

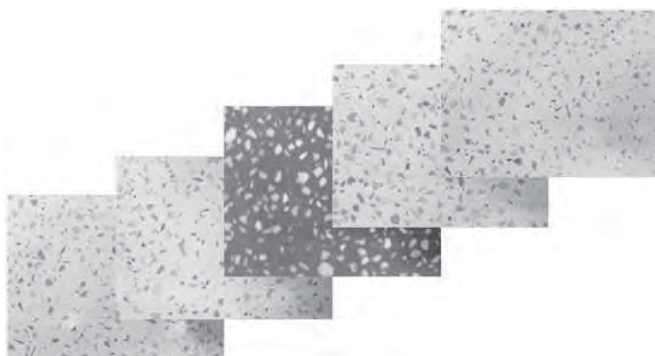
U M S N H

*UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO*

*MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS
TERRESTRES*



“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN NANO, MICRO Y MACRO ESTRUCTURAL DE GEOPOLÍMEROS MULTIFUNCIONALES PARA SU USO EN ULTRA-THIN COMPOSITE PAVEMENTS (ETAPA CERO)”



TESIS DE MAESTRÍA

Ing. Emmanuel Alejandro Martínez Hernández.

**Para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA**

Director de Tesis:

Dr. José Carlos Rubio Avalos

[Febrero 2011, Morelia Michoacán]

A mis padres. . . simplemente por todo.

Agradecimientos

Esta tesis ha sido fruto del esfuerzo de muchas personas, esfuerzo profesional por parte de algunos, y por parte de otros, personal y moral. Su ayuda ha sido imprescindible en el camino. . .

Agradezco primeramente a Dios; por permitirme después de varios años de mi vida de navegar en el mar de las ideas y de darme una fuerza inmensa para sobreponerme a las adversidades de Él y por que después de navegar tanto tiempo a la deriva hoy me has permitido llegar a tierra firme de nuevo.

Gracias al Dr. José Carlos Rubio Avalos, quien fue el que me motivó a emprender este proyecto y el que siempre estuvo ahí detrás, a lo largo de dos años y medio; orientando, aconsejando, corrigiendo, animando. . . Ha sido un honor trabajar con usted profesionalmente y un placer haberlo tratado como persona.

Igualmente quiero expresar un enorme agradecimiento a la **U.M.S.N.H** y en especial al cuerpo docente de la Maestría en Infraestructura del Transporte de la Rama de las Vías Terrestres por haber inculcado en mí el conocimiento y los valores para ejercer de una manera ética y profesional esta carrera.

De la misma manera quisiera agradecer a la **Facultad de Ingeniería Civil, al Laboratorio de Materiales y la Sección de Investigación e Innovación Tecnológica en materiales de construcción.**

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la beca otorgada para la realización de estudios de Maestría en el marco de programas de PNPC.

Se Agradece la colaboración del **Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ)** y al apoyo en Física de materiales del Dr. José de Jesús Pérez Bueno.

Agradecemos a **SIALATO S.A de C.V.**® por permitirnos el acceso a sus instalaciones de investigación, su asesoría científico-tecnológica en el área de nano-materiales, así como el uso de su infraestructura y equipos de laboratorio para el desarrollo complementario del presente trabajo de investigación.

A mis compañeros de profesión, en especial al Ingeniero Gibrán y Fernando, quiero agradecerle las innumerables discusiones científicas, los consejos, la dedicación y sobre todo el buen ambiente de trabajo que siempre hemos tenido.

Gracias a todos los amigos, que directa o indirectamente, han contribuido al desarrollo de lo que es mi Tesis de Maestría; porque siempre han estado conmigo, dispuestos a apoyarme, animarme y sobre todo a escucharme. . . tarea que requiere a veces mucha paciencia y disciplina.

No puedo concluir los agradecimientos sin mencionar a mi familia, a mis hermanos y en especial a mis padres, Oscar Martínez y Emilia Hernández, ustedes han hecho de mí lo que soy y por el mejor de los consejos para el trabajo: su ejemplo.

Ing. Emmanuel Alejandro Martínez Hernández.

*Nuestra recompensa se encuentra en el
esfuerzo y no en el resultado.
Un esfuerzo total es una victoria completa.*

Mahatma Gandhi (1869 – 1948)

“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN NANO, MICRO Y MACRO ESTRUCTURAL DE GEOPOLÍMEROS MULTIFUNCIONALES PARA SU USO EN ULTRA-THIN COMPOSITE PAVEMENTS (ETAPA CERO).”

Ing. Emmanuel Alejandro Martínez Hernández.

Resumen

En la actualidad, y ante la situación cambiante constantemente de la sociedad, se está apostando en el campo de investigación, mediante grupos multidisciplinarios, la innovación de nuevos materiales de construcción (nano-materiales funcionales e inteligentes) capaces de superar las limitaciones que presentan los actuales en cuanto al impacto ambiental, economía y durabilidad. El comportamiento físico, mecánico, óptico, eléctrico, reactividad, ruta de síntesis, etc. de los materiales de construcción cambian drásticamente a niveles nanométricos; incrementando de manera sistemática los desarrollos y aplicaciones de los nuevos materiales para construcción, abriendo un universo de posibilidades para la Ingeniería civil, en donde en una unidad estructural comienza la investigación a niveles moleculares y nanométricos del comportamiento de sistemas estructurales los cuales rigen y gobernarán los nuevos avances de las próximas décadas.

El presente trabajo de investigación se enfoca a la síntesis de nuevos nanocementos geopoliméricos, su caracterización nano y micro estructural y su correlación con el comportamiento macro estructural. En esta etapa “cero”, proponer una aplicación tecnológica sólida (Ultra-Thin Composite Pavements) como producto preliminar terminado, buscando combinar la investigación aplicada, con la innovación tecnológica (creación del valor del conocimiento).

El área específica de investigación fue la nanotecnología de materiales para la construcción, en sus sub-especialidades de: nano-funcionalidad (nanomateriales inteligentes) y Nano green Chemistry. En esta etapa “cero” la cual tuvo un periodo de investigación intensivo de dos años y medio con un equipo multidisciplinario y con colaboraciones inter-institucionales públicas y privadas se logró satisfactoriamente sintetizar nuevos nanocementos geopoliméricos con resistencias mecánicas comparadas con los cementos portland actuales, y se logró correlacionar el comportamiento estructural con el nano estructural a partir de una serie de estudios: TEM, SEM, AFM, DRX, FTIR, UV-Vis, IES, indentaciones, propiedades mecánicas y físicas tales como los módulos de elasticidad, relaciones de poisson y módulos de ruptura. Con toda esta información generada fue posible proponer una aplicación para nuevos pisos industriales inteligentes desarrollando modelos a escala de microcarpetas industriales.

Las investigaciones continúan hacia el desarrollo de estructuras inteligentes y comercialmente viables.

Es importante mencionar que se generaran dos artículos para revistas indizada calidad conacyt, divulgaciones científicas en congresos internacionales y publicaciones en revistas científicas.

“ANALYSIS AND EVALUATION: NANO, MICRO AND MACROSTRUCTURAL OF MULTI-FUNCTIONAL GEOPOLYMERS FOR APPLICATIONS IN ULTRA-THIN COMPOSITE PAVEMENTS (PHASE 0)”.

Ing. Emmanuel Alejandro Martínez Hernández.

Abstract

Due to constantly changing social demands, there is ongoing interest in construction materials innovation (e.g. functional and smart nano-materials) that would be capable of exceeding the limitations presented by currently available materials in relation to environmental impacts, economy and durability. The synthesis route, reactivity, physical, mechanical, optical, and electrical behavior of construction materials changes drastically at the nanometric level; increasing systematically developments and application of the new construction materials, opening an universe of possibilities for civil engineering where structural unity stems from investigations at molecular and nanometric levels, leading to understanding of molecular rules that will lead to new advances over next decades.

This work focuses on the synthesis of new geopolymeric nanocements materials, its nano and micro structural characterization and its correlation with their macro structural behavior. On this “cero” phase we propose a solid technological application (Ultra-Thin Composite Pavements) as preliminary finishing product; looking for combination between applied research and technological innovation (Creation of Knowledge Value).

The specific area of investigation was materials nanotechnology for the construction industry at subspecialties of: nano-functionality (smart nanomaterials) and Nano-Green Chemistry. At this “cero” phase which had an intensive investigation period of two and a half years within a multidisciplinary working team and public and private inter-institutional collaborators, the synthesis of new geopolymeric nanocements with mechanical behavior comparable with actual Portland cements was successfully achieved. Further, it was possible to correlate structural behavior with the nano structural one from a series of studies as: TEM, SEM, AFM, DRX, FTIR, UV-Vis, IES, indentations, mechanical and physical properties such as elasticity modules, Poisson relations and rupture modules. With all this information, it was possible to propose an application for new smart industrial floors, developing models at a microcarpets industrial scale.

Research continues to smart structures development and to achieve in this field a commercially viable product.

It is important to mention that we will generate two international scientific papers (CONACYT-QUALITY) for science divulgation, also international congress presentations and publication in scientific domestic magazines.

Motivación de la Tesis

Hoy y desde hace mucho tiempo el material de construcción más utilizado es el Concreto, su uso va desde infraestructura que se pueden considerar como menores hasta construcciones que antes eran inimaginables esto debido a sus grandes ventajas que presenta ante otros materiales de construcción, por lo cual su consumo supera el de cualquier otro.

Hasta hace apenas algunos años se pensaba que el Concreto bien ejecutado tenía una duración prácticamente ilimitada; sin embargo, tanto la experiencia como las investigaciones llevadas a cabo indican que diferentes agresiones de tipo Físico, Químico o Mecánico causan el deterioro del mismo y dan lugar a que aparezcan todo tipo de patologías que influyen negativamente en la durabilidad de las construcciones siendo causa de costosas reparaciones para mantener la funcionalidad y seguridad de las estructuras. Este deterioro se traslada a cualquier estructura realizada con este material tal como los pavimentos rígidos que hoy en día están teniendo un gran apogeo en el área de las vías terrestres. Sin embargo, sólo a mediados de este siglo se inició el estudio sistemático de este problema que ha llegado a ocupar un lugar muy importante dentro de las investigaciones sobre el deterioro del concreto a nivel mundial, por los problemas y tipos de estructuras involucrados.

Debido a lo mencionado, el fenómeno de la durabilidad en el concreto es el mayor problema que preocupa y llama la atención de ingenieros de mantenimiento de estructuras de concreto, tales como carreteras y puentes en todo el mundo. Las primeras medidas utilizadas para evitar el deterioro prematuro del concreto consistieron en aumentar progresivamente los contenidos mínimos de cemento, reduciéndose las relaciones agua/cemento, aumentando espesores entre muchos otros. En la década de los años ochenta comenzó el desarrollo de concretos de altas prestaciones, con lo que se pensaba que el problema quedaría totalmente resuelto, si bien las dificultades prácticas de su utilización han puesto de manifiesto que todavía queda un largo camino por recorrer.

Aunado a todo esto, en la actualidad, muchas estructuras de concreto con apenas 10 o 20 años de servicio tienen que ser reparadas por alguna causa de deterioro que presentan, dando lugar a grandes pérdidas económicas. Por ello, se trata de un tema de máxima actualidad como lo demuestra el que cada día sea mayor el número de investigaciones realizadas en el tema tales como el desarrollo de medidas de protección, desarrollo de nuevos concretos, innovación de nuevos materiales, etcétera.

Además en los últimos años ha comenzado a cobrar una gran importancia la durabilidad de las estructuras, y la conciencia de que hay que garantizar una vida útil de las mismas.

Garantizar una vida útil de 50 a 100 años puede resultar un quebradero de cabeza en un futuro no muy lejano, sobre todo en zonas especialmente sensibles a procesos de deterioro del concreto.

Ahora bien ante esta incipiente problemática que causa al sector de la construcción, resulta de gran importancia, como se menciono con anterioridad seguir innovando y tratar de conseguir con ayuda multidisciplinaria el desarrollo de nuevos materiales de construcción que reduzcan y aumenten la durabilidad de las estructuras.

Ante esto en el siglo XXI la ciencia se ha visto revolucionada por investigaciones relacionadas con la nanociencia y nanotecnología, conceptos que se traducen en un gran desarrollo tecnológico en una variada gama de actividades de gran impacto para la sociedad. Una de ellas es el estudio de materiales relacionados con la ingeniería civil y sobre todo en un país como el nuestro “en vías de desarrollo” en donde es de suponerse que el desarrollo de infraestructura se extenderá y en donde el área de las vías terrestres podría verse beneficiada con la creación de nuevas carreteras con mayores prestaciones.

Es por eso que ante esta problemática; mediante el desarrollo de esta investigación, se pretende innovar en nuevos materiales de construcción tales como el Nanocemento Geopolimérico, que es un material elaborado con materiales alcalinamente activados que se sintetizan a partir de nanopartículas de Oxido de Silicio y Oxido de Aluminio en presencia de una solución Alcalina, con el cual posteriormente se pretende elaborar un concreto de mayores prestaciones, que permita en primera parte la solución del problema mediante la sustitución del concreto deteriorado por este nuevo material en forma de un material que sirva en forma de una reparación tradicional o como segundo fin, la sustitución completa del elemento estructural o la creación de nuevas estructuras, como tramos de pavimentos rígidos. Se pretende que este nuevo material tenga un futuro muy ambicioso y prometedor puesto que se piensa puede ser en un futuro no muy lejano ser la solución más viable para solucionar la problemática de la durabilidad de las estructuras que tiene repercusiones exuberantes tanto económicas como sociales.

Objetivos

Los objetivos que se han puesto en esta tesis son:

- ❑ Innovar en el desarrollo de un nuevo material llamado NANOCEMENTO GEOPOLIMÉRICO, para la fabricación de un nanoconcreto multifuncional, el cual sea menos susceptible a los problemas comunes de deterioro que sufren los materiales comúnmente usados en la construcción, como el concreto tradicional elaborado con cemento portland, esperando para él un futuro prometedor puesto que se tiene proyectado sea un material ecológico y que explore otras nuevas propiedades como la “multifuncionalidad”.

Para conseguir el objetivo anteriormente indicado se han seguido los siguientes objetivos particulares o específicos:

1. Combinar la investigación aplicada con la innovación tecnológica.
2. Elaborar un nuevo concreto químicamente inerte utilizando nanocementos, el cual presente una mayor durabilidad frente a los problemas que causan el deterioro de las estructuras.
3. Caracterizar física, química, nano y microestructuralmente el material elaborado.
4. Correlacionar las propiedades nano y micro estructurales con el comportamiento macro estructural.
5. Proponer una aplicación tecnológica como producto preliminar terminado (creación del valor del conocimiento): pavimentos rígidos, pisos industriales, material objeto de rehabilitaciones, etcétera.

Índice

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT.....	III
MOTIVACIÓN DE LA TESIS.....	IV
OBJETIVOS.....	VI
1 INTRODUCCIÓN	1
2 ESTADO-DEL-ARTE	3
2.1 INNOVACIÓN	3
2.1.1 ¿QUÉ ES INNOVACIÓN?	5
2.1.2 METODOLOGÍAS DE LA INNOVACIÓN.....	8
2.1.2.1 TRIZ.	8
2.1.2.2 Q. F. D.....	10
2.1.2.3 KANSEI ENGINEERING	13
2.1.3 ¿QUÉ ES EL I. D. & i. T?.....	18
2.2 CONCRETO HIDRÁULICO.	24
2.2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO.	24
2.2.2 MATERIALES CONSTITUYENTES DEL CONCRETO.	25
2.2.3 DURABILIDAD DEL CONCRETO TRADICIONAL	36
2.2.3.1 FACTORES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD DEL CONCRETO.	37
2.2.4 ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN LAS VÍAS TERRESTRES.....	53
2.2.4.1 PISOS INDUSTRIALES	53
2.2.4.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS	63
2.2.4.3 SOBRECARPETAS DE CONCRETO SOBRE PAVIMENTOS DE ASFALTO (ULTRA-THIN WHITETOPPING).....	66
2.2.4.4 PUENTES.....	73
2.3 NANOTECNOLOGÍA Y NANOMATERIALES	81
2.3.1 INVERSIÓN	83
2.3.2 ENSAMBLAJE INTERDISCIPLINARIO.....	84
2.3.3 NANOTECNOLOGÍA AVANZADA.....	84
2.3.4 NANOTECNOLOGÍA EN MÉXICO	85
2.3.5 LA NANOTECNOLOGÍA EN LA INGENIERÍA CIVIL.	87
2.3.6 FUTURAS APLICACIONES.....	88
2.3.7 APLICACIONES ACTUALES	89
2.3.8 NANOMATERIALES.....	89
2.3.8.1 ¿QUÉ SON LOS NANOMATERIALES?.....	89
2.3.8.2 APLICACIONES DE LOS NANOMATERIALES.....	95
2.3.8.3 NANOTUBOS DE CARBONO.....	96
2.4 MATERIALES COMPUESTOS MULTIFUNCIONALES-INTELIGENTES	98
2.4.1 MATERIALES COMPUESTOS.....	98
2.4.1.1 TIPOS DE MATERIALES COMPUESTOS.....	99
2.4.1.2 APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.....	99
2.4.1.3 EJEMPLO DE MATERIALES COMPUESTOS	100
2.4.2 MATERIALES MULTIFUNCIONALES-INTELIGENTES	101
2.4.3 GEOPOLÍMEROS.....	103
2.4.4 NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS.....	106
2.4.4.1 APLICACIONES DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS.	108
2.5 TÉCNICAS EXPERIMENTALES	110
2.5.1 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO, MEB (SEM).....	110
2.5.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X, DRX	112
2.5.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN, TEM	115
2.5.4 ESPECTROSCOPIA DE INFRAROJO POR TRANSFORMADA DE FOURIER, FTIR.....	118
2.5.5 MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA, AFM	119

2.5.6	ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA, IES (RESISTIVIDAD-IMPEDANCIA)	127
2.5.7	ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ULTRAVIOLETA VISIBLE, UV – Vis	130
2.5.8	MEDIDA DE DUREZA: INDENTACIÓN VICKERS	135
2.5.9	DILATOMETRÍA	137
3	DISEÑO EXPERIMENTAL	139
4	SÍNTESIS DE NANOCEMENTO	141
5	RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN	144
5.1	PRIMERA FASE	144
5.1.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 9 DÍAS DE EDAD	144
5.1.1.1	ABSORCIÓN	144
5.1.1.2	DENSIDAD	146
5.1.1.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	147
5.1.2	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 45 DÍAS DE EDAD	149
5.1.2.1	ABSORCIÓN	149
5.1.2.2	DENSIDAD	149
5.1.2.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	150
5.2	SEGUNDA FASE	151
5.2.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 60 DÍAS DE EDAD, SIN HIPERFLUIDIFICANTE	151
5.2.1.1	ABSORCIÓN	155
5.2.1.2	DENSIDAD	155
5.2.1.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	156
5.2.2	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 60 DÍAS DE EDAD, CON HIPERFLUIDIFICANTE	156
5.2.2.1	ABSORCIÓN	156
5.2.2.2	DENSIDAD	157
5.2.2.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	157
5.2.3	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA EN ESPECÍMENES DE 10X10X10 cm DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 60 DÍAS DE EDAD, SIN HIPERFLUIDIFICANTE	158
5.2.3.1	ABSORCIÓN	158
5.2.3.2	DENSIDAD	159
5.2.3.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	159
5.2.4	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA EN ESPECÍMENES DE 10X10X10 cm DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 60 DÍAS DE EDAD, CON HIPERFLUIDIFICANTE	160
5.2.4.1	ABSORCIÓN	160
5.2.4.2	DENSIDAD	160
5.2.4.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	161
5.2.5	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA EN ESPECÍMENES DE 5X5X5 cm DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 60 DÍAS DE EDAD VARIANDO EL CONTENIDO DE ÓXIDO DE HIERRO, CON HIPERFLUIDIFICANTE	162
5.2.5.1	ABSORCIÓN	162
5.2.5.2	DENSIDAD	163
5.2.5.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	163
5.2.6	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA EN ESPECÍMENES DE 5X5X5 cm DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 45 DÍAS DE EDAD VARIANDO EL CONTENIDO DE TiO ₂ , CON HIPERFLUIDIFICANTE	164
5.2.6.1	ABSORCIÓN	164
5.2.6.2	DENSIDAD	165
5.2.6.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	165
5.2.7	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO, SEM	166
5.2.7.1	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE SEM EN NANOCEMENTO GP – 150%MAR TI, SH.	167
5.2.7.2	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE SEM EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, SH	169

5.2.7.3	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE SEM EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, SH	171
5.2.7.4	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE SEM EN NANOCEMENTO GP – 150%MAR TI, CH	173
5.2.7.5	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE SEM EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, CH.....	175
5.2.7.6	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE SEM EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, CH.....	177
5.2.8	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN, TEM	179
5.2.9	MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA, AFM	181
5.2.10	DIFRACCIÓN DE RAYOS X, DRX.....	183
5.2.10.1	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE DRX EN NANOCEMENTO GP – 150%MAR TI, SH.....	183
5.2.10.2	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE DRX EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, SH	184
5.2.10.3	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE DRX EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, SH	185
5.2.11	ESPECTROSCOPIA DE INFRAROJO POR TRANSFORMADA DE FOURIER, FTIR.....	186
5.2.11.1	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FTIR EN NANOCEMENTO GP – 150%MAR TI, SH.....	186
5.2.11.2	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FTIR EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 5% WOLLAS, SH	187
5.2.11.3	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FTIR EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, SH ..	187
5.2.11.4	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FTIR EN NANOCEMENTO GP – 150%MAR TI, CH	188
5.2.11.5	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FTIR EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, CH.....	188
5.2.11.6	CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FTIR EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, CH.....	189
5.2.12	ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ULTRAVIOLETA VISIBLE, UV – Vis	192
5.2.12.1	CORRIDA NÚMERO UNO	192
5.2.12.1.1	CARACTERIZACIÓN UV – Vis EN NANOCEMENTO GP – 150%MAR TI, CH	192
5.2.12.1.2	CARACTERIZACIÓN UV – Vis EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, CH....	193
5.2.12.1.3	CARACTERIZACIÓN UV – Vis EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, CH.....	193
5.2.12.1.4	CARACTERIZACIÓN UV – Vis EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 20%TiO ₂ , CH	194
5.2.12.2	CORRIDA NÚMERO DOS.....	196
5.2.12.2.1	CARACTERIZACIÓN UV – Vis EN NANOCEMENTO GP – 150%MAR TI, CH	196
5.2.12.2.2	CARACTERIZACIÓN UV – Vis EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, CH.....	197
5.2.12.2.3	CARACTERIZACIÓN UV – Vis EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 50%OXIFe, CH.....	197
5.2.12.2.4	CARACTERIZACIÓN UV – Vis EN NANOCEMENTO GP – 75%MAR TI, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH198	
5.2.12.2.5	ARACTERIZACIÓN UV – Vis EN NANOCEMENTO GP – 75%MAR TI, 150%OXIFe, 10%AGUA, CH	198
5.2.12.3	CORRIDA NÚMERO TRES	200
5.2.12.4	CORRIDA NÚMERO CUATRO	203
5.2.12.4.1	CARACTERIZACIÓN UV – Vis EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 5%TiO ₂ , CH	203
5.2.12.4.2	CARACTERIZACIÓN UV – Vis EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 10%TiO ₂ , CH	204
5.2.12.4.3	CARACTERIZACIÓN UV – Vis EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 20%TiO ₂ , CH	204
5.2.13	DILATOMETRÍA.....	206
5.2.13.1	DILATOMETRÍA EN NANOCEMENTO GP – 150%MAR TI, CH	207
5.2.13.2	DILATOMETRÍA EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, CH	207
5.2.13.3	DILATOMETRÍA EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 10%TiO ₂ , CH	208
5.2.13.4	DILATOMETRÍA EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 30%TiO ₂ , CH	208
5.2.13.5	DILATOMETRÍA EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.....	209
5.2.13.6	DILATOMETRÍA EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 5%NEU, CH	209
5.2.13.7	DILATOMETRÍA EN COMPUESTO ELABORADO CON CEMENTO BLANCO r/c = 0.4, CH	210
5.2.13.8	DILATOMETRÍA CEMENTO ELABORADO CON CPC r/c = 0.4, CH.....	210
5.2.14	ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA, IES (RESISTIVIDAD-IMPEDANCIA)	211
5.3	TERCERA FASE	215
5.3.1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE NANOCONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS A 45 DÍAS DE EDAD	215
5.3.2	MEDIDA DE LA DUREZA MEDIANTE INDENTACIÓN VICKERS.....	219
5.3.2.1	DUREZA VICKERS EN CONCRETO ESTÁNDAR ELABORADO CON CPC	220

5.3.2.2	DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH	222
5.3.2.3	DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.....	224
5.3.2.4	DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP - 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.....	226
5.3.2.5	DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP - 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.....	228
5.3.2.6	DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH	230
5.3.2.7	DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO ₂ , CH	232
5.3.2.8	DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO ₂ , CH	234
5.3.2.9	DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO ₂ , CH	236
5.3.3	MÓDULO DE RUPTURA EN NANOCONCREOTOS GEOPOLIMÉRICOS.....	238
5.3.4	MÓDULOS DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON EN NANOCONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS	274
6	DISEÑO DE PISO INDUSTRIAL GEOPOLIMÉRICO MULTIFUNCIONAL (INNOVACIÓN TECNOLÓGICA: PRODUCTO SÓLIDO MODELOS DE MICROCARPETAS)	303
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	318
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	320

Índice de Figuras

- Figura 1.1.** Nanoconcretos Geopoliméricos.
- Figura 2.1.** Esquema de la pirámide de la innovación.
- Figura 2.2.** Principios del TRIZ.
- Figura 2.3.** QFD Fases del desarrollo del producto.
- Figura 2.4.** Funcionamiento del Kansei.
- Figura 2.5.** Desglose de la investigación para llegar a la innovación.
- Figura 2.6.** Proceso I + D + i. T.
- Figura 2.7.** Análisis FODA.
- Figura 2.8.** Fabricación del Cemento Portland.
- Figura 2.9.** Carbonatación del Concreto Reforzado.
- Figura 2.10.** Efecto de la relación agua cemento sobre la velocidad de deterioro del concreto expuesto a sales que contienen sulfatos.
- Figura 2.11 a y b.** Pisos industriales utilizados en la construcción de terminales para maniobras de contenedores.
- Figura 2.12 a y b.** Pisos industriales para almacenamiento y almacenaje de carga con movimiento de vehículos y personas.
- Figura 2.13** Volumen de Concreto en Carreteras.
- Figura 2.14 a, b, c y d.** Carreteras elaboradas en la actualidad en México con concreto hidráulico.
- Figura 2.15.** Sobrecarpeta ultra-thin whitetopping.
- Figura 2.16.** Sobrecarpeta whitetopping aplicada en una carretera en Nebraska.
- Figura 2.17 a y b.** Puentes de concreto reforzado.
- Figura 2.18.** Elementos principales de un puente.
- Figura 2.19.** Viga continúa.
- Figura 2.20.** Marco Rígido.
- Figura 2.21.** Apoyo rígido (concreto).
- Figura 2.22.** Infraestructura de Carreteras y Puentes en la República Mexicana.
- Figura 2.23.** Puentes Prioritarios afectados por la Corrosión.
- Figura 2.24.** Deterioros encontrados en puentes causados por efecto de la corrosión y otras patologías.
- Figura 2.25.** Nanocemento desarrollado por NANOCEM.
- Figura 2.26.** Incremento en áreas superficiales en materiales por la utilización de nanopartículas.
- Figura 2.27.** Productos comunes con innovación nanotecnológica en el mercado.
- Figura 2.28.** Representación animada de un nanotubo de carbono.
- Figura 2.29.** Panel sandwich con núcleo en forma de panal.
- Figura 2.30.** Cambio en la estructura cristalina de las AMF producido por el cambio de fase.
- Figura 2.31.** Red sialato.
- Figura 2.32.** Mecanismo de polimerización propuesto.
- Figura 2.33.** Tipos de Cementos.
- Figura 2.34.** Componentes y Formación del Nanocemento Geopolimérico.
- Figura 2.35.** Proceso de Policondensación del Nanocemento.
- Figura 2.36.** Aplicaciones de los nanocementos Geopoliméricos.

Figura 2.37. Incidencia y efectos del haz de electrones sobre un material en microscopía MEB.

Figura 2.38. Interacción de los rayos X con los átomos.

Figura 2.39. Esquema de la geometría Bragg-Brentano en un difractómetro de polvo.

Figura 2.40. Esquema de un microscopio electrónico de transmisión.

Figura 2.41. Imágenes de MET a) campo oscuro y b) campo claro.

Figura 2.42. Formación de una imagen mediante microscopía electrónica de transmisión, de campo claro.

Figura 2.43. Equipo de FT-IR empleado para estudios de IR.

Figura 2.44. Diagrama de un microscopio de Fuerza Atómica.

Figura 2.45. Ampliación a 3000x de una palanca usada de AFM.

Figura 2.46. Modos de operación: a) modo contacto, b) modo de no contacto, c) modo de repiqueteo.

Figura 2.47. Interacción entre la punta y la muestra empleando microscopía de tunelamiento STM.

Figura 2.48. Micrografía de un polímero depositado sobre un vidrio empleando el modo Tapping.

Figura 2.49. Micrografía de un cerámico empleando el modo Tapping.

Figura 2.50. Micrografía de una fibra de Nylon 6,12 en modo Tapping

Figura 2.51: Esquema que representa a la punta del AFM escaneando sobre una muestra. Esta punta está fija a una varilla elástica. Sobre esta varilla incide un haz láser que se refleja en un fotodiodo. Cuando la punta sigue la superficie de la muestra, la varilla se mueve y esto hace que el reflejo del haz láser dibuje este movimiento en el fotodiodo. Esta información se utiliza después para transformarse en un dibujo de la topografía de la muestra.

Figura 2.52. Microscopio de Fuerza Atómica, CYPHER. (ASYLUM RESEARCH).

Figura 2.53. Región Ultravioleta-Visible.

Figura 2.54. A la izquierda se presenta el esquema de un penetrador Vickers. A la derecha se puede observar una micrografía de una huella tras la indentación.

Figura 5.1. Comportamiento de la absorción de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 9 días de edad.

Figura 5.2. Comportamiento de la densidad de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 9 días de edad.

Figura 5.3. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 9 días de edad.

Figura 5.4. Comportamiento de la absorción de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad.

Figura 5.5. Comportamiento de la densidad de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad.

Figura 5.6. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad.

Figura 5.7. Comportamiento de la absorción de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Sin Hiperfluidificante – Segunda Fase.
Figura 5.8. Comportamiento de la densidad de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Sin Hiperfluidificante – Segunda Fase.

Figura 5.9. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Sin Hiperfluidificante – Segunda Fase.

Figura 5.10. Comportamiento de la absorción de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante – Segunda fase.

Figura 5.11. Comportamiento de la densidad de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante – Segunda Fase.

Figura 5.12. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante – Segunda Fase.

Figura 5.13. Comportamiento de la Absorción en especímenes de 10x10x10 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Sin Hiperfluidificante – Segunda Fase.

Figura 5.14. Comportamiento de la Densidad en especímenes de 10x10x10 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Sin Hiperfluidificante – Segunda Fase.

Figura 5.15. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión en especímenes de 10x10x10 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Sin Hiperfluidificante – Segunda Fase.

Figura 5.16. Comportamiento de la Absorción en especímenes de 10x10x10 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante – Segunda Fase.

Figura 5.17. Comportamiento de la Densidad en especímenes de 10x10x10 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante – Segunda Fase.

Figura 5.18. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión en especímenes de 10x10x10 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante – Segunda Fase.

Figura 5.19. Comportamiento de la Absorción en especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 60 días de edad Con Hiperfluidificante variando el contenido de Óxido de Hierro – Segunda Fase.

Figura 5.20. Comportamiento de la Densidad en especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 60 días de edad Con Hiperfluidificante variando el contenido de Óxido de Hierro – Segunda Fase.

Figura 5.21. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión en especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 60 días de edad Con Hiperfluidificante variando el contenido de Óxido de Hierro – Segunda Fase.

Figura 5.22. Comportamiento de la Absorción en especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante variando el contenido de Óxido de Titania – Segunda Fase.

Figura 5.23. Comportamiento de la Densidad en especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante variando el contenido de Óxido de Titania – Segunda Fase.

Figura 5.24. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión en especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante variando el contenido de Óxido de Titania – Segunda Fase.

Figura 5.25. a, b, c y d. SEM en espécimen de Nacocemento GP – 150%MAR TI, Sin Hiperfluidificante.

Figura 5.26. Espectro del espécimen de Nanocemento GP – 150%MAR TI a 20000x 1µm, Sin Hiperfluidificante.

Figura 5.27. a, b, c y d. SEM en espécimen de Nacocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS Sin Hiperfluidificante.

Figura 5.28. Espectro del espécimen de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS a 20000x 1µm, Sin Hiperfluidificante.

Figura 5.29. a, b, c y d. SEM en espécimen de Nacocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe Sin Hiperfluidificante.

Figura 5.30. Espectro del espécimen de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe a 20000x 1µm, Sin Hiperfluidificante.

Figura 5.31. a, b, c y d. SEM en espécimen de Nacocemento GP – 150%MAR TI, Con Hiperfluidificante.

Figura 5.32. Espectro del espécimen de Nanocemento GP – 150%MAR TI a 20000x 1µm, Con Hiperfluidificante.

Figura 5.33. a, b, c y d. SEM en espécimen de Nacocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS Con Hiperfluidificante.

Figura 5.34. Espectro del espécimen de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS a 20000x 1µm, Con Hiperfluidificante.

Figura 5.35. a, b, c, y d. SEM en espécimen de Nacocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe Con Hiperfluidificante.

Figura 5.36. Espectro del espécimen de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe a 20000x 1µm, Con Hiperfluidificante.

Figura 5.37. a, b y c. Nanocemento Geopolimérico base “ amorfo”.

Figura 5.38. a, b y c Nanocemento Geopolimérico base “Nano-cristales”.

Figura 5.39. Caracterización mediante AFM del Cemento 2 a 1.1 µm.

Figura 5.40. a y b. Caracterización mediante AFM del Cemento 2 a 76.9 nm.

Figura 5.41. Gráfica DRX en Nanocemento GP – 150%MAR TI, SH.

Figura 5.42. Gráfica DRX en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, SH.

Figura 5.43. Gráfica DRX en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, SH.

Figura 5.44. Gráfica FTIR en Nanocemento GP – 150%MAR TI, SH.

Figura 5.45. Gráfica FTIR en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, SH.

Figura 5.46. Gráfica FTIR en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, SH.

Figura 5.47. Gráfica FTIR en Nanocemento GP – 150%MAR TI, CH.

Figura 5.48. Gráfica FTIR en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, CH.

Figura 5.49. Gráfica FTIR en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, CH.

Figura 5.50. Combinación gráficos FTIR: Nanocemento GP – 150%MAR TI, SH & CH.

Figura 5.51. Combinación gráficos FTIR: Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, SH & CH.

Figura 5.52. Combinación gráficos FTIR: Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, SH & CH.

Figura 5.53. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 150%MAR TI, CH.

Figura 5.54. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, CH.

Figura 5.55. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, CH.

Figura 5.56. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 20%TiO₂, CH.

Figura 5.57. Combinación de Gráficos UV - Vis en Nanocemento Geopoliméricos-Corrida uno.

Figura 5.58. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 150%MAR TI, CH.

Figura 5.59. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, CH.

Figura 5.60. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 50%OXIFe, CH.

Figura 5.61. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 75%MAR TI, 100%OXIFe, 7%Agua, CH.

Figura 5.62. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 75%MAR TI, 150%OXIFe, 10%Agua, CH.

Figura 5.63. Combinación de Gráficos UV - Vis en Nanocemento Geopoliméricos-Corrida dos.

Figura 5.64. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%TiO₂, CH.

Figura 5.65. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 10%TiO₂, CH.

Figura 5.66. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 20%TiO₂, CH.

Figura 5.67. Combinación de Gráficos UV - Vis en Nanocemento Geopoliméricos-Corrida tres.

Figura 5.68. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%TiO₂, CH.

Figura 5.69. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 10%TiO₂, CH.

Figura 5.70. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 20%TiO₂, CH.

Figura 5.71. Combinación de Gráficos UV - Vis en Nanocemento Geopoliméricos-Corrida cuatro.

Figura 5.72. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Nanocemento GP – 150%MAR TI

Figura 5.73. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS

Figura 5.74. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Nanocemento GP – 100%MAR TI, 10%TiO₂.

Figura 5.75. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%TiO₂

Figura 5.76. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Nanocemento GP – 100%MAR TI, 100%OXIFe, 7%AGUA.

Figura 5.77. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%NEU.

Figura 5.78. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Compuesto elaborado con Cemento Blanco relación a/c = 0.4.

Figura 5.79. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Compuesto elaborado con CPC relación a/c = 0.4.

Figura 5.80. Grafica IES del espécimen de Nanocemento Gp – 150%MAR TI, CH.

Figura 5.81. Grafica IES del espécimen de Nanocemento Gp – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, CH

Figura 5.82. Grafica IES del espécimen de Nanocemento Gp – 100%MAR TI, 10%TiO₂, CH.

Figura 5.83. Grafica IES del espécimen de Nanocemento Gp – 100%MAR TI, 50%OXIFe, CH.

Figura 5.84. Grafica IES del espécimen de Nanocemento Gp – 100%MAR TI, 5%NEU#80, CH.

Figura 5.85. Grafica IES del espécimen de Nanocemento Gp – 100%MAR TI, 30%TiO₂, CH.

Figura 5.86. Grafica IES del espécimen de Elaborado con cemento CPC.

Figura 5.87. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión en especímenes de 10x10x10 cm de nanocementos geopoliméricos a 45 días de edad, CH.

Figura 5.88. a, y b. Indentacion en la matriz del concreto elaborado con CPC y agregados de AGC.

Figura 5.89. a, y b. Indentacion en agregados del concreto elaborado con CPC y agregados de AGC.

Figura 5.90. a, y b. Indentacion en la matriz del Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

Figura 5.91. a, y b. Indentacion en agregados del Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

Figura 5.92. a, y b. Indentacion en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

Figura 5.93. a, y b. Indentacion en agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

Figura 5.94. a, y b. Indentacion en la matriz del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

Figura 5.95. a, y b. Indentacion en agregados del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

Figura 5.96. a, y b. Indentacion en la matriz del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

Figura 5.97. a, y b. Indentacion en agregados del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

Figura 5.98. a, y b. Indentacion en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Figura 5.99 a, y b. Indentacion en agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Figura 5.100. a, y b. Indentacion en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Figura 5.101. a, y b. Indentacion en agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Figura 5.102. a, y b. Indentacion en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO₂, CH.

Figura 5.103. a, y b. Indentacion en agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO₂, CH.

Figura 5.104. a, y b. Indentacion en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Figura 5.105. a, y b. Indentacion en agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Figura 5.106. Comportamiento del Revenimiento de las diferentes mezclas.

Figura 107. Comportamiento de la extensibilidad de las diferentes mezclas.

Figura 5.108 Resumen de Resultados de los diferentes tipos de mezclas y especímenes ultra-thin.

Figura 5.109 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 elaborados con concreto CPC.

Figura 5.110 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 3 elaborados con concreto CPC.

Figura 5.111 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 4 elaborados con concreto CPC.

Figura 5.112 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

Figura 5.113 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 2 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

Figura 5.114 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 3 (PLACA) ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

Figura 5.115 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLAS, CH.

Figura 5.116 a y b respectivamente. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 2 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLAS, CH.

Figura 5.117 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

Figura 5.118 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 2 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

Figura 5.119 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

Figura 5.120 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 2 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

Figura 5.121 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Figura 5.122 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 2 ultra-thin Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Figura 5.123 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Figura 5.124 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 2 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Figura 5.125 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 3 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Figura 5.126 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Figura 5.127. Resistencia a la Compresión en Especímenes Cilíndricos de las diferentes mezclas trabajadas.

Figura 5.128. Módulos de Elasticidad de las diferentes mezclas trabajadas.

Figura 5.129. Relación de Poisson de las diferentes mezclas trabajadas.

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Componentes Mineralógicos del Clinker.

Tabla 2.2. Secuencia de reacciones en un horno rotatorio.

Tabla 2.3. Proporción de Óxidos en Cementos Portland.

Tabla 2.4. Composición media de los minerales principales en Cementos Portland corrientes.

Tabla 2.5. Propiedades de los minerales principales en el Cemento Portland.

Tabla 2.6. Características de los tipos de cementos Portland (ASTM) según su composición de minerales principales.

Tabla 2.7. Componentes silíceos reactivos que pueden estar presentes en los agregados.

Tabla 2.8. Efectos producidos en el concreto por agentes químicos.

Tabla 2.9. Componentes silíceos reactivos que pueden estar presentes en los agregados.

Tabla 2.10. Compuestos mineralógicos del Cemento Portland.

Tabla 2.11. Clasificación de pisos (Adaptado del ACI 302 IR, Guía para la construcción de pisos y losas de concreto.

Tabla 2.12. Espesor de la losa y capacidad de carga.

Tabla 2.13. Relación aproximada entre la resistencia a la compresión y a la flexión del concreto (métrico).

Tabla 2.14. Espesor mínimo recomendado para las losas de reencarpetado a base de concreto colocadas sobre pavimentos asfálticos existentes.

Tabla 2.15. Lineamientos para poder reparar fallas en los pavimentos de asfalto antes de colocar la sobrecarpeta.

Tabla 2.16. Número y Longitud de Puentes de la Red Carretera Federal por Estado.

Tabla 2.17. Materiales nanotecnológicos de estudio en la actualidad.

Tabla 5.1. Lista de Compuestos Primera Fase.

Tabla 5.2. Lista de Compuestos Segunda Fase.

Tabla 5.3. Lista de Compuestos con variación en el contenido de Óxido de Hierro Segunda Fase.

Tabla 5.4. Lista de Compuestos con variación en el contenido de Óxido de Titanio Segunda Fase.

Tabla 5.5. Lista de Compuestos – Corrida uno para prueba UV - Vis.

Tabla 5.6. Lista de Compuestos – Corrida dos para prueba UV - Vis.

Tabla 5.7. Lista de Compuestos – Corrida cuatro para prueba UV - Vis.

Tabla 5.8. Lista de Compuestos para prueba de Dilatometría.

Tabla 5.9. Lista de Compuestos Tercera Fase.

Tabla 5.10. Dureza Vickers medidas en la matriz del compuesto elaborado con CPC.

Tabla 5.11. Dureza Vickers medidas en los agregados del compuesto elaborado con CPC.

Tabla 5.12. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

Tabla 5.13. Dureza Vickers medidas en los agregados del Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

Tabla 5.14. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

Tabla 5.15. Dureza Vickers medidas en los agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

Tabla 5.16. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

Tabla 5.17. Dureza Vickers medidas en los agregados del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

Tabla 5.18. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

Tabla 5.19. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

Tabla 5.20. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Tabla 5.22. Dureza Vickers medidas en los agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Tabla 5.23. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Tabla 5.24. Dureza Vickers medidas en el agregado del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Tabla 5.25. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO₂, CH.

Tabla 5.26. Dureza Vickers medidas en el agregado del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO₂, CH.

Tabla 5.27. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Tabla 5.28. Dureza Vickers medidas en el agregado del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Tabla 5.29. Resumen: ME y Relación de Poisson en Concreto CPC.

Tabla 5.30. Resumen: ME y Relación de Poisson Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH

Tabla 5.31. Resumen: ME y Relación de Poisson en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLAS, CH.

Tabla 5.32. Resumen: ME y Relación de Poisson en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

Tabla 5.33. Resumen: ME y Relación de Poisson en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

Tabla 5.34. Resumen: ME y Relación de Poisson en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Tabla 5.35. Resumen: ME y Relación de Poisson en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Tabla 5.36. Resumen: ME y Relación de Poisson en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Tabla 5.37. Resumen: ME, RP y Resistencia a la Compresión: Diferentes Mezclas.

Tabla 6.1. Lista de materiales y composición sin Fibras: Fase Innovación Técnica.

Tabla 6.2. Lista de materiales y composición con Fibras: Fase Innovación Técnica.

Índice Fotográfico

- Fotografía 2.1. a y b.** MEB utilizado y unidad de microanálisis y adquisición de resultados.
- Fotografía 2.2.** Equipo empleado para el recubrimiento de muestras mediante la pulverización.
- Fotografía 2.3.** Muestras labradas para la caracterización por SEM.
- Fotografía 2.4. a y b.** Preparación de muestras para DRX
- Fotografía 2.5.** Equipo de análisis DRX SIEMENS D5000 utilizado.
- Fotografía 2.6. a y b.** Preparación de la muestra para TEM.
- Fotografía 2.7.** Microscopio TEM PHILIPS modelo TECNAI FEG DF20 utilizado.
- Fotografía 2.8. a y b.** Preparación de muestras para caracterización a través de IES.
- Fotografía 2.9. a y b.** Muestras y equipo utilizado para caracterización a través de IES
- Fotografía 2.10. a y b.** Especímenes pulidos para indentación Vicker.
- Fotografía 2.11.** Indentador Vicker utilizado para la obtención de la dureza del material.
- Fotografía 2.12. a y b.** Especímenes labrados para prueba de dilatometría.
- Fotografía 2.13. a, b y c.** Dilatómetro THETA INDUSTRIES modelo 3220 empleado obtención de expansión-contracción.
- Fotografía 4.1.** Pesaje de los diferentes agregados para la conformación de composiciones.
- Fotografía 4.2.** Nanopartículas de Sílice, hidróxido de potasio y óxido de aluminio para la conformación del nanocemento base.
- Fotografía 4.3.** Mezcla de la solución alcalina en agitador magnético.
- Fotografía 4.4.** Mezcla de los componentes para la conformación de nanocemento geopolimérico.
- Fotografía 4.5.** Elaboración de especímenes en moldes de 5 x 5 x 5 cm.
- Fotografía 4.6.** Almacenaje de especímenes
- Fotografía 5.1.** Secado de especímenes.
- Fotografía 5.2.** Saturación de especímenes en agua.
- Fotografía 5.3.** Prensa utilizada para la determinación de la resistencia a compresión.
- Fotografía 5.4 a y b.** Especimen de Nanocemento GP – 150%MAR TI, antes y después de someterlo a carga axial.
- Fotografía 5.5 a y b.** Especimen de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe antes y después de someterlo a carga axial.
- Fotografía 5.6. a, b, c y d.** Especímenes de Nanocemento GP – 150%MAR TI con y sin hiperfluidificante antes y después de someterlos a carga axial.
- Fotografía 5.7.** Modos de falla en especímenes de Nanocemento GP – 150%MAR TI con y sin hiperfluidificante después de someterlos a carga axial.
- Fotografía 5.8. a, b, c y d.** Especímenes de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS con y sin hiperfluidificante antes y después de someterlos a carga axial.
- Fotografía 5.9.** Modos de falla en especímenes de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS con y sin hiperfluidificante después de someterlos a carga axial.
- Fotografía 5.10. a, b, c y d.** Especímenes de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe con y sin hiperfluidificante antes y después de someterlos a carga axial.
- Fotografía 5.11.** Modos de falla en especímenes de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe con y sin hiperfluidificante después de someterlos a carga axial.
- Fotografía 5.12.** Equipo utilizado para la caracterización SEM.
- Fotografía 5.13. a y b.** Determinación de la Resistencia a la Compresión del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO₂.

Fotografía 5.14. a y b. Determinación de la Resistencia a la Compresión del Nanoconcreto GP - 50%MAR TI, 50%GR2-3.

Fotografía 5.15. a y b. Determinación de la Resistencia a la Compresión del Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS.

Fotografía 5.16. a y b. Determinación de la Resistencia a la Compresión del Nanoconcreto GP - 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe.

Fotografía 5.17. a y b. Determinación de la Resistencia a la Compresión del Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80.

Fotografía 5.18. a y b. Indentaciones en las diferentes mezclas de concretos.

Fotografía 5.19. a, b y c. Especimen labrado de Compuesto elaborado con cemento CPC y agregados de AGC.

Fotografía 5.20. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP - 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

Fotografía 5.21. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

Fotografía 5.22. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP - 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

Fotografía 5.23. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP - 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

Fotografía 5.24. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Fotografía 5.25. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Fotografía 5.26. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO₂, CH.

Fotografía 5.27. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Fotografía 5.28. a, b, c, d, e y f. Proceso de elaboración de Vigas de 15x15x60cm y 15x10x60 de concreto elaborado con CPC.

Fotografías 5.29. a y b. Desmolde y curado de Vigas de Concreto CPC.

Fotografía 5.30. Medida de la Extensibilidad.

Fotografías 5.31. a y b. Prelación de moldes y elaboración de la mezcla de Nanoconcreto GP - 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

Fotografía 5.32. a, b, c y d. Preparación de área de trabajo para obtención de extensibilidad y Revenimiento.

Fotografía 5.33. a, b, c y d. Medición de la Extensibilidad en Nanoconcreto GP - 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

Fotografía 5.34. a, b, c, d e, f, g. Medición de la Extensibilidad y Revenimiento en Nanoconcreto GP - 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

Fotografía 5.35. a, b, c y d. Colado del Nanoconcreto GP - 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

Fotografía 5.36. a, b, c y d. Desmolde a las 24 horas de colado del Nanoconcreto GP - 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

Fotografía 5.37. a, y b. Preparación de la mezcla del Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

Fotografía 5.38. a, b, c, d, e y f. Medición de la Extensibilidad y Revenimiento de la mezcla del Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

Fotografía 5.39. a, b, c y d. Colado de la mezcla del Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

Fotografía 5.40. Desmolde y almacenamiento del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH, presentando pequeños agrietamientos y contracción.

Fotografías 5.41 a, b, c y d. Medición del Revenimiento y Extensibilidad del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

Fotografías 5.42 a y b. Elaboración de la mezcla del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA CH.

Fotografías 5.43 a, b, c, d, e y f. Medición del Revenimiento y Extensibilidad de la mezcla del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA CH.

Fotografías 5.48 a, b, c y d. Colado de la mezcla del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA CH.

Fotografías 5.49 a, b y c. Desmolde y almacenamiento de especímenes de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA CH, (grietas superficiales).

Fotografías 5.50 a y b. Preparación y elaboración de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Fotografías 5.51 a, b, c, d y f. Medición del Revenimiento y Extensibilidad de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Fotografías 5.52 a, b, c y d. Colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Fotografías 5.53 a, y b. Desmolde y almacenamiento de especímenes de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Fotografías 5.54 a, y b. Preparación y Elaboración de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Fotografías 5.55 a, b, c y d. Medición del Revenimiento y Extensibilidad de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Fotografías 5.56 a, b, c y d. Colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Fotografías 5.57 a y b. Desmolde y Almacenamiento de especímenes de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Fotografías 5.58 a, y b. Preparación y Elaboración de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Fotografías 5.59 a, b, c, d, e y f. Medición del Revenimiento y Extensibilidad de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Fotografías 5.60 a, b, c y d. Colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Fotografías 5.61 a y b. Desmolde y almacenamiento de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Fotografías 5.62 a y b. Elaboración y colado de la mezcla de concreto con CPC en dimensiones de 10x15x60 cm.

Fotografías 5.63 a y b. Elaboración y colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU, CH de 5x15x60cm una vez que el concreto elaborado con CPC alcanza su fraguado inicial.

Fotografías 5.64 a y b. Elaboración y colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH de 15x15x60cm.

Fotografías 5.65 a y b. Elaboración y colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, 5%NEU#80, CH de 15x15x60cm.

Fotografías 5.66 a, b, c y d. Elaboración y colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, 5%NEU#80, 50%Agregado AGC, CH de 15x15x60cm.**Fotografías 5.67.** Desmolde y almacenamiento de vigas de 15x15x60 cm de nanocementos geopoliméricos.

Fotografías 5.68. Almacenamiento de especímenes para posterior caracterización.

Fotografías 5.69. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes de Concreto elaborado con CPC.

Fotografías 5.70. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH

Fotografías 5.71. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

Fotografías 5.72. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

Fotografías 5.73. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

Fotografías 5.74. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH

Fotografías 5.75. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Fotografías 5.76. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Fotografías 5.77. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

Fotografías 5.78. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH. (Estado Fresco).

Fotografías 5.79. Vigas sometidas a esfuerzo de flexión.

Fotografías 5.80 a y b. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes de Nanoconcreto (espécimen completo de nanoconcreto GP) GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Fotografías 5.81 a y b. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes de Nanoconcreto (espécimen completo de nanoconcreto GP) GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, 5%NEU#80, 50%AGREGADO AGC, CH.

Fotografía 5.82 a, b, c y d. Cabeceo cilindros.

Fotografía 5.83 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en especímenes de concreto elaborado con CPC.

Fotografía 5.84 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH

Fotografía 5.85 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

Fotografía 5.86 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

Fotografía 5.87 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

Fotografía 5.88 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Fotografía 5.89 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Fotografía 5.90 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Fotografías 6.1 a, b c y d. Elaboración y colado del material Nanogeopolimérico Estándar.

Fotografías 6.2 a, b c y d. Elaboración y colado del material Nanogeopolimérico Ecológico.

Fotografías 6.3 a, b c y d. Elaboración y colado del material Nanogeopolimérico Estándar.

Fotografías 6.4 a, b c y d. Elaboración y colado del material Nanogeopolimérico Reflectivo.

Fotografías 6.5 a, b c y d. Elaboración y colado del material Nanogeopolimérico Magnético.

Fotografías 6.6 a, b c y d. Elaboración y colado del material Nanogeopolimérico Ecológico.

Fotografías 6.7 a, b c y d. Colocación de los materiales a intemperismo ambiental.

Fotografías 6.8 a y b. Placa de Material Geopolimérico Estándar Sin Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

Fotografías 6.9 a y b. Placa de Material Geopolimérico Estándar Con Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

Fotografías 6.10 a y b. Placa de Material Geopolimérico Magnético Sin Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

Fotografías 6.11 a y b. Placa de Material Geopolimérico Magnético Con Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

Fotografías 6.12 a y b. Placa de Material Geopolimérico Reflectivo Sin Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

Fotografías 6.13 a y b. Placa de Material Geopolimérico Reflectivo Con Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

Fotografías 6.14 a y b. Placa de Material Geopolimérico Ecológico Sin Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

Fotografías 6.15 a y b. Placa de Material Geopolimérico Ecológico Sin Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

Fotografías 6.16 a, b c y d. Materiales después de 3 meses sometidos a intemperismo ambiental.

Fotografías 6.17 a y b. Placa de Material Geopolimérico Estándar Con y Sin Fibra después de Intemperismo Ambiental.

Fotografías 6.18 a y b. Placa de Material Geopolimérico Magnético Con y Sin Fibra después de Intemperismo Ambiental.

Fotografías 6.19 a y b. Placa de Material Geopolimérico Reflectivo Con y Sin Fibra después de Intemperismo Ambiental.

Fotografías 6.20 a y b. Placa de Material Geopolimérico Ecológico Con y Sin Fibra después de Intemperismo Ambiental.

1 INTRODUCCIÓN

El gran desarrollo de la Construcción en los últimos 50 años se ha basado principalmente en la utilización del Concreto, por lo cual debido a sus magníficas propiedades de Durabilidad y Rentabilidad se ha convertido en el principal protagonista del sector de la construcción y en la actualidad en las vías terrestres con la construcción cada vez mas creciente de carreteras hechas con pavimentos rígidos.

Hace algunos años se pensaba que el Concreto bien ejecutado tenia una durabilidad ilimitada, pero tanto la experiencia como investigaciones llevadas a cabo indican que diferentes agresiones de tipo Físico, Químico y Mecánico lo deterioran de manera significativa, siendo causa de numerosas y costosas Reparaciones para mantener la funcionalidad y seguridad de las Estructuras hechas con este material, como en el caso de los pavimentos rígidos, que aunado a todo lo demás presenta el inconveniente técnico de la apertura al tráfico en tiempos prolongados lo que implica que se provoquen congestionamientos, por ejemplo, en zonas urbanas y/o en obras de gran envergadura tales como la construcción de un pista de aterrizaje en donde se requiera que el tiempo de construcción sea lo mas corto posible; lo que se lograría con la innovación de nuevos materiales.

Es por eso que en los últimos años se han intensificado las investigaciones relacionadas con la innovación y el mejoramiento de los materiales utilizados en obras de ingeniería, con el objetivo de mejorar sus propiedades y/o economizar su costo de fabricación y los que su utilización implique. Una de las ultimas tecnologías desarrolladas con muchas aplicaciones en este campo es la nanotecnología, que como su nombre lo indica, se desarrolla a escalas nanométricas, y en donde los Geopolímeros resultan ser uno de los materiales que más resultan beneficiados, por imprescindible utilización en cualquier sector de la vida cotidiana del ser humano.

El termino “polímero” se usa frecuentemente para hacer referencia a una extensa molécula orgánica con unidades y secuencias repetidas. No obstante en 1979, se introdujo el termino “Geopolímero” para denotar aquellos polímeros de origen inorgánico obtenidos tras la síntesis de una solución alcalina con un sólido construido fundamentalmente por aluminosilicatos; surge así el concepto de goepolimerización. Esta reacción esta basada en la química de la activación alcalina de cementantes, la cual fue presentada inicialmente por Purdon O, quien propuso que el mecanismo de endurecimiento silicoaluminatos activados involucra la disolución de Si y Ca en presencia de NaOH y precipitación de silicato cálcico hidratado (C-S-H) o aluminatos hidratados. La aplicación industrial de este tipo de reacción alcalina tuvo sus inicios en la industria cerámica con Olsen N. en 1970. A partir de esta fecha y en especial en la década de los 90 se conformaron grupos de investigación con el objetivo de profundizar en el conocimiento de estos procesos y generar nuevos materiales y/o aplicaciones tecnológicas, todo esto en la actualidad en el marco de la nanotecnología [1].

En general, los geopolímeros están constituidos por una red de silicatos compuestos por tetraedros de SiO_4 y AlO_4 enlazados alternativamente con átomos de oxígeno. Iones con carga positiva, tales como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , son esenciales para el balanceamiento de la carga negativa del Al^{3+} y se alojan en las cavidades de la estructura. Los polisialatos son anillos o cadenas poliméricas con Si^{4+} y Al^{4+} en número de coordinación IV con oxígeno y cuya fórmula empírica puede ser descrita como $\text{M}_n(\text{SiO}_2)_z\text{-AlO}_2)_n\text{wH}_2\text{O}$, donde z puede tomar valores entre 1, 2 o 3, M corresponde a un catión monovalente (K^+ o Na^+) y n es el grado de policondensación. Algunos geopolímeros contienen cationes alcalinotérreos, particularmente Ca^{2+} debido a la fuente primaria utilizada, como es el caso de la escoria siderúrgica de alto horno (GBFS) o de cenizas volantes tipo C (FA). Los geopolímeros pueden ser sintetizados por medio de reacciones de policondensación de óxidos de aluminosilicatos, tales como arcillas calcinadas, minerales naturales, desechos industriales, rocas volcánicas o mezclas de dos o más materiales. Estos minerales o subproductos industriales son combinados con un activador alcalino a bajas temperaturas ($<200^\circ\text{C}$) para generar enlaces poliméricos Si-Al-O [1].

En el marco de esta tecnología y estos materiales es que se desarrolla el presente trabajo, que tiene como objeto principal investigar, desarrollar e innovar en un nuevo material de construcción denominado Nanocemento Geopolimérico funcional, que permita aminorar los problemas de durabilidad que presenta el concreto tradicional elaborado con cemento Portland cristalino.

A lo largo de esta tesis de maestría se presentará el estudio, bajo distintas técnicas experimentales, de los distintos materiales Geopoliméricos sintetizados y se pondrán en juicio con el concreto tradicional elaborado con cemento Portland; por lo que resulta imprescindible mencionarlo en un apartado, que contenga desde su elaboración hasta las patologías que presentan algunas construcciones elaboradas con el. Se hará mención de la misma manera a la Nanotecnología, ya que en el ámbito de este proyecto, los materiales que se van a manejar van a estar comprendidos siempre en un rango nanométrico; así como de las técnicas experimentales utilizadas para caracterizar nuestro material.

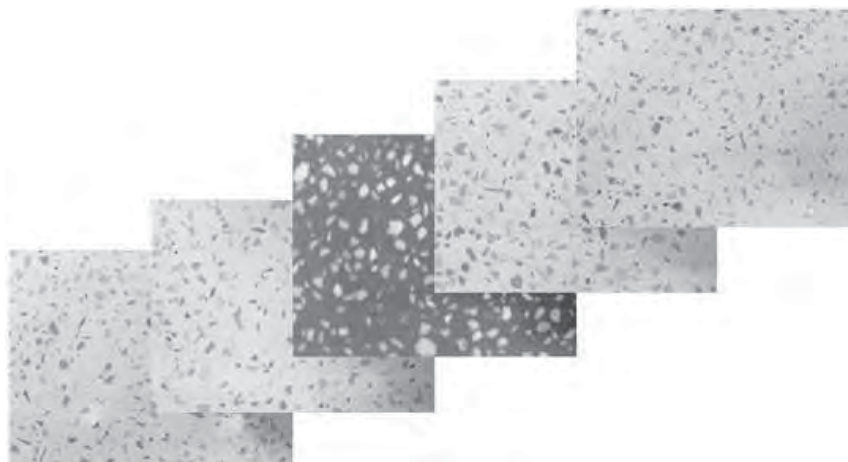


Figura 1.1. Nanoconcretos Geopoliméricos.

2 ESTADO-DEL-ARTE

2.1 INNOVACIÓN



Fuente: Imagen tomada de http://www.aqua-aerobic.com/aquaology_innovation.asp

A lo largo de esta tesis se estará recurriendo con mucha frecuencia al término de innovación. Término que además comparte uno de los objetivos de esta investigación y que en la actualidad juega un papel muy importante en el desarrollo de nuevos productos y en el éxito de muchas empresas, destinadas a satisfacer las exigencias de una sociedad siempre sedienta de mejores servicios y productos para mejorar su calidad de vida; es por eso y mucho más que se mencionara de forma breve y concisa en este subcapítulo para que el lector comprenda el terreno en el que se esta desarrollando esta investigación.

Antes de pasar al tema de innovación resulta imprescindible comprender conceptos como ciencia, tecnología, investigación, idea y desarrollo; por lo que se pasara a definirlos a continuación:

Ciencia: La ciencia (del latín scientia 'conocimiento') es el conjunto de conocimientos sistemáticamente estructurados obtenidos mediante la observación de patrones regulares, de razonamientos y de experimentación en ámbitos específicos, de los cuales se generan preguntas, se construyen hipótesis, se deducen principios y se elaboran leyes generales y esquemas metódicamente organizados. La ciencia utiliza diferentes métodos y técnicas para la adquisición y organización de conocimientos sobre la estructura de un conjunto de hechos suficientemente objetivos y accesibles a varios observadores, además de basarse en un criterio de verdad y una corrección permanente. La aplicación de esos métodos y conocimientos conduce a la generación de más conocimiento objetivo en forma de predicciones concretas, cuantitativas y comprobables referidas a hechos observables pasados, presentes y futuros. Con frecuencia esas predicciones pueden formularse mediante razonamientos y estructurarse como reglas o leyes generales, que dan cuenta del comportamiento de un sistema y predicen cómo actuará dicho sistema en determinadas circunstancias [2].

Investigación: La investigación es la búsqueda intencionada de conocimientos o de soluciones a problemas. La investigación es un proceso formal y sistemático de pensar que emplea instrumentos y procedimientos especiales con miras a la resolución de problemas, a la búsqueda de respuestas en torno a una situación, o a la adquisición de nuevos conocimientos [3].

Una investigación se caracteriza por ser un proceso único:

- **Sistemático:** A partir de la formulación de una hipótesis u objetivo de trabajo, se recogen datos según un plan preestablecido que, una vez analizados e interpretados, modificarán o añadirán nuevos conocimientos a los ya existentes, iniciándose entonces un nuevo ciclo de investigación. La sistemática empleada en una investigación es la del método científico.
- **Organizado:** todos los miembros de un equipo de investigación deben conocer lo que deben hacer durante todo el estudio, aplicando las mismas definiciones y criterios a todos los participantes y actuando de forma idéntica ante cualquier duda. Para conseguirlo, es imprescindible escribir un protocolo de investigación donde se especifiquen todos los detalles relacionados con el estudio.
- **Objetivo:** las conclusiones obtenidas del estudio no se basan en impresiones subjetivas, sino en hechos que se han observado y medido, y que en su interpretación se evita cualquier prejuicio que los responsables del estudio pudieran hacer.

Tecnología: Es el conjunto de conocimientos técnicos, que permiten diseñar y crear bienes y servicios que facilitan la adaptación al medio ambiente y satisfacer tanto las necesidades esenciales como los deseos de las personas. La actividad tecnológica influye en el progreso social y económico, pero su carácter abrumadoramente comercial hace que esté más orientada a satisfacer los deseos de los más prósperos (consumismo) que las necesidades esenciales de los más necesitados [4].

Idea: Una idea es el primero y más obvio de los actos del entendimiento, ya que se limita al simple conocimiento de algo. Se trata de una imagen o representación mental de un objeto o un propósito. La idea es también el conocimiento puro y racional, debido a las naturales condiciones de nuestro entendimiento; al plan y disposición que se ordena en la fantasía para la formación de una obra; y a la intención de hacer algo [5].



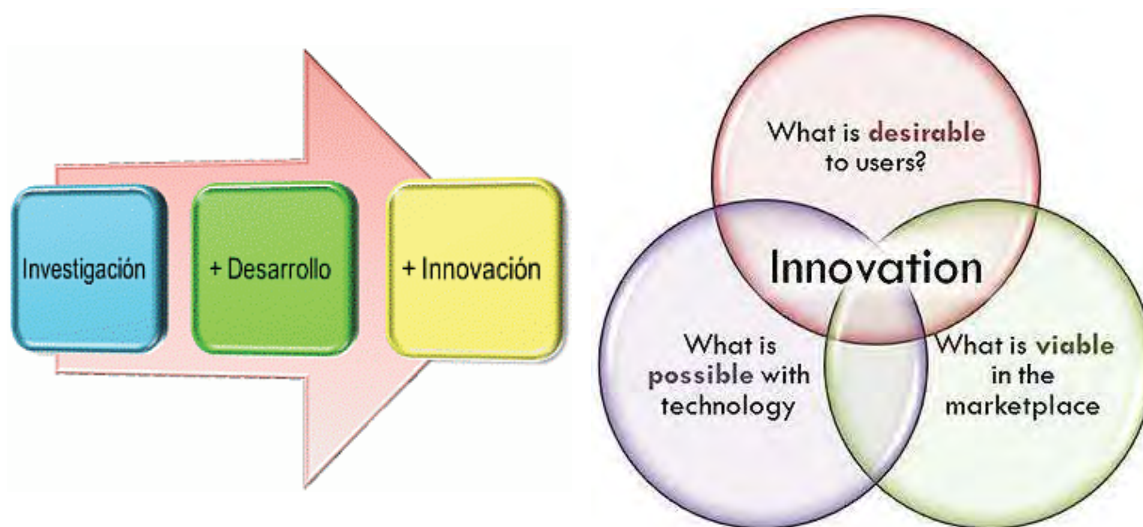
Fuente: Imagen tomada de <http://www.wannaflock.com/2011/02/25-centavos-de-creatividad/>

Creatividad: Es generar ideas u objetos novedosos y originales, valorados socialmente. Es considerada por algunos psicólogos como un aspecto de la inteligencia [6].

Desarrollo: Se entiende como desarrollo al avance en los niveles de crecimiento económico, social, cultural y político de una sociedad o país. Partamos de la idea de que desde la antigüedad, la humanidad ha tenido avances o ha progresado hacia lo que somos ahora. Este progreso no termina aquí ya que en la actualidad, la humanidad sigue avanzando y lo seguirá haciendo en el futuro; así nace la idea del desarrollo. El concepto de desarrollo también se refiere a los avances y las mejoras que permitan satisfacer de mejor manera las necesidades básicas humanas, como agua potable, vivienda, alimentación y salud; no importa el lugar de residencia de la persona. Por ello, el desarrollo también se entiende como una condición de vida social dentro de un país, en la cual las necesidades auténticas de las personas (colectivas o individuales) se suplen a través del uso de los recursos y sistemas naturales en forma sostenida y racional. La utilización de los recursos debe estar basada en una tecnología que no atente contra los aspectos culturales y los derechos humanos, el medio ambiente [7].

2.1.1 ¿QUÉ ES INNOVACIÓN?

Innovación es pues la mezcla y entendimiento de todos los conceptos antes vistos que se ven fructificados cuando se logra el desarrollo de un producto o un servicio que el mercado valore y genere “riqueza”.



Fuente: Imagen tomada de <http://www.guerrillaonline.com/cs/Importance-of-Innovation-78.htm>

La innovación en términos más conceptuales es el arte de convertir las ideas y el conocimiento en productos, procesos o servicios nuevos o mejorados que el mercado reconozca y valore. Convertir el conocimiento y las ideas en riqueza. Por lo tanto innovación no es añadir mayor sofisticación tecnológica a los productos, sino que estos se adapten mejor a las necesidades del mercado. Otra definición no menos acertada es la dada por Cumming, después de revisar cerca de 30 años definiciones de innovación, “la innovación es la primer aplicación exitosa de un producto o proceso”.

La meta de la innovación es crear valor en los negocios, como productos únicos e innovadores, que saltan de la mente humana al mercado. Así, en la actualidad, si una empresa no es innovadora, está destinada al fracaso [8].

Las manifestaciones de la innovación se encuentran en nuevas aplicaciones, nuevos materiales, nuevos productos, nuevas prácticas productivas, nuevos servicios, nuevos modelos organizacionales, nuevas prácticas gerenciales y nuevas prácticas comerciales [6].

La innovación puede ser gradual o intermitente, puede ser disruptiva o radical, pero al final es la sustitución de algo por una mejora o novedad [6].

La aplicación de los cambios generados por la innovación es cada vez más rápida, así tenemos que la fotografía tardó más de 100 años en ser aplicada después de descubrirse, el motor eléctrico tardó más de 65 años, el teléfono tardó casi 60 años, hoy en día los cambios son más rápidos, y lo podemos ver en la Internet, las computadoras, los teléfonos celulares, las cámaras digitales, las máquinas expendedoras, y otros artículos más [6].

El concepto de innovación en todas sus definiciones no comprende solo tecnología sino que incluye:

- ✓ Innovación tecnológica.
- ✓ Innovación organizativa.
- ✓ Innovación comercial.

La Innovación es un proceso intensivo en conocimiento de:

- Tecnología
 - Tecnología disponible es sus costos, productos y procesos
 - Capacidad, uso y costes de los sistemas y tecnologías de información
- De la organización interna y los recursos
 - Recursos técnicos: tienen que ver aquí temas como los proveedores, oferta, coste, condiciones de pago, especificaciones de calidad, plazos de entrega, mejoras en la organización de la producción, subcontratación de tareas, mejoras en la logística y transporte, aseguramiento de calidad, gestión medioambiental, certificación, normatividad, reglamentación técnica, actual y próxima que afecte el producto o al proceso, etcétera.
 - Recursos económicos: recursos financieros disponibles en la actuación empresarial, acceso al crédito, desgravación, de los costes internos de funcionamiento, logísticos y de inmovilizado, de producción, de distribución, etcétera.
 - Recursos humano: capacidades del equipo humano que integra la empresa y su potenciación, tecnologías de información y tecnologías industriales, acción comercial, gestión financiera y administrativa, capacidad de liderazgo, etcétera.
- Del mercado: aquí tienen que ver las necesidades y exigencias de los clientes, presentes y futuras. Calidad, diseño, precio, diversificación, gustos estéticos, calidad medioambiental, etcétera [6].

