

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



TESIS

“Estudio comparativo sobre los efectos de las adiciones de nano-SiO₂ y humo de sílice en concretos base cemento portland expuestos a altas temperaturas”

**POR
JESÚS FERNANDO LÓPEZ PERALES**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON
ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

DICIEMBRE 2015

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



TESIS

“Estudio comparativo sobre los efectos de las adiciones de nano-SiO₂ y humo de sílice en concretos base cemento portland expuestos a altas temperaturas”

**POR
JESÚS FERNANDO LÓPEZ PERALES**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON
ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

DICIEMBRE 2015

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

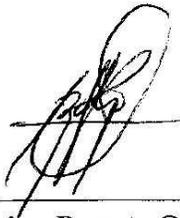
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “**Estudio comparativo sobre los efectos de las adiciones de nano-SiO₂ y humo de sílice en concretos base cemento portland expuestos a altas temperaturas**” realizada por el estudiante Jesús Fernando López Perales, con matrícula 1414889, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

COMITÉ DE TESIS



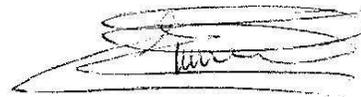
Dra. Ana María Guzmán Hernández

Asesor



Dr. Rodrigo Puente Ornelas

Revisor



Dr. Gerardo Fajardo San Miguel

Revisor



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

DEDICATORIA

*“Estas cosas os he hablado para que en mi tengáis paz. En el mundo tendréis
aflicción; pero confiad, yo he vencido al mundo” (Juan 16:33).*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León y de manera especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la cual soy egresado a nivel licenciatura y por permitirme seguir con mis estudios de posgrado.

Agradezco al CONACYT por la beca otorgada para mis estudios de maestría, con la cual fue posible culminar este trabajo de investigación.

A mi Directora de Tesis, Dra. Ana María Guzmán Hernández por el apoyo brindado, los consejos y ayuda durante todo este tiempo.

De manera especial a mi Co-director de Tesis, Dr. Rodrigo Puente Ornelas por darme ese voto de confianza para llevar a cabo este proyecto de investigación, sus consejos en todo momento, su aporte en cada etapa del proyecto y sobre todo por su gran y valiosa amistad. Así como a las personas que forman parte de su equipo de trabajo, Efraín Martínez y Emir Martínez.

Al Dr. Gerardo Fajardo San Miguel por formar parte del Comité de Tesis como revisor de la misma.

A mi asesor de Tesis durante mi estancia en Madrid, Dra. María Cruz Alonso Alonso, por aceptarme en el Instituto Eduardo Torroja, por sus consejos y aportes para mi trabajo de investigación. Agradezco a todo su equipo de trabajo quien en todo momento me brindo su ayuda: Rocío Jarabo, José Luis García, Mercedes Sánchez, Álvaro Fernández, Nuria González, Daniel Tchangang, Javier Luna, Virtudes Flor-Laguna, Eduardo Valero y Virginia Sánchez.

A las personas que estuvieron conmigo durante mi estancia en el extranjero, quienes fueron parte fundamental en los buenos momentos y también en los momentos difíciles, Daniel Witron, Uriel Costilla, Sandra Zamarripa, Estefanía Rosales y Edna Cárdenas.

A mis compañeros de generación quienes juntos comenzamos este reto y sin duda terminamos llevando con nosotros muchas experiencias y grandes recuerdos. A los Profesores del Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales por aportar de su experiencia para mi crecimiento académico y personal.

Por último quiero agradecer a las personas que han estado conmigo en cada etapa de mi vida y que sin ellos esto no sería posible, a mis padres Yolanda Perales, Jesús López, mis hermanos Laura López, Guillermo López y Ángel López.

INDICE

INDICE	I
LISTA DE TABLAS	VI
NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES	VII
RESUMEN	1
CAPITULO I	2
INTRODUCCION	2
CAPITULO II	6
ESTADO DEL ARTE	6
2.1.- CONGLOMERANTES EN LA CONSTRUCCIÓN	6
2.2.- CEMENTO PORTLAND	7
2.2.1.- Composición básica del cemento portland	9
2.2.2.- Hidratación del cemento portland	11
2.2.3.- Productos de hidratación del cemento portland	13
2.3.- CONCRETO BASE CEMENTO PORTLAND	14
2.4.- USO DE ADICIONES SUPLEMENTARIAS	16
2.4.1.- Residuo nanosílice geotérmica	18
2.5.- DURABILIDAD DEL CONCRETO	20
2.5.1.- Durabilidad del concreto expuesto a altas temperaturas	21
2.5.1.1.- Cambios en las propiedades mecánicas	22
2.5.1.2.- Cambios en las propiedades físicas	23
2.5.1.3.- Cambios en las propiedades químicas	23
2.5.2.- Efecto de las adiciones suplementarias en concretos expuestos a altas temperaturas	24

2.5.3.- Efecto de la adición de fibras en concretos expuestos a altas temperaturas	27
2.5.4.- Uso del nanopartículas de sílice en concretos expuestos a altas temperaturas	28

CAPITULO III **30**

HIPOTESIS	30
OBJETIVO GENERAL	30
OBJETIVOS ESPECIFICOS	30

CAPITULO IV **32**

DESARROLLO EXPERIMENTAL	32
4.1.- INTRODUCCIÓN	32
4.2.- MATERIAS PRIMAS Y SU CARACTERIZACIÓN	32
4.2.1.- ACONDICIONAMIENTO DEL RESIDUO NANOSÍLICE GEOTÉRMICA	33
4.2.1.1.- LAVADO DEL RESIDUO NANOSÍLICE GEOTÉRMICA	33
4.2.1.2.- SECADO, TAMIZADO Y HOMOGENEIZADO DEL RESIDUO NANOSÍLICE GEOTÉRMICA	34
4.2.2.- CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES CEMENTANTES	34
4.2.2.1.- COMPOSICIÓN QUÍMICA	34
4.2.2.2.- COMPOSICIÓN MINERALÓGICA	34
4.2.2.3.- PROPIEDADES FÍSICAS	35
4.2.3.- CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	35
4.3.- ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO	35
4.4.- RÉGIMEN DE CALENTAMIENTO	36
4.5.- CARACTERIZACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO PREVIO AL RÉGIMEN DE CALENTAMIENTO	37
4.5.1.- DETERMINACIÓN DEL PESO DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO	37
4.5.2.- DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO	38
4.6.- CARACTERIZACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO POSTERIOR AL RÉGIMEN DE CALENTAMIENTO	39
4.6.1.- ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO	39
4.6.2.- DIFRACCIÓN DE RAYOS X	40
4.6.3.- MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	40

CAPITULO V **42**

RESULTADOS Y DISCUSIONES	42
5.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	42
5.2. MATERIALES CEMENTANTES	42
5.2.1. Composición química	42
5.2.2. Composición mineralógica	42
5.2.3. Propiedades físicas	43
5.3. AGREGADOS	44
5.3.1. Composición mineralógica	44
5.3.2. Distribución granulométrica	45
5.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS ESPECÍMENES PREVIO AL RÉGIMEN DE CALENTAMIENTO	45
5.4.1. Pérdida de peso de los especímenes sometidos a altas temperaturas	45
5.4.2. Velocidad de Pulso de Ultrasonidos (UPV)	48
5.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS ESPECÍMENES POSTERIOR AL RÉGIMEN DE CALENTAMIENTO	50
5.5.1. Análisis Termogravimétrico Diferencial (ATD)	50
5.5.2. Difracción de Rayos X (DRX)	56
5.5.3. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB-retrodispersados)	58
5.5.4. Análisis EDS	63

CAPITULO VI **65**

CONCLUSIONES	65
---------------------	-----------

BIBLIOGRAFIA **67**

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.- EDIFICIOS AFECTADOS POR LA ACCIÓN DEL FUEGO: A) CASINO ROYAL, (MÉXICO), B) THE ADDRESS, (EMIRATOS ÁRABES UNIDOS).	3
FIGURA 2.- CONSTRUCCIONES ANTIGUAS: A) PIRÁMIDES DE GIZEH, (EGIPTO), B) PALACIO DE CRESA, (GRECIA), C) PANTEÓN ROMANO, (ITALIA), D) COLISEO ROMANO, (ITALIA).	7
FIGURA 3.- ESTRUCTURAS DE CONCRETO: A) ESTRUCTURAS ANTIGUAS, B) ESTRUCTURAS MODERNAS	15
FIGURA 4.- MATERIALES SUPLEMENTARIOS: A) CENIZA VOLANTE, B) ESCORIA GRANULADA DE ALTO HORNO, C) HUMO DE SÍLICE	17
FIGURA 5.- PLANTAS GEOTÉRMICAS EN MÉXICO: A) UBICACIÓN DE LAS PRINCIPALES PLANTAS GEOTÉRMICAS, B) PLANTA CERRO PRIETO, C) PLANTA CERRO PRIETO	19
FIGURA 6.- HORNO ELÉCTRICO UTILIZADO PARA EL CALENTAMIENTO DE LOS ESPECÍMENES	37
FIGURA 7.- RÉGIMEN DE CALENTAMIENTO	37
FIGURA 8.- DETERMINACIÓN DEL PESO DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO.....	38
FIGURA 9.- EQUIPO UTILIZADO PARA VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS	38
FIGURA 10.- EQUIPO UTILIZADO PARA ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO	39
FIGURA 11.- EQUIPO UTILIZADO PARA ANÁLISIS DRX	40
FIGURA 12.- EQUIPO UTILIZADO PARA ANÁLISIS MEB.....	41
FIGURA 13.- DRX DE LOS MATERIALES CEMENTANTES EMPLEADOS	43
FIGURA 14.- DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA DE LOS MATERIALES CEMENTANTES	43
FIGURA 15.- DRX DE LOS AGREGADOS EMPLEADOS	44
FIGURA 16.- DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS AGREGADOS EMPLEADOS.....	44
FIGURA 17.- PÉRDIDA DE PESO (%) A DIFERENTES TEMPERATURAS	46
FIGURA 18.- DAÑO SUPERFICIAL DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO CPC100 Y CPC80/NSG20	47
FIGURA 19.- VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS RELATIVA	48

FIGURA 20.- MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO RELATIVO	49
FIGURA 21.- TG/DTG ESPÉCIMEN CPC100 INICIAL	51
FIGURA 22.- TG/DTG ESPÉCIMEN CPC80/NSG20 INICIAL.....	51
FIGURA 23.- PÉRDIDA DE PESO DE LOS ESPECÍMENES INICIALES	52
FIGURA 24.- AMPLIACIÓN PÉRDIDA DE PESO DE LOS ESPECÍMENES INICIALES	53
FIGURA 25.- DTG ESPÉCIMEN CPC100 INICIAL Y A DIFERENTES Tc.....	53
FIGURA 26.- AMPLIACIÓN DTG ESPÉCIMEN CPC100 INICIAL Y A DIFERENTES Tc	54
FIGURA 27.- DTG ESPÉCIMEN CPC80/NSG20 INICIAL Y A DIFERENTES Tc.....	55
FIGURA 28.- AMPLIACIÓN DTG ESPÉCIMEN CPC80/NSG20 INICIAL Y A DIFERENTES Tc	55
FIGURA 29.- DIFRACTOGRAMA DE LOS ESPECÍMENES CPC100 INICIAL Y A DIFERENTES Tc	56
FIGURA 30.- DIFRACTOGRAMA DE LOS ESPECÍMENES CPC80/NSG20 INICIAL Y A DIFERENTES Tc.....	57
FIGURA 31.- MEB DE LOS ESPECÍMENES INICIALES A 350X.....	58
FIGURA 32.- MEB DE LOS ESPECÍMENES CPC100 A 350X Y A DIFERENTES Tc.....	59
FIGURA 33.- MEB DE LOS ESPECÍMENES CPC100 (ITZ) A 1000X	60
FIGURA 34.- MEB DE LOS ESPECÍMENES CPC80/NSG20 A 350X Y A DIFERENTES Tc.....	61
FIGURA 35.- MEB DE LOS ESPECÍMENES CPC80/NSG20 (ITZ) A 1000X.....	62
FIGURA 36.- ANÁLISIS EDS DE LOS ESPECÍMENES (A) CPC100, (B) CPC80/NSG20, (C) CPC70/HS30	63

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.- CLASIFICACIÓN CEMENTO PORTLAND NORMA ASTM C-150	8
TABLA 2.- CLASIFICACIÓN CEMENTO PORTLAND NORMA NMX-C-414-ONNCCE	8
TABLA 3.- CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DEL CEMENTO NORMA NMX-C-414-ONNCCE	9
TABLA 4.- CLASE RESISTENTE DEL CEMENTO NORMA NMX-C-414-ONNCCE.....	9
TABLA 5.- CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DEL CEMENTO NORMA NMX-C-414-ONNCCE	10
TABLA 6.- PRINCIPALES REACCIONES DE LA HIDRATACIÓN DE LOS COMPUESTOS DEL CEMENTO PORTLAND	14
TABLA 7.- VENTAJAS OBTENIDAS AL UTILIZAR PUZOLANAS EN LA ELABORACIÓN DE CONCRETOS	18
TABLA 8.- CLASIFICACIÓN Y EFECTO DE LOS AGENTES PERJUDICIALES EN LA DURABILIDAD DEL CONCRETO	21
TABLA 9.- TRANSFORMACIONES QUÍMICAS DEL CONCRETO EXPUESTO A ALTAS TEMPERATURAS	24
TABLA 10.- DOSIFICACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO	36
TABLA 11.- DESIGNACIÓN Y PROPORCIÓN DE MEZCLAS	36
TABLA 12.- COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS MATERIALES CEMENTANTES.....	42

NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES

Abreviación	Nomenclatura	Estequiometría
CP	Cemento Pórtland	-
CPC	Cemento Pórtland Compuesto	-
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	-
CO ₂	Dióxido de Carbono	-
NSG	Residuo Nanosílice Geotérmica	-
HS	Humo de Sílice	-
UPV	Velocidad de Pulso de Ultrasonidos	-
ATD	Análisis Térmico Diferencial	-
DRX	Difracción de Rayos X	-
MEB	Microscopía Electrónica de Barrido	-
EDS	Espectroscopía por Dispersión de Energías	-
-	Yeso	CaSO ₄ • 2H ₂ O
-	Semihidrato	CaSO ₄ • ½ H ₂ O
C	Óxido de Calcio	CaO
S	Dióxido de Silicio	SiO ₂
A	Dióxido de Aluminio	Al ₂ O ₃
F	Óxido de Hierro	Fe ₂ O ₃
C ₃ S	Silicato Tricálcico	3CaO • SiO ₂
C ₂ S	Silicato Dicálcico	2CaO • SiO ₂
C ₃ A	Aluminato Tricálcico	3CaO • Al ₂ O ₃
C ₄ AF	Ferro-aluminato Tetracálcico	4CaO • Al ₂ O ₃ • Fe ₂ O ₃
AF _t	Etringita (Trisulfoaluminato de Calcio Hidratado)	3CaO • Al ₂ O ₃ • 3CaSO ₄ • 32H ₂ O
AF _m	Monosulfato	3CaO • Al ₂ O ₃ • CaSO ₄ • 12H ₂ O
-	Óxido de Magnesio	MgO
-	Óxido de Potasio	K ₂ O
-	Óxido de Sodio	Na ₂ O
CC	Carbonato de Calcio	CaCO ₃
CSH	Silicato de Calcio Hidratado	Sin estequiometría exacta
CH	Hidróxido de Calcio	Ca(OH) ₂
NSG	Residuo Nanosílice Geotérmica	-
EAH	Escoria de Alto Horno Granulada	-
-	Óxido de Azufre	SO ₃
PI	Pérdida por Ignición	-
Tc	Temperatura Crítica	-
<i>E</i>	Módulo Elástico Dinámico	-
ρ	Densidad	-

NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES

Abreviación	Nomenclatura	Estequiometría
ν	Coefficiente de Poisson	-
CA	Cemento Anhído	-
PI	Producto Interno	-
PE	Producto Externo	-
Ag	Agregado	-

RESUMEN

El concreto es un material de construcción que ha sido utilizado desde la antigüedad y que incluso hoy en día sigue siendo un material de enorme consumo debido principalmente a su facilidad de fabricación y bajo costo, no requiere de gran tecnología y presenta buenas propiedades mecánicas y de durabilidad además de sus múltiples aplicaciones. Por otra parte, durante el proceso de producción del clinker de cemento portland con el cual se fabrica el concreto, se emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero, principalmente CO_2 , por tal motivo, la tendencia actual en el ámbito de la construcción es el de incorporar nuevos materiales y/o residuos industriales con el fin de mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto además de colaborar a reducir el impacto ambiental. Al hablar de materiales de construcción, un aspecto de suma importancia es la durabilidad. La durabilidad del concreto involucra estabilidad, resistencia mecánica y físico-química; sin embargo, debido a factores que pueden ser de carácter accidental o de diseño, cuando el concreto se ve sometido a altas temperaturas sufre cambios en sus propiedades y características los cuales pueden poner en riesgo la estabilidad de la estructura de concreto. Por tal motivo, es importante estudiar y entender los procesos de degradación más relevantes que ocurren en la microestructura del concreto cuando éste es sometido al efecto de las altas temperaturas. Para ello, en esta investigación se estudiaron concretos que fueron elaborados utilizando cemento portland compuesto (CPC) y adiciones parciales de residuo nanosílice geotérmica (NSG) y humo de sílice (HS) sometidos a un régimen de calentamiento lento en un horno eléctrico donde la temperatura fue aumentando hasta alcanzar la temperatura crítica. La temperatura crítica se mantuvo constante durante dos horas y posteriormente, el enfriamiento se realizó dentro del horno eléctrico. Al término del régimen de calentamiento, la degradación de la microestructura del concreto se evaluó mediante velocidad de ultrasonidos (UPV), análisis térmico diferencial (ATD), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB-retrodispersados). Los resultados demuestran que la pérdida de masa y la reducción en la velocidad de ultrasonidos es mayor para los especímenes con adiciones (NSG y HS) en comparación con el espécimen de referencia, elaborado 100% con CPC. En el análisis termogravimétrico se observó la formación de portlandita y carbonato de calcio durante la etapa de enfriamiento y por lo tanto, presenta menor cristalinidad y se descompone a temperaturas menores, como pudo corroborarse en los difractogramas. En las imágenes MEB se pudo observar una mayor degradación en la microestructura de los especímenes con adiciones (interface agregado-pasta de cemento), confirmando que el concreto adicionado con NSG es más susceptible a la acción de altas temperaturas en comparación con el espécimen de referencia y el adicionado con HS.

CAPITULO I

INTRODUCCION

El concreto es uno de los materiales de construcción más extensamente empleado debido a su gran versatilidad. Es un material que fácilmente puede fabricarse, no requiere gran tecnología, es relativamente económico, presenta una alta resistencia mecánica y gran durabilidad además de tener la capacidad de adoptar la forma del molde.

El concreto es básicamente la mezcla de dos componentes: pasta y agregados. La pasta, compuesta generalmente de cemento portland y agua, une a los agregados para formar una masa que endurece como una roca debido a las reacciones químicas entre el cemento y el agua. El cemento portland (CP) por tanto, es un material esencial para la fabricación de estructuras de concreto como edificios, puentes, presas, etc. La demanda y producción mundial de clinker de CP está en constante aumento, lo que implica la emisión de grandes cantidades de gases de efecto invernadero, principalmente de CO₂ a la atmósfera ya que el proceso de producción requiere una gran cantidad de energía eléctrica además de la explotación de recursos naturales no renovables (materias primas y combustibles fósiles) ^[1, 2]. Se estima que al producir 1 tonelada de CP se emite CO₂ a la atmósfera en cantidades muy similares (900 kg) ^[3]. Por lo tanto, con el fin de reducir el impacto ambiental y las emisiones de CO₂, las investigaciones tanto en el ámbito académico como en la industria se han enfocado en incorporar al proceso de producción nuevos materiales y/o residuos industriales como sustitutos parciales de cemento portland, los cuales a su vez mejoran las propiedades y durabilidad del concreto ^[4, 5].

El concreto se caracteriza por tener propiedades tales como una buena trabajabilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad. La durabilidad del concreto puede definirse como la acción de permanecer en servicio a través del tiempo e involucra estabilidad, resistencia mecánica y resistencia química ^[6]. El concreto durante su vida en servicio y por diversos factores que pueden ser de carácter accidental (fallos en instalaciones eléctricas, escape de combustibles, entre otros) o bien de diseño, se ve sometido a altas temperaturas. A pesar de que el concreto es considerado como un material que presenta buen comportamiento cuando es sometido a altas temperaturas, la exposición al fuego es sin duda uno de los procesos más destructivos al que puede ser sometido una estructura de concreto durante su vida útil ^[7]. Por lo tanto, estudiar el comportamiento de una estructura de concreto después de haber sido sometida a altas temperaturas puede proporcionar criterios de diseño básicos que podrían permitir evacuar a las personas antes de que una estructura colapse.

Durante los últimos años se han registrado incendios en edificios causando pérdidas humanas además de daños materiales en los cuales los costos de reparación y mantenimiento se elevan considerablemente. El incendio de la Guardería ABC en Hermosillo, Sonora (2009) y el incendio del Casino Royal en Monterrey, Nuevo León (2011) son algunos ejemplos de las tragedias registradas en los últimos años en México. El incendio ocurrido en uno de los rascacielos más importantes de Dubái (2015), es de los más recientes y del cual se siguen investigando las causas que lo originaron y la magnitud de los daños (**Figura 1**).



Figura 1.- Edificios afectados por la acción del fuego: A) Casino Royal, (México), B) The Address, (Emiratos Árabes Unidos).

El efecto de las altas temperaturas puede generar alteraciones en la estructura interna del concreto (cambios físico-químicos) que afecta sus propiedades, como es el caso de la reducción en resistencia a la compresión y módulo de elasticidad además de presentar agrietamiento y cambios de color en la superficie ^[8]. El daño que se produce en el concreto dependerá principalmente de la velocidad de calentamiento, la temperatura máxima alcanzada, del tiempo de exposición, de las condiciones de enfriamiento y de las propiedades de los materiales componentes ^[9].

Como se mencionó anteriormente, el uso de subproductos o residuos industriales como sustituto parcial del cemento portland para la elaboración de concretos ha sido una práctica muy común debido a los beneficios medioambientales que otorga además del incremento en las propiedades mecánicas, físico-químicas y de durabilidad ^[10].

En Baja California, México, se ubica la planta geotérmica “Cerro Prieto” la cual, tiene por objetivo el producir electricidad de bajo costo; sin embargo, en el proceso también se genera un residuo industrial compuesto principalmente de sílice amorfa con tamaño de partícula del orden nanométrico (~40 nm).

Este residuo nanosílice geotérmica (NSG) ha sido objeto de estudio en la elaboración de morteros, pastas, geopolímeros y concretos ^[11, 12]. Los resultados obtenidos en las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto elaborado con cemento portland y adiciones de NSG, indican que este residuo es un material promisorio como sustituto parcial de cemento portland con beneficios similares a los obtenidos por el humo de sílice (HS) ^[13].

Si bien es cierto que los efectos que producen las nanopartículas de sílice y el humo de sílice cuando son adicionados al concreto se han estudiado ampliamente durante los últimos años, en la literatura se encuentran escasas investigaciones en las que se compara el efecto de la incorporación de partículas de nanosílice y humo de sílice al concreto cuando es sometido a altas temperaturas ^[14].

Un ejemplo de ello es la investigación de Morteza y colaboradores, donde estudiaron el efecto producido por las altas temperaturas en concretos de alta resistencia con adiciones de nanosílice y humo de sílice sobre la resistencia a la compresión y tensión. Los autores concluyen que la nanosílice incrementa la resistencia a la compresión y tensión residual mientras que el desprendimiento explosivo (spalling) y la pérdida de masa disminuyen a medida que la permeabilidad se incrementa ^[15].

Por tal motivo, esta investigación se enfocó en evaluar los procesos de degradación más relevantes que se producen en la microestructura del concreto cuando se expone a altas temperaturas (350°C, 550°C y 750°C), haciendo una comparación entre el concreto con adiciones (residuo nanosílice geotérmica y humo de sílice) y el concreto sin adiciones, fabricado con cemento portland compuesto (CPC).

La investigación por tanto, se llevo a cabo de la siguiente manera:

- En el capítulo 2 se realizó la revisión bibliográfica enfocada principalmente en la elaboración de concretos con sustituciones parciales de cemento portland por materiales puzolánicos y residuos industriales. Se mencionan los beneficios que se pueden obtener en las propiedades mecánicas y de durabilidad al utilizar materiales de reemplazo y se realiza un análisis detallado de los procesos de degradación más relevantes que ocurren en la microestructura del concreto cuando es sometido a altas temperaturas.
- En el capítulo 3 se plantea la hipótesis elaborada en base a la revisión bibliográfica y se describen los objetivos de la investigación (objetivo general y específicos).
- En el capítulo 4 se incluye el desarrollo experimental, los materiales y variables involucradas, métodos y equipo de laboratorio que se utilizó para poder llevar a

cabo la investigación. También se describen las diferentes técnicas de caracterización empleadas durante la investigación, las cuales son: velocidad de ultrasonidos (UPV), análisis térmico diferencial (ATD), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB-retrodispersados).

