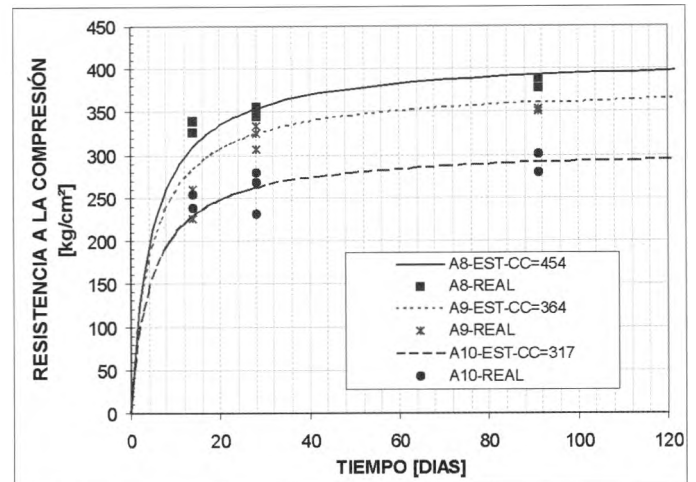


Figura 2. Desarrollo de la resistencia a la compresión de concretos con grava caliza y arena caliza lavada

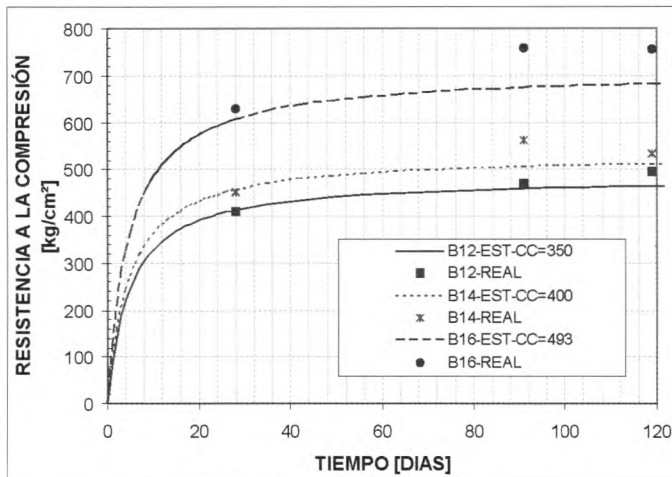


Figura 3. Desarrollo de la resistencia a la compresión de concretos con grava caliza y arena andesita

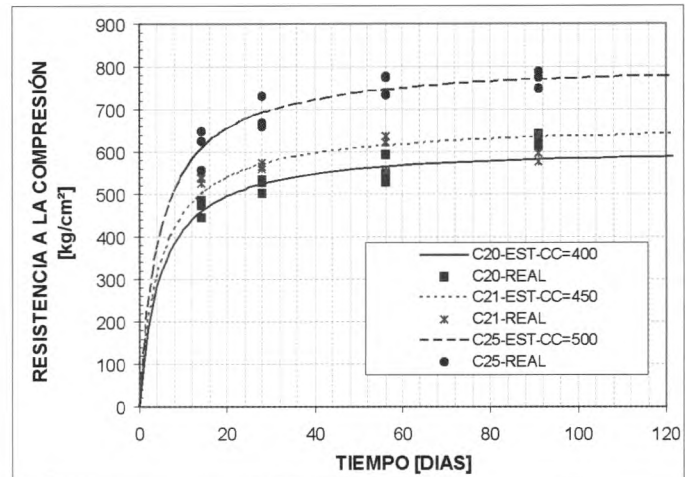


Figura 4. Desarrollo de la resistencia a la compresión de concretos con grava basalto y arena de río

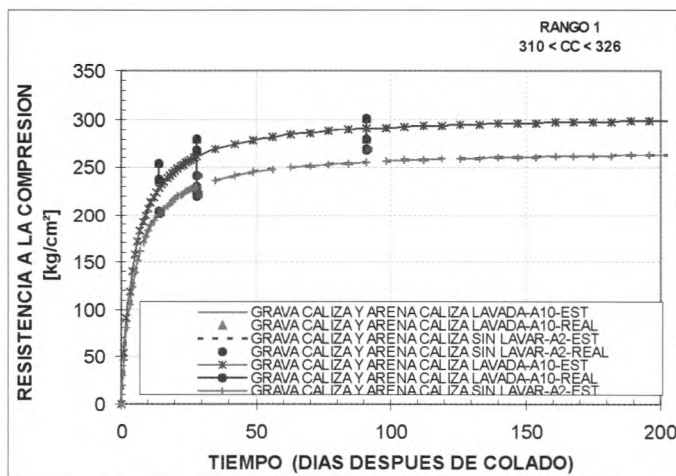


Figura 5. Desarrollo de la resistencia a la compresión de concretos fabricados con diferentes agregados