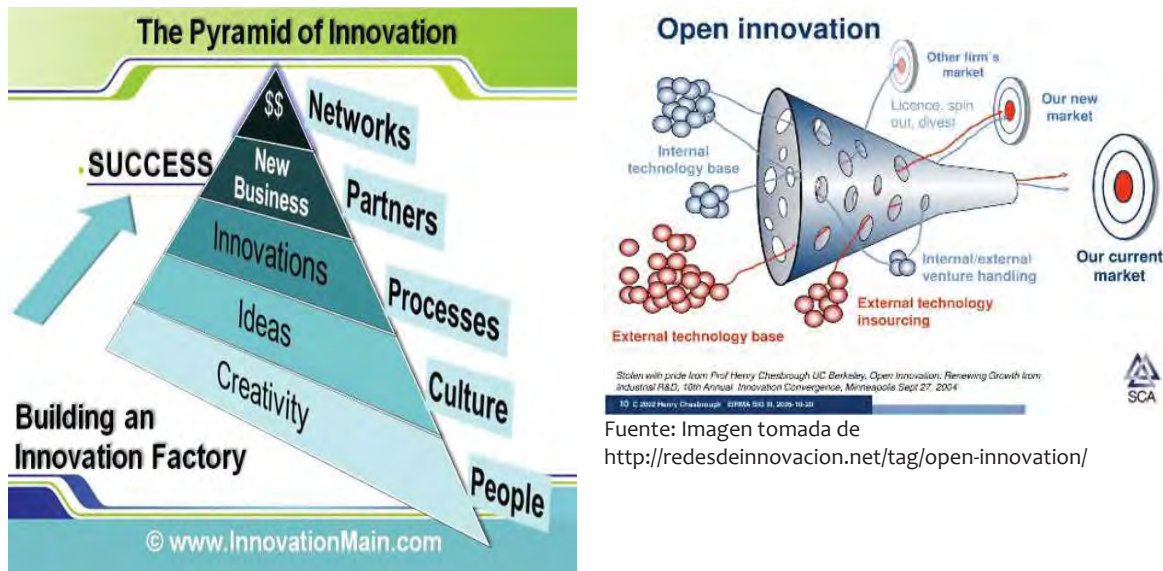


Figura 2.1. Esquema de la pirámide de la innovación. Fuente: Imagen tomada de <http://www.innovationmain.com/Workshops.html>

¿Cómo medir la Innovación?

Para saber que nivel de innovación se tiene es necesario medir la innovación y para ello se utilizan los indicadores de innovación, entre los que destacan los duros o tangibles como las patentes, las marcas comerciales, los nuevos productos y las ventas de estos productos. Existen otros como los gastos en investigación, desarrollo e innovación, tanto públicos como privados, el nivel de escolaridad de la población y el uso de las nuevas tecnologías como la Internet, los celulares, y otros artículos llamados novedosos o de nueva generación [6].

¿Cómo desarrollar Innovación?

Para que la innovación pueda desarrollarse en una región es necesario contar con herramientas y aplicaciones que rompan los paradigmas del conocimiento y que se manifiesten en aplicaciones, para ello se requiere de técnicas de creatividad, creación de bancos de ideas, transformación de ideas en negocios, asistir a ferias de ideas e inversionistas, incentivar la experimentación, proporcionar el clima adecuado y el soporte, y contar con un clima cultural [6].

De entre las técnicas o metodologías de creatividad que han sido utilizadas para desarrollar innovación tenemos: las Tormentas de Ideas, el Pensamiento Lateral, la Sinéctica, los Seis Sombreros, los Mapas Mentales, QFD, Kansei Engineering y el TRIZ, cualquiera que se utilice debe de dar como resultado un cambio en procesos, productos o aplicaciones [6].

2.1.2 METODOLOGÍAS DE LA INNOVACIÓN

2.1.2.1 TRIZ.

Es la técnica, que en español se traduce por: “Metodología sistemática para inventar o innovar tecnológicamente” [10], para generar ideas ingeniosas especialmente ante problemas tecnológicos. Fue desarrollada por Genrich S. Altshuller (científico, ingeniero y analista ruso de patentes). Es un método heurístico nacido a partir de la identificación de unas pautas inventivas, en las patentes, utilizadas por igual en sectores de la técnica muy diversos. Las primeras publicaciones aparecieron en los años 50, siendo de los últimos trabajos publicados por Altshuller, en el año 1985, el 'Algoritmo para la Resolución de Problemas Inventivos' o por su acrónimo ruso', ARIZ 85.

TRIZ es ante todo un método que sigue actualizándose mediante investigación de los avances en patentes aunque el enfoque de análisis se ha extendido a otras disciplinas de la actividad humana como las ciencias sociales e incluso el arte. Una simplificación de TRIZ se denomina S.I.T. o A.S.I.T.

¿Para que?

TRIZ, recoge una serie de principios que 'la persona' debe aprender permitiéndole analizar un problema, modelarlo, aplicar soluciones estándar e identificar ideas inventivas. No obstante, la fase de análisis de problemas y la de síntesis de ideas inventivas, se ven reforzadas si se realizan en grupo.

Principios en los que se sustenta el TRIZ.

- TRIZ aporta 5 niveles fundamentales, en el grado de dificultad cuando se enfrenta a un problema de inventiva o innovación tecnológica:
 1. **Funcionalidad y sistémica:** nuestro entorno está lleno de sistemas con elementos o subsistemas interrelacionados entre sí, que aportan una función a algún otro sistema. Ejemplo: El sistema bombilla está constituido por filamento, soporte, base y bulbo, y su función principal es transformar la corriente en luz (energía eléctrica en energía lumínica). La ciencia y la tecnología se pueden organizar además de por disciplinas, por funciones, de modo que cuando un biólogo necesite realizar algo acceda también a conocimientos de la mecánica y/o la óptica, y viceversa
 2. **Idealidad:** lo importante de un sistema (en especial los artificiales o máquinas y aparatos) no son sus partes sino la función que aporta. Es una pauta del progreso que los sistemas tiendan a reducir sus partes e incluso a desaparecer, permaneciendo la función. Ejemplo: El puntero del profesor, hoy ha desaparecido y hasta el puntero láser puede desaparecer ya que los cañones de video, por ejemplo, ya llevan un propio cursor (imagen) que hace de puntero.
 3. **Uso de recursos:** En la búsqueda de la idealidad, las invenciones y avances más ingeniosos son aquellos que en lugar de añadir, sustraen elementos; y aprovechan, para resolver el problema, los recursos disponibles dentro del propio sistema o en un entorno inmediato. Ejemplo: para desulfurar los gases de una central térmica, aprovechamos las propias cenizas resultantes de la combustión causante de tales gases.

4. Pautas acerca del origen y evolución de los sistemas y de la tecnología: El análisis de cientos de miles de documentos de patentes que dio lugar a TRIZ, identificó una serie de pautas que nos ayudan a predecir cómo puede evolucionar un sistema, así como determinadas configuraciones tecnológicas.
 5. Contradicciones: Algunos problemas difíciles resueltos, tenían en común la resolución de contradicciones. En ocasiones, mejorar un aspecto o problema supone agravar otro, tenemos entonces un conflicto o contradicción. La solución habitual es la de compromiso. TRIZ aporta una serie de sugerencias para tratar de 'salvar' la contradicción. Ejemplo: la pasteurización láctea preserva vitaminas pero no elimina todas las bacterias. Si aumentamos la temperatura (esterilización) eliminamos más bacterias pero destruimos más vitaminas. El principio inventivo aplicado es el de 'hurrying' o 'darse prisa': El sistema UHT calienta la leche a alta temperatura pero sólo durante un instante. Se eliminan las bacterias pero no da tiempo a degradar las vitaminas. ¡Contradicción resuelta!
- Todos los sistemas tecnológicos evolucionan de acuerdo a 8 leyes básicas y dos secundarias. Conociendo dichas leyes, es posible predecir las formas idóneas de resolver un problema.
 - Todos los sistemas tecnológicos tienen 39 parámetros que los caracterizan, entre los que se encuentra; peso, volumen, área superficial, resistencia, temperatura, brillantez, etcétera.
 - Existen 40 principios de inventiva, que sirven para sugerir posibles soluciones a un problema de innovación tecnológica. Entre dichos principios se encuentran; segmentación, extracción, consolidación, anidación, universalidad, vibración mecánica, acción periódica, etcétera.
 - Los 40 principios de inventiva se combinan con las 39 características de los sistemas tecnológicos, en una gran “Matriz de contradicción”, mediante la cual se sugieren posibles soluciones a los problemas de inventiva o innovación tecnológica. Esta matriz es la aportación más importante de TRIZ a la innovación tecnológica [10].

¿Dónde se originan los principios de la metodología TRIZ?

Estos principios se originan del análisis de millones de patentes, a nivel mundial, por expertos en innovación tecnológica-patente.

En otras palabras, la metodología TRIZ es como tener miles de inventores tratando de resolver nuestro problema, aportando las soluciones que ellos emplearon al enfrentar uno similar [10].

Algunas de las principales empresas en las que se emplea la TRIZ de manera cotidiana.

- ✚ **Toyota, VW, BMW, General Motors, Ford, Nissan**; para mejorar sus motores, incrementando potencia y rendimiento.
- ✚ **Procter & Gamble, Colgate**: aumentar la productividad de su departamento de Investigación y desarrollo.
- ✚ **Bosch, Novartis, Bayer**: Optimizar procesos de producción, disminuyendo costos.
- ✚ **Nestlé**: mejorar la producción y desarrollar nuevos productos.
- ✚ **Agencia Espacial Europea** [10].

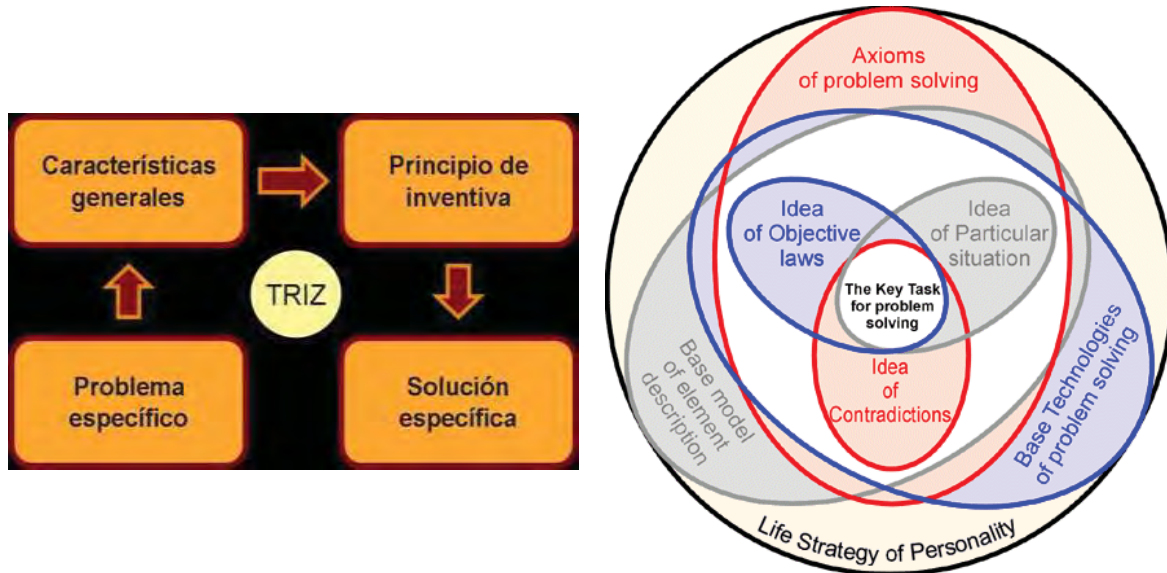


Figura 2.2. Principios del TRIZ. Fuente: Imagen tomada de <http://www.osaka-gu.ac.jp/php/nakagawa/TRIZ/eTRIZ/eforum/eKhomenko990927/eKhomenko990927.html>

2.1.2.2 Q. F. D.

Podemos fabricar un producto o diseñar un servicio con unas excelentes prestaciones, a un bajo precio y, sin embargo, fracasar por no tener la acogida esperada en el mercado. Esta situación nos indicaría que el diseño se ha hecho a espaldas del cliente potencial o que, aún habiendo intentado conocer las expectativas de éste, hemos fracasado a la hora de traducirlas a características de nuestro producto/servicio [12].

La importancia del diseño es, por tanto, fundamental para el éxito. Este diseño debe traducir las demandas expresadas y latentes del cliente a las especificaciones del producto/servicio.

Como se ha visto anteriormente, las fuentes de información que se pueden utilizar son variadas. Desde las quejas y reclamaciones hechas por los usuarios (que por cierto son pocas, ya que un porcentaje elevado de clientes insatisfechos no declaran su insatisfacción a la organización prestataria abiertamente), hasta cuestionarios administrados a éstos, pasando por conversaciones directas (normalmente en grupo).

La cuestión es qué método utilizar para que esa traducción del mundo del cliente al mundo de la organización sea lo más correcta posible. En este sentido, el **QFD** (Quality Function Deployment) supone una metodología que permite sistematizar la información obtenida del usuario hasta llegar a definir las características de calidad del servicio, adaptándolo a las necesidades y expectativas detectadas. Significa por tanto una herramienta para el diseño del producto o servicio.

Finalmente, obtendremos una idea precisa de cuáles deben ser las especificaciones del servicio, en qué elementos hay que invertir y de qué manera, para conseguir acercarnos a las expectativas del cliente, y ajustar así el servicio de modo que se consigan clientes satisfechos.

El QFD permite obtener información sobre los aspectos del servicio en los que hay que centrarse y, en su caso, mejorar. Para ello, tiene en cuenta las valoraciones del cliente sobre esas variables, referidas al propio servicio (y a la competencia, si se considera oportuno). Su objetivo es la obtención de una Calidad de Diseño de un servicio excelente mediante la conversión de las necesidades del cliente en características de calidad adecuadas, sin omisiones ni elementos superfluos.

El despliegue de la función de calidad es comúnmente conocido con el acrónimo inglés QFD (Quality Function Deployment). Fue introducido en Japón por Yoji Akao en 1966, sin embargo el primer libro (en japonés) sobre este método no se publica hasta 1978 y sólo a partir de 1990 aparece bibliografía en inglés y, más adelante, en otros idiomas.

El QFD puede definirse como un **sistema estructurado que facilita el medio para identificar necesidades y expectativas de los clientes (voz del cliente) y traducirlas al lenguaje de la organización**, esto es, a requerimientos de calidad internos, desplegándolas en la etapa de planificación con la participación de todas las funciones que intervienen en el diseño y desarrollo del producto o servicio [12].

Tiene dos propósitos: [12]

- Desplegar la calidad del producto o servicio. Es decir, el diseño del servicio o producto sobre la base de las necesidades y requerimientos de los clientes.
- Desplegar la función de calidad en todas las actividades y funciones de la organización.

El QFD se pregunta por la calidad verdadera, es decir, por "QUÉ" necesitan y esperan del servicio los usuarios. También se interroga por "CÓMO" conseguir satisfacer necesidades y expectativas. Y en este caso nos encontramos ya ante la cuestión de cómo diseñar el servicio para que responda a la calidad esperada [12].

El elemento básico del QFD es la denominada Casa de la Calidad (House of Quality). Es la matriz de la que derivarán todas las demás. Y es que es este enfoque matricial lo característico del método, de modo que el despliegue de la calidad utilizará un amplio número de matrices y de tablas relacionadas entre sí [12].

Fases del Q. F. D. [13]

- ✚ **Identificar y jerarquizar a los clientes.** Este elemento es indispensable para comprender a los clientes y considerar correctamente sus expectativas. Por otra parte, nos permitirá seleccionar el/los segmento/s de usuarios adecuados para recoger los datos e informaciones necesarios para realizar el despliegue de la Calidad Demandada y Planificada. En esta fase es imprescindible la participación del Departamento Comercial o de Marketing de la organización, que probablemente poseerá datos al respecto.

- ✚ **Identificación de las expectativas del cliente.** Para realizar el diseño de un producto/servicio en función del cliente, es esencial conocer las expectativas de éste, lo que podemos llamar mundo del cliente. Los medios que se disponen para ello, pueden ser los siguientes: Grupos de discusión. Informes sobre quejas. Estudios existentes en base a encuestas realizadas. Informes de responsables de puntos de venta. Publicaciones y artículos. Informaciones sobre la competencia. En esta fase deben implicarse distintos departamentos, como Marketing, Comercial, Organización,... así como personal de línea. El sistema de elección a utilizar es el contacto directo con clientes mediante conversaciones, preferiblemente en grupo en las que deberemos descubrir las demandas explícitas y latentes sobre el servicio. Estos clientes, a ser posible, deberán conocer también el servicio de la competencia y opinar sobre ellos. Este tipo de informaciones suelen presentar dos inconvenientes: son poco exhaustivas y poco precisas. Ambos, se superan en la fase siguiente [13].
- ✚ **Conversión de la información en descripciones verbales específicas.** Los datos anteriores nos deben de servir para adquirir una primera orientación sobre las preferencias del cliente. De este modo, contaremos con una información base que reelaboraremos en esta fase con el fin de presentar un cuestionario completo a una muestra de clientes más amplia. Esta reelaboración es necesaria si pensamos que, normalmente, no se es muy específico al plantear las demandas. Por ejemplo, el grupo de usuarios pueden comentar que les gustaría tener donde elegir al comprar en el establecimiento. A partir de ahí podemos precisar dos elementos de nuestro cuestionario: variedad de productos y variedad de marcas. Se trata de convertir la información directa en información verbal más precisa que nos permita obtener medidas concretas.
- ✚ **Elaboración y administración de la encuesta a clientes.** El último paso de la toma de datos sería administrar una encuesta a usuarios de nuestro servicio, que conozcan también la competencia. En este cuestionario se les pide que evalúen, de 1 a 5 (1: no ejerce influencia; 5: ejerce fuerte influencia) la influencia de cada uno de las demandas estudiadas a la hora de elegir un establecimiento u otro. Se pide también que valoren cual es la posición, en cada una de esas variables, de la propia empresa y las de las empresas de la competencia, también en una escala de 1 a 5 [13].
- ✚ **Despliegue de la calidad demandada.** Definidos los datos a obtener y conseguidos éstos, se pasa a realizar el despliegue de la Tabla de Planificación de la Calidad. Se trata de una matriz en la que tenemos, por una parte, los factores acerca de los cuales se ha interrogado a la muestra de clientes. Por otra, tenemos la importancia que se ha dado a cada uno de ellos así como la valoración que han hecho de nuestra empresa y de la competencia. La columna puntos estratégicos permite introducir la orientación estratégica que se quiere dar al servicio. En función de la importancia concedida por el cliente en un factor concreto y la valoración recibida por la propia empresa y las de la competencia, decidiremos la calidad planificada que queremos obtener en el futuro. Ese será el valor al que tenderemos y, en relación con la situación actual, asignaremos un factor de aumento de la calidad en esa variable: Con estos datos, estaremos en condiciones de obtener los pesos absolutos (importancia absoluta) de los distintos factores. El siguiente paso es la determinación de los pesos relativos (importancia relativa) de cada una de las variables en la mejora del servicio. Evidentemente, se trata de determinar en qué aspectos hay que comprometer mayor esfuerzo para ajustar

nuestro servicio a las demandas del cliente, QUÉ hay que mejorar, en función de la situación actual de la empresa y de la competencia.

✚ **Despliegue de las características de calidad.** El cuadro anterior nos indica QUÉ hay que mejorar. Esto ya supone un avance en cuanto al diseño del servicio pero existe otra interrogante a despejar: CÓMO lo mejoramos. Para ello, es necesario desplegar otro cuadro. Se trata de una matriz de doble entrada donde se cruzan los factores evaluados con las características de calidad. Las características de calidad se refieren a los elementos propios del mundo de la organización, es decir, aquellos que la empresa puede modificar en determinada medida y que son indicadores cuantificables y medibles por tanto. La elaboración de esta lista de indicadores debe hacerse por parte de un grupo interdisciplinar, pudiendo llevarse a cabo paralelamente a las fases anteriores. Estos indicadores tienen una importancia fundamental ya que representan el mundo de la empresa, y será en ellos sobre los que hay que actuar. La lista resultante deberá ser, por tanto, exhaustiva y consistente. Esta metodología (QFD) permite invertir con el máximo rendimiento en el diseño del servicio, haciéndolo en aquellos elementos relevantes en función del análisis realizado que, como puede observarse, considera las opiniones de los clientes, tanto sobre nuestra empresa como sobre las de la competencia, en las variables sustanciales del servicio [13].



Figura 2.3. QFD Fases del desarrollo del producto. Fuente: Imagen tomada de <http://singaporebuzzblog.blogspot.com/2011/01/service-characteristics-news-pics.html>

2.1.2.3 KANSEI ENGINEERING

Dentro del desarrollo de productos orientados al usuario ha aparecido recientemente una gran variedad de metodologías capaces de captar la voz del consumidor y traducir sus requisitos en diseños concretos. Son metodologías como el QFD, el método Chalmers o el método Page por citar algún ejemplo. No obstante, estas metodologías se han centrado más en temas funcionales y de calidad objetivable. Los aspectos relacionados con las apreciaciones subjetivas y gustos del usuario han sido motivo de menos estudio. Trabajar sobre estos conceptos permitiría innovar y generar productos diferenciados a la vez que más cercanos al consumidor. Por lo general, las metodologías comentadas anteriormente no sirven para obtener criterios que permitan plasmar requisitos relacionados con la percepción y los conceptos subjetivos que el consumidor demanda al producto, por tal motivo nace esta metodología [17].

La Ingeniería Kansei surgió en 1970 en la Universidad japonesa de Hiroshima y rápidamente contó con la aceptación y el apoyo de la industria de este país. Los diseñadores japoneses dedicaron más de dos décadas a la investigación y aplicación de esta metodología. El desarrollo de varios métodos y su aplicación en distintos campos fueron el resultado de esta intensa dedicación y de la colaboración entre las distintas empresas japonesas y coreanas. Los éxitos obtenidos han contribuido a la difusión de esta metodología en EE.UU. y en algunos países de Europa.

Se trata de una metodología de desarrollo ergonómico de nuevos productos orientada al consumidor basada en trasladar y plasmar las imágenes mentales, percepciones, sensaciones y gustos del consumidor en los elementos de diseño que componen un producto [17].

O en otras palabras es una metodología que está relacionada con los sentimientos y las emociones de las personas en diferentes ámbitos de la vida, en este caso, en el diseño de productos. Cuando vamos a un gran centro comercial los consumidores tenemos siempre claro qué priorizar: el precio y la funcionalidad, principalmente, y en ese contexto a lo que ayuda esta metodología es a atraer más al cliente desde el punto de vista del embalaje, el sabor, el olor... Al final, lo que pretendemos con la ingeniería «kansei» es leer la mente del cliente y saber lo que va a consumir.

Partiendo de la voz del usuario para conocer los requisitos que éste desea que cumpla un determinado producto, puede ocurrir que su posterior traducción en especificaciones de diseño sea más o menos directa o inmediata. Es decir, puede saberse cómo cumplir un requisito y cómo medir si se alcanza o no, o bien no saber cómo materializarlo. En el segundo caso se requiere un trabajo de investigación. En el primero, existen aspectos que se pueden traducir de forma directa en valores de variables objetivas (altura, peso, etc.) que herramientas como el QFD, y otros métodos permiten hacer de forma ordenada y controlada. Existen sin embargo, otros aspectos subjetivos y poco definidos que requieren de herramientas como la Ingeniería Kansei para su traducción en elementos de diseño [17].

Una vez garantizada la durabilidad, seguridad, eficacia, apariencia agradable y un precio realista del producto, con la Ingeniería Kansei se pretende dotar al mismo de una sobrecalidad que permita una adaptación específica al usuario. "Hacer a la medida" según las preferencias del usuario se convierte en una de las máximas del método. Con esta metodología se pretende mejorar los atributos de diseño estudiando el modo con el que el usuario los percibe. Para llevar a cabo esta labor con éxito es necesario que los conceptos que se incorporen no provengan de ideas preconcebidas de los técnicos o diseñadores sino que, dentro de una filosofía de "market-in", provengan de todos los ámbitos involucrados en el desarrollo del producto: vendedores, consumidores, diseñadores, etcétera.

Esto supone abandonar el diseño basado en los criterios individuales del fabricante porque difícilmente el usuario va a percibir el diseño tal y como él lo concibió. En este aspecto el método se centra en:

- Determinar las diferencias de percepción entre los fabricantes y los consumidores.
- Determinar las relaciones entre lo que el usuario percibe y las expresiones que utiliza para manifestarlo.
- Constituir criterios que determinen la lógica que utiliza el consumidor a la hora de elegir entre la amplia gama de productos que cubren la misma necesidad. Se busca la relación entre el criterio lógico "bueno-malo", y el criterio psicológico "me gusta-no me gusta". Más tarde se intenta clarificar el conflicto entre ambos criterios y determinar un método para tratar las divergencias.

Las necesidades básicas que permitirán definir la estructura general del planteamiento Kansei son como sigue:

- Obtener y cuantificar la respuesta del usuario en términos kansei (valoración psicosociológica).
- Identificar las características de diseño de un producto desde la percepción del usuario.
- Implementar la herramienta a partir de los datos anteriores.
- Ajustar el diseño del producto a los cambios sociales y a los que se producen en las preferencias de los usuarios con el paso del tiempo.

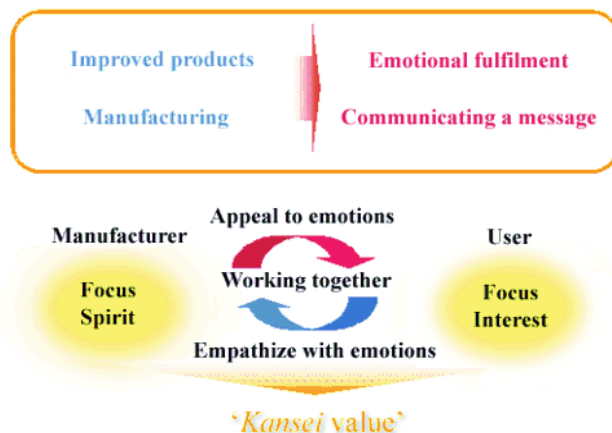


Figura 2.4. Funcionamiento del Kansei.

Fuente: Imagen tomada de
<http://www.google.com.mx/imgres?imgurl>

Estructura y Funcionamiento.

A continuación se describe la estructura y funcionamiento del Kansei tipo II o KES (Kansei Engineering System) por ser el más difundido y empleado en la última década. Este tipo de Kansei consiste en un sistema experto que transforma los sentimientos que se desea que el producto transmita al consumidor ("kansei") en elementos de diseño. El objetivo es que a partir de una o más palabras descriptivas del objetivo "kansei" de diseño, el sistema experto genere por sí solo las características del diseño (colores, dimensiones, prestaciones etcétera). Su arquitectura contiene principalmente cuatro bases de datos: [17].

1. **La base de datos de palabras:** se construye a través de la captación del universo semántico del producto (palabras que el consumidor utiliza para describir sus sensaciones del producto) y de la configuración de las escalas semánticas (conceptos independientes entre sí) que lo caracterizan. Básicamente es un sistema capaz de encontrar las proyecciones de las palabras que describen el objetivo "kansei" de diseño en un sistema de ejes semánticos independientes.
2. **La base de datos de imagen:** contiene las relaciones entre los elementos de diseño y las palabras utilizadas por el usuario. Esta base se construye a partir del tratamiento de datos obtenidos en la fase anterior y su relación con los elementos de diseño mediante la Teoría Cuantitativa Tipo I de Hayashi (1976), que es un tipo de análisis de regresión múltiple con datos cualitativos, o a través de técnicas de inteligencia artificial. Esta base es capaz de crear, a partir de componentes semánticas generadas por la base de datos de palabras, componentes de diseño del producto.
3. **La base de conocimientos:** a partir de los datos anteriores y de otras restricciones posibles decide cuáles son los elementos de diseño finales sugeridos para el producto. En esta base se establecen las reglas necesarias para decidir en cada caso los elementos de diseño más correlacionados con ciertos calificativos y viceversa.
4. **La base de datos de diseño y de color:** los detalles de diseño se implementan, al igual que los colores, considerando su correlación absoluta con las palabras del usuario.

Un KES funciona de la forma la siguiente: el usuario (fabricante, diseñador, e incluso consumidor) introduce en el sistema las palabras que identifican los atributos deseados en el producto. El sistema ve si las puede reconocer en su base de datos de palabras. Si puede hacerlo, utiliza la base de datos de imagen y de reglas y decide los elementos de diseño y el color que más se ajustan a las palabras utilizadas por el usuario [17].

Para construirlo es necesario en primer lugar decidir el ámbito de aplicación. A partir de ahí se recopilan las palabras "kansei" y se aplica la Semántica Diferencial para definir los ejes semánticos del producto. Seguidamente, con la definición de los elementos de diseño y con una muestra de productos que equilibre su distribución, se realizan pruebas con usuarios a partir de las cuáles será posible encontrar, mediante técnicas de tratamiento de datos más o menos complejas, las relaciones entre los calificativos usados por los usuarios y los elementos de diseño.

Con los datos de los que se dispone en este estadio, es posible construir y utilizar el KES de dos formas distintas.

- ✓ Como soporte para el diseñador: éste será capaz de traducir en elementos de diseño los sentimientos que desea transmitir al consumidor con el producto.
- ✓ Como sistema de evaluación de un diseño: el diseñador está en disposición de conocer cuál va a ser la interpretación del usuario a partir de combinaciones de parámetros de diseño y de colores.

Campo de Aplicación.

Las aplicaciones de la ingeniería Kansei al diseño de productos han sido relativamente frecuentes en los últimos 10 años en los países orientales. En un principio se aplicó al desarrollo de la industria del automóvil, ámbito en el que se conocen el mayor número de aplicaciones. Nissan, Mazda y Mitshubishi fueron los primeros en la aplicación del Kansei al desarrollo de componentes de sus modelos como volantes, velocímetros o frontales. Otras marcas como Ford también comenzaron a aplicarlo fuera del ámbito oriental en su modelo Taurus. El KES es el tipo de Kansei más utilizado actualmente por la bondad de los resultados que ofrece y por el hecho de abandonar los criterios de los expertos y centrarse en las apreciaciones subjetivas del usuario. Esto hace posible además que se haya aplicado en una gran diversidad de campos de forma rápida. Así, se encuentran en la literatura aplicaciones tan diversas como el diseño de uniformes para escolares, de cocinas, de sillas de oficina, en obras civiles para por ejemplo ajustar el paisaje a las preferencias del público, diseño de gafas, de prótesis mamarias, etcétera [17].

Algunas de las principales empresas que introdujeron la Metodología Kansei Engineering en la actualidad son:

- ✚ **Automobile:** Mitsubishi, Mazda, Nissan, Toyota, Honda, Isuzu, Ford, GM, Delphi Automotive Systems, Hyundai.
- ✚ **Apparel:** Wacoal, Goldwin.
- ✚ **Electric Home Appliance:** Panasonic, Panasonic Electric Works, Sanyo, Sharp, Samsung.
- ✚ **Office Machine:** Fuji, Cannon, Epson.
- ✚ **Housing:** Panasonic Electric Works, TOTO. INAX, YKK, Tateyama, Kansai Electric Power Plant.
- ✚ **Cosmetics:** Shiseido, Noevia, Milbon, Johnson & Johnson.
- ✚ **Others:** Komatsu, BT, Mizuno, Tsumara, Sebra, Nichiman, Toyobo.

En definitiva, lo que se pretende con la Ingeniería Kansei es diseñar más allá de lo que los ojos pueden ver, para cubrir las expectativas del consumidor que superan las básicas exigencias de calidad y funcionalidad [17].

Como se puede corroborar con lo descrito anteriormente, el concepto de innovación aunque resulte muy sencillo de definir, tiene gran impacto en las necesidades futuras de una sociedad y el éxito de nuevas empresas y nuevos productos; es por eso que resulta de gran importancia regirnos ya sea como institución educativa o empresarial en obtener resultados mas tangibles que sigan aportando al estado actual del conocimiento. Tal conocimiento ya esta siendo tomado en cuenta en nuevos proyectos de inversión ya que rinde frutos evidentes en la I. D. & i. T.

2.1.3 ¿QUÉ ES EL I. D. & i. T?

Investigación, desarrollo e innovación es un concepto de reciente aparición, en el contexto de los estudios de ciencia, tecnología y sociedad.

Mientras que el de desarrollo es un término proveniente del mundo de la economía, los de investigación e innovación provienen respectivamente del mundo de la epistemología y la tecnología, y su dinámica relación se encuentra en el contexto de la diferenciación entre ciencia pura y ciencia aplicada; cualquiera de ellos es de compleja definición. Esko Aho define provocativamente investigación como invertir dinero para obtener conocimiento, mientras que innovación sería invertir conocimiento para obtener dinero, lo que expresa muy bien el fenómeno de retroalimentación que se produce con una estrategia exitosa de I+D+i.

En la aplicación política y legislativa del concepto I+D+i, se define investigación como la indagación original planificada que persiga descubrir nuevos conocimientos y una superior comprensión en el ámbito científico y tecnológico; desarrollo como la aplicación de los resultados de la investigación o de cualquier otro tipo de conocimiento científico para la fabricación de nuevos materiales o productos o para el diseño de nuevos procesos o sistemas de producción, así como para la mejora tecnológica sustancial de materiales, productos, procesos o sistemas preexistentes; e innovación tecnológica como la actividad cuyo resultado sea un avance tecnológico en la obtención de nuevos productos o procesos de producción o mejoras sustanciales de los ya existentes. Se considerarán nuevos aquellos productos o procesos cuyas características o aplicaciones, desde el punto de vista tecnológico, difieran sustancialmente de las existentes con anterioridad [19].

El I+D se desglosa en 3 clases:

1. Investigación Básica
2. Investigación Aplicada
3. Desarrollo Tecnológico.

La Investigación Básica comprende todos aquellos estudios o trabajos originales que tienen como objetivo adquirir conocimientos científicos nuevos, se analiza propiedades, estructuras y relaciones con el objetivo de formular hipótesis, teorías y leyes. En esta etapa los científicos realizan "Descubrimientos".

La Investigación Aplicada parten de los trabajos originales desarrollados en la investigación básica, pero con el objetivo de adquirir conocimientos nuevos orientados a un objetivo práctico determinado, dichos resultados son susceptibles de ser patentados, para una futura explotación comercial. En esta etapa los científicos o técnicos "Inventan".

El desarrollo tecnológico comprende la utilización de los conocimientos adquiridos en la investigación aplicada para la producción de materiales, dispositivos, procedimientos o servicios nuevos. En esta etapa la empresa ha conseguido los conocimientos "Know How" (saber hacer) y se desarrolla los prototipos o plantas pilotos.



Figura 2.5. Desglose de la investigación para llegar a la innovación.

Por ultimo si los resultados del prototipo son eficaces y viables, se realiza inversiones para producir en grandes series y vender al mercado, entonces cuando el mercado acepta el producto o servicio, se convierte en **innovación**.

Para entender mejor estos conceptos se recurre a un ejemplo de la maquina del tiempo aplicaremos a dicha innovación el modelo de I+D+i: [19].

- **Investigación Básica:** En un principio los investigadores estudian las leyes actuales que rigen la física cuántica, analizando y ampliando las leyes legadas por Einstein, finalmente desarrollan hipótesis que se convierten en leyes acerca de la dilatación espacio-tiempo, sus descubrimientos son objeto de publicación de las primeras revistas científicas.
- **Investigación Aplicada:** Un grupo de técnicos especialistas y científicos son reunidos para trabajar con el objetivo de crear una maquina del tiempo, la cual nos permitirá viajar a través del tiempo, basándose en los estudios anteriores, desarrollan metodologías planos y procesos, finalmente inventan la maquina del tiempo, la cual patentan para poder explotarla económicamente.
- **Desarrollo Técnico:** La empresa desarrolla un prototipo de la maquina del tiempo, se asientan los conocimientos nuevos adquiridos y se ensaya hasta obtener unos resultados óptimos, en este momento se ha realizado el primer viaje temporal.
- **Innovación:** La empresa produce en masa maquinas del tiempo, la humanidad acepta dicho producto pues es fiable y además proporciona un servicio totalmente novedoso, en este momento se ha producido una Innovación Radical y de Producto.

PROCESO I+D+i



Figura 2.6. Proceso I + D + i. T.

¿Qué es el análisis FODA?

FODA (en inglés SWOT), es la sigla usada para referirse a una herramienta analítica que le permitirá trabajar con toda la información que posea sobre su negocio, en una técnica de planeación estratégica que permite crear o reajustar una estrategia de desarrollo. El cual permitirá conformar una cuadro de la situación actual de un distrito, como puede ser el caso de empresas o negocios que se abren al mercado; permitiendo, de esta manera, obtener un diagnostico preciso que permita tomar decisiones acordes con los objetivos y políticas formulados por todos los miembros o equipo de trabajo [20].

El FODA es pues, una herramienta útil para examinar las **Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas**, dentro de una empresa, organización o negocio.

Este tipo de análisis representa un esfuerzo para examinar la interacción entre las características particulares de su negocio y el entorno en el cual éste compite. El análisis FODA tiene múltiples aplicaciones y puede ser usado por todos los niveles de la corporación y en diferentes unidades de análisis tales como producto, mercado, producto-mercado, línea de productos, corporación, empresa, división, unidad estratégica de negocios, etcétera. Muchas de las conclusiones obtenidas como resultado del análisis FODA, podrán serle de gran utilidad en el análisis del mercado y en las estrategias de mercadeo que diseñe y que califiquen para ser incorporadas en el plan de negocios [20].

El análisis FODA debe enfocarse solamente hacia los factores claves para el éxito de su negocio. Debe resaltar las fortalezas y las debilidades diferenciales internas al compararlo de manera objetiva y realista con la competencia y con las oportunidades y amenazas claves del entorno.

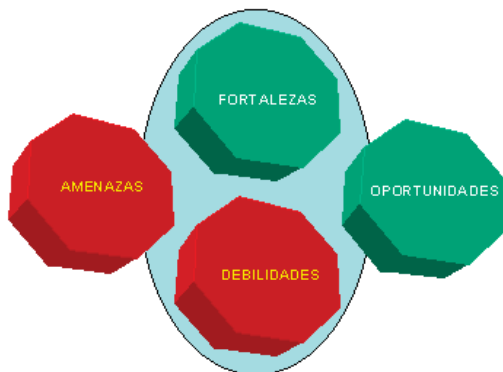


Figura 2.7. Análisis FODA.

Lo anterior significa que el análisis FODA consta de dos partes: una interna y otra externa.

- La **parte interna** tiene que ver con las fortalezas y las debilidades de su negocio, aspectos sobre los cuales usted tiene algún grado de control [20].
 - ✓ Fortalezas: son los elementos positivos que los integrantes de la organización perciben (sienten) que poseen y que constituyen recursos necesarios y poderosos para alcanzar los objetivos.
 - ✓ Debilidades: son los elementos, recursos, habilidades, actitudes técnicas que los miembros de la organización o población de un distrito tiene y sienten que la municipalidad no tiene y que constituyen barreras para lograr la buena marcha de la organización.
- La **parte externa** mira las oportunidades que ofrece el mercado y las amenazas que debe enfrentar su negocio en el mercado seleccionado. Aquí usted tiene que desarrollar toda su capacidad y habilidad para aprovechar esas oportunidades y para minimizar o anular esas amenazas, circunstancias sobre las cuales usted tiene poco o ningún control directo.
 - ✓ Oportunidades: son aquellos factores, recursos que la municipalidad sienten (perciben) que pueden aprovechar o utilizar para hacer posible el logro de los objetivos.
 - ✓ Amenazas: se refiere a los factores ambientales externos que la población siente que les puede afectar NEGATIVAMENTE, los cuales pueden ser de tipo político, económico, tecnológico. Son normalmente todos aquellos factores externos a la organización que se encuentran en el medio ambiente mediato y, en algunas ocasiones inmediato [20].

¿Es necesario investigar para innovar?

No es necesario una investigación propia para poder innovar, cualquier empresa puede innovar asimilando tecnologías de otras empresas, en este contexto puede ser útil el distinguir entre el **I+D creativo**, el cual intenta poner en marcha nuevos productos y procesos, y el **I+D de asimilación**, el cual quiere comprender y absorber los resultados de la investigación extranjera, estas estrategias son llevadas a cabo por aquellos países emergentes, un claro ejemplo es el caso de los años 50 y 60 en Japón, los cuales invirtieron en I+D para asimilar la tecnología americana, cosa que le permitió después pasar al investigación creativa [19].

La principal ventaja del I+D de asimilación, es la reducida inversión que se realiza, mientras que la principal desventaja, es la lentitud con la que pueden llegar a obtener resultados aplicados a sus procesos o productos, lentitud que puede suponer la desaparición por completo de toda una industria

La I+D+i permite a las empresas y a una nación incrementar el nivel de la ciencia y la tecnología; por lo que se debe aumentar el recurso humano dedicado a estas áreas, reforzando los derechos y las garantías de los investigadores; fortaleciendo la dimensión de la ciencia y la tecnología tanto dentro de la empresa como en el país, llevándola a niveles internacionales, se debe potenciar el papel de la investigación básica e incrementar la aplicada, todos los logros y avances alcanzados deben comunicársele a la sociedad, para que sean difundidos y conocidos por toda la población [21].

Es importante decir que las estadísticas sobre el número y entidad de las organizaciones que se dedican a "I+D" pueden revelar el estado de la industria en un país, el grado de competencia o el progreso científico [21].

Algunas mediciones que suelen realizarse están relacionadas con: presupuestos dedicados a I+D, número de patentes presentadas o publicaciones científicas, lo que se resume en el capital humano y los recursos financieros disponibles para la actividad de I+D.

Los retos son grandes cuando se piensa en I+D+i, ya que representa una inversión en tiempo y dinero, la investigación, el desarrollo y la innovación, son actividades que requieren de dedicación, de allí de la importancia de que el talento humano que se inicie en estas actividades lo haga de forma voluntaria. Los estudios en I+D+I, comprenden muchas fases y no tienen tiempos fijos, es por ello que el personal que incursione en las áreas científicos-tecnológicas debe identificarse con la carrera del investigador [21].

Cuando se incrementa la fuerza laboral que se dedica a I+D y la inversión para ello, se fortalece la base de la innovación, ya que los constantes estudios y desarrollos, conllevan a innovar en materia tecnológica y ésta aporta soluciones importante a la empresa, al país y al entorno (sociedad), la magnitud del aporte que se realice en estas áreas permitirá visualizar la evolución de las mismas, claro ésta que el aporte debe realizarse con mayor fuerza en las áreas que sean clave y en las que la empresa y el país tenga mayores posibilidades de desarrollo, con miras a competir con tecnología desarrollada a nivel internacional e ir rompiendo con la dependencia tecnológica.

Para aprovechar las ventajas de la ubicación en la innovación no es suficiente con disponer de recurso humano que sólo sea observador de I+D, a través de visitas técnicas a diferentes plantas o laboratorios que cuenten con la tecnología que se utiliza en su medio laboral.

Es necesario que las empresas incluyan en su planificación estratégica global, la estrategia que apunte hacia lo científico y tecnológico, definiendo una estrategia tecnológica basada en una cartera de tecnologías clave y alineada con la estrategia global de la empresa y con las condiciones del entorno cambiante. Por lo que una empresa debe [21].

- Identificar todas las tecnologías y subtecnologías diferentes de la cadena de valor,
- Identificar tecnologías potencialmente relevantes en otros sectores o tecnologías que se encuentran en desarrollo científico,
- Determinar el curso probable del cambio en las tecnologías esenciales,
- Determinar qué tecnología y potenciales cambios tecnológicos son más importantes para la ventaja competitiva y para la estructura del sector,
- Evaluar las capacidades relativas de la empresa en cuanto a las tecnologías importantes y el coste de realizar mejoras,
- Elegir una estrategia tecnológica que abarque todas las tecnologías importantes que refuerzan la estrategia competitiva general de la empresa,
- Reforzar las estrategias tecnológicas de las unidades de negocios en el ámbito organizativo.

La implementación de una estrategia tecnológica debe conllevar a la detección formal de oportunidades y problemas tecnológicos, y gestionar la selección y el seguimiento de proyectos resultantes.

Sin olvidar la relación estrecha que guardan las actividades de I+D+I, con la transferencia tecnológica y del conocimiento. Por lo que a través de la elaboración de planes y programas se puede ver en qué medida la empresa como conjunto armónico aprende, crece y progresa unida, ya se pone en marcha un proceso cuyos beneficios le llegarán ampliamente multiplicados, sin olvidar que en muchas ocasiones la inversión ha de entenderse a medio-largo plazo. No obstante el aumento del conocimiento y la productividad en el conjunto de la empresa se incrementará.



El transferir la tecnología a unidades de la empresa que le ayuden a solucionar problemas y hacerlas más productivas no es el fin único de I+D+I, porque sino se transfiere el conocimiento que permita implementar la tecnología creada, la inversión realizada está perdida, es por ello que la transferencia del conocimiento se convierte en un vehículo de difusión no sólo de capacidades concretas, sino de la cultura propia y distintiva que la empresa quiere tener y ofrecer al exterior como señas de identidad y propósitos, en relación con su clientela y competidores [21].

2.2 CONCRETO HIDRÁULICO.

2.2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO.

El concreto es un material de construcción que se obtiene de la mezcla de agua, cemento, arena y grava. De la distinta mezcla de estas materias primas se obtiene también otros materiales de construcción afines: [22].

Pasta de Cemento: proviene de la mezcla de agua y cemento.

Mortero: Proviene de la mezcla de agua, cemento y arena.

Concreto: Proviene de la mezcla de agua, cemento, arena y grava.

A estos materiales, en el momento de su amasado, se les puede añadir otros productos para mejorar algunas características determinadas.

El que al concreto se le considere hoy como rey universal de los materiales de construcción se debe a sus indiscutibles ventajas: [22].

1. Es un material que permite conseguir piezas de cualquier forma, debido al carácter plástico que posee en estado fresco.
2. Posee elevada resistencia mecánica a la compresión y, aunque posea menor resistencia a la tracción, permite aumentarla embebiendo acero en su interior.
3. Proporciona piezas de gran monolitismo, prescindiendo de juntas de uniones, que suelen ser zonas débiles. Desde este punto de vista es mejor que las construcciones pétreas, de ladrillo o de acero laminado.
4. Esta formado por materiales abundantes y baratos.

Pero no todo son ventajas en el concreto, pues a este material se le pueden poner serios inconvenientes:

1. Es un material pesado con una relación peso/resistencia elevada.
2. Presenta anisotropía (por ejemplo, en su resistencia mecánica).
3. Es sensible a determinados agentes agresivos, tanto de tipo Físico como Químico.

Además, el costo relativamente bajo de sus componentes, unido a la ilimitada adaptabilidad a las formas más diversas, hace que pueda aplicarse a casi todo tipo de construcciones, de manera competitiva con la piedra, al acero y la madera.

2.2.2 MATERIALES CONSTITUYENTES DEL CONCRETO.

a) CEMENTO.

Parte fundamental en las características y el desarrollo de la corrosión del Concreto Tradicional los confieren los componentes el Cemento, comúnmente cemento Portland, debido a esto primeramente se pretende dar en este punto una breve descripción de la elaboración del Cemento para posteriormente ver como inciden sus componentes en el Fenómeno de la Corrosión [23].

El cemento se presenta en forma de polvo finísimo, de color gris, que mezclado con agua forma una pasta que endurece tanto bajo el agua como el aire. Por endurecer bajo el agua y por necesitar agua para su fraguado se le define como un aglomerante hidráulico.

❑ PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO.

El componente principal del cemento es el clinker, el cual esta compuesto por materias primas: calizos y arcillosos. Como materiales calizos: contienen principalmente carbonato cálcico, pueden usarse calizas, margas, conchas marinas, etc. Como materiales arcillosos: contienen principalmente óxidos de silicio o sílice de aluminio o alúmina, y de hierro, con una cierta cantidad de agua libre y de agua de cristalización, arcillas, pizarras, esquistos, escoria de alto horno, etcétera [23].

Algunos de estos materiales, por ejemplo las margas y la escoria, son a su vez calcáreos y arcillosos. Además hay impurezas, tales como carbonato de magnesio que lleva a veces la caliza y otros elementos Na, K, P, etc., estos en pequeñas cantidades.

La parte esencial de la fabricación del cemento es la calcinación, que consiste proceso de fusión incipiente en un horno rotatorio de las materias antes mencionadas, previa reducción y dosificación de estas. Lo primero, consiste en la reducción de estos a granos muy finos, con el fin de aumentar su superficie específica, de manera que puedan tener lugar en el horno las reacciones buscadas. Este proceso de reducción de tamaño de las materias primas se puede hacer básicamente por dos procedimientos diferentes, que son el de vía seca y el de vía húmeda [23].

- ✓ **Proceso de Vía Seca:** la reducción de tamaño se hace por una serie de chancadoras y molinos en los que se trituran y desmenuzan los materiales en seco. Si inicialmente las materias primas no están lo bastante secas, deben someterse a un pre-secamiento.
- ✓ **Proceso de Vía Húmeda:** se deslían los materiales en agua formando una suspensión que se espesa y eventualmente se le disminuye el contenido de agua por filtros al vacío antes de entrar en el horno. Esta vía necesita menos gastos de energía mecánica en la reducción de tamaño, pero mayores gastos térmicos, ya que es necesario evaporar en el horno una cantidad de agua mayor.

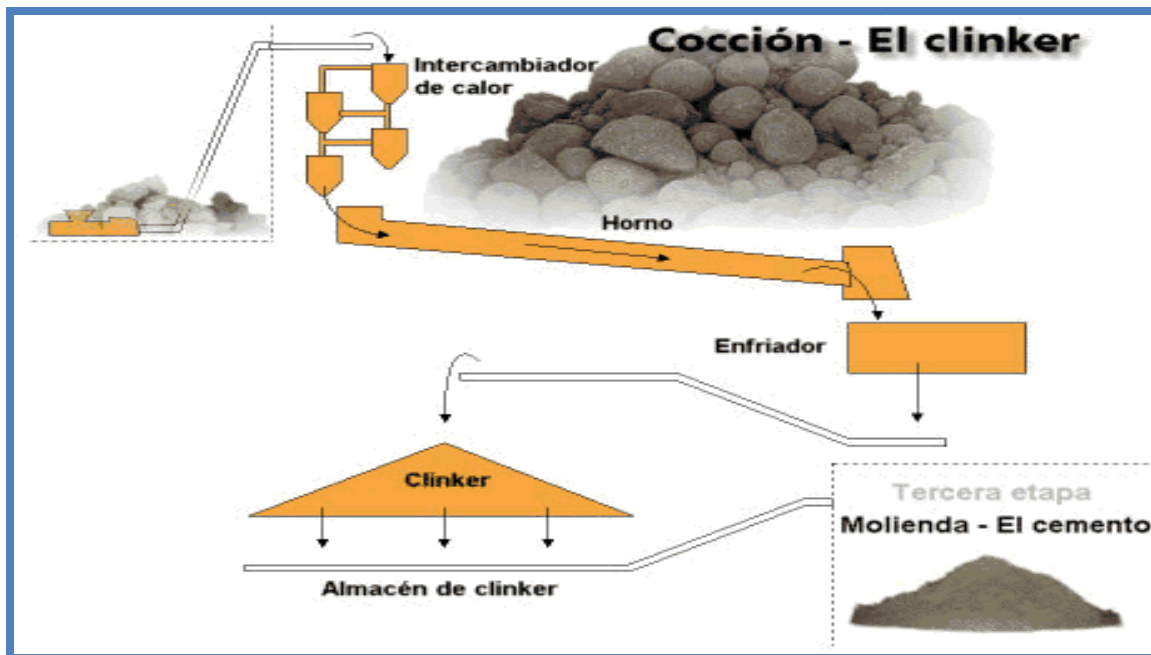


Figura 2.8. Fabricación del Cemento Portland.

El emplear una vía u otra depende del tipo de materias primas.

El segundo proceso previo consiste en la dosificación necesaria para que las materias primas calcáreas y arcillosas estén en la proporción necesaria para obtener el clinker de la composición requerida.

Mediante el tratamiento térmico, la mezcla cruda finamente molida de los materiales naturales no hidráulicos, calcita, cuarzo, arcillas y feldspatos, es transformada en una mezcla íntima de cuatro minerales principales hidráulicamente activos que se aprecian en la siguiente tabla.

Nombre	Composición	P.M. (g/mol)	Calor de hidratación (cal/g)	Fórmula abreviada	Nombre del mineral
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	228	120	C_3S	Alita
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	172	60	C_2S	Belita
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	270	207	C_3A	Felita
Ferrito aluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	486	100	C_4AF	Celita

Tabla 2.1. Componentes Mineralógicos del Clinker.

El tratamiento térmico de calentamiento y enfriamiento responsable para esta transformación se denomina clinkerización. En el proceso de formación de clinker ocurre una serie de complejas reacciones en un rango amplio de temperaturas y durante el mismo coexisten frecuentemente mezclas complejas de productos reactantes intermedios y finales. Aún después de alcanzada la temperatura máxima de aproximadamente 1.450 °C, debe transcurrir un cierto tiempo antes que se produzca clinker de una calidad aceptable [23].

Rango de Temperatura (°C)	Tipo de reacción
Calentamiento :	
20 – 100	Evaporación de H ₂ O libre
100-300	Perdida del agua físicamente absorbida
400-900	Remoción de H ₂ O estructural (grupos H ₂ O y OH) de los minerales de arcilla
>500	Cambio de estructura en los minerales de sílice
600-900	Disociación de los carbonatos
>800	Formación de belita, productos intermedios
>1.250	Formación de alita
>1.260	Formación de fase líquida (caldo de aluminato y ferrita)
Aprox. 1.450	Se completa la reacción y recristalización de alita y belita
Enfriamiento:	
1.300-1.240	Cristalización de fase líquida

Tabla 2.2. Secuencia de reacciones en un horno rotatorio.

Es importante el balance térmico del horno para obtener el mejor aprovechamiento del calor. Para ello, el aire para la combustión se pasa por el clinker caliente con lo que se consigue la doble finalidad de aprovechar el calor y enfriar el clinker. En la parte inicial del horno se ponen dispositivos para favorecer la transmisión térmica de los gases a la mezcla cruda. Además, los gases de escape se aprovechan incluso para calentar las materias primas antes de entrar en el horno. El clinker sale formando bolitas de 3 a 29 mm de diámetro y es necesario pulverizarlo [23].

❑ **CEMENTO PORTLAND.**

Una vez ya formado el clinker este se pulveriza mediante molinos de bola hasta convertirlo en polvo finísimo, adicionándole en esta etapa yeso CaSO₄ (yeso o anhidrita) de alrededor de un 5% de su peso. Así el producto obtenido se denomina Cemento Pórtland, que es el tipo de cemento más utilizado como ligante para la preparación de concreto. Es importante destacar que sino se le adicionara yeso al clinker, el cemento, tendría un fraguado muy rápido, de esta manera el yeso se utiliza como regulador del fraguado. Los cementos Pórtland son de composición variable, pero comprendida entre ciertos límites. El análisis químico de un cemento se expresa por sus óxidos. Sus proporciones en los cementos Pórtland corrientes suelen ser las que se indican en la Tabla 2.3.

Componente	%	Media %
CaO	59-67	64
SiO ₂	17-25	21
Al ₂ O ₃	5-9	6.5
Fe ₂ O	1-5	2.5
MgO	1-4	2.5
SO ₃	1-3	2.1
Pérdida por calcinación.	0.6-2	1.3
Residuo Insoluble	0.008-0.02	0.01

Tabla 2.3. Proporción de Óxidos en Cementos Portland.

En la tabla anterior se encuentran los componentes principales de que hemos hablado: cal, sílice, alúmina, óxido de hierro [24]. Estos componentes constituyen, en la composición media, el 94% del total. La magnesia (óxido de magnesio) no es un componente favorable, pero proviene de impurezas de algunas calizas. El SO₃ es del yeso que se añadió al clinker. Además de los óxidos citados, hay otros como Mn₂O₃, Na₂O, K₂O, TiO₂, etc., en proporciones menores. El significado de la pérdida por calcinación y del residuo insoluble se explicará más adelante [23].

Como ya se ha visto, estos óxidos que da el análisis químico no se hallan libres, sino combinados en virtud de las reacciones producidas en el horno. Los cuatro óxidos principales forman los compuestos C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF. De la composición expresada por los óxidos y teniendo en cuenta sus pesos moleculares, se puede deducir la composición potencial de los cuatro minerales que constituyen principalmente el cemento Portland. Desde luego, estas proporciones son diferentes en cada cemento particular [23].

Mineral	%
C ₃ S	48
C ₂ S	28
C ₃ A	12
C ₄ AF	8

Tabla 2.4. Composición media de los minerales principales en Cementos Portland corrientes.

Estos cuatro compuestos son identificables al microscopio como cuatro fases diferentes. Tienen distintas propiedades y de su proporción dependen por tanto las características principales de un cemento Portland. Los cuatro compuestos podrían considerarse aisladamente como cuatro cementos diferentes, pues todos ellos tienen la virtud de fraguar y endurecerse; pero esto lo hacen a distintas velocidades y alcanzando diferentes valores de resistencia [23].

Propiedades minerales presentes en el Cemento Portland.

Como el fraguado y endurecimiento se producen por reacciones con el agua, que son exotérmicas, su distinta velocidad está relacionada directamente con el calor de hidratación liberado [23].

El aluminato tricálcico tiene mucho calor de fraguado, es de reacción rápida. De él depende la resistencia del hormigón a un día. Es atacable por los sulfatos y de su mayor proporción depende que el cemento sea más vulnerable a ese ataque químico, por ejemplo, por el agua de mar. El silicato tricálcico le sigue en rapidez. De él principalmente depende la resistencia de 3 a 28 días. Calor de hidratación alto, pero no tanto como el C₃A.

El silicato dicálcico es más lento que los anteriores y tiene menos calor de hidratación. El C₄AF tiene débiles propiedades aglomerantes [23].

Minerales Principales	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
Velocidad de reacción	Media	Lenta	Rápida	Lenta
Calor liberado	Medio	Poco	Mucho	Poco
Valor conglomerante				
inicial	Bueno	Pobre	Bueno	Pobre
Final	Bueno	Bueno	Pobre	Pobre
Reacción con sulfatos	No	No	Si	No

Tabla 2.5. Propiedades de los minerales principales en el Cemento Portland.

Propiedades de un Cemento Portland conocida su composición Mineralógica.

Según su composición mineralógica se clasifican los cementos Portland norteamericanos en cinco tipos con las características y composición media que se indican a continuación, en porcentaje [23].

	I	II	III	IV	V
	Corriente	Moderado Calor	Alta Resist. Inicial	Bajo calor	Resist. A los sulfatos
C₃S	48	43	57	20	39
C₂S	28	30	20	52	33
C₃A	12	7.5	11	6	4.5
C₄AF	8	12	7	14	16

Tabla 2.6. Características de los tipos de cementos Portland (ASTM) según su composición de minerales principales.

Obsérvese, por ejemplo, que el cemento resistente a los sulfatos es el que tiene menos C_3A . El de bajo calor, es el que tiene menos C_3S y poco C_3A ; y el de resistencia inicial, el que tiene más C_3S y una cantidad no reducida de C_3A . Otro factor que influye extraordinariamente en la velocidad de endurecimiento y en el calor de hidratación es la finura del cemento. En cuanto a la velocidad del fraguado, está siempre regulada por el yeso, debiéndose añadir más en los cementos más finos. El Fe_2O_3 es responsable del tono gris del cemento. Por eso cuando se quiere fabricar cemento blanco hay que buscar materias primas que tengan muy poco Fe_2O_3 y en lo posible también poco MgO . La magnesia (MgO), el SO_3 y la cal libre pueden producir expansiones diferidas que, al ocurrir en el hormigón ya endurecido, ocasionan su agrietamiento. Por tal razón se limita en las normas su contenido máximo y además se hace con el cemento un ensayo acelerado de expansión [23].

El óxido de magnesio da el tono verdoso de algunos cementos. Por cal libre se entiende CaO que no ha reaccionado en la clinkerización. Esa cal se encuentra confinada dentro de una estructura mineral compacta lo que hace que no reaccione inmediatamente con el agua al mezclar el hormigón. Su hidratación se produce muy posteriormente, con el consiguiente aumento de volumen y el peligro de agrietamiento a que nos hemos referido. Los óxidos alcalinos Na_2O y K_2O se encuentran en proporción total de 0,4% a 1,3%; con todo, pueden tener gran trascendencia en el comportamiento del cemento, ya que reaccionan con ciertos áridos produciendo expansiones y grietas en el hormigón. Por eso se recomienda que su proporción total, expresada como Na_2O , sea menor que 0,6%. La reacción álcali-árido más conocida es la álcali-sílice, entre los álcalis del hormigón álcalis (sodio y potasio) y ciertas rocas silíceas o minerales presentes en algunos áridos [23].

Pérdida por Calcinación y Residuo Insoluble.

La pérdida por calcinación o pérdida al fuego es la disminución relativa de peso del cemento al calentarlo a 1000 °C. En ese calentamiento se desprende principalmente agua y CO_2 . El agua proviene de varios orígenes: En primer lugar en las fábricas a veces se rocía el clinker con agua para enfriarlo, lo que le produce una muy pequeña hidratación superficial. En segundo lugar, la humedad del aire absorbida por el mismo clínquer. En tercer lugar, el agua que lleva el yeso, ya que éste no pasa por el horno en la fábrica de cemento, y lleva agua de cristalización, y posiblemente humedad.

El CO_2 proviene de absorción del aire. La pérdida por calcinación puede servir además como índice del estado de un cemento del cual se dude por haber tenido un almacenamiento inadecuado.

El residuo insoluble se refiere a la parte que no se disuelve en ácido clorhídrico. Los componentes de la porción arcillosa del crudo son insolubles en HCl , pero pasan a ser solubles después de haber reaccionado en el horno. Por lo tanto, el residuo insoluble es un índice para saber si la clinkerización ha sido completa o no.

b) AGUA DE AMASADO.

El agua desempeña dos roles en su calidad de componente del concreto, el primero es que participa en el proceso de hidratación del cemento, la cual no puede tener lugar sin su presencia y luego otorga la trabajabilidad necesaria del concreto siendo determinante para definir su fluidez. En consecuencia, es un componente fundamental del concreto, ya que su presencia condiciona tanto el desarrollo de las propiedades en estado fresco, como en la etapa de endurecimiento (porosidad, retracción y resistencia) [23].

❑ CONDICIONES DE CALIDAD.

Para su incorporación en el concreto, el agua debe presentar ciertas características de calidad, las cuales aparecen definidas en la NCh. 1498 y pueden resumirse en la forma siguiente:

- ✓ El uso de agua potable esta permitido sin necesidad de verificar su calidad.
- ✓ El agua de mar solo puede usarse en la preparación de hormigones de resistencia especificada inferior a 150 kg/cm².
- ✓ El agua contenida de azúcares, en forma de sacarosa o glucosa, no puede ser empleada para la preparación de concretos [23].

Las aguas de origen desconocido deben ser sometidas a análisis químico, debiendo atenerse su composición a los límites señalados en la norma respectiva.

En resumen, el agua debe estar libre de sales, impurezas, sólidos en suspensión y materias orgánicas.

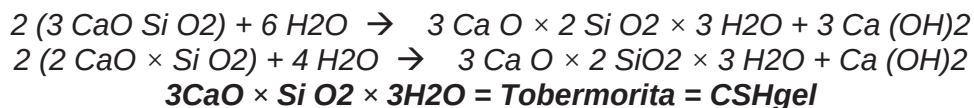
c) HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.

Cuando se mezcla el cemento Portland con agua, los silicatos y aluminatos que son los componentes principales, se hidratan dando lugar a una masa rígida y dura conocida con el nombre de cemento endurecido. A este proceso se le conoce como fraguado, que es la propiedad esencial de los cementos y su cualidad es proporcionar, mezclados con el agua, una pasta que fragua y endurece, tanto al aire libre como bajo el agua [23].

Se puede considerar la hidratación del cemento como un proceso en el cual se produce una disolución con reacción de sus componentes con el agua, seguida de una difusión y precipitación de los componentes hidratados. La hidratación continúa produciéndose después del fraguado. De ahí la importancia de mantener un ambiente de elevada humedad después del fraguado. A este tratamiento se le llama *Curado*. Durante el curado va aumentando progresivamente la resistencia mecánica del concreto al ir precipitando sus componentes hidratados.

Los compuestos del cemento se hidratan a distinta velocidad, iniciándose con el C₃A y continuando posteriormente con C₄AF, C₃S y C₂S. A partir de ese momento el proceso no es cabalmente conocido, existiendo teorías que suponen la precipitación de los compuestos hidratados, con la formación de cristales entrecruzados entre sí que desarrollen fuerzas de adherencia, las que producen el endurecimiento de la pasta (Teoría cristaloidal de Le Chatelier) o alternativamente por el endurecimiento superficial de un gel formado a partir de dichos compuestos hidratados (Teoría coloidal de Michaelis), estimándose actualmente que el proceso presenta características mixtas [23].

La hidratación del cemento Pórtland es principalmente una hidrólisis de silicatos, que produce un hidrato de silicato de calcio liberando cal que se separa bajo la forma de hidróxido de calcio. Las reacciones más importantes son las de los silicatos tricálcico y dicálcico [23].



No se han considerado las reacciones del C₃A, C₄AF y del yeso. En ellas la cantidad de agua necesaria es, en proporción, mayor que en las reacciones citadas; pero como esos componentes se hallan en menor cantidad que los silicatos, no influye considerablemente en la demanda de agua del cemento, que va a ser como máximo $28 \pm 1^\circ\text{C}$ [23].

Esta es el agua que se combina químicamente; desde luego el concreto necesita una relación agua/cemento mayor que 0.28, pero ello es debido a la necesidad de darle trabajabilidad.

En el caso de los cementos puzolánicos, la cal Ca (OH)₂, liberada en las reacciones anotadas, reacciona a su vez con la puzolana formando compuestos con propiedades conglomerantes. Además, la puzolana, al consumir la cal, desequilibra las reacciones anotadas y hace que se incline más la reacción hacia la derecha, formándose más tobermorita (CSH gel) [23].

Aparte del CSH gel, el hidróxido de calcio es el componente principal del cemento hidratado. Se cree que el Ca (OH)₂ no contribuye a la resistencia y siendo una base fuerte, en el sentido químico de la palabra, protege al acero contra la corrosión electroquímica en los hormigones armados.

El hidróxido de calcio es ligeramente soluble en agua y puede ser sacado de la estructura si se mantiene el hormigón en contacto permanente con H₂O corriente; esto aumenta la porosidad y reduce su resistencia [23].

El hidróxido de calcio reacciona lentamente con el CO₂ del aire para formar CaCO₃. De este modo se destruye el efecto protector contra la corrosión del acero de refuerzo. Este fenómeno se llama "carbonatación" y su importancia depende del contenido de cemento, relación agua / cemento y condiciones climatológicas.

Si se incrementa la velocidad de hidratación, sube el desarrollo de la resistencia a temprana edad, pero se perjudica la resistencia final. La hidratación lenta y retardada permite la formación de una estructura microcristalina (gel) de gran superficie, que da como resultado una buena resistencia. La reacción de hidratación es un proceso exotérmico, es decir, durante la reacción del cemento con el agua se libera calor. La cantidad de calor liberada es bastante importante y se llama "calor de hidratación". Debido a la baja conductibilidad del concreto, éste funciona como aislante y dentro de una gran masa de concreto la hidratación produce un gran aumento de la temperatura, hasta 50°C [23].

La gradiente de temperatura que se produce como consecuencia de este fenómeno puede ser causante de la formación de grietas en el hormigón.

En resumidas cuentas ante esta interacción del cemento con el agua se produce pues, la formación de nuevos componentes como son:

- La Etringita,
- La Tobermorita y
- La Portlandita.

La Etringita, que se produce por la reacción del aluminato Tri-cálcico con el agua y el yeso hidratado esto para evitar el fraguado relámpago; la Tobermorita, que es producida por la hidratación del Silicato Tri-Cálcico y es la parte mas estable del cemento y la Portlandita, que se considera la parte mas inestable del cemento ya que esta tiende a reaccionar muy fácilmente con cualquier elemento agresivo como son los cloruros y el CO₂.

d) ÁRIDOS.

Los áridos son materiales pétreos, compuestos de partículas duras de forma y tamaño estables, que pueden ser de origen ígneo, sedimentario o metamórfico o artificial como escorias y arcillas expandidas [23].

Es el componente inerte del concreto, que representa entre un 65% y un 80% de su volumen y tiene dos funciones principales:

- ✓ Proveer una masa de partículas aptas para resistir la acción de cargas aplicadas, la abrasión, el paso de la humedad y la acción climática.
- ✓ Resistir los cambios de volumen resultantes de los procesos de fraguado y endurecimiento y los cambios de humedad de la pasta de cemento.

Debe darse una gran atención a la elección y control ya que de sus características depende [23]:

- a) Docilidad del concreto u concreto fresco
- b) Resistencia del concreto u concreto endurecido
- c) Durabilidad de las estructuras
- d) La economía de las mezclas

Los requisitos generales que deben cumplir los áridos para la fabricación de concreto u hormigón están contenidos en la norma chilena NCh 163. Of79. Aspectos que se deben tener en cuenta en el estudio de los áridos son [23]:

- ✓ Sus propiedades internas
- ✓ Cualidades de la superficie
- ✓ Propiedades en conjunto

Además se deben tener en cuenta condiciones que deben cumplir para una buena integración en el concreto como son:

- ✓ Condiciones de trabajabilidad
- ✓ Condiciones de resistencia propia
- ✓ Condiciones de estabilidad físico-químicas.

La granulometría de los áridos tiene una gran influencia sobre las propiedades del hormigón fresco y endurecido. Para obtener la misma trabajabilidad, un árido de granulometría fina necesitará, por lo general, una mayor proporción de agua que uno de granulometría gruesa. El tamaño máximo del árido grueso estará de acuerdo con la naturaleza del trabajo [23].

En los áridos la forma de las partículas y su textura superficial influyen más a las propiedades del concreto fresco que a las propiedades del hormigón endurecido. Las partículas de textura áspera o partículas alargadas y laminadas requieren más agua para producir un concreto trabajable, que los áridos redondos o cúbicos.

En algunas áreas, los áridos con ciertos constituyentes químicos reaccionan con los álcalis del cemento. Esta reacción de árido-álcali (Reacción ASR), puede causar una expansión anormal y grietas en el hormigón. Es necesario que sean químicamente estables.

e) ADITIVOS.

Según ASTM aditivo es el material, además del cemento, agua y áridos, que se añade al concreto o mortero inmediatamente antes o durante el mezclado [23].

El objeto de añadir aditivos es el de modificar, acentuar o conferir alguna propiedad que de por sí la mezcla no posee, y hacerla temporal o permanente durante su estado fresco o endurecido.

Se presenta en forma de polvo o líquido. Los aditivos líquidos se emplean diluidos en agua y los aditivos en polvo se prefiere sean agregados directamente al cemento. Se aplican en dosis pequeñísimas que varían de entre un 0,1% y un 5% del peso del cemento y su efecto es de índole físico, químico o físico-químico. Esta dosis empleada tiene directa relación con la magnitud del efecto, debiéndose en todo caso respetar los límites recomendados por el fabricante y el aporte de sustancias dañinas en el hormigón. Los aditivos se pueden clasificar como [23]:

- ✓ Aditivos incorporadores de aire
- ✓ Aditivos plastificantes (reductores de agua)
- ✓ Aditivos retardadores
- ✓ Aditivos aceleradores
- ✓ Aditivos impermeabilizantes
- ✓ Aditivos expansivos.
- ✓ Misceláneos (agentes para lechadas de sellado y agentes formadores de gas).