- En el capítulo 5 se mencionan los resultados obtenidos durante la experimentación y se realiza una discusión detallada de los mismos, incluyendo la caracterización inicial y cada una de las técnicas de caracterización antes mencionadas.
- Por último, en el capítulo 6 se incluyen las conclusiones finales obtenidas del tema de investigación.

CAPITULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1.- Conglomerantes en la construcción

El conglomerante, por definición es un material que tiene la capacidad de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efecto de transformaciones químicas que originan nuevos compuestos. A través del tiempo, los conglomerantes han sido parte importante en el ámbito de la construcción y entre los más utilizados se encuentran el yeso, la cal y el cemento ^[16]. Los vestigios demuestran que los egipcios emplearon morteros de yeso y cal en sus construcciones monumentales. Hacia el año 500 A.C. los griegos utilizaron mezclas de caliza calcinada, agua y arena para su empleo como morteros. Sin embargo, fueron los romanos quienes dieron un paso importante al descubrir un cemento que fabricaron al mezclar cenizas volcánicas con cal viva, realizando obras de tipo mortero/concreto antes del año 300 A.C. En Puzzuoli se encontraba un depósito de estas cenizas y de aquí que se le dio el nombre de cemento de puzolana ^[17]. En la **Figura 2** se muestran algunas de las construcciones más antiguas elaboradas por los egipcios, griegos y romanos.

El yeso, es un conglomerante producto de la cocción de la piedra de yeso o aljez, el cual una vez mezclado con agua y en determinadas proporciones, es capaz de fraguar en el aire. Este yeso se denomina sulfato de calcio hemihidratado o semihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$). Sus principales aplicaciones incluyen: conglomerante para unir piezas, molduras, escayolas, recubrimiento de muros y como aislante ^[18].

La cal, es un ligante cuyos principales constituyentes son óxidos e hidróxidos de calcio, magnesio, silicio, aluminio y hierro. La diferencia entre cal aérea y cal hidráulica reside en que la adición de agua en la cal aérea se utiliza para favorecer el amasado sin intervenir en ninguna reacción química, mientras que en la cal hidráulica produce reacciones químicas que favorecen el endurecimiento de la misma. Sus principales aplicaciones incluyen: ligante de morteros (morteros de reparación), enlucidos, revocos y estabilización de arcillas ^[18].

Pero de todos los conglomerantes hidráulicos, el cemento portland y sus derivados son sin duda los más empleados en la construcción y de mayor producción en el mundo, esto debido a que están formados básicamente por mezclas de caliza, arcilla y yeso que son minerales muy abundantes en la naturaleza, tienen un precio relativamente bajo si se

comparan con otros materiales y además presentan buenas propiedades de resistencia y durabilidad. El cemento portland, por tanto, es un material que ha sido ampliamente utilizado en todo el mundo en estructuras que pueden ser edificios, puentes, túneles, presas, fábricas, pavimentos, entre otros ^[19].

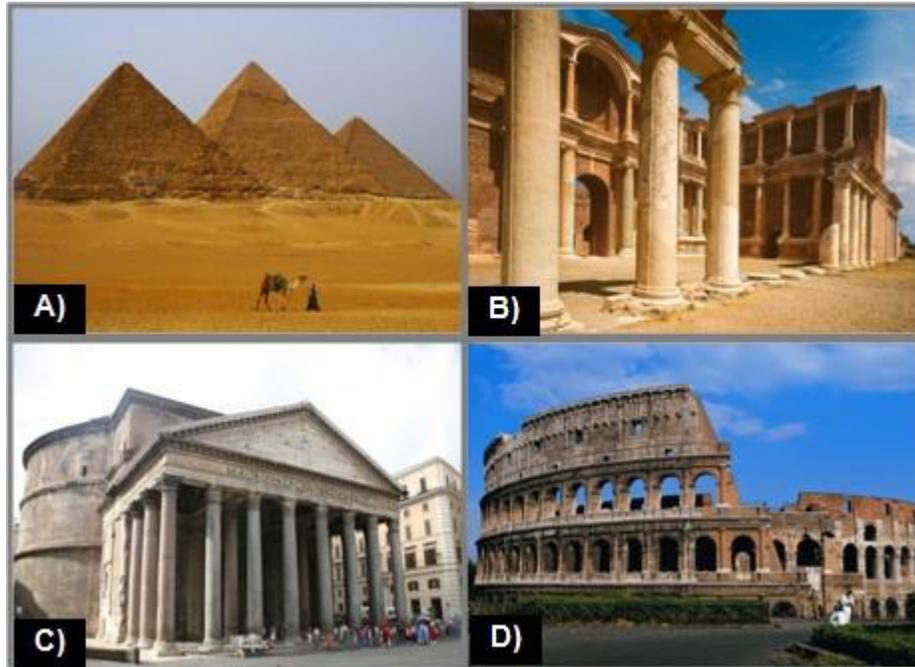


Figura 2.- Construcciones antiguas: A) Pirámides de Gizeh, (Egipto), B) Palacio de Cresa, (Grecia), C) Panteón Romano, (Italia), D) Coliseo Romano, (Italia).

2.2.- Cemento portland

Al mezclar cemento con agua y agregados, se forma una masa moldeable que al fraguar forma un elemento rígido y resistente al cual se le conoce como concreto. Existen muchos tipos de concreto basados en distintos cementos, sin embargo, el concreto de cemento portland es uno de los más extendidos alrededor del mundo.

El cemento portland fue patentado en 1824 por Joseph Aspdin y su nombre se debe a los acantilados de piedra caliza de la isla Portland, en Inglaterra ^[20]. El cemento portland, es aquel que se obtiene por la mezcla de materias primas que consisten principalmente en un material calcáreo y otro arcilloso, además de la adición de otros materiales como puede ser el óxido de hierro, el cual se agrega a la mezcla con la finalidad de reducir la temperatura de clinkerización.

La mezcla se introduce al horno hasta fundirse a la temperatura de clinkerización (1400°C - 1650°C) obteniendo un producto que se conoce como clinker de cemento portland, durante la etapa de molido se añade una pequeña cantidad de yeso para regular el tiempo de fraguado y el resultado es un polvo fino al cual se le conoce como cemento portland ^[17].

La norma ASTM C-219 define al cemento portland como un cemento hidráulico (fragan y endurecen por la reacción química con el agua) producido por la pulverización del clinker de cemento portland y que usualmente contiene sulfato de calcio ^[21].

La norma ASTM C-150 clasifica a los cementos en ocho diferentes tipos: I, IA, II, IIA, III, IIIA, IV y V, de los cuales el tipo I y II generalmente son los más utilizados en las construcciones que emplean cemento portland. La **Tabla 1** muestra la clasificación de los ocho tipos de cemento portland de acuerdo a la norma ASTM C-150 ^[22].

Tabla 1.- Clasificación cemento portland norma ASTM C-150

Tipo	Denominación
I	Normal
IA	Normal con aire incluido
II	Moderada resistencia a los sulfatos
IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido
III	Alta resistencia inicial (temprana)
IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido
IV	Bajo calor de hidratación
V	Alta resistencia a los sulfatos

Tabla 2.- Clasificación cemento portland norma NMX-C-414-ONNCCE

Tipo	Denominación
CPO	Cemento portland ordinario
CPP	Cemento portland puzolánico
CPEG	Cemento portland con escoria granulada de alto horno
CPC	Cemento portland compuesto
CPS	Cemento portland con humo de sílice
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno

Por otra parte, la norma mexicana NMX C-414-ONNCCE define al cemento hidráulico como un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava, asbesto u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad.

La norma mexicana clasifica a los cementos en seis diferentes tipos de acuerdo a las materias primas que lo forman, como se muestra en la **Tabla 2**. Según las necesidades del proyecto, los cementos pueden requerir de una o más características especiales, mismas que se mencionan en la **Tabla 3** y en base a su resistencia, se clasifican de acuerdo a lo señalado en la **Tabla 4**, donde la “R” hace referencia a la resistencia inicial que debe cumplir el cemento a la edad de 3 días ^[23].

Tabla 3.-Características especiales del cemento norma NMX-C-414-ONNCCE

Nomenclatura	Característica Especial
RS	Resistente a los sulfatos
BRA	Baja reactividad álcali-agregado
BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

Tabla 4.- Clase resistente del cemento norma NMX-C-414-ONNCCE

Clase Resistente	Resistencia a compresión (N/mm²)		
	Mínimo a 3 días	Mínimo a 28 días	Máximo
20	-	20	40
30	-	30	50
30R	20	30	50
40	-	40	-
40R	30	40	-

2.2.1.- Composición básica del cemento portland

Las materias primas utilizadas para la fabricación del cemento portland consisten principalmente en CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃. Estos materiales interactúan entre sí dentro del horno formando compuestos químicos complejos.

Dentro del horno, se reestructura la composición molecular y se producen cuatro compuestos principales además de otros compuestos menores que se encuentran casi en su totalidad en estado cristalino, pudiéndose encontrar de un 2% a 12% de ellos en estado amorfo ^[19]. La **Tabla 5** enlista los compuestos principales, su composición y abreviatura de acuerdo a su mayor proporción en el cemento portland.

Tabla 5.- Características especiales del cemento norma NMX-C-414-ONNCCCE

Compuesto	Composición	Abreviatura	Fase
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	Alita
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	Belita
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Aluminato/Felita
Ferro-aluminato tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Ferrita/Celita

CaO = C; SiO₂ = S; Al₂O₃ = A; Fe₂O₃ = F

Los silicatos, C_3S y C_2S son las fases más importantes; la alita constituye del 50% al 70% del clínker, reacciona rápidamente con el agua por lo cual se le atribuye la característica de aportar la resistencia mecánica inicial, desarrolla un gran calor y libera abundante cantidad de cal (cal de hidrólisis). La abundante cal liberada en la hidratación le confiere al concreto un alto grado de basicidad o alcalinidad (pH de 12-13) lo cual evita o retarda la corrosión de las armaduras en el caso del concreto armado y pretensado. La belita por su parte, constituye sólo del 15% al 30% del clínker, reacciona lentamente con el agua y por consecuencia, contribuye poco a la resistencia mecánica inicial, incrementando su aporte a la resistencia después de los 28 días. Además, desarrolla mucho menos calor y libera menores cantidades de cal ^[24].

La fase aluminato, C_3A se encuentra en el cemento portland en un 5% a 10%, es el constituyente que más calor desprende y su presencia es indeseable, ya que contribuye poco o en nada a la resistencia mecánica y cuando la pasta de cemento endurecido sufre ataque por sulfatos, la formación de sulfo-aluminato de calcio (etringita) puede causar agrietamiento. Por otra parte, presenta debilidad frente a eventuales ataques químicos y ambientales como son aguas y terrenos selenitosos o agua de mar. Esta fase reacciona rápidamente con el agua produciendo un falso fraguado; para evitar esta reacción es necesario agregar yeso a la mezcla para que actúe como agente controlador del fraguado. Dentro de los beneficios de esta fase se encuentra el facilitar la combinación del óxido de calcio con el óxido de silicio ^[24].

La fase ferrita, C_4AF se encuentra presente en el cemento en cantidades menores, y a diferencia de las fases anteriores, no contribuye al desarrollo de la resistencia mecánica significativamente a cualquier edad.

La mayoría de los efectos de color para la producción del cemento gris se deben al C_4AF y sus hidratos ^[25]. Sus propiedades en cierta manera, se contraponen a las del C_3A , ya que se caracterizan por su buena resistencia frente a los ataques químicos de los sulfatos, confiriendo una mayor durabilidad del concreto en medios yesíferos y sulfatados en general.

Los compuestos menores incluyen la cal libre, el óxido de magnesio, óxido de titanio, óxido de manganeso, óxido de sodio y óxido de potasio. Es importante mencionar que el término compuestos menores solo hace referencia al pequeño porcentaje que representan del peso del cemento. La importancia de su estudio se debe a que en el proceso de hidratación, algunos de estos compuestos desencadenan efectos nocivos a la estructura de concreto, tal es el caso de la cal libre, el óxido de magnesio y los álcalis.

La cal libre es un constituyente frecuente pero no deseable del cemento portland y su existencia es debida a defectos de fabricación. La hidratación de la cal libre es expansiva, lo que provoca fisuras superficiales, debilitamiento y destrucción del elemento de concreto. Al igual que la cal libre, el MgO también es expansivo aunque a un plazo más largo. Debido a esto, las normas de cementos especifican un máximo contenido admisible de MgO en los cementos portland ^[25].

El K_2O y Na_2O conocidos como álcalis se encuentran en el cemento portland ya sea combinados con el C_3A y el C_2S o en forma de sulfatos. Los álcalis reaccionan con algunos agregados produciendo la reacción conocida como álcali-agregado provocando la desintegración del concreto además de afectar la velocidad de desarrollo de resistencia mecánica ^[26].

2.2.2.- Hidratación del cemento portland

La hidratación del cemento es la reacción química entre las partículas de cemento y agua. En presencia de agua, los silicatos y aluminatos del cemento portland forman productos de hidratación o hidratos, generando una mezcla que pasa de un estado pastoso a duro (fraguado) para después pasar a la etapa de endurecimiento ^[27]. La hidratación es un proceso complejo de disoluciones y precipitaciones en el que, para cada fase individual, las diferentes reacciones de hidratación se dan simultáneamente a diferentes velocidades e influyendo unas sobre otras. Entre los minerales del cemento portland, el C_3A es quien presenta una mayor reactividad frente al agua ejerciendo una mayor influencia en el proceso de hidratación inicial y reología. La hidratación del C_3A , al igual que ocurre con el resto de las fases del clínker de cemento portland, se ve

afectada por factores tales como la temperatura, la relación agua/cemento, la superficie específica, la presencia de aditivos, entre otros.

Debido a los componentes o fases del cemento portland, la velocidad de reacción es variable por lo cual se divide en las siguientes etapas:

- a) ***Etapa I, período de pre-inducción:*** al entrar en contacto el C_3S con el agua de amasado comienza la etapa de pre-inducción, donde hay una rápida evolución de calor la cual cesa después de 15 minutos. El C_3S se disuelve superficialmente suministrando iones silicato, iones OH^- y Ca^{2+} que pasan a la solución. Al cabo de unos segundos, la solución se sobresatura con respecto al silicato de calcio hidratado, precipitando rápidamente en forma de gel al que se le conoce como gel CSH. La fase C_3A se disuelve y reacciona con los iones Ca^{2+} y SO_4^{2-} presentes en la fase líquida, formando un precipitado conocido como etringita (AF_t).
- b) ***Etapa II, período de inducción:*** después de la Etapa I, sigue un período de inactividad relativa, en el cual el consumo de agua y la cantidad de hidratos formados son muy pequeños, lo cual explica porqué el concreto de cemento portland queda manejable y trabajable, es decir, se encuentra en un estado plástico durante un tiempo determinado.
- c) ***Etapa III, período de aceleración o post-inducción:*** después de transcurrir de 1 a 3 horas, empieza la solidificación o fraguado inicial. El C_3S comienza a hidratarse de nuevo de forma rápida. La velocidad de hidratación alcanza un máximo al final del período de aceleración. Al término de este período el fraguado final ha ocurrido y comienza el endurecimiento inicial.
- d) ***Etapa IV, período de desaceleración:*** por la hidratación del C_3S , el espesor de la capa de gel CSH crece. Por consiguiente, llega un momento en el cual la velocidad de reacción es igual a la velocidad de difusión. Posteriormente, la velocidad de reacción empieza a disminuir hasta que llega a un estado estable y el proceso de hidratación comienza a ser gobernado por la difusión en estado sólido, la cual es por lo general muy lenta.
- e) ***Etapa V, período de difusión:*** en esta etapa la difusión es muy lenta y la velocidad de hidratación es controlada únicamente por la velocidad de difusión. El espesor de la capa de gel CSH sigue creciendo por lo cual resulta cada vez más difícil para las moléculas de agua incorporarse a las partículas de cemento anhidras.

2.2.3.- Productos de hidratación del cemento portland

La pasta de cemento se forma como consecuencia de las reacciones químicas del cemento al entrar en contacto con el agua. Dependiendo de la composición del cemento y de las condiciones de hidratación (temperatura, humedad, etc.) se hace de la pasta un sistema dinámico que cambia con el tiempo formando un conjunto complejo de productos de hidratación. Los compuestos anhidros del cemento portland reaccionan con agua para formar compuestos que se dividen en dos categorías: compuestos cristalinos hidratados y gel, los cuales se describen a continuación. La **Tabla 6** resume los principales productos de hidratación del cemento portland.

- a) **Gel CSH:** el silicato tricálcico y silicato dicálcico que constituyen alrededor del 75% por peso del cemento portland, reaccionan con el agua para producir dos nuevos compuestos: un gel no cristalino con composición y estructura semejantes a la del mineral conocido como tobermorita e hidróxido de calcio que es un compuesto cristalino. El gel CSH presenta una relación Ca/Si que oscila entre 1.5 y 2.0 sin embargo, los diferentes materiales que se adicionan pueden variar esta relación. En la pasta de cemento hidratada, el hidróxido de calcio constituye el 25% del peso mientras que el gel tobermorita constituye alrededor del 50%.
- b) **Hidróxido de calcio:** los cristales de hidróxido de calcio, comúnmente llamados portlandita, constituyen del 20% al 25% del volumen de sólidos en la pasta hidratada. A diferencia del gel de silicato de calcio hidratado (gel CSH), la estequiometría del hidróxido de calcio está definida por $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y precipita en forma de cristales alargados con una morfología de prismas hexagonales. Tiene efectos positivos ya que es el encargado de mantener el pH de la pasta en valores altos (entre 12 y 13) para actuar como reserva alcalina, de esta manera mantiene al concreto armado protegido contra la corrosión química. Sin embargo, también tiene efectos negativos tales como la solubilidad en agua y su fácil lixiviación por disolución, además de poder reaccionar con sulfatos y cristalizar en forma de dihidrato dando lugar a procesos de expansión y ruptura así como la posterior formación de etringita. Varios de estos aspectos negativos pueden ser controlados mediante la adición de puzolanas.
- c) **Etringita:** la etringita se forma en cristales aciculares, relativamente largos, producto de la reacción del aluminato tricálcico o ferro-aluminato tetracálcico con yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Al igual que el hidróxido de calcio, es el primer producto de la hidratación del cemento que se forma después del amasado. Debido a la progresiva hidratación, y en presencia de hidróxido de calcio y aluminato, puede por desprendimiento de yeso, convertirse en monosulfato (AF_m).

- d) **Otros componentes:** uno de los componentes importantes formados durante la hidratación del cemento son los poros, los cuales representan zonas débiles en la estructura total de la pasta de cemento endurecida y que por consecuencia, alteran la estructura, disminuyendo la resistencia del concreto.

Tabla 6.- Principales reacciones de la hidratación de los compuestos del cemento portland

Reacciones de Hidratación del Cemento	Productos de Hidratación del Cemento
$2 (3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 6 \text{H}_2\text{O}$	$= 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca(OH)}_2$
Silicato tricálcico + Agua	= Gel CSH + Hidróxido de calcio
$2 (2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 4 \text{H}_2\text{O}$	$= 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Ca(OH)}_2$
Silicato dicálcico + Agua	= Gel CSH + Hidróxido de calcio
$3 (\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) + 12 \text{H}_2\text{O} + \text{Ca(OH)}_2$	$= 3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$
Aluminato tricálcico + Agua + Portlandita	= Aluminato de calcio hidratado
$4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 10 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{Ca(OH)}_2$	$= 6 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$
Ferro-aluminato tetracálcico + Agua + Portlandita	= Ferro-aluminato de calcio hidratado
$3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 10 \text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	$= 3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$
Aluminato tricálcico + Agua + Yeso	= Monosulfoaluminato cálcico hidratado

2.3.- Concreto base cemento portland

El concreto es el material de construcción más ampliamente utilizado. Se estima que se consumen en el mundo alrededor de 11 billones de toneladas métricas de concreto por año. A diferencia de la madera y el acero convencional, el concreto posee una excelente resistencia frente al agua, por tanto es un material ideal para ser utilizado en la construcción de edificios, acueductos y presas. La facilidad con la cual los elementos de concreto pueden adoptar diversas formas y tamaños lo vuelve un material muy atractivo además del bajo costo que representa elaborar elementos de concreto, ya que sus principales componentes son muy abundantes y están disponibles alrededor del mundo. En la **Figura 3** se observa como el concreto ha sido utilizado para la fabricación de estructuras antiguas y se sigue utilizando en estructuras modernas. A manera de resumen, el concreto posee características tales como resistencia, versatilidad, durabilidad y economía, las cuales lo han convertido en el material de construcción con más aceptación en todo el mundo ^[25].



Figura 3.- Estructuras de Concreto: A) Estructuras Antiguas, B) Estructuras Modernas

El concreto se forma con la mezcla de ciertos componentes básicos tales como cemento portland, agua, agregados, aditivos y aire que resultan en una pasta que fragua y endurece formando un elemento rígido y resistente. La calidad del concreto está determinada por la composición química del cemento portland, la hidratación y el desarrollo de la microestructura, además de los aditivos y las características de los agregados utilizados. Otros aspectos que determinan la calidad del concreto es la colocación, consolidación y el curado del concreto una vez puesto en obra ^[20].

En el concreto base cemento portland, los agregados ocupan entre el 60% y el 75% del volumen. El papel que desempeñan los agregados en el concreto es el de aportar la estabilidad a la estructura de concreto. Los agregados finos generalmente consisten en arena natural o piedra triturada con partículas menores a los 5 mm, mientras que el agregado grueso se compone principalmente de grava o piedra triturada con partículas mayores a 5 mm ^[27].

La mezcla de concreto requiere de agua para que el proceso de hidratación del cemento se pueda llevar a cabo. Además del agua necesaria para la hidratación, las mezclas requieren de un exceso de agua para poder facilitar el trabajo de la mezcla, sin embargo el exceso de agua también es el causante de la aparición de huecos capilares los cuales incrementan la porosidad y permeabilidad del concreto haciéndolo menos resistente.

Los aditivos son un ingrediente que se añade a la mezcla con el propósito de modificar el comportamiento del concreto ya sea en estado fresco o en estado endurecido. Dentro de los beneficios de utilizar aditivos, se encuentran la obtención de ciertas propiedades que al inicio no se tenían o bien, el mantener la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colocación y curado cuando se tienen climas adversos ^[20].

2.4.- Uso de adiciones suplementarias

Además de los componentes básicos con los que se forma el concreto, los materiales suplementarios son utilizados en las mezclas de concreto como adición o como sustituto parcial del cemento portland. Dentro de los beneficios de utilizar materiales adicionales de reemplazo, podemos mencionar que se obtiene un concreto de menor costo, el impacto hacia el medio ambiente se reduce considerablemente, se obtienen una mayor resistencia de la estructura de concreto a largo plazo además de incrementar la durabilidad de la misma ^[28].

Una de las principales razones por las cuales se utilizan materiales cementantes suplementarios, es porque se busca reducir el impacto ambiental que produce la fabricación de cemento portland. La elaboración de cemento portland requiere el consumo de energía en grandes cantidades así como la emisión de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂. Por tal motivo, el uso de adiciones minerales o residuos industriales como reemplazo parcial de cemento portland ha sido una práctica que se ha difundido alrededor del mundo ^[28]. Algunos de los materiales cementantes suplementarios más utilizados incluyen la ceniza volante, escoria de alto horno granulada, humo de sílice, arcillas calcinadas y puzolanas naturales (**Figura 4**).

Los materiales de reemplazo pueden dividirse en dos categorías:

- a) **Hidráulicos latentes:** son materiales que poseen propiedades cementantes pero necesitan de una activación externa para su reacción. Un ejemplo es el cuarzo, el cual finamente molido y mezclado con cal forma silicatos cálcicos hidratados mediante un tratamiento en autoclave.
- b) **Puzolanas:** son materia esencialmente silicosa, la cual finamente dividida no posee ninguna propiedad hidráulica, pero posee constituyentes capaces, a temperatura ordinaria, de fijar el hidróxido de calcio para formar compuestos estables con propiedades cementantes.

De acuerdo a la norma ASTM C-125, una puzolana es un material silíceo o silico-aluminoso que por sí solo posee poco o ningún valor cementante, pero al encontrarse finamente molido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento a temperaturas ordinarias para formar compuestos con propiedades cementantes ^[29]. Por otra parte, la norma ASTM C-618 establece que para considerar un material como puzolánico, la suma de los óxidos SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ debe ser al menos del 70% en peso ^[30].