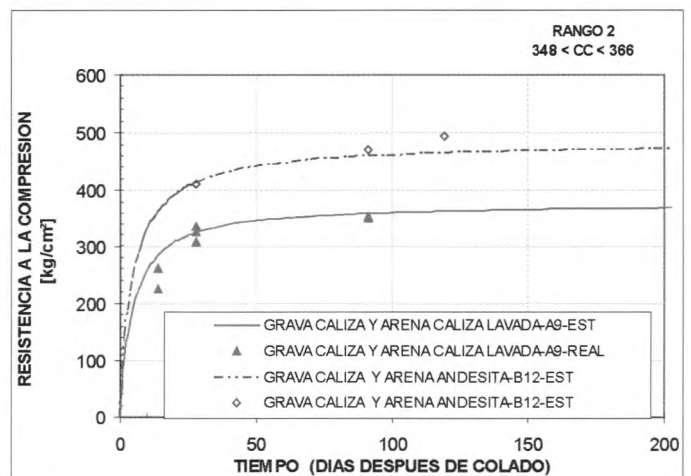


Figura 6. Desarrollo de la resistencia a la compresión de concretos fabricados con diferentes agregados

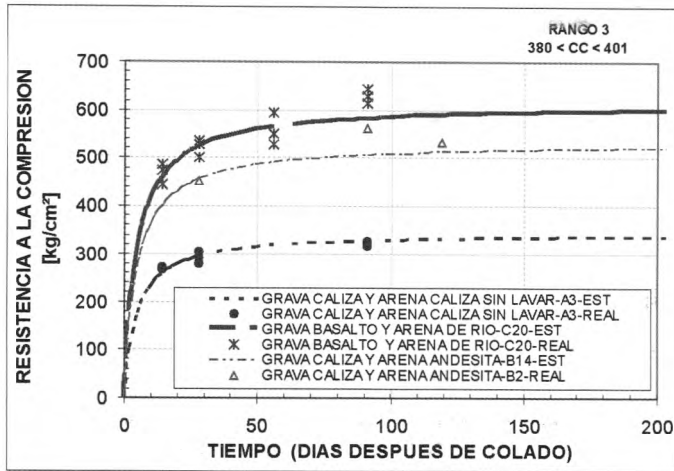


Figura 7. Desarrollo de la resistencia a la compresión de concretos fabricados con diferentes agregados

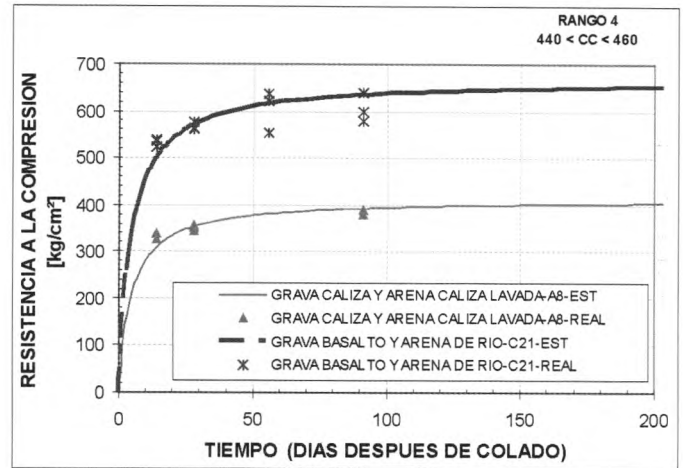


Figura 8. Desarrollo de la resistencia a la compresión de concretos fabricados con diferentes agregados