El uso de aditivos esta condicionado a:

- a) Que se obtenga el resultado sin tener que variar sustancialmente la dosificación básica.
- b) Que el aditivo no tenga efectos negativos en otras propiedades del concreto.
- c) Que un análisis de esto justifique su empleo

El concreto debe ser trabajable, terminable, resistente, durable, impermeable y resistente al desgaste. Estas cualidades se pueden obtener a menudo más conveniente y económicamente por medio del cálculo apropiado de la mezcla y la selección de materiales adecuados sin recurrir a aditivos, con excepción de los agentes incorporadores de aire cuando sean necesarios. Sin embargo, puede haber casos en que se requieran ciertas propiedades especiales, tales como: tiempo de fraguado prolongado, aceleración de la resistencia a corta edad, atrasar el desarrollo del calor de hidratación. En estos casos es aconsejable considerar e investigar ciertos aditivos, ya que su uso en el concreto puede producir los efectos especiales deseados. En algunos casos se puede desear propiedades que sólo son posibles de obtener con la ayuda de aditivos [23].

No obstante, no se puede considerar a ningún aditivo como sustituto de la buena práctica de concretado. La trabajabilidad de las mezclas y la calidad del hormigón se pueden mejorar por medio de ajustes en la granulometría de la mezcla de áridos y por medio del uso de agentes incorporadores de aire, humidificantes y dispersadores del cemento.

Las mezclas de ensayo siempre deben hacerse con el aditivo y los materiales de trabajo, ya que la acción de un aditivo está muy influenciada por la composición del cemento y por otros aditivos [23].

Antes de usar un aditivo se debe tener presente que:

- a) Todo empleo de aditivo presume un buen concreto.
- b) Antes de decidir el empleo de un aditivo se debe verificar si es posible obtener la propiedad deseada mediante la modificación de los componentes del concreto y las condiciones de la obra.
- c) Se debe considerar, además de las ventajas, sus inconvenientes, limitaciones, contraindicaciones y compatibilidades.
- d) El efecto que produce el aditivo se debe medir mediante ensayos de laboratorio y resultados de faenas.

2.2.3 DURABILIDAD DEL CONCRETO TRADICIONAL.

La durabilidad del concreto ha sido un tema importante por muchos años debido a su significancia que trasciende en el nivel de servicio del concreto o de las estructuras de concreto reforzado, además del gran impacto en el sector de la construcción.

El código de diseño ACI define la durabilidad del concreto de cemento Portland como la habilidad para resistir la acción del intemperismo, el ataque químico, la abrasión, o cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras, que produzca deterioro del concreto [24]. La conclusión primordial que se desprende de la definición anterior, es que la durabilidad no es un concepto absoluto que dependa solo del diseño de mezcla, sino que esta en función del ambiente de exposición y las condiciones de trabajo a las cuales lo sometamos. En este sentido, no existe un concreto “durable” por si mismo, ya que las características físicas, químicas y mecánicas que pudieran ser adecuadas para ciertas circunstancias no necesariamente lo habilitan para seguir siendo “durable” bajo condiciones diferentes.

Tradicionalmente se asoció la durabilidad a las características resistentes del concreto y particularmente a su resistencia en compresión, pero las experiencias prácticas y el avance de la investigación en este campo han demostrado que es solo uno de los aspectos involucrados, pero no el único ni el suficiente para obtener un concreto durable. El problema de la durabilidad es sumamente complejo, en la medida en que cada situación de exposición y condición de servicio ameritan una especificación particular tanto para los materiales y diseño de mezcla, como para los aditivos, la técnica de producción y el proceso constructivo.

Bryant Mather, uno de los pioneros en la investigación en la Tecnología del Concreto y en el área de la durabilidad indica en uno de sus trabajos: “Está demostrado científicamente que las estructuras de concreto se comportan inadecuadamente debido a que las especificaciones técnicas fueron deficientes o que éstas fueron correctas pero no se siguieron en la obra”. No se debe copiar o “adaptar” especificaciones técnicas locales y foráneas para proyectos y situaciones que muestren similitudes aparentes, pero que, sin embargo, desde el punto de vista de la tecnología del Concreto y la durabilidad, se requiere una evaluación y criterios particulares [23].

Se ha demostrado que las adiciones al cemento pueden ser utilizadas para reducir el calor asociado con la hidratación del cemento y reducir el potencial de fisuración térmica en elementos estructurales masivos. Estos materiales modifican la micro-estructura del concreto y reducen su permeabilidad por lo que consecuentemente reducen la penetración de aguas y sales disueltas en el concreto. La impermeabilidad del concreto reducirá varias formas de deterioro del mismo, tales como la corrosión del acero de refuerzo y el ataque de químicos. Las mayorías de las adiciones al cemento reducen la expansión interna del concreto debido a reacciones químicas tales como la reacción árido álcali y ataques de sulfatos. La combinación óptima de materiales varía para diferentes requisitos de desempeño y para el tipo de adición.

2.2.3.1 FACTORES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD DEL CONCRETO.

Son diversos los factores que conducen la durabilidad del concreto, esta se puede determinar por agentes externos y agentes internos o propios de concreto [23]. Los agentes externos son aquellos provenientes del medio en el cual se encuentre el elemento, que implican el ingreso de fluidos agresivos que se encuentran en su ambiente circundante, seguido de procesos físicos o químicos que atacan provocando una perturbación de su estructura y superficie, con frecuencia aportando al desarrollo de fuerzas expansivas y de interrupción. Los agentes de tipo interno o propios del concreto provocan un daño algo similar, influido principalmente por cambios de humedad, mal diseño o fabricación de las mezclas, errores de estalación, etc. Claramente, la capacidad del concreto para limitar estos procesos influye en la durabilidad y el grado de deterioro de él. Los factores que afectan la durabilidad del concreto, son aquellos que producen el deterioro o degradación del mismo.

A continuación se discute las principales causas que provocan el deterioro del concreto.

a) CONGELAMIENTO Y DESHIELO.

El congelamiento y deshielo, constituye un agente de deterioro que ocurre en los climas en que la temperatura desciende hasta provocar el congelamiento del agua contenida en los poros capilares del concreto [23].

En términos generales el fenómeno se caracteriza por introducir esfuerzos internos en el concreto que pueden provocar su fisuración reiterada y la consiguiente desintegración. Este fenómeno, se da tanto a nivel de la pasta de cemento, como en los agregados de manera independiente, así como en la interacción de ambos por lo que su evaluación debe abordar cada uno de estos aspectos.

❖ **Efecto en la pasta de cemento**, existe dos teorías que explica el efecto en el concreto. La primera se denomina de “presión hidráulica”, que considera que dependiendo del grado de saturación de los poros capilares y poros del gel, la velocidad de congelación y la permeabilidad de la pasta, al congelarse el agua en los poros ésta aumenta de volumen y ejerce presión sobre el agua aún en estado líquido, ocasionando tensiones en la estructura resistente. Si estas tensiones superan los esfuerzos últimos de la pasta, se produce la rotura [23].

La segunda teoría llamada de “presión osmótica” asume las mismas consideraciones iniciales de la anterior pero supone que al congelarse el agua en los poros cambia la alcalinidad del agua aún en estado líquido, por lo que tiende a dirigirse hacia las zonas congeladas de alcalinidad menor para entrar en solución lo que genera en una presión osmótica del agua líquida sobre la sólida ocasionando presiones internas en la estructura resistente de la pasta con consecuencias similares al caso anterior.

Bajo ambas teorías al producirse el descongelamiento o deshielo, se liberan las tensiones y al repetirse este ciclo muchas veces se produce la rotura por fatiga de la estructura de la pasta, si es que no se produjo inicialmente.

- ❖ **Efecto en los agregados.** En los agregados existe evidencia de que por los tamaños mayores de los poros capilares se producen generalmente presiones hidráulicas y no osmóticas; con esfuerzos internos similares a los que ocurren en la pasta de cemento, existiendo indicios que el tamaño máximo tiene una influencia importante, estimándose que para cada tipo de material existe un tamaño máximo por debajo del cual se puede producir el congelamiento confinado dentro del concreto sin daño interno en los agregados. Por otro lado cuando menor sea la capacidad del agregado para absorber agua, menor será el efecto del congelamiento interno de la misma que tienen baja durabilidad ante la acción de ciclos de congelación, son aquellos con un grado de porosidad de moderado a alto, lo que les permite retener y mantener un grado de saturación relativamente alto, cuando se encuentran incorporados ya en el concreto
- ❖ **Efecto entre la pasta y los agregados.** Existe la denominada “Teoría Elástica” que considera un efecto mixto de los agregados sobre la pasta; ya que al congelarse el agua dentro de ellos se deforman elásticamente sin romperse por tener una estructura más resistente que la del cemento y ejercen presión directa sobre la pasta generando tensiones adicionales a las ocasionadas en el cemento independientemente [23].

b) ABRASIÓN.

Se define la resistencia a la abrasión como la habilidad de una superficie de concreto a resistir el desgaste por roce, frotamiento y fricción. Este fenómeno se origina de varias maneras, siendo las más comunes las atribuidas a las condiciones de servicio, como son el, tránsito de peatones y vehículos sobre las veredas y losas, el efecto del viento cargado de partículas sólidas y el desgaste producido por el flujo continuo de agua [23].

En la mayoría de los casos, el desgaste por abrasión no ocasiona problemas estructurales, sin embargo puede traer consecuencias en el comportamiento bajo las condiciones de servicio o indirectamente propiciando el ataque de algún otro enemigo de la durabilidad (agresión química, corrosión, etc.), siendo esto último más evidente en el caso de las estructuras hidráulicas [23].

❑ FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DEL CONCRETO.

La resistencia a la abrasión del hormigón es un fenómeno progresivo. Inicialmente la resistencia está muy relacionada con la resistencia a la compresión en la superficie de desgaste, y la mejor forma de juzgar el desgaste de un piso es en base a esta resistencia. Entonces el factor principal reside en qué tan resistente es desde el punto de vista estructural o mecánico, la superficie expuesta al desgaste. A medida que la pasta se desgasta los agregados finos y gruesos quedan expuestos; la abrasión y los impactos provocarán una degradación adicional relacionada con agregados y la dureza de los agregados [23].

Se ha demostrado en base a ensayos y experiencias en obra que la resistencia a la compresión del hormigón es proporcional a su resistencia a la abrasión. Debido a que la abrasión ocurre en la superficie, es crítico maximizar la resistencia superficial. La resistencia se puede incrementar utilizando mezclas para espolvorear en seco y capas de acabado, técnicas de acabado y procedimientos de curado adecuados. No se debe confiar exclusivamente en los resultados de ensayos de compresión realizados sobre probetas cilíndricas, sino que se debería prestar particular atención a la instalación y acabado de la superficie del piso [23].

Para una mezcla de concreto determinada, la resistencia a la compresión de la superficie mejora:

- ✓ Evitando la segregación de los componentes
- ✓ Eliminando la exudación
- ✓ Estableciendo un adecuado cronograma para el acabado
- ✓ Minimizando la relación agua cemento superficial (prohibiendo agregar agua a la superficie para facilitar el acabado)
- ✓ Utilizando procedimiento de curado adecuados.

Una dosificación económica para lograr mayor resistencia a la compresión incluye el uso de una relación agua cemento mínima y agregados de tamaño adecuado. Se debe considerar la calidad de los agregados en la región de la superficie. Se han desarrollado varias maneras de medir el desgaste o la resistencia a la abrasión, a nivel de laboratorio como a escala natural; pero los resultados son bastante relativos pues ninguna de ellas puede reproducir las condiciones reales del uso de las estructuras, ni dar una medida absoluta en términos numéricos que puede servir para comparar condiciones de uso o concretos similares; por lo tanto el mejor indicador es evaluar principalmente factores como la resistencia en compresión, las características de los agregados, el diseño de mezcla, la técnica constructiva y el curado.

c) REACCIONES QUÍMICAS EN LOS AGREGADOS.

Las reacciones químicas en los agregados, pueden producir desintegración, afectando las estructuras de concreto, algunas de ellas pueden ser beneficiosas, pero otras pueden dañar gravemente el concreto provocando expansiones a nivel interno anormales, generando fisuramiento, ciertos desplazamientos de elementos en estructuras mayores y por ende una pérdida de resistencia. Las reacciones químicas que se presentan en estos agregados están constituidos por: la reacción Álcali-Sílice, la reacción Carbonatos-Álcalis y otras reacciones [23].

❑ REACCIÓN ÁLCALI - SÍLICE.

Se produce con algunos agregados del tipo ópalo, calcedonia, ciertas formas de cuarzo, cristobalita, tridimita, riolita, dacita, andesita o latita, también con vidrio o productos de la vitrificación criptocristalina y vidrios silicios sintéticos, que reaccionan con los hidratos de calcio del cemento ocasionando compuestos expansivos [23].

Tabla 2.7. Componentes silíceos reactivos que pueden estar presentes en los agregados.

Sustancia reactiva	Composición química	Naturaleza física
Ópalo	SiO ₂ · nH ₂ O	Amorfa
Calcedonia	SiO ₂	Microcristalina a criptocristalina; generalmente fibrosa
Ciertas formas de cuarzo	SiO ₂	(a) Microcristalina a criptocristalina; (b) Cristalina, pero intensamente fracturada, bajo tensión y/o llena de inclusiones
Cristobalita	SiO ₂	Cristalina
Tridimita	SiO ₂	Cristalina
Riolita, dacita, latita o andesita	Silíceos, con proporciones menores de Al ₂ O ₃	Vítrea o criptocristalina
Vidrio o productos de la vitrificación criptocristalina	FeO ₂₂ , tierras alcalinas y álcalis	Materiales como la matriz de las rocas volcánicas o los fragmentos de las tufas
Vidrios silíceos sintéticos	Silíceos, con proporciones menores de álcalis, alúmina, otras sustancias o todo lo anterior	Vítrea

Las rocas más perjudiciales en términos de la reacción álcali-sílice (es decir, las rocas que contienen una o más de las sustancias listadas en la tabla anterior) son las siguientes

- ✓ Cherts opalinos
- ✓ Andesitas y tufas
- ✓ Cherts calcedónicos
- ✓ Esquistos silíceos
- ✓ Cherts cuarcíticos
- ✓ Filitas
- ✓ Riolitas y tufas
- ✓ Concreciones opalinas
- ✓ Dacitas y tufas
- ✓ Dolomitas silíceas
- ✓ Cuarzos y cuarcitas fracturados, bajo tensión o llenos de inclusiones
- ✓ Calizas silíceas

Una roca puede ser clasificada, por ejemplo, como una caliza silícea y aún así ser inocua si sus componentes silíceos son diferentes a los indicados en la tabla anterior. Hasta el año 1958 solo se reconocían los agregados mencionados anteriormente. En forma posterior se fueron incorporando otras rocas a la lista de componentes reactivos conocidos, incluyendo las argilitas, las areniscas, las cuarcitas y los esquistos, además del cuarzo fracturado y bajo tensión. Este cuarzo bajo tensión típicamente se caracteriza por extinciones ondulatorias. Varias de estas rocas, incluyendo los gneis graníticos, las subareniscas metamorfoseadas, algunos cuarzos y gravas cuarcíticas, parecen reaccionar lentamente incluso con cementos con alto contenido de álcalis, y su reactividad no fue reconocida hasta que las estructuras tuvieron más de veinte años de edad. Se ha demostrado que algunas rocas y minerales que no participan de la reacción álcali-sílice pero que pueden producir álcalis por deslave, pueden hacer reaccionar a los agregados reactivos.

Se han desarrollado varios métodos químicos, físicos y petrográficos para estimar el riesgo potencial de la reactividad de los agregados, siendo la mejor evaluación la evidencia práctica del empleo de los agregados en concreto sin problemas. Una de las dificultades para evaluar el riesgo consiste en que el desarrollo del fenómeno es lento, por lo que debe existir evidencia estadística de por lo menos 5 años para poder opinar sobre la habilidad práctica de algún agregado en particular sobre el que exista duda.

El producto inicial de la reacción en la superficie será un gel calcio-álcali-sílice no expansivo próximo al C-S-H. Para que la reacción continúe la cantidad de material reactivo debe ser despreciable o mayor que una cantidad pésima, dependiendo de la cantidad de álcali y de la fineza del material reactivo. La formación del producto no expansivo es deseable y sólo ocurrirá si las partículas reactivas son suficientemente numerosas o suficientemente finas [23].

Si la cantidad de sílice es importante con respecto a la superficie de los agregados reactivos, internamente se formará un gel álcali-sílice, en la interfase agregado-pasta, con ilimitado potencial de expansión, el cual absorberá agua y ejercerá fuerzas potencialmente destructivas, que rompe la estructura interna del concreto provocando fisuración y desintegración.

Es importante anotar que además de la reactividad potencial que pueden tener los agregados, deben darse otras condiciones para que se produzca la reacción, como son la calidad particular del agregado en cuestión, alto contenido de álcalis del cemento (superior al 6%), humedad relativa del orden del 80% y en el caso de climas cálidos con temperatura ambiente elevada, la reacción se acelera. Sin embargo se concluye que no es tan fácil que se conjuguen todos los factores a la vez, por lo que este tipo de reacciones no se da con mucha frecuencia.

❖ **Caracterización del daño en el concreto producto de la reacción álcali – sílice.**

Se caracteriza por los siguientes síntomas:

- ✓ Gran dilatación interna y total
- ✓ Grietas superficiales irregulares y muy anchas (hasta 35mm) y de poca profundidad (entre 150 y 400mm)
- ✓ Apariencia apagada y yesosa de las fracturas recientes
- ✓ Exudación gelatinosa con eflorescencias blancuzcas en la superficie y en el interior del concreto, especialmente en los huecos, junto a las fracciones reactivas de ripio y arena las cuales han de estar superficialmente alteradas.

❑ **REACCIÓN CARBONATOS - ÁLCALIS.**

Se produce en algunas rocas carbonatadas que participan en reacciones con los álcalis; en algunos casos estas reacciones producen expansión y fisuración perjudiciales. Las reacciones perjudiciales generalmente se asocian con las calizas arcillosas y dolomíticas que tienen características de textura inusuales, esta reacción se denomina reacción álcali-carbonato. Además de la reacción álcali-carbonato expansiva y perjudicial, también existe otro fenómeno asociado con algunas rocas carbonatadas. Debido a este fenómeno las zonas periféricas de las partículas de agregado que están en contacto con la pasta cementicia cambian y desarrollan bordes prominentes dentro de las partículas, lo cual altera significativamente la pasta que las rodea. La naturaleza de formación de estos bordes está asociada con un cambio en la distribución de sílice y carbonato entre la partícula de agregado y la pasta cementicia que la rodea. Los bordes parecen extenderse hacia el agregado en forma concéntrica, llegando a profundidades mayores a medida que transcurre el tiempo. Al ser atacados con ácido diluido, algunos bordes aparecen en relieve positivo mientras que otros aparecen en relieve negativo; de allí la denominación de bordes positivos y bordes negativos. A diferencia de las reacciones álcali-carbonato que provocan expansión y fisuración perjudiciales, es poco probable que la reacción álcali-carbonato formadora de bordes, constituya una reacción perjudicial en sí misma [23, 25].

❖ ***Caracterización del daño en el concreto producto de la reacción carbonatos – álcalis.***

El hormigón afectado se caracteriza por una red de fisuras irregulares o en malla, generalmente más desarrolladas en las áreas de la estructura en las cuales el hormigón tiene una provisión de humedad constante y renovable, como por ejemplo en las áreas próximas al nivel del agua de las pilas de los puentes, detrás de la parte de los muros de sostenimiento en contacto con el suelo, debajo de las losas de pavimento o en zonas de postes o columnas que podrían funcionar como "pabilos".

Una característica de la reacción álcali-carbonato que la diferencia de la reacción álcali-sílice es la ausencia general de gel de sílice exudando de las fisuras. Otros signos que evidencian la severidad de la reacción son el cierre de las juntas de expansión y el posible aplastamiento del concreto adyacente.

Para identificar la reactividad de los agregados existen una serie de exámenes y ensayos, como por ejemplo; el examen de textura, examen microscópico, examen visual y la aplicación de ciertos métodos en laboratorio como el método del cilindro de roca, reacción álcali-roca carbonatada en prismas de hormigón.

❑ **OTRAS REACCIONES.**

Otras reacciones químicas perjudiciales que involucran a los agregados incluyen la oxidación o hidratación de ciertos óxidos, sulfatos o sulfuros inestables que se produce una vez que los agregados son incorporados al hormigón. Los ejemplos incluyen la hidratación del óxido de magnesio, el óxido de calcio o el sulfato de calcio anhidro, o la oxidación de la pirita. Aparentemente se ha descubierto que los agregados compuestos por dolostona sana que son estables en el hormigón a temperaturas normales se pueden deteriorar debido a la oxidación de pequeñas cantidades de pirita si se los utiliza a temperaturas elevadas. Los agregados pueden estar contaminados con hierro metálico y este contaminante se podría oxidar. Además, hay otras reacciones que se pueden producir debido a la presencia de impurezas orgánicas tales como el humus o los azúcares. Al utilizar los agregados se debería tener en cuenta estas posibilidades e implementar medidas correctivas si fuera necesario. Generalmente realizando una cuidadosa inspección y análisis de los agregados es posible detectar la presencia de este tipo de impurezas reactivas y evitar su uso en el hormigón. Cabe destacar que las reacciones álcali-sílice y álcali-carbonato son más importantes que las demás reacciones descritas [23].

d) AMBIENTE QUÍMICAMENTE AGRESIVO.

El concreto es un material que en general tiene un comportamiento satisfactorio ante diversos ambientes químicamente agresivos. El concepto básico reside en que el concreto es químicamente inalterable al ataque de agentes químicos que se hallan en estado sólido. Para que exista alguna posibilidad de agresión, el agente químico debe estar en solución en una cierta concentración y además tener la opción de ingresar en la estructura de la pasta durante un cierto tiempo, es decir debe haber un cierto flujo de la solución concentrada hacia el interior del concreto y este flujo debe mantenerse un tiempo suficiente para que se produzca la reacción.

Este marco de referencia reduce pues las posibilidades de ataque químico externo al concreto, sin embargo existen agentes que incrementan la posibilidad de deterioro como son: las temperaturas elevadas, velocidades de flujo altas, mucha absorción y permeabilidad, el curado deficiente y los ciclos de humedecimiento y secado. Los ambientes agresivos usuales están constituidos por el aire, agua y suelos contaminados que entran en contacto con las estructuras de concreto [23].

En la Tabla 2.8 se resumen los efectos que producen en el hormigón algunos agentes químicos habituales. La Tabla 2.9 muestra los factores más importantes que afectan la capacidad del concreto para resistir el deterioro.

Tabla 2.8. Efectos producidos en el concreto por agentes químicos.

VELOCIDAD DE ATAQUE A TEMPERATUR A AMBIENTE	ACIDOS INORGAN.	ACIDOS ORGAN.	SOLUCIONES ALCANINAS	SOLUCIONES SALINAS	OTROS
Rápida	Clorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Láctico	–	Cloruro de aluminio	–
Moderada	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de Sodio >20%	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de magnesio Sulfato de calcio	Bromo (gaseoso) Licor de sulfato
Lenta	Carbónico	–	Hidróxido de Sodio 10% a 20%	Cloruro de amonio Cloruro de magnesio Cloruro de sodio	Cloro (gaseoso) Agua de mar Agua blanda
Despreciable	–	Oxálico Tartárico	Hidróxido de Sodio <10% Hipoclorito de sodio Hidróxido de amonio	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de zinc Cromato de Sodio	Amoniaco líquido

Tabla 2.9. Componentes silíceos reactivos que pueden estar presentes en los agregados.

Factores que aceleran o agravan el ataque	Factores que demoran o mitigan el ataque
1.Elevada porosidad debida a i. Elevada absorción de agua ii. Permeabilidad iii. Vacíos	1.Hormigón denso obtenido mediante: i. Correcta dosificación de la mezcla ii. Contenido de agua unitario reducido iii. Mayor contenido de material cementicio iv. Incorporación de aire v. Compactación adecuada vi. Curado efectivo
2. Fisuras y separación debidas a: i. Concentración de tensiones ii. Choque térmico	2.Hormigón denso obtenido mediante: i. Uso de armadura de tracción de tamaño adecuado y correctamente ubicada ii. Inclusión de puzolana para reducir el aumento de temperatura iii. Colocación de materiales adecuados en las juntas de contracción.
3.Lixiviación y penetración de líquidos debido a: i. Flujo de líquidos ii. Formación de charcos iii. Presión hidráulica	3.Diseño estructural: i. Minimizar las áreas de contacto y turbulencia ii. Proveer membranas y sistemas con barreras protectoras para reducir la penetración

Cabe mencionar que la dosificación de la mezcla y el mezclado y procesamiento inicial del hormigón fresco determinaran su homogeneidad y densidad. En caso que los procedimientos de curado son defectuosos se producirán fallas y fisuras. La resistencia a la fisuración depende de la resistencia y capacidad de deformación.

El movimiento de las sustancias perjudiciales que transportan agua aumenta las reacciones que dependen tanto de la cantidad como de la velocidad del flujo.

Los concretos que frecuentemente estarán expuestos a agentes químicos que se sabe producen un rápido deterioro del concreto se deberían proteger con una barrera protectora resistente a dichos agentes químicos [23].

Algunos de los factores que provocan, por su disponibilidad en el medio ambiente, la mayoría de casos de ataque químico al concreto están constituidos por el agua de mar, la sal del agua de mar, los ácidos, la carbonatación, cloruros y sulfatos.

❑ **ATAQUE POR ÁCIDOS.**

En general, el cemento Pórtland no tiene una buena resistencia a los ácidos; no obstante, puede tolerar algunos ácidos débiles, particularmente si la exposición es ocasional.

❖ **¿De dónde provienen los ácidos que atacan al concreto?**

Los productos de la combustión de numerosos combustibles contienen gases sulfurosos que se combinan con la humedad para formar ácido sulfúrico. Además, es posible que se acumulen aguas residuales en condiciones tales que provoquen la formación de ácidos. El agua de drenaje de ciertas minas y ciertas aguas industriales pueden contener o formar ácidos que atacan al concreto. Las turbas, los suelos arcillosos y los esquistos aluminosos pueden contener sulfuro de hierro (pirita) que, al oxidarse, genera ácido sulfúrico. Mediante reacciones adicionales pueden producir sales de sulfato, las cuales generan ataques por sulfatos.

En ocasiones los arroyos de montaña son levemente ácidos debido a la presencia de dióxido de carbono libre en disolución. Generalmente, si el hormigón es de buena calidad y tiene una baja absorción, estas aguas sólo atacan su superficie. Algunas aguas minerales que contienen grandes cantidades ya sea de dióxido de carbono y/o sulfuro de hidrógeno en disolución pueden dañar severamente cualquier hormigón. En el caso del sulfuro de hidrógeno, las bacterias que convierten este compuesto en ácido sulfúrico pueden tener un papel importante [23].

Los ácidos orgánicos que se originan en los silos utilizados para almacenar productos agrícolas o en instalaciones de industrias manufactureras o procesadoras tales como las cervecerías, lecherías, plantas de enlatado y molinos de pulpa de madera, pueden provocar daños superficiales. Esto puede representar una preocupación particularmente importante en el caso de las losas de piso, aún cuando la integridad estructural no resulte afectada.

❖ ¿Qué efectos provocan los ácidos en el concreto?

El deterioro que los ácidos provocan en el concreto es fundamentalmente el resultado de una reacción entre estos compuestos químicos y el hidróxido de calcio del cemento Pórtland hidratado. Cuando se utilizan calizas o agregados dolomíticos, éstos también están sujetos al ataque por ácidos.

En la mayoría de los casos, la reacción química da por resultado la formación de compuestos de calcio solubles en agua que posteriormente son lixiviados por las soluciones acuosas. Los ácidos oxálico y fosfórico son excepciones, ya que las sales de calcio resultantes son insolubles en agua y no pueden ser fácilmente eliminadas de las superficies de concreto. En el caso del ataque por ácido sulfúrico, el deterioro producido es mayor o acelerado, ya que el sulfato de calcio formado afectará al concreto mediante el mecanismo de ataque por sulfatos descrito en forma posterior en este capítulo. Si a través de las fisuras o poros del concreto pueden ingresar ácidos, cloruros u otras soluciones salinas agresivas, es posible que las armaduras de acero sufran corrosión la cual a su vez provocará fisuración y descantillado del concreto [23].

Un concreto denso con una baja relación agua cemento proporciona algún grado de protección contra el ataque por ácidos. Ciertos materiales puzolánicos, y los vapores de sílice en particular, aumentan la resistencia del concreto a los ácidos. Sin embargo, en todos los casos el tiempo de exposición a los ácidos se debería minimizar tanto como sea posible y se debería evitar la inmersión. En estos casos se debería utilizar un sistema de barrera protectora o tratamiento adecuado.

❑ CARBONATACIÓN.

Se produce cuando disminuye la alcalinidad del concreto, debido a la reacción de CO_2 con la fase líquida intersticial saturada de hidróxido cálcico del concreto y de los compuestos hidratados del cemento en equilibrio con dicha fase líquida, formándose Carbonato Cálcico, como se muestra en la Figura 2.9.

Virtualmente todos los elementos constitutivos del cemento Pórtland hidratado son susceptibles de carbonatación.

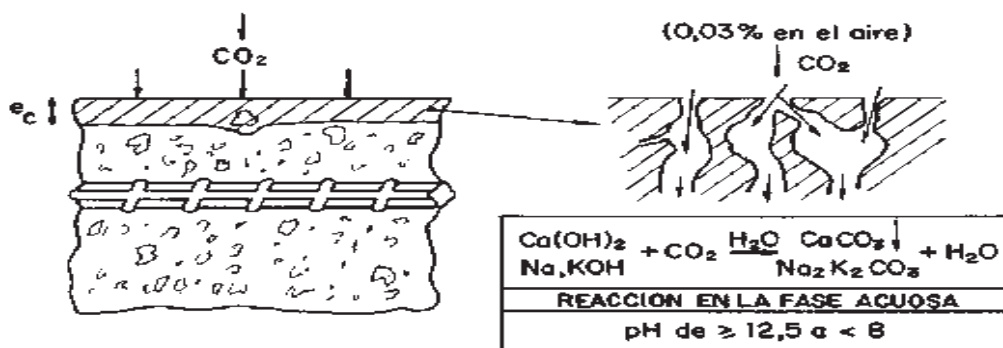


Figura 2.9. Carbonatación del Concreto Reforzado.

La reacción del cemento Pórtland hidratado con el CO₂ del aire es generalmente un proceso lento. Este proceso depende fuertemente de la humedad relativa ambiente, la temperatura, la permeabilidad del hormigón y la concentración de CO₂. Las mayores tasas de carbonatación se producen cuando la humedad relativa se mantiene entre 50 y 75%. Para humedad relativa menor que 25%, el grado de carbonatación que ocurre se considera insignificante. Si la humedad relativa es mayor que 75%, la humedad presente en los poros restringe la penetración de CO₂. Los hormigones relativamente permeables sufren una carbonatación más rápida y extensa que los concretos densos, bien compactados y curados.

Cuando todo el Ca (OH)₂, KOH y NaOH presentes en los poros ha sido carbonatado, el pH empieza a decrecer, hasta alcanzar valores de pH menores de 9, y en el concreto reforzado con acero destruye la capa pasivante del acero y se inicia la corrosión generalizada, tal y como si estuviera simplemente expuesto a la atmósfera sin ninguna protección, pero con el agravante de que la humedad permanece en el interior del concreto y por tanto en contacto con el refuerzo mucho más tiempo que se ésta estuviera libremente expuesta al aire, ya que el concreto absorbe humedad muy rápidamente, pero se seca muy despacio [23].

❑ **EXPOSICIÓN AL AGUA DE MAR.**

La concentración total de sales del agua de mar difiere en las distintas partes del mundo; en algunas regiones el agua de mar está menos diluida. Sin embargo, los elementos constitutivos del agua del mar son básicamente constantes. En las regiones frías y templadas la concentración es menor que en las regiones cálidas; la concentración es particularmente elevada en las regiones costeras poco profundas con tasas de evaporación diaria excesivas. Cuando se construyen estructuras de concreto en áreas costeras reclamadas al mar, si las fundaciones se encuentran por debajo del nivel del agua salobre, la succión capilar y la evaporación pueden provocar súper saturación y cristalización en el concreto por encima del nivel del terreno, lo cual provocaría tanto un ataque químico sobre el concreto (sulfato) como la agravación de la corrosión del acero (cloruros). En las regiones de clima tropical la combinación de estos efectos perjudiciales puede provocar graves defectos en el concreto en apenas unos pocos años [23].

❖ **¿Qué efectos del agua de mar en el concreto?**

La reacción del concreto maduro con los iones sulfato del agua del mar es similar a la que ocurre con los iones sulfato presentes en el agua dulce o lixiviados de los suelos, pero sus efectos son diferentes. La concentración de iones sulfato en el agua de mar puede aumentar a niveles elevados debido a la acción capilar y evaporación bajo condiciones climáticas extremas. Sin embargo, la presencia de iones cloruro altera la magnitud y la naturaleza de la reacción química, de manera que un cemento con un determinado contenido de C₃A calculado produce menos expansión que la que se anticiparía para el mismo cemento expuesto a agua dulce con el mismo contenido de iones sulfato.

Como se apreció, éste tipo de ataque químico comprende el ataque por cloruros y sulfatos, compuestos que también se encuentran en otros lugares por separado no tan solo en el agua de mar. A continuación se analizan en forma independiente.

❑ **CLORUROS.**

Los iones cloruro llegan al concreto o bien por que se añaden con sus componentes (aditivos, agua,...) durante el amasado, o por que penetran desde el exterior a través de la red de poros. Esta situación es la que se da en ambientes marinos o cuando se utilizan sales para el deshielo de carreteras o puentes, en climas fríos.

Estos iones cloruro tienen una acción insignificante sobre el concreto desde el punto de vista de la agresión química directa, pero erradamente se le considera en muchas oportunidades causantes del deterioro que es producido por otros agentes [23, 26].

En este sentido hay que tener perfectamente claro que el concepto de que los cloruros no tiene acción perjudicial directa sobre el concreto, sino a través de su participación en el mecanismo de la corrosión de metales embebidos en el concreto, produciéndose compuestos de hierro que al expandirse rompen la estructura de la pasta y agregados. El no entender a cabalidad este fenómeno lleva muchas veces a confusión pues con frecuencia se descartan materiales con cloruros para su empleo en concreto simple sin ser necesario

Estos iones se disuelven en el agua que contiene los poros y avanzan hacia el interior por difusión u otros mecanismos de transporte, ocasionando ataques localizados que frecuentemente se transforman en picaduras que pueden reducir drásticamente la sección del trabajo del acero, en espacios de tiempo relativamente cortos.

Para finalizar, cabe recalcar que una vez que el cloruro alcanza el nivel de la armadura, la corrosión se inicia hasta que se alcance una concentración crítica, que por otro lado no puede tomar un valor constante, ya que depende de varios factores como: tipo de cemento (finura, contenido de yeso, contenido de aluminato tricálcico, etc.), relación agua/cemento, curado, compactación, contenido de agua en los poros, disponibilidad de oxígeno, etc. Esta multi-dependencia hace que no se pueda definir un valor único de Cl^- para iniciar la corrosión.

❑ **ATAQUE QUÍMICO POR SULFATOS PROVENIENTES DE FUENTES EXTERNAS AL CONCRETO.**

Una de las formas más frecuentes de ataque químico al concreto endurecido es la acción de los sulfatos. Los sulfatos son sales que afectan la durabilidad del concreto siempre y cuando estén en solución, ya que estos en condición anhidra no producen ningún ataque, por lo general consisten en sulfatos de Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio. Muchas de estas sustancias se encuentran en forma de minerales, a continuación se da un listado de estos nombres y su composición general [23]:

✓ Anhidrita CaSO_4	✓ Kierserita $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
✓ Tenardita Na_2SO_4	✓ Glauberita $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$
✓ Basanita $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	✓ Epsomita $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
✓ Mirabilita $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	✓ Langbeinita $\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$
✓ Yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	✓ Taumasita $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)(\text{OH})_1 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
✓ Arcanita K_2SO_4	

El ión sulfato se encuentra en el suelo. Normalmente en zonas áridas, se pueden presentar en las arenas como material de aporte y en rocas carbonatadas de origen sedimentario, y pese a que pueden no estar en muy alta concentración, si se producen ciclos de humedecimiento y secado sobre el concreto, la concentración puede incrementarse y causar deterioro. Además se encuentra en mayor o menor proporción en todas las aguas libres subterráneas y en solución en agua de lluvia. El agua que se utiliza en las torres de enfriamiento de hormigón también puede ser una potencial fuente de ataque por sulfatos debido a la evaporación, particularmente si estos sistemas utilizan cantidades relativamente pequeñas de agua de reemplazo. También se encuentra en aguas contaminadas por desechos industriales, como industrias asociadas con la fabricación de químicos, baterías, aluminio, escorias del procesamiento del hierro, cenizas, etc. El agua de mar y los suelos costeros embebidos en agua de mar constituyen un tipo de exposición particular, que se explico con anterioridad.

❖ ¿Qué componentes internos del concreto sean quizás inestables a la presencia de sulfatos?

Como se mencionó con anterioridad, para la fabricación del concreto se realiza una mezcla de agua, áridos finos o grueso (en el caso del motero árido fino), agua, aire, posibles aditivos, y un material conglomerante, que comúnmente corresponde al cemento. Este cemento tiene un compuesto principal, que es el clinker, el cual se obtiene de un proceso detallado anteriormente, el cual es triturado finamente y además se le incluyen adiciones de yeso para formar el cemento.

El análisis químico de un cemento se expresa por sus óxidos, estos óxidos no se hallan libres sino combinados. Los cuatro óxidos principales forman los compuestos que se aprecian en la siguiente tabla, junto a algunas de sus características, donde se aprecia que el compuesto mineralógico del cemento Pórtland, que es mas sensible a la acción de los sulfatos es el Aluminato tricálcico C₃A.

Tabla 2.10. Compuestos mineralógicos del Cemento Portland.

	Característica resistencia mecánica	Hidratación		Observaciones
		Velocidad	Calor	
C₃S: Silicato-tricálcico	Desarrolla resistencias mecánicas a edades tempranas	Rápida	Alto	Principal responsable resistencias mecánicas
C₂S: Silicato-bicálcico	Desarrolla resistencias mecánicas a edades últimas	Lenta	Bajo	Resistencias mecánicas a largo plazo
C₃A: Aluminato-tricálcico	Genera gran calor de hidratación y participa de resistencias mecánicas a edades tempranas	Muy rápida	Muy alto	Responsable fraguado rápido. Sensible a sulfatos
C₄AF: Ferroaluminato-tetracálcico	No desarrolla resistencias mecánicas	Lenta	Moderado	No aporta resistencia mecánica

❖ **Mecanismo de reacción.**

El sulfato en solución proveniente del medio exterior, ingresa al concreto por sus poros y microfisuras que pueda tener y se difunde en el concreto a través de ellos, poniéndose en contacto con el Aluminato tricálcico (C₃A), hidratado, uno de los primeros compuestos formado durante la hidratación del clinker contenido en todos los tipos de cemento y con el ión de calcio liberado por los procesos de hidratación del clinker Pórtland, generando compuestos con acciones perjudiciales para el concreto. Todos los sulfatos causan el deterioro de concreto de cemento Pórtland pero el mecanismo y grado de ataque depende, entre otras cosas, de la clase de sulfato presente.

❖ **La severidad del ataque de sulfatos al concreto depende de lo siguiente:**

- ✓ Tipo de sulfatos. Los sulfatos de magnesio y amonio son los más dañinos al concreto.
- ✓ Concentración de sulfatos. La presencia de sulfatos más solubles es más perjudicial al concreto. Además, la mayoría de las recomendaciones toman en cuenta la cantidad de sulfatos presente al clasificar la severidad del ataque.
- ✓ Si la solución del sulfato está estancada o fluyendo. La severidad del ataque se incrementa en el caso de las aguas que fluyen. Así, la naturaleza y el contacto entre el sulfato y el concreto son importantes. El ataque más intensivo tiene lugar en el concreto que está expuesto a ciclos de mojado y secado que en el concreto completa y continuamente sumergido en la solución.
- ✓ Presión. La fuerza del ataque aumenta debido a que las presiones tienden a forzar la solución del sulfato en el concreto.
- ✓ Temperatura. Al igual que sucede con cualquier reacción química, la velocidad de la reacción se incrementa con la temperatura.
- ✓ Presencia de otros iones en la solución del sulfato. Afectan la potencia del ataque. Un ejemplo típico es el agua de mar, que contiene sulfatos y cloruros. Generalmente, la presencia de iones de cloruro altera la extensión y la naturaleza de la reacción química, produciendo menor expansión en el concreto debido a los sulfatos en el agua de mar.

❖ **Caracterización del ataque por sulfatos.**

El ataque por sulfatos se caracteriza por:

- ✓ Cambio de coloración en la superficie, ya que el cemento va perdiendo su carácter conglomerante quedando por consiguiente los áridos libres de la unión que les proporciona la pasta. Inicialmente suele presentar aspecto poroso, cambio de color, eflorescencias o manchas.
- ✓ Aumento de volumen, dando por consiguiente, a una fuerte expansión degradando el conglomerante y dejando solo al árido.
- ✓ La aparición de fisuras entrecruzadas cuyo espesor va aumentando dando como resultado una fisuración irregular, causado por las tensiones que generan los productos de expansión. Esta aparición de fisuras facilita además la penetración de más sustancias nocivas a medida que progresa la degradación

- ✓ Simultáneamente a la fisuración se va generando una delaminación con un curvado de las capas más externas del concreto.
- ✓ Pérdida del pegado entre la pasta de cemento y los agregados.
- ✓ Degradación de concreto en que la matriz cementicia, se transforma en un material blando y sin cohesión.
- ✓ Desintegración de la masa de concreto

❖ **Factores que afectan la resistencia a sulfatos en el concreto.**

El ataque de sulfatos al concreto tiene lugar cuando la solución de sulfato penetra en el concreto y reacciona químicamente con sus constituyentes, principalmente con la matriz de cemento. Así pues, los factores que afectan la resistencia a sulfatos del concreto no son solamente aquellos que influyen en la reacción química con la matriz de cemento, sino también aquellos que influyen en la permeabilidad y la calidad total del concreto.

✓ **Cementos.**

La relación entre la resistencia a sulfatos del cemento Pórtland y su contenido de aluminato tricálcico (C₃A) está bien establecida. El cemento Pórtland que contiene menos de 5% de C₃A ha sido clasificado como un resistente a sulfatos, y se usa como el criterio de especificación de muchos reglamentos y normas para el cemento en todo el mundo, ver tabla mostrada en apartado anterior. Los estudios han demostrado que los cementos que contienen potencialmente menos hidróxido de calcio en la hidratación se comportan bien en exposición de sulfatos.

✓ **Contenido de cemento del concreto.**

Afecta significativamente su resistencia a sulfatos, sin importar la composición del cemento. La velocidad de deterioro disminuye al incrementarse el contenido de cemento, aún en concretos hechos con cemento Pórtland ordinario. En otras palabras, para producir concreto resistente a sulfatos, la utilización de un cemento resistente a sulfatos debe combinarse con el uso de un contenido de cemento que no esté por debajo de un mínimo. Esta conclusión se refleja en las recomendaciones para producir concreto resistente a sulfatos.

✓ **Relación agua-cemento.**

La permeabilidad del concreto es un factor significativo que influye en su resistencia al ataque de sulfatos. Cuando se tiene materiales de buena calidad, proporcionamiento satisfactorio y una buena práctica, la permeabilidad del concreto es una función directa de su relación agua-cemento y del tiempo de curado. En otras palabras, siendo todos los otros factores iguales, la resistencia a sulfatos del concreto se incrementa al disminuir su relación agua-cemento. Este efecto de la relación agua/cemento se muestra en la siguiente figura, basada en los datos obtenidos de pruebas de exposición.

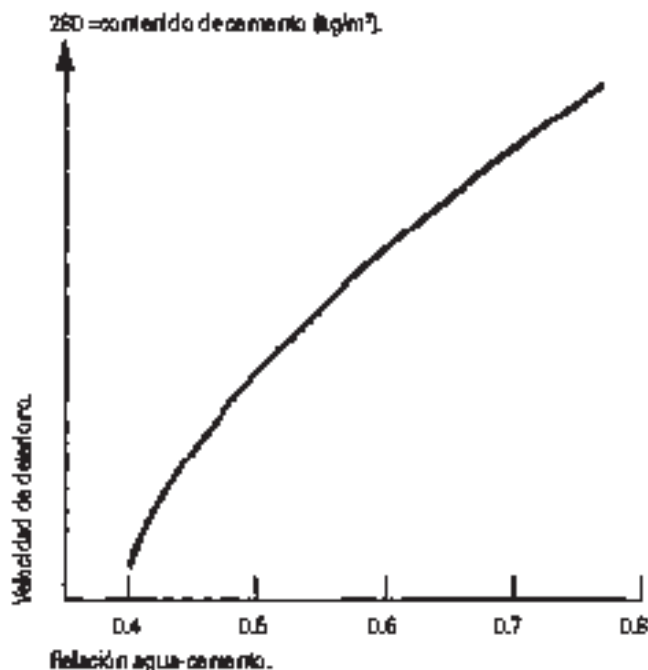


Figura 2.10. Efecto de la relación agua cemento sobre la velocidad de deterioro del concreto expuesto a sales que contienen sulfatos.

✓ **Aditivos.**

Hay muchos tipos de aditivos disponibles para su incorporación en el concreto para mejorar ciertas propiedades, para economizar o para ambas cosas. Generalmente, el efecto de los aditivos en las propiedades del concreto depende no sólo de su formulación y su interacción con el cemento, sino también de las variaciones o ajustes que provocan en las proporciones de la mezcla de concreto. De este modo, los aditivos que provocan una reducción en la relación agua-cemento y/o incrementan la trabajabilidad, pueden aumentar la resistencia del concreto a sulfatos, a condición de que no se usen para reducir su contenido de cemento. Está bien establecido que los aditivos que contienen cloruro de calcio afectan adversamente la resistencia del concreto a sulfatos.

✓ **Práctica de construcción.**

La colocación, compactación y curado del concreto son factores importantes para producir concreto de baja permeabilidad. Agregar más agua en el sitio durante la colocación del concreto para restablecer el revenimiento o para ayudar al acabado final, perjudicará la resistencia del concreto a sulfatos. Se requiere de compactación adecuada y curado apropiado para producir concreto denso con capilares discontinuos (baja permeabilidad). Dar un acabado al concreto para proporcionar una superficie densa, libre de agujeros y defectos, puede mejorar la resistencia a sulfatos.

2.2.4 ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN LAS VÍAS TERRESTRES

Sin lugar a duda, como se ha dicho con anterioridad, el concreto hoy en día es el material que más se utiliza en la actualidad; su uso esta inmiscuido en todas las ramas de la construcción y en la infraestructura civil en la rama de las vías terrestres es donde se acentúa más fuertemente por los grandes volúmenes utilizados y por la importancia de las obras para el desarrollo de un país. Dentro de las estructuras con mayor importancia, y sobre todo en las que se espera tenga un futuro prometedor a corto plazo la aplicación de nuestro material desarrollado están: los puentes, los pavimentos rígidos y los pisos industriales, que en la actualidad se están poniendo más de moda por ejemplo en la construcción de patios para maniobras de contenedores en especial en zonas portuarias.

2.2.4.1 PISOS INDUSTRIALES

Un piso de concreto sobre un terreno es un elemento común de construcción con concreto. Puede ser una losa muy simple o muy compleja. La Tabla 2.11 describe nueve clases de pisos propuestos por el Instituto Americano del Concreto. Sin importar cuán básico o elevado sea el grado de ingeniería con que se construya un piso, el método de construcción es similar: se prepara el terreno y se funde el concreto. Por supuesto, existen muchas otras consideraciones tales como el drenaje y el diseño del espesor. La Tabla 2.11 también muestra algunas de las consideraciones especiales y técnicas de acabado que son apropiadas para cada clase de piso [27].



Figura 2.11 a.



Figura 2.11 b.

Figura 2.11 a y b. Pisos industriales utilizados en la construcción de terminales para maniobras de contenedores.

Tabla 2.11. Clasificación de pisos (Adaptado del ACI 302 IR, Guía para la construcción de pisos y losas de concreto [27].

CLASE	TIPO DE TRÁNSITO ANTICIPADO	USO	CONSIDERACIONES ESPECIALES	ACABADO FINAL
1. Una sola capa	Superficie expuesta - Tránsito peatonal	Oficinas, iglesias, comercial, institucional, residencial de unidades múltiples, decorativo.	Acabado uniforme, agregado antideslizante en áreas específicas, curado. Agregado mineral coloreado, pigmento de color o agregado expuesto, patrones estampados o incrustados, disposición de juntas artísticas, curado.	Acabado normal con llana de acero, acabado antideslizante en donde se requiera.
2. Una sola capa	Superficie cubierta - Tránsito peatonal	Oficinas, iglesias, comercial, gimnasios, residencial de unidades múltiples, institucional con recubrimientos.	Losas planas y niveladas apropiadas para recubrimientos aplicados, curado. Juntas de coordinación con recubrimientos aplicados.	Acabado ligero con llana de acero.
3. Dos capas.	Superficie expuesta o cubierta - Tránsito peatonal	Coronamiento no adherido y adherido sobre una losa base para edificios comerciales o no industriales en donde no lo dicte el tipo de construcción o programación.	Losa base – superficie buena, uniforme, a nivel, curado. Coronamiento no adherido – rompedor de adherencia en la losa base, espesor mínimo de 75mm, reforzado, curado. Coronamiento adherido – agregado de tamaño apropiado, espesor mínimo de 19mm, curado	Losa base – acabado allanado debajo de un coronamiento no adherido; superficie limpia, texturizada debajo de un coronamiento adherido. Coronamiento – para superficie expuesta, acabado normal con llana de acero; para superficie cubierta, acabado ligero con llana de acero.
4. Una sola capa	Superficie expuesta o cubierta – tránsito peatonal y vehicular ligero	Institucional o comercial	Losa nivelada y plana apropiada para recubrimientos aplicados, agregados antideslizantes para áreas específicas, curado. Coordine las juntas con los recubrimientos aplicados.	Acabado normal con llana de acero.
5. Una sola capa	Superficie expuesta – tránsito vehicular industrial (llantas neumáticas y llantas sólidas moderadamente blandas).	Pisos industriales para manufactura, procesamiento y almacenamiento.	Subrasante buena y uniforme, disposición de juntas, resistencia a la abrasión, curado.	Acabado duro con llana de acero.
6. Una sola capa	Superficie expuesta – tránsito vehicular industrial de trabajo pesado (ruedas duras y cargas pesadas sobre ruedas).	Pisos industriales, sometidos a tránsito pesado; puede estar sometido a cargas de impacto.	Subrasante buena y uniforme, disposición de juntas, resistencia a la abrasión, curado.	Endurecedor de superficie de agregado especial metálico o mineral, allanado repetido con acero duro.
7. Dos capas	Superficie expuesta – tránsito vehicular industrial de trabajo pesado (ruedas duras y cargas pesadas sobre ruedas).	Pisos de dos capas adheridas sometidas a tránsito pesado y a impacto.	Losa base – subrasante buena y uniforme, refuerzo, disposición de juntas, superficie nivelada, curado. Coronamiento – compuesto de agregado bien graduado, todo mineral o todo metálico. Espesor mínimo de 19mm. Endurecedor de superficie de agregado metálico o mineral aplicado a coronamientos simples para darle firmeza, curado.	Superficie de losa limpia y de base texturizada para un coronamiento adherido subsecuente. Las llanas mecánicas especiales para coronamiento son opcionales, acabado duro, bien allanado.
8. Dos capas	Como en las clases 4, 5 y 6	Coronamientos no adheridos sobre pisos nuevos o viejos en donde lo dicte la secuencia de construcción o el programa.	Rompedor de adherencia en la losa base, espesor mínimo de 100mm, resistencia a la abrasión, curado.	Como en las clases 4, 5 o 6
9. Capa simple o coronamiento	Superficie expuesta – se requiere tolerancia de superficie superplana o crítica. Materiales especial, vehículos de manejo o robóticas que requieren tolerancias específicas.	Almacenes de bahías altas y pasillos angostos; estudios de televisión, pistas de hielo.	Requisitos variables de la calidad del concreto. No pueden usarse endurecedores aplicados por espolvoreado, amenos que se haga una aplicación especial y se tenga mucho cuidado. FF50 a FF125 (piso superplano), curado.	Siga estrictamente las técnicas de acabado, tal y como esta indicado para los pisos superplanos.

RENTABILIDAD DE LOS PISOS DE MAYOR ESPESOR

Además de las deficiencias comunes de un curado inadecuado, juntas muy espaciadas una de otra, y mezclas demasiadas aguadas, el problema más descuidado, pero también más fundamental, ha sido el espesor de la losa [27]. Incrementar el espesor de la losa es una de las maneras más fáciles y efectivas de mejorar el comportamiento de un piso. La resistencia a la flexión se incrementa con el cuadrado del espesor de un elemento. Por ejemplo, compare una viga que sea de una unidad con otra que sea 1.5 veces más gruesa:

1 al cuadrado es 1

1.5 al cuadrado es 2.25

Por lo tanto, la resistencia a la flexión de la viga más gruesa sería de 2.25/1, o 225% de la viga más delgada. Las losas siguen el mismo tipo de relación. Para ilustrar, compare una losa no reforzada sobre terreno para un piso de 100 mm con una que tiene 125 mm de espesor. Para hacer la ilustración más genérica, la comparación puede estar basada en porcentajes. Sea el costo del concreto en una losa de 100 mm el 100%. El costo del material adicional en la losa de 125 mm es de 25% más, o un total de 125%. (El costo real en el sitio de la losa más gruesa, incluyendo la mano de obra, sería de un porcentaje un poco menor, puesto que los costos de la preparación de la subrasante y el acabado de la superficie serían los mismos) [27].

Para compara las resistencias a la flexión de la losa de 125 mm con la losa de 100 mm, considera la relación 1252 a 1002, que es igual a 15,625/10,000, o 1,56. En este ejemplo, para un incremento del 25% en el costo del material, corresponde un incremento del 56% en la capacidad para soportar carga. Similarmente, para una losa de 100 mm que se incrementa en el 50% de su espesor, corresponde un incremento del 125% en la capacidad para soportar carga.

Por cada dólar que se gasta para producir un piso de más espesor, corresponde un valor más del doble en la capacidad real para soportar carga.

La Tabla 2.12 muestra el mejoramiento relativo en la capacidad para soportar carga como resultado de hacer más gruesa la losa. Una relación similar se aplica cuando una losa de cualquier espesor se incrementa en su espesor.

Tabla 2.12. Espesor de la losa y capacidad de carga [27].

Espesor de la losa	Espesor relativo comparado con uno de 100 mm (4 pulg.)	Resistencia relativa comparada con 100 mm (4 pulg.)
mm (in)	losa	losa
100 (4)	100	100
125 (5)	125	156
150 (6)	150	225
175 (7)	175	306
200 (8)	200	400

CONCRETO PARA PISOS

La función común compartida para la mayoría de los tipos de pisos de concreto consiste en proporcionar soporte para las cargas aplicadas. Incluyendo personas, vehículos y mercancías. Además, con frecuencia, el concreto sirve como superficie de desgaste. Es necesaria concreto de buena calidad para soportar cargas y resistir desgaste [27]. Los ingredientes, la manera en que se combinan, y la manera en que se elabora el concreto, todo esto afecta la calidad y el desempeño resultante del piso. A continuación se hará un breve recorrido de los aspectos fundamentales para la construcción de un buen piso de concreto:

- a) Tipo y contenido de cemento; si no hay necesidades especiales de construcción regularmente se utiliza cemento Pórtland. A veces, las necesidades de construcción o el medio ambiente de servicio dictan que se use un tipo especial de cemento.
- b) Materiales cementantes suplementarios; además de cemento Pórtland, hay otros aglutinantes disponibles para usarse en el concreto. Las mezclas de concreto para pisos se hacen regularmente con cemento Pórtland más un cementante suplementario (MCS). Los MCS comunes incluyen ceniza volante, humo de sílice, arcilla calcinada y escoria.
- c) Agregado Grueso; el agregado grueso debe satisfacer los requisitos de la ASTM C33.
- d) Agregado Fino; el agregado fino está compuesto de arena natural, arena manufacturada, o combinación de las dos. Las normas ASTM C33 y C330 proporcionan granulometrías que pueden ser usadas.
- e) Aditivos químicos; estos aditivos ofrecen varias ventajas en la construcción con concreto que incluyen el mejoramiento de las propiedades de este y de los procedimientos de construcción. En América del Norte, los aditivos deben ser conforme a la ASTM C 494 y C 1017.
- f) Fibras; estas pueden mejorar la resistencia a la flexión, la ductilidad, la firmeza, la resistencia al impacto, la fatiga, la resistencia al desgaste del concreto y en su caso ayudan a reducir el agrietamiento por contracción.

PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO ENDURECIDO

Las propiedades del concreto fresco afectan tanto la manera en que el concreto es manejado como las características del concreto endurecido. Para pisos, el concreto endurecido debe ser capaz de soportar cargas y resistir el desgaste [27]. Tanto para soportar carga como la resistencia al desgaste se ven afectadas por la resistencia a la compresión del concreto. Dentro de estas propiedades se encuentra al asentamiento, contenido de aire, exudación, contracción, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión.

Resistencia a la Compresión

Para aplicaciones en oficinas, residenciales y comerciales, se requiere una resistencia mínima de 21 MPa a 28 días. Se han usado exitosamente resistencias menores (menos de 20 MPa) en aplicaciones que no necesitan altos grados de resistencias al desgaste. Se recomienda una resistencia mínima a los 28 días de 28 MPa para la mayor parte de usos de pisos institucionales/comerciales e industriales de trabajo ligero. Para pisos industriales sometidos a tránsito pesado, se recomienda una resistencia a 28 días de 31 MPa, o más alta. Una resistencia más baja puede ser adecuada para soportar las cargas en el piso, pero puede ser inadecuada para una resistencia satisfactoria al desgaste en ambientes altamente abrasivos. También es aconsejable requerir una resistencia de 12.5 MPa antes de permitir el tránsito de construcción de peso ligero en la losa [27].

La resistencia al desgaste de las superficies de pisos de concreto, en lo que concierne al tránsito de rozamiento del equipo con llantas sólidas de hule, llantas duras de poliuretano, y de incrustaciones de acero, se ve aumentado por la densificación por medio del allanado duro durante el acabado del piso. La resistencia al desgaste es más importante en los 3 mm superiores del piso, y está muy influida por los métodos de construcción empleados, especialmente los métodos de acabado.

La resistencia requerida no debe ser más que la necesaria para satisfacer los requisitos de resistencia y resistencia al desgaste de la losa. Sin embargo, resistencias mayores que las mínimas indicadas anteriormente pueden permitir una reducción del espesor de la losa y proporcionar una resistencia al desgaste mejorada.



Figura 2.12 a.

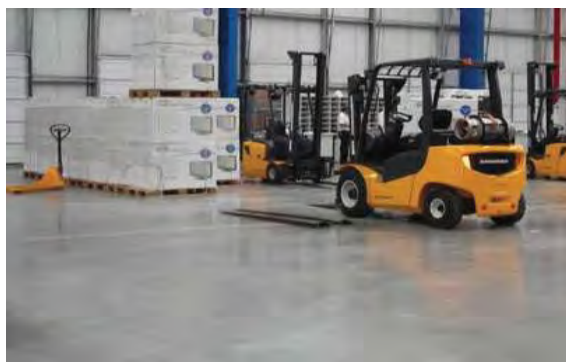


Figura 2.12 b.

Figura 2.12 a y b. Pisos industriales para almacenamiento y almacenaje de carga con movimiento de vehículos y personas.

Resistencia a la Flexión

Cuando se aplica una carga a un piso sobre terreno, ella produce esfuerzos en la losa de concreto. Los esfuerzos de compresión causados por la carga sobre la losa son comúnmente mucho más bajos que la resistencia a compresión. Más importante que el esfuerzo a compresión es el esfuerzo a flexión causado por la carga. La flexión es crítica puesto que coloca una porción del concreto en tensión y la resistencia a la tensión del concreto es una pequeña fracción de la resistencia a la compresión. Las mayorías de las losas que se comportan así lo hacen como resultado de una falla en la flexión. Consecuentemente, el esfuerzo de flexión y la resistencia a la flexión (módulo de rotura) del concreto se usan en el diseño de pisos para determinar el espesor de la losa [27].

La resistencia a la flexión está determinada por pruebas de módulo de rotura MR de acuerdo a la ASTM C 78. Existen algunas dificultades asociadas a esta prueba, los especímenes de prueba son grandes, de modo que en alguna medida son difíciles de manejar. La medición de la resistencia a la flexión es bastante sensible a las variaciones en los especímenes y procedimientos de prueba, más que las pruebas a compresión. Estos cilindros para determinar la resistencia a compresión son más fáciles de mover y hacer además de que están menos propensos a sufrir daño que los especímenes de resistencia a la flexión. Por esta razón, se ha desarrollado una relación entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión por medio de pruebas de laboratorio. Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión pueden usarse después para estimar la resistencia a la flexión por medio de la fórmula:

$$MR = k (f_c)^{1/2}$$

Mr = Módulo de rotura o resistencia a la flexión, en MPa o psi

fc = Resistencia a la compresión en MPa o psi

k (métrico) = Constante, usualmente entre 0.7 (para agregado redondeado) o 0.8 (para agregado triturado)

k (pulg-libra) = Constante, usualmente de 9 a 11

Tabla 2.13. Relación aproximada entre la resistencia a la compresión y a la flexión del concreto (métrico) [27].

Resistencia a la compresión f_c MPa	Resistencia a la Flexión, MR, MPa
28	3.9
31	4.1
34	4.3
38	4.6
41	4.7
45	5.0
48	5.1

JUNTAS, REFUERZO Y CONTROL DE GRIETAS

Las grietas en pisos de concreto con frecuencia son causadas por cambios de volumen restringidos que crean esfuerzos de tensión. Cuando los esfuerzos de tensión exceden la resistencia a la tensión del concreto, éste se agrieta. Existe la posibilidad de agrietamiento aleatorio debido a que son inevitables la contracción por enfriamiento y la contracción por secado, propiedades inherentes del concreto endurecido [27].

Debe controlarse el agrietamiento aleatorio del concreto, y existen muchas maneras efectivas de hacerlo. Una consideración fundamental es minimizar los cambios de volumen del concreto endurecido. Otras maneras incluyen juntas, uso de varillas de refuerzo o malla de alambre electrosoldado. Las fibras pueden ayudar a controlar las grietas por contracción plástica. También puede usarse postensado o concreto de contracción compensada, aunque estos métodos agregan un valor extra al costo del piso y requieren contratistas con amplia experiencia y equipo y materiales especializados.

Las juntas permiten que el concreto se mueva ligeramente, reduciendo así la restricción y alineando los esfuerzos que causan el agrietamiento aleatorio. Aunque las juntas son estéticamente más agradables en su apariencia que las grietas aleatorias, ellas pueden requerir rellenado y mantenimiento posterior para controlar el astillamiento en sus bordes.

El diseñador del piso debe preparar un plan de juntas o de disposición de juntas para todos los trabajos de losas sobre rasante. El establecer el tipo, número y localización de juntas del piso permite mejores estimaciones de costos y menos errores durante la construcción.

Clasificación de juntas en pisos de concreto según su función:

- ✓ Juntas de aislamiento
- ✓ Juntas de contracción
- ✓ Juntas de construcción

PISOS ESPECIALES

A lo largo de esta breve introducción se ha discutido pisos de concreto sobre terreno para usarse en muchas aplicaciones comunes [27]. Además, el concreto es buena elección para pisos que tienen necesidades técnicas o estéticas especiales, tales como:

Pisos de Concreto de Cemento Blanco

Uno de los principales usos de un piso de concreto con cemento blanco es para mejorar la iluminación. Aunque la visibilidad puede mejorarse incrementando el número o la intensidad de las unidades de luz, cuesta mucho dinero instalar y compara luces extra o más potentes. Las superficies coloreadas claras son benéficas, ya que proporcionan reflectancia máxima de la luz. En segundo lugar, ellas reducen las sombras de maquinaria grande, mercancías apiladas y estantes altos [27].

Los pisos de concreto de cemento blanco reflejan la luz significativamente mejor que los pisos de concreto gris. Inclusive después de servicio continuado, hay poco cambio en la capacidad para reflejar la luz con una limpieza apropiada.

Pisos de Calefacción Radiante

Se ha usado el calentamiento de pisos por medio de radiación exitosamente por más de 50 años. El concepto es simple: se hace circular agua caliente a través de una tubería que está enterrada en el piso manteniendo el calor en donde es más necesario, los ocupantes del edificio entonces se encuentran confortables poniendo el termostato en un punto bajo, lo que puede producir el costo del combustible hasta 40% [27].

Los beneficios más grandes del calor radiante son el confort y la eficiencia. Estas ventajas son apropiadas tanto en la construcción residencial como en aplicaciones comerciales, particularmente cuando hay que calentar espacios con grandes volúmenes de aire.

El calor radiante calienta objetos, no solamente el aire. La calidad del aire mejora ya que no hay aire caliente soplando polvo y alérgenos a través del edificio. Además escapa menos aire cada vez que se abren las ventanas o las puertas.

Con calefacción radiante de piso, el calor puede distribuirse en zonas, o colocarse exactamente donde se requiere y se necesita. Por ejemplo, en grandes edificios, es posible calentar diferentes áreas a diferentes temperaturas, según se requiera por las actividades y ocupaciones de esa área.

El concreto está idealmente adaptado a los beneficios de la calefacción radiante del piso. Las aplicaciones de losas sobre terreno proporcionan un método fácil de instalación de tuberías [27].

Las losas de concreto calentadas rápidamente regresan el calor al salón después de un flujo de aire frío. Las puertas abiertas, las grandes ventanas e inclusive grandes cambios de aire no afectan significativamente la temperatura del edificio. El calor es retenido en el concreto, de modo que el salón permanece más caliente durante más tiempo sin fluctuaciones extremas de temperatura.

La clave en el diseño de un sistema de piso radiante para una losa de concreto, es la exactitud en los cálculos de la pérdida de calor. La losa de concreto actúa como un radiador gigante para calentar el edificio, de modo que es importante reducir las pérdidas de calor usando aislamiento debajo de la losa.

Pisos de Congeladores y Pistas de Hielo

Los pisos que van a estar expuestos a bajas temperaturas durante el servicio, tales como congeladores, salones fríos y pistas de hielo, requieren algunas consideraciones especiales. El diseño de la mezcla de concreto y la colocación son estándar, ya que las losas se construyen a temperaturas normales. Sin embargo, existen al menos tres deferencias notables respecto a los pisos estándar [27].

- ✓ Preparación de la capa de apoyo y aislamiento
- ✓ Construcción térmica
- ✓ Dificultad potencial en las reparaciones

Los salones fríos pueden transmitir el frío muy adentro del terreno, congelando la humedad en el suelo y haciendo que se levanten las capas inferiores. Para evitar eso, se instala una capa de aislamiento, tablero aislante de poliestireno (estiroespuma). El espesor de aislamiento comúnmente varía de 100 a 200 mm construido con múltiples capas de tableros de aislamiento de 50 mm. Además, puede instalarse una losa de capa de limpieza que contenga o coloque sobre la superficie conductos de retorno de calor por debajo del aislamiento [27].

Ambientes de Temperaturas Altas

Las temperaturas altas son importantes en muchas industrias, tales como las del hierro y el acero, petroquímicas, nucleares e incineradoras, así como los pisos de congeladoras tienen requisitos especiales para la colocación del concreto, los ambientes colocados en ambientes de temperatura alta deben ser cuidadosamente diseñados y construidos. Sobre todo, tienen que satisfacer todos los requisitos especiales impuestos por las temperaturas elevadas de servicio. Las estructuras y el material son afectados por el calor [27].

La diferencia más significativa que se aplicará al diseño estructural del piso es de qué manera se manejan las juntas. Temperaturas altas causaran expansión de la losa de concreto. Un concreto típico refractario tiene una expansión térmica reversible de aproximadamente 5×10^{-6} cm/cm/°C. Este movimiento debe ser tomado en cuenta en un diseño de juntas adecuado, si no se permite a las juntas espacio suficiente para la expansión, las caras de las mismas pueden estar sometidas a presiones lo suficientemente grande para causar desportillamiento y para que se desmoronen. En casos extremos, también existe el potencial para el pandeo de las losas [27].

Pisos Colorados y Texturizados

Las superficies de concreto coloreadas y texturizadas ganaron popularidad en los años 1980 y 1990. Ellas poseen una gran atracción por su vista, durabilidad y economía. Estos tratamientos de superficie son tan atractivos en el interior como en el exterior de un edificio familiar o comercial. Se requiere inclusión de aire para superficies al aire libre donde se anticipan temperaturas de congelamiento y descongelantes. Además de los beneficios regulares del concreto, estos acabados resaltan el prestigio y el valor de cualquier propiedad, ellos pueden completar el diseño total del arquitecto y proporcionar distinción a un proyecto [27].

Técnicas de coloreado:

- ✓ Pigmentos integrales; hechos de óxidos metálicos sintéticos o naturales
- ✓ Coloreados de espolvoreado seco; son tratamientos de superficie usados con o sin estampado de patrones, son una mezcla de cemento, pigmentos y arena fina
- ✓ Tintes; son materiales que se aplican en concreto endurecido. Pueden utilizarse sobre superficies nuevas y viejas.

Más información acerca de Diseño y construcción de pisos de concreto se encuentra en la referencia [27].

2.2.4.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS

Es evidente que el desarrollo de infraestructura ha ido a la alza en muchos países como el de México ya que cada vez es más evidente que para el crecimiento de un país es necesario el desarrollo de infraestructura, en donde el sector de las vías terrestres se venido beneficiando por los grandes beneficio que esta implica. Es bajo esta premisa que la construcción de caminos más seguros y durables ha venido cobrando mucha importancia. A continuación se muestra un panorama del desarrollo en la construcción y el empleo del concreto en los pavimentos rígidos en los últimos años en la infraestructura carretera mexicana, no entrando en detalles de diseño puesto que con el subcapítulo pasado se dio un bosquejo de diseño de pisos industriales compartiendo estos mucha similitud.

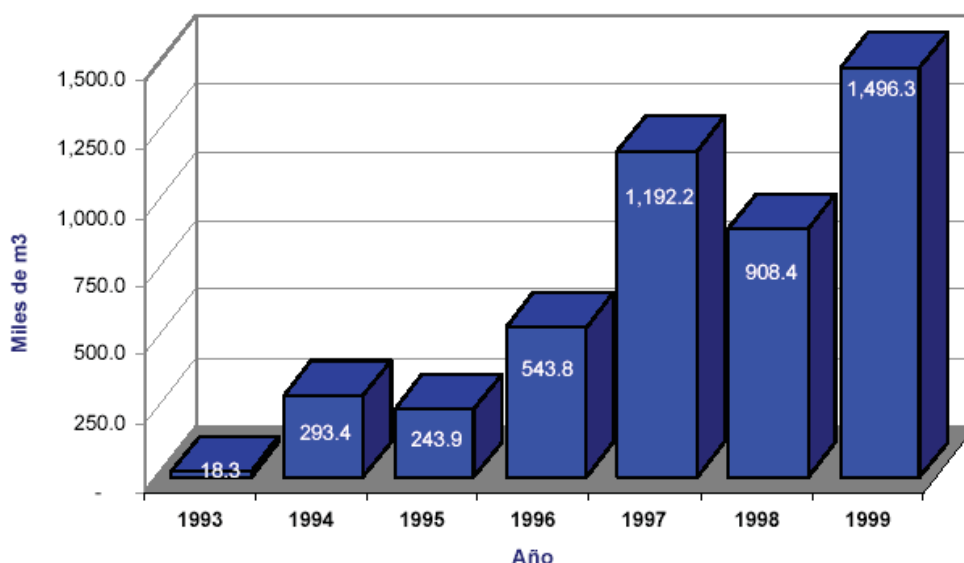


Figura 2.13 Volumen de Concreto en Carreteras.