Por lo general, las puzolanas se clasifican en naturales y artificiales. Las puzolanas naturales incluyen materias de origen volcánico y materias sedimentarias que pueden ser de origen animal o vegetal. Entre las puzolanas artificiales podemos encontrar materias tratadas (tratamiento térmico entre 600°C y 900°C), subproductos de fabricación industrial, cenizas volantes, humo de sílice, ceniza de cascarilla de arroz, escorias granuladas de industrias metálicas no ferrosas, entre otras. Algunas de ellas se describen a continuación:

- a) **Ceniza volante:** es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas generadoras de electricidad. Es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio. La ceniza volante es un polvo finamente dividido muy parecido al cemento portland. Las partículas de ceniza volante se encuentran en su mayoría como esferas o cenosferas huecas.
- b) **Humo de sílice:** es un subproducto que se obtiene de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos eléctricos durante la producción de silicio o ferro-silicio. El humo de sílice es básicamente dióxido de silicio en partículas no cristalinas con diámetro menor a 1 mm.
- c) **Escoria granulada de alto horno:** es un material hidráulico latente subproducto de la producción de hierro. Al enfriarse la escoria se forman partículas granulares que consisten principalmente en aluminosilicatos de calcio de naturaleza amorfa. En presencia de agua y un activador, la escoria se hidrata y se endurece de manera similar al cemento portland.
- d) **Ceniza de cascarilla de arroz:** la ceniza de cascarilla de arroz es un producto que se obtiene de la combustión de cáscaras de arroz en calderas. La amplia gama de aplicaciones se derivan del alto contenido de sílice amorfa, ya que contiene alrededor de 85 a 90% de sílice. Las partículas de ceniza de cascarilla de arroz tienen un tamaño de aproximadamente 25 micras.



Figura 4.- Materiales Suplementarios: A) Ceniza Volante, B) Escoria Granulada de Alto Horno, C) Humo de Sílice

En la **Tabla 7** se resumen las principales ventajas que pueden obtenerse al utilizar puzolanas en la fabricación de concretos.

Tabla 7.- Ventajas obtenidas al utilizar puzolanas en la elaboración de concretos

Propiedad	Ventajas / Beneficios
Resistencia Mecánica	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora en la resistencia a compresión y a tracción
Estabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad frente a la expansión por cal libre • Estabilidad frente a la expansión por sulfatos • Estabilidad frente a la expansión por reacción álcali-agregado
Durabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Frente a ataques por aguas puras y ácidas • Frente a ataques por aguas y suelos sulfatados • Frente a ataques por agua de mar
Economía	<ul style="list-style-type: none"> • Al resultar menos costoso la elaboración de concreto ya que se reemplaza parte del cemento por un material puzolánico.
Plasticidad	<ul style="list-style-type: none"> • Reduciendo la relación a/c • Reduciendo la segregación • Evitando la exudación y el sangrado
Impermeabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Reduciendo la porosidad • Evitando la formación de eflorescencias
Adherencia	<ul style="list-style-type: none"> • Mejorando la adherencia entre el agregado y la pasta • Mejorando la adherencia del mortero a la armadura
Comportamiento térmico	<ul style="list-style-type: none"> • Liberando menor calor de hidratación

2.4.1.- Residuo nanosílice geotérmica

Residuos industriales como los mencionados anteriormente han sido objeto de estudio en una gran cantidad de investigaciones durante los últimos años, sin embargo, existe poca literatura reportada sobre la utilización de residuos generados en las plantas geotérmicas.

La energía geotérmica es aquella energía que puede ser obtenida mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. En la década de los 80s casi el total de la energía consumida en el mundo provenía de la quema de combustibles fósiles. El consumo de estos combustibles produce una aceleración en el calentamiento global. En México, la mayoría de las máquinas y los automóviles utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento y más del 50% de la energía eléctrica es producida en plantas

termoeléctricas, las cuales también utilizan combustibles fósiles. Por tal motivo, a nivel mundial desde hace algunos años se ha comenzado a utilizar otras fuentes para la generación de energía. Las energías alternativas son aquellas que se obtienen sin la destrucción del medio ambiente, y a diferencia de los combustibles fósiles, las energías alternativas son renovables. Ejemplo de energías alternativas son la energía eólica, solar, biomasa y geotérmica.

Hasta el año 2010, México estaba en la cuarta posición como país con mayor capacidad geotérmica instalada a nivel mundial, solo por debajo de Estados Unidos, Filipinas e Indonesia ^[31]. El campo geotérmico de Cerro Prieto, ubicado en Baja California, México (**Figura 5**), es uno de los más grandes a nivel mundial con una capacidad instalada para producir más de 720 MW de energía eléctrica. Por tanto, las plantas geotérmicas producen energía eléctrica de bajo costo y además contribuyen de manera significativa en el ahorro de combustibles fósiles y la disminución de los niveles de contaminación.

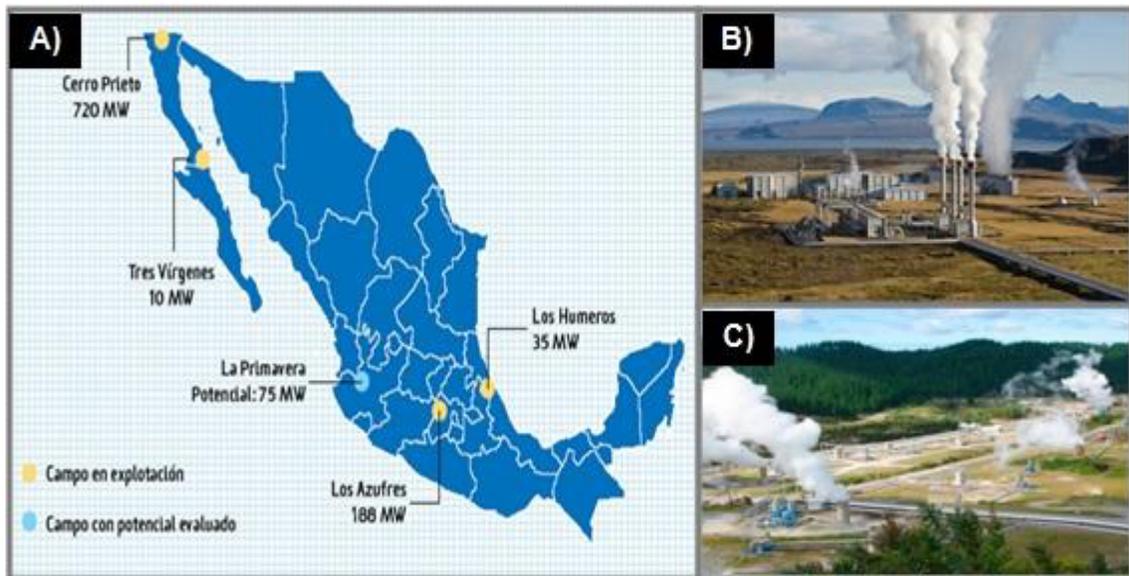


Figura 5.- Plantas Geotérmicas en México: A) Ubicación de las principales plantas geotérmicas, B) Planta Cerro Prieto, C) Planta Cerro Prieto

Además de la producción de energía eléctrica en las plantas geotérmicas, también se genera un residuo compuesto principalmente por partículas de sílice amorfa de tamaño nanométrico (~40nm) con algunas impurezas como son cloruros de sodio y potasio. De acuerdo a datos proporcionados por CFE, la generación de este residuo industrial puede estimarse en más de 70 mil toneladas anuales. Es por este motivo que recientemente, el residuo de nanosílice geotérmica (NSG) ha sido objeto de estudio en la elaboración de pastas, morteros, concretos y geopolímeros con el fin de encontrarle una aplicación útil.

En investigaciones previas se ha encontrado el incremento en las propiedades mecánicas de pastas elaboradas a base de cemento portland con adiciones parciales de residuo NSG. Esto se debe a que la NSG, por su composición química, presenta actividad puzolánica mejorando la hidratación del cemento, incrementando las cantidades de gel CSH y resultando en una matriz de productos de hidratación más compacta. Los resultados obtenidos en las propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos base cemento portland con adiciones de NSG, indican que la NSG es un material promisorio como reemplazo del cemento portland con beneficios similares a los obtenidos por el humo de sílice (HS) y por tal motivo, las investigaciones continúan en torno a este residuo industrial.

2.5.- Durabilidad del concreto

La “Portland Cement Association” (PCA) define a la durabilidad del concreto como la habilidad de éste a resistir la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión manteniendo sus propiedades de ingeniería. Los componentes del concreto, la proporción de los mismos, la interacción entre estos y los métodos de colocación y curado determinan la durabilidad final y la vida útil del concreto ^[27].

Hablar de durabilidad del concreto es hablar de una de sus propiedades más importantes debido a que es esencial que el concreto sea capaz de resistir las condiciones para las cuales ha sido diseñada la estructura durante su vida útil ^[17]. Se estima que en la industria de la construcción, se gasta el 40% en mantenimiento y reparación de estructuras y el 60% se utiliza para nuevas instalaciones. En Estados Unidos por ejemplo, se estima el gasto de \$325 millones de dólares por año debido a reparaciones en puentes y estacionamientos a causa de problemas producidos por sales de deshielo ^[32].

Los problemas de durabilidad pueden ser causados por agentes externos que surgen del medio ambiente o bien, por agentes internos que se encuentran dentro del concreto. Estos agentes que provocan una disminución en la durabilidad de la estructura de concreto pueden clasificarse como mecánicos, físicos, químicos y biológicos. En la **Tabla 8** se pueden encontrar algunos de estos agentes así como el efecto que provocan en la durabilidad de la estructura.

En resumen, es importante conocer la naturaleza del ambiente en el cual se va emplear la estructura; es decir, realizar un estudio para identificar qué problemas de durabilidad se pueden presentar y de esta manera poder aplicar la protección necesaria.

Tabla 8.- Clasificación y efecto de los agentes perjudiciales en la durabilidad del concreto

Clasificación	Agente Agresivo	Efecto sobre el concreto
Mecánicos	Carga, sobrecarga, choque, impactos y rozamientos.	Agrietamiento, erosiones y cavitaciones.
Físicos	Variaciones de temperatura, cambios de humedad, fuego, corriente eléctrica y radiación.	Grietas en la unión pasta-agregado y corrosión de armaduras.
Químicos	Aire y otros gases, aguas agresivas, productos químicos, suelos y suelos minerales.	Reacciones de sulfatos, ácidos y sales ácidas.
Biológicos	Vegetación y microorganismos (bacterias).	Fisuras, humedad y formación de sulfatos.

2.5.1.- Durabilidad del concreto expuesto a altas temperaturas

Durante su vida en servicio y por diversos factores que pueden ser de carácter accidental o bien de diseño, el concreto se puede ver sometido a altas temperaturas. En general, el concreto es considerado como un material que presenta buen comportamiento cuando es sometido a altas temperaturas, ya que no sufre procesos de combustión o ignición como la madera y los polímeros además de ser mal conductor térmico, por lo que el calor tarda un tiempo considerable en alcanzar cierta profundidad, cosa que no ocurre con los metales como el acero. Sin embargo, esta situación puede generar alteraciones en la estructura interna del concreto (cambios físico-químicos) que afectan sus propiedades, como es el caso de la reducción en la resistencia a compresión y módulo de elasticidad además de presentar agrietamiento y cambios de color en la superficie ^[8, 33].

El concreto es por definición un material poroso y dentro de estos poros se encuentra agua tanto en su forma libre como en la adsorbida además de aire. Por tanto, las altas temperaturas a las que se ve sometida una estructura de concreto durante un incendio, no solo afectan las propiedades mecánicas como resistencia a compresión y módulo de elasticidad, sino que también se ve afectada la migración de humedad de la estructura de concreto. En presencia de agua líquida, el calor que es suministrado a la estructura de concreto por el fuego, es parcialmente absorbido por la evaporación del agua líquida. Sin embargo, cuando la velocidad de evaporación es mayor que la velocidad de migración del vapor, se desarrolla un incremento en la presión de poro. Si la presión de poro supera la resistencia a tensión del material, se producen daños en la estructura de concreto como

puede ser el desprendimiento explosivo (spalling), resultando en el colapso de la misma [7, 75]. El daño que se produce en el concreto dependerá principalmente de la velocidad de calentamiento, la temperatura máxima alcanzada, del tiempo de exposición, de las condiciones de enfriamiento y de las propiedades de los materiales componentes [9, 55, 56]. Debido a que el concreto es un material compuesto; el comportamiento frente a las altas temperaturas está directamente relacionado a sus materiales constituyentes, la composición de la pasta de cemento, contenido y tamaño de agregado empleado, así como del contenido de humedad y su estructura porosa [34]. Por lo tanto, la exposición del concreto a altas temperaturas altera su microestructura a diferentes niveles dependiendo de la temperatura de exposición.

2.5.1.1.- Cambios en las propiedades mecánicas

La resistencia mecánica de una estructura de concreto expuesta a altas temperaturas se ve afectada principalmente a causa del daño que se produce en los agregados, el debilitamiento en la unión que existe entre la pasta de cemento y el agregado, el aumento en la porosidad producto de la deshidratación de la pasta de cemento y la degradación del gel CSH, además del agrietamiento producto de reacciones químicas como las que ocurren en algunos agregados [33, 55].

El tipo de agregado que se utiliza en la mezcla de concreto es uno de los factores que más influyen en la pérdida de la resistencia a compresión de una estructura de concreto expuesta a altas temperaturas. En general, los agregados son químicamente más estables a altas temperaturas en comparación con la pasta de cemento; sin embargo, los agregados sufren cambios de volumen significativos con la temperatura, siendo más sensibles los agregados de naturaleza silíceo que los de naturaleza caliza [35, 51].

Esto es debido a que el agregado de naturaleza silíceo se transforma de α -cuarzo en β -cuarzo alrededor de 575°C , mientras que el agregado de naturaleza caliza se descompone formando CaO y CO_2 a partir de 700°C , lo cual explica porque presenta un mejor comportamiento un concreto con agregado de tipo calizo cuando se expone a altas temperaturas en comparación con el concreto elaborado con agregado silíceo [25, 54]. La resistencia a tracción y módulo de elasticidad también se ven afectados a causa de las altas temperaturas y, al igual que en la resistencia a compresión, el tipo de agregado juega un papel importante, ya que la disminución es menor con agregados que son químicamente más estables como se mencionó anteriormente. A diferencia de la resistencia a compresión, la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad disminuyen pero de una forma casi lineal con respecto al incremento en la temperatura [36].

2.5.1.2.- Cambios en las propiedades físicas

Los cambios en las propiedades físicas como resultado del incremento en la temperatura incluyen la expansión térmica, incremento en la porosidad tanto en la pasta como en el concreto, cambios en la densidad del concreto y aumento de la permeabilidad, entre otros ^[37]. En la pasta de cemento se produce una retracción entre 300°C y 800°C por la pérdida de humedad y deshidratación de todos los componentes ^[54,76].

En el caso del concreto, se produce una expansión térmica la cual depende en gran medida del tipo de agregado y contenido empleado, teniendo un coeficiente de expansión mayor los agregados silíceos en comparación con los agregados calizos ^[54]. La porosidad aumenta en la pasta de cemento como en el concreto con el aumento en la temperatura siendo significativo este incremento para temperaturas por encima de 300°C. El cambio en la densidad del concreto se debe básicamente a los cambios de peso producto de la deshidratación, dilatación térmica y cambio en la porosidad. La permeabilidad, por otra parte, también aumenta con el incremento en la temperatura ^[33].

2.5.1.3.- Cambios en las propiedades químicas

Las principales transformaciones químicas que se producen en el concreto cuando éste es expuesto a altas temperaturas se resumen en la **Tabla 9**. Cuando el concreto es expuesto a altas temperaturas, alrededor de los 100°C tiene lugar una pérdida de masa que se asocia con la evaporación del agua presente en los poros capilares y en los poros de gel CSH ^[33]. La etringita que es considerada como uno de los componentes hidratados del cemento más inestables térmicamente, se descompone a temperaturas entre 110°C y 150°C ^[52, 54].

A temperaturas de entre 100°C y 200°C, se destruyen los enlaces del agua adsorbida en los microporos y comienza a descomponerse la cadena de gel CSH ^[54, 57, 77]. En el rango de temperaturas de 200°C y 350°C se considera que se descompone el gel CSH formando estructuras intermedias inestables ^[51, 52]. La portlandita se descompone alrededor de 450°C formando CaO y H₂O ^[8, 57, 55]. Los agregados que se consideran térmicamente más estables en comparación con la pasta de cemento, se descomponen en torno a 575°C cuando son de naturaleza silícea y en torno a 700°C cuando son de naturaleza caliza ^[54]. Alrededor de 1200°C comienza la fusión de la pasta de cemento deshidratada y los agregados ^[33, 54].

Tabla 9.- Transformaciones químicas del concreto expuesto a altas temperaturas

Rango de Temperaturas	Efecto en el concreto
20-80°C	Eliminación lenta de agua de los poros capilares
80-90°C	Descomposición de AFt y AFm
80-100°C	Pérdida del agua contenida en los poros capilares
100-200°C	Eliminación del agua químicamente unida (adsorbida e interlaminar)
200-350°C	Descomposición del gel CSH formando $\alpha\text{C}_2\text{SH}$
400-450°C	Descomposición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formando CaO y H_2O
570-600°C	Transformación de cuarzo αSiO_2 en βSiO_2
650-800°C	Descomposición del CaCO_3 formando CaO y CO_2
800-1200°C	Fusión de las fases deshidratadas
> 1200°C	Fusión de los agregados

2.5.2.- Efecto de las adiciones suplementarias en concretos expuestos a altas temperaturas

El uso de materiales cementantes suplementarios, como se mencionó anteriormente, es una práctica que se ha vuelto muy común alrededor del mundo. Por lo tanto, es importante estudiar el comportamiento del concreto adicionado con estos materiales cuando son sometidos a altas temperaturas. En diversas investigaciones como se muestra a continuación, se ha encontrado que la resistencia del concreto expuesto a altas temperaturas se puede mejorar mediante el reemplazo parcial de cemento por materiales puzolánicos como son la ceniza volante, humo de sílice, escoria de alto horno, metacaolín, entre otros ^[56, 58, 59].

- a) **Ceniza Volante:** es posible encontrar en la literatura diversas investigaciones en las cuales se estudia el efecto de la adición de ceniza volante en pastas de cemento, morteros y concretos expuestos a altas temperaturas. Dias y colaboradores encontraron la retención de entre 30% a 40% de la resistencia a compresión en pastas de cemento con adiciones de 10%, 25% y 40% de ceniza volante que fueron expuestas a 600°C ^[60]. Aydin y colaboradores investigaron morteros con adiciones de ceniza volante en porcentajes de 20% a 60% sometidos a temperaturas de hasta 900°C y que fueron enfriadas en aire y agua. Los morteros con adiciones de ceniza volante mostraron un incremento en la resistencia a compresión residual en 24% en comparación con las muestras de

referencia ^[61]. Xu y colaboradores estudiaron concretos de resistencia normal con adiciones de ceniza volante de hasta 55%, encontrando que el concreto adicionado con ceniza volante mejora la resistencia al fuego de la estructura de concreto en comparación con el concreto elaborado únicamente con CPO ^[62]. En resumen, se ha encontrado que la presencia de ceniza volante incrementa la resistencia a altas temperaturas de un espécimen de concreto en comparación con el concreto convencional. Algunos autores adjudican la aparición de grietas debido a la rehidratación de la portlandita; por lo tanto, al adicionar ceniza volante en grandes cantidades se consume una gran parte de la portlandita lo que se traduce en un menor agrietamiento ^[63].

- b) *Humo de Sílice:*** el humo de sílice, debido a su fino tamaño de partícula tiende a incrementar la velocidad de reacción y la resistencia inicial, además de incrementar la durabilidad y reducir la permeabilidad del espécimen de concreto. El humo de sílice es un material muy utilizado con el fin de producir concreto de alta resistencia, y es este tipo de concreto quien presenta una mayor tendencia a experimentar desprendimiento explosivo debido a su densa matriz cementante ^[64]. Hertz en su investigación encontró que el incremento en el contenido de humedad, la reducción de la permeabilidad y el incremento en la velocidad de calentamiento, son parámetros que aumentan el riesgo al desprendimiento explosivo del espécimen de concreto. Por tanto, propone un máximo de 10% de humo de sílice como una cantidad ideal de reemplazo para de esta manera evitar el desprendimiento explosivo (spalling) de la muestra de concreto ^[64]. Rahel y colaboradores estudiaron morteros con adiciones de humo de sílice de 5% y 10% sometidos a altas temperaturas con una velocidad de calentamiento de 7°C/min, las muestras no experimentaron desprendimiento explosivo y encontraron un incremento en la resistencia a compresión residual de 9% y 18% respectivamente entre 300°C y 600°C ^[65]. En todos los casos, los morteros con adición de 5% de humo de sílice mostraron una mayor resistencia a compresión residual. Felicetti y colaboradores investigaron el efecto de la adición de humo de sílice en porcentajes de hasta 9.4% en concretos de alta resistencia y de resistencia normal a una velocidad de calentamiento menor a 1°C/min con el fin de evitar desprendimiento explosivo, encontrando que el concreto de resistencia normal con adición de humo de sílice presentó una mayor resistencia a compresión residual en comparación con el concreto de alta resistencia ^[66]. Tanyildizi y colaboradores estudiaron concretos de alta resistencia con adiciones de humo de sílice de 5% y 10% y una velocidad de calentamiento de 2.5°C/min. Los especímenes de concreto presentaron desprendimiento explosivo y agrietamiento entre 400°C y 600°C, por lo cual concluyen que el concreto no debe exceder 5%

de adición de humo de sílice para evitar el desprendimiento explosivo ^[67]. Xiao y colaboradores estudiaron concretos de alto desempeño con adiciones de humo de sílice de 10% utilizando un régimen de calentamiento de acuerdo a lo establecido por el estándar ISO-834, encontrando que estos concretos pueden mantener su resistencia residual sin presentar desprendimiento explosivo por encima de 400°C ^[68]. Saad y colaboradores realizaron investigaciones en concretos con adiciones de humo de sílice de 10%, 20% y 30% sometidos a temperaturas de 20°C a 600°C donde encontraron que el espécimen con 10% de adición de humo de sílice presenta el mejor desempeño en relación a resistencia a compresión residual a todas temperaturas ^[69].

- c) **Escoria de Alto Horno:** es un subproducto de la fabricación del hierro que se adiciona típicamente como polvo finamente molido con el fin de reducir la permeabilidad del concreto y mejorar su durabilidad. En la literatura pueden encontrarse diversos estudios en los cuales se adiciona escoria de alto horno a pastas, morteros y concretos los cuales son sometidos a altas temperaturas. Mendes y colaboradores estudiaron pastas de cemento con adiciones de 35%, 50% y 65% de escoria de alto horno sometidas a altas temperaturas y a una velocidad de calentamiento de 6.25°C/min. Las pastas elaboradas con CPO mostraron agrietamiento por encima de 400°C, a diferencia de las pastas con adiciones de EAH quienes mostraron un incremento en su resistencia residual y muy poco agrietamiento, llegando a la conclusión de que la EAH presenta beneficios cuando las pastas de cemento se someten a temperaturas por encima de 400°C ^[70]. Por su parte, Wang y colaboradores investigaron pastas de cemento con adiciones de EAH de 10%, 20%, 50%, 80% y 100% sometidas a temperaturas de hasta 600°C a una velocidad de calentamiento menor a 1°C/min. Encontrando que las pastas que contenían 50% y 80% de EAH mostraron el mejor desempeño en el rango de temperaturas de 400°C a 600°C ^[71]. Aydin investigó el efecto de sustituir EAH en 20%, 40%, 60% y 80% en morteros que fueron sometidos a temperaturas de hasta 900°C y velocidad de calentamiento de 10°C/min. Los resultados indican que los morteros adicionados con EAH no presentaron pérdida de resistencia hasta 600°C y no se reportó agrietamiento superficial ni desprendimiento explosivo ^[72]. Carrete y colaboradores estudiaron concretos con adiciones de EAH de 35% expuestos a temperaturas de hasta 600°C por largos períodos de tiempo de 1, 4 y 8 meses. Los resultados muestran que la adición de EAH no mejora la resistencia a compresión residual del concreto expuesto a altas temperaturas por períodos de tiempo largos ^[73].

2.5.3.- Efecto de la adición de fibras en concretos expuestos a altas temperaturas

Además del estudio de concretos adicionados con materiales cementantes suplementarios, se han realizado un gran número de investigaciones en las cuales se estudia el efecto de la adición de fibras en concretos que son expuestos a altas temperaturas, siendo las de polipropileno y las metálicas las más utilizadas.