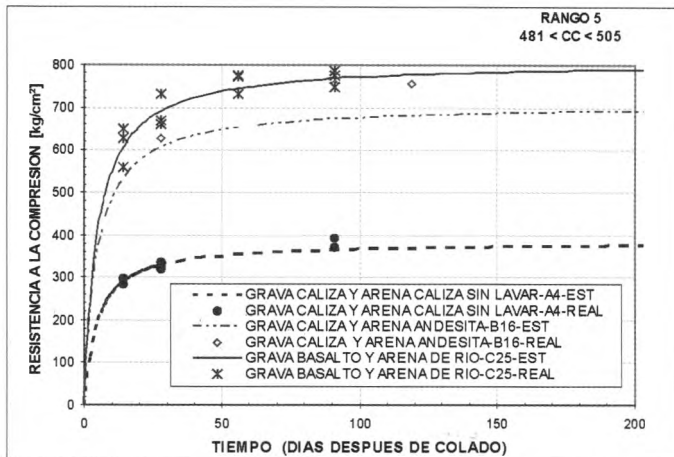


Figura 9. Desarrollo de la resistencia a la compresión de concretos fabricados con diferentes agregados

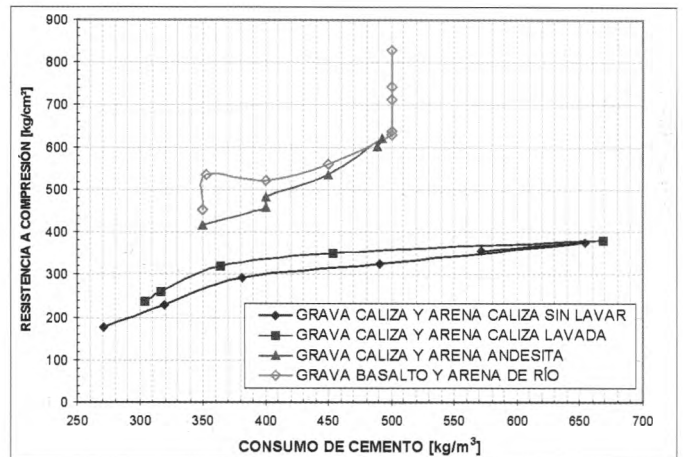


Figura 10. Curva consumo de cemento - resistencia a la compresión para varios agregados

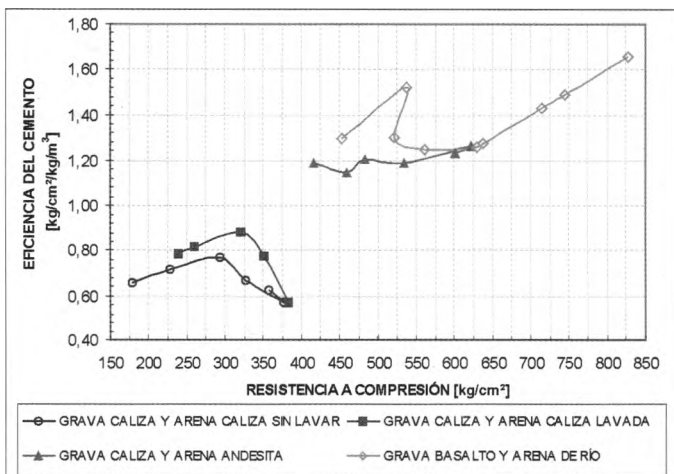


Figura 11. Eficiencia del cemento con el nivel de la resistencia a la compresión para varios agregados