Otro punto importante mencionar también es que ante la globalización se hicieron mas imperantes las necesidades de contar con una infraestructura que permita el desarrollo de la actividad económica y social del país.

En el año de 1993 la SCT con el apoyo de Cementos Mexicanos construyó la primera carretera de concreto hidráulico con el uso de especificaciones internacionales y las nuevas tecnologías de pavimentación, siguiendo estrictas normas de calidad tanto en la producción como en el tendido del concreto y contemplando una serie de alternativas en las especificaciones que permitirían establecer posteriormente situaciones comparativas que permitirían establecer adecuadamente las características ideales en las especificaciones de los pavimentos de concreto hidráulico. Así en 1993 el libramiento Ticumán ya era una realidad en concreto hidráulico, con una longitud de 8.5km.

A partir de este proyecto y con los resultados programados que se fueron obteniendo del, se continuo con la especificación y construcción de algunas otras carreteras de concreto hidráulico en el país, de tal forma que al final de 1994 ya se habían iniciado los trabajos en los tramos de las Autopistas Guadalajara – Tepic, Tuxpan – Tihuatlán y Tihuatlán – Poza Rica, así como el primer tramo de la Cárdenas – Agua Dulce.

A pesar de la crisis económica que sufrió el país, para el año de 1995 ya se estaban realizando los trabajos de algunas carreteras como: Yautepec - Jojutla, Atlapexco - Tianguistengo, Jiutepec - Zapata y un tramo de la Autopista Querétaro - San Luis Potosí.

Durante el año de 1996 se construyeron también de concreto los tramos: Entronque Aeropuerto de San Luis Potosí - Entronque Libramiento de San Luis Potosí, Libramiento de San Luis Potosí - El Huizache y el tramo Aeropuerto de Ixtapa - Zihuatanejo.

Para los años de 1997 y 1998 se especificaron y construyeron los siguientes tramos: Autopista Pirámides - Tulancingo, un segundo tramo de Ixtapa - Aeropuerto, el Libramiento Ruta Dos en Nuevo Laredo, la Autopista Cancún - Tulum, la Autopista Huizache - Matehuala, tres tramos de la Autopista Querétaro - Palmillas, el Libramiento Uman en el estado de Yucatán, el Libramiento Rincón de Romos en el estado de Aguascalientes, Boulevard Aeropuerto La Paz y el tramo de Chihuahua - Aldama. En este período se realizó una ampliación a la aeropista del aeropuerto de Mérida con la tecnología del concreto hidráulico.

Para 1999 se estuvieron realizando ó por iniciar los trabajos de construcción de los tramos de: la Autopista Rosario - Escuinapa en el estado de Sinaloa, Aeropuerto Vallarta - Río Ameca en Jalisco, Río Ameca - Cruz de Huanacastle en Nayarit, el segundo tramo de la Cárdenas - Agua Dulce en Tabasco, la carretera Yautepec - Oacalco, el tramo Poxila - Límite de Estados en Yucatán, Libramiento de Colima, Chajul - Flor de Café en el estado de Chiapas, Entronque Feliciano - Lázaro Cárdenas Michoacán, Acceso al Puerto Fronterizo Laredo puente Internacional III, Matehuala - San Roberto y San Roberto - Puerto México en el estado de Nuevo León, el acceso al puerto de Altamira (API), las laterales del Paseo Tollocán en Toluca Estado de México, los tramos de Huayacocotla y la Chinantla en Veracruz, el Libramiento Nororiente de Querétaro, así como la aeropista del aeropuerto de Kaua en el estado de Yucatán.

Como se ha descrito en la información presentada anteriormente el crecimiento y evolución de los pavimentos de concreto hidráulico ha aumentado de una manera que resulta muy favorable para el país, por las ventajas que los mismos representan, esto ha propiciado que la demanda de caminos de excelente calidad haya ido en aumento.

Pero no todo es miel sobre hojuelas, como se ha venido mencionando las estructuras realizadas con este material son afectadas por fenómenos de deterioro muy severos y de gran relevancia y aunado a esto las causas propias de deterioro de este tipo de pavimentos, de las cuales las mas significativas son derivadas muchas veces de sistemas constructivos o de la misma naturaleza que el concreto presenta y que en carreteras es una punto crucial, que es la aparición de grietas por el fenómeno de contracción y expansión entre otros de los que no se entrara en detalle. Pero destacando también un punto crucial considerado uno de los talones de Aquiles del los pavimentos rígidos que es la velocidad de fraguado y alcance de resistencias máximas sobre todo en obras que requieran la apertura en tiempos cortos, por lo que se reitera la utilización hoy en día de materiales mas funcionales y seguros, lo que se esta alcanzado hoy en día con el gran desarrollo tecnológico en esta área.



Figura 2.14 a, b, c y d. Carreteras elaboradas en la actualidad en México con concreto hidráulico.

2.2.4.3 SOBRECARPETAS DE CONCRETO SOBRE PAVIMENTOS DE ASFALTO (ULTRA-THIN WHITETOPPING).

Estas sobre carpetas ultra-thin whitetopping son carpetas de concreto construidas sobre un pavimento existente de asfalto. Dicho procedimiento, implica la reparación previa a la colocación de la sobrecarpeta, la corrección de las principales irregularidades en el perfil de la superficie, y la colocación del pavimento de refuerzo. La capa superpuesta de rodamiento se construye directamente sobre la superficie de asfalto del pavimento existente [28].

Las sobrecarpetas de concreto se han colocado sobre todo tipo de vías terrestres desde 1981.

Las aeropistas, carreteras interestatales, caminos primarios e inclusive caminos secundarios, calles urbanas y áreas de estacionamiento se han podido mejorar considerablemente a base de una sobrecarpeta de concreto sobre pavimento de asfalto.

Al pavimento de concreto proporciona una superficie más resistente y más durable que el asfalto. El concreto también mejora las características del drenaje superficial al eliminar desviaciones inseguras tales como las roderas y dislocamientos en los pavimentos de asfalto.

Las sobrecarpetas de concreto colocadas encima del asfalto, proporcionan una superficie segura que dará muchos años de servicio a bajo costo y con mantenimiento mínimo [28].

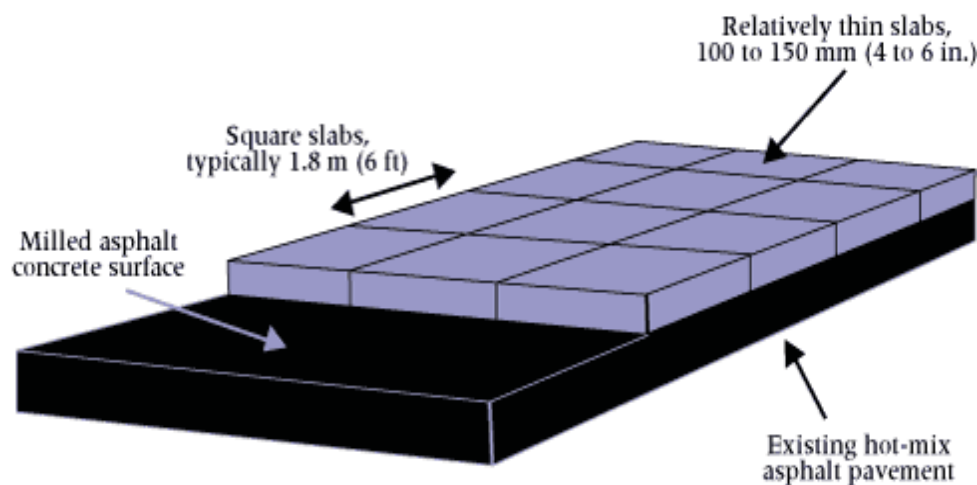


Figura 2.15. Sobrecarpeta ultra-thin whitetopping.

Ventajas

Las sobrecarpetas de concreto proporcionan ventajas a largo plazo para los usuarios de caminos y para los organismos encargados de carreteras y aeropuertos. La superficie de concreto reduce drásticamente el tiempo y los retrasos, que generalmente acompañan al mantenimiento constante de una superficie de asfalto. Las roderas, dislocamientos, agrietamientos por temperatura, agrietamiento tipo piel de cocodrilo (fatiga) y el intemperismo, implican el tratamiento frecuente a base de sellamiento de grietas y de recubrimientos superficiales. Una superficie de concreto es durable, resistente y requiere mucho menos tiempo de mantenimiento y dinero. Las sobrecarpetas de concreto son particularmente efectivas, en proyectos donde las restricciones en el presupuesto anual y altos niveles de tráfico, hacen que las interrupciones frecuentes en la circulación y los costos de mantenimiento sean intolerables [28].

También se puede colocar una sobrecarpeta de concreto para aumentar la calidad de una superficie de concreto. Las cargas pesadas producen roderas y dislocamientos en el asfalto y son un peligro potencial para los usuarios. Esto constituye un serio problema en intersecciones, casetas de cobro de cuotas de peaje, rampas y áreas de estacionamiento de aeronaves, donde el tráfico está constantemente frenando y arrancando. Las roderas llenas de agua de lluvia en estas zonas, pueden causar derrapamientos, pérdida de control del vehículo y por lo tanto, dar lugar a accidentes y a lesiones profesionales.

El hidroplaneo es también un problema serio en caminos con roderas, sobre todos en rutas interestatales y primarias. En el estudio denominado “Consideraciones de seguridad en la formación de roderas y de ondulaciones en superficie de rodamiento de asfalto,” los parámetros medidos indican que las distancias de frenado para superficies de concreto son muchos mayores que para las superficies de asfalto sobre todo cuando el asfalto esta húmedo y con roderas. Las cargas pesadas no forman roderas ni dislocamientos en el concreto, el cual conserva una alta resistencia antiderrapante.

Las sobrecarpetas de concreto no desarrollan las fallas típicas presentes en los reencarpetados de asfalto. Una vez que se han formado roderas en un pavimento de asfalto, la experiencia ha demostrado, que la colocación de una sobrecarpeta de asfalto sobre ese pavimento no evitará que se vuelva a presentar. Las roderas aparecen ante la incapacidad de lograr una compactación adecuada en las roderas que dejan las ruedas y/o ante la imposibilidad del asfalto de resistir las presiones actuales de los neumáticos y los volúmenes de tráfico de hoy en día. El concreto puede cubrir uniformemente las roderas en el asfalto y corregir el perfil de la superficie. La reflexión de grietas es otra forma de falla de sobrecarpetas de asfalto, que puede reducir apreciablemente la vida útil esperada. Debido a la capacidad que tiene la losa de concreto para puentear los problemas subyacentes, no ocurriría tal reflexión [28].

También se han usado sobrecarpetas de concreto sobre pavimentos de asfalto existentes como una alternativa a la “construcción por etapas” de pavimentos flexibles. En la mayor parte de los casos, el asfalto subdiseñado de la primera etapa se deteriora antes de poder colocar el primer reencarpetado proyectado. Las sobrecarpetas delgadas subsecuentes no se comportaron bien por que la falla original del asfalto, se refleja rápidamente a través del citado reencarpetado. Aun cuando se especifique una sobrecarpeta de asfalto más gruesa, los resultados no mejoran apreciablemente. Se ha demostrado que en las sobrecarpetas más gruesas, se forman más roderas que en recubrimientos delgados. Los análisis de los costos de rehabilitación y mantenimiento a largo plazo correspondientes a la “construcción por etapas”, en comparación con las sobrecarpetas de concreto demuestran que, para la dependencia encargada de las especificaciones una sobrecarpeta de concreto, representa la solución más duradera de bajo riesgo [28].

Otra ventaja de este tipo de sobrecarpeta, es que con ella, se puede evitar posibles problemas e construcción que pueden ocurrir durante la reconstrucción de un pavimento. En algunos lugares los pavimentos existentes se construyeron sobre terrenos de apoyo muy pobres. Las subrasantes saturadas y los suelos débiles, producen dificultades durante la construcción y aumentan el tiempo necesario para terminar el proyecto. La presencia de un nivel freático alto y/o de suelos débiles subyaciendo a un pavimento asfáltico que ha fallado, es muy probable que necesiten excavarse y rellenarse en un espesor a veces de más de un metro como etapa previa a la construcción. Una sobrecarpeta de concreto permite que la construcción se haga directamente sobre la superficie flexible existente, sin tener que eliminar o reparar la sub-base o la subrasante en toda la extensión del proyecto. El espesor gradual para ligarse a un puente o a estructuras en línea se logra rebajando con fresadora el asfalto existente hasta obtener la pendiente adecuada.

La colocación de una sobrecarpeta de concreto sobre un pavimento de asfalto, también puede ahorrar costos de construcción cuando hay mal tiempo. Después de una lluvia fuerte, la construcción de nuevos pavimentos se puede retrasar varios días, mientras la subrasante se seca hasta alcanzar una condición adecuada. Con la sobrecarpeta de concreto el contratista usa una barredora mecánica, para eliminar el agua en exceso acumulada en las roderas dejadas por las ruedas. Por lo tanto, en muchos casos la construcción de pavimentos de concreto sobre el asfalto se puede reanudar inmediatamente después de que deja de llover.

El concreto no se ve afectado por el debilitamiento estacional durante el descongelamiento primaveral.

Un estudio de pavimentos de prueba dentro de las Pruebas en carreteras de la AASHTO mostró que las variaciones estacionales tienen mucho menos efecto en el comportamiento de los pavimentos de concreto. Casi el 61% de todos los tramos asfálticos fallaron durante los meses de primavera, en comparación con sólo 5.5% de los tramos de prueba pavimentados con concreto. El concreto es elástico durante todo el año [28].

Eficiencia

Las sobrecarpetas de concreto mantienen un alto nivel de servicio durante toda su vida útil. El grado de eficiencia es una medición de la carpeta de un pavimento para soportar el tráfico, y depende de la integridad estructural y del grado de comodidad de recorrido. La vida útil de las sobrecarpetas de asfalto es mucho más corta [28].

Las sobrecarpetas de concreto mejoran la capacidad estructural. La capa de refuerzo reacciona estructuralmente, como si se hubiera construido sobre una capa de base resistente. Esto evita las fallas del tipo estructural tales como pérdida de apoyo, efecto de bombeo de finos, agrietamiento y despostillamiento de las esquinas. En un estudio reciente hecho por la ACPA acerca de sobrecarpetas de concreto en seis estados, no se encontró evidencia alguna de fallas estructurales.

Un reencarpetado de concreto actuará como puente para librar los problemas aislados que pudieran reflejarse a través de un asfalto. Una sobrecarpeta de asfalto sobre un pavimento antiguo de asfalto necesita trabajos de reparación de consideración. Esto se debe a que en cualquier sistema flexible las capas subyacentes necesitan repartir un parte importante de carga.

En vista de que una sobrecarpeta de concreto toma el lugar de los riesgos del asfalto para soportar las cargas por encima del asfalto en malas condiciones, se necesitaron menos reparaciones [28].



Figura 2.16. Sobrecarpeta whitetopping aplicada en una carretera en Nebraska.

Criterios de diseño

Las sobrecarpetas de concreto sobre pavimentos asfálticos, se pueden unir entre sí con juntas simples (con o sin pasajuntas), con juntas reforzadas o con si refuerzo continuo. La mayor parte de las sobrecarpetas de concreto sobre asfalto se unen con pasajuntas simples. Cualquiera que sea el caso, se debe usar un procedimiento de diseño confiable, para calcular el espesor de la sobrecarpeta [28].

El procedimiento debe ser capaz de caracterizar la capacidad de carga estructural, que el pavimento existente impartirá a la sobrecarpeta de concreto. Al igual que sucede con todos los pavimentos de concreto, se necesita especificar una separación adecuada entre juntas, la transferencia de carga, una estimación del volumen de tráfico y las condiciones de drenaje, a fin de garantizar una larga vida. Un diseño confiable –aquél que toma en cuenta estos factores- permitirá una calidad de servicio excelente a lo largo de toda la vida útil esperada (de 20 a 30 años o más).

Espesor mínimo de la losa

El nivel del tráfico esperado afecta el espesor de diseño. El espesor se puede determinar por medio de los mismos procedimientos usados en pavimentos nuevos de concreto. En la Tabla 2.14 se presenta el espesor mínimo recomendado para los diseños estándar de concreto colocado sobre asfalto [28].

El espesor generalmente varía entre 20 y 30 cm en el caso de carreteras primarias e interestatales. En las redes secundarias, la mayoría de las sobrecarpetas de concreto tienen un espesor comprendido entre 13 y 18 cm aunque en algunos proyectos se ha usado un espesor de 10 cm.

Es común encontrar bordes de mayor espesor en sobrecarpetas de concreto de caminos secundarios. El bombeo del pavimento en carreteras secundarias asfaltadas, generalmente excede el bombeo necesario en una sobrecarpeta. El borde más grueso aumenta la capacidad de carga del pavimento. Un aumento de 25 mm puede casi duplicar la capacidad de soporte de cargas.

En aeropuertos también se han empleado las sobrecarpetas de concreto. El espesor de diseño en aeropuertos de aviación general, usualmente varía entre 10 a 15 cm. El espesor de diseño en los aeropuertos de gran actividad depende de la aeronave y del diseño [28].

Tabla 2.14. *Espesor mínimo recomendado para las losas de reencarpetao a base de concreto colocadas sobre pavimentos asfálticos existentes.*

	Carreteras primarias e interestatales (cm)	Caminos de bajo volumen de tráfico y secundarios (cm)	Áreas de estacionamiento vehicular (cm)	Aeropuertos de aviación general (cm)	Aeropuertos de gran actividad (cm)
- Con juntas	15	10	10 *	10	**
- Reforzadas continuamente	15	15		15	**

* Aeronaves de 12,500 libras de peso bruto o menos

** El espesor en el caso de aeropuertos de gran actividad depende de la aeronave de diseño.

Flexocreto

Los trabajos recientes para encontrar soluciones en la reparación de pavimentos asfálticos deteriorados, ha conducido a la investigación y desarrollo del llamado flexocreto (“flexocrete” en inglés). El flexocreto es una sobrecarpeta delgada de concreto de alta resistencia de corta vida, colocada sobre un pavimento original de asfalto. El flexocreto está pensado sobre todo para estacionamientos al aire libre, calles residenciales y urbanas y caminos con bajo volumen de tráfico. Las losas tienen menos de 10 cm de espesor y cuentan con juntas espaciadas a cada 1.8 m o menos. El refuerzo a base de fibras se ha pensado para impartirle confinamiento y resistencia [28].

Una sobrecarpeta de flexocreto construida para una compañía dedicada al manejo de los desechos en su planta de Kentucky, ha soportado 350,000 cargas equivalentes de un solo eje en sólo ocho meses. Sigue dando servicio a vehículos pesados hasta la fecha. Otro proyecto a base de flexocreto se construyó en Colorado, sobre un camino de acceso a una carretera interestatal primaria. El proyecto está siendo monitoreado y se ha comportado bien.

El flexocreto es una combinación de sobrecarpeta de concreto con el sistema constructivo “Fast Track” (pavimento de concreto de apertura rápida al tráfico). En la actualidad se están haciendo más estudios de esta innovación prometedora. La tecnología del flexocreto puede venir a revolucionar la construcción de sobrecarpetas en el futuro [28].

Caracterización del apoyo

Un requisito adicional en el diseño de sobrecarpetas de concreto, es la determinación de las condiciones de apoyo que las capas existentes le proporcionan a la nueva capa de refuerzo. La mejor y más recomendable caracterización se obtiene al usar ensayos de deflexión no destructivos. Con un deflectómetro de caída libre (FWD por sus siglas en inglés) se miden los parámetros de deflexión de las capas existentes. Se calcula la resistencia (módulo de elasticidad) de cada una de las capas de pavimento, a partir de los datos de deflexión. Estos valores se incorporan posteriormente al procedimiento de diseño del espesor [28].

Preparación previa a la colocación de la sobrecarpeta

Sólo se va a hacer referencia a los problemas serios en los pavimentos asfálticos durante las etapas avanzadas, tales como acanalamiento serio, dislocamiento o formación de baches. Las zonas con fallas en la subrasante que no vallas a impartir un apoyo uniforme a la sobrecarpeta se necesitan excavar y reemplazar. En la Tabla 2.15 se presenta una guía para las reparaciones necesarias en fallas de pavimentos asfálticos construidos [28].

Tabla 2.15. Lineamientos para poder reparar fallas en los pavimentos de asfalto antes de colocar la sobrecarpeta.

Condición general del pavimento	Trabajo de reparación realizado *
Formación de roderas (< 5 cm)	Ninguno **
Formación de roderas (> 5 cm)	Fresado o nivelación
Dislocamiento	Fresado
Baches	Rellenar con piedra triturada
	Mezcla en frío o en caliente
Falla de la subrasante	Eliminar y reemplazar/reparar
Grietas de piel de cocodrilo	Ninguno
Agrietamiento en bloques	Ninguno
Agrietamiento transversal	Ninguno
Agrietamiento longitudinal	Ninguno
Desgaste	Ninguno
Exudación	Ninguno

* Otros factores que se deben tomar en cuenta: drenes laterales, costo de colocación directa vs. Fresado vs. Nivelación

** considerar la profundidad de aserrado de la junta.

Una vez reparado, los encargados del proyecto deben decidir cómo tratar una superficie distorsionada antes de proceder a colocar la sobrecarpeta. Las instituciones han recurrido a diversos métodos, entre ellos: 1) barrido y colocación directa; 2) fresado para nivelar las distorsiones de la superficie; y 3) colocación de una capa de nivelación [28].

Colocación directa

Cuando se coloca directamente la superficie no se trata, y las roderas se rellenan con la propia sobrecarpeta de concreto. No es necesario el fresado ni la nivelación precisa u otros procedimientos. Se recomienda la nivelación directa, para todos los casos en los que las roderas no excedan de 5 cm de profundidad máxima.

Para poder determinar el volumen de concreto necesario, una brigada topográfica debe levantar secciones transversales del perfil distorsionado. La separación entre secciones transversales la determina el ingeniero residente [28].

2.2.4.4 PUENTES

Los puentes son sin lugar a duda una de las construcciones mas importantes en la infraestructura carretera por la importancia que juegan; ya que son estructuras construidas para salvar un cauce o extensión de agua como una quebrada, río, canal, lago, etcétera [29].



Figura 2.17 a y b. Puentes de concreto reforzado.

COMPONENTES DEL PUENTE

Los puentes están compuestos por:

- Accesorios**, elementos sin función estructural pero vitales para garantizar el buen funcionamiento del puente tales como superficie de rodamiento, barandas y juntas de expansión [29].
- Superestructura**, compuesta por el piso, los elementos principales (vigas, cerchas y arco) y los elementos secundarios (diafragmas, sistemas de arriostramiento, portales, aceras, etc).
- Subestructura**, comprende los apoyos, los bastiones y las pilas.
- Accesos de aproximación**, están compuestos por los rellenos con sus respectivas protecciones y la losa de aproximación cuando exista.

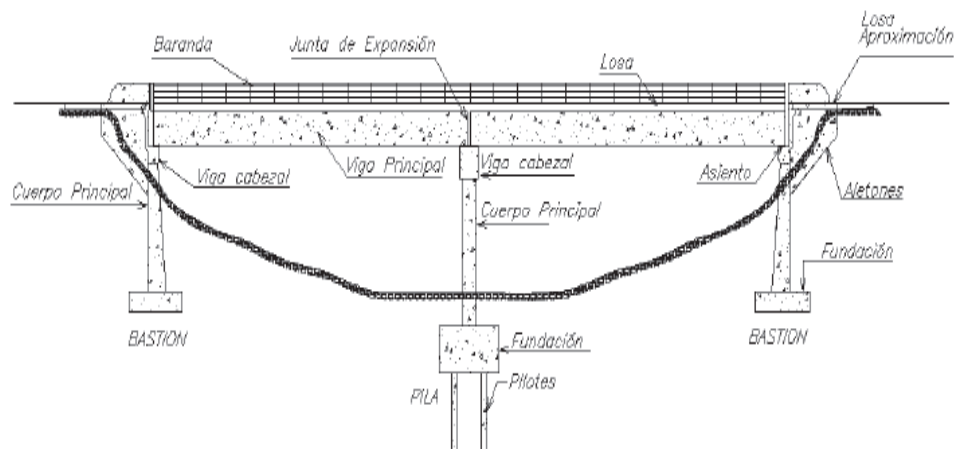


Figura 2.18. Elementos principales de un puente.

Accesorios.

Los elementos que componen los accesorios son:

- 1) Superficie de rodamiento, capa de desgaste que se coloca sobre la plataforma del sistema de piso para protegerlo de la abrasión producida por el tráfico; puede ser de asfalto o concreto con espesores que varían de 2.54 cm a 5 cm. Sin embargo, debido a malas prácticas del mantenimiento de carreteras, este espesor algunas veces es mayor por la inapropiada colocación de sobrecapas de asfalto [29].
- 2) Baranda, sistema de contención longitudinal fijada al sistema de piso para evitar la caída al vacío de los usuarios, vehículos, ciclistas y peatones, pueden ser de concreto o de acero.
- 3) Juntas de expansión: Elementos divisorios de la losa instalados en los extremos de cada tipo de superestructura que permite la traslación y/o rotación, para garantizar la expansión y contracción de la superestructura por temperatura y sismo.

Superestructura

1. **Componentes:** La superestructura comprende todos los elementos estructurales que se encuentran sobre los apoyos del puente como son el sistema de piso, los elementos principales tales como vigas, cerchas, arcos y sistemas de suspensión (puentes colgantes y atirantados) y los elementos secundarios como diafragmas, viguetas de piso, sistema de arriostramiento, portales, etc. A continuación se da una descripción de estos elementos [29].
 - a) *Sistema de piso:* Generalmente denominado como “losa” es la plataforma sobre la cual circula la carga vehicular, puede ser de concreto reforzado, acero o madera. El sistema de piso tiene como principal función la transferencia de la carga viva a los elementos principales de la superestructura que pueden ser arcos, cerchas y vigas, entre otros.
 - b) *Elementos secundarios:* Son aquellos que distribuyen adecuadamente las cargas, generan mayor rigidez lateral y torsional restringiendo las deformaciones de los elementos principales para que éstos sean más eficientes, por ejemplo los diafragmas en sentido transversal, los arriostramientos en planta inferior y en planta superior que unen entre sí las vigas principales, cerchas y arcos.
 - c) *Elementos principales:* Su función principal es soportar las cargas transferidas a ellos por el sistema de piso y además transmitir los esfuerzos resultantes hacia subestructura a través de los apoyos. Cada rango de longitud de puente cuenta con el tipo de elemento más eficiente para soportar los esfuerzos producidos por las cargas, el cual también determina el tipo de superestructura.

2. ***Tipos de Superestructura:*** El tipo de superestructura esta definido por el modelo estructural (sea este de tramo simple o de tramos continuos ya sea de vigas, cercha, arco, marco rígido, etcétera) y por el material de los elementos principales (acero, concreto, madera, etcétera). La selección del tipo de superestructura considera además del modelo estructural otros aspectos como disponibilidad de material, velocidad de construcción, mantenimiento, aspectos ambientales y costos. Los tipos de superestructura más comunes son [29]:

a) *Superestructura de Vigas:*

- a. Superestructura de viga simple: viga principal con dos apoyos con juntas de expansión al inicio y al final del tramo.
- b. Superestructura de vigas continuas: viga principal con más de dos apoyos.

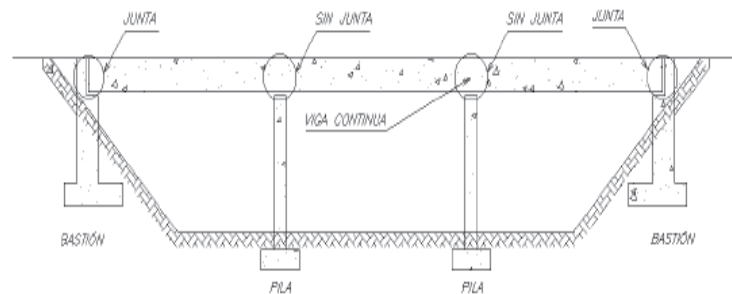


Figura 2.19. Viga continúa.

- c. Marco rígido: es aquella estructura en la que las vigas de la superestructura están empotradas en las pilas de tal manera que los apoyos transmiten esfuerzos de flexión a las columnas.



Figura 2.20. Marco Rígido.

- b) *Superestructura de cercha.* Se compone de dos armaduras unidas entre sí mediante el sistema de piso, diafragmas transversales o portales y los sistemas de arriostramiento superior e inferior. Las armaduras a su vez, son estructuras rígidas bidimensionales formadas con elementos rectos independientes sometidos a esfuerzos de tensión y compresión que están unidos por juntas o nodos. Existen tres tipos [29]:
- Cercha de paso inferior:* cuando el paso vehicular es por debajo de la estructura de cercha.
 - Cercha de paso superior:* cuando el paso vehicular se sitúa por encima de la estructura de cercha.
 - Cercha de media altura:* es una cercha de paso inferior sin ningún sistema de arriostramiento superior.
- c) *Superestructura de Arco:* Estructura compuesta por vigas o armaduras con forma de arco sometida a esfuerzos de compresión pura, el modelo más común es el arco simplemente apoyado. Existen también los arcos triarticulados. El concepto de arco paso inferior y paso superior es el mismo descrito anteriormente para los tipos de cercha.
- d) *Superestructuras suspendidas*
- Superestructura tipo colgante:* Es un sistema de piso suspendido mediante péndolas (o cables secundarios verticales), los cuales a su vez están unidos a los cables principales que forman una curva catenaria entre las torres. Para mantener el equilibrio de las fuerzas de tensión de los cables principales, estos se anclan a bloques masivos en ambos extremos del puente.
 - Atirantado o pilares:* Es un sistema de piso suspendido de una o varias pilas centrales mediante cables tirantes inclinados que trabajan a tensión. A diferencia de los colgantes no requiere anclajes en los extremos porque el anclaje se localiza en las mismas pilas. Otras características son la forma de las pilas (forma de H, Y invertida, de A, de A cerrada por la parte inferior (diamante), etcétera, además la disposición de los tirantes puede ser paralela o convergentes (radiales).

Subestructura

La subestructura está formada por elementos estructurales diseñados para soportar el peso de la superestructura y las cargas que a ésta se aplican. Los componentes de la subestructura son [29]:

1. **Apoyos:** Los apoyos son sistemas mecánicos que transmiten las cargas verticales de la superestructura a la subestructura. El uso y la funcionalidad de estos varía dependiendo del tamaño y la configuración del puente. Las funciones principales de los apoyos aparte de transmitir todas las cargas de la superestructura a la subestructura son garantizar los grados de libertad del diseño de la estructura como traslación por expansión o contracción térmica o sismo y la rotación causada por la deflexión de la carga muerta y la carga viva. Existen tres tipos de apoyos:

- a. Apoyo de expansión: permite que la estructura rote y se traslade en el sentido longitudinal, puede ser placa, de neopreno, de nódulo o balancín.
- b. Rígido o empotrado: los apoyos rígidos restringen todos los movimientos de traslación y rotación.



Figura 2.21. Apoyo rígido (concreto).

- c. Bastiones: Elemento de la subestructura que sirve de apoyo en los extremos de la superestructura, puede ser construida de concreto, acero, madera o mampostería. Dado que los bastiones están en contacto con los rellenos de aproximación del puente, una de sus funciones principales es de absorber el empuje del terreno. Estos bastiones están compuestos por aletones (paredes laterales cuya función es confinar la tierra o material de relleno detrás del bastión, se diseñan como muros de retención), viga cabezal (parte superior de un bastión sobre la cual se apoya el extremo de un tramo de la superestructura. La viga cabezal posee pedestales, que son columnas cortas sobre las que se apoyan directamente las vigas principales de la superestructura), el cuerpo principal (como su nombre lo dice es el componente principal del bastión. Puede ser tipo pared “muro de retención con o sin contrafuertes” o marco rígido “dos o mas columnas unidas en su parte superior a la viga cabezal”) y la fundación (es el conjunto formado por el cimiento o base del cuerpo principal y el suelo o roca soportante. En función del mecanismo de transición de las cargas se clasifican en superficiales y profundas) [29].

En el apartado anterior se dio un breve recorrido por los elementos principales que conforman un puente; pero como se ha mencionado en innumerables ocasiones hay varias afectaciones de tipo físicas y químicas que causan el deterioro de ellos, en especial en el concreto. Se procederá a hacer un breve recorrido por la red federal de caminos para ver el grado de deterioro que sufren los puentes, y así darnos un panorama de las futuras aplicaciones de nuevos materiales, ya sea para la sustitución de elementos y como reparaciones y así alargar la vida útil de estas estructuras.

GRADO DE DETERIORO DE LOS PUENTES EN LA INFRAESTRUCTURA DE LA RED FEDERL DE CARRETERAS EN MÉXICO

ANTECEDENTES.

En el año de 1993, la dirección general de conservación de carreteras de la SCT implanto un sistema de administración de puentes, denominado sistema integral de puentes mexicanos (SIPUMEX) [30].

Este sistema integra una base de datos con información básica, desde el punto de vista estructural, las características geométricas, ubicación geográfica, material y tipo de estructura, fecha de construcción, así como de las reparaciones realizadas y calificación de sus condiciones.

Se ha integrado un inventario nacional de los puentes existentes en las 31 entidades federativas, destacando [30]:

- Por el número de puentes: Michoacán con 463 y Quintana Roo con 19.
- Por longitud Total: Veracruz con 415km y Quintana Roo con 0.80km.

Estado	No. de Puentes	Longitud (km)	Estado	No. de Puentes	Longitud (km)
Aguascalientes	70	2.5	Nayarit	124	4.8
Baja California	122	4.8	Nuevo León	241	8.4
Baja Calif. Sur	96	2.9	Oaxaca	382	17.2
Campeche	74	2	Puebla	140	4
Coahuila	305	9	Querétaro	63	2.2
Colima	58	3.1	Quintana Roo	19	0.8
Chiapas	266	11.3	San Luis Potosí	251	8.6
Chihuahua	352	9.9	Sinaloa	230	10.4
Durango	237	7	Sonora	457	9
Guanajuato	162	3.9	Tabasco	84	5.6
Guerrero	390	18.5	Tamaulipas	349	10.9
Hidalgo	197	7	Tlaxcala	152	3.9
Jalisco	298	11.1	Veracruz	415	18.7
México	208	8.2	Yucatán	23	1.1
Michoacán	463	15.8	Zacatecas	195	4.8
Morelos	77	1.9	TOTAL NACIONAL	6500	229.3

Tabla 2.16. Número y Longitud de Puentes de la Red Carretera Federal por Estado, (fuente SIPUMEX).

Carreteras y puentes de la república mexicana

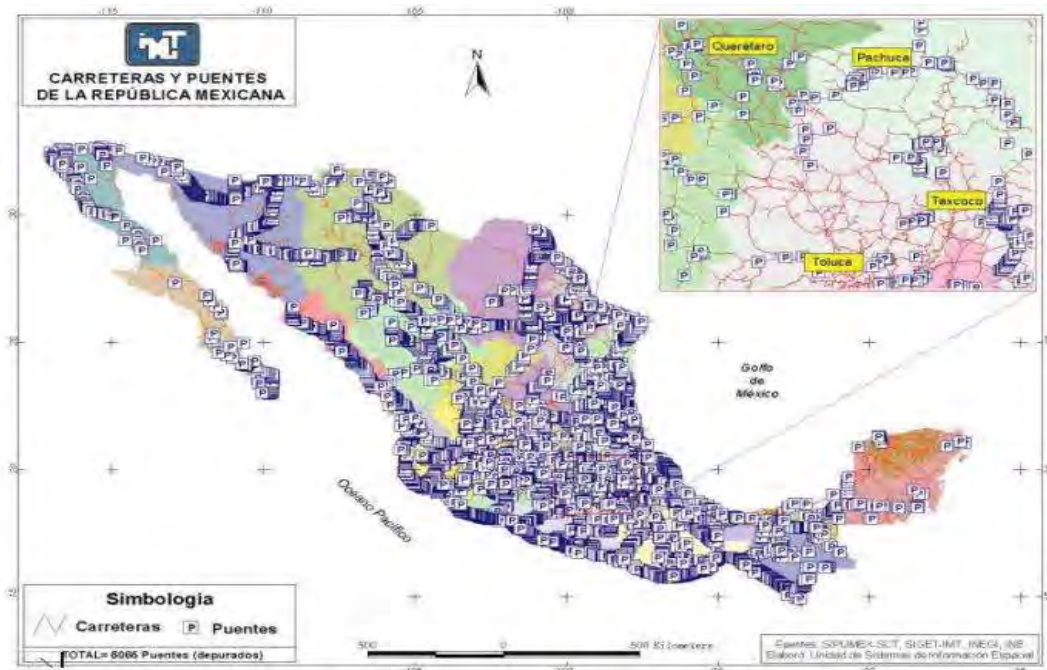


Figura 2.22. Infraestructura de Carreteras y Puentes en la República Mexicana.

Puentes prioritarios afectados por la corrosión

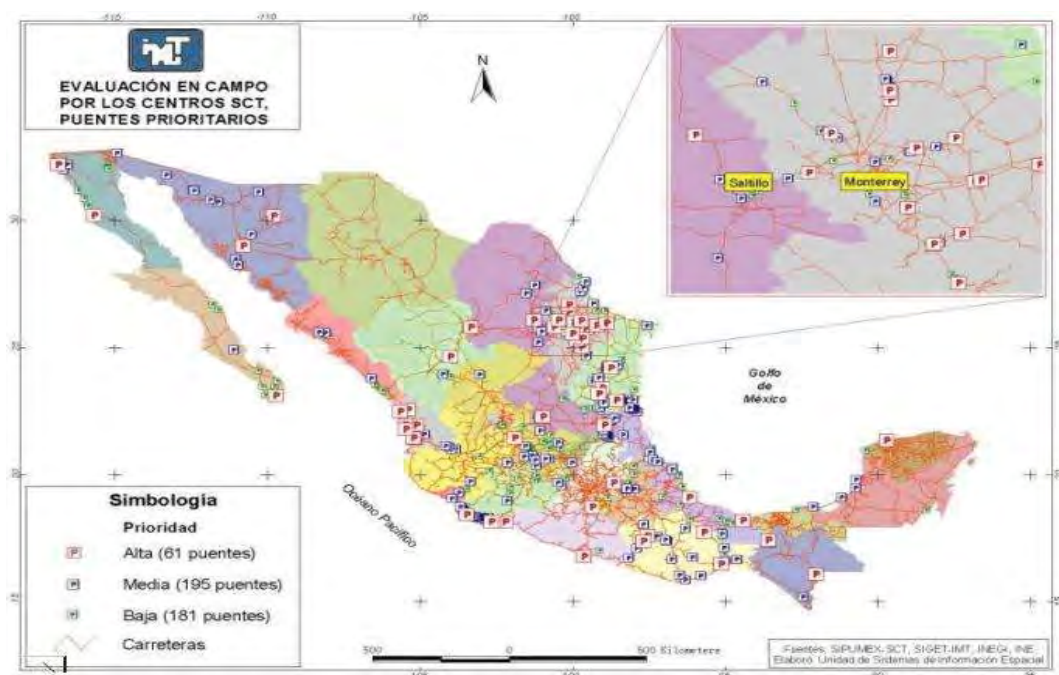


Figura 2.23. Puentes Prioritarios afectados por la Corrosión.

Diferentes aspectos y grados de deterioro de los puentes, en su mayor parte por el efecto de la corrosión



Figura 2.24. Deterioros encontrados en puentes causados por efecto de la corrosión y otras patologías.

Las patologías de deterioro en el concreto, como se ha visto, son muy variables y de importantes consideraciones y sobre todo el la infraestructura del transporte por ser de gran impacto en la sociedad y en el desarrollo de un país. Por tal motivo la preocupación de encontrar nuevos sistemas y materiales que prolonguen la vida útil de estas. Es por esto que la innovación en el desarrollo de nuevos materiales es considerada como un campo de investigación con gran futuro.

2.3 NANOTECNOLOGÍA Y NANOMATERIALES

La nanociencia es un área emergente de la ciencia, revolucionaria en diversos ámbitos (biología, medicina, ingeniería, construcción, etcétera), que se ocupa del estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales de muy pequeñas dimensiones. No puede denominarse química, física o biología dado que los científicos de este campo están estudiando un campo dimensional muy pequeño para una mejor comprensión del mundo que nos rodea. La nanociencia se define como una ciencia que se ocupa de fenómenos y manipulación de materiales a escala atómica cuyo tamaño es de cientos de décimas de nanómetros.

El concepto de nanotecnología fue presentado en 1959 por el físico Richard Feynman, quien exploró la posibilidad de manipular el material en la escala de átomos individuales y moléculas, introduciendo la capacidad creciente de examinar y controlar el material a escalas nanométricas.

“Hay mucho sitio al fondo” (*there is plenty of room at the bottom*, “En el fondo hay espacio de sobra”). Con este juego de palabras se dirigió Richard Feynman en 1959 a su auditorio en la Universidad Tecnológica de California, Caltech, en una de las conferencias más famosas de la historia de la Física [30].

Pero el fondo al que se refería Feynman no era el de la abarrotada sala de actos. Hablaba de otro fondo: el de las fronteras de la física, el mundo que existe a escala molecular, atómica y subatómica.

Por primera vez, alguien incitaba a que se investigaran cosas como escribir todos los libros de la Biblioteca del Congreso en una pieza de plástico del tamaño de un grano de polvo, miniaturizar las computadoras, construir maquinaria de tamaño molecular y herramientas de cirugía capaces de introducirse en el cuerpo del paciente y operar desde el interior de sus tejidos. . . Propuso usar máquinas-herramientas para hacer máquinas-herramientas más pequeñas que serían usadas para hacer máquinas todavía más pequeñas, y así sucesivamente hasta el nivel átomo. Ya en ese nivel, sería posible usar tales máquinas para construir moléculas que poseyeran determinadas especificaciones, que pudieran usarse en aplicaciones muy diversas. Concluía diciendo que los principios de la física, tal y como él los entendía, no negaban la posibilidad de manipular las cosas átomo por átomo.

Según explicaba Feynman, esta nueva disciplina de investigación establecía un área de conocimiento que tendría en un futuro un número enorme de sus aplicaciones técnicas. Desde entonces, Richard Feynman es considerado como el padre de la Nanotecnología o Nanociencia.

Pero sus palabras no tuvieron gran repercusión hasta que a principios de los años 80, Eric Drexler, un estudiante de pregrado del Instituto Tecnológico de Massachusetts, insinuó la posibilidad de crear sistemas de ingeniería a nivel molecular. Pretendía construir nanomáquinas hechas de átomos y capaces de construir, ellas mismas, otros componentes moleculares, que formaban parte a su vez de otras máquinas. Su idea fundamental era que si se tomaban prestadas las ideas de la naturaleza y adicionalmente el avance de la ciencia lo permitía, sería posible construir máquinas que podrían influir en el orden de los átomos, de manera tan precisa como para emular el proceso de evolución. En 1986 publicó un libro titulado *"The engines of creation"*, los motores de la creación, en español, donde introdujo las posibilidades, ventajas y peligros de la manipulación molecular. Este libro está considerado como un clásico de este nuevo campo.

Otras personas de esta área fueron Rosalind Franklin, James Dewey Watson y Francis Crick quienes propusieron que el ADN era la molécula principal que jugaba un papel clave en la regulación de todos los procesos del organismo y de aquí se tomó la importancia de las moléculas como determinantes en los procesos de la vida. Aquella podría usarse para solucionar muchos de los problemas de la humanidad, pero también podría generar armas muy potentes.

Pero estos conocimientos fueron más allá ya que con esto se pudo modificar la estructura de las moléculas como es el caso de los polímeros o plásticos que hoy en día encontramos en nuestros hogares. Pero hay que decir que a este tipo de moléculas se les puede considerar "grandes".

Con todos estos avances el hombre tuvo una gran fascinación por seguir investigando más acerca de estas moléculas, ya no en el ámbito de materiales inertes, sino en la búsqueda de moléculas orgánicas en nuestro organismo.

Hoy en día la medicina tiene más interés en la investigación en el mundo microscópico ya que en él se encuentran posiblemente las alteraciones estructurales que provocan la enfermedad, y no hay que decir de las ramas de la medicina que han salido mas beneficiadas como es la microbiología, inmunología, fisiología; en fin, casi todas las ramas de la medicina.

Con todos estos avances han surgido nuevas ciencias, por ejemplo, la Ingeniería Genética que hoy en día es discutida debido a repercusiones como la clonación o la mejora de especies.

Es así como es posible definir la nanotecnología como el diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nanoescala, y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nanoescala.

Para comprender el potencial de esta tecnología es clave saber que las propiedades físicas y químicas de la materia cambian a escala nanométrica, lo cual se denomina efecto cuántico. La conductividad eléctrica, el color, la resistencia, la elasticidad, la reactividad, entre otras propiedades, se comportan de manera diferente que en los mismos elementos a mayor escala.

En otras palabras, cuando se manipula la materia a la escala tan minúscula de átomos y moléculas, demuestra fenómenos y propiedades totalmente nuevas. Por lo tanto, científicos utilizan la nanotecnología para crear materiales, aparatos y sistemas novedosos y poco costosos con propiedades únicas.

La nanotecnología promete soluciones vanguardistas y más eficientes para los problemas ambientales, así como muchos otros enfrentados por la humanidad, desde nuevas aplicaciones médicas o más eficientes a soluciones de problemas ambientales y muchos otros.

El significado del prefijo "nano" es una dimensión: 10 elevado a -9.

- ✓ Esto es: 1 nanómetro = 0,000000001 metros.
- ✓ Es decir, un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro, o millonésima parte de un milímetro.
- ✓ También: 1 milímetro = 1.000.000 nanómetros (nm.).

La mayoría de grupos de investigación y desarrollo dentro del campo de la Nanotecnología se dedican al estudio de los Nanomateriales. Los Nanomateriales se pueden definir como materiales novedosos, poco costos y con propiedades únicas, cuya estructura molecular ha sido construida a escala nanométrica.

2.3.1 INVERSIÓN

Algunos países en vías de desarrollo ya destinan importantes recursos a la investigación en nanotecnología. La nanomedicina es una de las áreas que más puede contribuir al avance sostenible del Tercer Mundo, proporcionando nuevos métodos de diagnóstico y cribaje de enfermedades, mejores sistemas para la administración de fármacos y herramientas para la monitorización de algunos parámetros biológicos [30].

Actualmente, alrededor de 40 laboratorios en todo el mundo canalizan grandes cantidades de dinero para la investigación en nanotecnología. Unas 300 empresas tienen el término “nano” en su nombre, aunque todavía hay muy pocos productos en el mercado.

Algunos gigantes del mundo informático como IBM, Hewlett-Packard ('HP') NEC e Intel están invirtiendo millones de dólares al año en el tema. Los gobiernos del llamado Primer Mundo también se han tomado el tema muy en serio, con el claro liderazgo del gobierno estadounidense, que para este año ha destinado 570 millones de dólares a su National Nanotechnology Initiative.

En España, los científicos hablan de “nanopresupuestos”. Pero el interés crece, ya que ha habido algunos congresos sobre el tema: en Sevilla, en la Fundación San Telmo, sobre oportunidades de inversión, y en Madrid, con una reunión entre responsables de centros de nanotecnología de Francia, Alemania y Reino Unido en la Universidad Autónoma de Madrid.

Las empresas tradicionales podrán beneficiarse de la nanotecnología para mejorar su competitividad en sectores habituales, como textil, alimentación, calzado, automoción, construcción y salud. Lo que se pretende es que las empresas pertenecientes a sectores tradicionales incorporen y apliquen la nanotecnología en sus procesos con el fin de contribuir a la sostenibilidad del empleo. Actualmente la cifra en uso cotidiano es del 0,1 %. Con la ayuda de programas de acceso a la nanotecnología se prevé que en 2014 sea del 15 % en el uso y la producción manufacturera.

2.3.2 ENSAMBLAJE INTERDISCIPLINARIO

La característica fundamental de nanotecnología es que constituye un ensamblaje interdisciplinar de varios campos de las ciencias naturales que están altamente especializados. Por tanto, los físicos juegan un importante rol no sólo en la construcción del microscopio usado para investigar tales fenómenos sino también sobre todas las leyes de la mecánica cuántica. Alcanzar la estructura del material deseado y las configuraciones de ciertos átomos hacen jugar a la química un papel importante. En medicina, el desarrollo específico dirigido a nanopartículas promete ayuda al tratamiento de ciertas enfermedades. Aquí, la ciencia ha alcanzado un punto en el que las fronteras que separan las diferentes disciplinas han empezado a diluirse, y es precisamente por esa razón por la que la nanotecnología también se refiere a ser una tecnología convergente [30].

Una posible lista de ciencias involucradas sería la siguiente:

- Química (Moleculares y computacional)
- Bioquímica
- Biología molecular
- Física
- Electrónica
- Informática
- Matemáticas
- Medicina

2.3.3 NANOTECNOLOGÍA AVANZADA

La nanotecnología avanzada, a veces también llamada fabricación molecular, es un término dado al concepto de ingeniería de nanosistemas (máquinas a escala nanométrica) operando a escala molecular. Se basa en que los productos manufacturados se realizan a partir de átomos. Las propiedades de estos productos dependen de cómo estén esos átomos dispuestos. Así por ejemplo, si reubicamos los átomos del grafito (compuesto por carbono, principalmente) de la mina del lápiz podemos hacer diamantes (carbono puro cristalizado). Si reubicamos los átomos de la arena (compuesta básicamente por sílice) y agregamos algunos elementos extras se hacen los chips de un ordenador [30].

A partir de los incontables ejemplos encontrados en la biología se sabe que miles de millones de años de retroalimentación evolucionada pueden producir máquinas biológicas sofisticadas y estocásticamente optimizadas. Se tiene la esperanza que los desarrollos en nanotecnología harán posible su construcción a través de algunos significados más cortos, quizás usando principios biomiméticos. Sin embargo, K. Eric Drexler y otros investigadores han propuesto que la nanotecnología avanzada, aunque quizá inicialmente implementada a través de principios miméticos, finalmente podría estar basada en los principios de la ingeniería mecánica.

Determinar un conjunto de caminos a seguir para el desarrollo de la nanotecnología molecular es un objetivo para el proyecto sobre el mapa de la tecnología liderado por Instituto Memorial Battelle (el jefe de varios laboratorios nacionales de EEUU) y del Foresight Institute. Ese mapa debería estar completado a finales de 2006, y además, debería de tomarse como ejemplo para otros países.

2.3.4 NANOTECNOLOGÍA EN MÉXICO

El inicio del desarrollo de la ciencia en México se intensificó desde la construcción de Ciudad Universitaria, el presidente Ávila Camacho impulsó una serie de reformas y leyes para la UNAM. Más adelante surgieron organismos como el CONACYT y el SIN que se dedicaron a unir las fuerzas de los científicos nacionales en torno a la investigación y el apoyo para el desarrollo de las ciencias. Archivo: NanoUNAM.JPG. Cabe mencionar que México es uno de los países latinoamericanos donde el desarrollo de las llamadas nanotecnologías son más prominentes y prometedores, aunque estos avances no están sustentados en el estudio de sus posibles implicaciones éticas y ambientales debido a que se considera como una forma de incrementar la competitividad económica y por ello hay prisa para encumbrarle [30].

En México se considera a la nanotecnología como un sector estratégico y a pesar de ello, solamente la fundación conjunta con Estados Unidos y algunas sociedades civiles han manifestado su apoyo para que la tecnología repunte. Por otro lado, la vecindad con el país más poderoso del mundo, ha dado a México la oportunidad de contar con el apoyo de este país mediante la construcción en su territorio de parques tecnológicos y sirviéndose de los beneficios que obtiene gracias al Tratado de Libre Comercio.

Actualmente las universidades en México han cooperado con la investigación en el área gracias a que han puesto posgrados en su oferta relacionados con la nanotecnología y mediante la ilimitada ayuda que ha suscrito con las empresas transnacionales. En México es muy importante la atracción de capital de empresas de otros países. Se tienen múltiples ideas respecto al progreso que se podría tener respecto al uso de la nanotecnología. Uno de los más conocidos es el Proyecto Universitario de Nanotecnología Ambiental (PUNTA), el cual se basa en solucionar el problema de la contaminación del entorno mediante catalizadores y nanocatalizadores, para que con ello se lleve a cabo la limpieza de dos recursos básicos para el hombre: el aire y el agua.

El programa PUNTA tiene como objetivo el mejorar la calidad de vida, reduciendo la contaminación generada por los vehículos; además de hacer más propicio el aire en lugares cerrados como oficinas o el transporte público. Distintas instituciones llevan a cabo descubrimientos, investigación y desarrollo de la nanotecnología, y una de las áreas en las que se desea implementar esta ciencia es en la medicina.

- En el ramo medico se desea implementar para la fácil implementación de medicamento en lugares inaccesibles para el hombre, con el fin de no agredir a otros órganos y causar un mayor daño. Otro punto por el cual se requiere este tipo de tecnología, es para la exploración del organismo para su mejor entendimiento. Un ejemplo de ello, es la idea de que se empleen distintas nanoestructuras para la exploración del sistema humano, para que con ello se detecten a tiempo distintas enfermedades como lo es el cáncer.

El IMP con colaboración de Pemex, buscan un proyecto bastante retador, ya que mediante la implementación de la nanotecnología descubrirán nuevos usos que se le puedan dar a los derivados del petróleo, con el fin de encontrar nuevas fuentes de energía. Existen diversos proyectos que llevan a cabo tanto instituciones académicas como empresas, con el único fin de buscar un mejor desarrollo en la calidad de vida de la sociedad mexicana.

Ahora bien, la idea que una sociedad puede tener respecto al concepto de nanotecnología es muy distinta, todo dependiendo de la profundidad que cada integrante tenga respecto al tema. Podemos hablarle a algún ciudadano estadounidense sobre nanociencia y sus avances y posiblemente tenga algún conocimiento o idea respecto al tema, sin embargo en países emergentes como el caso de México, el tema no es muy conocido por la sociedad, por lo que sería muy difícil entablar una conversación respecto a la nanotecnología.

Es una de las desventajas que podría tener un país que no cuente con el suficiente uso de la nanotecnología en la sociedad, ya que se pueden adoptar distintos puntos de vista respecto al tema, llegando a considerar a la nanotecnología como “algo” que podría afectar a la sociedad, y por consecuente su rechazo por parte de la misma. Países como México y Brasil mantienen un nivel considerable de desarrollo e investigación nanotecnológica, sin embargo el nivel de inversión es muy bajo. En cambio, en otros países se ha llegado a considerar que la nanotecnología podría ser implementada con fines militares, para ser utilizados en campos de batalla, o incluso en la tecnología nuclear.

En cuanto a la posición que actualmente ha tomado la sociedad ante la innovación nanotecnológica es muy variada. Se que en México no habría una posición en contra o que cause algún disturbio social, debido a la falta de conocimiento que se tiene respecto al tema dentro de la sociedad. Sin embargo cabe decir que existen personas con alto conocimiento en cuanto a las ciencias, y podrían generarse en algunos casos situaciones en contra dependiendo del uso que se le esté dando a la nanotecnología. Sin embargo, se considera que el tener un gran avance en la nanotecnología y todas sus aplicaciones en el país, México podría experimentar cierto “aumento”, tanto en el nivel de vida de la sociedad como en la situación económica actual del país.

Existen muchas opiniones por parte de la sociedad, sin embargo muchas de ellas no son sustentables. México debería de ingresar al desarrollo de la nanotecnología a un nivel mayor, ya que esta última se considera que tendrá una gran importancia en el futuro. Podrían surgir distintas consecuencias en caso de que México no invirtiera mas en el tema, sin embargo no se ha mostrado un gran avance en el desarrollo.

2.3.5 LA NANOTECNOLOGÍA EN LA INGENIERÍA CIVIL.

Los rápidos avances que está experimentando la nanotecnología en todas sus dimensiones también son de aplicación en procesos constructivos de la ingeniería civil. Los más destacados serían «los materiales inteligentes o materiales funcionales», que puedan comportarse como sistemas vivos, de forma que sean capaces de llevar a cabo una función de actuación. Un ejemplo de estos nuevos materiales son los nanotubos de carbón, mucho más ligeros que el aluminio y 100 veces más resistentes que el acero [30].

Se tendrían así materiales de construcción de alto rendimiento, como una muy alta resistencia, durabilidad, comportamiento térmico y acústico; se podrían desarrollar polímeros, adhesivos, elastómeros, fibras y materiales compuestos para su aplicación en ingeniería civil, materiales inteligentes con funciones de reparación y de autodiagnóstico (de la microestructura, fatiga, etcétera.)

En el tema de carreteras se está investigando las nuevas nanomateriales pueden conferir a los nuevos materiales. Estas nanopartículas podrían aportar soluciones a problemas como es conseguir una gran estabilidad del material para que no se degrade al sol, la dispersión homogénea para pintura de asfalto, etc.

Hay actualmente problemas con los pigmentos utilizados para obtener pinturas rojas, ya que muchas veces éstas reaccionan con el concreto cambiando su tonalidad hacia el rosa. En este sentido, hay líneas de investigación sobre pigmentos o colorantes orgánicos depositados sobre arcillas y otros tipos de soportes para poder conseguir que no se degraden. Otra de las posibles soluciones es la de encapsular nanopigmentos en polímeros con el fin de que no tiendan a degradarse.

Un ejemplo más próximo al intento de aplicar la nanotecnología en la ingeniería civil es la iniciativa del consorcio europeo NANOCEM (www.nanocem.net) [31], dedicado a la investigación y transferencia de tecnología relativa a la nanotecnología del cemento y sus aplicaciones en la construcción.



Figura 2.25. Nanocemento desarrollado por NANOCEM. Fuente: www.nanocem.com.

Es entonces la nanotecnología una solución viable que ya se está desarrollando en muchos países desarrollados y que prácticamente es aquí en México donde tenemos un amplio camino por recorrer y es un mercado apto para el desarrollo satisfactorio de investigaciones en el tema encaminadas a darle solución a problemas que se presentan en el sector de la ingeniería civil.

2.3.6 FUTURAS APLICACIONES

Según un informe de un grupo de investigadores de la Universidad de Toronto, en Canadá, las quince aplicaciones más prometedoras de la nanotecnología son [30]:

- Almacenamiento, producción y conversión de energía.
- Armamento y sistemas de defensa.
- Producción agrícola.
- Tratamiento y remediación de aguas.
- Diagnóstico y cribaje de enfermedades.
- Sistemas de administración de fármacos.
- Procesamiento de alimentos.
- Remediación de la contaminación atmosférica.
- **Construcción.**
- Monitorización de la salud.
- Detección y control de plagas.
- Control de desnutrición en lugares pobres.
- Informática.
- Alimentos transgénicos.
- Cambios térmicos moleculares (Nanotermología).

2.3.7 APLICACIONES ACTUALES

Nanotecnología aplicada al envasado de alimentos. Una de las aplicaciones de la nanotecnología en el campo de envases para alimentación es la aplicación de materiales aditivados con nanoarcillas, que mejoren las propiedades mecánicas, térmicas, barrera a los gases, entre otras; de los materiales de envasado. En el caso de mejora de la barrera a los gases, las nanoarcillas crean un recorrido tortuoso para la difusión de las moléculas gaseosas, lo cual permite conseguir una barrera similar con espesores inferiores, reduciendo así los costes asociados a los materiales [30].

Los procesos de incorporación de las nanopartículas se pueden realizar mediante extrusión o por recubrimiento, y los parámetros a controlar en el proceso de aditivación de los materiales son: la dispersión nanopartículas, la interacción de las nanopartículas con la matriz, las agregaciones que puedan tener lugar entre las nanopartículas y la cantidad de nanopartículas incorporada.

En ainia centro tecnológico están desarrollando y caracterizando nuevos nanocomposites basados en polímeros y mezclas poliméricas para aplicaciones industriales, funcionalización de envases de PET con nanoarcillas, una metodología de diseño de envases para sistematizar la incorporación de aspectos diferenciales clave para el éxito del producto: nanocompuestos para la mejora de las propiedades barrera de materiales de envase y una sistemática de diseño de envases considerando las exigencias del consumidor, desarrollando y evaluando materiales funcionalizados con nanoarcillas.

2.3.8 NANOMATERIALES.

2.3.8.1 ¿QUÉ SON LOS NANOMATERIALES?

Aunque el interés por el estudio de los nanomateriales surgió con fuerza en las últimas décadas, estos ya existían desde hace varios siglos atrás. Las nanopartículas específicamente, han existido en el planeta por siglos, algunos ejemplos son partículas de humo y las nanopartículas dentro de bacterias. Más adelante en algunas civilizaciones antiguas ya se utilizaban, aprovechando sus propiedades ópticas y medicinales [32].

Los nanomateriales son una clase de materiales (sean cerámicos, metales, semiconductores, polímeros, o bien una combinación de estos), en donde sus dimensiones se encuentran entre 1 y 100 nm. Estos presentan una transición entre moléculas y átomos, y un material con dimensiones de sólido volumétrico (bulk). Mientras que un material de orden micrométrico aun presenta propiedades similares a la de un sólido volumétrico (bulk), en los nanomateriales, debido a su tamaño reducido a unos cuantos nanómetros, se modifican sus propiedades que finalmente difieren del mismo material con dimensiones de sólido volumétrico, de las moléculas y los átomos.

Un aspecto singular de los nanomateriales es que presentan una superficie muy elevada respecto a su volumen, lo que se traduce en una mayor reactividad para su aplicación en campos como adsorción o catálisis. Otra ventaja significativa de los nanomateriales reside en la capacidad de modificar sus propiedades fundamentales (tales como magnetización, propiedades ópticas, temperatura de fusión, etc.) respecto a los materiales a escala micro o macroscópicas. Algunas de estas propiedades se relacionan directamente con las interacciones superficiales entre nanopartículas (dureza o temperatura de fusión) pero las propiedades electrónicas están controladas por los denominados "efectos de confinamiento cuántico". Este efecto no entra en juego al pasar de micro a macro dimensiones. Sin embargo, se convierte en dominante cuando el rango de tamaño nanómetro es alcanzado. La nanomecánica estudia las propiedades mecánicas de estos materiales. Su actividad catalítica revela nuevas propiedades en la interacción con los biomateriales [30].

La nanotecnología puede ser pensada como extensiones de las disciplinas tradicionales hacia la consideración explícita de estas propiedades. Además, las disciplinas tradicionales pueden ser re-interpretarse como aplicaciones específicas de la nanotecnología. Esta dinámica de reciprocidad de ideas y conceptos contribuye a la comprensión moderna del campo. En términos generales, la nanotecnología es la síntesis y aplicación de las ideas de la ciencia y la ingeniería hacia la comprensión y producción de nuevos materiales y dispositivos. Estos productos suelen hacer uso copioso de las propiedades físicas asociadas a pequeña escala [30].

Materiales reducidos a nanoescala pueden repentinamente mostrar propiedades muy diferentes en comparación con las que presentan en una exposición a macroescala, lo que permite aplicaciones únicas. Por ejemplo, sustancias opacas llegan a ser transparente (cobre); materiales inertes se convierten en catalizadores (platino); sólidos se convierten en líquidos a temperatura ambiente (oro); aislantes se convierten en conductores (silicio). Materiales como el oro, que es químicamente inerte a las escalas normales, puede servir como un potente químico catalizador en nanoescalas. Gran parte de la fascinación con la nanotecnología se deriva de los fenómenos de superficie que en cuestión exhibe la nanoescala [30].

Nanométricas partículas de polvo (a unos cuantos nanómetros de diámetro, también llamadas nanopartículas) son potencialmente importantes en cerámica, metalurgia de polvos, el logro de nanoporosidad uniforme y aplicaciones similares. La fuerte tendencia de las pequeñas partículas para formar macizos ("aglomerados") es un grave problema tecnológico que impide dichas solicitudes. Sin embargo, algunos dispersantes como citrato amónico (acuosa) y imidazoline o oleyl alcohol (no acuoso) son prometedores para los aditivos de aglomeración [30].

De acuerdo al número de dimensiones que se encuentren en el régimen nanométrico, los nanomateriales se pueden clasificar en cuatro tipos:

1. Materiales de dimensión cero: las tres dimensiones se ubican en el régimen nanométrico, a esta corresponden las nanopartículas.

2. De una dimensión, teniendo una longitud variable, conservan una sola dimensión en el régimen de nanómetros, como es el caso de nanoalambre y nanotubos.
3. De dos dimensiones: con áreas de tamaño indefinido, mantienen su espesor en el orden e 1 a 100nm, como en el caso de películas delgadas.
4. De tres dimensiones: en que los sólidos tridimensionales están formados por unidades nanométricas.

• **EFFECTOS PRODUCIDOS POR LAS NANOPARTÍCULAS.**

A medida que la dimensión de las partículas se reduce, sobre todo en el intervalo de 1 a 10nm los efectos de tamaño y de superficie son cada vez más notables. Entre el efecto del tamaño mas importantes, se ha determinado el confinamiento de los electrones, lo que implica una manifestación de efectos cuánticos en el material y que pueden percibirse a través de sus propiedades de conducción electrónica, magnéticas, etcétera. Es por esto que a este tipo de partículas se les ha conocido como puntos cuánticos [23].

Por otra parte los efectos de la superficie también son de gran importancia, ya que se tienen en las partículas pequeñas un incremento en áreas superficiales por unidad de volumen y en energía libre superficial respecto a los sólidos volumétricos.

Debido a que los átomos en la superficie de la nanopartícula están menos enlazados que el resto de sus átomos y su esfera de coordinación esta incompleta, se incrementa su energía libre superficial, afectando las propiedades como temperatura de fusión de nanopartículas de Pt se reduce de 1773°C en un sólido volumétrico a 600°C en nanopartículas de 8nm en promedio [23].

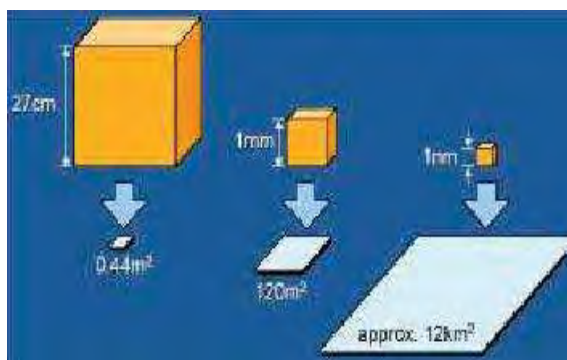


Figura 2.26. Incremento en áreas superficiales en materiales por la utilización de nanopartículas.

Por otra parte la absorción óptica en nanopartículas también es un fenómeno de superficie que se modifica, y se puede modular dependiendo de las características de la partícula (composición, tamaño, protectores de superficie, etcétera).

A continuación se expone una tabla donde vienen recogidos los principales materiales nanotecnológicos en cuyo estudio se trabaja actualmente (tabla 2.17). Algunos son versiones muy pequeñas de compuestos convencionales (al ser versiones pequeñas exhiben propiedades físicas distintas a las que poseen los mismos materiales pero a escala macroscópica) y otros son nanomateriales nuevos, como por ejemplo los nanotubos de carbón o fuereños.

El mercado que mueven los nanomateriales es hoy en día considerable. Además se ha estimado que en el campo de los nanomateriales nóveles habrá un impacto en el mercado de más de US\$340 billones en un periodo de diez años.

Tabla 2.17. Materiales nanotecnológicos de estudio en la actualidad [23].

Material	Propiedades	Aplicaciones	Escala de tiempo (lanceamiento al mercado)
Cúmulos de átomos			
Quantum Wells o Ondas cuánticas	Capas ultra finas, normalmente de material semiconductor de unos pocos nanómetros de grosor. El material semiconductor (la onda) crece entre materiales barrera mediante técnicas de crecimiento cristalino. Los materiales barrera atrapan a los electrones en las capas ultra finas, provocando de esta manera una serie de propiedades muy útiles. Estas propiedades han contribuido por ejemplo al desarrollo de dispositivos láser.	Los lectores de CDs han usado los láseres de ondas cuánticas unos años. Desarrollos recientes prometen introducir estos nanodispositivos a bajo precio en el campo de las telecomunicaciones y de la óptica.	Actualmente – 5 años
Quantum Dots o puntos cuánticos	Partículas fluorescentes que son invisibles a menos que se iluminen con luz ultravioleta. Pueden hacerse para que exhiban un gran rango de colores, dependiendo de su composición.	Telecomunicaciones y óptica	7-8 años
Polímeros	Materiales orgánicos que emiten luz cuando se aplica a través de ellos una corriente eléctrica y viceversa.	Conversión, energética, computing	No se sabe
Estructuras menores de 100nm			

Nanocápsulas	El ejemplo más conocido son los “ <i>Buckminsterfullerenes</i> ”, que fueron descubiertos en 1985. Estas partículas de C60 son 1nm de ancho.	Se divisan muchas aplicaciones como por ejemplo lubricante seco para la ingeniería.	Actualmente 2 años
Nanopartículas catalíticas	Estos materiales ya existían antes de que se incluyeran en el campo de la nanotecnología. Están en el un rango de 1-10nm. En recientes desarrollos se ha conseguido que una masa determinada de catalizador pueda tener más área para reaccionar, mejorando de esta manera su rendimiento.	Amplio rango de aplicaciones, incluyendo materiales, combustible y producción de alimentos, salud y agricultura.	Actualmente
Material	Propiedades	Aplicaciones	Escala de tiempo (tiempo miento al mercado)
Carbon nanotubes o nanotubos de carbono	Existen dos tipos de nanotubos: El nanotubo de pared simple, también llamado “ <i>Buckytube</i> ” y los nanotubos de varias capas de carbono. Los dos están compuestos por carbono del tipo grafito y tienen típicamente un radio interno de 5nm y un radio externo de 10nm. Vienen descritos como el material más importante de la Nanotecnología hoy en día. Se ha calculado que los materiales basados en nanotubos tienen un potencial de ser de 50 a 100 veces más fuertes que el acero pesando seis veces menos.	Se prevén muchas aplicaciones como por ejemplo: fabricación de aviones, automóviles y construcción. Nanotubos de carbono de varias capas de carbono están disponibles en cantidades comerciales.	Actualmente-5 años

Capas menores de 100nm de grosor			
Self Assembly Monolayers (SAMs) o Monocapas conglomeradas	Se trata de sustancias que pueden ser tanto orgánicas como inorgánicas que forman espontáneamente capas de una molécula de grosor sobre una superficie determinada. Capas adicionales se pueden formar encima de la primera, formando así láminas cada una de ellas con un espesor igual al de una molécula.	Amplio rango de aplicaciones, basadas principalmente en propiedades tales como su funcionalidad química como su resistencia al desgaste.	2-5 años
Revestimiento de nanopartículas	La tecnología "coating" o de revestimiento se está dejando influenciar mucho por la Nanotecnología. Por ejemplo el caso de los revestimientos de acero inoxidable usando polvos nanocristalinos han demostrado ser más duros que los revestimientos convencionales.	Sensores, fabricación de cristales líquidos, cables moleculares, lubricantes y capas protectoras, revestimientos anticorrosivos y herramientas para cortar fuertes y resistentes.	5-15 años
Material	Propiedades	Aplicaciones	Escala de tiempo (lanzamiento al mercado)
Nanocomposites o Nanocompuestos	Composites son combinaciones de metal, cerámicas, polímeros y material biológico que permiten comportamientos funcionales. Cuando se introducen materiales que ya existen, en la escala nanométrica, se forman los nanocompuestos, propiedades como la dureza, transparencia o	Un gran número de aplicaciones, en particular aquellas donde características como la pureza y la conductividad eléctrica son importantes, como por ejemplo en	Actualmente-2 años

	porosidad se alteran.	microelectrónica. La explotación de estos materiales es pequeña actualmente, siendo el carbón negro el más explotado para aplicaciones industriales.	
Textiles	La incorporación de nanopartículas y cápsulas ha conseguido un incremento de la durabilidad y de la ligereza de las prendas.	Usos militares y consumo diario.	3-5 años

De todos estos materiales que se han descrito, los Nanocomposites o Nanocompuestos, son los que más aplicación han encontrado en nuestro proyecto, aplicación a Infraestructura Civil, y por tal motivo nos reúne en esta investigación.