En general, las fibras de polipropileno no tienen un efecto muy significativo en incrementar la resistencia a compresión y módulo de elasticidad residual de un elemento de concreto después de ser sometido a altas temperaturas. Sin embargo, la adición de éstas fibras en concretos que son expuestos a altas temperaturas mejora considerablemente las resistencias a flexión y tracción residual cuando las temperaturas son de aproximadamente 400°C, ya que sus puntos de fusión e ignición son de 150°C y 400°C a 500°C respectivamente. Por otra parte, debido a estos puntos de fusión e ignición de las fibras de polipropileno, se generan huecos (poros) que se conectan con los poros capilares existentes para formar vías de escape del vapor de agua y reducir el daño en la estructura de concreto ^[78]. Debido a esto, el concreto con adición de fibras de polipropileno se ha encontrado que tiene una mayor resistencia al desprendimiento explosivo (spalling) en comparación con el concreto sin adición de fibras ^[79].

La adición de fibras metálicas, generalmente se traduce en la mejora de las propiedades mecánicas residuales del espécimen de concreto sometido a altas temperaturas como es el caso de la resistencia a compresión, flexión y tracción indirecta. Las fibras metálicas tienen una mayor conductividad térmica en comparación con los agregados y la matriz cementante. Por lo tanto, el calor puede ser transmitido de manera más uniforme en el espécimen de concreto adicionado con fibras de acero y de esta manera se reducen las grietas formadas debido al gradiente térmico, mejorando a su vez la resistencia a compresión y tensión del espécimen ^[81, 82]. Además, debido a que la adición de fibras metálicas en el espécimen de concreto reduce el gradiente térmico, también reduce la probabilidad de un desprendimiento explosivo; sin embargo, los estudios realizados en este ámbito revelan que la probabilidad de desprendimiento explosivo es menor para el espécimen de concreto adicionado con fibras de polipropileno en comparación con el adicionado con fibras metálicas, lo que indica que el vapor de agua es la principal razón que provoca el desprendimiento explosivo cuando el concreto es sometido a altas temperaturas ^[81, 83].

Con el objetivo de reducir la probabilidad del desprendimiento explosivo del concreto y además tomar ventaja de los beneficios que proporciona la adición de fibras metálicas, se han realizado estudios en los cuales se hace una mezcla tanto de fibras de polipropileno como de fibras metálicas ^[84].

En su estudio, Peng y colaboradores encuentran que incorporar una mezcla de fibras metálicas y de polipropileno, es una solución prometedora para mejorar la resistencia del concreto expuesto a altas temperaturas ^[79]. Han y colaboradores estudiaron la resistencia al desprendimiento explosivo de concretos de alta resistencia con mezcla de fibras metálicas y fibras de polipropileno que son expuestos a altas temperaturas, llegando a la conclusión de que no se presentaba desprendimiento explosivo cuando el concreto de alta resistencia contenía una mezcla de ambas fibras ^[80]. Chen y colaboradores por su parte, estudiaron la resistencia residual de concretos de alta resistencia reforzado con fibras híbridas expuestos a altas temperaturas, en donde concluyen que las propiedades del concreto de alta resistencia se mejoran considerablemente cuando se combinan fibras con alto punto de fusión (ej. metálicas o de carbón) y fibras con bajo punto de fusión (ej. polipropileno) ^[81].

2.5.4.- Uso del nanopartículas de sílice en concretos expuestos a altas temperaturas

Aunque se han realizado una gran diversidad de investigaciones relacionadas al estudio de materiales puzolánicos en concretos que son expuestos a altas temperaturas, existe poca literatura reportada sobre la utilización de nanopartículas de sílice en este campo, como se muestra a continuación.

La adición de nanopartículas de sílice tiene un efecto más pronunciado que el obtenido al adicionar a la mezcla de concreto micro partículas de sílice, esto es debido principalmente al área superficial que posee y a que actúan como sitios de nucleación para la precipitación de gel CSH ^[15]. En pastas de cemento se ha encontrado que la adición de nanopartículas de sílice mejora significativamente la estabilidad térmica del sistema cementante ^[74].

Morteza y colaboradores estudiaron el efecto que ocasionan las altas temperaturas en concretos de alta resistencia con adiciones de nanosílice en cantidades menores a 5%, utilizando una velocidad de calentamiento de 20°C/min. Los resultados mostraron que las nanopartículas de sílice, a diferencia del humo de sílice, incrementan las resistencias a compresión y tensión residual de los especímenes de concreto sometidos a altas temperaturas ^[15]. Ibrahim y colaboradores estudiaron morteros de alta resistencia con adiciones de ceniza volante en grandes volúmenes (25%, 35% y 45%) y nanopartículas de sílice (2.5%, 5% y 7.5%) expuestos a temperaturas de hasta 700°C utilizando una velocidad de calentamiento de 9°C/min. Los resultados mostraron que a 700°C, los morteros exhiben una reducción en la resistencia a compresión y flexión; sin embargo, los especímenes que contenían nanopartículas de sílice mostraron una mayor resistencia

residual ^[61,75]. Heikal y colaboradores estudiaron cementos compuestos por EAH y nanopartículas de sílice en porcentajes de hasta 4% que fueron expuestos a tratamientos térmicos a temperaturas de 200°C, 400°C, 650°C, 850°C y 900°C a una velocidad de calentamiento de 5°C/min. Los resultados indican que el cemento compuesto por EAH en porcentajes de 25% a 50% y nanosílice en porcentajes de 4% mejora la resistencia térmica a temperaturas de hasta 650°C ^[37,76].

Debido a que en investigaciones previas, se ha encontrado que el residuo nanosílice geotérmica (NSG) es un material promisorio como reemplazo parcial del cemento portland y que proporciona beneficios similares a los obtenidos por el humo de sílice, la presente investigación tiene como reto estudiar el efecto que provoca la adición de NSG en la durabilidad de concretos sometidos a altas temperaturas con el fin de aportar conocimiento en el desarrollo y mejoramiento de materiales alternos al cemento portland y, dado que se trata de un residuo industrial, contribuir con la preservación del medio ambiente.

CAPITULO III

HIPOTESIS

En investigaciones previas se ha encontrado que la sustitución parcial de cemento portland por residuo nanosílice geotérmica (NSG) en la elaboración de concretos, mejora las propiedades mecánicas, fisicoquímicas y de durabilidad debido a la actividad puzolánica que la NSG presenta y los resultados son similares a los obtenidos al utilizar humo de sílice como reemplazo de cemento portland. Por otra parte, respecto al comportamiento del concreto cuando éste es expuesto a altas temperaturas (durabilidad), existe escasa literatura en la cual se estudie el efecto de la incorporación de nanopartículas de sílice. Por lo tanto, se formula la siguiente hipótesis:

- Debido a la alta densificación de la matriz cementante desarrollada en los concretos adicionados con NSG, como consecuencia de la producción de gel CSH adicional generado por la NSG, existe consecuentemente una mayor cantidad de agua la cual está contenida en los geles CSH, la cual puede fomentar un agrietamiento extensivo en la matriz cementante de los concretos cuando estos son expuestos a altas temperaturas.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la microestructura del concreto con sustitución parcial de cemento portland por residuo nanosílice geotérmica y humo de sílice cuando se expone a temperaturas críticas de 350°C, 550°C y 750°C y comparar su comportamiento con el concreto elaborado 100% con cemento portland compuesto.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Obtención de los especímenes de concreto.
2. Previo al régimen de calentamiento, los especímenes de concreto serán caracterizados mediante la determinación del peso y la velocidad de ultrasonidos.
3. Los especímenes de concreto serán sometidos a un ciclo de calentamiento lento y a diferentes temperaturas críticas programadas en un horno eléctrico (350°C, 550°C y 750°C).
4. Después de someter los especímenes de concreto al régimen de calentamiento, serán caracterizados mediante: velocidad de ultrasonidos (UPV), análisis termogravimétrico (ATD), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido en su modalidad de electrones retrodispersados (MEB).
5. Discutir los resultados obtenidos de la caracterización de los especímenes de concreto sometidos a altas temperaturas para poder elaborar las conclusiones de la investigación.

CAPITULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1.- Introducción

En este capítulo se presentan los detalles de la experimentación realizada durante el trabajo de investigación necesarios para poder cumplir con los objetivos planteados, por lo que se describe la materia prima utilizada y su caracterización, el proceso de fabricación de los especímenes de concreto, las variables empleadas en la fabricación de los especímenes, el régimen de calentamiento al cual fueron sometidos los especímenes de concreto así como las técnicas de caracterización empleadas antes y después del régimen de calentamiento para analizar el efecto que produce la adición de la NSG y el HS en concretos cuando son sometidos a altas temperaturas.

Los procesos de degradación más relevantes que ocurren a microescala en el concreto cuando es expuesto a altas temperaturas se evaluaron y analizaron, haciendo una comparativa en el comportamiento del concreto adicionado (NSG y HS) y el concreto sin adiciones, fabricado con cemento portland compuesto (CPC) además de analizar si existe algún efecto relacionado con la cantidad de adición que se utilizó en la mezcla de concreto.

4.2.- Materias primas y su caracterización

Las materias primas que se utilizaron en el desarrollo de esta investigación son:

1. Cemento Portland Compuesto CPC 30R de acuerdo a la clasificación de la norma mexicana NMX-C-414-ONNCE.
2. Residuo Nanosílice Geotérmica (NSG) proveniente de la central geotermoeléctrica “Cerro Prieto” localizada en el municipio de Mexicali, Baja California, México.
3. Humo de Sílice, adición comercial distribuida por la empresa “Degusa”.
4. Arena y grava de naturaleza caliza provenientes de la región de Santa Catarina, Nuevo León.
5. Agua destilada comercial distribuida por la empresa “Agua Monterrey”.

6. Superplastificante Glenium 3150 base policarboxilato distribuido por la empresa “Degusa”.

4.2.1.- Acondicionamiento del residuo nanosílice geotérmica

El residuo nanosílice geotérmica fue sometido a un acondicionamiento previo a ser utilizado en la elaboración de los especímenes de concreto con el fin de obtener en dicho residuo concentraciones de cloruros totales del 0%.

Inicialmente, la NSG fue proporcionada por Comisión Federal de Electricidad, la cual fue enviada desde la planta localizada en Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México en lotes de aproximadamente 20 kg, por lo que fue necesario determinar el contenido de cloruros totales de cada lote.

Para determinar el contenido inicial de cloruros totales, se tomó una muestra representativa de cada lote, la muestra fue triturada con el fin de eliminar aglomeramientos y posteriormente fue homogeneizada para después pasar a un secado dentro de un horno a una temperatura de 105°C; la muestra permaneció en estas condiciones 24 horas. Al finalizar el secado, la concentración de cloruros totales se determinó empleando el proceso descrito por Puente Ornelas en su investigación ^[13].

4.2.1.1.- Lavado del residuo nanosílice geotérmica

Con el fin de reducir el contenido de cloruros presentes en la NSG hasta alcanzar niveles aproximados de 0%, se realizó un proceso de lavado. Para ello, se tomó un lote de NSG que presentara la menor concentración de cloruros totales. La mezcla seleccionada se depositó en un contenedor y se le agregó agua potable a una temperatura de aproximadamente 100°C para después ser homogeneizada durante 15 minutos. La mezcla se dejó decantar durante 12 horas y una vez que el material sedimentó, el exceso de agua que se encontraba sobre éste (conteniendo los cloruros disueltos), fue extraído, de manera que en el contenedor quedara únicamente NSG húmeda. Posteriormente, se extrajo una muestra representativa a la cual se le determinó la concentración de cloruros totales bajo el procedimiento descrito por Puente Ornelas ^[13].

El proceso de lavado del residuo nanosílice geotérmica se repitió hasta que la NSG alcanzó una concentración de cloruros totales muy cercana al 0%.

4.2.1.2.- Secado, tamizado y homogeneizado del residuo nanosílice geotérmica

Al finalizar con el lavado del residuo nanosílice geotérmica, éste fue introducido a una cámara isotérmica la cual permaneció a una temperatura constante de 60°C durante 48 horas con el fin de secar por completo dicho residuo. Tras el proceso de secado, la NSG fue tamizada utilizando un tamiz Tyler #200, para obtener partículas de NSG inferiores a 75 μ . Para homogeneizar la NSG, ésta se introdujo en una revolvedora durante 20 minutos. Una vez que el proceso de homogeneización finalizó, la NSG se depositó en bolsas de plástico y colocadas en un recipiente hermético hasta su utilización.

4.2.2.- Caracterización de los materiales cementantes

4.2.2.1.- Composición química

Determinar los compuestos químicos presentes en los materiales que serán utilizados para la fabricación de los especímenes de concreto es de suma importancia debido a que nos puede brindar una perspectiva sobre su posible comportamiento durante el proceso de hidratación y después de ser sometidos al régimen de calentamiento.

La composición química de los materiales cementantes (CPC, HS y NSG) se determinó mediante análisis semicuantitativo y cualitativo empleando la técnica de Fluorescencia de rayos X utilizando un espectrómetro S4 Pioneer marca Bruker.

4.2.2.2.- Composición mineralógica

La identificación de fases minerales en cada uno de los materiales cementantes fue realizada mediante difracción de rayos X empleando la metodología de polvos. El equipo utilizado fue un difractómetro de rayos X marca Bruker y los parámetros utilizados para el análisis fueron: voltaje de 45 kV, corriente de 40 μ A, barrido de 5 a 80 grados, tamaño de paso de 0.05 2 θ , tiempo de acumulación de 3 segundos/paso y longitud de onda de la radiación estándar CuK α (λ) de 1.5418 Å.

Las fases cristalinas se identificaron de acuerdo a la base de datos de difracción de polvos ICDD ^[85].

4.2.2.3.- Propiedades físicas

En cada uno de los materiales cementantes fueron determinadas las siguientes propiedades físicas: distribución de tamaño de partícula, área superficial (método de análisis BET), pérdidas por ignición, residuos insolubles (ASTM C-114) y densidad (ASTM C-188).

4.2.3.- Caracterización de los agregados

Los agregados fueron caracterizados determinando su densidad, absorción de agua según los procedimientos de las normas ASTM C-127 y ASTM C-128, distribución granulométrica según los procedimientos de las normas ASTM C-702 y ASTM C-136 y análisis mediante DRX. Se corrigió en la dosificación de los materiales la cantidad de agua requerida por parte de los agregados.

4.3.- Elaboración de los especímenes de concreto

Los concretos fueron elaborados empleando moldes cilíndricos de dimensiones de 50x100 mm y utilizando Cemento Portland Compuesto Tipo I 30R de acuerdo a la norma mexicana NMX-C-414-ONNCE, grava de $\frac{3}{4}$ (19mm), arena #4 (4.75mm), residuo nanosílice geotérmica (NSG) en concentraciones de cloruros totales de 0% en peso con respecto al cemento, humo de sílice (HS), agua destilada y superplastificante comercial Glenium 3150 base policarboxilato. En el diseño de mezclas fue utilizada una relación agua/cementantes de 0.5 así como niveles de reemplazo de cemento portland por NSG de 20% y 30% y niveles de reemplazo de cemento portland por HS de 30%. La

Tabla 10 muestra la dosificación de los materiales empleados en la elaboración de las mezclas de concreto. Los especímenes fueron sometidos a un proceso de fraguado y curado en cámaras isotérmicas a una temperatura de 20°C. Los especímenes de concreto permanecieron en agua saturada con hidróxido de calcio a dicha temperatura hasta la edad de 4 años, posteriormente fueron extraídos y colocados en un recipiente libre de agua (seco) a una temperatura de 20°C y un ambiente de humedad no controlada. Los especímenes de concreto se sometieron al régimen de calentamiento con una edad de 7 años y 6 meses. La designación y dosificación de los especímenes de concreto se muestran en la **Tabla 11**.

Tabla 10.- Dosificación de los materiales empleados en la elaboración de mezclas de concreto

Valores expresados en % en peso	CPC	Nivel de reemplazo (%)	
	100%	20% R	30% R
Cemento	14.86	11.89	10.40
Material de reemplazo (NSG o HS)	-	2.97	4.46
Agregado grueso (grava)	42.46	42.46	42.46
Agregado fino (arena)	35.03	35.03	35.03
Agua	7.43	7.43	7.43
Superplastificante	0.22	0.22	0.22
Total	100	100	100

Tabla 11.- Designación y proporción de mezclas

Muestra	Proporción de mezcla		
	Cemento	Adición	Relación a/c
CPC100	100%	0%	0.5
CPC80/NSG20	80%	20%	0.5
CPC70/NSG30	70%	30%	0.5
CPC70/HS30	70%	30%	0.5

4.4.- Régimen de calentamiento

Los especímenes de concreto fueron sometidos a un régimen de calentamiento lento el cual se llevó a cabo en un horno eléctrico Nabertherm con capacidad máxima de hasta 1,340°C como el que se muestra en la **Figura 6**. La velocidad de calentamiento empleada fue de 1°C/min partiendo de temperatura ambiente hasta alcanzar la temperatura crítica (Tc), la Tc se mantuvo constante durante 2 horas para permitir una homogeneización de la temperatura en todos los especímenes y posteriormente se enfriaron a una velocidad menor a 1°C/min dentro del horno eléctrico con la puerta cerrada. Las temperaturas críticas a las cuales se programó el horno eléctrico fueron: 350°C, 550°C y 750°C. La **Figura 7** muestra la curva de calentamiento que siguieron los especímenes en cada una de las temperaturas críticas.



Figura 6.- Horno eléctrico utilizado para el calentamiento de los especímenes

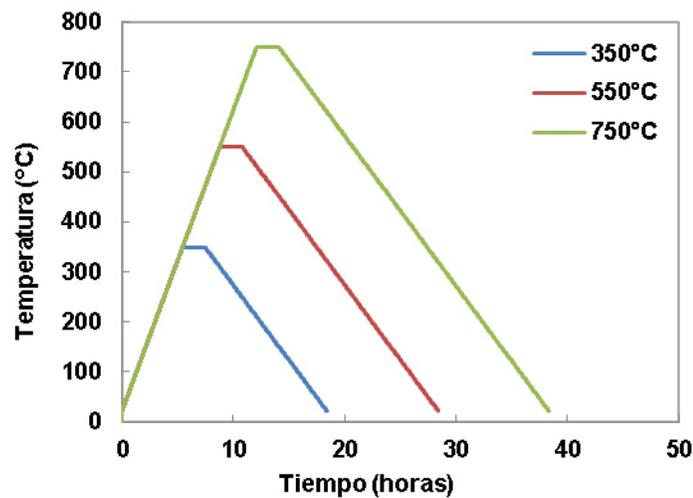


Figura 7.- Régimen de Calentamiento

4.5.- Caracterización de los especímenes de concreto previo al régimen de calentamiento

4.5.1.- Determinación del peso de los especímenes de concreto

El peso de los especímenes fue medido utilizando una balanza Mettler PM4800 Delta con precisión de centésimas como se muestra en la **Figura 8**. Al término de cada régimen de calentamiento, los especímenes se pesaron nuevamente para determinar la pérdida de peso y hacer una comparativa contra el peso inicial de los especímenes a cada una de las temperaturas críticas.



Figura 8.- Determinación del peso de los especímenes de concreto

4.5.2.- Determinación de la Velocidad de Ultrasonidos de los especímenes de concreto

La velocidad de ultrasonidos es considerada una técnica no destructiva que nos proporciona información de daños físicos en la estructura del concreto [43,45]. El funcionamiento básico consiste en hacer pasar una onda a través del material y los transductores marcan el tiempo de propagación de la onda. Este parámetro muestra un descenso como resultado del aumento de la degradación del concreto debido al aumento de la porosidad y fisuración. La **Figura 9** muestra el equipo PUNDIT utilizado para medir la velocidad de ultrasonidos siguiendo los criterios que especifica la norma europea UNE-EN 12504-4. La velocidad de ultrasonidos de los especímenes se midió antes y después de cada régimen de calentamiento, para determinar la disminución de la misma y hacer una comparativa contra el valor inicial de los especímenes a cada una de las temperaturas críticas. Con la medida de la velocidad en transversal se calcula el módulo dinámico de la elasticidad de acuerdo a los criterios de la norma UNE 1204-4.



Figura 9.- Equipo utilizado para velocidad de ultrasonidos

4.6.- Caracterización de los especímenes de concreto posterior al régimen de calentamiento

4.6.1.- Análisis Termogravimétrico

Para los ensayos de análisis térmico, se calienta una muestra representativa a una velocidad controlada hasta alcanzar altas temperaturas que superan los 1000°C y los cambios que ocurren debido a la reacción o descomposición de los compuestos se registran en función del tiempo y la temperatura.

Debido al aumento de temperatura se generan cambios de masa, temperatura, energía o estado de la muestra que nos permiten identificar productos de hidratación, estimar la reactividad de las puzolanas, cuantificar el grado de carbonatación de una muestra expuesta así como también problemas de durabilidad del concreto.

En el análisis termogravimétrico, se mide la masa de una muestra a medida que ésta se calienta a una velocidad controlada. Los cambios de masa que se registran de la muestra dependerán de la composición de la muestra, la temperatura, la velocidad de calentamiento y el tipo de gas en el horno. Los termogramas (TG) y sus derivadas (DTG) se realizaron tomando muestra de la parte central de los especímenes iniciales y después de someterse a cada régimen de calentamiento (350°C, 550°C y 750°C), la muestra se trituroó hasta tamaño polvo en mortero. Los análisis termogravimétricos se llevaron a cabo utilizando un equipo SDT Q600 como el que se muestra en la **Figura 10** y condiciones de atmosfera de nitrógeno, crisol de alúmina, peso de la muestra de 30~40 mg y una rampa de calentamiento de 25°C hasta 1000°C a una tasa de 10°C/min.



Figura 10.- Equipo utilizado para análisis termogravimétrico

4.6.2.- Difracción de Rayos X

La identificación cualitativa tanto de las fases presentes en las materias primas como en la pasta de cemento portland se realizó utilizando el método de análisis de polvos por difracción de rayos X (DRX). Se realizó un análisis de los especímenes iniciales y después de ser sometidos a las diferentes temperaturas críticas para poder comprender el efecto que ocasionan las altas temperaturas en las fases cristalinas presentes. Para ello, se tomo muestra del núcleo de los especímenes la cual fue triturada en mortero con el fin de separar los agregados de la pasta de cemento, una vez seleccionada la mayor parte de la pasta de cemento, ésta fue molida y tamizada para obtener un tamaño de partícula menor a 75 μm . Los análisis de difracción de rayos X se llevaron a cabo utilizando un equipo Bruker D8 ADVANCE como el que se muestra en la **Figura 11**.

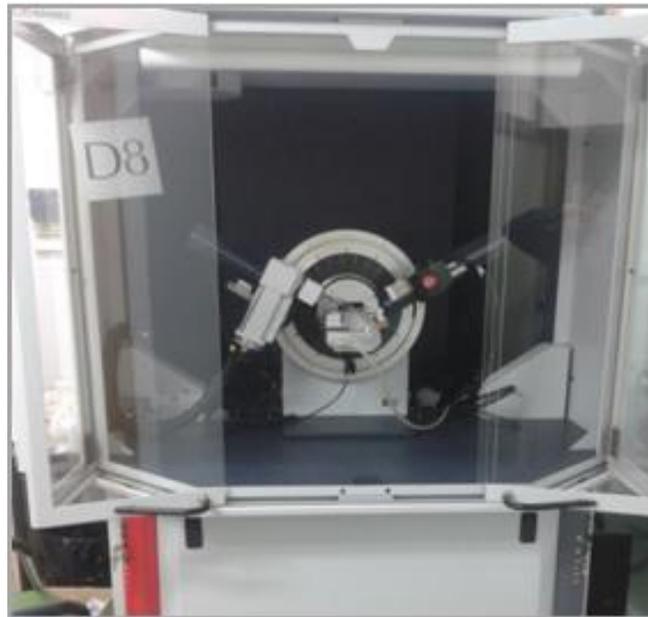


Figura 11.- Equipo utilizado para análisis DRX

4.6.3.- Microscopía Electrónica de Barrido

La microscopía electrónica de barrido es una técnica de caracterización empleada para obtener imágenes de la superficie de materiales sólidos. Mediante esta técnica es posible analizar la microestructura de las pastas de cemento obteniendo imágenes por electrones retrodispersados donde se pueden observar las fases anhidras e hidratadas, así como análisis de morfología y composición elemental.

Para el análisis vía MEB, se tomó muestra de la parte central del espécimen de concreto y se impregnaron al vacío utilizando resina epóxica, posteriormente fueron desbastadas utilizando lijas de carburo de silicio y pulidas con pasta de diamante, para finalmente recubrirlas con grafito. Las muestras una vez acondicionadas, fueron estudiadas mediante microscopía de electrones retrodispersados para analizar el efecto que provocan las altas temperaturas en la degradación de las mismas. El equipo utilizado fue un S-4800 Scanning Electron Microscope y Bruker X-Flash Detector 5030 para el microanálisis como se muestra en la **Figura 12**.