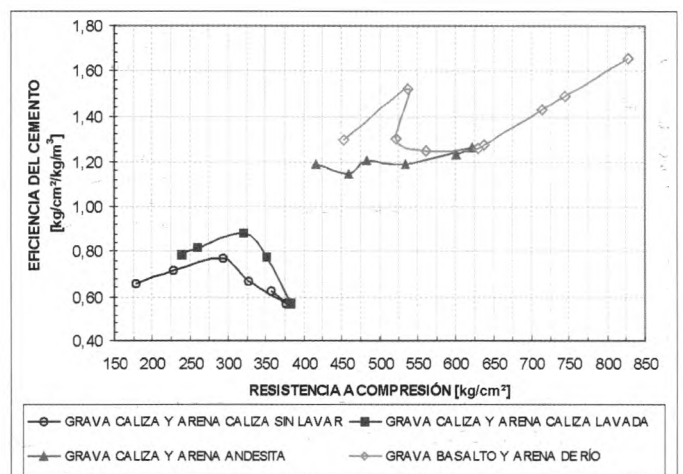
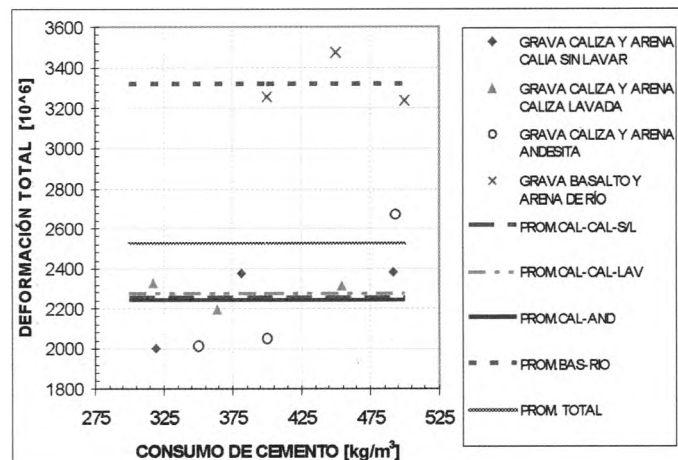
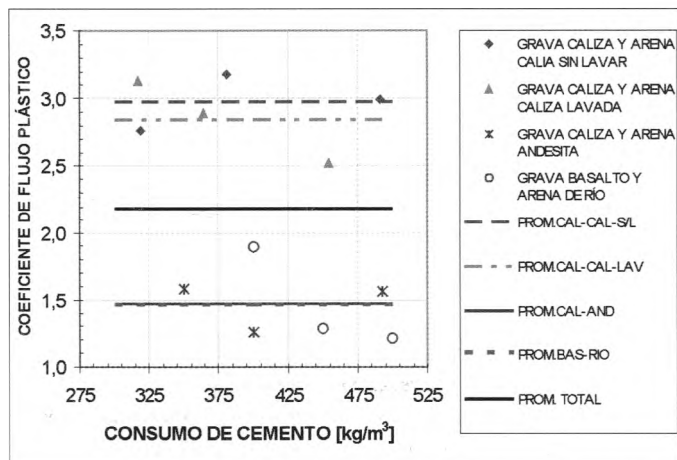
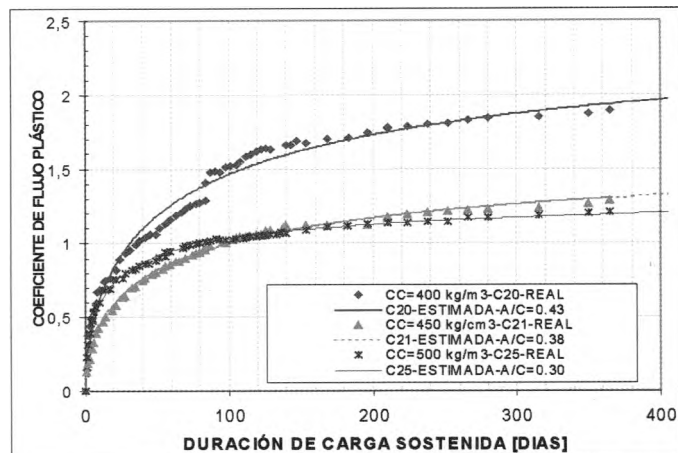
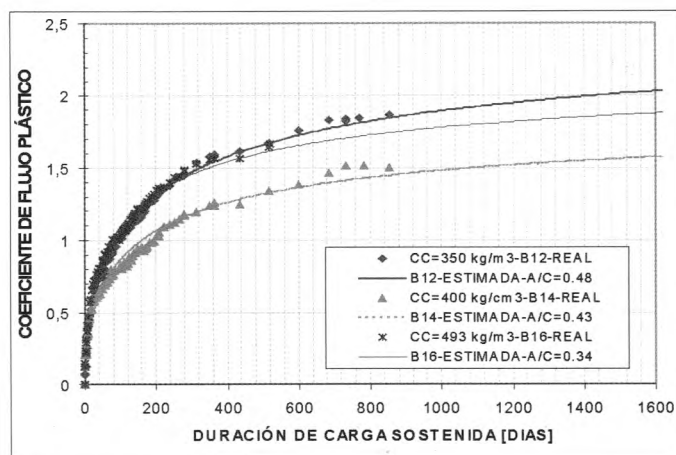
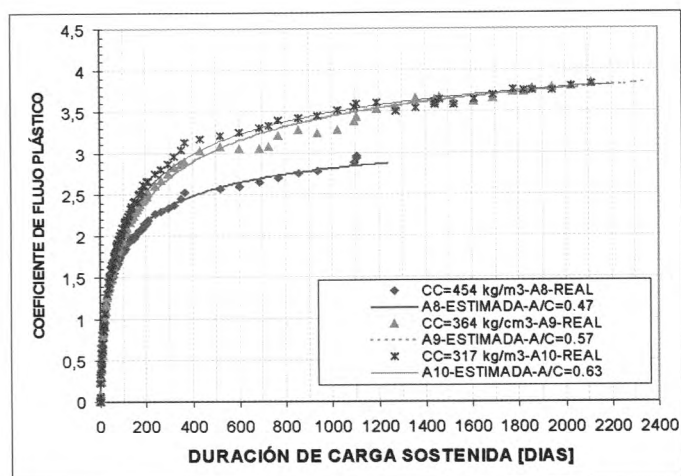
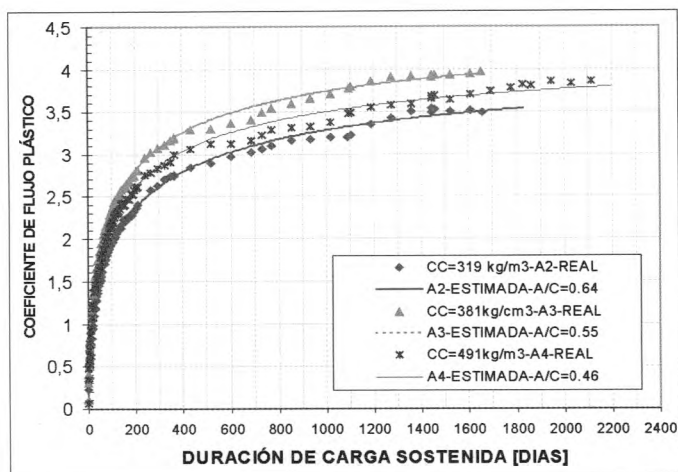