2.3.8.2 APLICACIONES DE LOS NANOMATERIALES.

Existen diversas aplicaciones de nanopartículas metálicas, cerámicas y poliméricas las cuales se mencionan a continuación [23]:

- ✓ **Medicina:** gasas para quemaduras serias o heridas crónicas, contienen nanopartículas de plata. La plata es un bactericida, que en forma de nanopartículas incrementa el área superficial mejorando la eficiencia antibacteriana contra 150 tipos de microbios, incluyendo los resistentes a drogas. Crema para dolores musculares y adhesivos dentales, etc.
- ✓ **Deportes:** pelotas de golf que corrigen vibraciones o pequeños corrimientos, canalizando la energía recibida del palo de golf, mejor que las pelotas convencionales. Pelotas de tenis, recubiertas de nanopartículas para alargar su duración.
- ✓ **Higiene:** desinfectantes de grado militar, utilizado en aviones para combatir el problema del SARS (síndrome respiratorio agudo severo) a base de nanoemulsiones.
- ✓ **Materiales para la construcción:** recubrimientos super-hidrofóbicos, repelentes de mugre. Se emplea como recubrimientos de concreto, ladrillos y yeso. Es un aditivo a base de nanopartículas utilizado para reforzar el efecto hidrofóbico en materiales de construcciones, reduciendo la adhesión al agua y partículas de tierra al mínimo.



Figura 2.27. Productos comunes con innovación nanotecnológica en el mercado.

2.3.8.3 NANOTUBOS DE CARBONO

Los Nanotubos de Carbono fueron descubiertos en Japón por S. Iijima en 1991, publicado en la revista Nature 354, 56 (1991), durante los trabajos de investigación sobre fullerenos. El gran impacto de los materiales nanoestructurados es debido a que su gran superficie mejora sus propiedades y abre caminos a una amplia diversidad de nuevas aplicaciones. Por eso, han atraído y están atrayendo un considerable interés como constituyentes de nuevos materiales y dispositivos nanoscópicos.

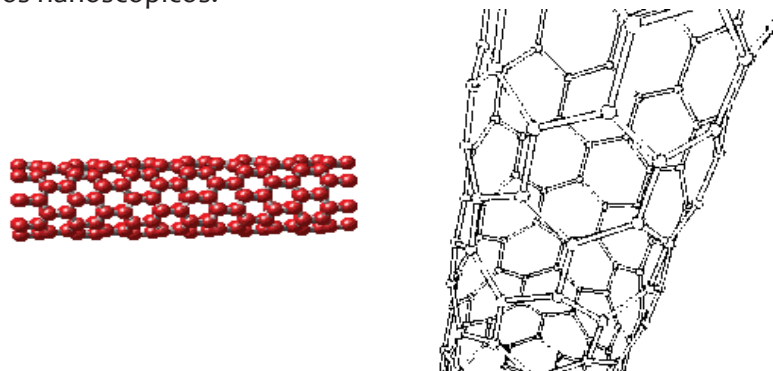


Figura 2.28. Representación animada de un nanotubo de carbono.

Los nanotubos de carbono (CNTs) están constituidos por redes hexagonales de carbono curvadas y cerradas, formando tubos de carbono nanométricos con una serie de propiedades fascinantes que fundamentan el interés que han despertado en numerosas aplicaciones tecnológicas. Son sistemas ligeros, huecos y porosos que tienen alta resistencia mecánica, y por tanto, interesantes para el reforzamiento estructural de materiales y formación de composites de bajo peso, alta resistencia a la tracción y enorme elasticidad.

Electrónicamente, se ha comprobado que los nanotubos se comportan como hilos cuánticos ideales monodimensionales con comportamiento aislante, semiconductor o metálico dependiendo de los parámetros geométricos de los tubos. Otra más de sus interesantes propiedades es su alta capacidad de emisión de electrones. En este campo, su interés radica en que sean capaces de emitir electrones a 0.11 eV de energía mientras que los mejores emisores de electrones utilizados en la actualidad emiten en un rango entre 0.6 y 0.3 eV. Además del estrecho rango de emisión de energía, los CNTs presentan otras ventajas respecto a los cristales líquidos utilizados en las pantallas planas como: amplio ángulo de visión, capacidad de trabajar en condiciones extremas de temperatura y brillo suficiente para poder ver las imágenes a la luz del sol.

Otra de sus aplicaciones como emisores de electrones es su utilización en la fabricación de fuentes de electrones para microscopios electrónicos. En el campo de la energía, los CNTs pueden ser usados para la preparación de electrodos para supercondensadores y baterías de litio, para el almacenamiento de hidrógeno y como soporte de catalizadores de platino en pilas de combustible. En aplicaciones biomédicas están siendo utilizados en sistemas de reconocimiento molecular, como biosensores y para la fabricación de músculos artificiales. Otra de las aplicaciones de los CNTs son para la producción de materiales de alto valor añadido, con propiedades estructurales y funcionales mejoradas.

- **ASPECTOS INNOVADORES**

El aspecto innovador de los materiales carbonosos de escala nanométrica, fullerenos y nanotubos, reside en que reúnen las siguientes propiedades:

1. Habilidad para trabajar a escala molecular, átomo a átomo. Esto permite crear grandes estructuras con fundamentalmente nueva organización molecular.
2. Son materiales de "base", utilizados para la síntesis de nanoestructuras vía autoensamblado.
3. Propiedades y simetría únicas que determinan sus potenciales aplicaciones en campos que van desde la electrónica, formación de composites, almacenamiento de energía, sensores o biomedicina.

2.4 MATERIALES COMPUESTOS MULTIFUNCIONALES-INTELIGENTES

2.4.1 MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos son materiales que aprovechan las propiedades de dos o más materiales (metálicos, cerámicos y plásticos) [46] que, al ser combinados y unidos de ciertas maneras y en proporciones adecuadas forman un nuevo material con propiedades diferentes a las de los constituyentes; estos materiales compuestos están formados de materiales continuos y discontinuos, al material continuo se la llama *matriz* (*responsable de las propiedades físicas y químicas; transmite los esfuerzos al agente reforzante, también lo protege y da cohesión al material*), y al medio discontinuo que usualmente es el más fuerte y duro se la llama *refuerzo* (*es una fase de carácter discreto y su geometría es fundamental a la hora de definir las propiedades mecánicas del material*) [33]. Así, pueden lograrse combinaciones de propiedades que son difíciles de obtener en materiales convencionales, tal como la gran tenacidad y alta resistencia a la tracción. Generalmente, los constituyentes se combinan en dos fases tal que las debilidades de uno de ellos se compensan con las fortalezas del otro, mejorando el desempeño global. Por ejemplo, un polímero puede reforzarse como fibras de vidrio para obtener resistencia y rigidez adecuadas, manteniéndose un bajo peso (debido a su baja densidad).

Estos materiales nacen de la necesidad de obtener materiales que combinen las propiedades de los cerámicos, los plásticos y los metales. Por ejemplo en la industria del transporte son necesarios materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto y que resistan bien la corrosión y el desgaste, propiedades éstas que rara vez se dan juntas [33].

A pesar de haberse obtenido materiales con unas propiedades excepcionales, las aplicaciones prácticas se ven reducidas por algunos factores que aumentan mucho su costo, como la dificultad de fabricación o la incompatibilidad entre materiales [33].

La gran mayoría de los materiales compuestos son creados artificialmente pero algunos, como la madera y el hueso, aparecen en la naturaleza [33].

Según Derek Hull un material compuesto es aquel que cumple con las siguientes condiciones:

1. Consta de dos o más materiales físicamente distintos y separables mecánicamente.
2. Puede fabricarse mezclando los distintos materiales de tal forma que la dispersión de un material en el otro pueda hacerse de manera controlada para alcanzar unas propiedades óptimas.
3. Las propiedades son superiores, y posiblemente únicas en algún aspecto específico, a las propiedades de los compuestos por separado.

El último punto es aquel que impulsa a científicos e investigadores, a crear y construir nuevos materiales compuestos, ya que si no se cumpliera este último punto no habría razón para formar un material compuesto.

2.4.1.1 TIPOS DE MATERIALES COMPUESTOS

En general los materiales compuestos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- 1) Materiales compuestos naturales; madera, hueso, bambú, músculos y otros tejidos.
- 2) Materiales micro-compuestos; aleaciones metálicas y termoplásticos endurecidos, hojas para moldeo continuo, termoplásticos reforzados, etcétera.
- 3) Macrocomposites; acero galvanizado, vigas de concreto reforzado, palas de helicópteros, esquís, paneles sándwich o laminares, etcétera. Siendo estos últimos los más abundantes.

Los laminares están formadas por paneles unidos entre si por algún tipo de adhesivo u otra unión. Lo más usual es que cada lámina esté reforzada con fibras y tenga una dirección preferente, más resistente a los esfuerzos. De esta manera obtenemos un material isótropo, uniendo varias capas marcadamente anisótropas. Es el caso, por ejemplo, de la madera contrachapada, en la que las direcciones de máxima resistencia forman entre sí ángulos rectos[33].

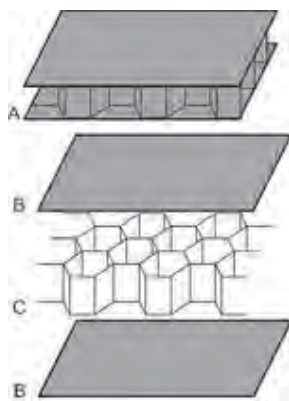


Figura 2.29. Panel sandwich con núcleo en forma de panal.

Los paneles sandwich consisten en dos láminas exteriores de elevada dureza y resistencia,, (normalmente plásticos reforzados, aluminio o incluso titanio), separadas por un material menos denso y menos resistente, (polímeros espumosos, cauchos sintéticos, madera balsa o cementos inorgánicos). Estos materiales se utilizan con frecuencia en construcción, en la industria aeronáutica y en la fabricación de condensadores eléctricos multicapas.

2.4.1.2 APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

En los últimos años ha habido un rápido crecimiento de los materiales compuestos, los cuales han ido reemplazando a otros materiales en especial a los metales. Las ventajas de los materiales compuestos aparecen cuando se consideran el módulo de elasticidad por unidad de peso (módulo específico) y la resistencia por unidad de peso (resistencia específica). En los materiales compuestos este módulo es muy alto, es decir se reduce mucho el peso, lo cual es muy importante en la industria del transporte ya que al reducir por ejemplo en peso en las parte móviles (caso de los metales), se incrementa el desempeño y un ahorro de energía.

Un material compuesto puede ser “inteligente, para lo cual, es necesario utilizar materiales “inteligentes”, que se introducen en la estructura como aparatos o en fibras. Un material inteligente es un material estructural que intrínsecamente (por su microestructura) tiene la capacidad de actuar, sentir y controlar. Similarmente, un sistema (o estructura) inteligente es un ensamble que presenta las mismas características, mediante la combinación de dos o más materiales. Un sistema inteligente incluye sensores o actuadores, los cuales producen, los cuales producen cambios de forma, características mecánicas, posición o frecuencia natural cuando hay un cambio de temperatura, de campo magnético o eléctrico, y procesadores de tiempo real, que pueden controlar el sistema. Por lo tanto, los materiales compuestos inteligentes son compuestos capaces de sensor cambios en el medio circundante y responder a ellos de una manera predeterminada [33].

2.4.1.3 EJEMPLO DE MATERIALES COMPUESTOS

- Plásticos reforzados con fibra:
 - ✓ Clasificados por el tipo de fibra:
 - Madera (fibras de celulosa en una matriz de lignina y hemicelulosa)
 - Plástico reforzado de fibra de carbono o CFRP o
 - Plástico reforzado con vidrio (GRP, GFRP o, informalmente, "fibra de vidrio")
 - ✓ Clasificados por la matriz:
 - Termoplásticos reforzados por fibra larga.
 - Termoplásticos tejidos de vidrio.
 - Compuestos termoformados o termoestables.
- Compuestos de matriz metálica o MMCs:
 - ✓ Cermet (cerámica y metal).
 - ✓ Fundición blanca.
 - Metal duro (carburo en matriz metálica)
 - ✓ Laminado metal-intermetal.
- Compuestos de matriz cerámica:
 - ✓ Hormigón/Concreto
 - ✓ Carbono-carbono reforzado (fibra de carbono en matriz de grafito).
 - ✓ Hueso (matriz ósea reforzada con fibras de colágeno)
 - ✓ Adobe (barro y paja)
- Compuestos de matriz orgánica/agregado cerámico
 - ✓ Madreperla o nácar
 - ✓ Concreto asfáltico
- Madera mejorada
 - ✓ Contrachapado
 - ✓ Tableros de fibra orientada (OSB).
 - ✓ Trex
 - ✓ Weatherbest (fibra de madera reciclada en matriz de polietileno)
 - ✓ Pycrete (serrín en matriz de hielo)

2.4.2 MATERIALES MULTIFUNCIONALES-INTELIGENTES

Los materiales inteligentes, denominados también *multifuncionales* [34], son aquellos que tienen la capacidad de cambiar sus propiedades mecánicas o físicas en presencia de un estímulo concreto. Aunque todavía no existe un consenso sobre los límites exactos entre materiales inteligentes y los que no lo son, se acepta que ellos poseen ciertas características, las cuales se describen en la siguiente definición de sistema inteligente:

Sistema o material que presenta sensores, “actuadores” y mecanismos de control, intrínsecos o embebidos, por los cuales es capaz de sentir un estímulo, de responder ante él de forma predeterminada en un tiempo apropiado y de volver a su estado original tan pronto como el estímulo cesa.

Los materiales inteligentes más comunes pueden clasificarse en:

- Materiales con memoria de forma
- Materiales electro y magnéticos
- Materiales foto y cromóactivos

❑ **MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA**

El efecto de memoria de forma consiste en una relación causa-efecto entre la deformación (cambio de forma) y un estímulo externo, por ejemplo, cambio de temperatura o de campo magnético.

Los materiales con memoria de forma pueden ser: aleaciones, polímeros o cerámicas con memoria de forma y aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma. De estos materiales, los más comunes parecen ser las aleaciones con memoria de forma (aquí se simplificará como AMF), las cuales son metales que además del efecto de memoria, tienen la propiedad de pseudoelasticidad. Después de ser deformadas mediante carga, las AMF pueden recuperar su forma o configuración original cuando se someten a un pequeño cambio de temperatura (unos 10°C), el cual produce un cambio de fase de estado sólido (ver figura 2.3). Aparecen dos fases, la martensita y la austenita. La martensita, que es relativamente suave, existe a bajas temperaturas. La austenita es más dura y aparece a una temperatura más alta. La martensita puede deformarse fácilmente, con lo cual una carga en la pieza con fase martensítica puede producir un cambio significativo en su forma, pero si la pieza se calienta por encima de la temperatura a la cual el material es completamente austenítico, ésta recupera su forma inicial, aún soportando la misma carga.

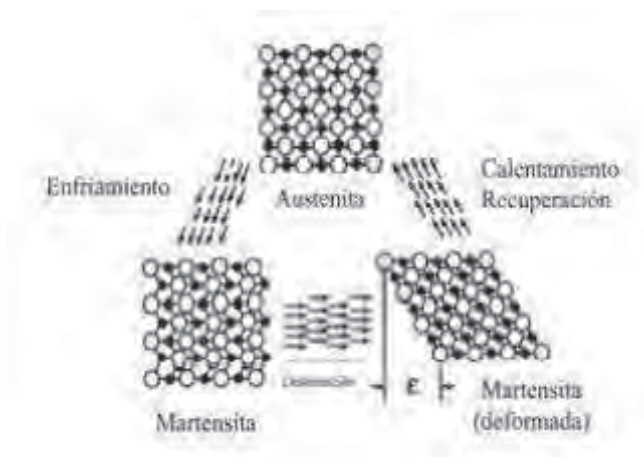


Figura 2.30. Cambio en la estructura cristalina de las AMF producido por el cambio de fase.

Además, para que la austenita se transforme en martensita, basta sólo con cargar la pieza (no se requiere cambio de temperatura). Cuando se reduce la carga, la martensita comienza a transformarse en austenita nuevamente y el alambre o pieza puede recuperar su forma inicial [35].

❑ **MATERIALES ELECTRO Y MAGNÉTICOS**

Los materiales electro y magnetoactivos cambian sus propiedades físicas cuando se someten a un campo eléctrico y magnético, respectivamente. Dentro de esta clasificación están los materiales piezoeléctricos, los materiales electro y magnetostrictivos, y los materiales electro y magnetoreológicos.

Los materiales piezoeléctricos adquieren un potencial eléctrico o un campo eléctrico cuando se someten a esfuerzo mecánico. También, se produce el efecto contrario, ya que estos materiales se deforman cuando se les aplica un voltaje. De acuerdo con esto, el ‘efecto piezoeléctrico’ es un fenómeno que resulta de una relación entre las propiedades eléctricas y las mecánicas del material [35].

Similarmente, los materiales electrostrictivos presentan el efecto de electrostricción, el cual implica un cambio de la dimensiones cuando se aplica un campo eléctrico. Una diferencia de éstos materiales con los piezoeléctricos es que en los primeros existe una dependencia cuadrática de la permisividad sobre el campo eléctrico, mientras que en los últimos existe dependencia lineal. Los materiales magnetostrictivos pueden responder a campos magnéticos como los piezoeléctricos responden a un campo eléctrico.

Los fluidos magnetoreológicos (MR) y electrorreológicos (ER) (fluidos inteligentes) pueden cambiar su viscosidad, drásticamente y de manera reversible, cuando se someten a un campo magnético y eléctrico, respectivamente.

❑ **MATERIALES FOTO Y CROMOACTIVOS**

Los materiales fotoactivos experimentan cambios de diferente tipo cuando se someten a la acción de la luz, y pueden producir luz bajo ciertos estímulos. En los cromóactivos se generan cambios de color en presencia de un estímulo externo, como por ejemplo la temperatura, la corriente eléctrica y la radiación UV. Ejemplos de materiales fotoactivos son los electroluminiscentes, fluorescentes y fosforescentes, y de materiales cromóactivos, los fotocrómicos, termocrómicos y electrocrómicos [35].

2.4.3 GEOPOLÍMEROS

Algunos residuos industriales son susceptibles de aprovechamiento, tal es el caso de las cenizas volantes, escorias de alto horno y otros residuos que gracias a sus características fisicoquímicas pueden ser propulsores de nuevos materiales para la construcción como los geopolímeros [47].

Geopolímero es un término acuñado por Joseph Davidovits en la década de los años 1980 para designar a polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización. Sin embargo estos compuestos ya habían sido desarrollados en la década de 1950 en la Unión Soviética con el nombre de Cementos de suelo (*Soil cements* en inglés). Los geopolímeros también son conocidos como aluminosilicatos inorgánicos [36].

Los geopolímeros tiene un elevado potencial para ser usados en numerosos campos, pero predomina el uso como sustitutos de cementos portland, campo hacia el que se ha dirigido la mayor parte de la investigación. Los geopolímeros tiene la ventaja de tener bajas emisiones de CO₂ en su producción, una gran resistencia química y térmica, y buenas propiedades mecánicas, tanto a temperatura ambiente como a temperaturas extremas.

La reacción de geopolimerización se produce bajo condiciones altamente alcalinas entre un polvo de aluminosilicato y una solución activadora (basada en una mezcla molar de hidróxido sódico y un silicato alcalino, por ejemplo, de sodio o de potasio) a condiciones ambientales. A nivel de laboratorio se suele usar metacaolín como material de partida para la síntesis de geopolímeros, siendo este generado por la activación térmica de caolinita. Se han llevado a cabo numerosos estudios usando desechos industriales de Metacaolín y otros aluminosilicatos [37].

Diversas investigaciones se han realizado alrededor del mundo. Los resultados de estos trabajos han demostrado las propiedades de alto desempeño mecánico y la durabilidad de estos materiales, así mismo han enunciado sus beneficios ambientales sobre los materiales convencionales con base en la utilización del cemento Portland.

Los beneficios ambientales se centran en las emisiones de la industria cementera, las cuales son reportadas entre 0.8 y 1.2 toneladas de CO₂ por tonelada de cemento producido, es decir que cuando se compra un bulto de cemento Portland de 50 kg se está siendo solidariamente responsable por la emisión de 50 kg de CO₂ a la atmósfera, con sus efectos en el incremento del efecto invernadero debido al cambio climático.

Los geopolímeros, como son conocidos los materiales obtenidos con base en cenizas volante, son elaborados a bajas temperaturas, generalmente inferiores a 100 °C (las temperaturas de los hornos cementeros superan los 100 °C durante la clinkerización) por lo que suponen un menor costo ambiental debido a la baja demanda energética que asume el producto terminado y por último el consumidor. Inclusive se pueden obtener materiales conglomerantes (geopolímeros) a temperatura ambiente, pero esto puede implicar unos tiempos de curado mayores a los convencionales [36].

➤ ESTRUCTURA Y MECANISMOS DE REACCIÓN

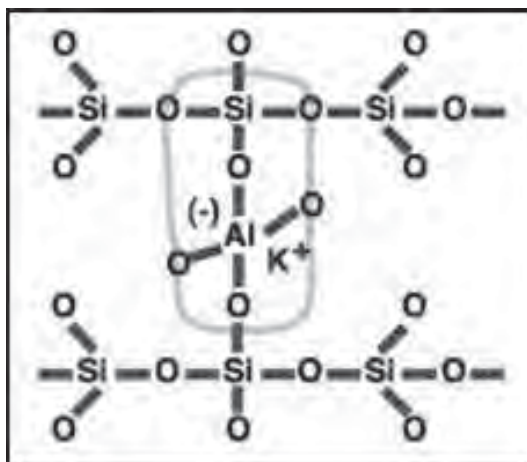
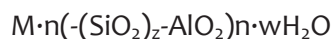


Figura 2.31. Red sialato.

El proceso de polimerización es llevado a cabo al poner al material puzolánico en contacto con la solución activador alcalina, lo cual da como resultado la formación de cadenas poliméricas tras haberse reorientado los iones en solución. Estas cadenas poliméricas pueden ser consideradas hipotéticamente como el resultado de la policondensación de iones de ortosialato. Dado que el mecanismo exacto de reacción aún no ha sido determinado completamente, se asume usualmente que la síntesis es llevada a cabo por medio de oligómeros, los cuales proveen las estructuras unitarias de la red macromolecular tridimensional [36].

Los geopolímeros que están basados en aluminosilicatos son llamados polysialatos. Este término es una abreviación de poli-(silico-oxo-aluminato) o $(-\text{Si-O-Al-O-})_n$, siendo n el grado de polimerización. La red sialato consiste en tetraedros de SiO₄ y AlO₄ unidos por átomos compartidos de oxígeno. Dentro de las cavidades de la red, deben estar presentes iones positivos (Na⁺, K⁺, Li⁺, Ca⁺⁺, Ba⁺⁺, NH₄⁺, H₃O⁺) para contrarrestar las cargas negativas del Al³⁺ para que el aluminio pueda estar unido a tres oxígenos, como el silicio. La fórmula empírica de los polysialatos es la siguiente [36]:



2.4.4 NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS.

Para centrarnos en el objetivo de esta investigación, que es, innovar en un nuevo material llamado nanocemento geopolimérico y con el elaborar un Concreto con una aplicación tecnológica, se muestra a continuación en la Figura 2.33 los diferentes tipos de cementos con el fin de especificar en donde estará ubicada nuestra investigación, la cual se centra en la parte de los Cementos Inorgánicos y específicamente en los que son activados Alcalinamente, que serán pues los utilizados para elaborar nuestro nuevo material que será el Nanocemento.

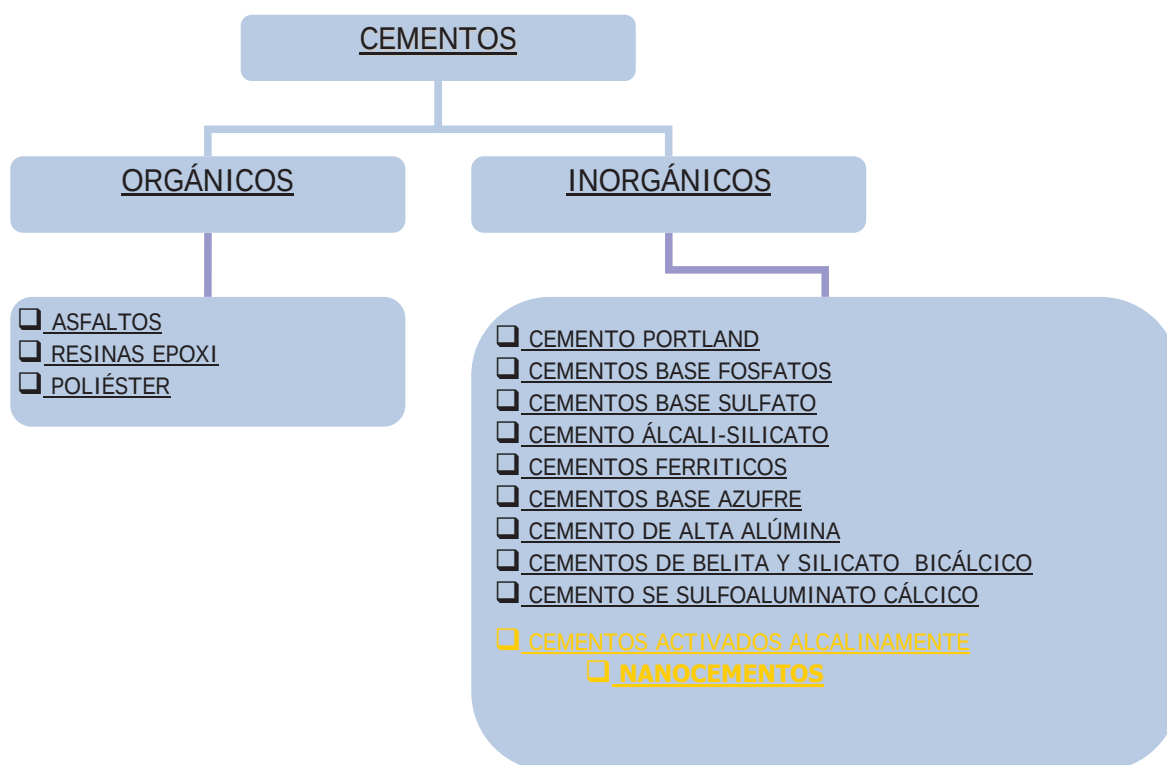


Figura 2.33. Tipos de Cementos.

Estos nanocementos son materiales Alcalinamente Activados, los cuales se sintetizan a partir de nanopartículas de óxido de Silicio y óxido de Aluminio, esto en presencia de una solución alcalina que suele ser Hidróxido de Sodio e Hidróxido de Potasio, que actúan químicamente como una Base y el mezclado o unión de la nano-alúmina con el nano-sílice como un ácido por lo que la reacción que se produce entre ellos es una Reacción Ácido-Base para posteriormente llegar al producto deseado que es el Nanocemento, tal y como se muestra en la Figura 2.34.

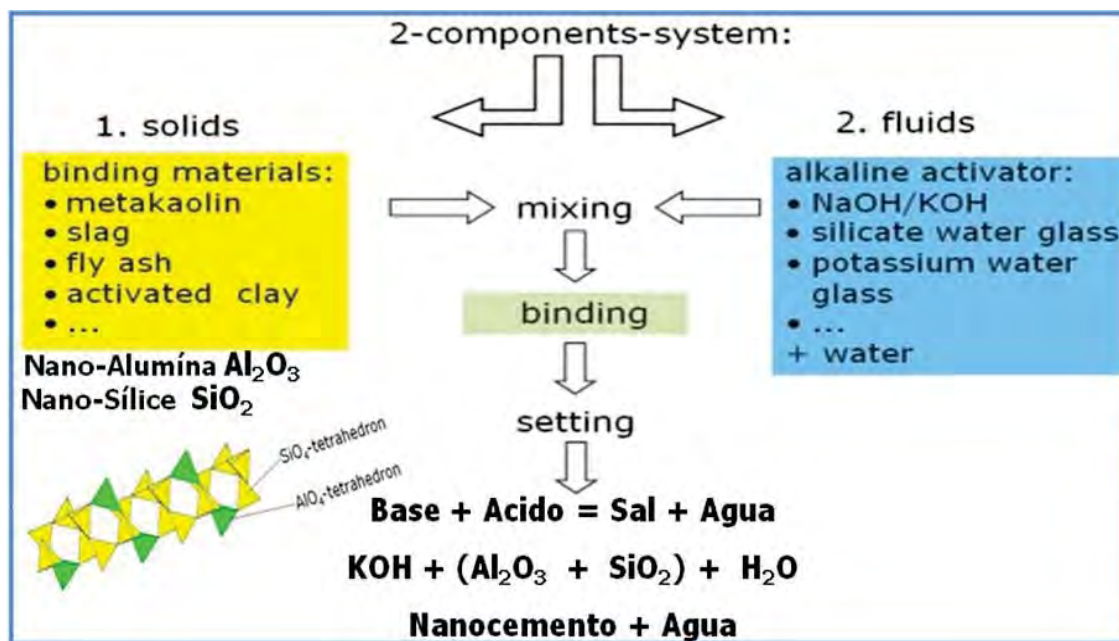


Figura 2.34. Componentes y Formación del Nanocemento Geopolimérico.

Lo que sucede posteriormente es un Proceso de Policondensación, que es un proceso de unión y formación de redes tridimensionales espaciales, esto quiere decir que se forman tetraedros de Sílice y Alúmina unidos tridimensionalmente los cuales forman nanoestructuras amorfas a semicristalinas, tal como se muestra en la Figura 2.35. Ahora bien debido a la formación de estas redes tridimensionales este nuevo material tiene ventajas de suma importancia comparándolo con el Concreto que es el material más utilizado para la construcción de Obra Civil, las cuales son:

- **No se tienen Fases Libres**, los que da como resultado un material menos propenso a reaccionar con agentes agresivos provenientes de exterior.
- **No se tienen Fases Inestables**,
- **Se genera con esto un Concreto más Durable**,
- **Se tiene un Fraguado Ultra-Rápido**.



A large fire is burning in a city street, with a fire hose spraying water onto the flames. The fire is intense and bright orange, consuming a building in the background. The street is lined with buildings, and the scene is filled with smoke and fire. A fire hose is visible in the foreground, spraying water onto the fire. The fire is very large and intense, with a lot of smoke and fire. The street is lined with buildings, and the scene is filled with smoke and fire. A fire hose is visible in the foreground, spraying water onto the fire.

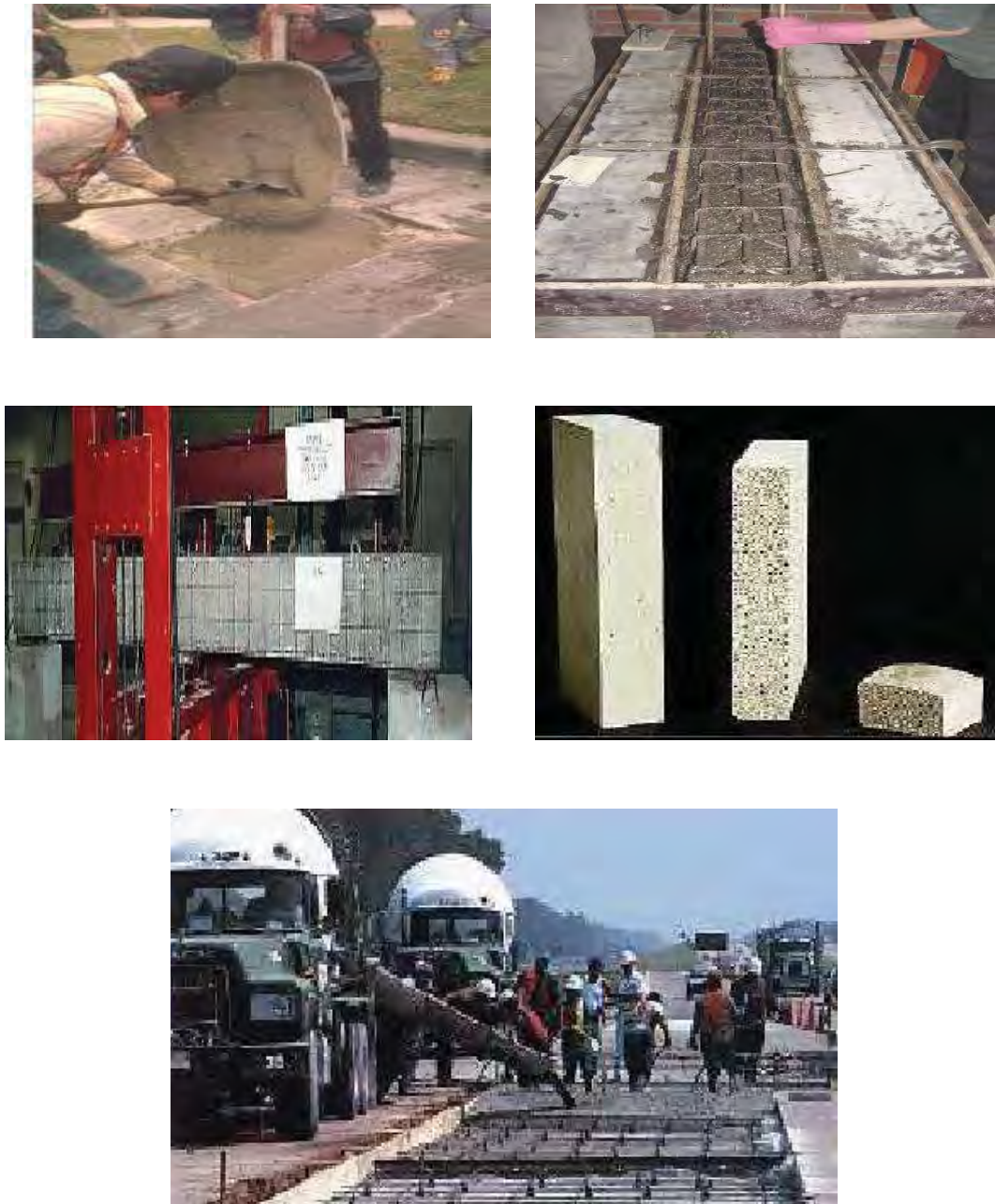


Figura 2.36. Aplicaciones de los nanocementos Geopoliméricos.

2.5 TÉCNICAS EXPERIMENTALES

2.5.1 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO, MEB (SEM)

El microscopio electrónico de barrido es una técnica de análisis de observación de todo tipo de materiales, tanto orgánicos como inorgánicos, que mediante el recorrido, a modo de barrido, de un haz muy fino de electrones, a gran velocidad que se genera mediante un filamento de wolframio sometido a un alto voltaje y aumentando su temperatura, sobre una superficie de un material, lo caracteriza morfológicamente, y mediante los adecuados accesorios permite efectuar un microanálisis elemental [39, 40, 41]. El haz de electrones en la muestra se encuentra bajo vacío y con un recubrimiento de oro o grafito (se ésta no es conductora) para generar una vía a tierra. El vacío se realiza para dar una mejor estabilidad al haz de electrones debido a que son absorbidos por la atmósfera y para evitar ionización de gases. Los electrones que interaccionan con la muestra se recogen en diferentes sensores dependiendo del análisis a realizar.

Este microscopio consiste en un sistema que permite crear y desviar un haz de electrones, así como medir las variaciones del parámetro escogido, denominado coeficiente de emisión electrónica secundaria. También consta de un dispositivo que permite la reconstrucción de la imagen del objeto y grabarla. La fenomenología básica en que se fundamenta esta técnica reside en que en el momento en que los electrones, dotados de una energía de algunos kilovoltios, chocan contra una muestra sólida se emiten electrones de energías diversas así como también una cierta radiación. En el proceso de observación se generan una variedad de señales tales como:

- *Electrones secundarios*: son emitidos por el material y provienen de capas situadas en la superficie hasta la profundidad que no excede algunos nanómetros y se utilizan preferentemente para las observaciones morfológicas del mismo.
- *Electrones retrodispersados*. Son empleados para la discriminación de fases existentes dentro del mismo material observado, dado que su producción es proporcional y está íntimamente relacionada con el número atómico Z.
- *Electrones Auger*: se producen cuando un electrón de una capa interna de un átomo es expulsado por un aporte exterior de energía, como por ejemplo por un electrón primario, y reemplazado por un electrón de una capa más exterior. La energía disponible puede disiparse en forma de radiación o cederse a otro electrón del átomo. Este electrón Auger es emitido con una energía característica del material irradiado y el fenómeno puede servir al microanálisis de la muestra o para reconstruir las imágenes de repartición de los elementos químicos en los primeros nanómetros de la superficie (técnica de microanálisis de capas finas).
- *Rayos X*: los electrones producidos en el filamento del microscopio electrónico se hacen incidir sobre la superficie de un material, se produce una excitación de éste y una emisión de radiación. Parte de esta radiación es de tipo rayos X, con una energía y longitud de onda propias del material, lo que nos permite deducir y cuantificar los elementos químicos que lo componen, EDX.

En la figura 2.37 se expone un diagrama en donde se detallan las señales anteriormente mencionadas.

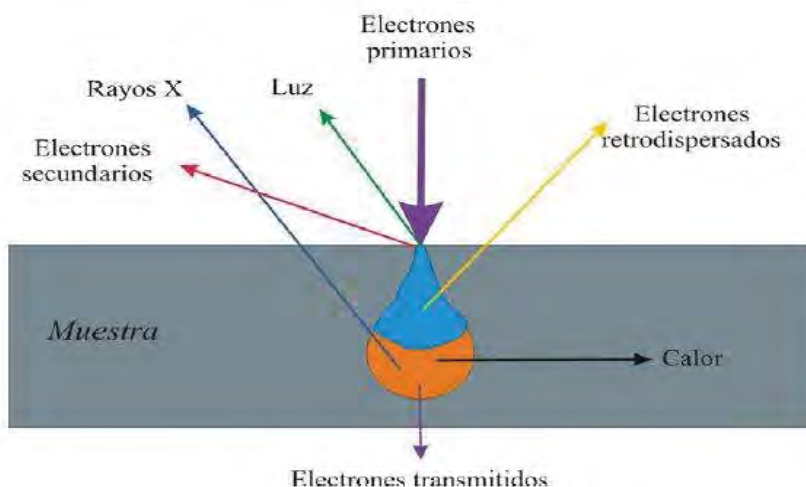
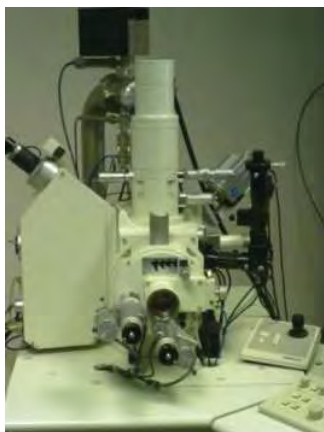


Figura 2.37. Incidencia y efectos del haz de electrones sobre un material en microscopia MEB.

Mediante la técnica MEB, se observó la microestructura y la superficie de los materiales sinterizados así como la morfología de los materiales sinterizados, labrados de una dimensión de 1 cm³ recubriéndolos con una película de bronce, mediante evaporación y deposición en vacío. El microscopio empleado fue un microscopio electrónico de barrido de la casa JEOL modelo JSM-6400; proporcionado por la UMSNH ubicado en la facultad de Ciencias Metalúrgicas. El equipo lleva también acoplada una unidad de microanálisis BRUCKER X FLASH-4010 de una resolución de 133 electrón volts, mediante la cual se captan y se representan los rayos X emitidos como un espectro EDX, que está conformado por picos que son característicos de cada elemento de la tabla periódica y que varían de altura acorde a las diferentes concentraciones [39, 40, 41].



Fotografía 2.1. a.

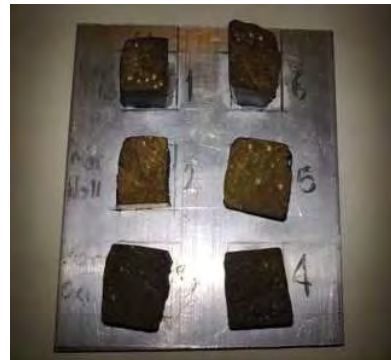


Fotografía 2.1. b.

Fotografía 2.1. a y b. MEB utilizado y unidad de microanálisis y adquisición de resultados.



Fotografía 2.2. Equipo empleado para el recubrimiento de muestras mediante la pulverización.



Fotografía 2.3. Muestras labradas para la caracterización por SEM.

2.5.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X, DRX

Los rayos X son una forma de radiación electromagnética de elevada energía y pequeña longitud de onda, del orden de los espacios interatómicos de los sólidos [39, 40, 41]. Cuando un haz de rayos X incide en un material sólido, parte de este haz se dispersa en todas direcciones a causa de los electrones asociados a los átomos o iones que se encuentran en el trayecto, pero el resto del haz puede dar lugar al fenómeno de difracción de rayos X, que tiene lugar si existe una disposición ordenada de átomos (Figura 2.38) y si se cumplen las condiciones que vienen dadas por la longitud de onda de los rayos X y la distancia interatómica con el ángulo de incidencia del haz difractado.

En otras palabras la difracción de rayos X es uno de los fenómenos que se producen al interaccionar un haz de rayos, de una determinada longitud de onda, con un material cristalino. La difracción de rayos X se basa en la dispersión coherente del haz de rayos X por parte de la materia (se mantiene la longitud de onda de la radiación) y a su vez en la interferencia constructiva de las ondas que están en fase dispersándose en determinadas direcciones del espacio.

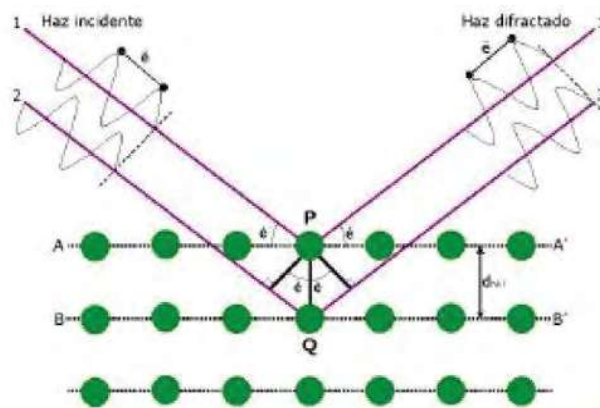


Figura 2.38. Interacción de los rayos X con los átomos.

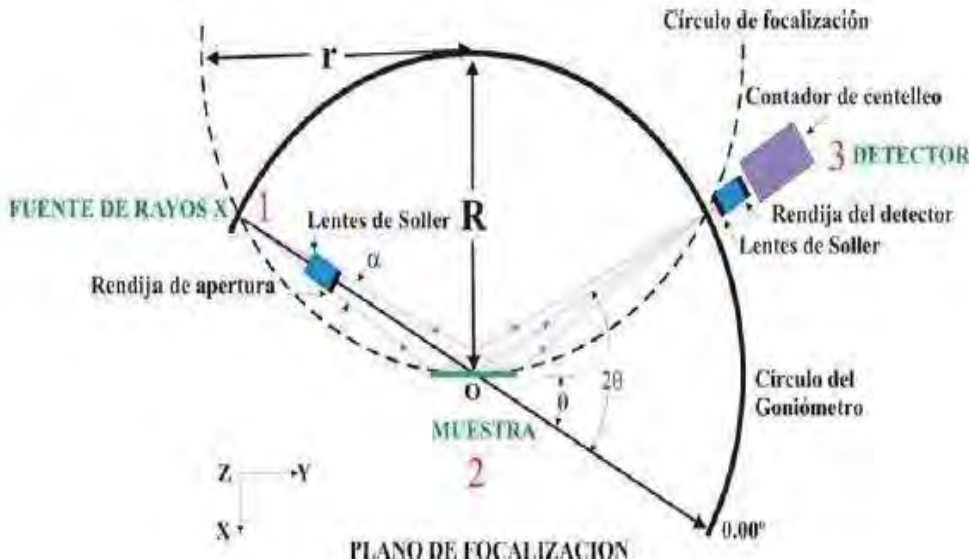




Figura 2.4. a



Figura 2.4. b

Fotografía 2.4. a y b. Preparación de muestras para DRX



Fotografía 2.5. Equipo de análisis DRX SIEMENS D5000 utilizado.

2.5.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN, TEM

El microscopio electrónico de transmisión es uno de los equipos más apropiados para llevar a cabo un buen estudio de la red cristalina y los defectos de los materiales. Como todos los microscopios electrónicos, utiliza un haz de electrones que se caracteriza por tener una longitud de onda mucho menor que la de la luz y con ello se logra aumentar la resolución. Con este equipo se pueden observar estructuras mucho más pequeñas, logrando aumentar hasta un millón de veces [39, 40, 41]. Además, tiene un poder de resolución de unas fracciones de nm.

Las partes principales de un microscopio electrónico son (ver Figura 2.40):

- Cañón de electrones, que emite los electrones que chocan contra la muestra y crean una imagen aumentada.
- Lentes magnéticas, para obtener campos que dirigen y enfocan el haz de electrones.
- Sistema de vacío, se emplea en el interior del equipo para minimizar la dispersión de electrones por las moléculas del aire.
- Sistema de registro mediante una CCD.

En proceso de adquisición de la imagen una parte de los electrones son dispersados, otros son absorbidos por el objeto y otros lo atraviesan formando una imagen aumentada de la muestra. Los electrones son acelerados al aplicar un potencial negativo que puede estar entre 100 – 1000 kV y son focalizados mediante dos lentes condensadoras sobre una muestra delgada, transparente a los electrones. Los electrones que atraviesan la muestra son recogidos y focalizados por la lente objetivo dentro de una imagen intermedia ampliada. La imagen es ampliada aún más con las lentes proyectora, con las cuales se controla el tamaño de la imagen en la pantalla fluorescente.

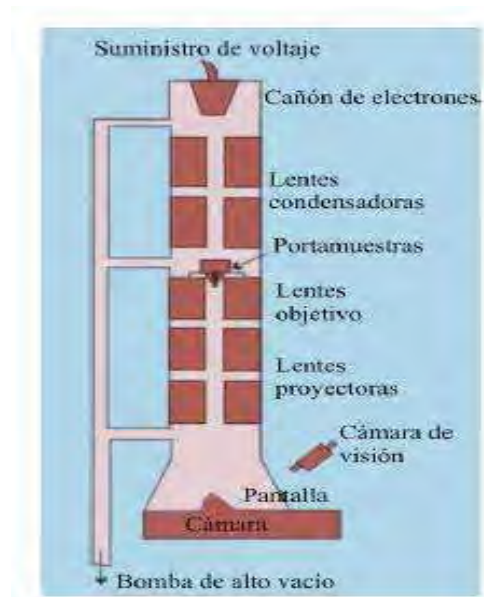


Figura 2.40. Esquema de un microscopio electrónico de transmisión.

En un microscopio de transmisión se emplean dos métodos para obtener la imagen, el de campo claro y el de campo oscuro. En el de campo claro, la imagen se forma a partir del haz transmitido, que no ha sufrido dispersión. Como resultado se obtiene una imagen del objeto oscura sobre un fondo brillante. En la de campo oscuro, se utilizan los electrones dispersados, obteniéndose una imagen brillante sobre un fondo oscuro (Figura 3214).



Figura 2.41. Imágenes de MET a) campo oscuro y b) campo claro.

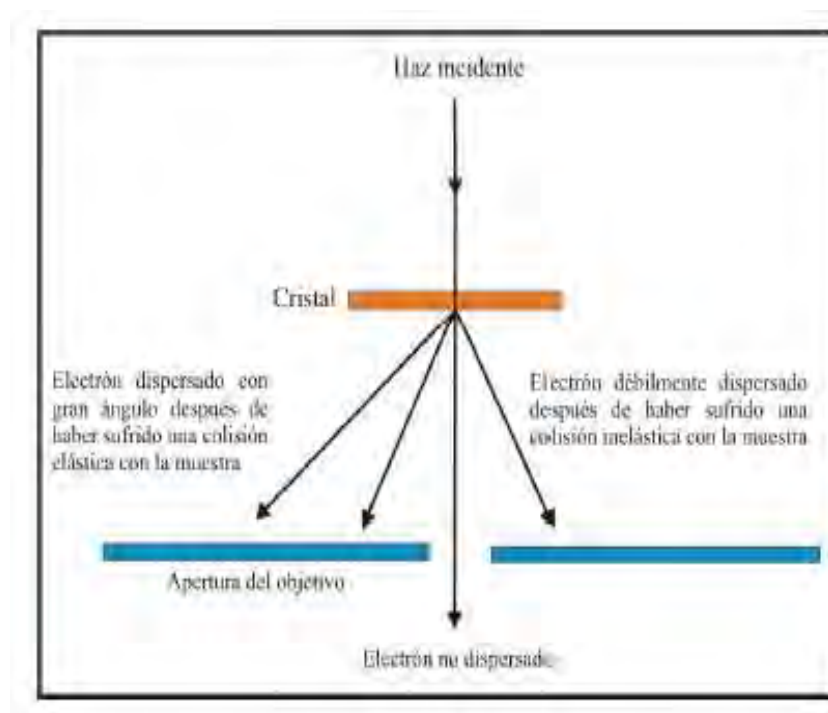


Figura 2.42. Formación de una imagen mediante microscopia electrónica de transmisión, de campo claro.

La muestra a analizar en el microscopio fue preparada moliendo nuestro “nanocemento base” en un mortero de Ágata hasta que este quedara convertido en un polvo de partículas pequeñísimas. El microscopio electrónico de transmisión que se empleó fue uno de la caso PHILIPS modelo TECNAI FEG DF20, el cual trabaja a 200 kV, manejando una temperatura en el cañón de 1800°C y un voltaje de aceleración de 4200 V.



Fotografía 2.6. a



Fotografía 2.6. b

Fotografía 2.6. a y b. Preparación de la muestra para TEM.



Fotografía 2.7. Microscopio TEM PHILIPS modelo TECNAI FEG DF20 utilizado.

2.5.4 ESPECTROSCOPIA DE INFRAROJO POR TRANSFORMADA DE FOURIER, FTIR

Cuando la radiación infrarroja incide sobre una muestra, es capaz de provocar cambios en los estados vibracionales de las moléculas constituyentes de la misma. La absorción de la radiación por parte de una muestra es indicativa del tipo de enlaces y grupos funcionales presentes en dicho compuesto [39, 40, 41]. Un análisis detallado de éste y haciendo una comparación con espectros similares se pueden determinar el tipo de compuesto en estudio.

Aplicaciones de la espectrometría de Infrarrojo por transformada de Fourier.

✚ Caracterización e identificación de materiales:

- ✓ Polímeros y plásticos,
- ✓ Sólidos inorgánicos (minerales, catalizadores, materiales compuestos),
- ✓ Análisis de productos farmacéuticos y de síntesis,
- ✓ Análisis de contaminantes, seguimiento de procesos químicos,
- ✓ Polimerizaciones, curado, reticulaciones,
- ✓ Reacciones catalíticas,
- ✓ Análisis de aceites y combustibles.

La muestra a analizar fue preparada moliendo nuestro “nanocemento base” en un mortero de Ágata hasta que este quedara convertido en un polvo de partículas muy pequeñas. El espectrofotómetro utilizado en este estudio fue un FT-IR modelo Perkin Elmer (Spectrum one) en un intervalo de número de onda de $4000 - 450 \text{ cm}^{-1}$ (Figura 2.43).



Figura 2.43. Equipo de FT-IR empleado para estudios de IR.

2.5.5 MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA, AFM

Desde su aparición en los 80's, el Microscopio de Fuerza Atómica (AFM, de sus siglas en inglés *Atomic Force Microscope*), ha sido un equipo importante para la elucidación de la microestructura de materiales, ya que es un instrumento mecánico óptico capaz de detectar fuerzas del orden de los piconewtons. Basado en la interacción local entre la punta y la superficie de una muestra, proporciona imágenes tridimensionales de superficies con alta resolución espacial en tiempo real. Debido a esto, el AFM es utilizado en la caracterización de materiales para determinar sus propiedades físicas [39, 40, 41].

Es un instrumento que al rastrear la muestra, es capaz de registrar continuamente su topografía mediante una sonda o punta afilada de forma piramidal o cónica. La sonda va acoplada a un listón o palanca microscópica muy flexible de sólo unos 20 μm . El AFM ha sido esencial en el desarrollo de la nanotecnología, para la caracterización y visualización de muestras a dimensiones nanométricas ($1 \times 10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nm}$).

El Microscopio de Fuerza Atómica trabaja en diferentes modos de operación como Tapping, Contacto e Imagen de Fase para obtener la topografía de la superficie de la muestra. También determina las propiedades físicas de los materiales como: viscoelasticidad, fuerza eléctrica y fuerza magnética.

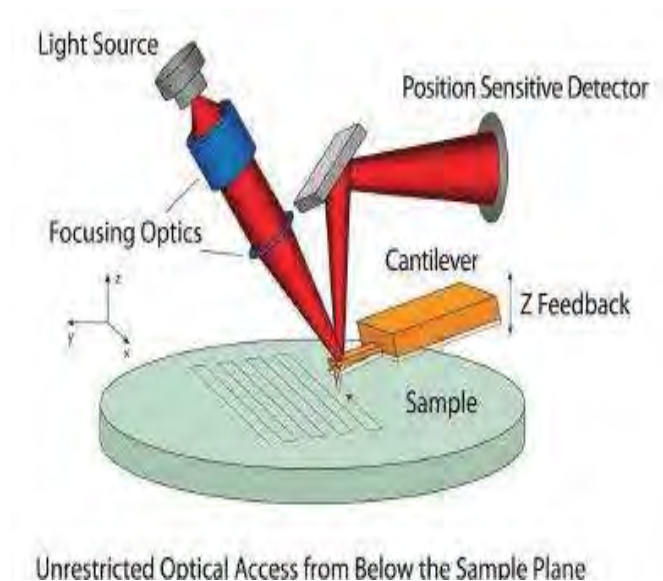


Figura 2.44. Diagrama de un microscopio de Fuerza Atómica.

PRINCIPIO FÍSICO DE OPERACIÓN

La técnica SPM proporciona imágenes tridimensionales en tiempo real, permitiendo monitorear un área localizada para obtener las propiedades físicas de los materiales simultáneamente. Todos los SPM's tienen 5 elementos fundamentales: la punta, el escáner, el detector, el sistema de control electrónico y el sistema de aislamiento de vibración [42].

La punta se selecciona de acuerdo al tipo de muestra y a las propiedades que se desean obtener; ésta puede ser de diferentes materiales, las más comunes son de Nitruro de Silicio o de Silicio. El diseño de escáner tiene forma de tubo y es de un material cerámico piezoeléctrico que cambia de dimensiones como respuesta a un voltaje aplicado. Estos escáneres se caracterizan por tener 3 grados de libertad, expandiéndose en una dirección y contrayéndose en otra como resultado del voltaje aplicado a sus electrodos. También se caracterizan por su frecuencia de resonancia, su rango de barrido el cual depende del material piezoeléctrico, sus dimensiones y el voltaje aplicado. El mayor intervalo de operación de un escáner es de ≈ 100 micras en movimiento lateral y ≈ 10 micras en movimiento vertical. Los sistemas de control y aislamiento de vibración son similares para la mayoría de SPM's.

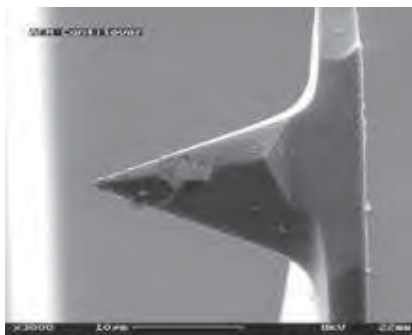


Figura 2.45. Ampliación a 3000x de una palanca usada de AFM.

TÉCNICAS DEL SPM

A. Microscopio de Fuerza Atómica

El microscopio de fuerza atómica monitorea la superficie de la muestra con una punta de radio de curvatura de 20 a 60 nm que se localiza al final de un cantilever. Las fuerzas entre la punta y la muestra provocan la deflexión de cantilever, simultáneamente un detector mide esta deflexión a medida que la punta se desplaza sobre la superficie de la muestra generando una micrografía de la superficie. La fuerza interatómica que contribuye a la deflexión del cantilever es la fuerza de Van der Waals [42].

A.1. Modos de operación de Microscopio de Fuerza Atómica

El microscopio de fuerza atómica utiliza múltiples modos de operación de acuerdo a las características físicas de la muestra y de las propiedades a medir.

Contacto: mide la topografía de la muestra deslizando la punta sobre la superficie.

Tapping: también llamado contacto intermitente, mide la topografía de la muestra tocando intermitentemente la superficie de la muestra.

Imagen de Fase: proporciona una imagen contrastada generada por la diferencia de adhesión en la superficie de la muestra y la punta.

Fuerza Magnética: mide el gradiente de fuerza magnética sobre la superficie de la muestra.

Fuerza Eléctrica: mide el gradiente de fuerza eléctrica sobre la superficie de la muestra.

Potencial de Superficie: mide el gradiente de campo eléctrico sobre la superficie de la muestra.

Modo Lift: técnica que utiliza dos modos de operación usando la información topográfica para mantener la punta a una altura constante sobre la superficie.

Modulación de Fuerza: mide la elasticidad/suavidad relativa de la superficie de las muestras.

Fuerza Lateral: mide la fuerza de fricción entre la punta y la superficie de las muestras.

Microscopia de Tunelamiento: mide la topografía de superficie de la muestra utilizando la corriente de tunelamiento.

Microscopia Electroquímica: mide la estructura de la superficie y las propiedades de los materiales conductores inmersos en soluciones electrolíticas.

Litografía: se emplea una punta especial para grabar información sobre la superficie de la muestra.

El AFM puede realizar dos tipos de medidas: Imagen y Fuerza.

- ✚ En el **modo de imagen** la superficie es barrida en el plano de la superficie (X-Y) por la punta. Durante el barrido la fuerza interatómica entre los átomos de la punta y los átomos en la superficie muestral provoca una flexión del listón. Esta flexión es registrada por un sensor adecuado (normalmente balanza óptica) y la señal obtenida se introduce en un circuito o lazo de realimentación. Este último controla un [actuador piezoeléctrico](#) que determina la altura (Z) de la punta sobre la muestra de forma que la flexión del listón se mantenga a un nivel constante (Normalmente introducido por el operador). Representando la altura de la punta (Z) frente a su posición sobre la muestra (X, Y) es posible trazar un mapa topográfico de la muestra $Z=Z(X, Y)$. La fuerza interatómica se puede detectar cuando la punta está muy próxima a la superficie de la muestra.

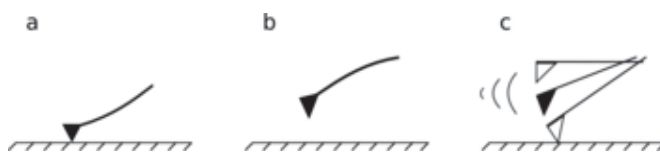


Figura 2.46. Modos de operación: a) modo contacto, b) modo de no contacto, c) modo de repiqueteo.

- ✚ En **medidas de fuerza** la punta se hace oscilar verticalmente mientras se registra la flexión del listón. La medida se expresa entonces representando fuerza (F) frente a altura (Z) sobre la muestra. Las medidas de fuerza son útiles en estudios de fuerzas de adhesión y permiten estudiar a nivel de una sola molécula interacciones específicas entre moléculas (ej: interacción antígeno-anticuerpo, interacción entre hebras complementarias de ADN) o interacciones estructurales de las biomoléculas (plegado de proteínas) así como caracterizar la elasticidad de polímeros. También es útil en estudios de indentación de materiales blandos (polímeros) que permitan caracterizar propiedades elásticas de la muestra como el módulo de elasticidad o viscoelásticas.

B. MICROSCOPIA DE TUNELAMIENTO STM

La técnica de microscopía de tunelamiento STM emplea un voltaje aplicado entre la muestra y una punta conductora como se observa en la Figura 2.47. Cuando existe una separación de $\sim 10 \text{ \AA}$ entre ellas, se observa la corriente generada por el tunelamiento de los electrones. Esta corriente varía como función de la distancia punta-muestra y es la señal usada para generar una micrografía.

El STM es una técnica altamente sensitiva debido a la relación exponencial entre la corriente de tunelamiento y la distancia punta-muestra. Con esta técnica se monitorea una muestra en modo de altura constante o corriente constante.

En el modo de altura constante, la punta se desplaza sobre un plano horizontal en la muestra y la corriente resultante varía como función de la topografía y de sus propiedades electrónicas en la superficie. De tal forma que la corriente medida en el detector es empleada para generar la imagen tridimensional de la muestra.

Para trabajar en el modo de corriente constante, primero se emplea el modo de altura constante para establecer el intervalo de trabajo. Después, se miden las variaciones de la distancia entre la punta y la muestra en el detector para generar la imagen tridimensional.

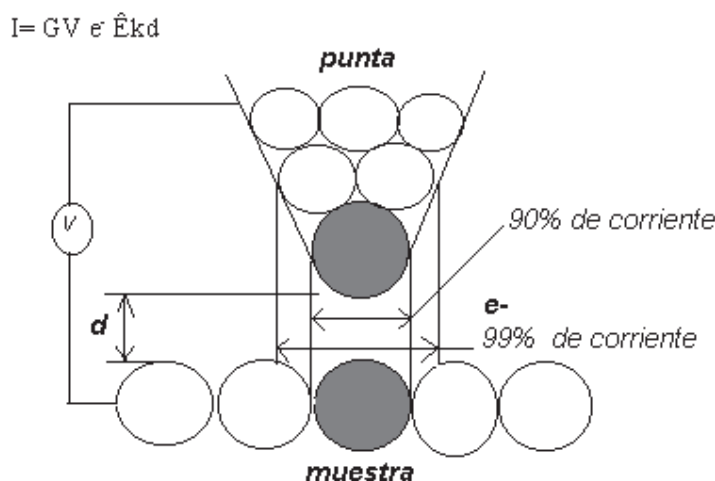


Figura 2.47. Interacción entre la punta y la muestra empleando microscopía de tunelamiento STM.

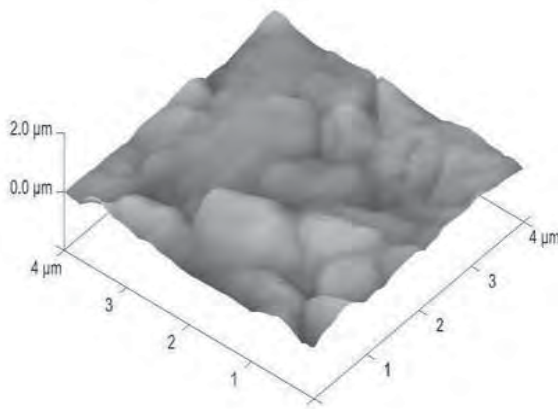
APLICACIONES DEL AFM EN LA CIENCIA DE LOS MATERIALES

La aplicación de las técnicas de SPM en la investigación de las propiedades (viscoelasticidad y dureza) y la microestructura de los materiales permite obtener imágenes con resolución del orden de los nanómetros. Además, estas técnicas proporcionan imágenes tridimensionales que permiten cuantificar la profundidad y morfología de las muestras [42].

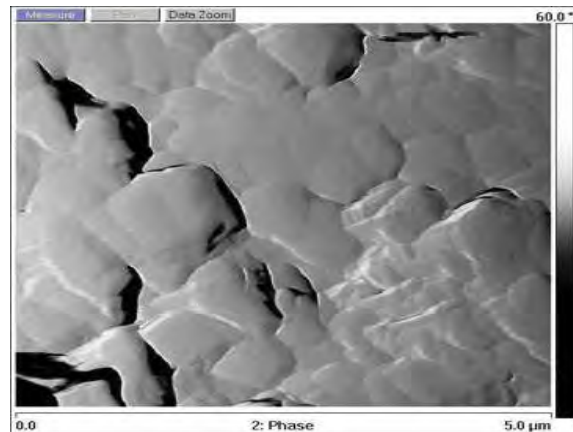
Las Figuras 2.48 a 2.49 muestran las micrografías que se obtuvieron con un Microscopio de Fuerza Atómica Nanoscope IV de Digital Instruments en modo Tapping usando puntas de nitruro de silicio.

En la Figura 2.48 se muestran las micrografías de un polímero depositado en un sustrato de vidrio. La Figura 4. a) proporciona información topográfica de la superficie conocida como su microestructura y las mediciones de altura del depósito. En la Figura 4. b) se muestra la imagen de contraste de fases para la misma muestra, la cual proporciona información cualitativa del grado de dureza de la superficie.

Las Figuras 2.49 a y b muestran las micrografías obtenidas de un cerámico que corresponden a la imagen de contraste de fases y amplitud que proporcionan información acerca de la homogeneidad y dureza de la superficie de la muestra. Las Figuras 2.50 a y b corresponden a la imagen obtenida de una fibra de Nylon 6, 12 que proporcionan información morfológica y dureza de la superficie de la muestra.

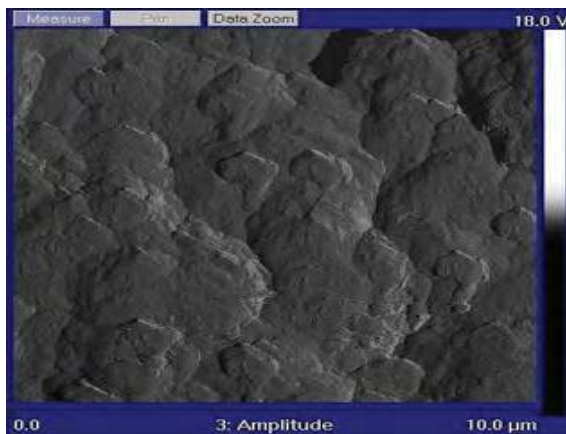


a) Morfología de un polímero.

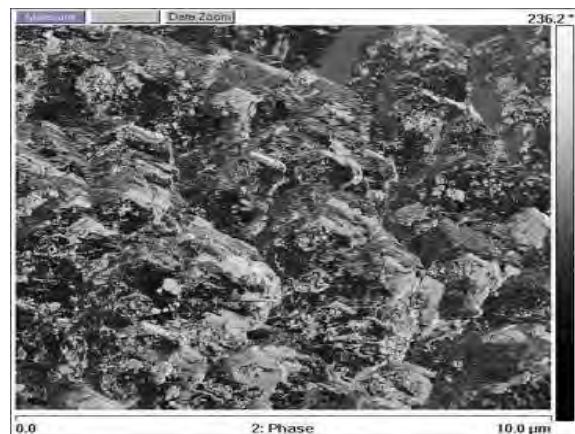


b) Contraste de fases de un polímero.

Figura 2.48. Micrografía de un polímero depositado sobre un vidrio empleando el modo Tapping.



a) Contraste de fases de un cerámico.



b) Amplitud de un cerámico.

Figura 2.49. Micrografía de un cerámico empleando el modo Tapping.

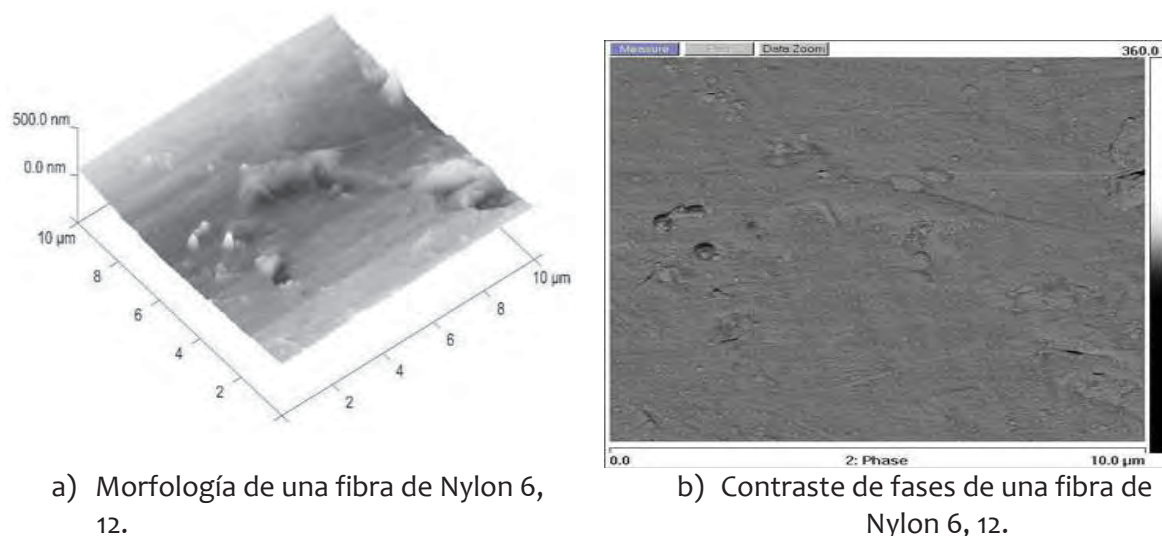


Figura 2.50. Micrografía de una fibra de Nylon 6,12 en modo Tapping

Como ya hemos dicho anteriormente, en el AFM las fuerzas mecánicas que hay entre la punta y una muestra cualquiera, colocadas a una distancia nanométrica, son el parámetro que el microscopio mide y utiliza en su realimentación. Se trata de un instrumento muy versátil para estudiar estructuras y medir las fuerzas superficiales sobre una muestra del material.

La información sobre la superficie bajo examen se recoge a través de una punta muy delgada montada en el extremo de una varilla elástica. La punta sensible transmite la fuerza que se ejercita entre la misma y los átomos o moléculas de la superficie de la muestra cuando aquella se mueve hacia arriba y hacia abajo sobre ésta última, detectando su rugosidad, y este movimiento puede ser medido con extrema precisión por medio de, por ejemplo, un haz láser reflejado por un espejo pequeño colocado sobre la punta y recogido por un elemento sensible (fotodiodo). Los datos procesados permiten reconstruir la estructura superficial en la dirección vertical, z. Una pequeña unidad que contiene un cristal piezoeléctrico, del tipo de las antiguas cápsulas con la púa de los tocadiscos, permite detectar la estructura horizontal de la superficie, en función de las ordenadas x e y. Se puede obtener así, con resolución nanométrica, la topografía de una muestra en una escala que varía desde 100 hasta 150,000 nm (0.15 mm), pudiéndose lograr resoluciones del orden de 1 nm.

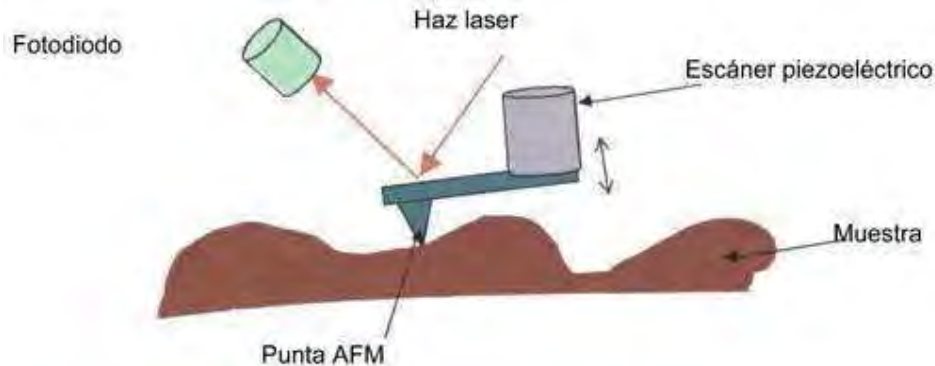


Figura 2.51: Esquema que representa a la punta del AFM escaneando sobre una muestra. Esta punta está fija a una varilla elástica. Sobre esta varilla incide un haz láser que se refleja en un fotodiodo. Cuando la punta sigue la superficie de la muestra, la varilla se mueve y esto hace que el reflejo del haz láser dibuje este movimiento en el fotodiodo. Esta información se utiliza después para transformarse en un dibujo de la topografía de la muestra.