Figura 12.- Equipo utilizado para análisis MEB

CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Caracterización de las materias primas

5.2. Materiales cementantes

5.2.1. Composición química

La **Tabla 12** muestra la composición química de los materiales cementantes, en la cual podemos observar el alto contenido de CaO que presenta el cemento y que está en común acuerdo con lo estipulado por la norma mexicana NMX-C-414-ONNCE para ser considerado como un Cemento Portland Compuesto (CPC) [23]. Por otra parte, el residuo nanosílice geotérmica (NSG) al igual que el humo de sílice (HS) presentan un alto contenido de SiO₂ que supera el 70% en peso, por lo cual se consideran como materiales puzolánicos de acuerdo a la norma ASTM C618-05.

Tabla 12.- Composición química de los materiales cementantes

(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	* PI	Área BET (m ² /g)
CPC	18.51	4.46	2.61	67.45	1.27	3.26	0.36	0.87	-	0.79	0.88
HS	95.89	0.42	1.22	0.61	0.42	0.45	0.17	0.82	-	0.29	24.66
NSG	98.36	0.09	0.04	0.45	-	0.03	0.32	0.23	0.06	0.31	35.28

* *PI.: Pérdida por Ignición a 950°C*

5.2.2. Composición mineralógica

La **Figura 13** muestra el patrón de difracción de rayos X del humo de sílice y del residuo nanosílice geotérmica. En dicho espectro es posible observar un halo amorfo en el rango de 20 a 30 respecto del ángulo 2θ presente en los materiales suplementarios.

El halo amorfo es característico de materiales silico-aluminosos y proporciona un indicativo del grado de reactividad de los materiales empleados.

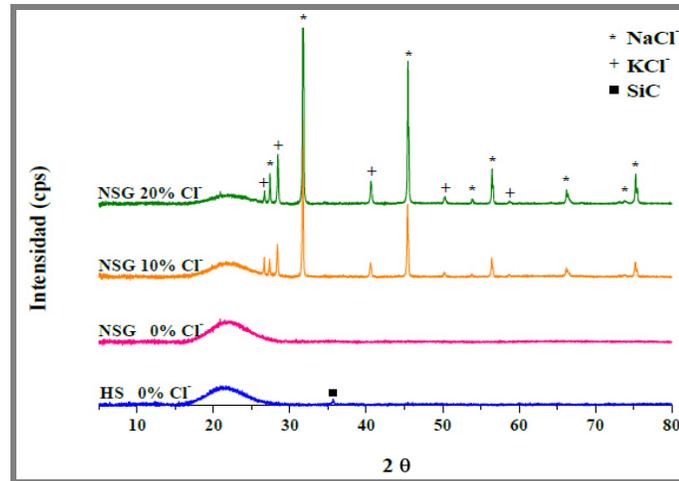


Figura 13.- DRX de los materiales cementantes empleados

5.2.3. Propiedades físicas

La **Figura 14** muestra la distribución del tamaño de partícula que presentaron los materiales cementantes al ser analizados mediante difracción laser.

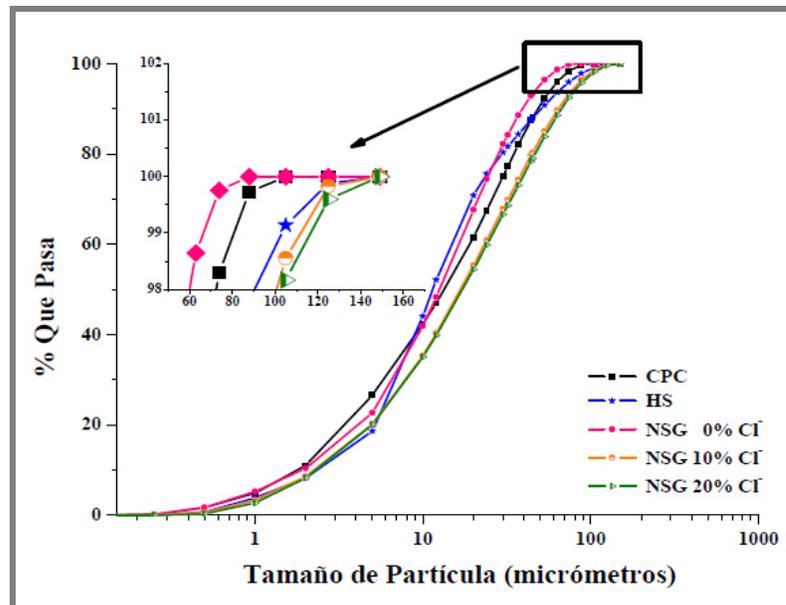


Figura 14.- Distribución de tamaño de partícula de los materiales cementantes

5.3. Agregados

5.3.1. Composición mineralógica

Los espectros DRX mostrados en la **Figura 15** confirman que los agregados empleados corresponden a materiales de tipo caliza (agregado no reactivo), cuyas reflexiones se asocian a las fases calcita y dolomita.

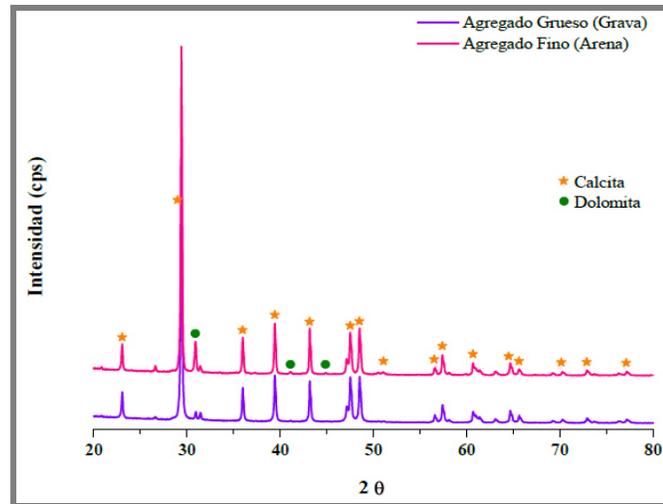


Figura 15.- DRX de los agregados empleados

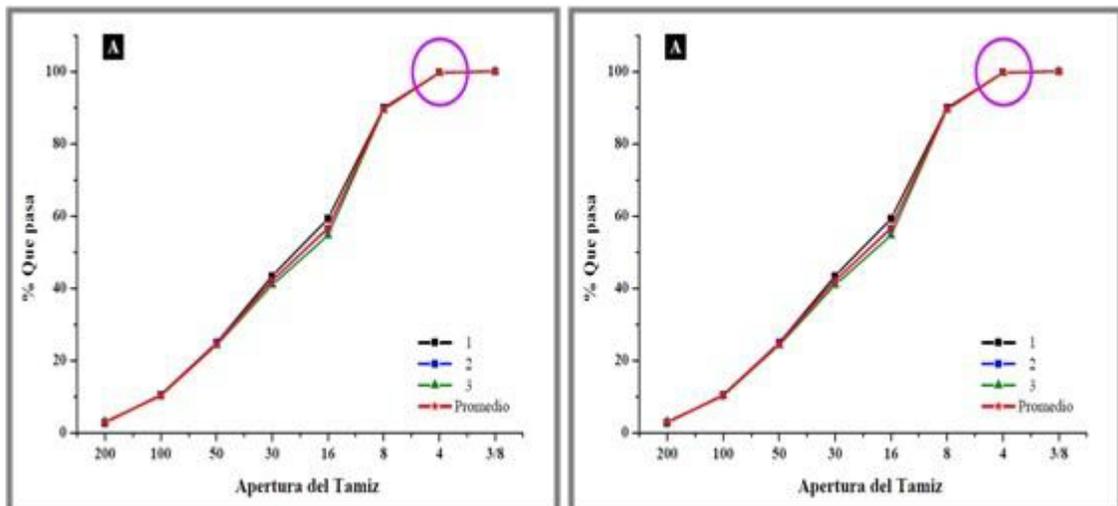


Figura 16.- Distribución granulométrica de los agregados empleados

5.3.2. Distribución granulométrica

La **Figura 16** presenta los gráficos generados por los valores de distribución granulométrica obtenida en los agregados empleados en esta investigación. El agregado fino (arena) exhibió una distribución de tamaño de grano en la que la mayor cantidad de agregado es retenido en la malla #4. Por otra parte, la **Figura 16** muestra que los agregados gruesos corresponden a grava $\frac{3}{4}$ debido a que es en esta malla en la que se retiene la mayor cantidad de agregado.

5.4. Caracterización de los especímenes previo al régimen de calentamiento

5.4.1. Pérdida de peso de los especímenes sometidos a altas temperaturas

La **Figura 17** muestra de forma gráfica los porcentajes de pérdida de peso que experimentaron los especímenes de concreto a las diferentes temperaturas de exposición y para los diferentes niveles de sustitución. Es posible observar que la pérdida de peso se incrementa a medida que la temperatura de exposición aumenta y es mayor esta pérdida para los especímenes adicionados (NSG y HS) en comparación con el espécimen de referencia ^[39]. La pérdida de peso de los especímenes que fueron expuestos a 350°C es relativamente baja, siendo de 1% para los especímenes CPC100 y 2% para los especímenes adicionados con NSG y HS. A esta temperatura crítica, no se encuentra diferencia significativa para el espécimen adicionado con humo de sílice en comparación con el residuo nanosílice geotérmica.

Cuando la temperatura de exposición alcanzó 550°C, la pérdida de peso que experimentaron los especímenes de concreto continuó siendo relativamente baja; con valores de 2% para los especímenes CPC100 y CPC70/HS30 y 4% aproximadamente para los especímenes adicionados con el residuo nanosílice geotérmica. En dicha figura puede apreciarse que la pérdida de peso es mayor para el espécimen adicionado con el residuo nanosílice geotérmica, lo cual puede atribuirse a la actividad puzolánica que presenta la NSG, que incrementa las cantidades de gel CSH resultando en una matriz cementante mucho más densa y por lo tanto, provocando una mayor pérdida de peso en comparación con los especímenes de referencia.

Por otra parte, cuando los especímenes fueron expuestos a la temperatura de 750°C, la pérdida de peso se incrementó en porcentajes de 11.5% para el espécimen CPC100, 12.5% para el espécimen CPC70/HS30 y 15.5% y 16.5% para los especímenes CPC80/NSG20 y CPC70/NSG30 respectivamente.

A partir de estos porcentajes, claramente se observa que la pérdida de peso es mayor para los especímenes adicionados con NSG en comparación con los elaborados únicamente con CPC y adiciones de HS. La pérdida de peso del espécimen adicionado con humo de sílice se asemeja más al espécimen de referencia (100% CPC) en comparación con los elaborados con NSG. Los porcentajes de pérdida de peso encontrados en este trabajo de investigación, son comparables a los encontrados por Morteza en su estudio. Morteza y colaboradores estudiaron el efecto de las altas temperaturas en concretos de alta resistencia modificados con nanopartículas de sílice y humo de sílice, donde para temperaturas de 400°C los porcentajes de pérdida de peso varían entre 3-4% y de 12-18% para temperaturas de 800°C [15].

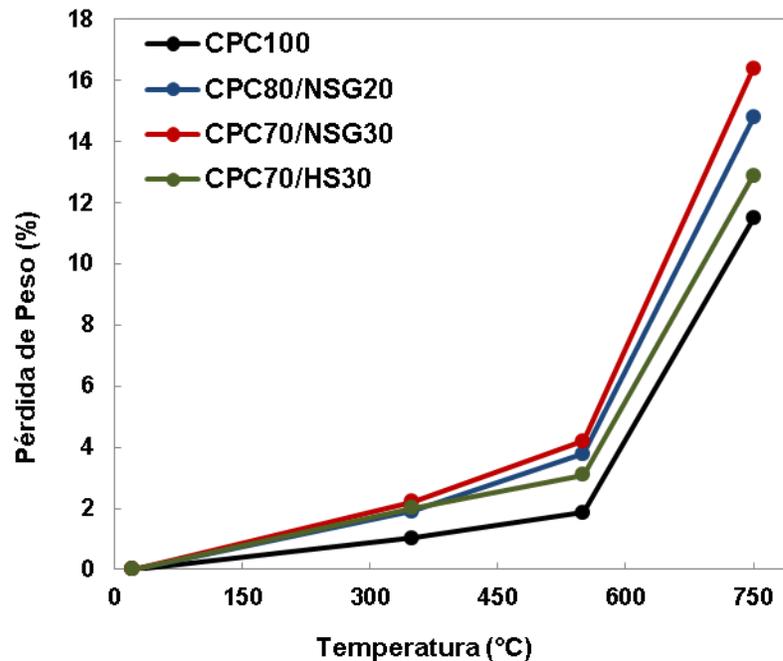


Figura 17.- Pérdida de peso (%) a diferentes temperaturas

La **Figura 18** muestra el daño superficial (agrietamiento) que sufrieron los especímenes CPC100 y CPC80/NSG20 después de haberse sometido a las tres temperaturas críticas (350°C, 550°C y 750°C). A partir de esta figura es posible observar que a 350°C y 550°C la aparición de grietas es mínima, lo cual tiene relación con la pérdida de peso que para estas dos temperaturas críticas presentó porcentajes relativamente bajos. Sin embargo, a 750°C el agrietamiento que sufrieron los especímenes y el cambio de color es muy visible, pudiendo relacionarse también con el mayor porcentaje de pérdida de peso que ocurrió a esta temperatura.

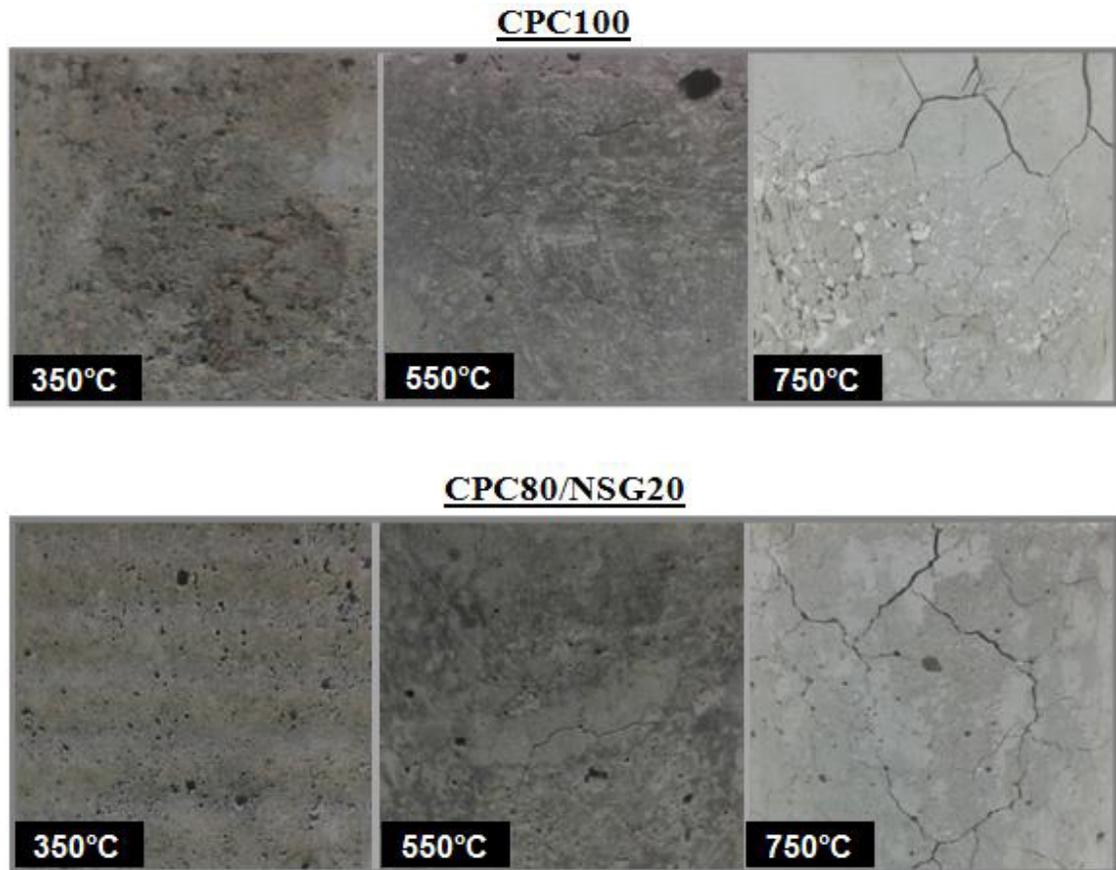


Figura 18.- Daño superficial de los especímenes de concreto CPC100 y CPC80/NSG20

Lo anterior está en acuerdo con el estudio realizado por Omer, donde para concretos elaborados con CPO y expuestos a temperaturas de hasta 1200°C, la aparición de grietas y cambios significativos de color se encuentran a temperaturas por encima de 600°C [18, 40]. Ali y colaboradores, en su investigación estudiaron concretos reforzados encontrando que no son significativos los cambios de color en especímenes sometidos a temperaturas por debajo de 400°C, el cambio de color es muy ligero a temperaturas de entre 400°C y 600°C y son muy notables cuando la temperatura es de alrededor de 800°C [41].

El cambio de color que experimentan los especímenes de concreto cuando son sometidos a altas temperaturas puede ser un indicio del daño que sufre el espécimen de concreto. Akca y colaboradores en su investigación mencionan que mediante el cambio de color que experimentan los concretos cuando son expuestos a altas temperaturas, se puede determinar si el mismo es reparable o no. El deterioro de una estructura de concreto que fue expuesta a 300°C puede ser reparable, sin embargo cuando la estructura de concreto se torna de color blanco, nos indica que ésta fue expuesta a 600°C y corresponde a una pérdida severa en la resistencia a la compresión, por tal motivo el concreto ya no puede ser reparado ya que no soportará las cargas de trabajo [40].

5.4.2. Velocidad de Pulso de Ultrasonidos (UPV)

La **Figura 19** muestra de forma gráfica los valores de velocidad de ultrasonidos relativa [$V_{Tc} / V_{22^{\circ}C}$] de los especímenes después de ser sometidos a las diferentes temperaturas de calentamiento, donde es posible observar que la velocidad de ultrasonidos se reduce de manera gradual con el aumento de la temperatura.

En investigaciones como la realizada por Abdul y colaboradores, se ha encontrado una mayor reducción en la velocidad de ultrasonidos cuando los especímenes se someten a temperaturas por encima de $450^{\circ}C$ la cual se atribuye a la degradación del gel CSH, por lo que la cantidad de huecos presentes en el concreto se incrementa y se reduce la velocidad de transmisión de las ondas de sonido a través de los especímenes de concreto [38, 43]

Por otra parte, se pudo apreciar que la reducción en la velocidad de ultrasonidos es mayor para los especímenes adicionados (NSG y HS) en comparación con los especímenes elaborados con 100% CPC. Lo anterior puede atribuirse a que la NSG y el HS densifican la matriz cementante, por lo cual la porosidad es reducida y existe una menor permeabilidad, limitando la capacidad de eliminar el vapor creado por la evacuación del agua libre en los poros y la deshidratación de la pasta de cemento, lo que provoca que se generen elevadas presiones y mayores daños en comparación con el espécimen sin adiciones.

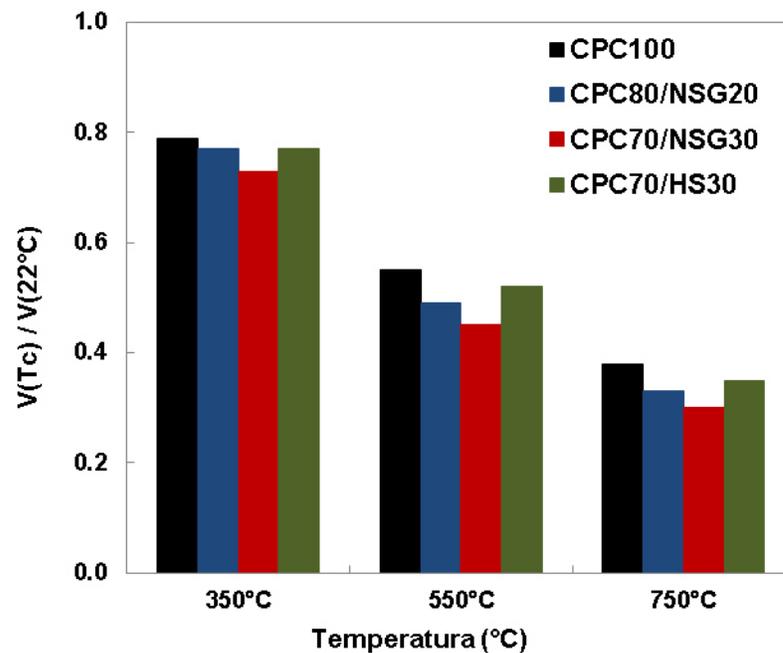


Figura 19.- Velocidad de ultrasonidos relativa

En investigaciones previas, se ha demostrado que la adición de humo de sílice mejora las propiedades físicas y mecánicas del concreto cuando es expuesto a altas temperaturas [65]. Saad y colaboradores, estudiaron concretos con sustituciones parciales de CPO por HS en porcentajes de 10%, 20% y 30% sometidos a temperaturas de hasta 600°C. Los resultados que obtuvieron indican que el concreto adicionado con humo de sílice en 10% es perfectamente estable para temperaturas de hasta 300°C, a temperaturas mayores (superiores a 600°C) las microgrietas comienzan a aparecer y a crecer. Sin embargo, este efecto no ocurre cuando la adición de humo de sílice se incrementa en porcentajes de 20-30%, ya que las microgrietas comienzan a aparecer después de someter el concreto a temperaturas por encima de 105°C y éstas crecen con el aumento en la temperatura de exposición [14]. Por lo tanto, la estabilidad térmica del concreto adicionado con humo de sílice disminuye con la adición de grandes porcentajes de HS (20-30%), tal como lo demuestran los resultados obtenidos en velocidad de ultrasonidos y pérdida de peso de nuestro trabajo de investigación.

Los resultados obtenidos en la velocidad de ultrasonidos así como en la pérdida de peso de esta investigación, indican que el concreto de referencia (100% CPC) tiene un mejor comportamiento cuando es sometido a altas temperaturas en comparación con los especímenes de concreto adicionados. Respecto a los especímenes de concreto adicionados (NSG y HS), podemos observar un mejor comportamiento del concreto adicionado con humo de sílice en comparación con el concreto adicionado con el residuo nanosílice geotérmica.

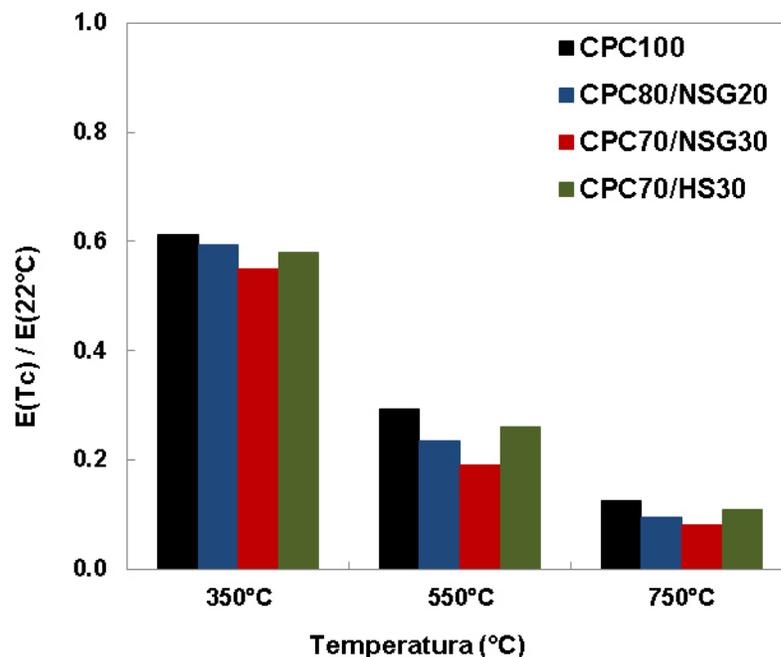


Figura 20.- Módulo elástico dinámico relativo

La **Figura 20** muestra los valores del módulo dinámico elástico relativo [$E_{Tc} / E_{22°C}$] que se calcularon con el valor obtenido de la velocidad de paso de ultrasonidos y mediante la **Ecuación 1**. Donde E es el módulo elástico dinámico en GPa, Cp es la velocidad de ultrasonidos medida en m/s, ρ es la densidad del material en kg/m^3 , y ν es el coeficiente de Poisson, considerado en 0.2 como lo plantean los autores Al-Assadi y Mohd en sus respectivas investigaciones ^[44, 45].

$$E = \frac{Cp^2 \rho (1 + \nu) (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Ecuación 1.- Determinación del módulo elástico dinámico

A partir de la **Figura 20** se puede observar una tendencia en la cual, el módulo elástico se reduce a medida que la temperatura de exposición aumenta, como se ha reportado en investigaciones como la realizada por Ozge y colaboradores, quienes trabajaron con concretos ligeros autocompactantes y sometidos a temperaturas de hasta 900°C ^[46, 47]. En esta investigación, la reducción del módulo elástico fue mayor en todos los casos (T_c) para los especímenes adicionados con HS y NSG en comparación al espécimen de referencia.