Figura 12. Relación resistencia a compresión - módulo de elasticidad para varios agregados (28 días)



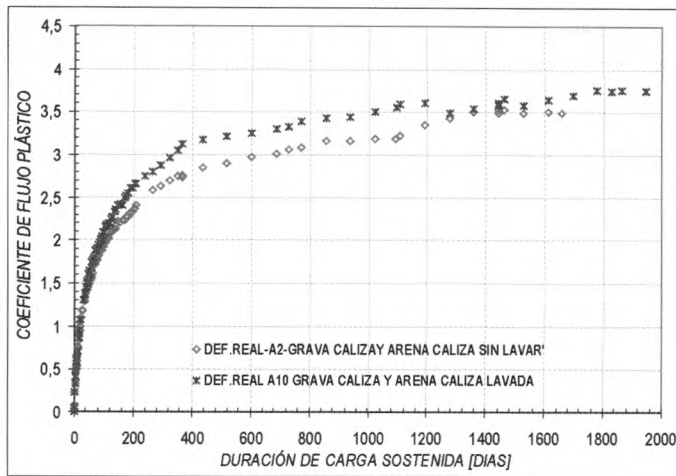


Figura 19. Comparativa de flujo plástico real de concreto con distintos agregados. Intervalo 1, $310 < CC < 326$

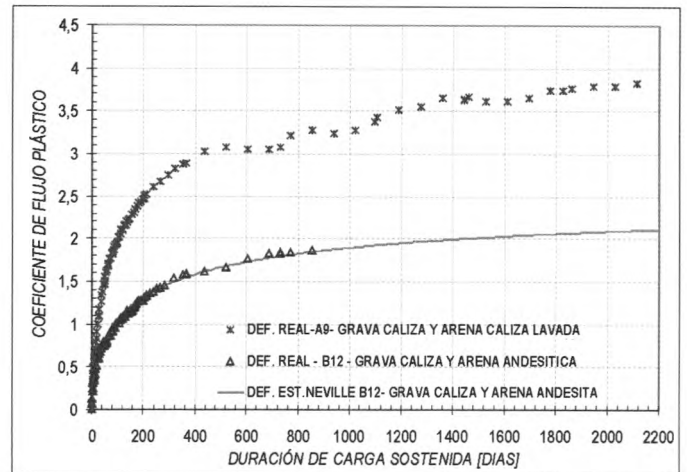


Figura 20. Comparativa de flujo plástico real de concreto con distintos agregados. Intervalo 2, $348 < CC < 366$