El AFM puede trabajar en el aire, bajo vacío o en medio líquido (para muestras biológicas), y analizar tanto materiales aislantes como conductores de la electricidad. Generalmente puede trabajar en los modos antes mencionados. En el Contact Mode la punta está en contacto con la muestra. Este método es en principio el único con el que se puede obtener imágenes con resolución atómica, además es el más adecuado cuando las muestras presentan una superficie irregular, sobre todo verticalmente. Por el contrario, las fuerzas normales a la interacción punta-muestra pueden llegar a ser muy altas debido a fuerzas de capilaridad que aparecen procedente de la capa adsorbida de vapor de agua que existe en la superficie de la muestra.

En el Non-Contact Mode la punta de la varilla elástica se mantiene a una distancia pequeña de la muestra (entre 5nm y 15nm). La varilla elástica empieza a oscilar y cuando se aproxima a la muestra, la frecuencia de vibración de la misma varía como consecuencia de las fuerzas de atracción entre la punta y la muestra. La imagen resultante es una reconstrucción de esta variación en la frecuencia de oscilación. En este modo, si bien se evitan daños a la muestra debido a la adherencia entre la punta y la superficie, se tiene una resolución menor respecto a los otros dos modos. Finalmente, en el Tappin Mode la varilla se mantiene en oscilación, y la punta está en contacto en forma intermitente con la superficie, lo que permite tener una información topográfica de alta resolución en el caso de muestras blandas o adhesivas. En este caso la varilla se pone a oscilar a su frecuencia de resonancia, que suele estar comprendida entre los 50 KHz y los 400 KHz. La punta toca a la muestra intermitentemente. El parámetro que se mide es la amortiguación que sufre la amplitud de vibración cuando la punta toca la superficie de la muestra.

Con todos estos modos, además de obtener una imagen de la topografía de la superficie de la muestra, es posible obtener, al mismo tiempo y en escala nanométrica, un mapa cualitativo de la fricción, de la dureza y de la adhesión, informaciones complementarias que completan la imagen topográfica (por ejemplo, individualizando los distintos componentes en un material compuesto o la presencia de contaminantes en su superficie). Modelando adecuadamente los fenómenos de fricción, dureza y adhesión en

escala micrométrica y nanométrica, y caracterizando las propiedades mecánicas de la varilla, resulta posible obtener una información cuantitativa sobre estos fenómenos. Ello puede ser útil, por ejemplo, para estudiar el estado de una pieza mecánica antes y después de su uso, poniendo en evidencia los fenómenos incipientes de desgaste que ha experimentado.

También resulta posible reconstruir el mapa de las propiedades magnéticas de la muestra, lo que encuentra aplicación en los dispositivos magnéticos para el almacenamiento de datos.

La muestra a analizar fue labrada al igual como se realizó para la caracterización SEM, obteniendo un espécimen de aproximadamente 1 cm^3 , pulido en acabado espejo. El microscopio de fuerza atómica utilizado para el análisis fue un equipo CYPHER de la casa ASYLUM [44].



Figura 2.52. Microscopio de Fuerza Atómica, CYPHER. (ASYLUM RESEARCH).

2.5.6 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA, IES (RESISTIVIDAD-IMPEDANCIA)

Las técnicas electroquímicas son muy importantes para la evaluación del deterioro del material analizado; existe diversidad de técnicas pero las más utilizadas son las no destructivas tales como LPR y EIS [43].

La Espectroscopia Electroquímica de Impedancias (EIS), consiste en la aplicación de un potencial eléctrico de frecuencia variable al material estudiado y en la medición en el campo complejo de la intensidad resultante. Esta técnica ofrece la posibilidad de detectar las regiones que son dominadas por elementos resistivos tales como Resistencia a la solución (R_{Ω}) y la resistencia a la polarización (R_p).

En otras palabras la espectroscopia de impedancias está basada en la posibilidad de separar las diferentes contribuciones a la respuesta de impedancia de un material, mediante la medición de dicha respuesta en un intervalo amplio de frecuencias. A muy bajas frecuencias, en las que todos los procesos de polarización contribuyen a la impedancia, el valor total de ésta corresponde a la suma de todos los procesos.

A medida que la frecuencia de excitación aumenta, los procesos de polarización más lentos (con una constante de tiempo τ más grande) dejan de ser capaces de seguir al campo, y por tanto, dejan de contribuir al valor total de la impedancia. A altas frecuencias, sólo los procesos con una dinámica muy rápida subsisten. Cuando un proceso deja de seguir al campo, se dice que ocurre una dispersión, y además de tener una frecuencia característica, puede ocurrir también que tenga un carácter bien definido. En muchos casos, el carácter de la dispersión puede ser de gran ayuda para el estudio del proceso de polarización que se investiga. Los dos procesos de dispersión más simples son la relajación y la resonancia [43].

Esta técnica es un método electroquímico utilizados en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo y determinando la respuesta correspondiente.

Revista cubana de física 202 – caracterización de materiales por espectroscopia de impedancias. Raúl Valenzuela, Instituto de Investigaciones en materiales, UNAM.

El procedimiento experimental más comúnmente usado, es cuando se aplica una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial – tiempo y corriente – tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondiente a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina “espectro de impedancias”.

En el caso de estudios de corrosión que utilizan la técnica de EIS, los espectros de impedancia obtenidos suelen ser analizados mediante circuitos eléctricos, compuestos por componentes tales como resistencias (R), capacitancias (C), inductancias (L), etcétera.

Combinados de tal manera que produzcan los espectros de impedancia medidos. Estos circuitos eléctricos son denominados “circuitos eléctricos equivalentes”.

La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica (R), utilizado en circuitos de corriente alterna (CA). En un circuito de corriente directa (CD) la relación entre la corriente (I) y el potencia (E) esta dada por la ley de ohm.

$$E = IR$$

En donde E es en volts, I en amperes y R en ohms. En el caso de una señal alterna la expresión equivalente es la siguiente.

$$E = IZ$$

En esta ecuación Z representa la impedancia del circuito, con unidades de ohm. Es necesario hacer notar que a diferencia de la resistencia, la impedancia de un circuito de CA depende de la frecuencia de la señal que sea aplicada. La frecuencia (f) de un sistema de CA se expresa en unidades de hertz (Hz) o números de ciclos por segundo (s^{-1}).

De esta manera, es posible definir la admitancia (Y) de un circuito de CA. La admitancia es el recíproco de la impedancia y es un parámetro de importancia en los cálculos matemáticos que involucra la técnica y por otra parte, los equipos usados en estudios de EIS miden en realidad la admitancia.

$$Y = 1 / Z = 1 / E$$

La impedancia de un sistema a cada frecuencia esta definida por, la razón entre la amplitud de la señal de corriente alterna y la amplitud de la señal de potencial alterno y el ángulo de fase. Un listado de estos parámetros a diferentes frecuencias constituye el “espectro de impedancia” [45].

La instrumentación básica, que permite obtener los espectros de impedancia de un sistema electroquímico, está constituida por un generador/analizador de funciones (conocido como FRA por sus siglas en ingles “frequency response alalyser”) el cual puede analizar o aplicar señales sinusoidales, en un amplio intervalo de frecuencias, empleando un potencióstato de alta velocidad de respuesta y sensibilidad (Figura 342). El potencióstato aplica la señal sinusoidal correspondiente al electrodo de trabajo en la celda electroquímica. La respuesta del electrodo medida por el potencióstato es alimentada por un analizador de funciones digital el cual determina la respuesta de impedancia y el ángulo de fase correspondiente a cada frecuencia estudiada. No obstante, es posible utilizar un potencióstato manual, de manera general, la captura o registro de los datos, el almacenamiento y la manipulación de los mismos se efectúa en una computadora.

Las muestras objeto de esta prueba fueron elaboradas en moldes de circulares de aproximadamente 1.5 cm por .5 cm de espesor, tal y como se muestra en la siguiente figura. El equipo utilizado para la medida de IES fue un 434.



Fotografía 2.8. a y b. Preparacion de muestras para caracterizacion a través de IES.



Fotografía 2.9. a y b. Muestras y equipo utilizado para caracterizacion a través de IES

2.5.7 ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ULTRAVIOLETA VISIBLE, UV – Vis

La **espectrometría ultravioleta-visible** o espectrofotometría UV-Vis implica la espectroscopia de fotones en la región de radiación ultravioleta-visible. Utiliza la luz en los rangos visible y adyacentes (el ultravioleta (UV) cercano y el infrarrojo (IR) cercano. La radiación absorbida por las moléculas desde esta región del espectro provoca transiciones electrónicas que pueden ser cuantificadas.

En esta región del espectro electromagnético, las moléculas se someten a transiciones electrónicas.

PRINCIPIO FÍSICO

El principio de la **espectroscopia ultravioleta-visible** involucra la absorción de radiación ultravioleta – visible por una molécula, causando la promoción de un electrón de un estado basal a un estado excitado, liberándose el exceso de energía en forma de calor. La longitud de onda (λ) comprende entre 190 y 800 nm.

La luz visible o UV es absorbida por los electrones de valencia, éstos son promovidos a estados excitados (de energía mayor). Al absorber radiación electromagnética de una frecuencia correcta, ocurre una transición desde uno de estos orbitales a un orbital vacío. Las diferencias entre energías varían entre los diversos orbitales. Algunos enlaces, como los dobles, provocan coloración en las moléculas ya que absorben energía en el visible así como en el UV, como es el caso del β -caroteno.

Cuando un haz de radiación UV-Vis atraviesa una disolución conteniendo un analito absorbente, la intensidad incidente del haz (I_0) es atenuada hasta I . Esta fracción de radiación que no ha logrado traspasar la muestra es denominada transmitancia (T) ($T = I/I_0$). Por aspectos prácticos, se utilizará la absorbancia (A) en lugar de la transmitancia ($A = -\log T$), por estar relacionada **linealmente** con la concentración de la especie absorbente según la Ley de Beer-Lambert: $A = \epsilon \cdot l \cdot c$ (ϵ : coeficiente de absortividad molar, l : camino óptico, c : concentración de la especie absorbente).

REGIONES DEL ESPECTRO ULTRAVIOLETA – VISIBLE

La región del espectro electromagnético que corresponde a las transiciones que involucran a electrones de la capa de valencia se extiende por longitudes de onda de 100 a 1000nm (regiones ultravioleta-visible e infrarroja cercana). No toda esta zona es de igual utilidad para la elucidación de estructuras orgánicas [39, 40, 41].

La región por debajo de los 200 nm, conocida como ultravioleta lejano, presenta características que hacen complicadas su utilización:

1. En esta zona absorben las moléculas componentes del aire, lo que hace imprescindible trabajar con equipos evacuados (de aquí el nombre de la región: Ultravioleta de vacío).

2. Los materiales usuales para la construcción de componente ópticos (celdas, lentes, elementos dispersivos), el cuarzo y el vidrio, absorben fuertemente esta zona. Se requiere trabajar con otros materiales, menos versátiles y más costosos (LiF, CaF₂, zafiro, utilizables hasta 115, 125 y 140 nm respectivamente).
3. Los solventes absorben fuertemente esta región. Los hidrocarburos saturados pueden usarse hasta 170 nm, los hidrocarburos perfluorados hasta 150 nm.
4. La sensibilidad de los detectores es generalmente baja.
5. La absorción en esta zona es poco selectiva. Casi todos los compuestos presentan absorción en esta región.

La región entre 200 y 400 nm, llamada Ultravioleta cercana, es de gran utilidad en la determinación estructural de insaturación conjugada, aromaticidad o de ciertos grupos insaturados con pares electrónicos libres (carbonilo, nitro, etc.), sin presentar los serios inconvenientes del Ultravioleta de vacío. Se requieren materiales ópticos de cuarzo si se quiere acceder a la zona de longitudes de onda inferiores a 350 nm, mientras que el vidrio es utilizable en el resto de la región Ultravioleta cercana y toda la región visible [39, 40, 41].

La región Visible, de 400 hasta cerca de 800 nm, es la única del espectro electromagnético detectable por el ojo humano. Las transiciones que se presentan en esta zona corresponden a transiciones electrónicas de muy baja energía. Todos los compuestos coloreados absorben selectivamente en esta región. Los compuestos fuertemente conjugados y ciertos complejos de metales de transición absorben significativamente en la región.

Ciertas transiciones electrónicas pueden presentarse a longitudes de onda superiores a 800 nm pero estas no son comunes en los compuestos orgánicos. En la Figura 2.53 se muestra la región Ultravioleta Visible del espectro electromagnético, así como sus características.

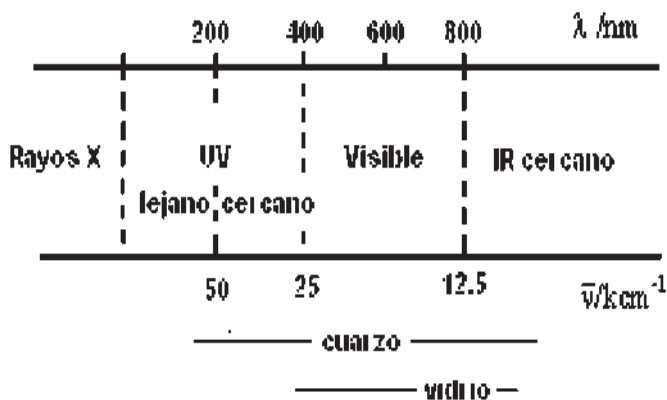


Figura 2.53. Región Ultravioleta-Visible.

APLICACIONES

La espectrometría UV-Vis se utiliza habitualmente en la determinación cuantitativa de soluciones de iones metálicos de transición y compuestos orgánicos muy conjugados.

Soluciones de iones metálicos de transición.

Las soluciones de iones metálicos de transición pueden ser coloreadas (es decir, absorben la luz visible) debido a que los electrones en los átomos de metal se pueden excitar desde un estado electrónico a otro. El color de las soluciones de iones metálicos se ve muy afectado por la presencia de otras especies, como algunos aniones o ligandos. Por ejemplo, el color de una solución diluida de sulfato de cobre es muy azul; agregando amoníaco se intensifica el color y cambia la longitud de onda de absorción máxima.

Compuestos orgánicos.

Los compuestos orgánicos, especialmente aquellos con un alto grado de conjugación, también absorben luz en las regiones del espectro electromagnético visible o ultravioleta. Los disolventes para estas determinaciones son a menudo el agua para los compuestos solubles en agua, o el etanol para compuestos orgánicos solubles. Los disolventes orgánicos pueden tener una significativa absorción de UV, por lo que no todos los disolventes son adecuados para su uso en espectrometría UV. El etanol absorbe muy débilmente en la mayoría de longitudes de onda. La polaridad y el pH del disolvente pueden afectar la absorción del espectro de un compuesto orgánico. La tirosina, por ejemplo, aumenta su máximo de absorción y su coeficiente de extinción molar cuando aumenta el pH de 6 a 13, o cuando disminuye la polaridad de los disolventes [39, 40, 41].

Aunque los complejos de transferencia de carga también dan lugar a colores, éstos son a menudo demasiado intensos para ser usados en mediciones cuantitativas.

La ley de Beer-Lambert establece que la absorbancia de una solución es directamente proporcional a la concentración de la solución. Por tanto, la espectrometría UV-VIS puede usarse para determinar la concentración de una solución. Es necesario saber con qué rapidez cambia la absorbancia con la concentración. Esto puede ser obtenido a partir de referencias (las tablas de coeficientes de extinción molar) o, con más exactitud, determinándolo a partir de una curva de calibración.

El espectrofotómetro UV-Vis puede utilizarse como detector para la Cromatografía Líquida de Alta Resolución (CLAR). La presencia de un analito da una respuesta que puede ser proporcional a la concentración. Para resultados precisos, la respuesta del instrumento al analito debe compararse con la respuesta a un estándar, lo que es muy similar al uso de curvas de calibración. La respuesta (por ejemplo, el pico de altura) para una concentración particular se conoce como factor de respuesta.

LEY DE BEER LAMBERT

La espectrometría UV-Vis se utiliza con mayor frecuencia en forma cuantitativa para determinar las concentraciones de especies absorbentes en solución, usando la Ley de Beer-Lambert:

$$A = -\log_{10}(I/I_0) = \epsilon \cdot c \cdot L$$

Donde A es la absorbancia medida, I_0 es la intensidad de la luz incidente a una determinada longitud de onda, I es la intensidad de transmisión, L la longitud de ruta a través de la muestra, y c la concentración de las especies absorbentes. Para cada especie y longitud de onda, ϵ es una constante conocida como absorptividad molar o coeficiente de extinción. Esta constante es una propiedad fundamental molecular en un solvente dado, a una temperatura y presión particular, y tiene como unidades $l/M \cdot cm$ o, a menudo, $U/M \cdot cm$.

La absorbancia y extinción a veces son definidas en términos de logaritmo natural en lugar de logaritmo de base 10.

La ley de Beer-Lambert es útil para la caracterización de muchos compuestos, pero no sirve como relación universal para la concentración y absorción de todas las sustancias. En moléculas complejas de gran tamaño, como los tintes orgánicos (Xylenol Naranja o Rojo Neutro, por ejemplo), a veces se encuentra una relación polinómica de segundo orden entre la absorción y la concentración.

ESPECTOFOTÓMETRO ULTRAVIOLETA-VISIBLE

El instrumento utilizado en la espectrometría ultravioleta-visible se llama espectrofotómetro UV-Vis. Mide la intensidad de luz que pasa a través de una muestra (I), y la compara con la intensidad de luz antes de pasar a través de la muestra (I_0). La relación I / I_0 se llama transmitancia, y se expresa habitualmente como un porcentaje (%T). La absorbancia (A) se basa en la transmisión:

$$A = -\log (\%T)$$

Las partes básicas de un espectrofotómetro son una fuente de luz (a menudo una bombilla incandescente para las longitudes de onda visibles, o una lámpara de arco de deuterio en el ultravioleta), un soporte para la muestra, una rejilla de difracción o monocromador para separar las diferentes longitudes de onda de la luz, y un detector. El detector suele ser un fotodiodo o un CCD. Los fotodiodos se usan con monocromadores, que filtran la luz de modo que una sola longitud de onda alcanza el detector. Las rejillas de difracción se utilizan con CCDs, que recogen la luz de diferentes longitudes de onda en píxeles.

Un espectrofotómetro puede ser único o de doble haz. En un instrumento de un solo haz (como el Spectronic 20), toda la luz pasa a través de la célula muestra. La I_0 debe medirse retirando la muestra. Este fue el primer diseño, y todavía está en uso en la enseñanza y laboratorios industriales.

En un instrumento de doble haz, la luz se divide en dos haces antes de llegar a la muestra. Un haz se utiliza como referencia, y el otro haz de luz pasa a través de la muestra. Algunos instrumentos de doble haz tienen dos detectores (fotodiodos), y el haz de referencia y el de la muestra se miden al mismo tiempo. En otros instrumentos, los dos haces pasan a través de un bloqueador que impide el paso de un haz. El detector alterna entre la medida del haz de muestra y la del haz de referencia.

Las muestras para espectrofotometría UV-Vis suelen ser líquidas, aunque la absorbancia de los gases e incluso de los sólidos también puede medirse. Las muestras suelen ser colocadas en una célula transparente, conocida como cubeta. Las cubetas suelen ser rectangulares, con una anchura interior de 1 cm. Esta anchura se convierte en la longitud de ruta, L , en la Ley de Beer-Lambert. También se pueden usar tubos de ensayo como cubetas en algunos instrumentos. Las mejores cubetas están hechas con cuarzo de alta calidad, aunque son comunes las de vidrio o plástico. El cristal y la mayoría de los plásticos absorben en el UV, lo que limita su utilidad para longitudes de onda visibles.

ESPECTRO ULTRAVIOLETA VISIBLE

Un espectro ultravioleta-visible es esencialmente un gráfico de absorbancia de luz frente a una longitud de onda en el rango del ultravioleta o la luz visible. Este espectro puede ser producido directamente con los espectrofotómetros más sofisticados, o bien pueden registrarse los datos de una sola longitud de onda con los instrumentos más simples. La longitud de onda se representa con el símbolo λ . Del mismo modo, para una determinada sustancia, puede hacerse un gráfico estándar del coeficiente de extinción (ϵ) frente a la longitud de onda (λ). Este gráfico estándar sería efectivamente "la concentración corregida" y, por tanto, independiente de la concentración. Para una sustancia determinada, la longitud de onda en la cual se produce el máximo de absorbancia en el espectro se llama λ_{max} , y se pronuncia "lambda-max" [39, 40, 41].

Las reglas de Woodward-Fieser son un conjunto de observaciones empíricas que pueden utilizarse para predecir λ_{max} , la longitud de onda de la absorción UV-Vis, para compuestos orgánicos conjugados como dienos y cetonas.

Las longitudes de onda de los picos de absorción pueden correlacionarse con los tipos de enlace en una determinada molécula, y son valiosos para determinar los grupos funcionales dentro de la molécula. La absorción UV-Vis no es, sin embargo, una prueba específica para ningún compuesto determinado. La naturaleza del disolvente, el pH de la solución, la temperatura, la concentración de electrolitos, y la presencia de sustancias interferentes pueden influir en los espectros de absorción de los compuestos, así como las variaciones en la anchura de la hendidura (ancho de banda efectivo) en el espectrofotómetro.

Para fines de esta investigación se elaboraron probetas cilíndricas de aproximadamente 3x3 cm con un espesor de 0.5 cm.

2.5.8 MEDIDA DE DUREZA: INDENTACIÓN VICKERS

Una de las técnicas más comunes en la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos es el ensayo de microdureza Vickers. En este tipo de ensayo, un penetrador que consta de una punta de diamante de geometría piramidal con un vértice de 136° (Figura 2.54) indenta la superficie pulida de la muestra por aplicación de una carga.

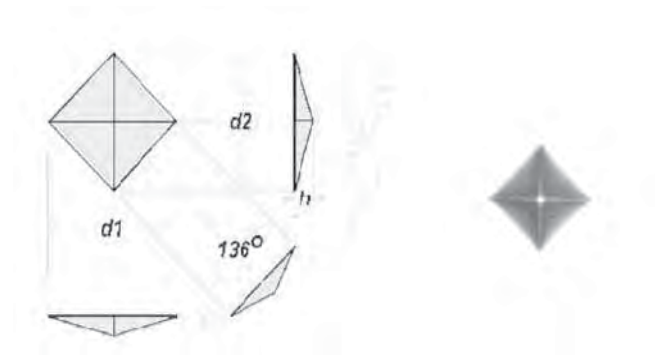


Figura 2.54. A la izquierda se presenta el esquema de un penetrador Vickers. A la derecha se puede observar una micrografía de una huella tras la indentación.

La marca resultante se observa al microscopio óptico donde se miden las diagonales d_1 y d_2 de la huella. La dureza Vickers H_v se calcula a partir de la carga aplicada P (en N) y las dimensiones de la huella d_1 y d_2 en m según la siguiente ecuación:

$$H_v = 1,8544 * (P/d^2)$$

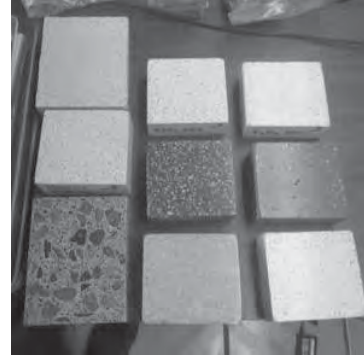
Donde:

P : Carga aplicada, N.

d : Media aritmética de las diagonales de la huella de indentación, mm

Los ensayos de dureza en los materiales cerámicos suelen presentar algunos problemas debido a su naturaleza frágil, que lleva a la formación de grietas que se propagan por debajo de la superficie e incluso a que el material se rompa bajo cargas de indentación altas, destruyendo la muestra. Esto ocurre debido a que se supera el límite elástico del material, produciéndose una deformación irreversible. Sin embargo, controlando la carga utilizada en el ensayo, es posible conseguir tanto huellas libres de grietas como grietas locales, que surgen de los vértices de la huella, a partir de las cuales es posible determinar la tenacidad [39, 40, 41].

El indentador Vicker utilizado para la obtención de las medidas de dureza fue un NANOVEA Series Vickers Hardness Tester. Los especímenes utilizados para la medición fueron elaborados en moldes de 10x10x10 cm colados hasta la mitad (especímenes de 10x10x5 cm) y con un pulido acabado espejo.



Fotografía 2.10. a y b. Especímenes pulidos para indentación Vicker.



Fotografía 2.11. Indentador Vicker utilizado para la obtención de la dureza del material.

2.5.9 DILATOMETRÍA

La dilatometría es una técnica termo-analítica utilizada para medir la expansión o contracción de los materiales durante su calentamiento o enfriamiento. Dicha técnica de información de cambios dimensionales sobre una amplia región de temperaturas (desde T ambiente hasta 2000 °C y en varios ambientes como por ejemplo atmósfera inerte, aire o vacío).

La variación de la expansión y/o contracción se representa frente a la temperatura representa en lo que se denomina, curva dilatométrica [39, 40, 41]. Esta representación no da información de la temperatura a la cuál un material ha completado la sinterización, es decir, ha terminado de contraer.

Para los materiales motivo de esta investigación se empleó un dilatómetro horizontal de la casa THETA INDUSTRIES modelo 3220 con capacidad de llegar hasta los 1600°C. La atmósfera de trabajo fue de aire y las muestras fueron sometidas a una temperatura de 600 °C, con excepción a la muestra NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 5%NEU, por el contenido de neumático en ella y por la posible contaminación del dilatómetro. Por tal motivo está se llevo a un incremento solamente de 100 °C. Los especímenes motivo de este estudio fueron labrados de una dimensión de 0.5x0.5 cm y una longitud de 1 cm.



Fotografía 2.12. a y b. Especímenes labrados para prueba de dilatometría.



Fotografía 2.13. a.



Fotografía 2.13. b.



Fotografía 2.13. c.

Fotografía 2.13. a, b y c. Dilatómetro THETA INDUSTRIES modelo 3220 empleado obtención de expansión-contracción.

3 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental de esta investigación es dividido en tres fases. La primera fase es donde se realizó la síntesis del nanocemento base y el comportamiento físico de este con otros compuestos; posterior a esto, en la segunda fase se procedió a la caracterización micro y nano estructural de los nanocompuestos seleccionados en la primera fase para llegar hasta una tercera fase en donde se agregaron otras composiciones así como agregados de granulometría mas gruesa; evaluándose sus propiedades físicas y mecánicas, de carácter macroestructurales (Módulos de elasticidad, relaciones de Poisson, Indentaciones) y así complementar las caracterizaciones micro y nano estructurales obtenidas en la primera fase y hacer una correlación de ellas para proponer su utilización en un producto sólido, una “Innovación Tecnológica”.

A continuación se presenta en forma detallada el proceso experimental, de los pasos más significativos, seguido en cada fase.

Primera Fase:

1. Síntesis del Nanocemento Base
2. Caracterización Física y Mecánica de Nanocementos Geopoliméricos a 9 días de edad y 45 días de edad.
 - Densidad
 - Absorción
 - Resistencia a la Compresión

Primera Fase:

1. Selección de Nanocementos Geopoliméricos con mejores propiedades y funcionalidades.
2. Caracterización Física y Mecánica de nanocementos geopoliméricos con y sin la adición de un hiperfluidificante a base de policarboxilatos y variando dimensiones de especímenes.
3. Incorporación de nuevas proporciones de materiales y nuevas composiciones con presumibles propiedades de carácter multifuncional.
4. Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) de nanocementos seleccionados de la Primera Fase.
5. Microscopia Electrónica de Transmisión en el Nanocemento Base.
6. Microscopia de Fuerza Atómica en una de las composiciones: Nanocemento Geopolimérico Ferro magnético.
7. Caracterización por Difracción de Rayos X (DRX.) en nanocementos seleccionados de la Primera Fase, con y sin la incorporación de policarboxilatos.
8. Caracterización por FTIR en nanocementos seleccionados de la primera fase.
9. Caracterización UV-Vis de nanocementos: primera fase y nuevas incorporaciones de compuestos.
10. Caracterización dilatométrica de nanocementos seleccionados por su funcionalidad.
11. Caracterización por IES en nanocementos seleccionados por su funcionalidad.

Tercera Fase.

1. Caracterización mecánica materiales seleccionados por su funcionalidad a 45 días de edad, variando e incorporando granulometría mas gruesa utilizando con incorporación de policarboxilatos.
2. Medida de la dureza mediante indentaciones tipo Vickers de nanoconcretos Geopoliméricos (nanocementos primera fase + materiales de granulometría mas gruesa).
3. Módulos de elasticidad y relaciones de Poisson en Nanoconcretos Geopolimericos.

Fase Final.

- Proposición para la utilización de Nanoconcretos Geopolimericos (materiales multifuncionales) en un producto sólido en la industria de la construcción, “Innovación Tecnológica”

4 SÍNTESIS DE NANOCEMENTO

Este punto, fue considerado para nosotros de mayor importancia y relevancia puesto que aquí es donde se obtuvo mediante la síntesis de nuestro producto los compuestos que presentaron mayores prestaciones, y en donde se estuvo trabajando en ello alrededor de un año. Esto debido a que como se ha mencionado se está trabajando en la innovación de un material mediante tecnología sistemas y conocimiento nuevo.

Se llegó a la conformación de nuestro material trabajando con diferentes mezclas de nanocemento haciendo una serie de corridas con diferentes composiciones, variando el contenido de material denominado para nosotros como “agregados”, obteniendo como resultado al final los mejores compuestos que fueron los que presentaron mejores características mediante la siguiente metodología:

- ✚ En recipientes herméticos y con una balanza con aproximación al centésimo de gramo se pesaron los diferentes materiales, tanto para la lechada de nanocemento base como de los agregados para la conformación del nanocemento geopolimérico, o nanoconcreto geopolimérico según fuera el caso.
- ✚ Una vez pesados, para la fabricación de la lechada de nanocemento base se procedió en primera instancia al desarrollo de la solución alcalina, mezclando los componentes de sílice, hidróxido de potasio e hiperfluidificante según fuera el caso en un agitador magnético; dejando reposar la solución alcalina alrededor de media hora por la reacción exotérmica que este procedimiento implica.



Fotografía 4.1. Pesaje de los diferentes agregados para la conformación de composiciones.



Fotografía 4.2. Nanopartículas de Sílice, hidróxido de potasio y óxido de aluminio para la conformación del nanocemento base.

- ✚ Una vez tenida la solución alcalina, se procedió a mezclarla hasta que quedara completamente sin evidencia de grumos con las nanopartículas de óxido de aluminio para obtener como resultado la lechada de nanocemento base.
- ✚ Obtenida esta lechada, que es la similar a la hecha con concreto tradicional, se procedió a mezclarla con los diferentes tipos de agregados hasta obtener una buena homogeneidad, observándose minuciosamente las características de trabajabilidad que presentaba cada compuesto, procediendo a registrar en la bitácora las anomalías e irregularidades en el desarrollo de su fabricación.



Fotografía 4.3. Mezcla de la solución alcalina en agitador magnético.



Fotografía 4.4. Mezcla de los componentes para la conformación de nanocemento geopolimérico.

- ✚ Una vez mezclados todos nuestros materiales, el resultado es la obtención de nuestro nanocemento o nanoconcreto geopolimérico que posteriormente se vertieron en moldes cúbicos de 5 centímetros y se desmoldaron a las 24 horas para ser almacenados y alcancen la edad requerida para sus diferentes evaluaciones, destacando que este material no necesita ser curado como en el caso del concreto tradicional hecho con cemento Portland.



Fotografía 4.5. Elaboración de especímenes en moldes de 5 x 5 x 5 cm.



Fotografía 4.6. Almacenaje de especímenes

Se realizaron varias corridas de diferentes materiales como se ha mencionado, variando las composiciones en cuanto a la solución base de nanocemento y los agregados utilizados. De estas composiciones se analizó la facilidad de trabajo en su fabricación, trabajabilidad, evaluaciones físicas y mecánicas; y se eligieron las que presentaron mayores prestaciones y características, que se analizarán y discutirán a continuación en el capítulo de resultados.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

5.1 PRIMERA FASE

En esta fase, se realizaron las caracterizaciones a través de pruebas físicas y mecánicas de nuestros diferentes nanomateriales geopoliméricos sintetizados, obtenidos variando diferentes composiciones de agregados; desarrollándose en esta fase un total de 6 compuestos, de los cuales se realizaron 3 especímenes de 5x5x5 cm cada uno:

Tabla 5.1. Lista de Compuestos Primera Fase.

Compuestos	Formulación
Nanocemento GP – 150%MAR TI	Nanocemento Base + Agregado 1 Agregado 1 = 150% Marmolina Tipo I
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 5%MICA	Nanocemento Base + Agregado 2 Agregado 2 = 100% Marmolina Tipo I + 5% Mica
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 5%WOLLAS	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 100% Marmolina Tipo I + 5% Wollastonita
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 5%MICA , 5%WOLLAS	Nanocemento Base + Agregado 4 Agregado 4 = 100% Marmolina Tipo 1 + 5% Mica + 5% Wollastonita
Nanocemento GP – 40%OXIFe , 40%POMEX	Nanocemento Base + Agregado 5 Agregado 5 = 40% Óxido de Hierro + 40% Pomex
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 30%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 6 Agregado 6 = 100% Marmolina Tipo I + 30% Óxido de Hierro

A continuación se presentan sus resultados físicos y mecánicos de cada composición de cada compuesto.

5.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 9 DÍAS DE EDAD

5.1.1.1 ABSORCIÓN

La determinación de la propiedad de **absorción** se realizó primeramente dejando que los tres especímenes de cada compuesto geopolimérico quedaran completamente secos en un horno a 40°C por 24 horas, pesándolos posteriormente y registrando su peso como “peso seco”. Consecutivamente se procedió a dejar saturar en agua los especímenes durante 24 horas, secándolos superficialmente después del anterior procedimiento, pesándolos y registrando su peso húmedo. El cálculo de la absorción para cada espécimen se realizó con la siguiente expresión:

$$A = (Ph - Ps) / Ps * 100$$

Donde:

A = Absorción en %,

Ph = Peso húmedo en gr,

Ps = Peso seco en gr.



Fotografía 5.1. Secado de especímenes.



Fotografía 5.2. Saturación de especímenes en agua.

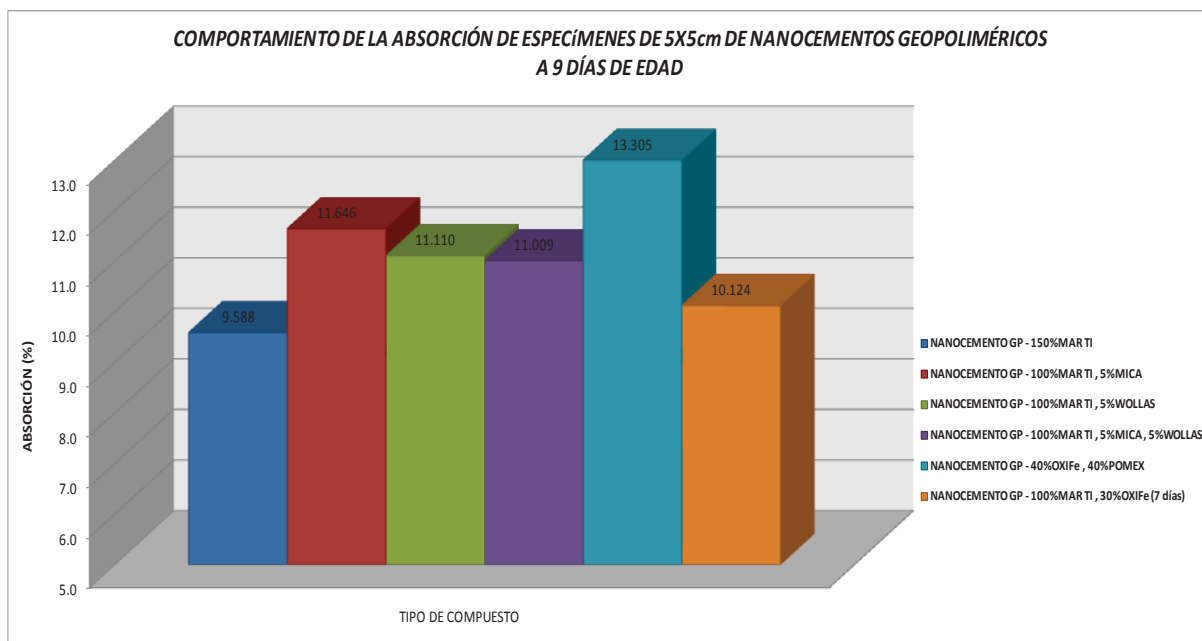


Figura 5.1. Comportamiento de la absorción de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 9 días de edad.

5.1.1.2 DENSIDAD

Una vez obtenidos los pesos secos y húmedos de los especímenes de Nanocementos Geopoliméricos, mediante el procedimiento descrito anteriormente se procedió a calcular la **densidad** de estos mediante la siguiente expresión:

$$D = Ps/V * 100$$

Donde:

D = Densidad en gr/cm³

Ps = Peso seco en gr,

V = Volumen del espécimen en cm³ (125 cm³ para nuestro caso por ser especímenes de 5x5x5 cm).

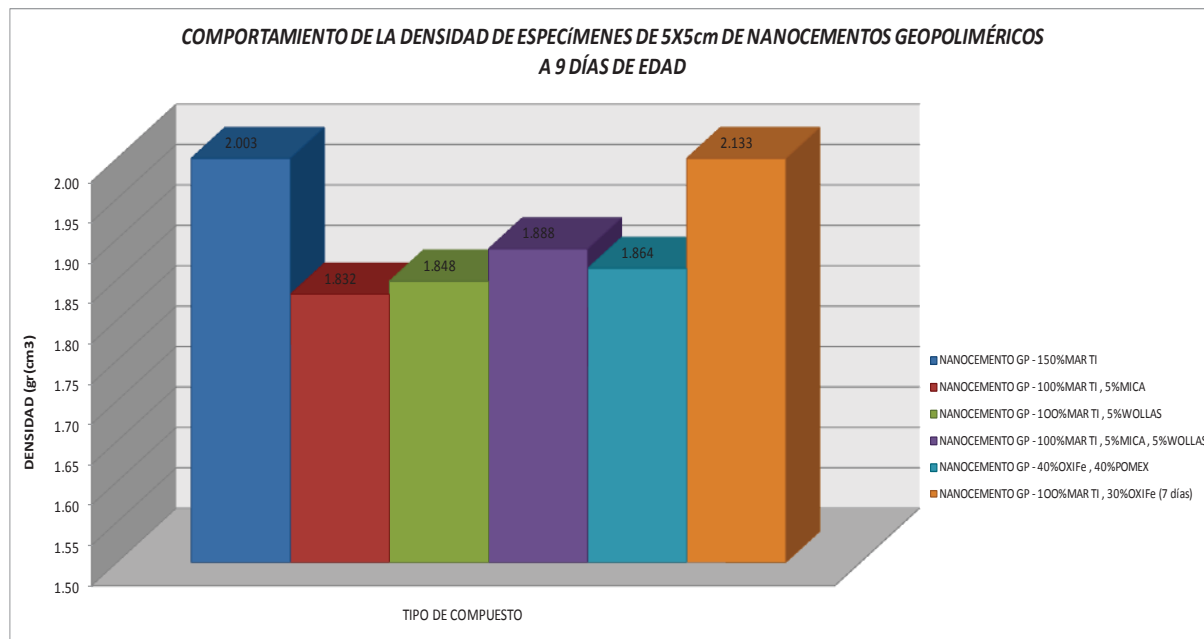


Figura 5.2. Comportamiento de la densidad de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 9 días de edad.

5.1.1.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La determinación de la **resistencia a compresión** se realizó sometiendo los especímenes de Nanocementos Geopoliméricos a carga axial, tal como lo muestran las Fotografías siguientes, aplicando la siguiente expresión:

$$\sigma = P / A$$

Donde

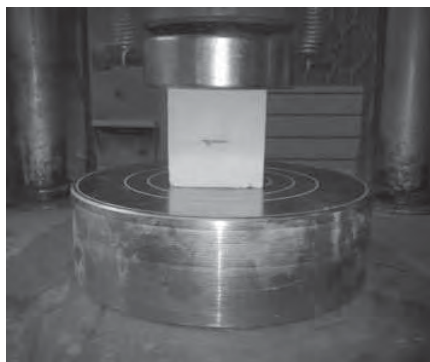
σ = Esfuerzo a compresión en MPa,

P = Carga de ruptura en lb/plg²,

A = Área del espécimen en plg². (25 cm² para nuestro caso por ser especímenes de 5x5x5 cm).



Fotografía 5.3. Prensa utilizada para la determinación de la resistencia a compresión.



Fotografía 5.4 a.



Fotografía 5.4 b.

Fotografía 5.4 a y b. Especimen de Nanocemento GP – 150%MAR TI, antes y después de someterlo a carga axial.



Fotografía 5.5 a.



Fotografía 5.5 b.

Fotografía 5.5 a y b. Especimen de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIfe antes y después de someterlo a carga axial.

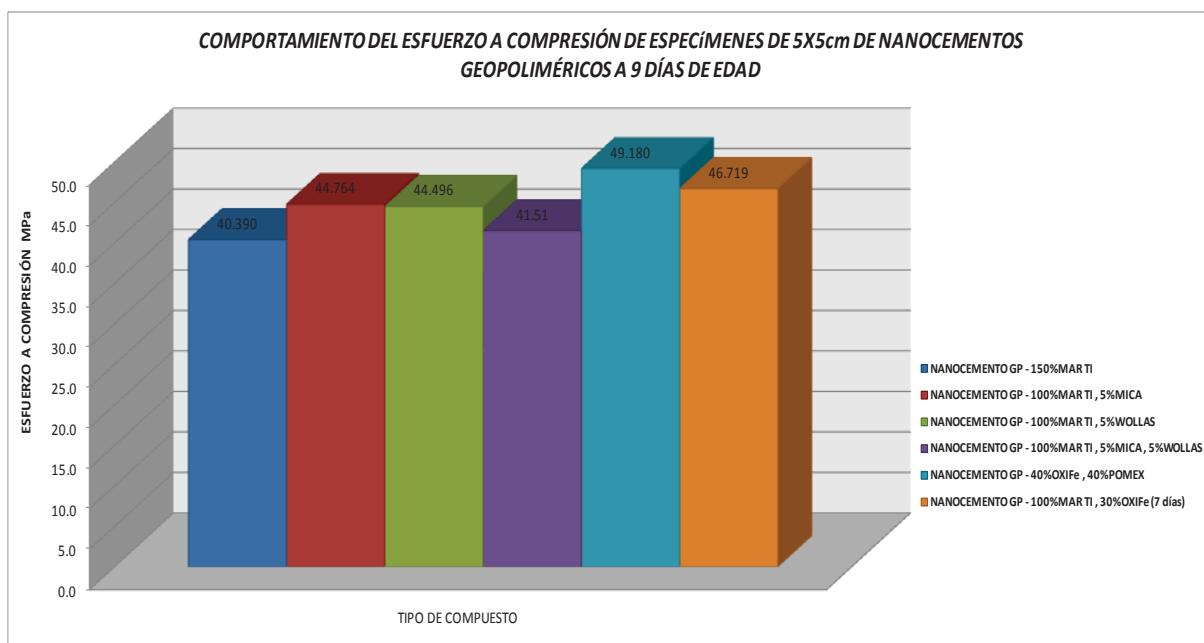


Figura 5.3. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 9 días de edad.

5.1.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 45 DÍAS DE EDAD

La obtención de la Absorción, Densidad y Resistencia a la compresión para especímenes de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad se hicieron conforme al procedimiento descrito en los subcapítulos 5.1.1.

5.1.2.1 ABSORCIÓN

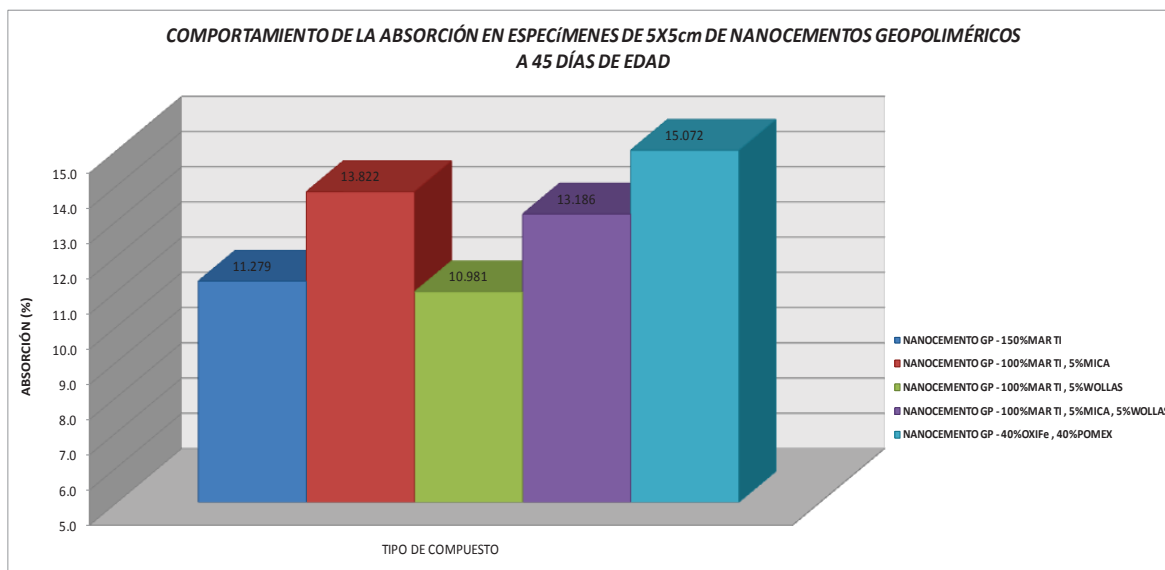


Figura 5.4. Comportamiento de la absorción de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad.

5.1.2.2 DENSIDAD

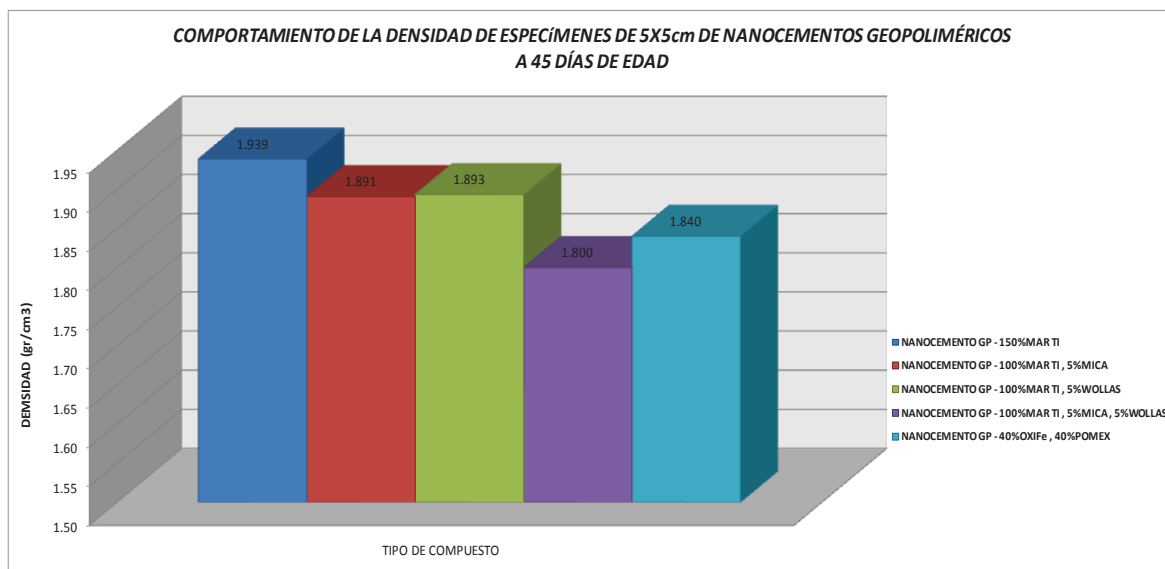


Figura 5.5. Comportamiento de la densidad de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad.

5.1.2.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

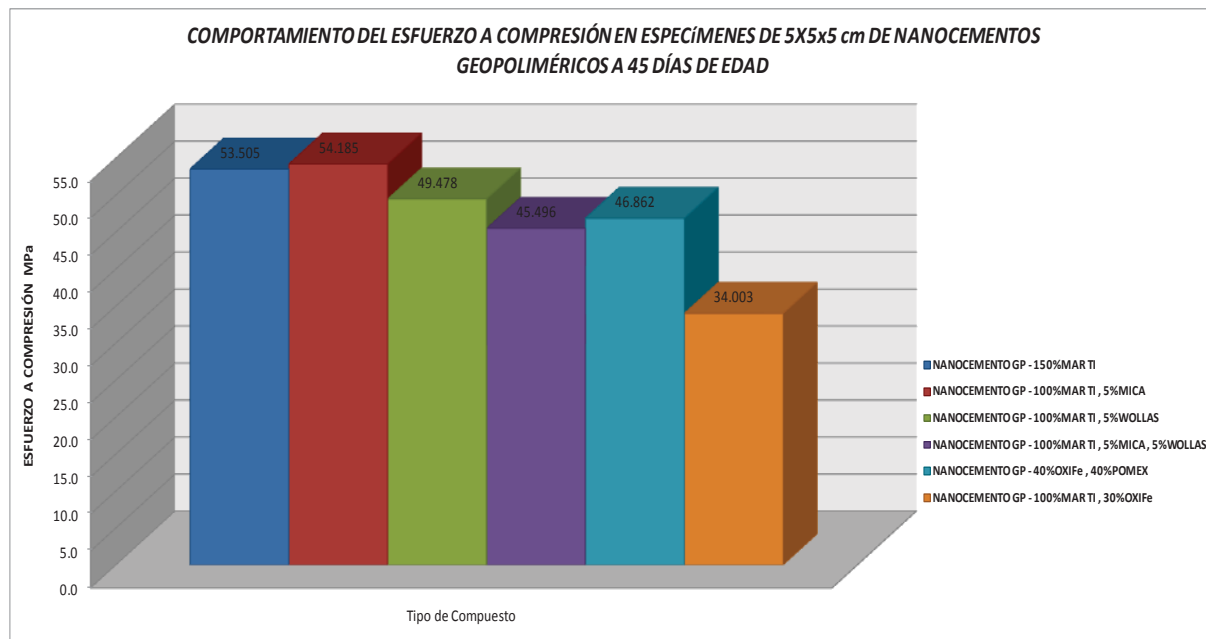


Figura 5.6. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad.

Como se puede observar en los gráficos el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas en los nanocementos, considerados como preliminares, se comportaron de manera satisfactoria obteniendo por ejemplo resistencias mecánicas a la compresión de alrededor de 40MPa para las diferentes composiciones de nanocementos geopoliméricos.

5.2 SEGUNDA FASE.

De los resultados obtenidos de las caracterizaciones como absorciones, densidades, resistencias y trabajabilidad de los 6 compuestos Geopoliméricos evaluados en la fase anterior, “primera fase”, se concluyó y procedió a elegir solamente 3 de ellos que fueron los que presentaron mejores prestaciones; observándose y recalando que no solo se eligieron los que presentaron mejores resultados, ya que algunos compuestos aunque presentaron buenas propiedades mecánicas, presentaban dificultades en su fabricación; como su dificultad en el mezclado por su baja trabajabilidad.

De estos tres compuestos se realizaron dos ciclos de 15 especímenes de 5x5x5 cm, probados en un promedio a 60 días de edad y en donde se agregó otra variable que es el Hiperfluidificante para darle mayor trabajabilidad, adicionándosele éste solamente a un ciclo de 15 especímenes obteniéndose de ellos los siguientes resultados:

Tabla 5.2. Lista de Compuestos Segunda Fase.

Compuestos	Formulación
Nanocemento GP – 150%MAR TI	Nanocemento Base + Agregado 1 Agregado 1 = 150% Marmolina Tipo I + con y sin Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 5%WOLLAS	Nanocemento Base + Agregado 2 Agregado 2 = 100% Marmolina Tipo I + 5% Wollastonita + son y sin Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 30%OXIFE	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 100% Marmolina Tipo I + 30% Óxido de Hierro + con y sin Hiperfluidificante

A continuación se presentan sus resultados físicos y mecánicos de cada compuesto:

5.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 60 DÍAS DE EDAD, SIN HIPERFLUIDIFICANTE

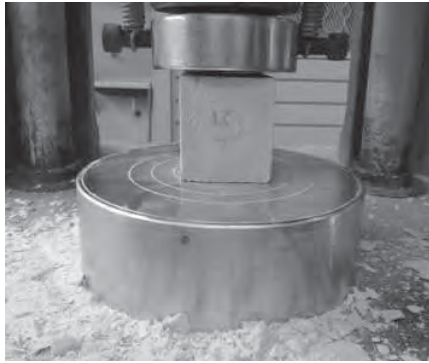
La caracterización física y mecánica en estos dos ciclos de 15 especímenes se hizo conforme al procedimiento del subcapítulo 5.5.1.



Fotografía 5.6. a.



Fotografía 5.6. b.



Fotografía 5.6. c.



Fotografía 5.6. d.

Fotografía 5.6. a, b, c y d. Especímenes de Nanocemento GP – 150%MAR TI con y sin hiperfluidificante antes y después de someterlos a carga axial.



Fotografía 5.7. Modos de falla en especímenes de Nanocemento GP – 150%MAR TI con y sin hiperfluidificante después de someterlos a carga axial.



Fotografía 5.8. a.



Fotografía 5.8. b.



Fotografía 5.8. c.



Fotografía 5.8. d.

Fotografía 5.8. a, b, c y d. Especímenes de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS con y sin hiperfluidificante antes y después de someterlos a carga axial.



Fotografía 5.9. Modos de falla en especímenes de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS con y sin hiperfluidificante después de someterlos a carga axial.



Fotografía 5.10. a.



Fotografía 5.10. b.



Fotografía 5.10. c.



Fotografía 5.10. d.

Fotografía 5.10. a, b, c y d. Especímenes de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe con y sin hiperfluidificante antes y después de someterlos a carga axial.



Fotografía 5.11. Modos de falla en especímenes de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe con y sin hiperfluidificante después de someterlos a carga axial.

5.2.1.1 ABSORCIÓN

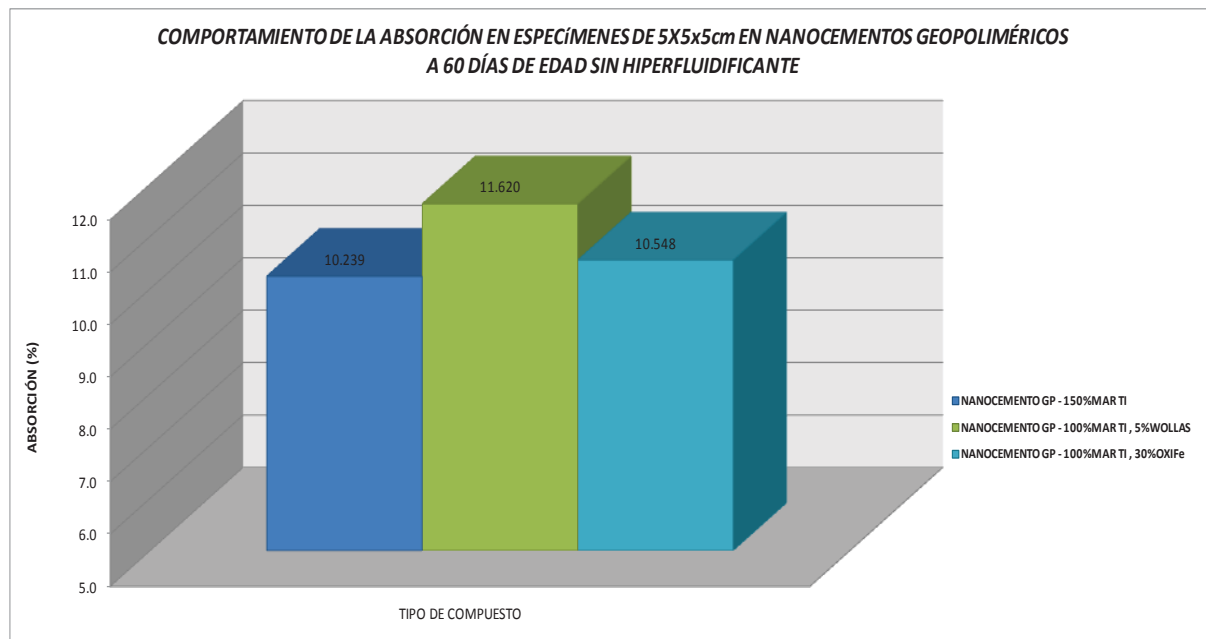


Figura 5.7. Comportamiento de la absorción de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Sin Hiperfluidificante – Segunda Fase.

5.2.1.2 DENSIDAD

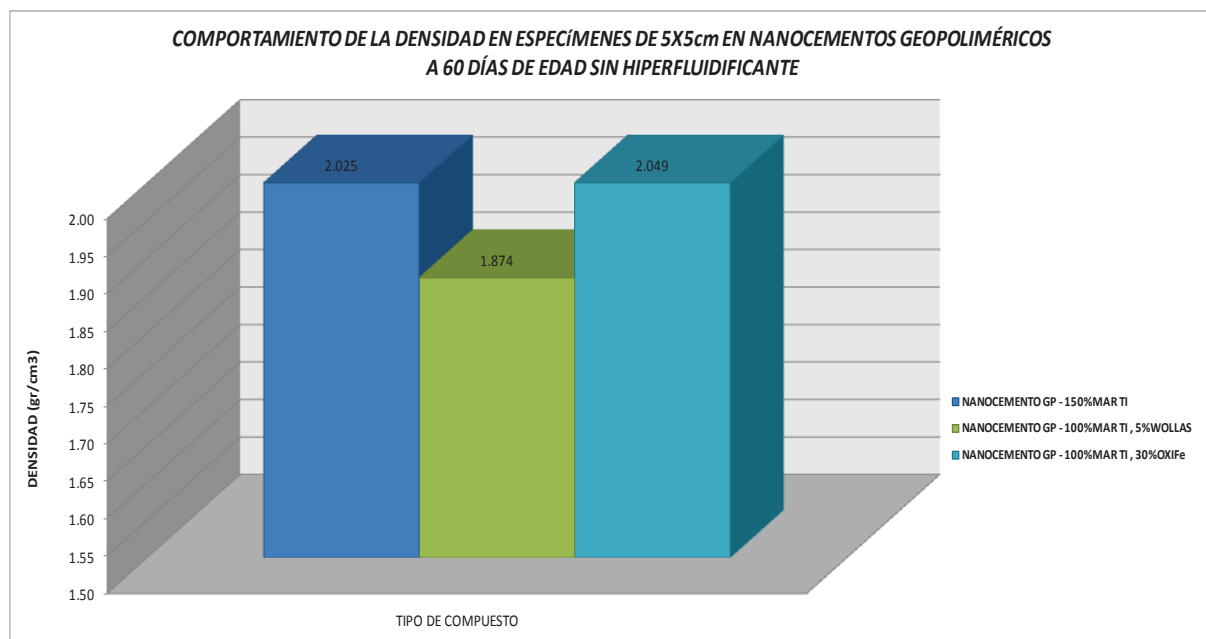


Figura 5.8. Comportamiento de la densidad de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Sin Hiperfluidificante – Segunda Fase.

5.2.1.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

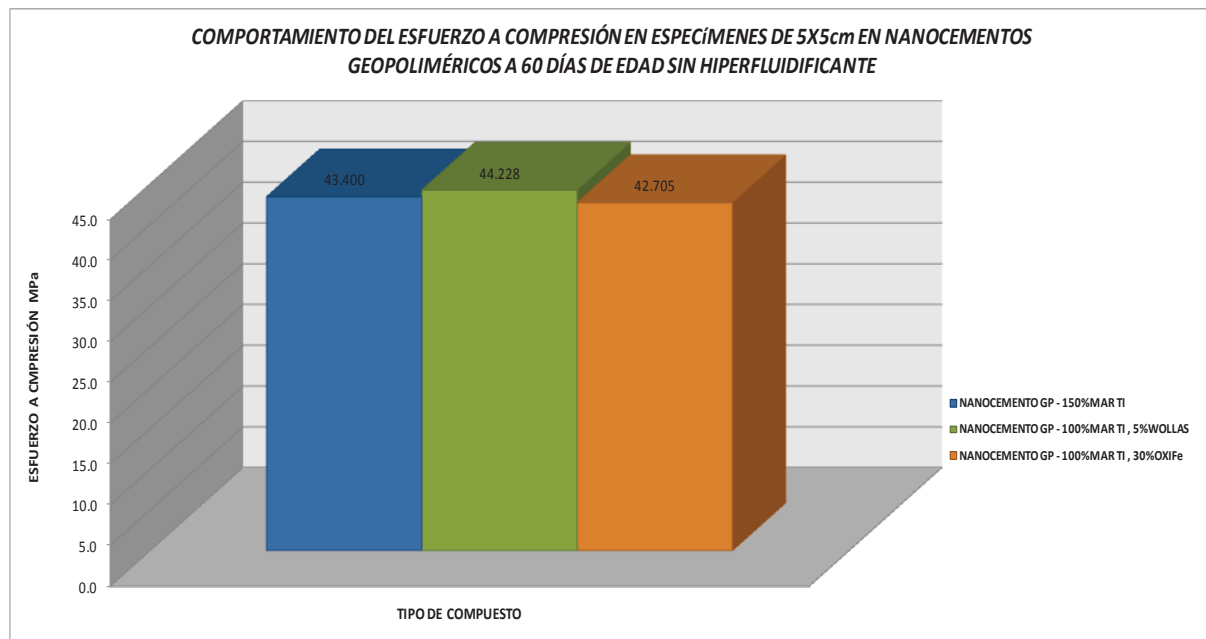


Figura 5.9. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Sin Hiperfluidificante – Segunda Fase.

5.2.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 60 DÍAS DE EDAD, CON HIPERFLUIDIFICANTE

5.2.2.1 ABSORCIÓN

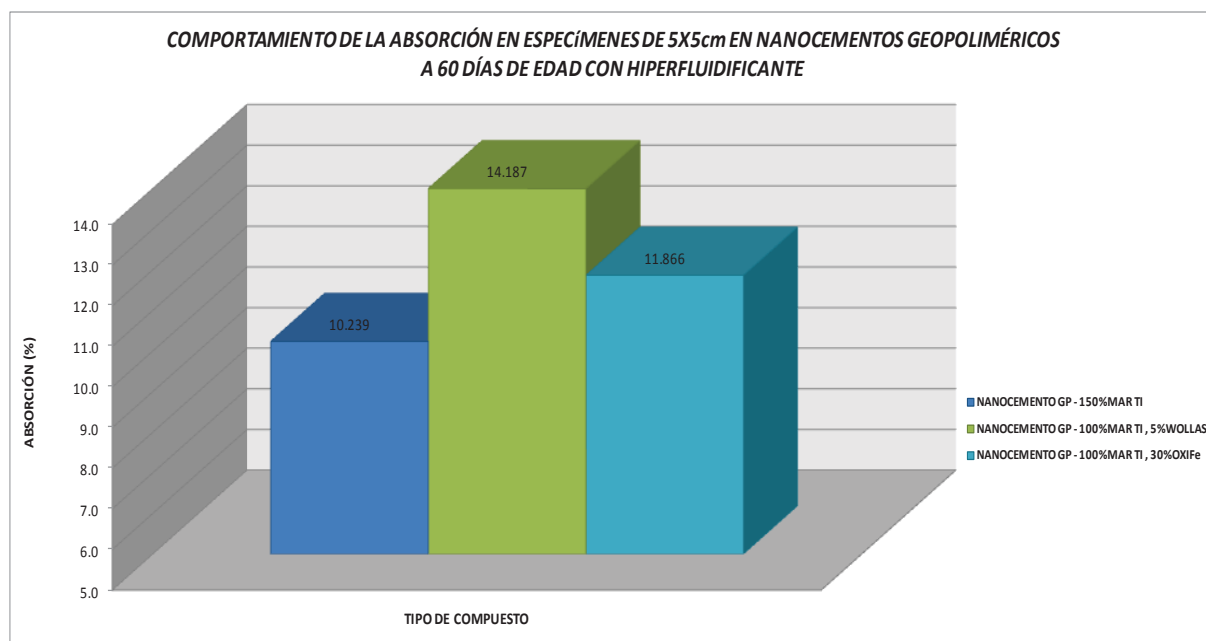


Figura 5.10. Comportamiento de la absorción de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante – Segunda fase.

5.2.2.2 DENSIDAD

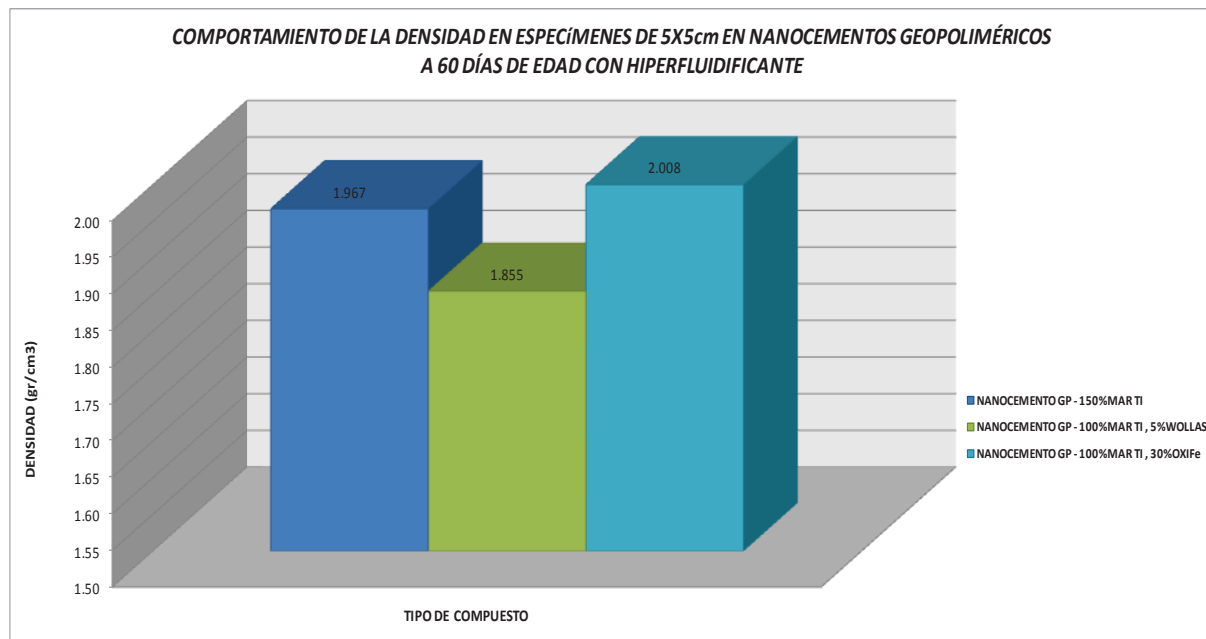


Figura 5.11. Comportamiento de la densidad de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante – Segunda Fase.

5.2.2.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

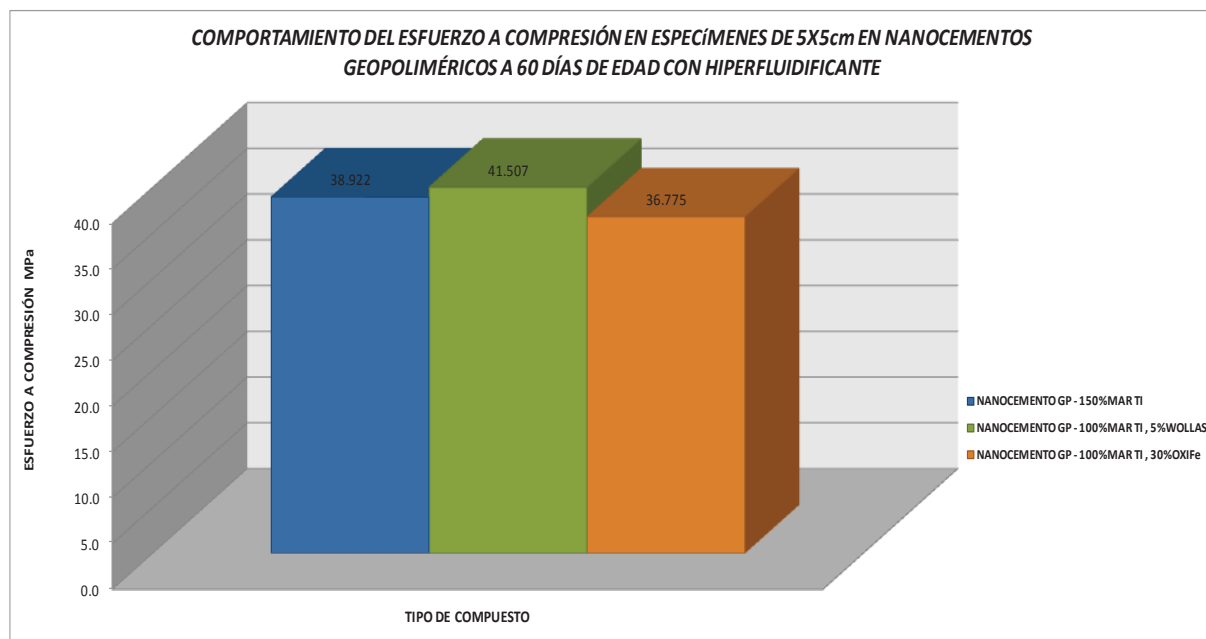


Figura 5.12. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión de especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante – Segunda Fase.

En esta fase como ya se menciona se hizo la incorporación de un hiperfluidificante a base de policarboxilatos para hacer mas trabajable la mezcla (mezcla autocompactable) y observar cambios posibles en caracterizaciones físicas y mecánicas.

De la caracterización física y mecánica de esta segunda fase, obseve que los nanocementos seleccionados objeto de este estudio, mantuvieron una tendencia en cuanto a las propiedades obtenidas en la primera fase, observando que se logro mejorar exitosamente la tranajabilidad y que son materiales que tienes altas propiedades mecánicas ya que alcanzan resistencias arriba de los 40 MPa.

En esta misma fase de la experimentación se hicieron otras incorporaciones de compuestos a los que se varió el tipo de espécimen, contenido y tipo de agregado. En primera instancia se presentaran los resultados de los mismos compuestos mostrados en la Tabla 5.2 de este subcapítulo, variando únicamente el tipo de espécimen. Los especímenes caracterizados fueron de 10x10x10 cm de dimensiones obteniéndose los siguientes resultados.