5.5. Caracterización de los especímenes posterior al régimen de calentamiento

5.5.1. Análisis Termogravimétrico Diferencial (ATD)

La **Figura 21** muestra el termograma del espécimen CPC100 inicial, en el cual podemos observar las pérdidas de peso a las diferentes temperaturas críticas. El DTG nos permite identificar con mayor claridad la pérdida de peso que ocurre a temperaturas inferiores a 100°C, la cual se debe principalmente a la pérdida del agua evaporable y agua capilar que se encuentra contenida en los poros ^[48]. En la región de 100°C y 400°C se observa una pérdida de peso continua que puede relacionarse con la deshidratación del gel CSH, como ha sido reportado en diversas investigaciones ^[8]. En la región de 400°C y 450°C, el DTG nos permite apreciar con claridad la pérdida de peso correspondiente a la deshidroxilación de la portlandita en CaO y agua, lo cual también se puede apreciar en el difractograma de la **Figura 29** ^[49]. A partir de 620°C se observa una pérdida de peso muy intensa, la cual corresponde a la descarbonatación del carbonato de calcio ($CaCO_3$) proveniente del agregado de naturaleza caliza ^[8, 35].

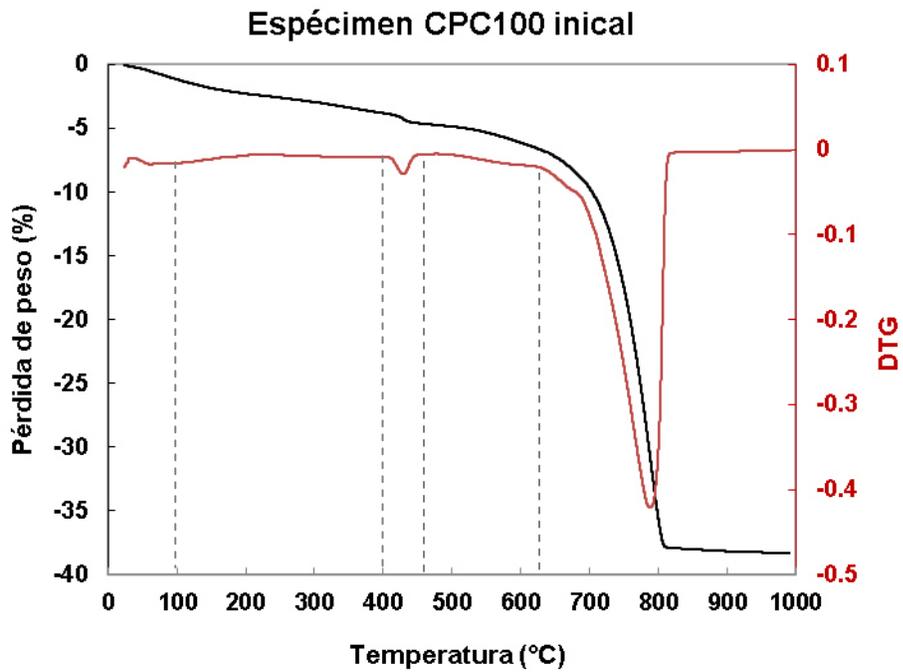


Figura 21.- TG/DTG espécimen CPC100 inicial

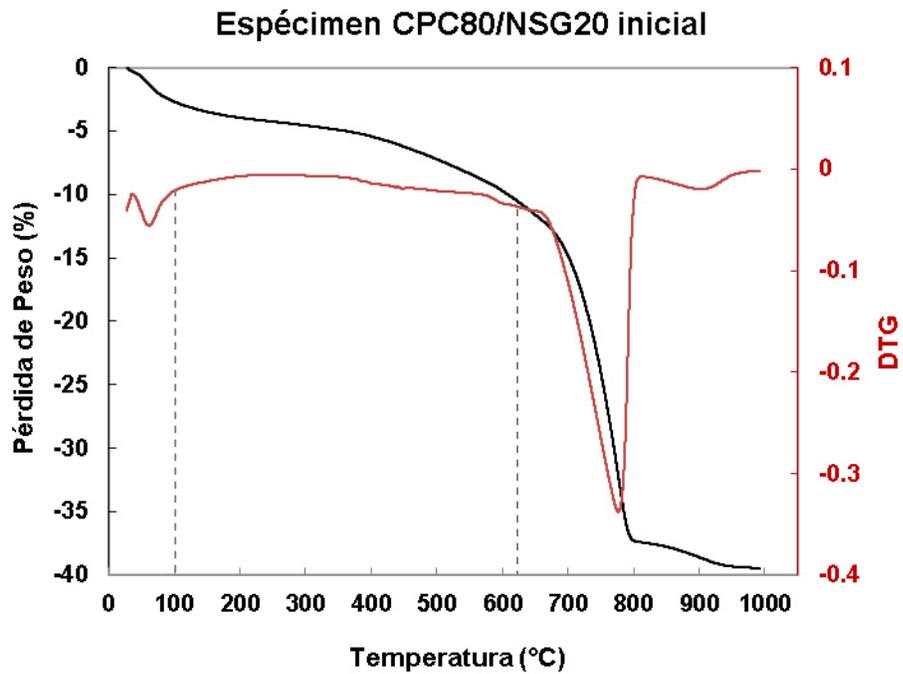


Figura 22.- TG/DTG espécimen CPC80/NSG20 inicial

La **Figura 22** muestra el termograma del espécimen CPC80/NSG20 inicial, en el cual podemos observar las principales pérdidas de peso a las diferentes temperaturas críticas, y como era de esperarse, el pico correspondiente a la transformación de la portlandita en CaO y H_2O no se aprecia en el termograma, lo cual es asociado a la actividad puzolánica que presenta el residuo nanosilíce geotérmico, reaccionando químicamente con el hidróxido de calcio para formar compuestos con propiedades cementantes, lo cual está en acuerdo con los resultados mostrados en el difractograma de la **Figura 30**.

La **Figura 23** y **Figura 24** muestran la pérdida de peso de los especímenes iniciales, donde a partir de los 300°C (considerando que entre los 200°C y 350°C comienza la deshidratación del gel CSH) podemos observar que esta pérdida es mayor para los especímenes adicionados en comparación con el espécimen de referencia. Como antes se ha mencionado, esto puede ser atribuido a que los especímenes adicionados producen mayores cantidades de gel CSH debido a la actividad puzolánica de la nanosílice geotérmica y del humo de sílice por lo cual la pérdida de peso en este rango de temperatura es mayor. A partir de la **Figura 24**, es posible apreciar como la curva presenta una caída más pronunciada de pérdida de peso a partir de los 400°C para los especímenes adicionados con NSG y como la curva de pérdida de peso que experimenta el espécimen adicionado con humo de sílice es muy similar a la del espécimen de referencia elaborado con 100% de CPC.

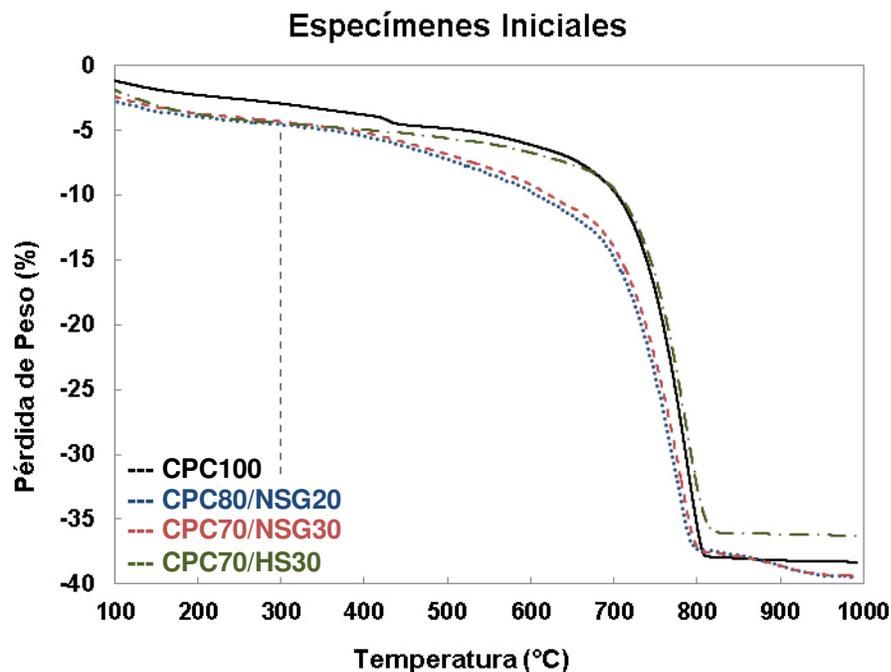


Figura 23.- Pérdida de peso de los especímenes iniciales

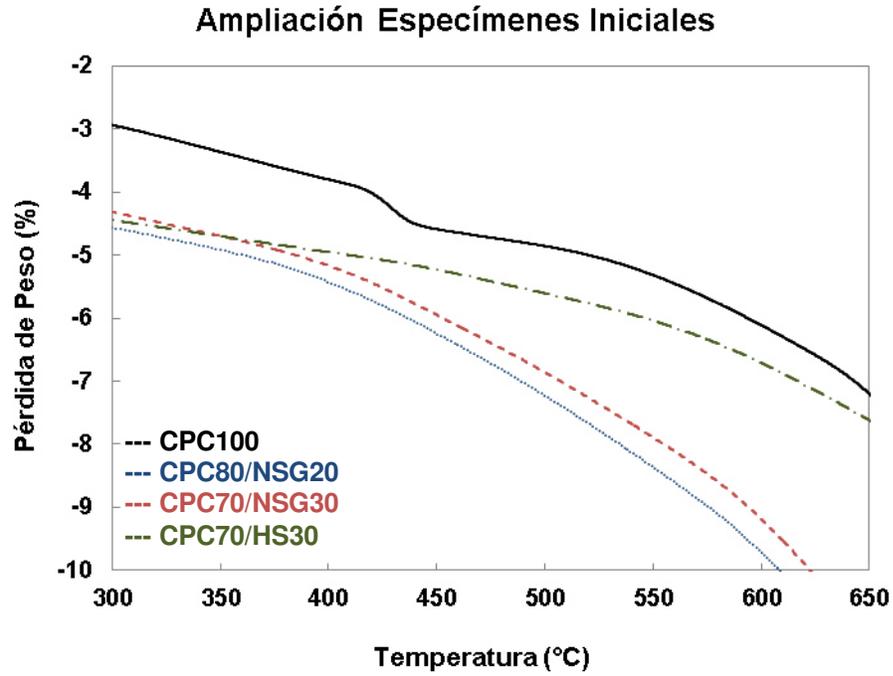


Figura 24.- Ampliación pérdida de peso de los especímenes iniciales

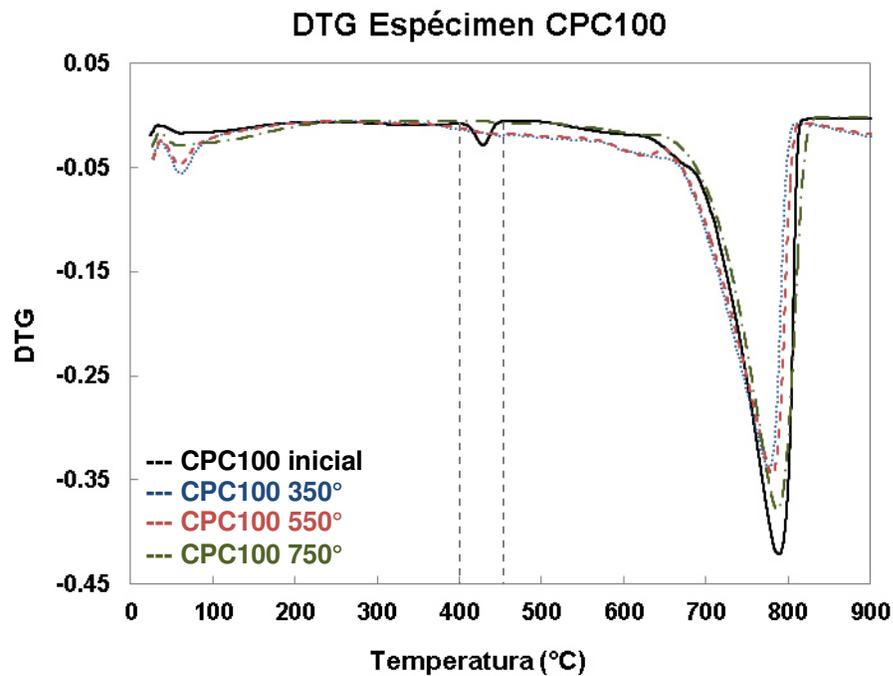


Figura 25.- DTG espécimen CPC100 inicial y a diferentes Tc

La **Figura 25** presenta las curvas DTG del espécimen CPC100 inicial y después de ser sometido a las tres temperaturas críticas, esto debido a que mediante el DTG se pueden apreciar las pérdidas de peso con mayor claridad a través de los picos que presenta. La ampliación que se muestra en la **Figura 26** nos permite observar como el pico correspondiente a la deshidratación de la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que se encuentra entre 400°C y 450°C está presente para los especímenes inicial y para la temperatura crítica de 350°C . Este pico desaparece cuando la temperatura crítica alcanzó 550°C , sin embargo a 750°C se puede apreciar nuevamente pero desplazado hacia la izquierda de la gráfica, lo que sugiere que ésta portlandita se formó durante la etapa de enfriamiento y es menos cristalina, por lo tanto se descompone a temperaturas inferiores como sugieren algunos investigadores [49, 50, 51].

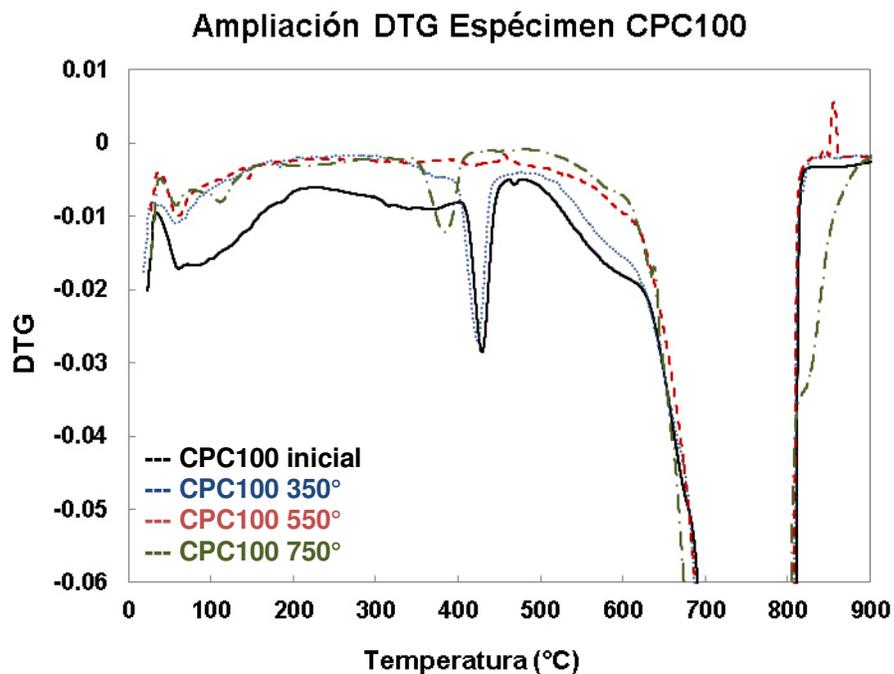


Figura 26.- Ampliación DTG espécimen CPC100 inicial y a diferentes T_c

La **Figura 27** muestra los DTG del espécimen CPC80/NSG20 inicial y después de ser sometidos a las tres diferentes temperaturas críticas. A partir de dicha figura es posible apreciar como el pico correspondiente a la transformación del CaCO_3 en CaO y CO_2 (descarbonatación) se desplaza ligeramente hacia la izquierda en comparación con el espécimen inicial. En la ampliación de la **Figura 28** se puede observar un segundo pico que aparece en el espécimen que fue sometido a 750°C , este pico es menos intenso lo que sugiere que se formó durante la fase de enfriamiento con el CO_2 que se encontraba

dentro del horno eléctrico y por lo tanto presenta menor cristalinidad y se descompone a menor temperatura como sugieren algunos investigadores ^[49, 52].

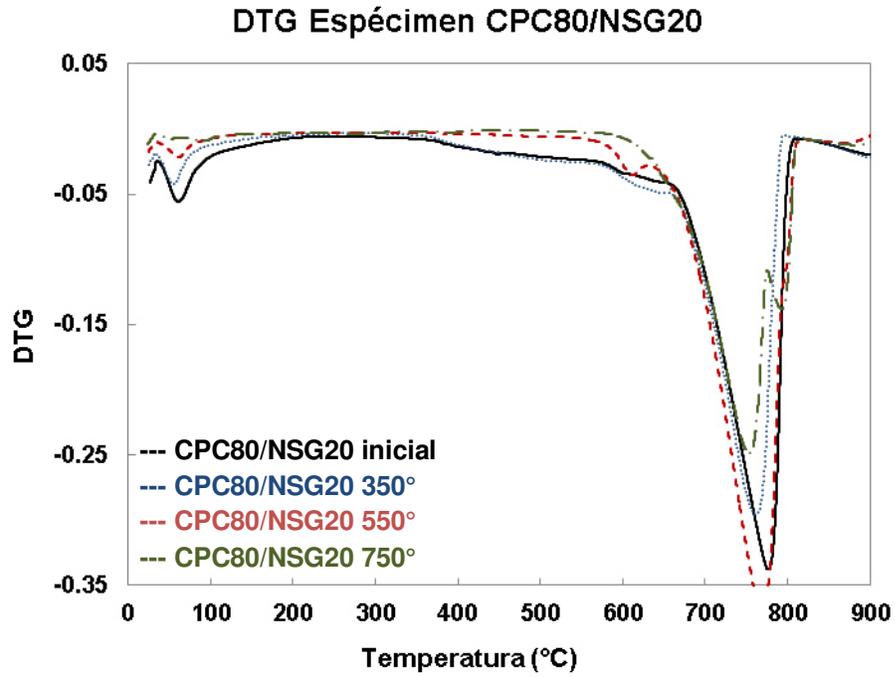


Figura 27.- DTG espécimen CPC80/NSG20 inicial y a diferentes Tc

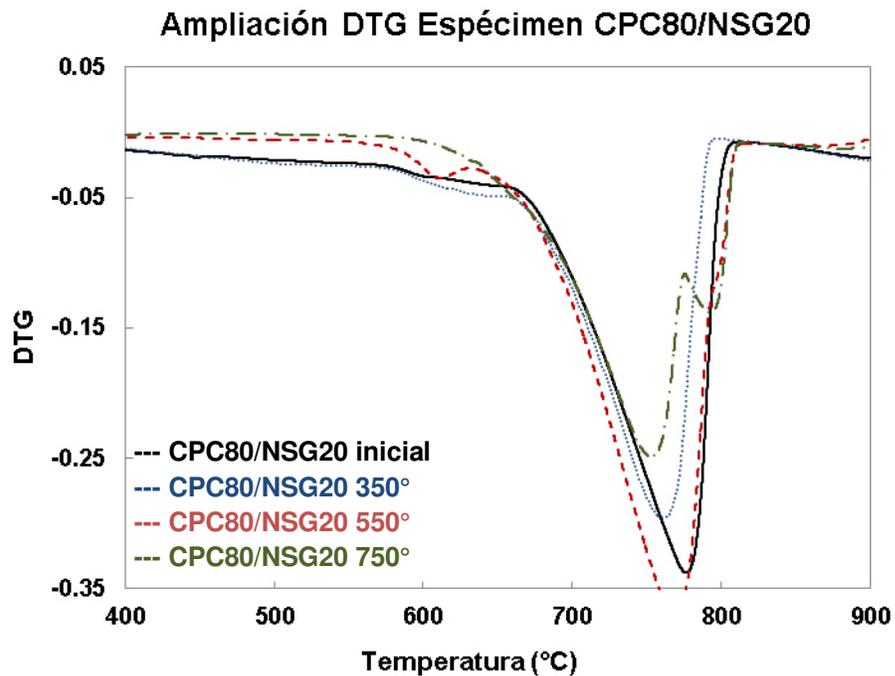


Figura 28.- Ampliación DTG espécimen CPC80/NSG20 inicial y a diferentes Tc

5.5.2. Difracción de Rayos X (DRX)

La **Figura 29** muestra el difractograma de los especímenes CPC100 inicial y después de ser sometidos a las tres diferentes temperaturas críticas. Las reflexiones típicas asociadas con la portlandita, calcita, cuarzo, gel tobermorita y dolomita fueron encontradas e identificadas. Es posible apreciar en dicha figura los picos correspondientes a la portlandita, así como los correspondientes a la calcita y dolomita provenientes del agregado.

El difractograma de la muestra inicial y el de la temperatura crítica de 350°C son muy similares, lo que confirma que las fases cristalinas detectadas no sufren transformación cuando se someten a la temperatura de 350°C. Es posible observar como en la muestra inicial y a 350°C existe un pico correspondiente a la portlandita el cual desaparece después de someterse a la temperatura crítica de 550°C, lo cual está en acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico mostrados en la **Figura 26** sin embargo, en el DTG de dicha figura se aprecia a 750°C el pico correspondiente a la portlandita que como anteriormente se discutió, se formó durante la etapa de enfriamiento y por tal motivo, es menos cristalino por lo cual en el DTG aparece desplazado y en el difractograma no es posible apreciarlo en el mismo ángulo 2θ ^[50]. La intensidad de los picos asociados a la calcita se incrementa con el aumento en la temperatura como puede observarse en la muestra sometida a 550°C ^[49].

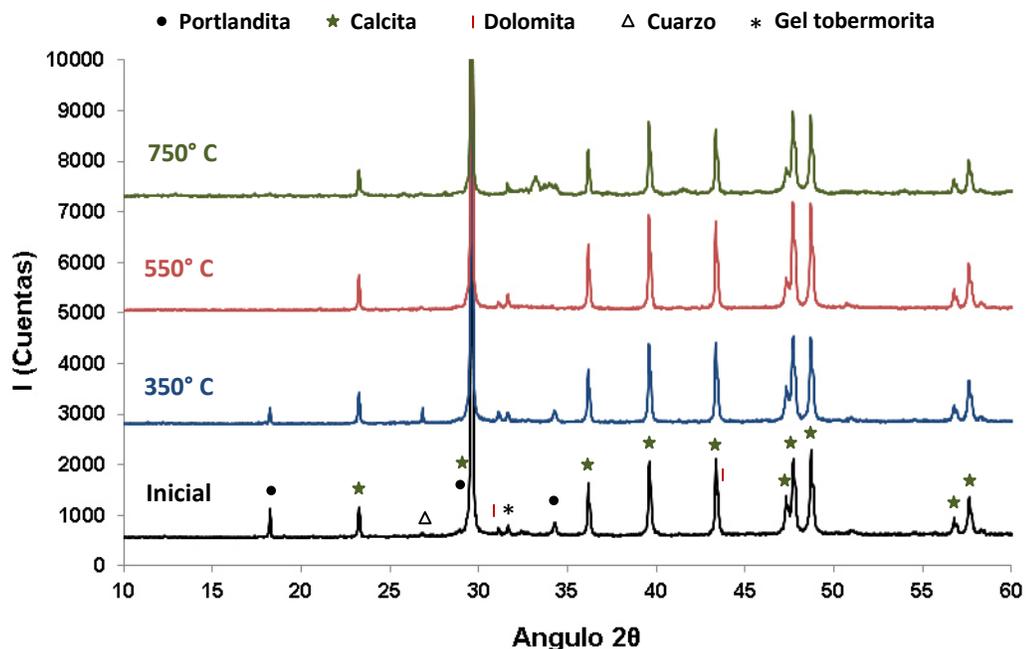


Figura 29.- Difractograma de los especímenes CPC100 inicial y a diferentes Tc

La **Figura 30** muestra el difractograma de los especímenes CPC80/NSG20 inicial y después de someterse a las tres diferentes temperaturas críticas. Las reflexiones típicas asociadas a la calcita, dolomita, gel tobermorita y cuarzo fueron encontradas e identificadas. Los difractogramas de la muestra inicial y a la temperatura crítica de 350°C son muy similares, lo que sugiere que las fases cristalinas detectadas no sufren transformación cuando se someten a la temperatura de 350°C. A diferencia del difractograma del espécimen CPC100, no se aprecia el pico correspondiente a la portlandita, lo cual se esperaba debido a la actividad puzolánica que presenta el residuo nanosílice geotérmica. Cuando el espécimen de concreto alcanzó la temperatura crítica de 550°C, los picos relacionados a la calcita muestran una mayor intensidad, hecho que también fue encontrado en el espécimen CPC100 ^[49].