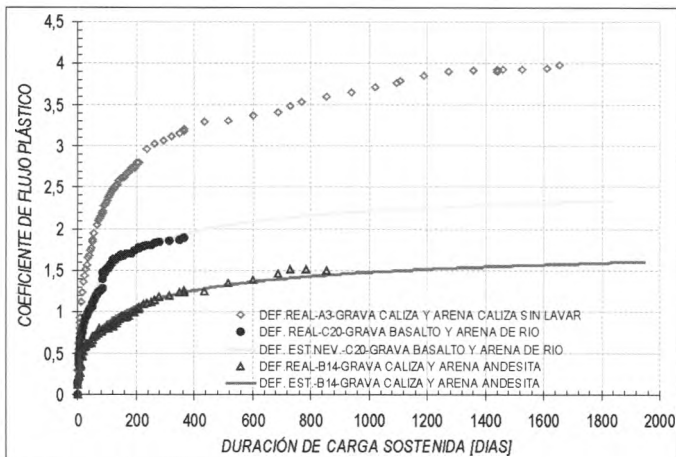


Figura 21. Comparativa de flujo plástico real para concreto con distintos agregados. Intervalo 3, $380 < CC < 401$

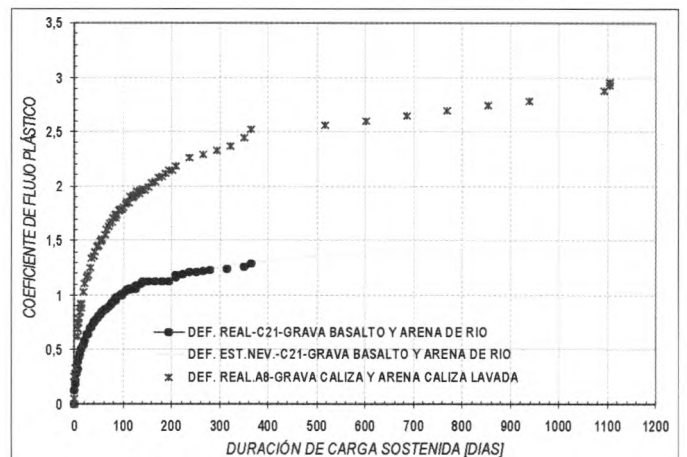


Figura 22. Comparativa de flujo plástico real de concreto con distintos agregados. Intervalo 4, $440 < CC < 460$

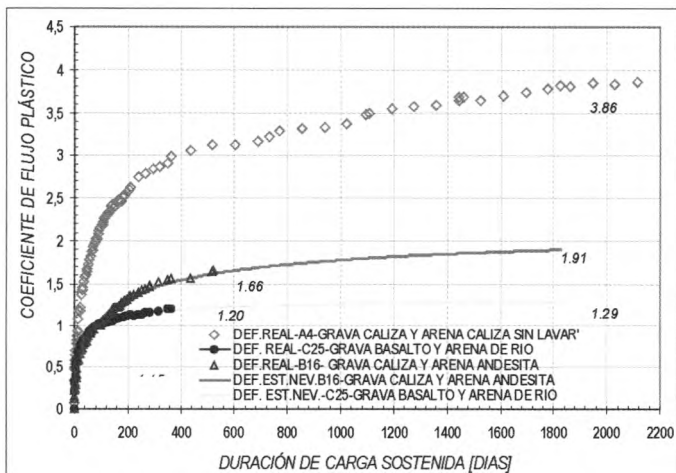


Figura 23. Comparativa de flujo plástico real de concreto con distintos agregados. Intervalo 5, $481 < CC < 505$

Semblanza de los autores

Oscar Hernández-Castañeda. Obtuvo el título de ingeniero civil en la Facultad de Ingeniería, UNAM en el año 2001. Ha colaborado en Pemex Refinación y en la Dirección General de Carreteras Federales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Fue participante del programa Jóvenes hacia la Investigación organizado por la Coordinación de Investigación Científica de la UNAM, donde obtuvo el primer y tercer lugar de informe técnico a nivel licenciatura, en las estancias cortas de 1998 y 1999, respectivamente. Actualmente está realizando la maestría en ingeniería (Construcción) en la División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM. Es becario del CONACYT y del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Alberto Leopoldo Fuentes-González. Es ingeniero civil por la Facultad de Ingeniería, UNAM desde 1977. Actualmente es investigador del Instituto de Ingeniería. Se ha dedicado al estudio de materiales para la industria de la construcción (concreto, ferrocemento, azufre) por más de 25 años. Ha participado en varios proyectos de investigación en el Instituto de Ingeniería para diferentes entidades y dependencias gubernamentales, así como para empresas privadas. Tiene varios artículos publicados y ha presentado una diversidad de ponencias y cursos relacionados con la ingeniería de materiales en México y en el extranjero.