5.2.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA EN ESPECÍMENES DE 10X10X10 cm DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 60 DÍAS DE EDAD, SIN HIPERFLIDIFICANTE

5.2.3.1 ABSORCIÓN

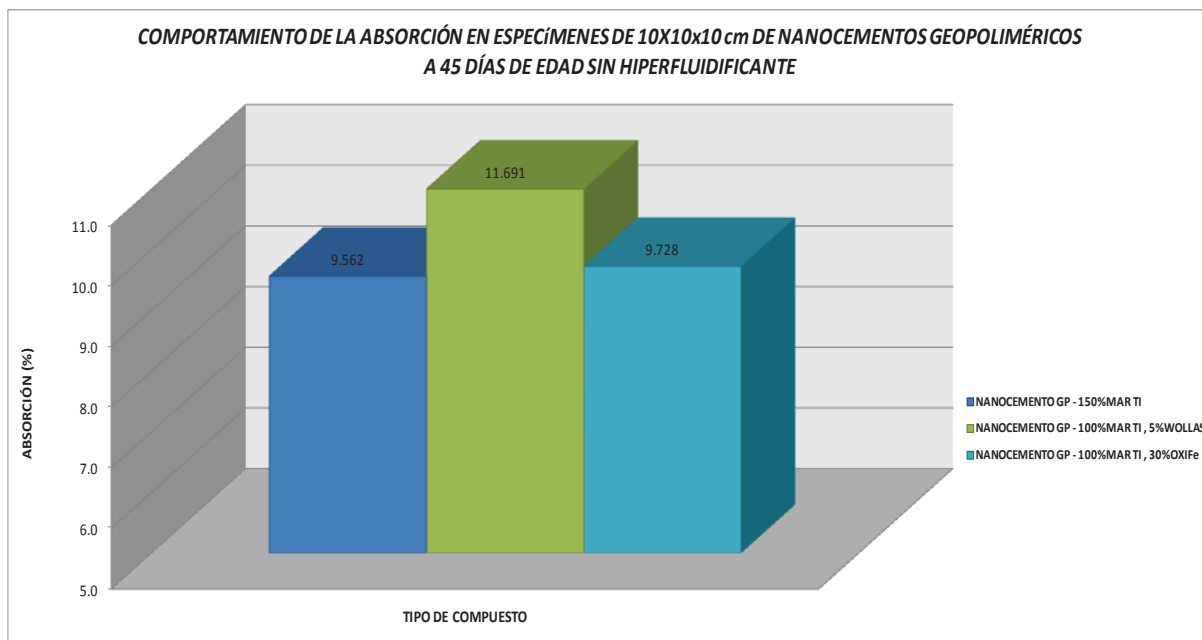


Figura 5.13. Comportamiento de la Absorción en especímenes de 10x10x10 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Sin Hiperfluidificante – Segunda Fase.

5.2.3.2 DENSIDAD

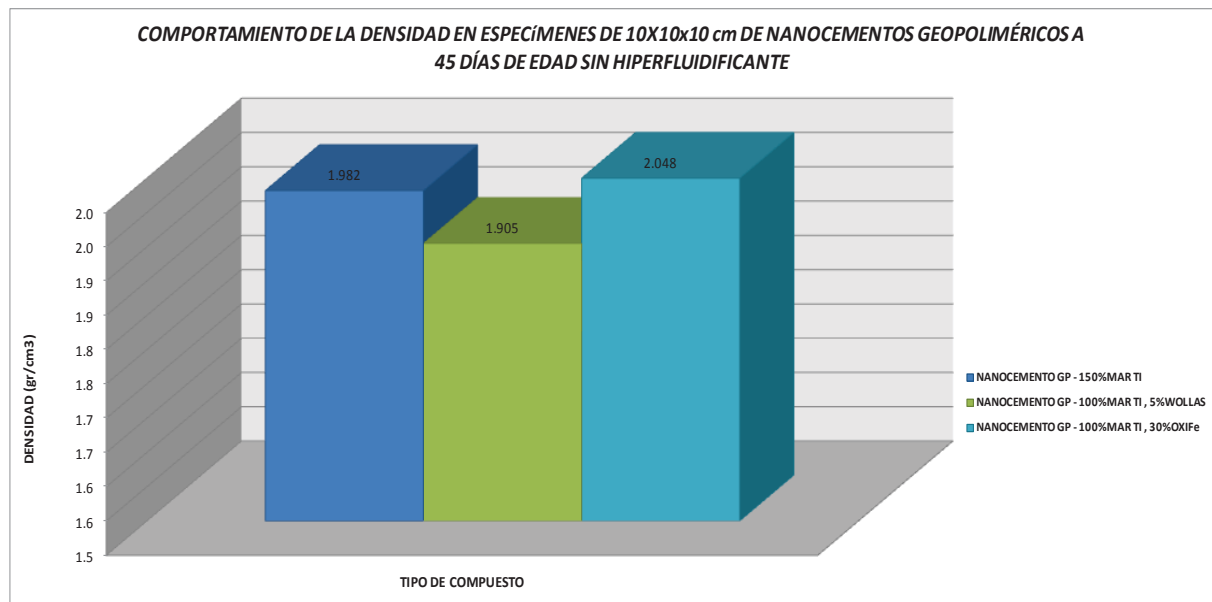


Figura 5.14. Comportamiento de la Densidad en especímenes de 10x10x10 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Sin Hiperfluidificante – Segunda Fase.

5.2.3.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

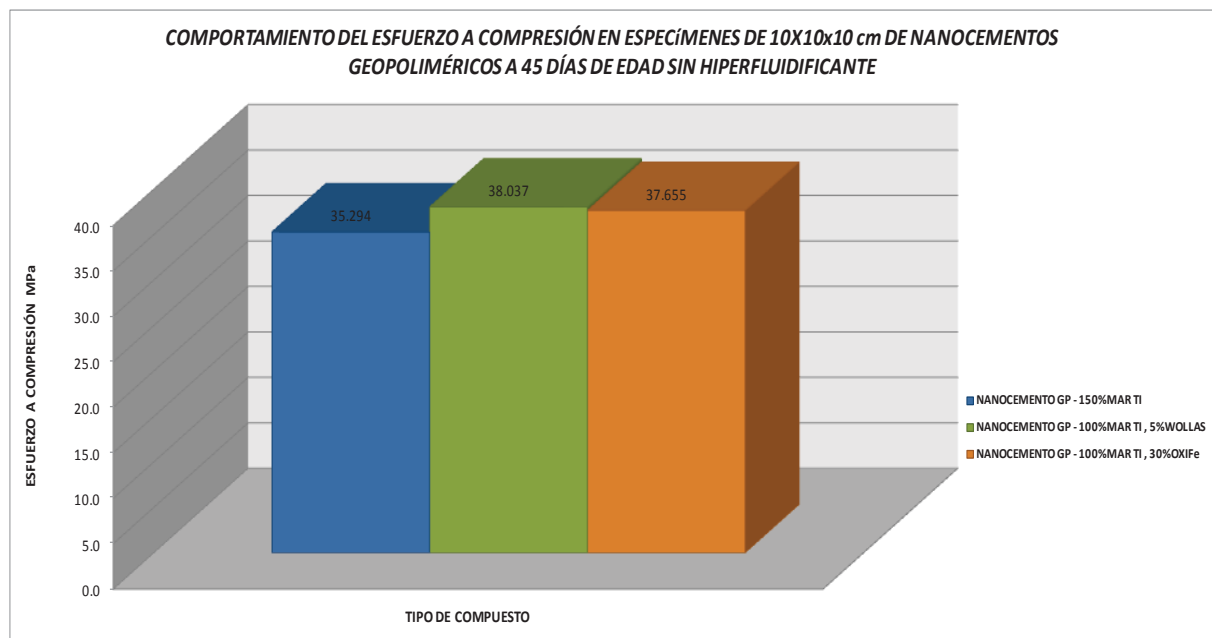


Figura 5.15. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión en especímenes de 10x10x10 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Sin Hiperfluidificante – Segunda Fase.

5.2.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA EN ESPECÍMENES DE 10X10X10 cm DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 60 DÍAS DE EDAD, CON HIPERFLUIDIFICANTE

5.2.4.1 ABSORCIÓN

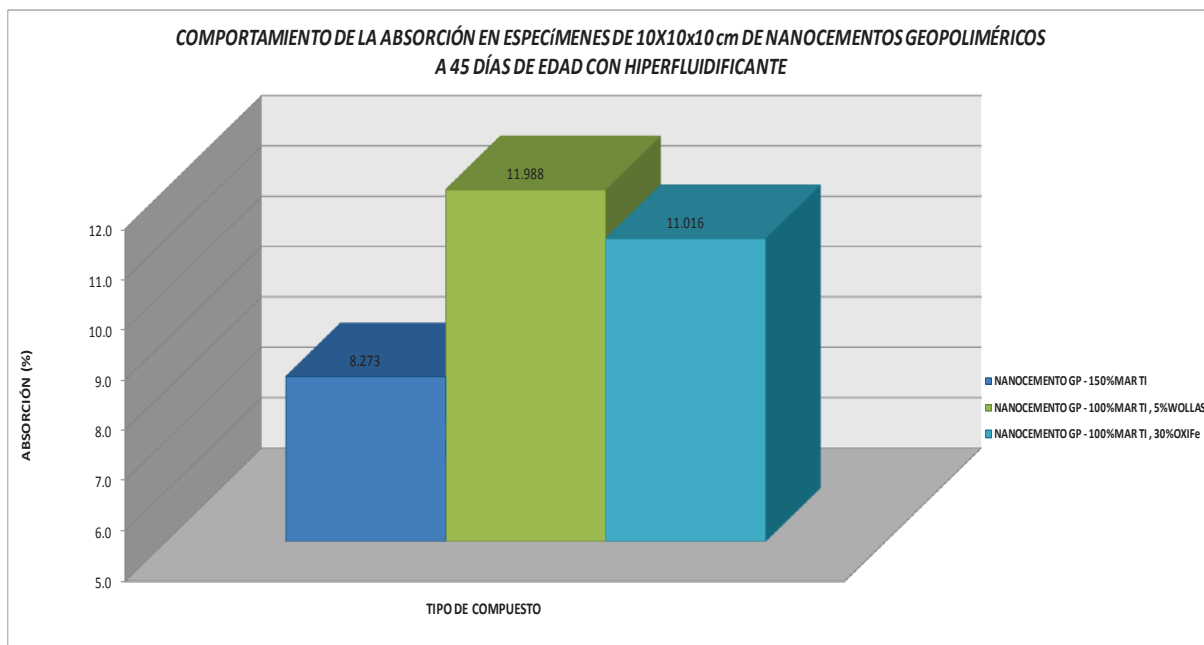


Figura 5.16. Comportamiento de la Absorción en especímenes de 10x10x10 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante – Segunda Fase.

5.2.4.2 DENSIDAD

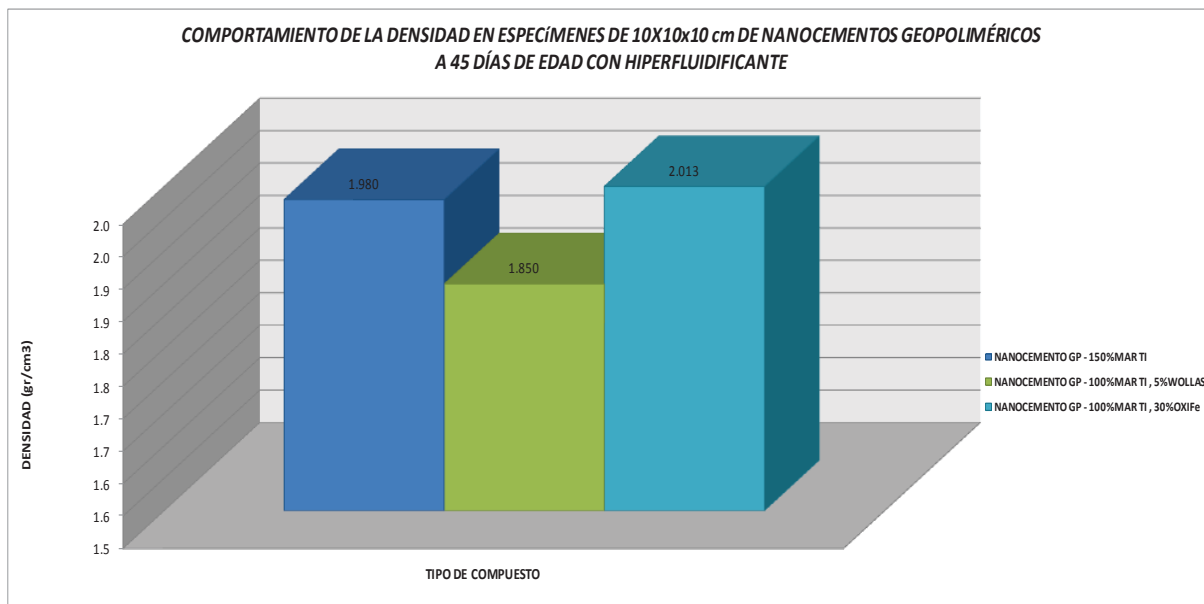


Figura 5.17. Comportamiento de la Densidad en especímenes de 10x10x10 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante – Segunda Fase.

5.2.4.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

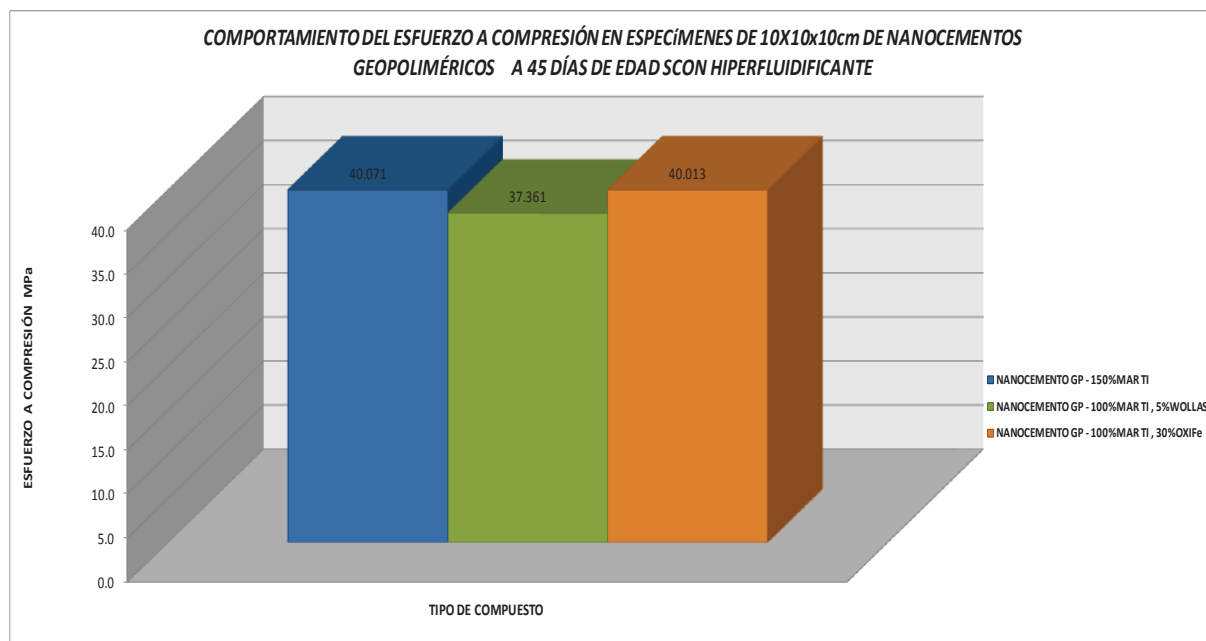


Figura 5.18. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión en especímenes de 10x10x10 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante – Segunda Fase.

Observe la tendencia de las propiedades físicas y mecánicas de nanocementos geopoliméricos, se corroboran los resultados obtenidos para cada etapa de esta fase.

Conforme a lo mencionado a inicios de este subcapítulo, en esta fase, en una segunda instancia se procedió a incorporar nuevos compuestos (variación en los agregados principalmente) y caracterizarlos física y mecánicamente. Esta incorporación fue debida a la búsqueda de los objetivos de esta investigación; que es alcanzar a desarrollar materiales funcionales. La incorporación antes mencionada es principalmente una variación a los tres compuestos que se tenían anteriormente en cuanto al contenido y tipo de agregado utilizado; se presenta a continuación la discusión de la caracterización física y mecánica en primer lugar en compuestos a los que se le vario en contenido de Óxido de Hierro (material que dentro de nuestro compuesto aumenta el comportamiento ante un campo magnético) y en segundo lugar a compuestos en donde se le agrego Óxido de Titania (TiO_2) un material inerte que nos proporciona un aumento en la propiedad de reflectancia de la luz.

5.2.5 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA EN ESPECÍMENES DE 5X5X5 cm DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 60 DÍAS DE EDAD VARIANDO EL CONTENIDO DE ÓXIDO DE HIERRO, CON HIPERFLUIDIFICANTE

La variación en el contenido de Óxido de Hierro a estas composiciones se hizo conforme a las proporciones indicadas en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Lista de Compuestos con variación en el contenido de Óxido de Hierro Segunda Fase.

Compuestos	Formulación
Nanocemento GP – 75%MAR TI, 50%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 1 Agregado 1 = 75% Marmolina Tipo I + 50% Óxido de Hierro + Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 75%MAR TI, 100%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 2 Agregado 2 = 75% Marmolina Tipo I + 100% Óxido de Hierro + 7% Agua + Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 75%MAR TI, 150%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 75% Marmolina Tipo I + 150% Óxido de Hierro + 10% Agua + Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 75%MAR TI, 200%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 4 Agregado 4 = 75% Marmolina Tipo I + 200% Óxido de Hierro + 21% Agua + Hiperfluidificante

A continuación se presentan sus resultados físicos y mecánicos de cada compuesto:

5.2.5.1 ABSORCIÓN

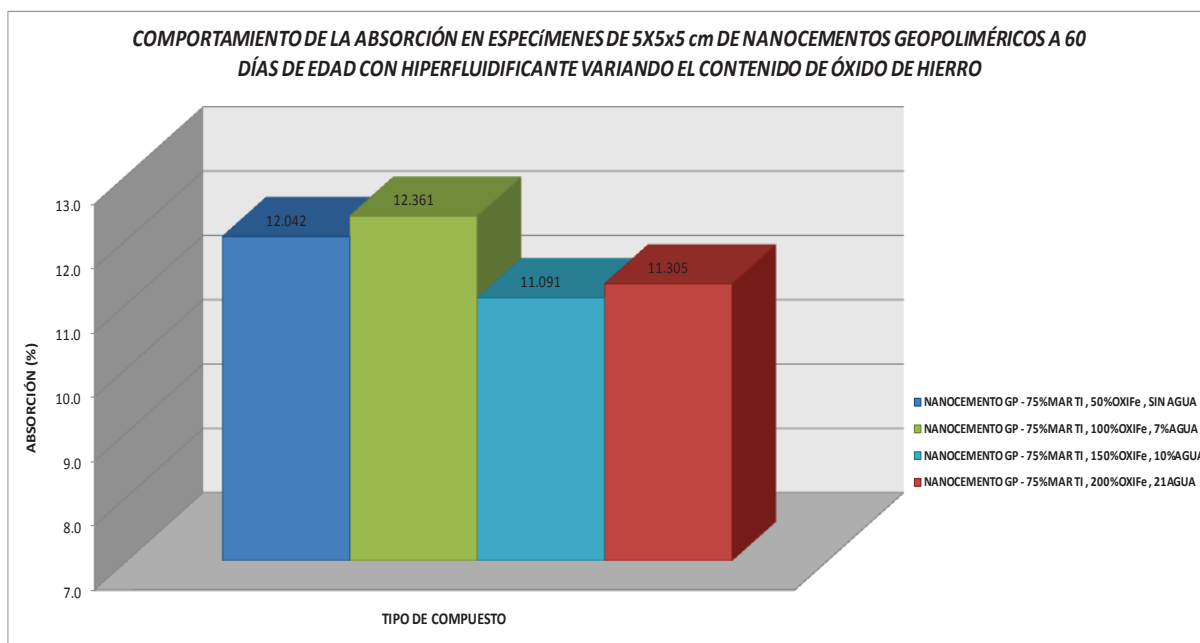


Figura 5.19. Comportamiento de la Absorción en especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 60 días de edad Con Hiperfluidificante variando el contenido de Óxido de Hierro – Segunda Fase.

5.2.5.2 DENSIDAD

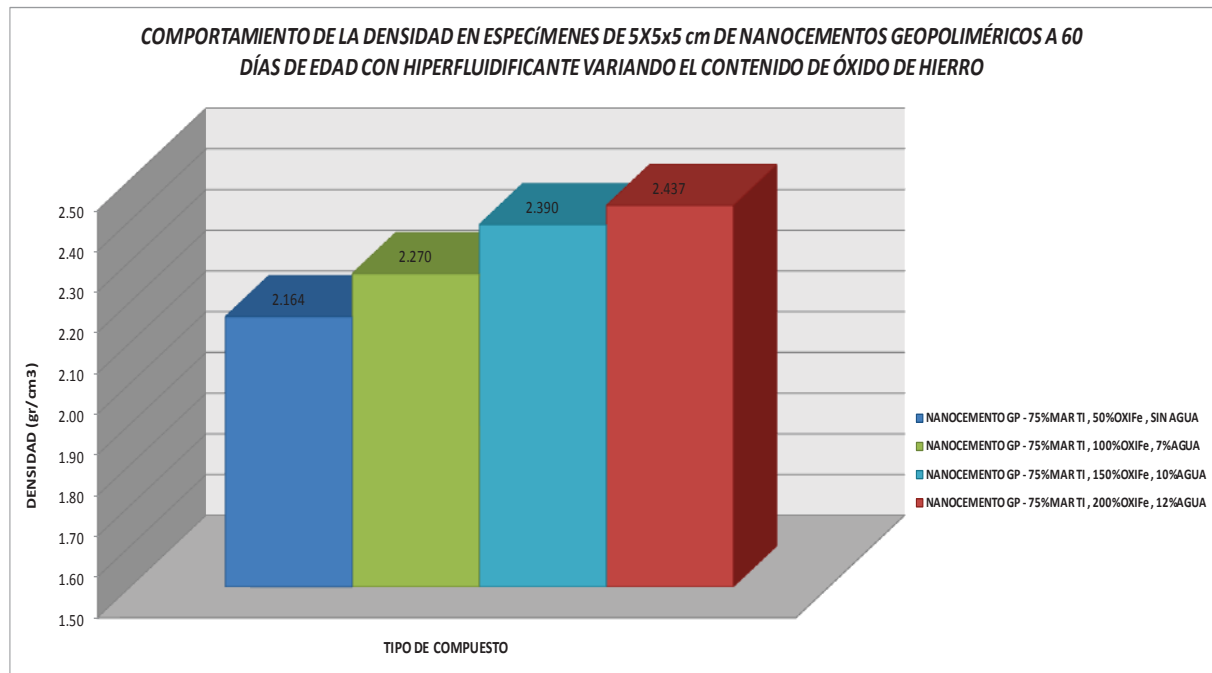


Figura 5.20. Comportamiento de la Densidad en especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 60 días de edad Con Hiperfluidificante variando el contenido de Óxido de Hierro – Segunda Fase.

5.2.5.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

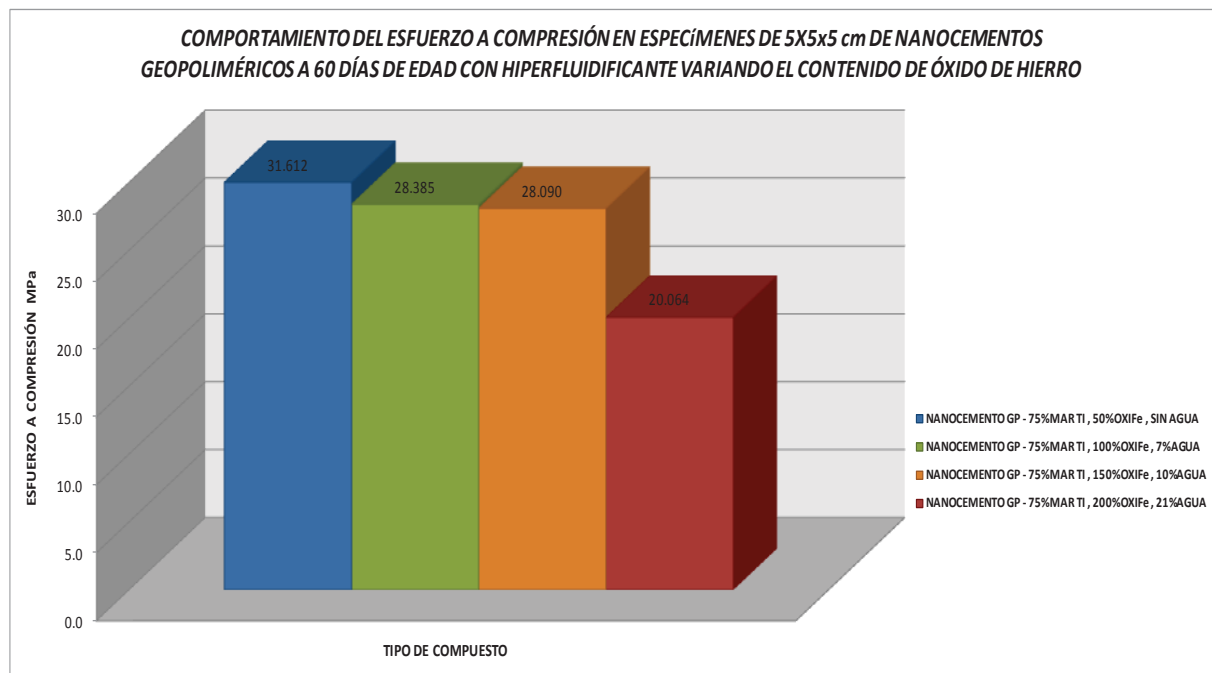


Figura 5.21. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión en especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 60 días de edad Con Hiperfluidificante variando el contenido de Óxido de Hierro – Segunda Fase.

5.2.6 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA EN ESPECÍMENES DE 5X5X5 cm DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS A 45 DÍAS DE EDAD VARIANDO EL CONTENIDO DE TiO_2 , CON HIPERFLUIDIFICANTE

La variación en el contenido de Óxido de Titania (TiO_2) a estas composiciones se hizo conforme a las proporciones indicadas en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Lista de Compuestos con variación en el contenido de Óxido de Titania Segunda Fase.

Compuestos	Formulación
Nanocemento GP – 100%MAR TI, 10% TiO_2	Nanocemento Base + Agregado 1 Agregado 1 = 100% Marmolina Tipo I + 10% TiO_2 + Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI, 20% TiO_2	Nanocemento Base + Agregado 2 Agregado 2 = 100% Marmolina Tipo I + 20% TiO_2 + Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30% TiO_2	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 100% Marmolina Tipo I + 30% TiO_2 + Hiperfluidificante

A continuación se presentan sus resultados físicos y mecánicos de cada compuesto:

5.2.6.1 ABSORCIÓN

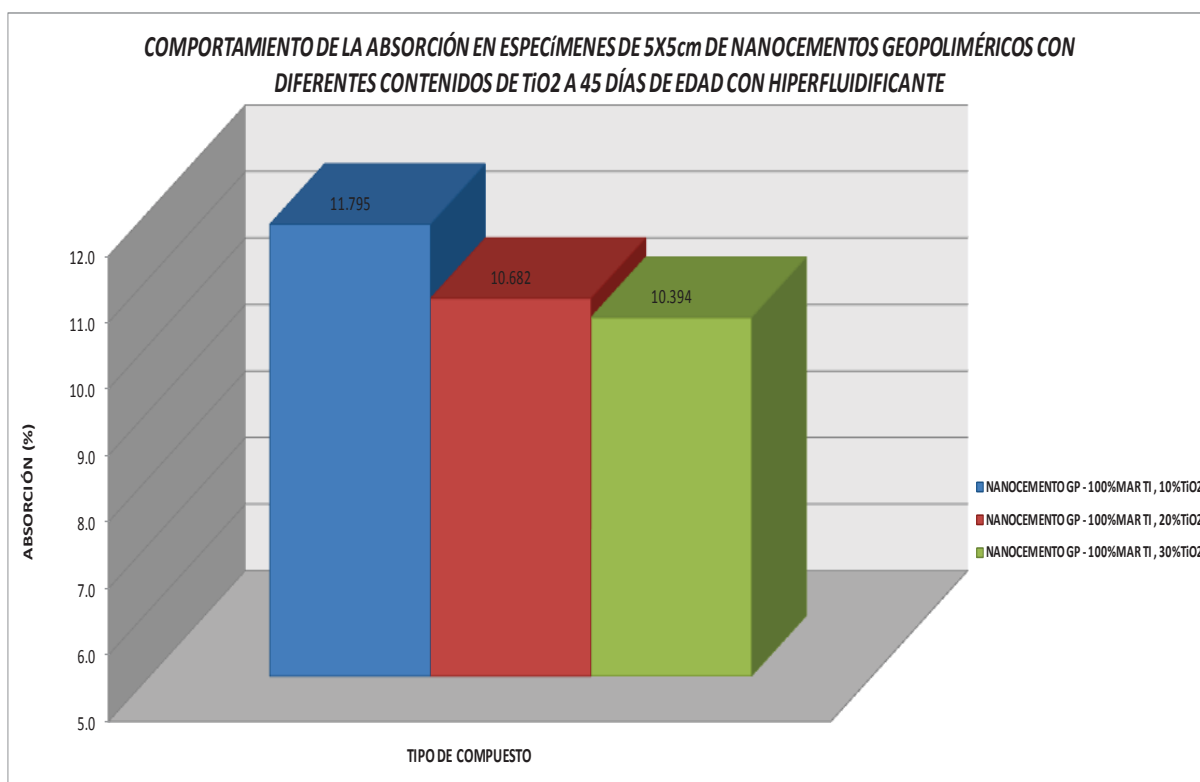


Figura 5.22. Comportamiento de la Absorción en especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante variando el contenido de Óxido de Titania – Segunda Fase.

5.2.6.2 DENSIDAD

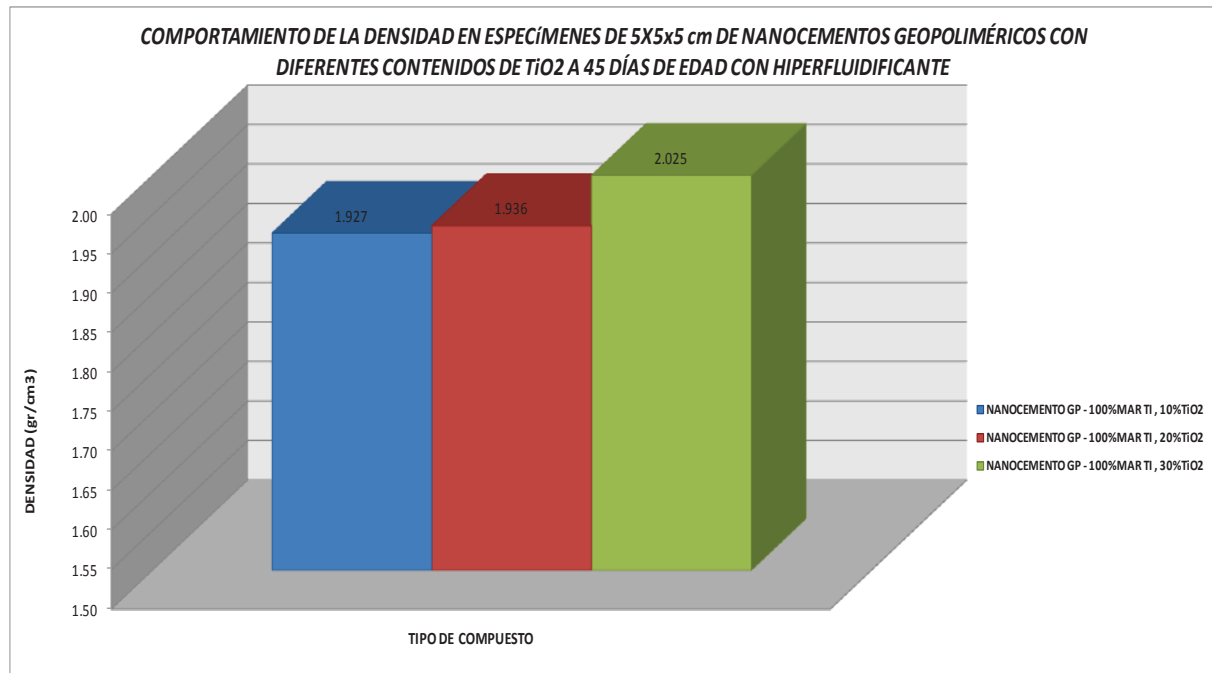


Figura 5.23. Comportamiento de la Densidad en especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante variando el contenido de Óxido de Titania – Segunda Fase.

5.2.6.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

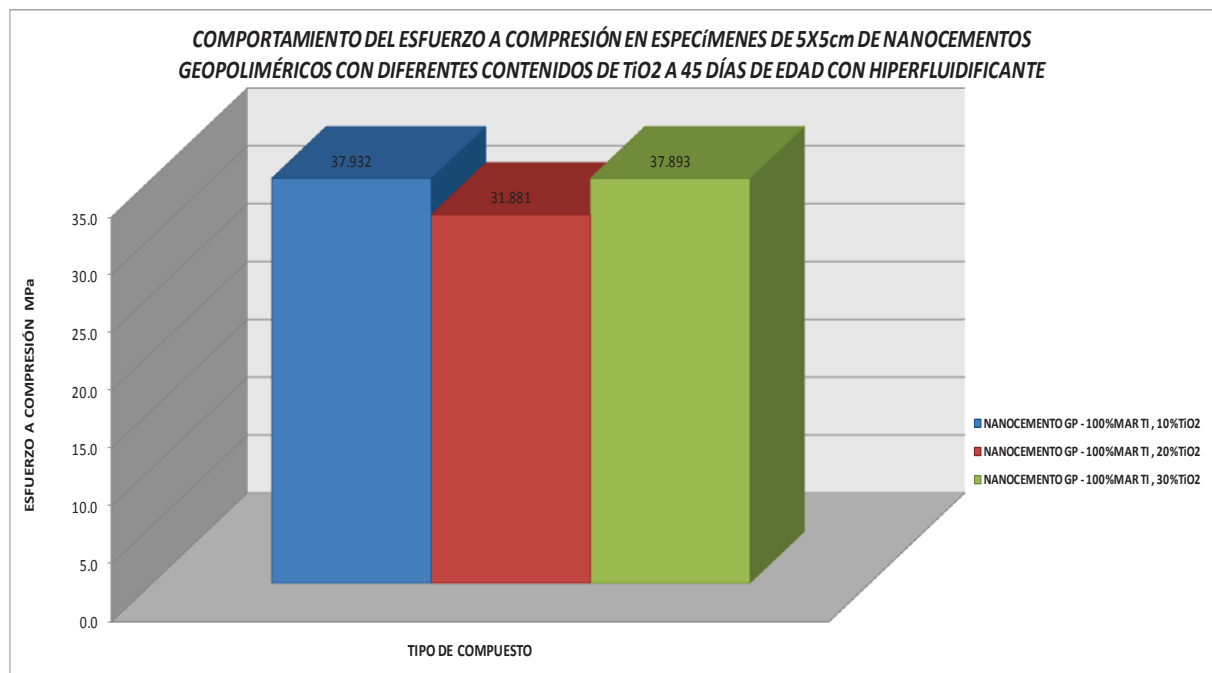


Figura 5.24. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión en especímenes de 5x5x5 cm de Nanocementos Geopoliméricos a 45 días de edad Con Hiperfluidificante variando el contenido de Óxido de Titania – Segunda Fase.

5.2.7 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO, SEM.

En esta fase también, a los compuestos descritos al inicio de esta fase (Tabla 5.2), también se le hicieron otras caracterizaciones como la microscopia electrónica de barrido. Los especímenes se labraron de acuerdo a lo descrito en el subcapítulo 2.5.1, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 5.2. Lista de Compuestos Segunda Fase.

Compuestos	Formulación
Nanocemento GP – 150%MAR TI	Nanocemento Base + Agregado 1 Agregado 1 = 150% Marmolina Tipo I + Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 5%WOLLAS	Nanocemento Base + Agregado 2 Agregado 2 = 100% Marmolina Tipo I + 5% Wollastonita + Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 30%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 100% Marmolina Tipo I + 30% Óxido de Hierro + Hiperfluidificante



Fotografía 5.12. Equipo utilizado para la caracterización SEM.

5.2.7.1 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE SEM EN NANOCEMENTO GP – 150%MAR TI, SH.

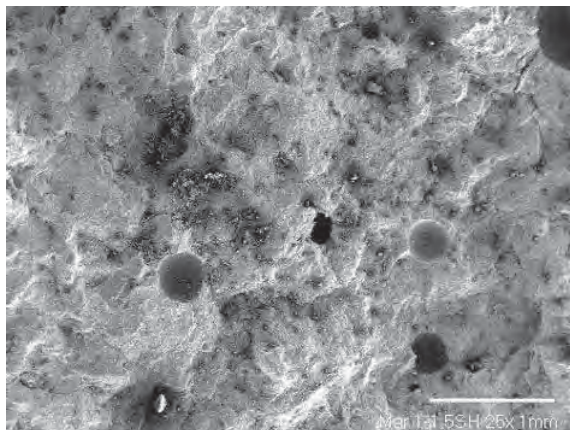


Figura 5.25. a) Nanocemento GP – 150%MAR TI, SH 25x
1mm

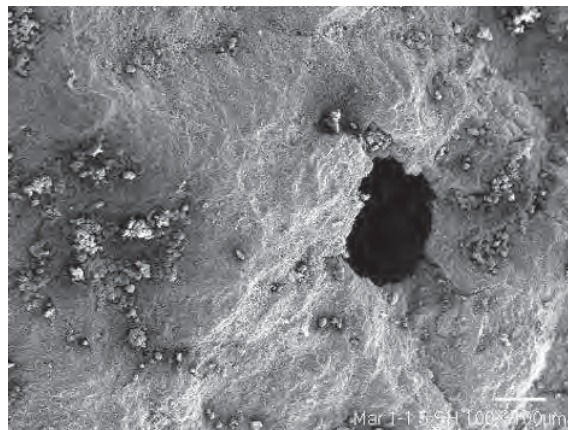


Figura 5.25. b) Nanocemento GP – 150%MAR TI, SH
100x 100µm

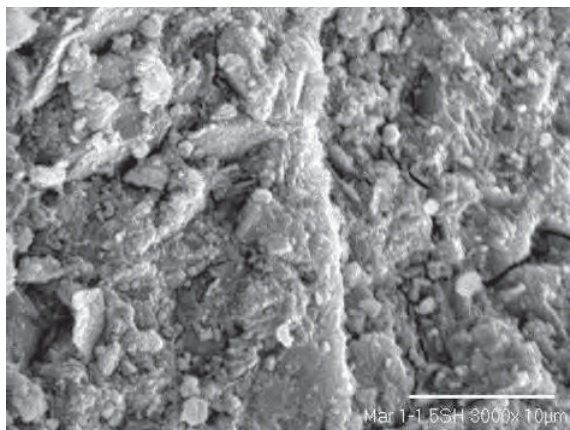


Figura 5.25. c) Nanocemento GP – 150%MAR TI, SH
3000x 10µm

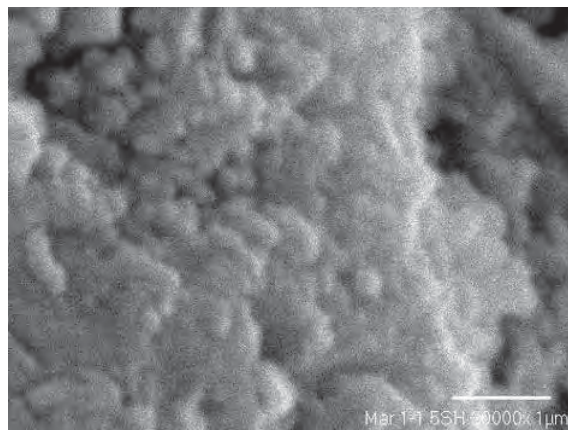


Figura 5.25. d) Nanocemento GP – 150%MAR TI, SH
20000x 1µm

Figura 5.25. a, b, c y d. SEM en espécimen de Nacocemento GP – 150%MAR TI, Sin Hiperfluidificante.

Como se puede apreciar en las microfotografías se forma una matriz amorfa la cual es claramente visible a 20000x sin formación de cristales.

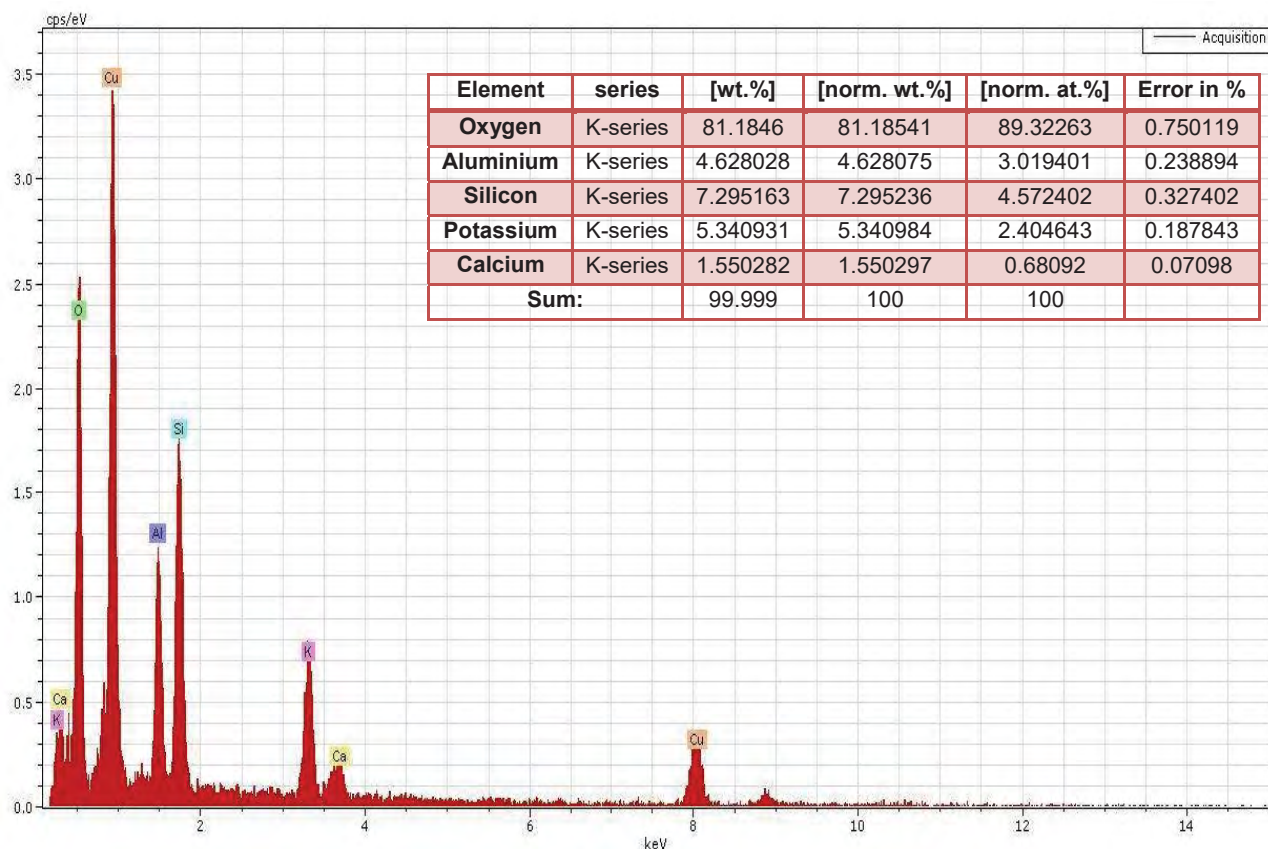


Figura 5.26. Espectro del espécimen de Nanocemento GP – 150%MAR TI a 20000x 1µm, Sin Hiperfluidificante.

El EDS corresponde a un aluminosilicato potásico del Nanocemento GP como se puede apreciar en lo elementos constituyentes.

**5.2.7.2 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE SEM EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI,
5%WOLLAS, SH**

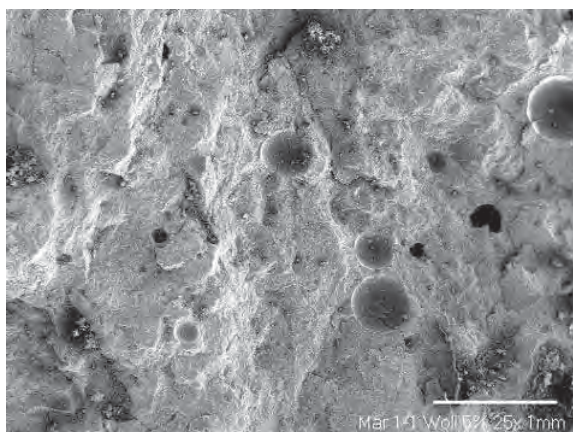


Figura 5.27. a) Nanocemento GP – 100%MAR TI,
5%WOLLAS, SH - 25x 1mm

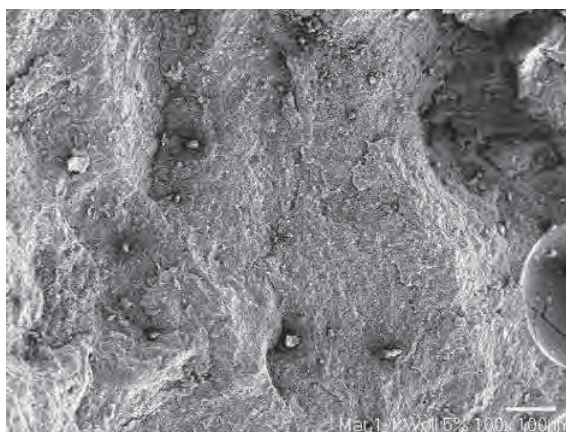


Figura 5.27. b) Nanocemento GP – 100%MAR TI,
5%WOLLAS, SH - 25x 1mm

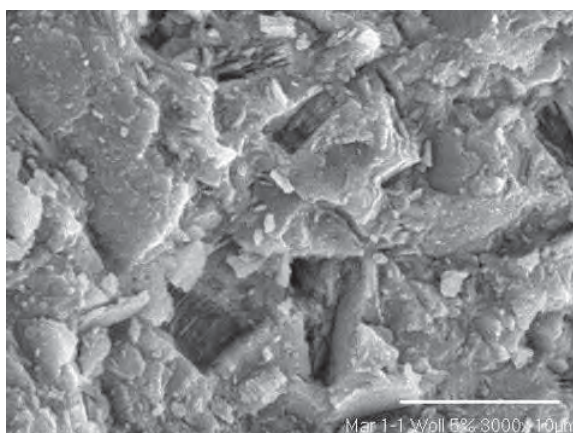


Figura 5.27. c) Nanocemento GP – 100%MAR TI,
5%WOLLAS, SH - 25x 1mm

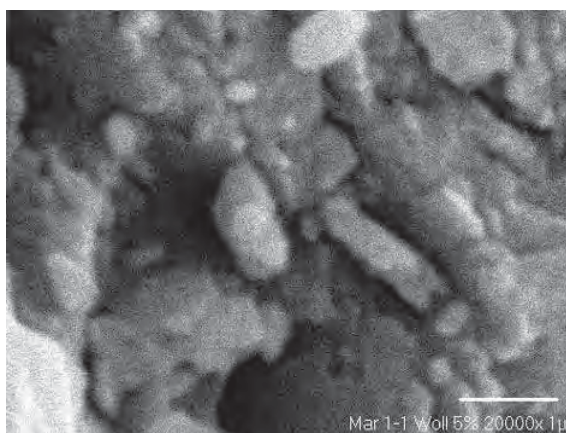


Figura 5.27. a) Nanocemento GP – 100%MAR TI,
5%WOLLAS, SH - 25x 1mm

Figura 5.27. a, b, c y d. SEM en espécimen de Nacocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS Sin Hiperfluidificante.

Las micrograffas muestran la formación densa de una matriz amorfa del nanocemento GP. Se incluye wollastonita como precursor de silicatos cálcicos para la formación del nanocemento.

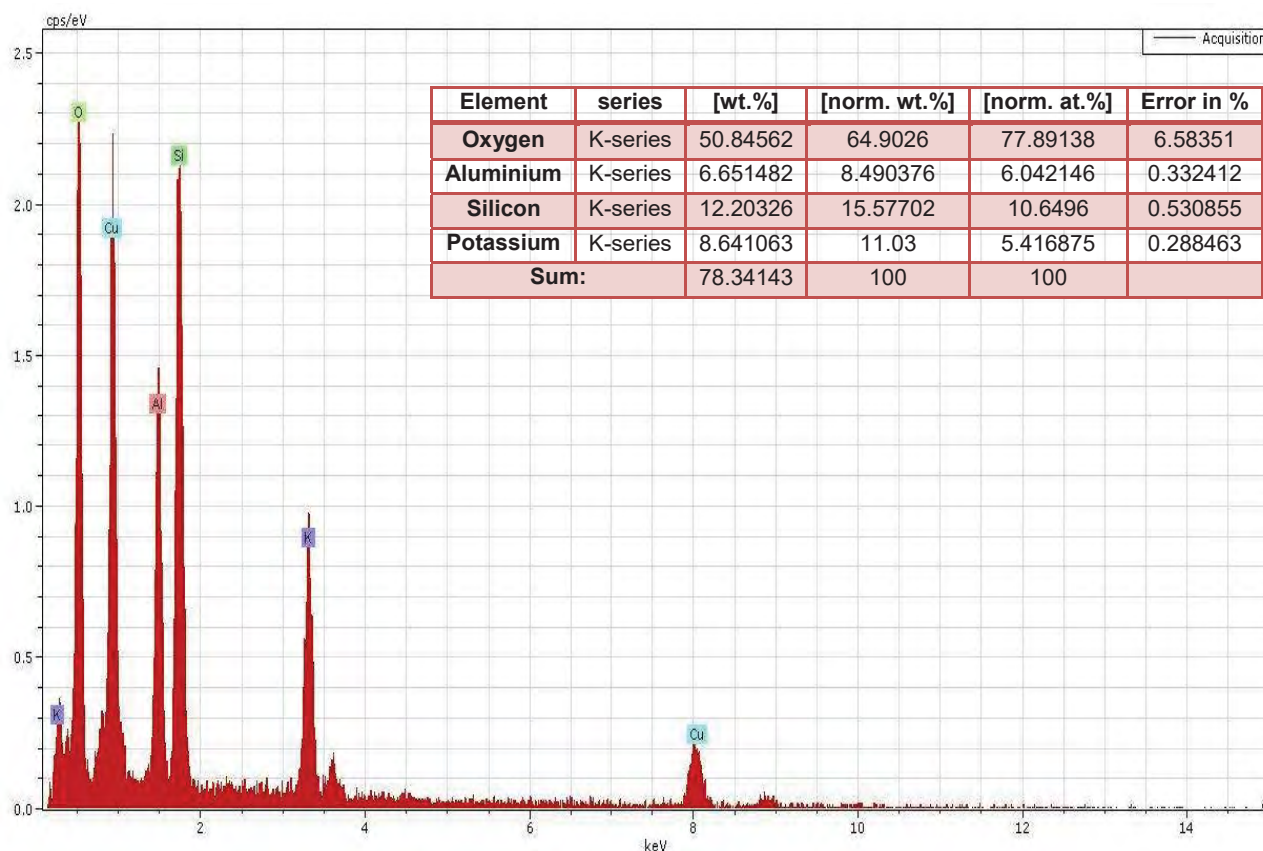


Figura 5.28. Espectro del espécimen de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS a 20000x 1µm, Sin Hiperfluidificante.

EDS del nanocemento con wollastonita, el análisis puntual no detecta la presencia del catión Ca^{2+} , esto puede deberse al lugar del análisis específico en la muestra, sin embargo se nota una presencia fuerte del K^+ así como Al^{+3} y Si^{+4} del nanocemento.

**5.2.7.3 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE SEM EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI,
30%OXIFe, SH**

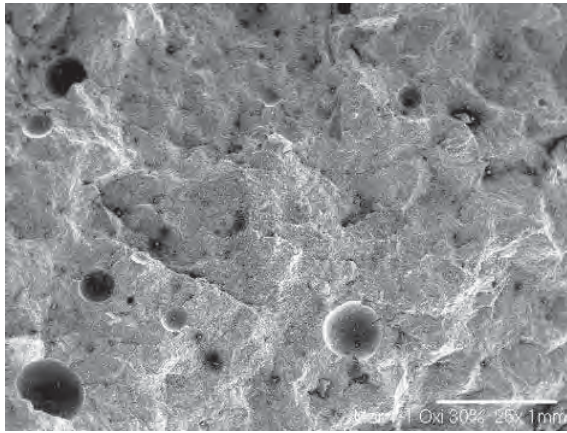


Figura 5.29. a) Nanocemento GP – 100%MAR TI,
30%OXIFe SH - 25x 1mm

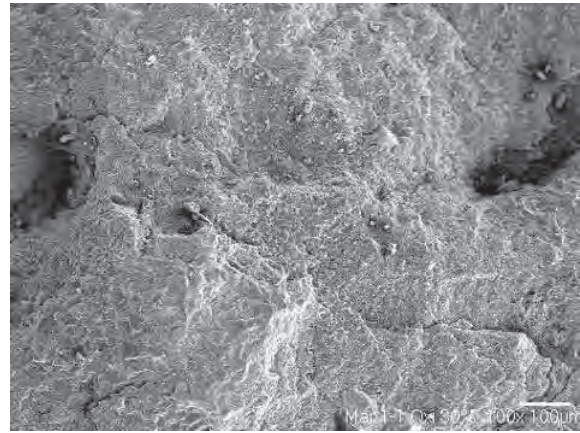


Figura 5.29. b) Nanocemento GP – 100%MAR TI,
30%OXIFe SH 100x 100µm

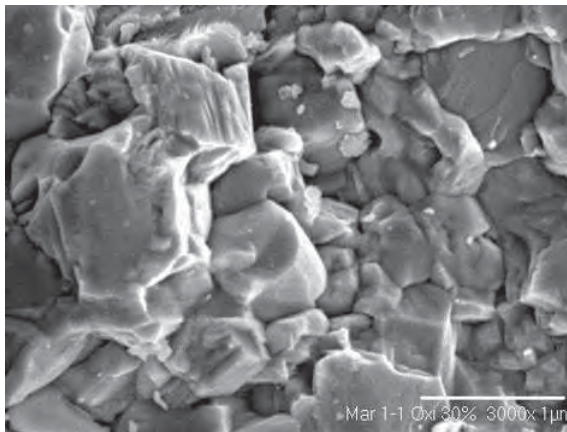


Figura 5.29. c) Nanocemento GP – 100%MAR TI,
30%OXIFe SH - 3000x 10µm

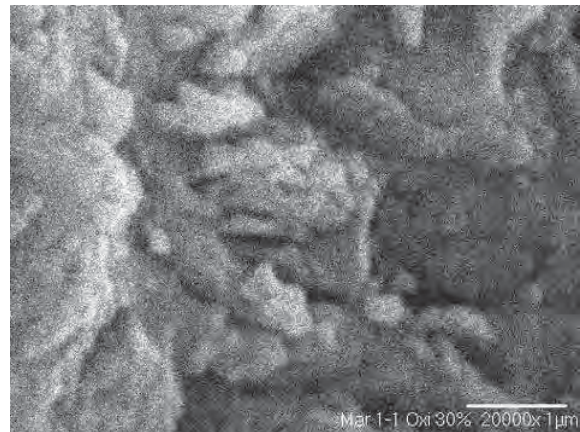


Figura 5.29. d) Nanocemento GP – 100%MAR TI,
30%OXIFe SH - 20000x 1µm

Figura 5.29. a, b, c y d. SEM en espécimen de Nacocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe Sin Hiperfluidificante.

Análisis microestructural de un nanocemento ferromagnético, observe la matriz amorfa y densa del material desarrollado.

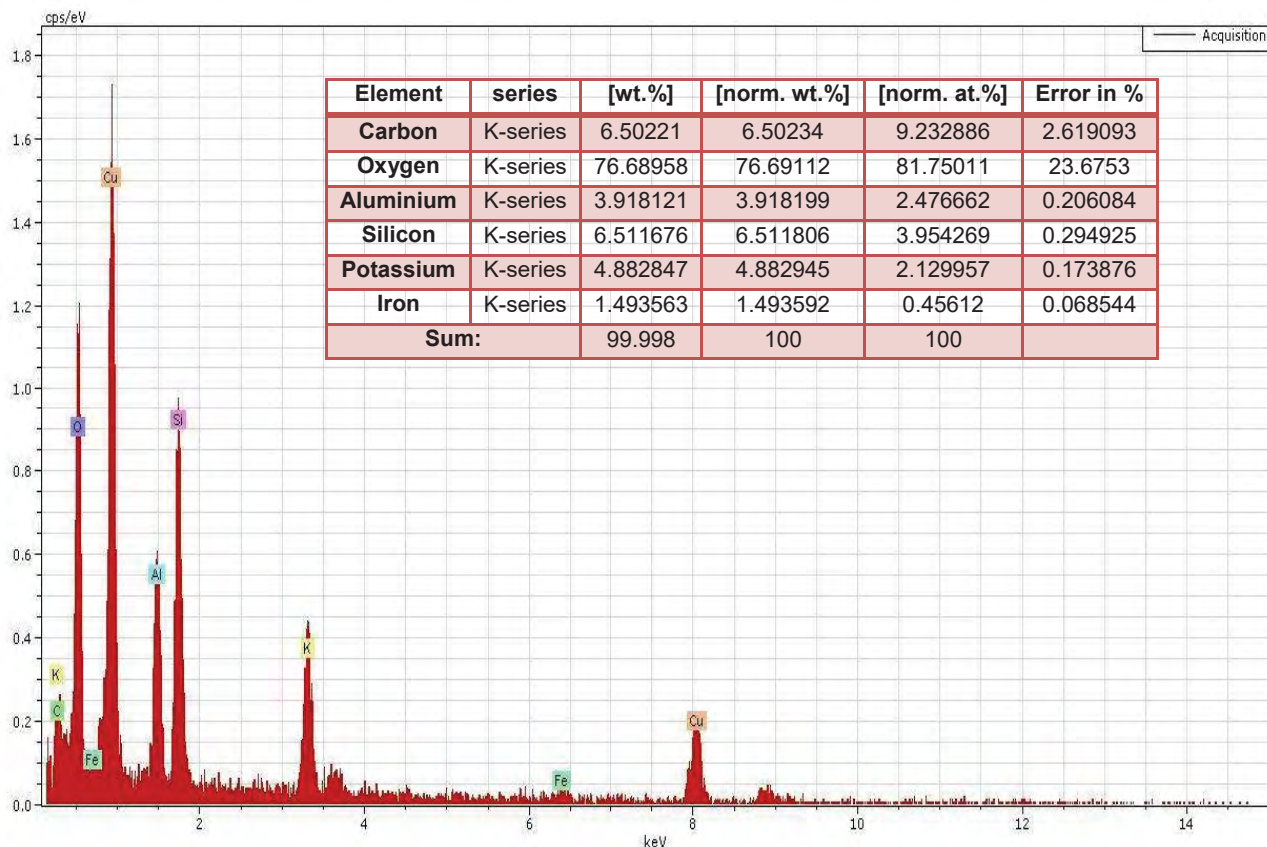


Figura 5.30. Espectro del espécimen de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe a 20000x 1µm, Sin Hiperfluidificante.

EDS del nanocemento ferromagnético, observe la presencia del elemento Fe^{3+} , la baja concentración se debe a la región en donde se realizó el análisis sin embargo se tiene incorporado un 30% (w/w).

5.2.7.4 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE SEM EN NANOCEMENTO GP - 150%MAR TI, CH

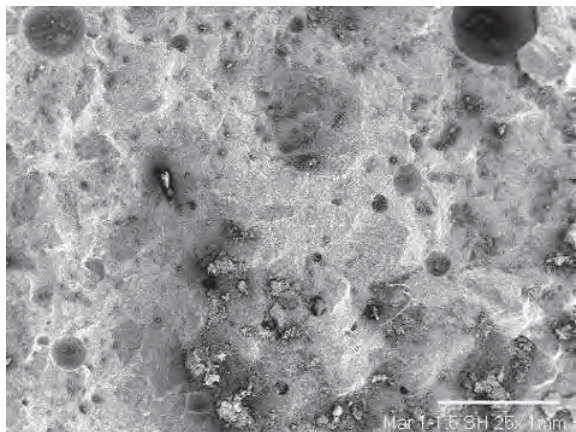


Figura 5.31. a) Nanocemento GP – 150%MAR TI, CH 25x
1mm

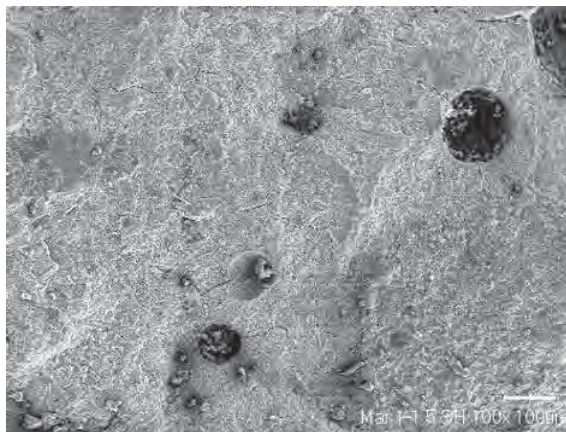


Figura 5.31. b) Nanocemento GP – 150%MAR TI, CH
100x 100µm

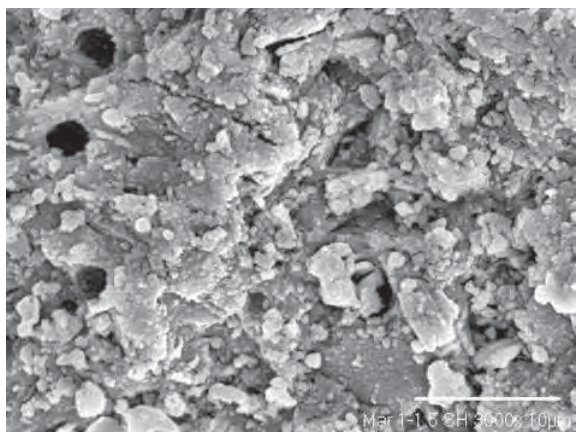


Figura 5.31. c) Nanocemento GP – 150%MAR TI, CH
3000x 10µm

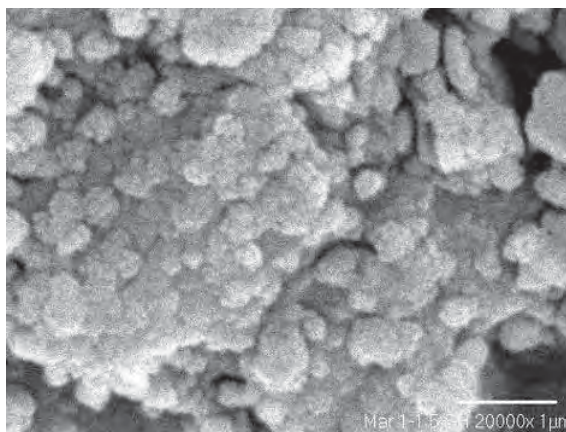


Figura 5.31. d) Nanocemento GP – 150%MAR TI, CH
20000x 1µm

Figura 5.31. a, b, c y d. SEM en espécimen de Nacocemento GP – 150%MAR TI, Con Hiperfluidificante.

Microestructura de un nanocemento GP utilizando Hiperfluidificante de alto rango a base de policarboxilatos buscando lograr propiedades autocompactantes en la matriz. Se observa una matriz densa.

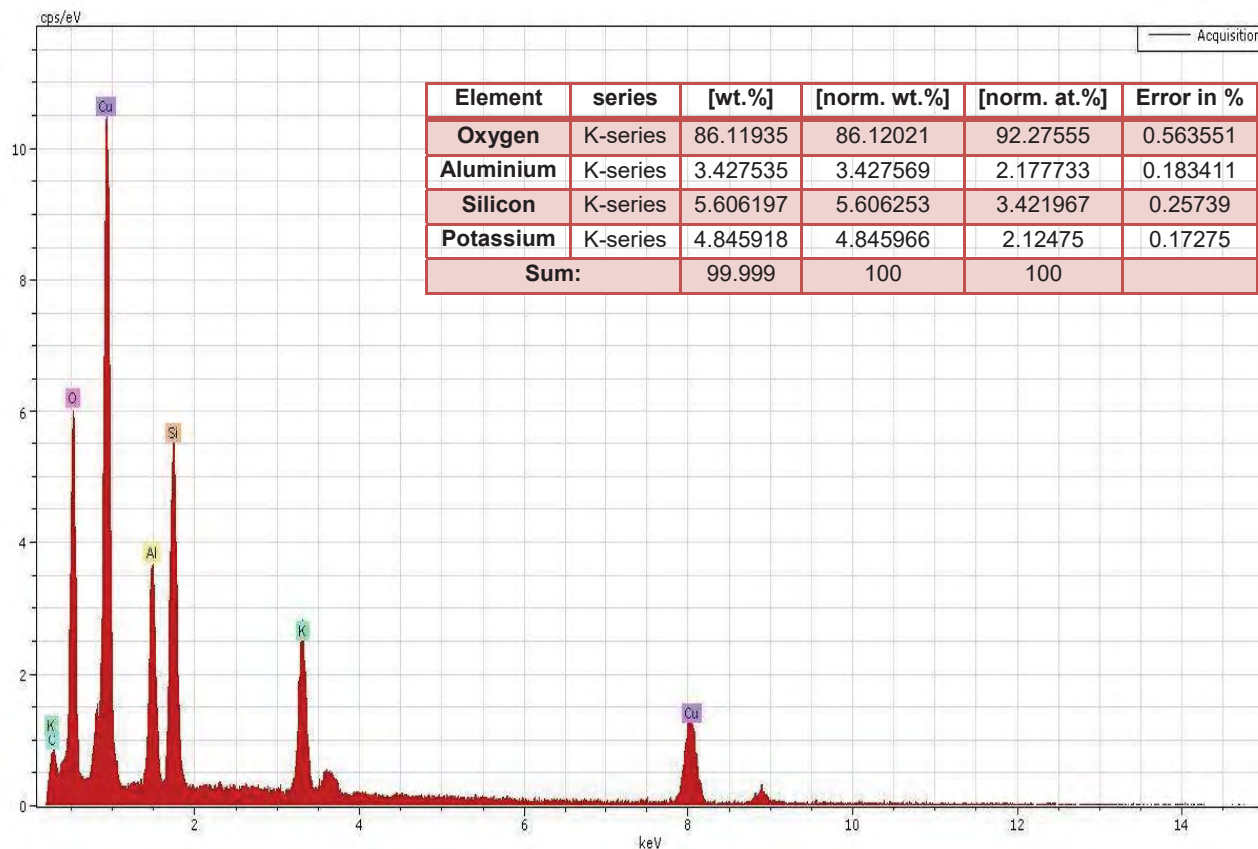


Figura 5.32. Espectro del espécimen de Nanocemento GP – 150%MAR TI a 20000x 1µm, Con Hiperfluidificante.

EDS de un nanocemento usando policarboxilatos, no se muestra ninguna presencia adicional de elementos químicos por la incorporación de los policarboxilatos en la región analizada.

**5.2.7.5 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE SEM EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI,
5%WOLLAS, CH**

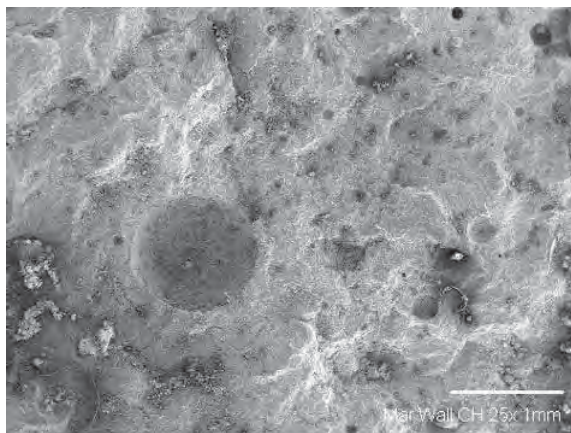


**Figura 5.33. a) Nanocemento GP – 100%MAR TI,
5%WOLLAS CH - 25x 1mm**

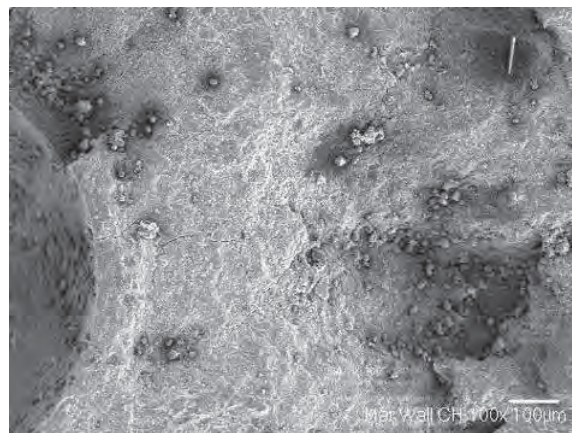


**Figura 5.33. b) Nanocemento GP – 100%MAR TI,
5%WOLLAS CH - 100x 100µm**

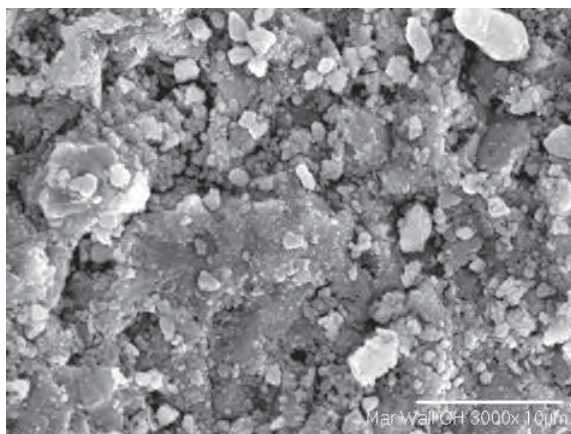


**Figura 5.33. c) Nanocemento GP – 100%MAR TI,
5%WOLLAS CH - 3000x 10µm**

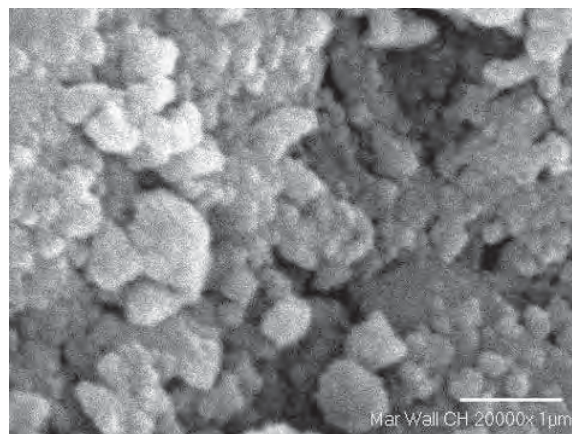


**Figura 5.33. d) Nanocemento GP – 100%MAR TI,
5%WOLLAS CH - 20000x 1µm**

Figura 5.33. a, b, c y d. SEM en espécimen de Nacocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS Con Hiperfluidificante.

Análisis microestructural por SEM de un nanocemento utilizando Wollastonita y policarboxilatos. Observe una matriz densa y amorfa así como la presencia de porosidad no comunicada. A 20000x no se observa ninguna morfología cristalina.