En el difractograma correspondiente a 750°C encontramos algunos picos de baja intensidad que no se aprecian en las demás temperaturas críticas, por lo que se asocian al CaCO_3 formado durante la fase de enfriamiento posterior al régimen de calentamiento, lo cual está en acuerdo con los resultados obtenidos del análisis termogravimétrico de la **Figura 28**. El DTG de dicha figura muestra un pico desplazado que corresponde al carbonato de calcio, lo cual sugiere que es menos cristalino y se descompone a temperaturas más bajas como se discutió anteriormente ^[50].

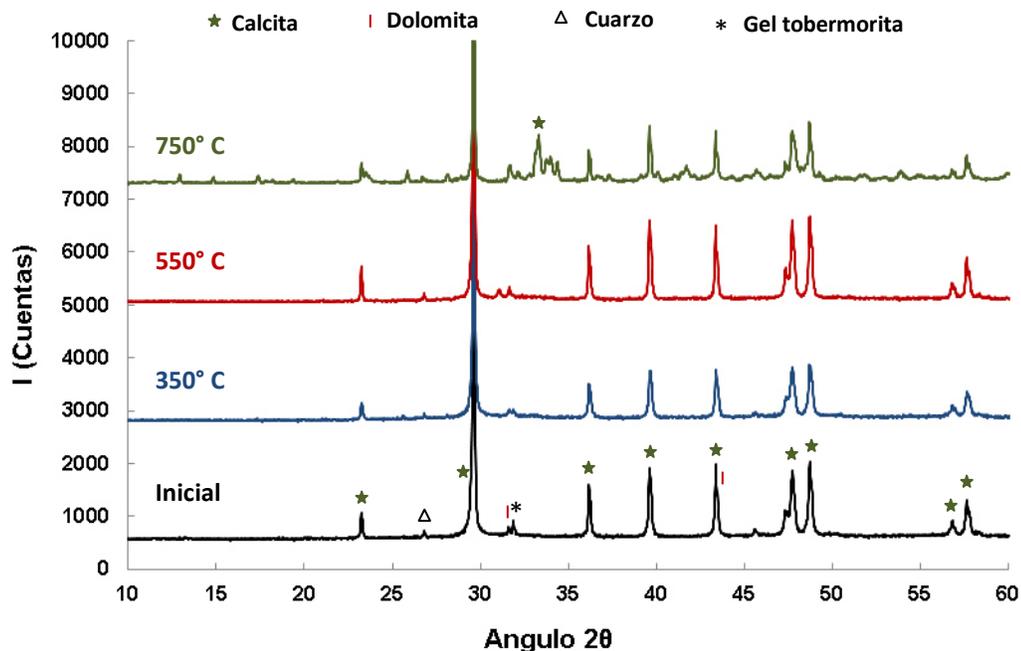


Figura 30.- Difractograma de los especímenes CPC80/NSG20 inicial y a diferentes Tc

5.5.3. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB-retrodispersados)

Mediante la microscopía electrónica de barrido en la modalidad de electrones retrodispersados se analizaron los especímenes de concreto con mayor detalle con la finalidad de entender el comportamiento que los mismos exhiben cuando son sometidos a altas temperaturas. La **Figura 31** muestra las imágenes de microscopía de los especímenes iniciales y es posible apreciar que la pasta de cemento presenta buena adherencia con los agregados, resultando en una matriz cementante compacta, además de poder apreciar en las diferentes muestras algunos anhidros los cuales se identifican por su tonalidad característica en color blanco y se encuentran rodeados por un anillo de reacción en color gris claro el cual es denominado producto interno. Las grietas que pueden encontrarse como en el caso de la **Figura 31 (d)** son asociadas al proceso de obtención de la muestra correspondiente.

CA = Cemento Anhído; PI = Producto Interno; PE = Producto Externo; Ag = Agregado

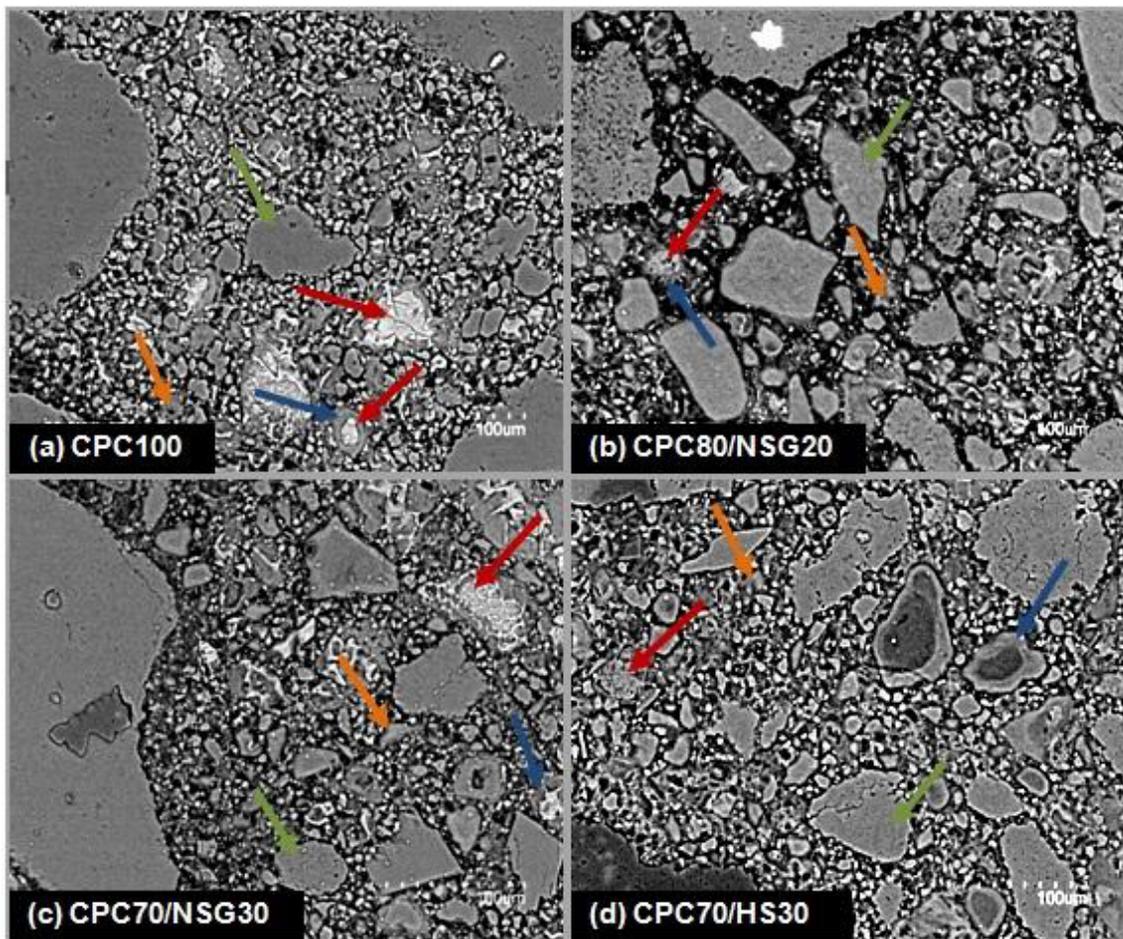


Figura 31.- MEB de los especímenes iniciales a 350x

La **Figura 32** muestra las imágenes del análisis de microscopía electrónica de barrido del espécimen CPC100 inicial y después de haber sido sometido a las tres diferentes temperaturas críticas. Es posible observar como al incrementar la temperatura de exposición, la microestructura del espécimen de concreto se va degradando ^[46]. La **Figura 32 (a)** presenta pocos huecos y podemos apreciar que existe buena adherencia entre el agregado y la pasta de cemento. A medida que la temperatura aumenta como se aprecia en la **Figura 32 (b)** comienzan a aparecer grietas en la zona de la interface agregado-pasta, contracción de la pasta de cemento y algunas fisuras, así como una mayor cantidad de huecos producto de la deshidratación de la pasta. Es posible observar que existe una separación entre el cemento anhidro y el anillo de producto interno que lo rodea. En la **Figura 32 (c)** la microestructura se ve con mayor deterioro producto de la temperatura de exposición de 550°C, se puede distinguir que los agregados de tipo calizo se encuentran en un desnivel en comparación con la pasta de cemento y la aparición de huecos es un poco mayor en comparación al espécimen sometido a 350°C. Por último, en la **Figura 32 (d)** las grietas que se observan y los huecos en la pasta de cemento nos indican el daño en la microestructura del espécimen sometido a 750°C.

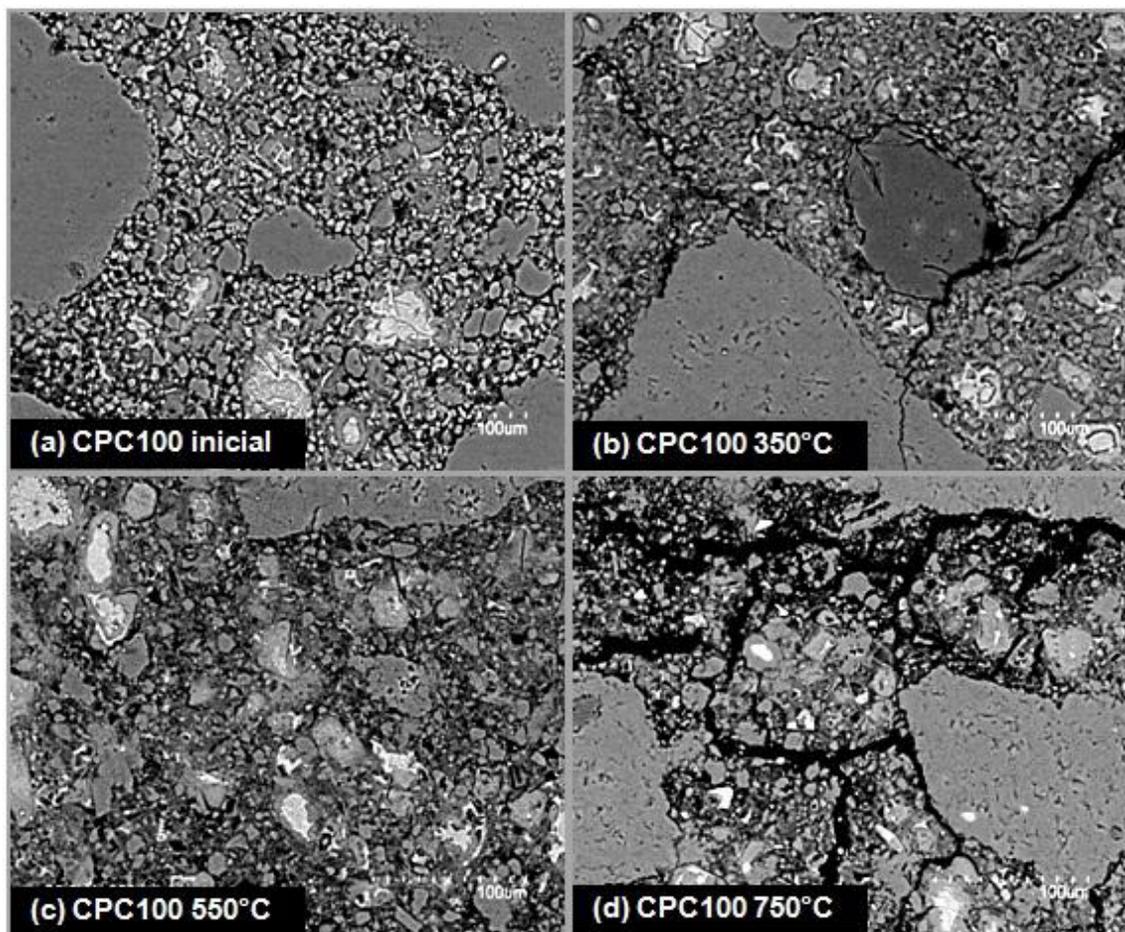


Figura 32.- MEB de los especímenes CPC100 a 350x y a diferentes Tc

Lo anterior está en acuerdo con el trabajo realizado por Peng y colaboradores, quienes estudiaron pastas de cemento sometidas a temperaturas de hasta 800°C, en el cual mencionan que la descomposición del gel CSH se vuelve significativa por encima de 600°C y la relación de descomposición se incrementa drásticamente con el aumento de la temperatura [53]. El gran deterioro que presentó el espécimen sometido a 750°C puede relacionarse con la pérdida de peso y reducción en la velocidad de ultrasonidos que para esta temperatura se incrementó considerablemente.

La **Figura 33** muestra el espesor de la fisura que encontramos en la zona de la interface agregado-pasta del espécimen CPC100 inicial y a las tres diferentes temperaturas de exposición. A medida que la temperatura de exposición aumenta, el espesor de la fisura en la interface agregado-pasta se incrementa, siendo considerablemente mayor cuando la temperatura alcanza 750°C. Esto está en acuerdo con el estudio realizado por Fares, quien trabajó con concretos autocompactantes sometidos a temperaturas de hasta 600°C y donde encuentra que éste espesor es más pronunciado por encima de 600°C [50]. El espesor promedio de las fisura en la zona agregado-pasta es de 1.2 micras, 5.42 micras y 7.16 micras a 350°C, 550°C y 750°C respectivamente.

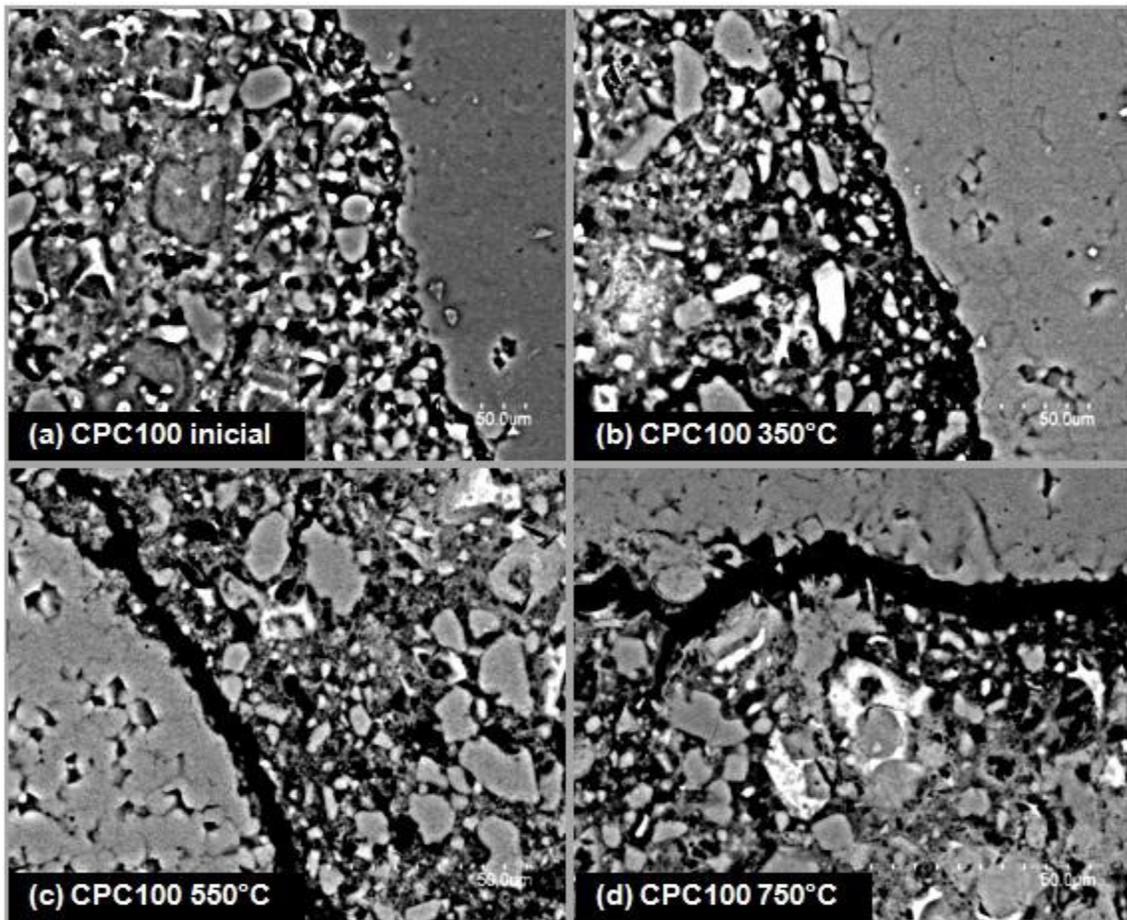


Figura 33.- MEB de los especímenes CPC100 (ITZ) a 1000x

En la **Figura 34** se muestran las imágenes SEM del espécimen CPC80/NSG20 inicial y después de haber sido sometido a las tres diferentes temperaturas críticas. La **Figura 34 (a)** muestra una matriz cementante con buena adherencia entre los agregados y la pasta de cemento. La **Figura 34 (b)** nos permite observar un ligero desnivel entre el cemento anhidro y el producto interno, la aparición de huecos producto de la deshidratación de la pasta de cemento es mayor que en el espécimen inicial sin embargo, las grietas que pueden observarse se asocian al proceso de obtención de la muestra y no como producto de la temperatura de exposición. La **Figura 34 (c)** muestra como la pasta se contrae dejando en un desnivel los agregados y la aparición de grietas comienza a presentarse sobre todo en la interface de la zona agregado-pasta. En la **Figura 34 (d)** nos muestra la formación de grietas no solo en la interface agregado-pasta, sino en la pasta de cemento en general, los huecos presentes en la pasta son mayores y se puede apreciar como los agregados comienzan a desintegrarse.

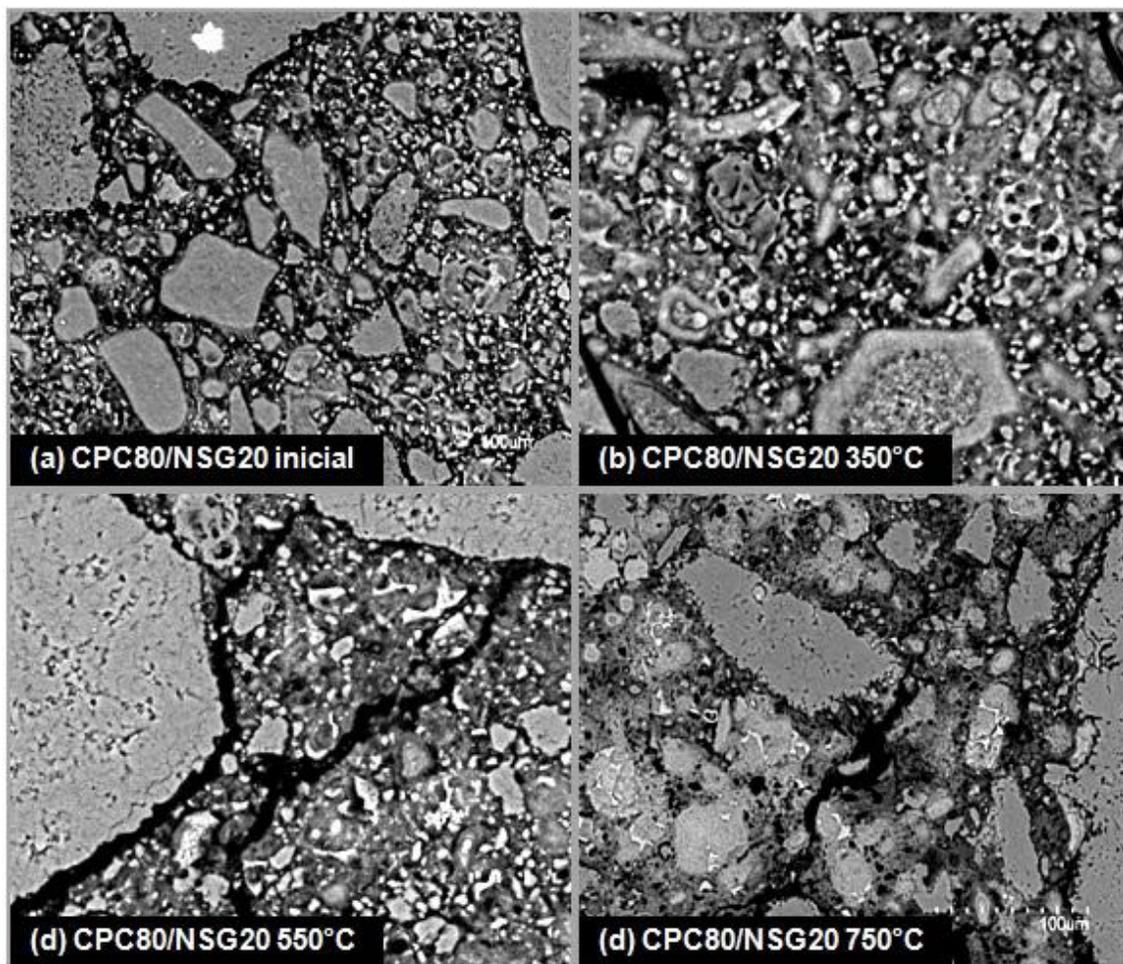


Figura 34.- MEB de los especímenes CPC80/NSG20 a 350x y a diferentes T_c

La **Figura 35** muestra el espesor de la fisura que encontramos en la zona de la interface agregado-pasta del espécimen CPC80/NSG20 inicial y a las diferentes temperaturas de exposición con el fin de comprender mejor el deterioro en la microestructura de los especímenes de concreto. A medida que la temperatura de exposición aumenta, el espesor de la fisura en la interface agregado-pasta se incrementa, siendo este considerablemente mayor cuando la temperatura alcanza 750°C, lo cual está en acuerdo con el estudio realizado por diversos investigadores, quienes concluyen que éste espesor es más significativo cuando se alcanzan temperaturas por encima de 600°C ^[50]. El espesor promedio de las fisura en la zona agregado-pasta es de 10.2 micras, 13.1 micras y 16.6 micras a 350°C, 550°C y 750°C respectivamente. En base a las medidas del espesor de las fisuras en esta zona, podemos apreciar que los espesores son mayores para el espécimen CPC80/NSG20 en comparación con el espécimen CPC100 en las tres temperaturas críticas y con lo cual se justifica la mayor pérdida de peso y reducción en la velocidad de ultrasonidos para el espécimen adicionado con 20% de residuo nanosílice geotérmica.

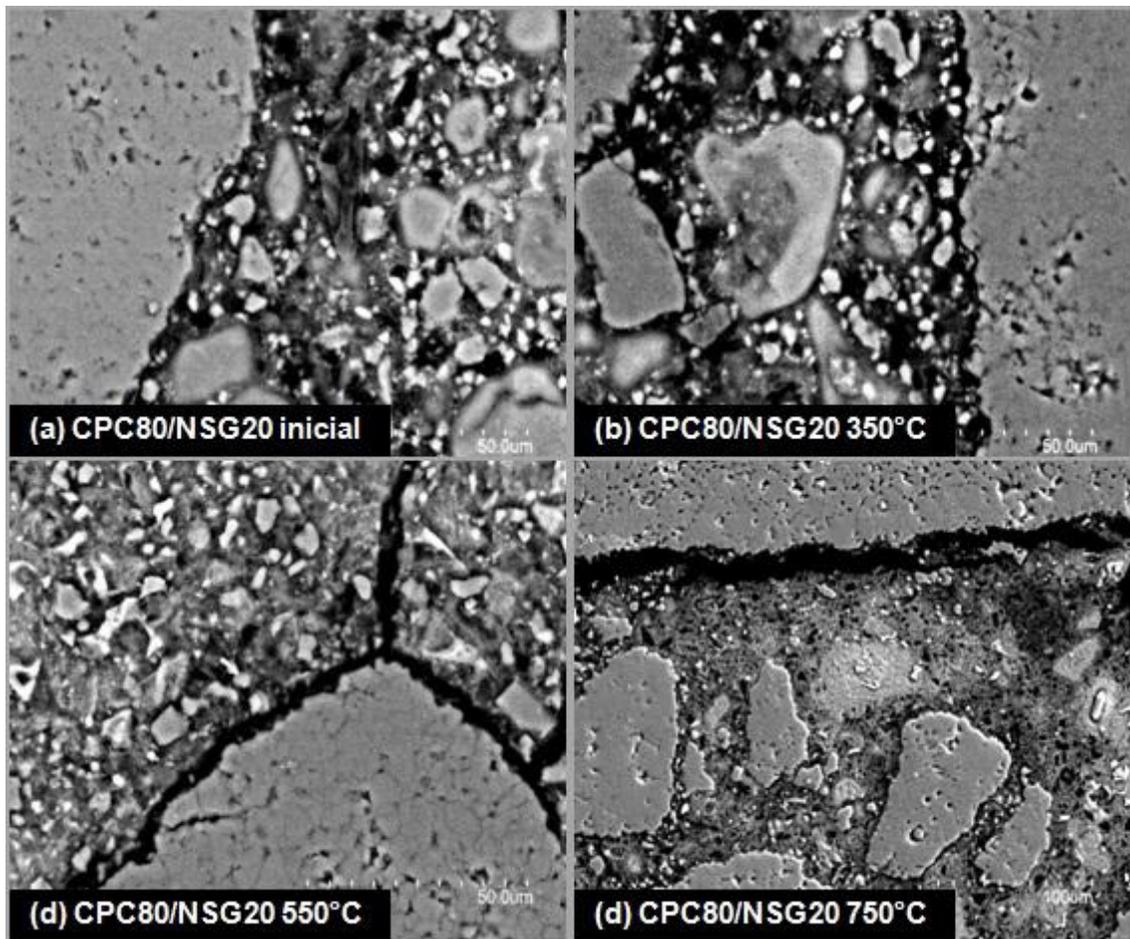


Figura 35.- MEB de los especímenes CPC80/NSG20 (ITZ) a 1000x

5.5.4. Análisis EDS

CA = Cemento Anhídrido; **PI** = Producto Interno; **PE** = Producto Externo; **Ag** = Agregado

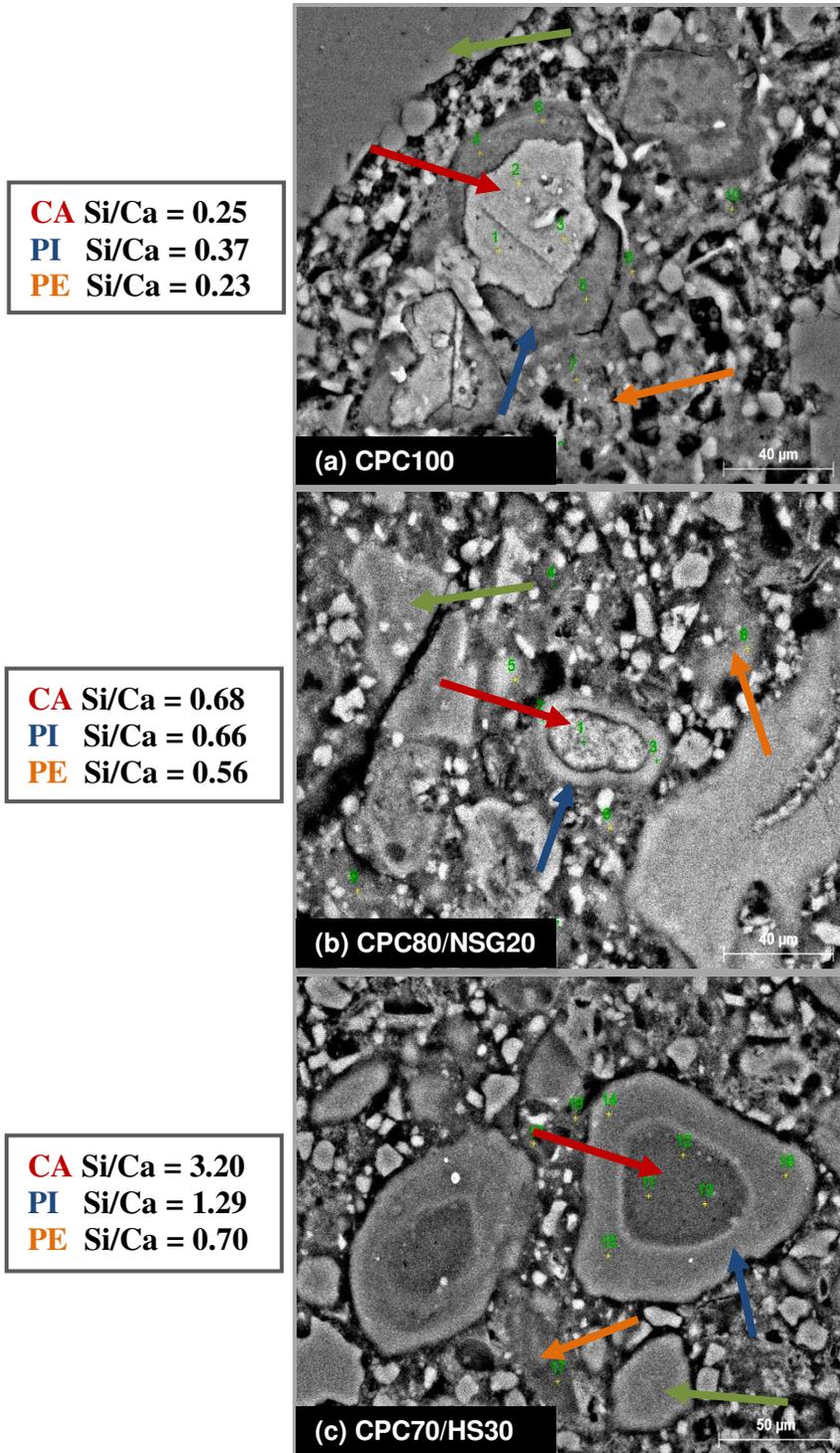


Figura 36.- Análisis EDS de los especímenes (a) CPC100, (b) CPC80/NSG20, (c) CPC70/HS30

A partir de los análisis EDS de la **Figura 36** se observa como existe diferencia en la relación Si/Ca, siendo esta relación mayor para los especímenes elaborados con NSG y HS en comparación con los elaborados únicamente con CPC. Este comportamiento puede atribuirse a que el Silicio que proviene de la NSG como del HS está incorporándose a la matriz cementante y actúa como punto de nucleación para reaccionar de manera activa con la portlandita en las reacciones de hidratación y el gel CSH producido tiene una alta concentración de Si ^[13]. Además, se puede apreciar como la microestructura del espécimen elaborado con 100% CPC es menos densa en comparación con la microestructura de los especímenes adicionados, esto es debido a la actividad puzolánica que presentan la NSG y HS y que genera mayores cantidades de gel CSH tanto en forma de productos internos como de productos externos.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta investigación como se mencionó, fue el de evaluar los procesos de degradación más relevantes que ocurren a microescala en el concreto cuando éste es sometido a altas temperaturas, haciendo una comparación entre el concreto adicionado (humo de sílice y residuo nanosílice geotérmica) y el concreto sin adiciones (elaborado con cemento portland compuesto). A partir de los resultados obtenidos en el Capítulo 5 se llegó a las siguientes conclusiones:

1. La pérdida de peso de los especímenes cuando fueron sometidos a las temperaturas críticas de 350°C y 550°C fue relativamente baja, siendo más significativa la pérdida de peso cuando la temperatura crítica alcanzó 750°C. La pérdida de peso fue mayor para los especímenes adicionados con el residuo nanosílice geotérmica en comparación con el espécimen de referencia (100% CPC) y el espécimen adicionado con humo de sílice, incrementándose la pérdida de peso a medida que se aumentaba la temperatura de exposición.
2. La velocidad de ultrasonidos disminuyó conforme la temperatura de exposición aumenta, siendo esta disminución mayor para los especímenes adicionados en comparación con el espécimen elaborado únicamente con CPC. La actividad puzolánica de las adiciones (HS y NSG) contribuyó a formar una matriz cementante más densa, por lo cual al someterse los especímenes a altas temperaturas, la capacidad para eliminar el vapor de agua se redujo provocando daños más severos en el espécimen de concreto resultando en una mayor disminución de la velocidad de ultrasonidos.
3. El módulo dinámico elástico disminuyó a medida que la temperatura de exposición aumentó, siendo mayor la reducción para los especímenes con adiciones de HS y NSG en comparación con el espécimen de referencia (100% CPC). De manera general, la reducción en el módulo elástico es de aproximadamente 40%, 75% y 90% para las temperaturas críticas de 350°C, 550°C y 750°C respectivamente.

4. A partir de los análisis termogravimétricos se identificaron las principales pérdidas de peso y las temperaturas críticas en las cuales ocurren estas pérdidas. Para los especímenes iniciales, la pérdida de peso en el rango de temperaturas de 300°C a 400°C fue mayor para los especímenes adicionados con HS y NSG comparado con el espécimen de referencia. Los perfiles DTG de los especímenes CPC100 y CPC80/NSG20 que fueron sometidos a la temperatura crítica de 750°C muestran picos relacionados con la portlandita y carbonato de calcio respectivamente pero menos intensos y desplazados de la curva de referencia, lo que sugiere que éstos se formaron durante la etapa de enfriamiento y por lo cual, son menos cristalinos y se descomponen a temperaturas menores.
5. En los difractogramas iniciales y a las diferentes temperaturas críticas (350°, 550° y 750°C) de los especímenes CPC100 y CPC80/NSG20 se identificaron las reflexiones típicas relacionadas a la portlandita, calcita, cuarzo, dolomita y gel tobermorita. El difractograma inicial y después de ser sometida la muestra a la temperatura crítica de 350°C son muy similares, lo que sugiere que no existen cambios significativos en las fases cristalinas a esta temperatura de exposición. Para la muestra CPC100, la portlandita se identificó en el difractograma inicial y a 350°C, sin embargo éste desaparece para la temperatura de 550°C y 750°C, lo cual está en acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico. El pico correspondiente a la portlandita que se identificó en el DTG a 750°C como antes se mencionó, es menos cristalino y por tal razón no se aprecia en el ángulo 2θ correspondiente del difractograma a dicha temperatura. Para la muestra CPC80/NSG20, a la temperatura crítica de 750°C se aprecian picos de baja intensidad que se relacionan al carbonato de calcio formado durante la fase de enfriamiento y de menor cristalinidad, como antes se discutió.
6. Las imágenes de microscopía electrónica de barrido permitieron estudiar el efecto de las diferentes temperaturas de exposición en la microestructura de las muestras CPC100 y CPC80/NSG20. A medida que la temperatura crítica se incrementaba, el daño en la microestructura de las muestras aumentaba, causando agrietamiento principalmente en la zona de la interface agregado-pasta, generando la aparición de huecos producto de la deshidratación y contracción de la pasta de cemento, además de que se apreció un desnivel entre la pasta de cemento y el agregado calizo. Se tomaron medidas del espesor de la fisura en la zona de la interface agregado-pasta a las diferentes temperaturas críticas, siendo mayor el espesor de la fisura para los especímenes adicionados con NSG en todos los casos, lo cual está en concordancia con los resultados obtenidos en la pérdida de peso y reducción en la velocidad de ultrasonidos.

BIBLIOGRAFIA

1. Ali, M., Saidur, R., Hossain, M.: **“A review on emission analysis in cement industries”**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, (2011) 2252-2261.
2. Hasanbeigi, L. P., Lin, E.: **“Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review”**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, (2012) 6220-6238.
3. Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., Bahadori, A.: **“Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry”**, *Journal of Cleaner Production*, 51, (2013) 142-161.
4. Higuchi, T., Morioka, M., Yoshioka, I., Yokozeki, K.: **“Development of a new ecological concrete with CO₂ emission below zero”**, *Construction and Building Materials*, 67, (2014) 338-343.
5. Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., Bolio, H.: **“Sustainable cement production – present and future”**, *Cement and Concrete Research*, 41, (2011) 642-650.
6. NMX-C-403-ONNCCE-1999, **“Concreto hidráulico de uso estructural”**.
7. Ahmet, K., Nabi, Y., Nihat, K.: **“Thermo-physical properties of concrete exposed to high temperatures”**, *Construction and Building Materials*, 45, (2013) 157-161.
8. Omer, A.: **“Effects of elevated temperatures on properties of concrete”**, *Fire Safety Journal*, 42, (2007) 516-522.
9. Ali, B., Hasan, Z.: **“Effect of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high strength concrete after exposure to high temperatures”**, *Cement and Concrete Composites*, 30, (2008) 106-122.
10. Rodriguez-Camacho, R., Uribe-Afif, R.: **“Importance of using the natural pozzolans on concrete durability”**, *Cement and Concrete Research*, 32, (2002) 1851-1858.

11. Escalante, J., Mendoza, G., Mancha, H., López, J., Vargas, G.: **“Pozzolanic properties of a geothermal silica waste material”**, *Cement and Concrete Research*, 29, (1999) 623-625.
12. Gómez, L., Escalante, J., Mendoza, G.: **“Geothermal silica as an alternative replacement material of portland cement”**, *Journal of Materials Science Letters*, 39, (2004) 4021-4025.
13. Puente, R.: **“Efecto de la adición del residuo nanosilíce geotérmica sobre la durabilidad de morteros y concreto base cemento portland”**, *Tesis Doctoral*, (2012).
14. Saad, M., Abo-El-Enein, S., Hanna, G., Kotkata, M.: **“Effect of silica fume on the phase composition and microstructure of thermally treated concrete”**, *Cement and Concrete Research*, 26, (1996) 1479-1484.
15. Morteza, B., Mazyar, B., Farhad, A.: **“Performance of nano silica modified high strength concrete at elevated temperatures”**, *Construction and Building Materials*, 68, (2014) 402-408.
16. Alejandro-Sánchez, F. J.: **“Historia, caracterización y restauración de morteros”**, *Sevilla*, (2002).
17. Neville, A.: **“Concrete Technology”**, *2nd Edition*, (2010).
18. Arcos-Molina, J.: **“Los materiales básicos de la construcción”**, (2007).
19. Gagg, C.: **“Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis”**, *Engineering Failure Analysis*, 40, (2014) 114-140.
20. Mamlouky, M., Zaniewski, J.: **“Materiales para ingeniería civil”**, *Madrid: Pearson Education*, (2009).
21. **“Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement”**, *ASTM International*, (2003) 1-3.
22. **“Standard Specification for Portland Cement”**, *ASTM International*, (2004) 1-8.
23. NMX-C-414-ONNCCE, **“Industria de la Construcción: cementos hidráulicos, especificaciones y métodos de prueba”**, (2005) 1-2.

24. Calleja, J.: **“Empleo racional de los cementos para los diferentes tipos de obras”**, *Materiales de Construcción*, (1980) 1-57.
25. Mehta, P., Monteiro, P.: **“Concrete: Microstructure, Properties and Materials”**, *California-USA: McGraw-Hill*, (2006).
26. Tang, S., Yao, Y., Andrade, C., Li, Z.: **“Recent durability studies on concrete structure”**, *Cement and Concrete Research*, 78, (2015) 143-154.
27. Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., Tanesi, J.: **“Diseño y Control de Mezclas de Concreto”**, *Illinois-USA: Portland Cement Association*, (2004).
28. Juenger, M., Siddique, R.: **“Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete”**, *Cement and Concrete Research*, 78, (2015) 71-80.
29. **“Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates”**, *ASTM International*, (2003).
30. **“Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”**, *ASTM International*, (2003).
31. www.energia.gob.mx
32. Revie, R.: **“Uhlig’s Corrosion Handbook”**, *Third Edition, United States*, (2011).
33. Cree, D., Green, M., Noumowe, A.: **“Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: A review”**, *Construction and Building Materials*, 45, (2013) 208-223.
34. Cattelan, R., Pinto, L., Casonato, C.: **“Improving the high performance concrete behavior in high temperatures”**, *Material Construction*, 53, (2003) 271-272.
35. Sakr, K., El-Hakim, E.: **“Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties”**, *Cement and Concrete Research*, 35, (2005) 590-596.
36. Qingtao, L., Zhuguo, L., Guanglin, Y.: **“Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing GGBFS as cementitious material”**, *Construction and Building Materials*, 35, (2012) 687-692.

37. Mohamed, H., Ali, A., Ismail, M., Awad, S.: **“Behavior of composite cement pastes containing silica nano particles at elevated temperatures”**, *Construction and Building Materials*, 70, (2014) 339-350.
38. Abdul, A., Shehu, I.: **“Performance evaluation of concrete containing high volume palm oil fuel ash exposed to elevated temperature”**, *Construction and Building Materials*, 76, (2015) 214-220.
39. Morsy, M., Galal, A., Abo-El-Enein, S.: **“Effect of temperature on phase composition of microstructure of artificial pozzolan-cement pastes containing burnt kaolinite clay”**, *Cement and Concrete Research*, 28, (1998) 1157-1163.
40. Akca, A., Zihnioglu, N.: **“High performance concrete under elevated temperatures”**, *Construction and Building Materials*, 44, (2013) 317-328.
41. Ali, E., Gokhan, K., Serhat, B. M., Mohamed, Y.: **“The effect of cement dosage on mechanical properties of concrete exposed to high temperatures”**, *Fire Safety Journal*, 55, (2013) 160-167.
42. Lin, W., Lin, T.: **“Microstructure of fire damage concrete”**, *ACI Mater J*, 3, (1996) 199-205.
43. Yang, H., Lin, Y., Hsiao, C., Liu, J.: **“Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity”**, *Fire Safety Journal*, 44, (2009) 121-130.
44. Al-Assadi, M., Fernández, J., Galvez, J.: **“Evaluación del deterioro del hormigón sometido a ciclos hielo-deshielo”**, *Anales de Mecánica de la Fractura*, 26, (2009) 472-477.
45. Mohd, S., Jagdish, P., Amjad, M.: **“Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS”**, *Construction and Building Materials*, 40, (2013) 944-950.
46. Ozge, A., Selim, H.: **“Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self consolidating lightweight aggregate concrete”**, *Construction and Building Materials*, 34, (2012) 575-583.

47. Morsy, M., Al-Salloum, Y., Abbas, H., Alsayed, S.: **“Behavior of blended cement mortars containing nano metakaolin at elevated temperatures”**, *Construction and Building Materials*, 35, (2012) 900-905.
48. Khoury, G.: **“Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment”**, *Magazine of Concrete Research*, 44, (1992) 291-309.
49. Alonso, C., Fernandez, L.: **“Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environment”**, *Journal of Materials Science*, 39, (2004) 3015-3024.
50. Fares, H., Remond, S., Noumove, A., Cousture, A.: **“High temperature behavior of self-consolidating concrete: microstructure and physicochemical properties”**, *Cement and Concrete Research*, 40, (2010) 488-496.
51. Alarcon, L., Platret, G., Massieu, E., Ehlacher, A.: **“The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on cement paste”**, *Cement and Concrete Research*, 35, (2005) 609-613.
52. Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Turrillas, X., Campo, J.: **“Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction”**, *Cement and Concrete Research*, 34, (2004) 1633-1644.
53. Peng, G., Huang, Z.: **“Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures”**, *Construction and Building Materials*, 22, (2008) 593-599.
54. Ingham, J. P.: **“Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures”**, *Materials Characterization*, 60, (2009) 700-709.
55. Bahar, D., Oguzhan, K.: **“Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume”**, *Fire Safety Journal*, 45, (2010) 385-391.
56. Abdul, A., Shehu, I. A., Ismail, M.: **“Effect of cooling regime on the residual performance of high-volume palm oil fuel ash concrete exposed to high temperatures”**, *Construction and Building Materials*, 98, (2015) 875-883.
57. Georgali, B., Tsakiridis, P. E.: **“Microstructure of fire-damaged concrete. A case study”**, *Cement and Concrete Composites*, 27, (2005) 255-259.

58. Savva, A., Manita, P., Sideris, K. K.: **“Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates”**, *Cement and Concrete Composites*, 27, (2005) 239-248.
59. Yuksel, I., Siddique, R., Ozkan, O.: **“Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement”**, *Construction and Building Materials*, 25, (2011) 967-972.
60. Dias, W., Khoury, G., Sullivan, P.: **“Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700°C”**, *ACI Mater J*, 87, (1990) 160-165.
61. Aydin, S., Baradan, B.: **“Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars”**, *Cement and Concrete Research*, 37, (2007) 988-995.
62. Xu, Y., Wong, Y., Poon, C., Anson, M.: **“Impact of high temperature on PFA concrete”**, *Cement and Concrete Research*, 31, (2001) 1065-1073.
63. Xu, Y., Wong, Y., Poon, C., Anson, M.: **“Influence of PFA on cracking of concrete and cement paste after exposure to high temperatures”**, *Cement and Concrete Research*, 33, (2003) 2009-2016.
64. Hertz, K. D.: **“Danish investigations on silica fume concretes at elevated temperatures”**, *ACI Mater J*, 89, (1992) 345-347.
65. Rahel, K., Kambiz, R., Roszilah, H., Moh, R.: **“The effect of high temperature on mortars containing silica fume”**, *Journal of Applied Sciences*, 11, (2011) 2666-2669.
66. Felicetti, R., Gambarova, P.: **“Effects of high temperature on the residual compressive strength of high strength siliceous concretes”**, *ACI Mater J*, 95, (1998) 395-406.
67. Tanyildizi, H., Coskun, A.: **“The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash”**, *Construction and Building Materials*, 22, (2008) 2269-2275.

68. Xiao, J., Falkner, H.: **“On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibers at elevated temperatures”**, *Fire Safety Journal*, 41, (2006) 115-121.
69. Saad, M., Abo-El-Eneini S., Hanna, G., Kotkatat, M.: **“Effect of temperature on physical and mechanical properties of concrete containing silica fume”**, *Cement and Concrete Research*, 26, (1996) 669-675.
70. Mendes, A., Sanjayan, J., Collins, F.: **“Phase transformations and mechanical strength of OPC/slag pastes submitted to high temperatures”**, *Mater Struct*, 41, (2008) 345-350.
71. Wang, H.: **“The effects of elevated temperature on cement paste containing GGBFS”**, *Cement and Concrete Composites*, 30, (2008) 992-999.
72. Aydin, S.: **“Development of a high temperature resistant mortar by using slag and pumice”**, *Fire Safety Journal*, 43, (2008) 610-617.
73. Carrete, G., Painter, K., Malhotra, V.: **“Sustained high temperature effect on concretes made with normal portland cement, normal portland cement and slag, or normal portland cement fly ash”**, *Concrete International*, 4, (1982) 41-51.
74. Singh, L., Karade, S., Bhattacharyya, S., Yousuf, M., Ahalawat, S.: **“Beneficial role of nanosilica in cement based materials. A review”**, *Construction and Building Materials*, 47, (2013) 1069-1077.
75. Ibrahim, R., Hamid, R., Taha, M.: **“Fire resistance of high volume fly ash mortars with nanosilica addition”**, *Construction and Building Materials*, 36, (2012) 779-786.
76. Heikal, M., Al-Duaij, O., Ibrahim, N.: **“Microstructure of composite cements containing blast-furnace slag and silica nanoparticles subjected to elevated thermally treatment temperature”**, *Construction and Building Materials*, 93, (2015) 1067-1077.
77. Stanislaw, F., Maciej, S.: **“Analysis of the development of cluster cracks caused by elevated temperatures in cement paste”**, *Construction and Building Materials*, 83, (2015) 223-229.

78. Qianmin, M., Rongxin, G., Zhiman, Z., Zhiwei, L., Kecheng, H.: “**Mechanical properties of concrete at high temperature. A review**”, *Construction and Building Materials*, 93, (2015) 371-383.
79. Peng, G., Yang, W., Zhao, J., Liu, Y., Bian, S., Zhao, L.: “**Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures**”, *Cement and Concrete Research*, 36, (2006) 723-727.
80. Han, Ch., Hwang, Y., Yang, S., Gowripalan, N.: “**Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement**”, *Cement and Concrete Research*, 35, (2005) 1747-1753.
81. Chen, B., Liu, J.: “**Residual strength of hybrid fiber reinforced high strength concrete after exposure to high temperatures**”, *Cement and Concrete Research*, 34, (2004) 1065-1069.
82. Gao, D., Yan, D., Li, X.: “**Splitting strength of GGBFS concrete incorporating with steel fiber and polypropylene fiber after exposure to elevated temperatures**”, *Fire Safety Journal*, 54, (2012) 67-73.
83. Zheng, W., Li, H., Wang, Y.: “**Compressive stress-strain relationship of steel fiber reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures**”, *Construction and Building Materials*, 35, (2012) 931-940.
84. Danying, G., Dongming, Y., Xiangyu, Li.: “**Splitting strength of GGBFS concrete incorporating with steel fiber and polypropylene fiber after exposure to elevated temperatures**”, *Fire Safety Journal*, 54, (2012) 67-73.
85. **International Center for Diffraction Data, Powder Diffraction File search manual**, (1998).