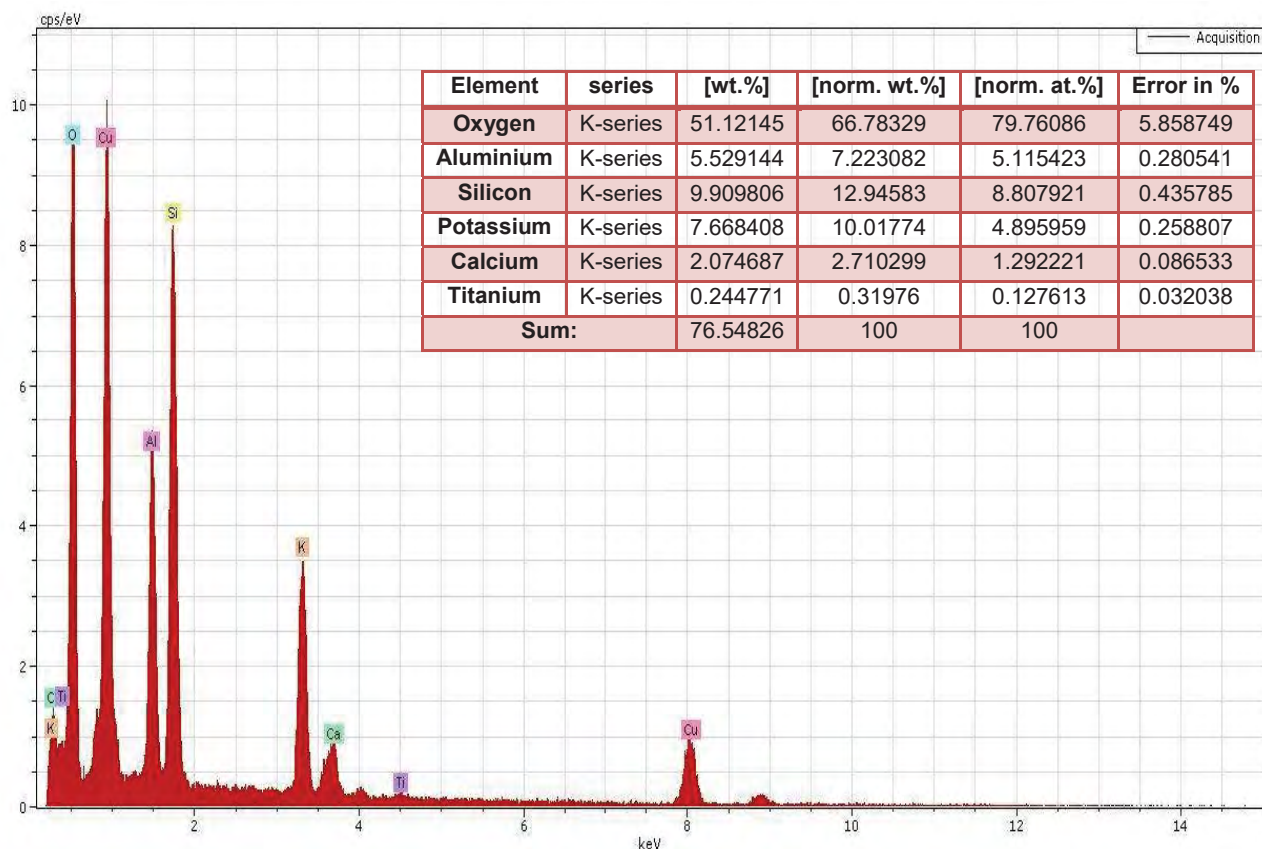


Figura 5.34. Espectro del espécimen de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS a 20000x 1µm, Con Hiperfluidificante.

EDS de un nanocemento con Wollastonita y policarboxilatos, en donde se muestra la presencia de Ca^{2+} procedente de la wollastonita. Adicionalmente se aprecian trazas de Ti^{+4} , impurezas del Al_2O_3 (Óxido de Aluminio) utilizado.

5.2.7.6 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE SEM EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, CH

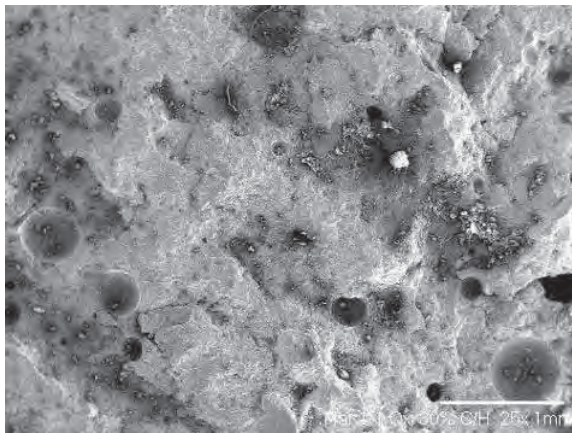


Figura 5.35. a) Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe CH - 25x 1mm

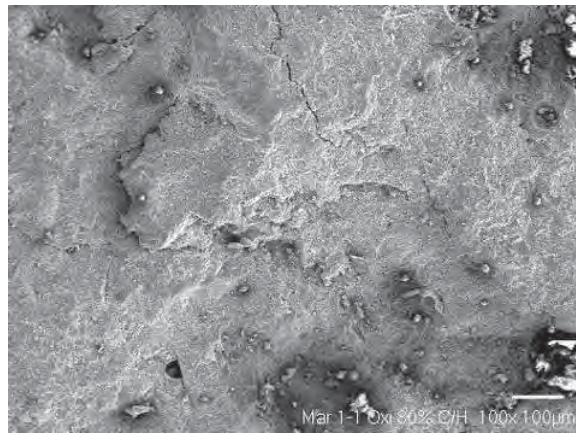


Figura 5.35. b) Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe CH - 100x 100µm

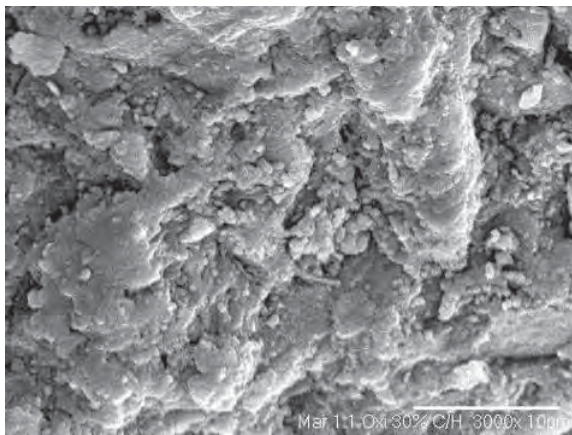


Figura 5.35. c) Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe CH - 3000x 10µm

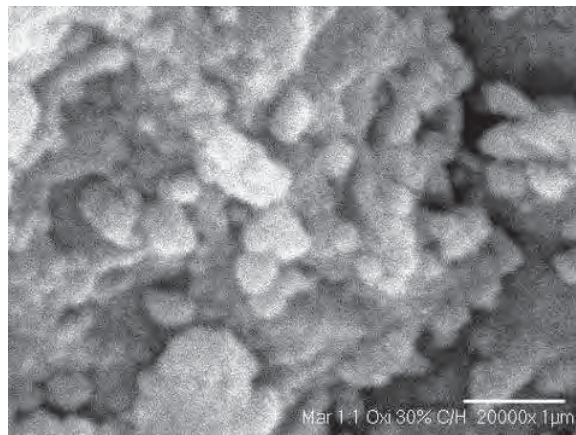


Figura 5.35. d) Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe CH - 20000x 1µm

Figura 5.35. a, b, c, y d. SEM en espécimen de Nacocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe Con Hiperfluidificante.

Micrografías de un nanocemento ferromagnético utilizando policarboxilatos. Observe la alta densidad de la matriz a 3000x.

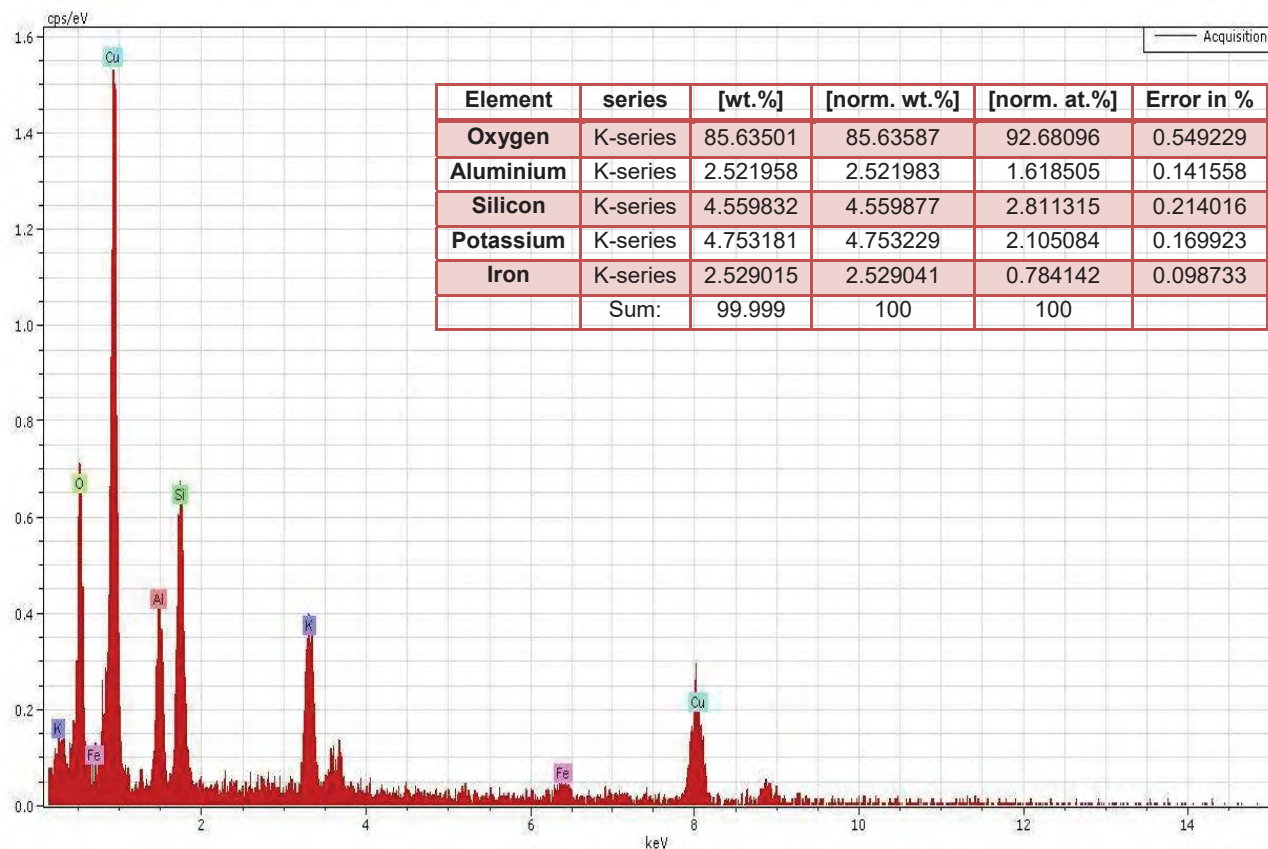


Figura 5.36. Espectro del espécimen de Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe a 20000x 1µm, Con Hiperfluidificante.

EDS de un nanocemento ferrmagnetico utilizando policarboxilatos. Se muestra la presencia de los elementos comunes de esta composición; no se aprecia ningún elemento químico proveniente de los policarboxilatos en el área analizada.

5.2.8 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN, TEM

En esta fase se realizó la caracterización mediante la microscopía electrónica de transmisión nuestro “**nanocemento base**”. La muestra se elaboró de acuerdo a lo descrito en el subcapítulo 2.5.3, obteniéndose los siguientes resultados.

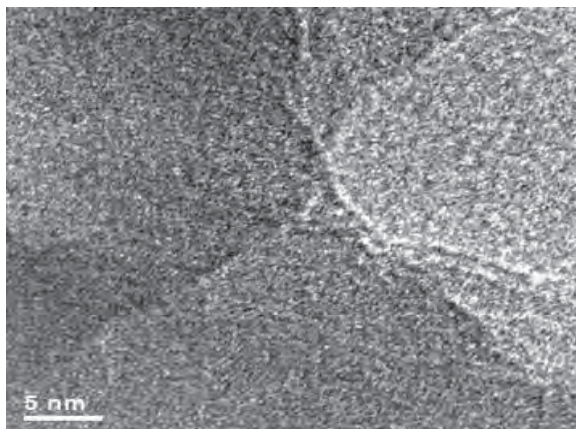


Figura 5.37. a. Nanocemento GP base amorfo a 5nm

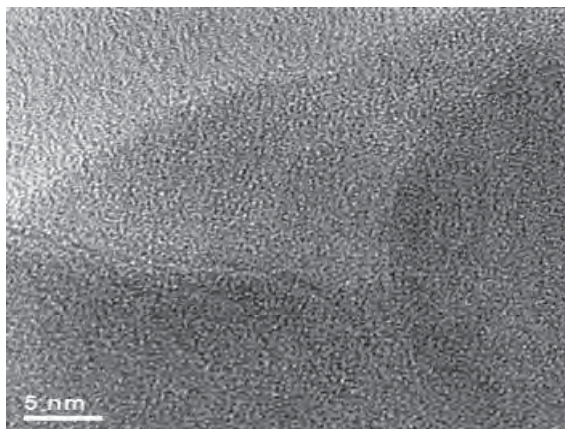


Figura 5.37. b. Nanocemento GP base amorfo a 5nm

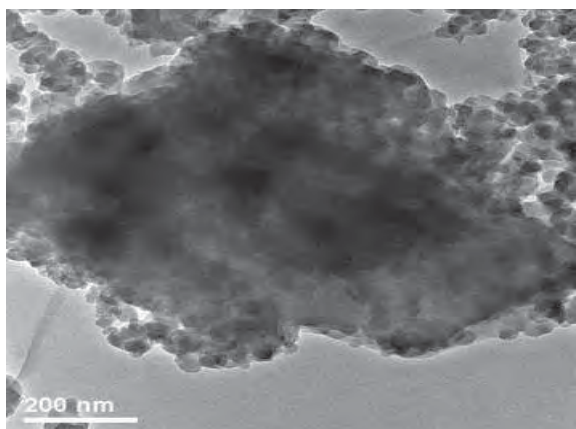


Figura 5.37. c. Nanocemento GP base amorfo a 200 nm

Figura 5.37. a, b y c. Nanocemento Geopolimérico base “amorfo”.

Análisis nanoestructural del nanocemento base sintetizado observando una matriz amorfa a 200nm. Ratificando lo encontrado a nivel microestructural (SEM) en relación a su ordenamiento atómico. Como se puede observar a una escala de 5nm la formación de un gel “estable” químicamente. Adicionalmente se puede observar un ordenamiento atómico no repetitivo ni direccional (sólido amorfo).

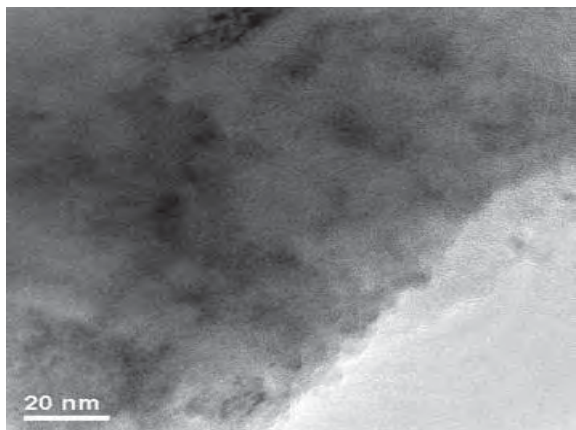


Figura 5.38. a. Nanocemento GP base nano-cristales
a 20 nm

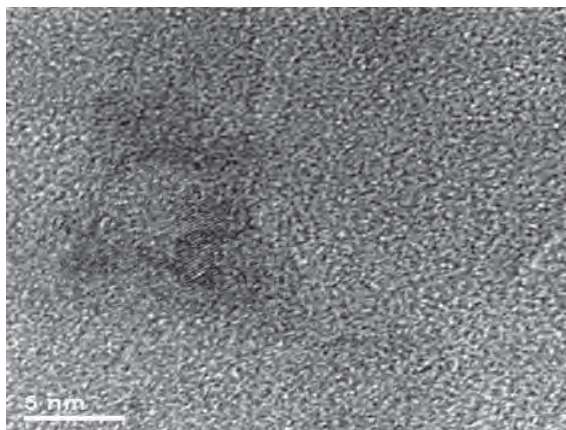


Figura 5.38. b. Nanocemento GP base nano-cristales
a 5 nm

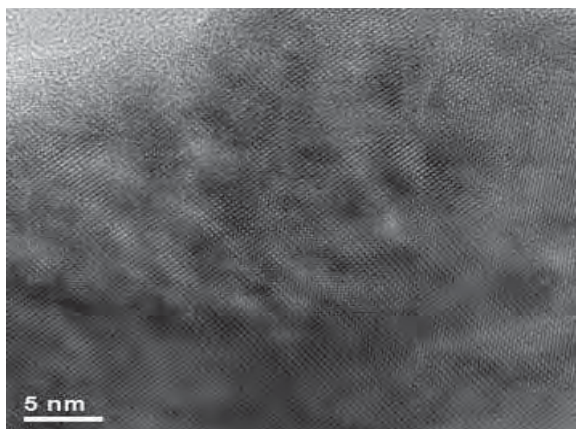


Figura 5.378. a. Nanocemento GP base nano-cristales
a 5 nm

Figura 5.38. a, b y c Nanocemento
Geopolimérico base “Nano-cristales”.

Análisis nanoestructural de otra región en donde se muestran “nanocristales” presumiblemente de aluminosilicatos potásicos hidratados (nano-zeolitas) con un ordenamiento atómico direccional y repetitivo, embebidos en una matriz amorfa del gel del nanocemento.

5.2.9 MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA, AFM

Se caracterizo también mediante la microscopia de fuerza atómica un compuesto de toda nuestra gama de composiciones; esto por la dificultad en obtener estos servicios ya que se realizo en uno de los microscopios AFM de mayor prestigio en la actualidad en el mercado de la casa ASHYLUM. La muestra que se caracterizo fue del compuesto denominado **Nanocemento GP – 100% MAR TI, 50% OXIFe** y se elaboro de acuerdo a lo descrito en el subcapítulo 2.5.5, obteniéndose los siguientes resultados.

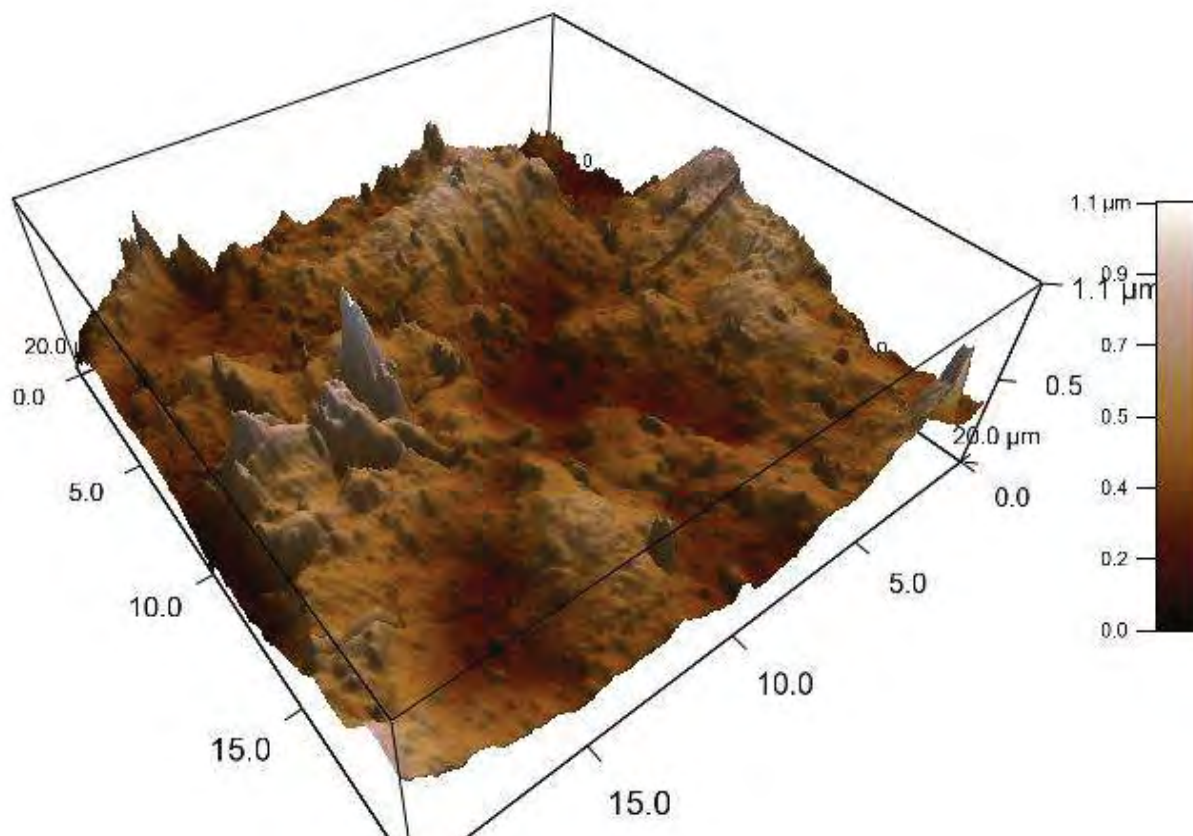


Figura 5.39. Caracterización mediante AFM del Nanocemento GP – 100% MAR TI, 50%OXIFe, CH en una área de barrido de 1.1 μm x 20 μm x 20 μm.

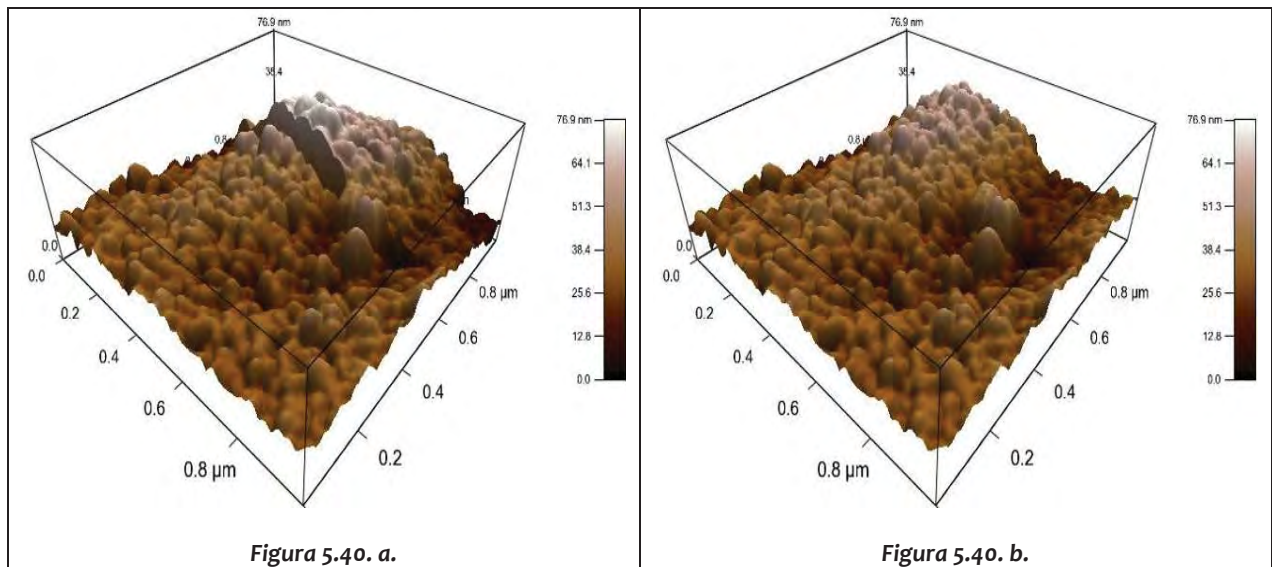


Figura 5.40. a y b. Caracterización mediante AFM del Nanocemento GP – 100% MAR TI, 50%OXIFe, CH en un área de barrido de $1.0\ \mu\text{m} \times 1.0\ \mu\text{m} \times 76.9\ \text{nm}$.

A través del análisis preliminar de microscopia de fuerza atómica utilizando un CYPHER (AFM más potente del mundo, 2010) se puede observar una densidad atómica de la superficie del nanocemento ferromagnético. Observe la nanotopografía superficial del sólido.

5.2.10 DIFRACCIÓN DE RAYOS X, DRX.

La prueba de Difracción de Rayos X (DRX), se realizó en los compuestos descritos en la parte inicial de la segunda fase (Tabla 5.2). Las muestras fueron preparadas y elaboradas de acuerdo a lo descrito en el subcapítulo 2.5.2.

Tabla 5.2. Lista de Compuestos - Segunda Fase para la prueba de DRX.

Compuestos	Formulación
Nanocemento GP – 150%MAR TI	Nanocemento Base + Agregado 1 Agregado 1 = 150% Marmolina Tipo I + sin Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 5%WOLLAS	Nanocemento Base + Agregado 2 Agregado 2 = 100% Marmolina Tipo I + 5% Wollastonita + sin Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 30%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 100% Marmolina Tipo I + 30% Óxido de Hierro + sin Hiperfluidificante

5.2.10.1 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE DRX EN NANOCEMENTO GP – 150%MAR TI, SH DRX EN NANOCEMENTO GP - 150%MAR TI SH

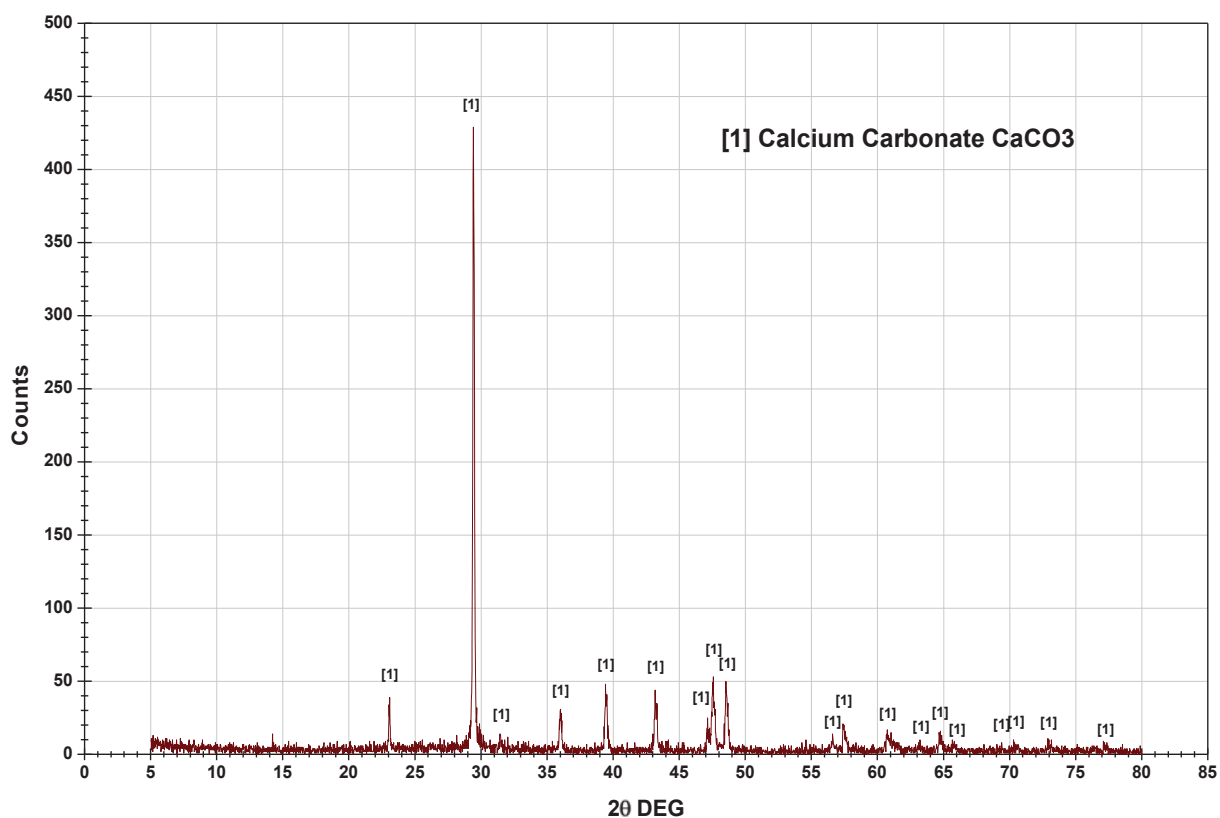


Figura 5.41. Gráfica DRX en Nanocemento GP – 150%MAR TI, SH.

Análisis por DRX de un nanocemento GP. Observe que solo se detecta la presencia de carbonato de calcio como fase única (cristalinidad) y se corrobora la estructura atómica del nanocemento (sólido amorfo).

5.2.10.2 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE DRX EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI,
5%WOLLAS, SH

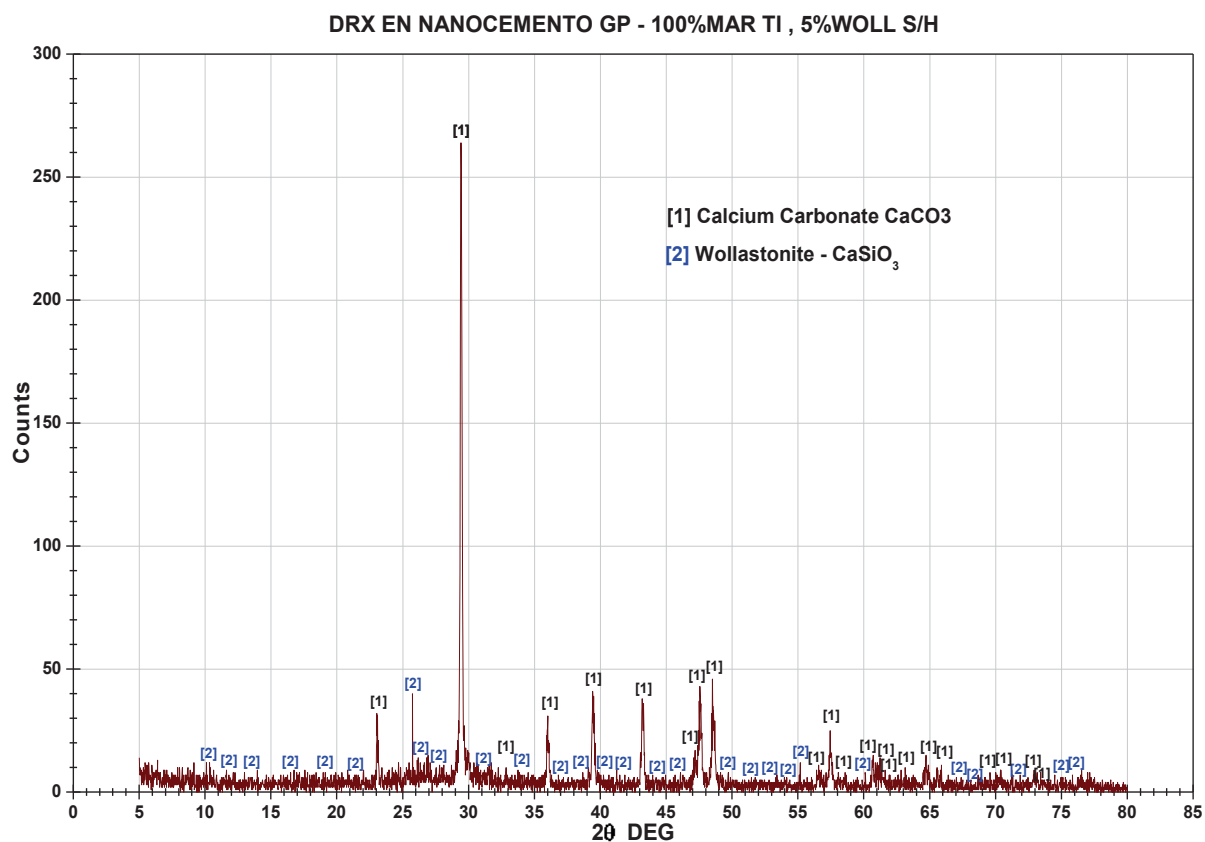


Figura 5.42. Gráfica DRX en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, SH.

Análisis por DRX de un nanocemento incorporando Wollastonita como precursor de silicatos cálcicos. Se observan dos fases cristalinas provenientes del carbonato de calcio y wollastonita respectivamente, no se aprecia que exista una nueva formación de fase cristalina por la incorporación de Ca^{2+} a esta edad de análisis (28 días).

5.2.10.3 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE DRX EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI,
30%OXIFe, SH

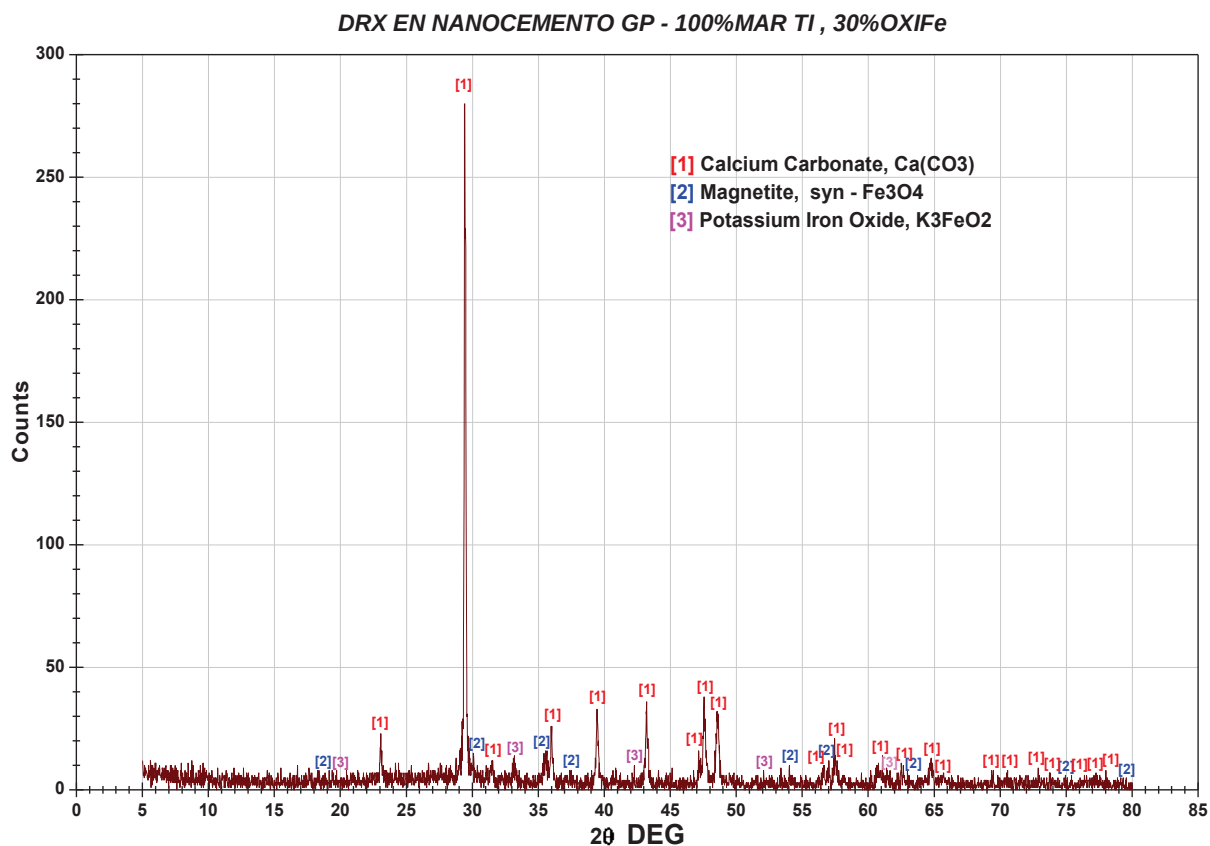


Figura 5.43. Gráfica DRX en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, SH.

DRX de un nanocemento ferromagnético encontrando tres fases cristalinas: Carbonato de Calcio (CaCO_3), Magnetita (Fe_3O_4) y Óxido de Potasio, Férrico (K_3FeO_2); este último presumiblemente formada durante el proceso de disolución alcalina y policondensación del nanocemento sintetizado.

5.2.11 ESPECTROSCOPIA DE INFRAROJO POR TRANSFORMADA DE FOURIER, FTIR

La prueba de Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR), se realizó en los compuestos descritos en la parte inicial de la segunda fase (Tabla 5.2). Las muestras fueron preparadas y elaboradas de acuerdo a lo descrito en el subcapítulo 5.5.4.

Tabla 5.2. Lista de Compuestos - Segunda Fase para la prueba de FTIR.

Compuestos	Formulación
Nanocemento GP – 150%MAR TI	Nanocemento Base + Agregado 1 Agregado 1 = 150% Marmolina Tipo I + sin y con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 5%WOLLAS	Nanocemento Base + Agregado 2 Agregado 2 = 100% Marmolina Tipo I + 5% Wollastonita + sin y con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 30%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 100% Marmolina Tipo I + 30% Óxido de Hierro + sin y con Hiperfluidificante

5.2.11.1 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FTIR EN NANOCEMENTO GP – 150%MAR TI, SH

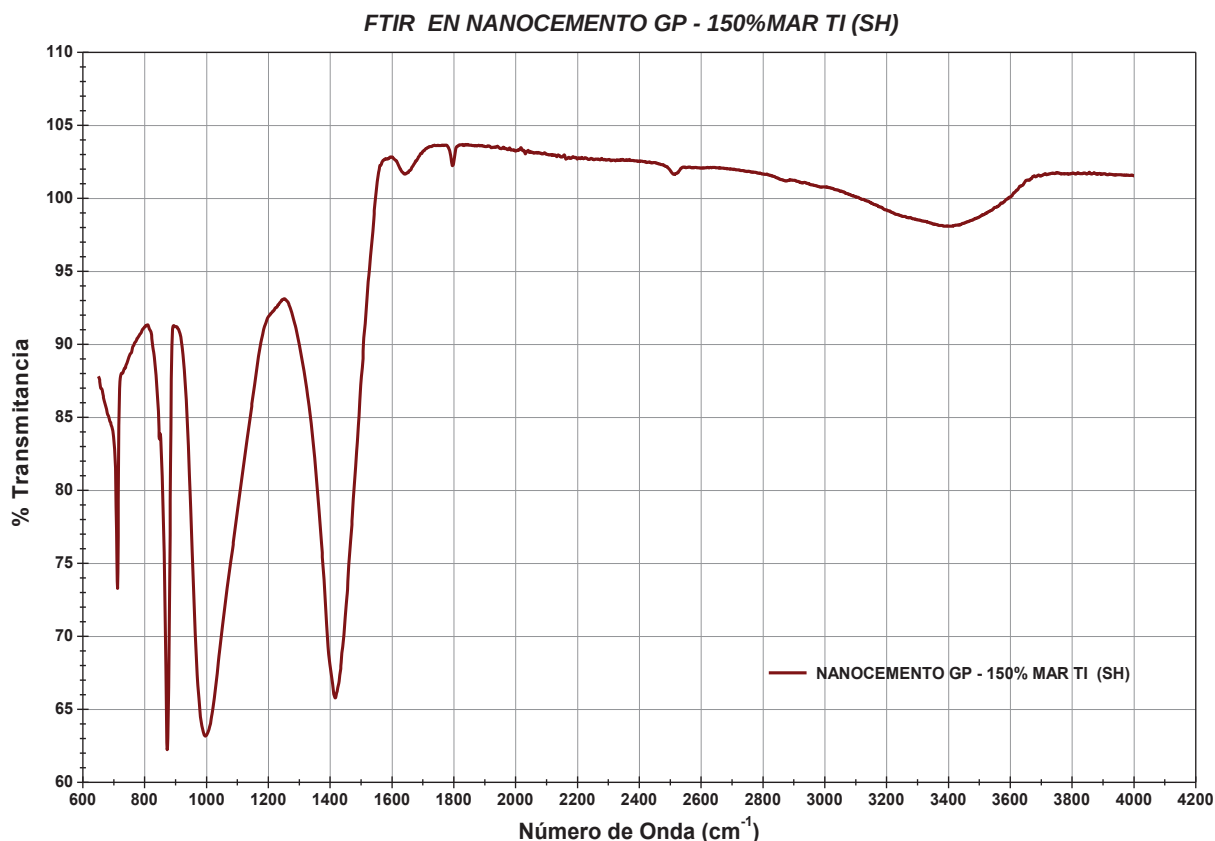


Figura 5.44. Gráfica FTIR en Nanocemento GP – 150%MAR TI, SH.

5.2.11.2 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FTIR EN NANOCEMENTO GP - 100% MAR TI, 5% WOLLAS, SH

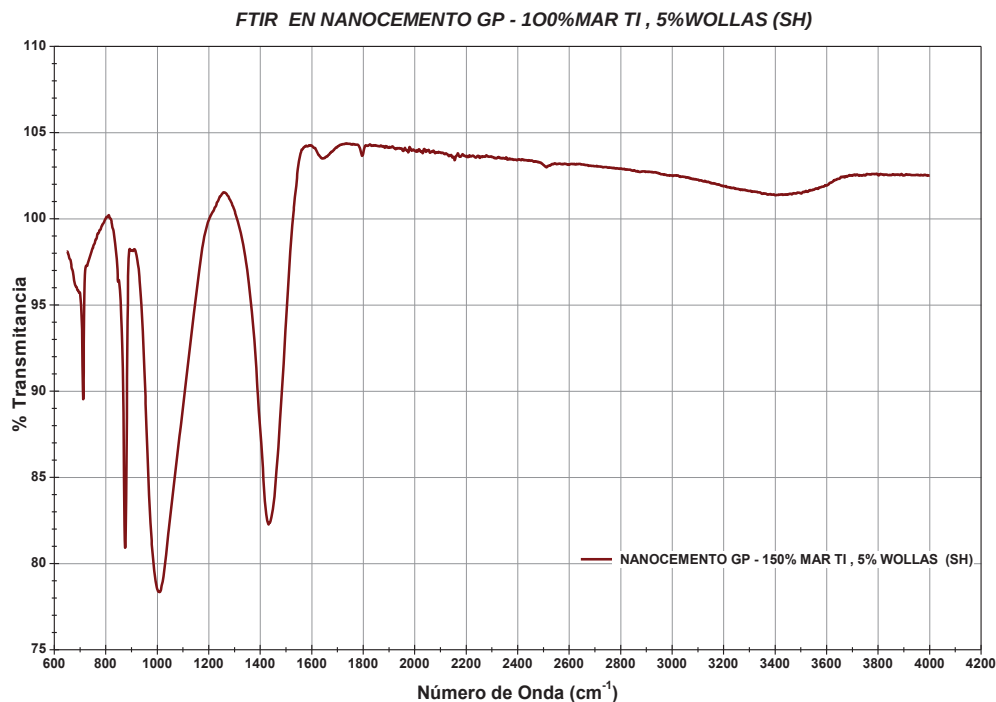


Figura 5.45. Gráfica FTIR en Nanocemento GP – 100% MAR TI, 5% WOLLAS, SH.

5.2.11.3 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FTIR EN NANOCEMENTO GP - 100% MAR TI, 30% OXIFe, SH

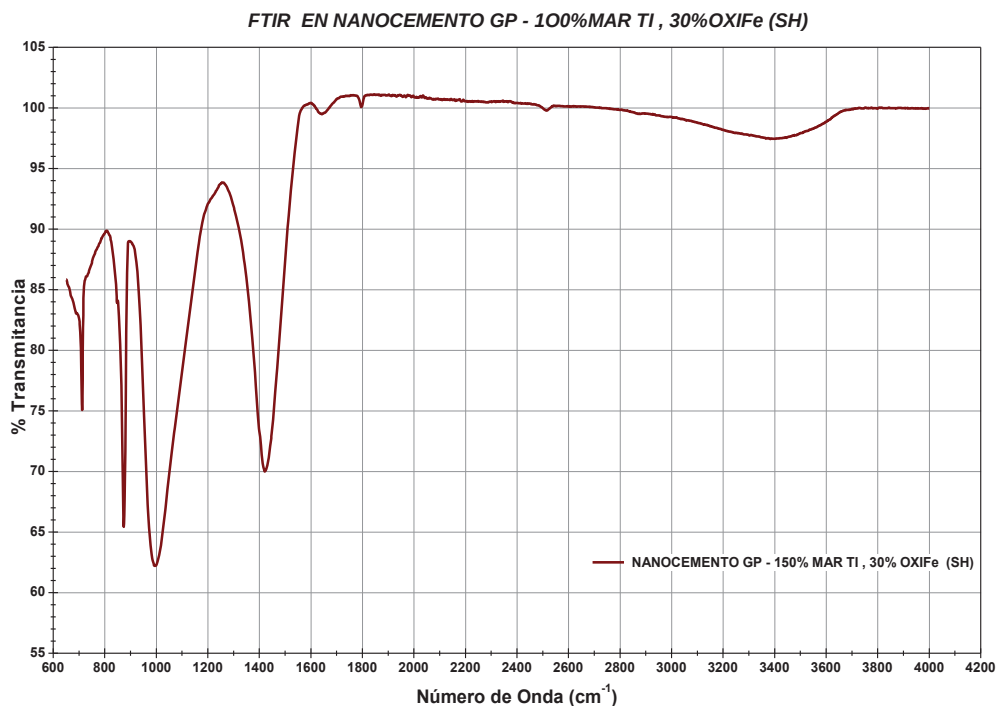


Figura 5.46. Gráfica FTIR en Nanocemento GP – 100% MAR TI, 30% OXIFe, SH.

5.2.11.4 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FTIR EN NANOCEMENTO GP - 150% MAR TI, CH

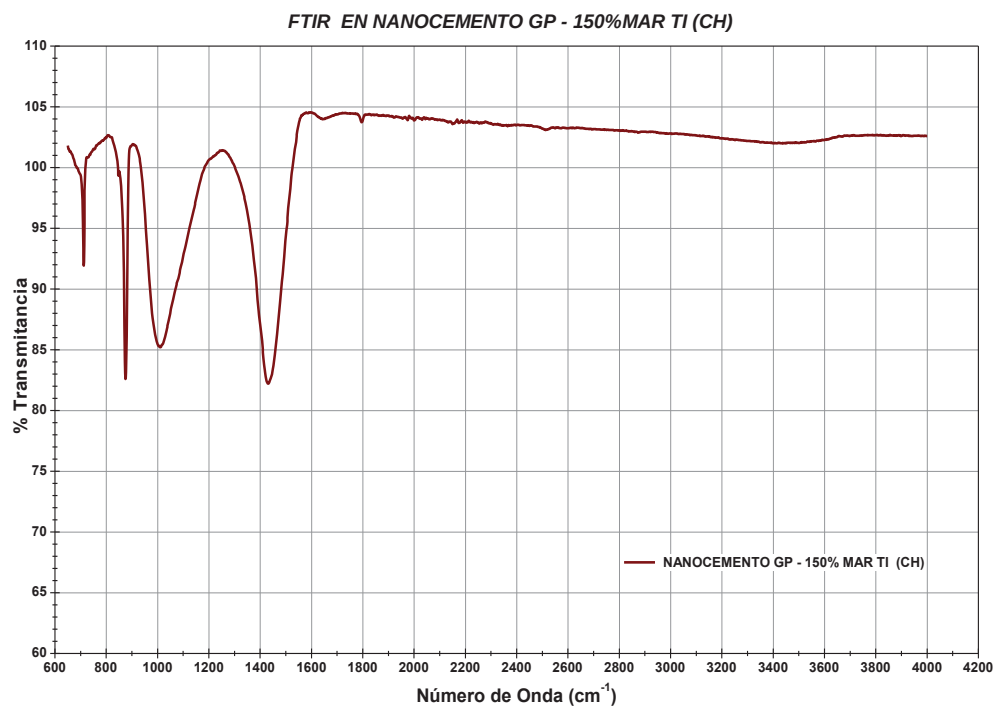


Figura 5.47. Gráfica FTIR en Nanocemento GP – 150% MAR TI, CH.

5.2.11.5 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FTIR EN NANOCEMENTO GP - 100% MAR TI, 5% WOLLAS, CH

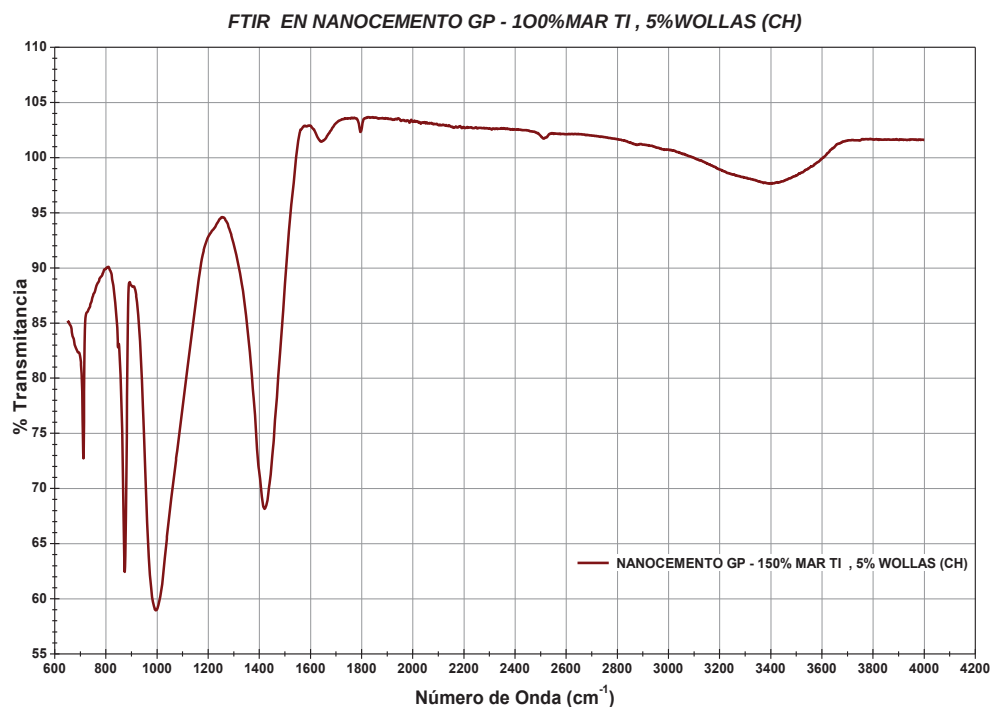


Figura 5.48. Gráfica FTIR en Nanocemento GP – 100% MAR TI, 5% WOLLAS, CH.

5.2.11.6 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FTIR EN NANOCEMENTO GP - 100% MAR TI, 30% OXIFe, CH

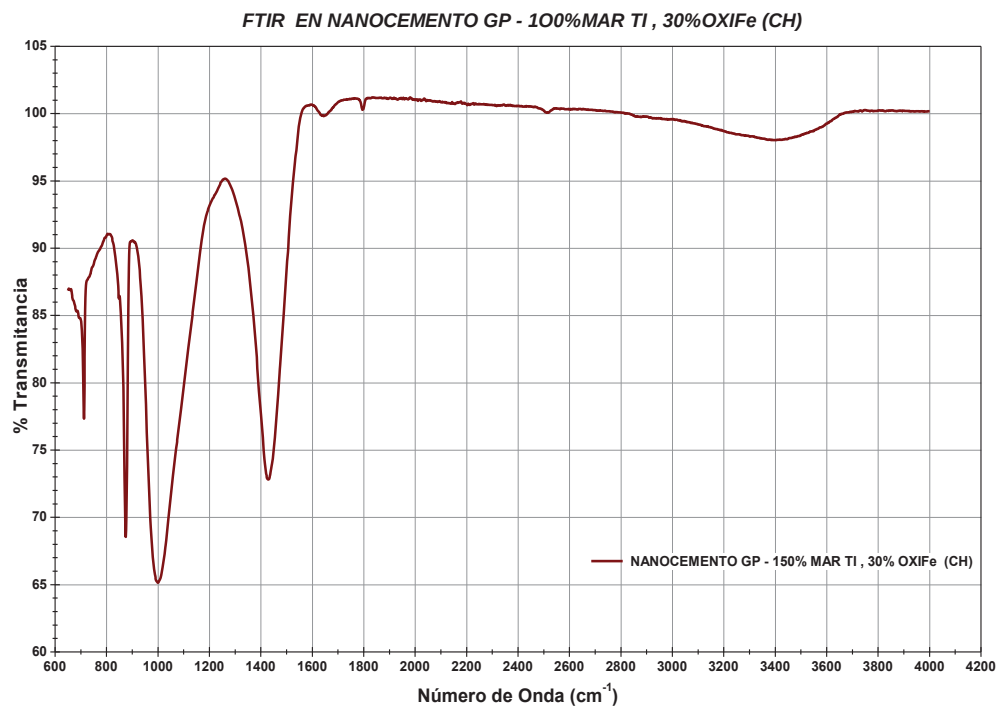


Figura 5.49. Gráfica FTIR en Nanocemento GP – 100% MAR TI, 30% OXIFe, CH.

 CARACTERIZACIÓN FTIR: COMBINACIÓN DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS

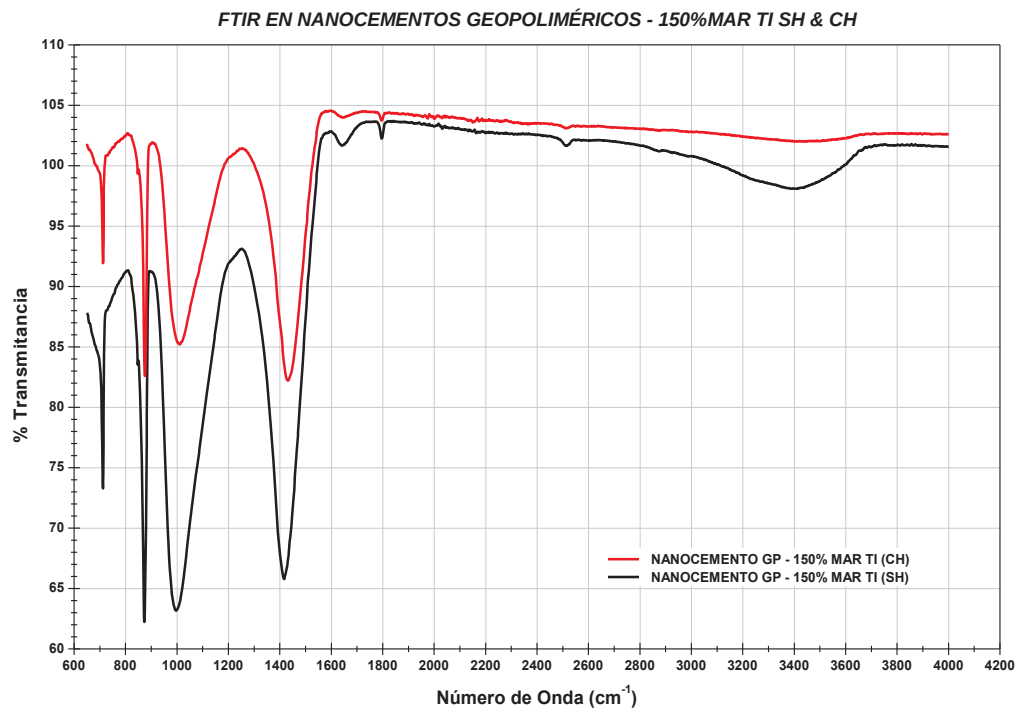


Figura 5.50. Combinación gráficos FTIR: Nanocemento GP – 150%MAR TI, SH & CH.

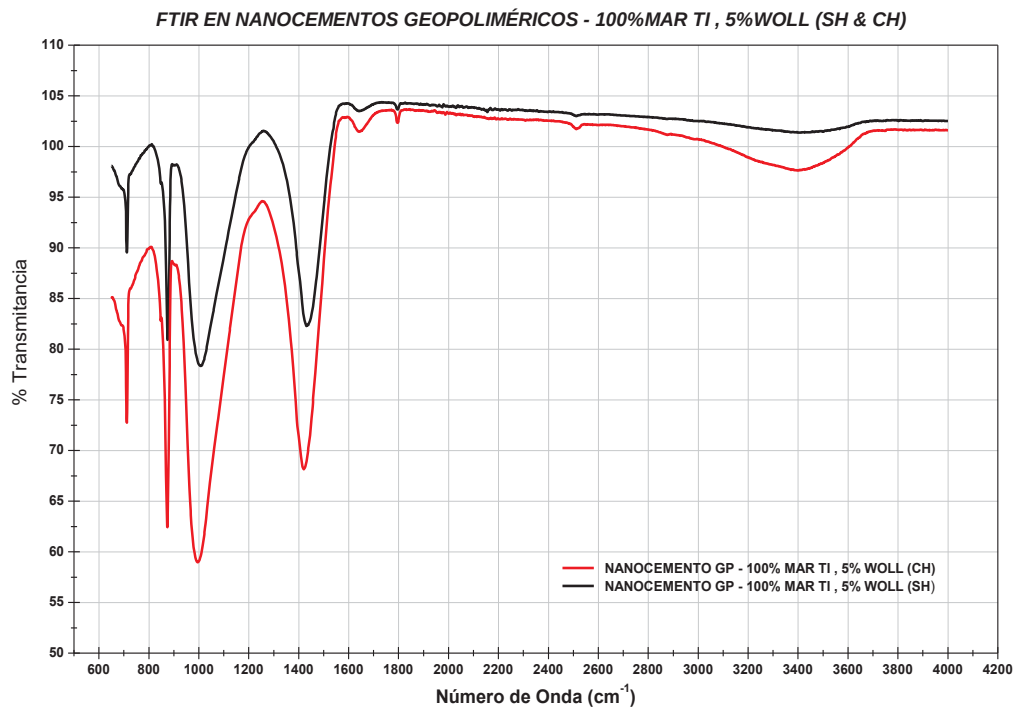


Figura 5.51. Combinación gráficos FTIR: Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, SH & CH.

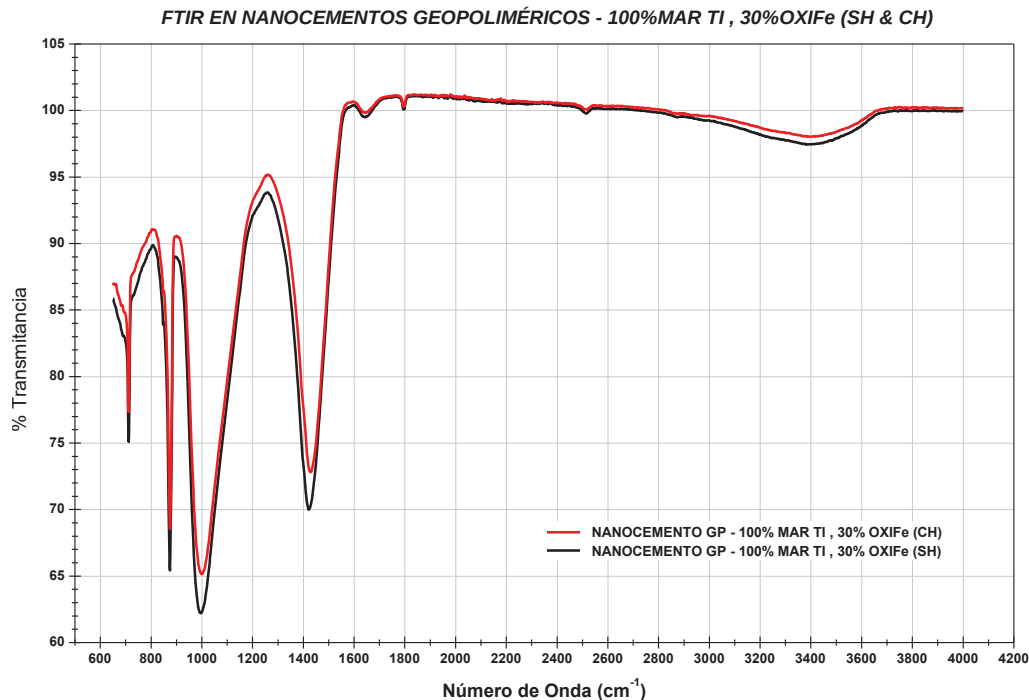


Figura 5.52. Combinación gráficos FTIR: Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, SH & CH.

El análisis de espectroscopia realizado busca detectar las energías vibracionales de los diferentes enlaces químicos desarrollados. Como puede observarse no se detecta significativo entre los nanocementos que utilizaron policarboxilatos y los estándares, por lo que se concluye que los policarboxilatos son inertes cuando se utilizan como hiperfluidificantes en las matrices de nanocemento. Es importante mencionar que falta identificar las diferentes bandas, para determinar los tipos de enlaces químicos presentes, sin embargo se presupone por las longitudes de onda vibracionales y una búsqueda preliminar que corresponden a enlaces del tipo silato ($-\text{Si-O-Al-O}-$), enlaces tipo silanol (Si-OH). Sin embargo es necesario realizar la identificación precisa.

5.2.12 ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ULTRAVIOLETA VISIBLE, UV - Vis

La caracterización mediante Espectroscopia de Absorción Ultravioleta Visible (UV - Vis), se realizó en compuestos descritos a continuación para cada corrida. Las muestras fueron preparadas y elaboradas de acuerdo a lo descrito en el subcapítulo 2.5.7.

5.2.12.1 CORRIDA NÚMERO UNO

Tabla 5.5. Lista de Compuestos – Corrida uno para prueba UV - Vis.

Compuestos	Formulación
Nanocemento GP – 150%MAR TI	Nanocemento Base + Agregado 1 Agregado 1 = 150% Marmolina Tipo I + con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 5%WOLLAS	Nanocemento Base + Agregado 2 Agregado 2 = 100% Marmolina Tipo I + 5% Wollastonita + con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 30%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 100% Marmolina Tipo I + 30% Óxido de Hierro + con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 20%TiO2	Nanocemento Base + Agregado 4 Agregado 4 = 100% Marmolina Tipo I + 20%TiO2 + con Hiperfluidificante

5.2.12.1.1 CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP – 150%MAR TI, CH

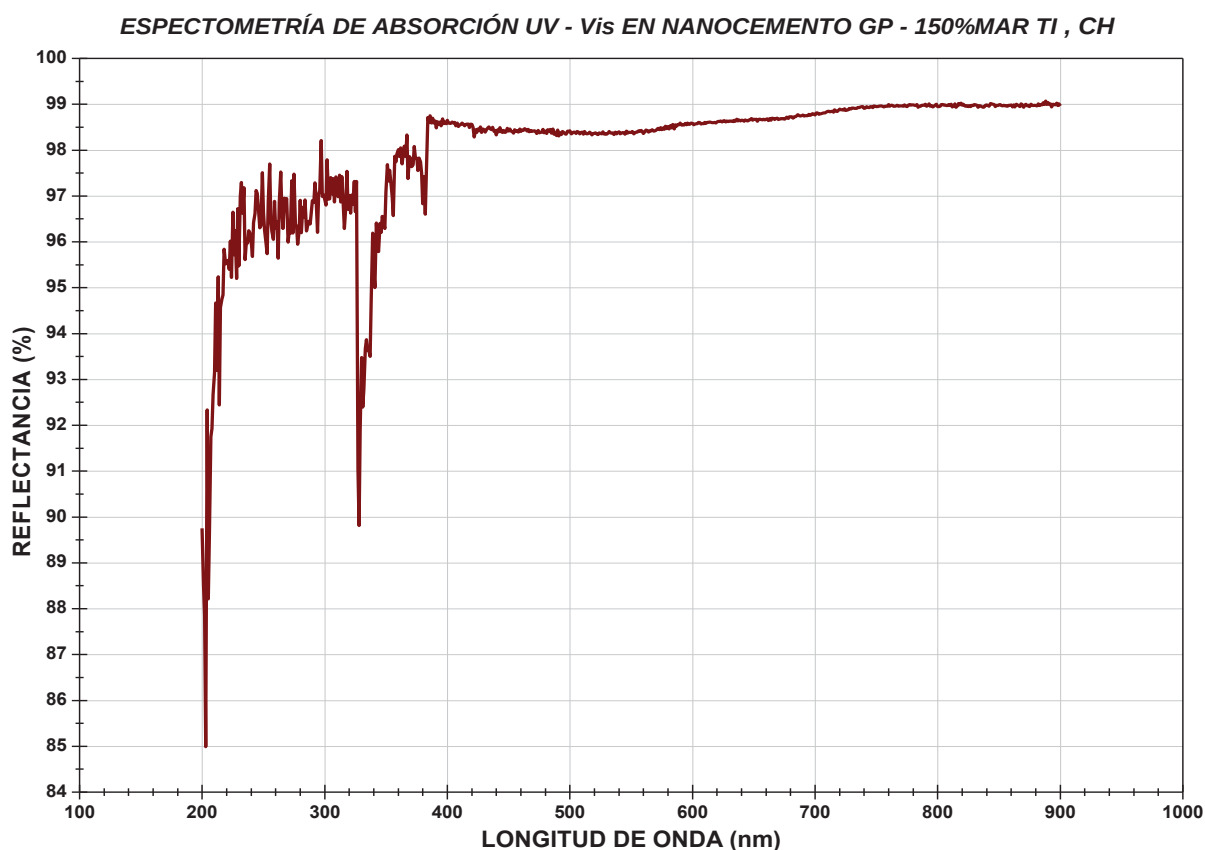


Figura 5.53. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 150%MAR TI, CH.

5.2.12.1.2 CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI,
5%WOLLAS, CH

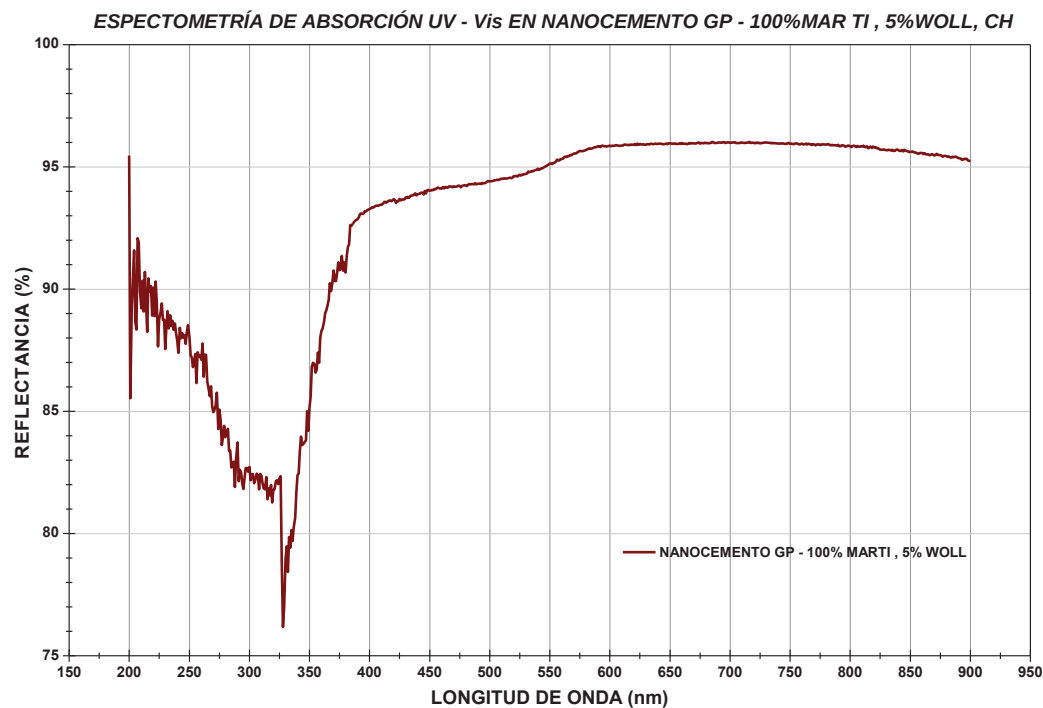


Figura 5.54. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, CH.

5.2.12.1.3 CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI,
30%OXIFe, CH

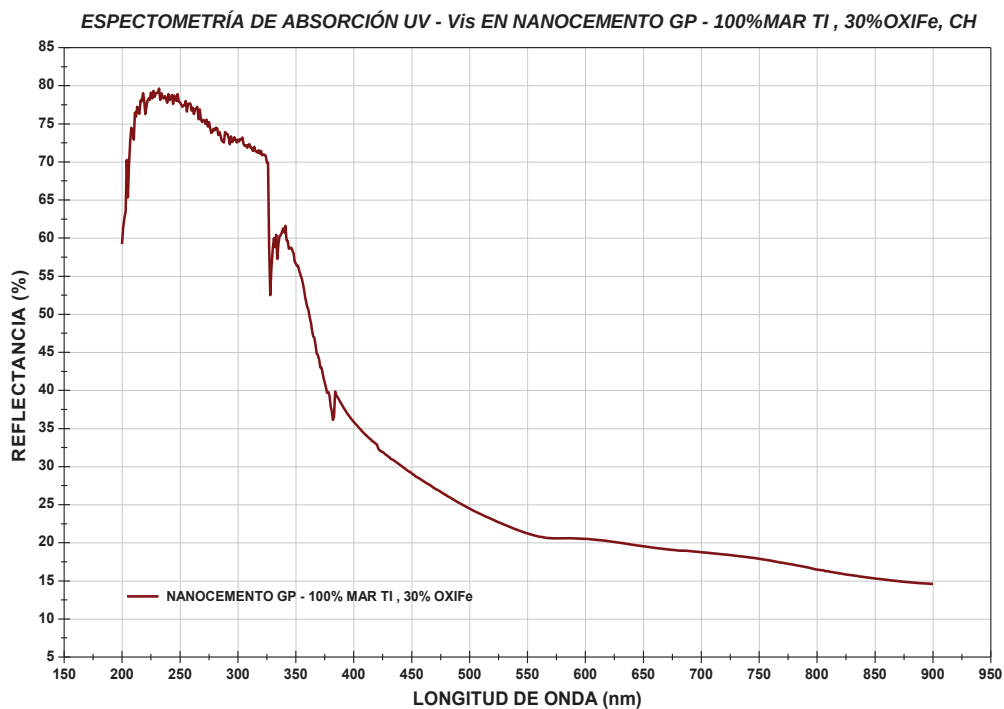


Figura 5.55. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, CH.

5.2.12.1.4 CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI, 20%TiO₂, CH

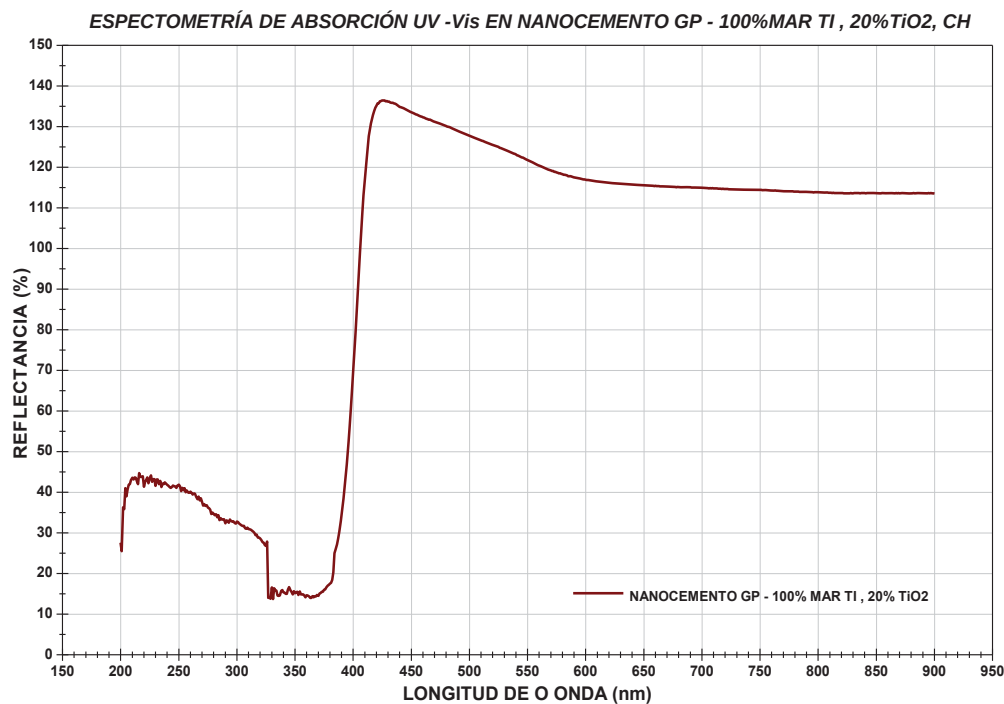


Figura 5.56. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 20%TiO₂, CH.

 **CARACTERIZACIÓN UV - Vis: COMBINACIÓN DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS
CH: CORRIDA NÚMERO UNO**

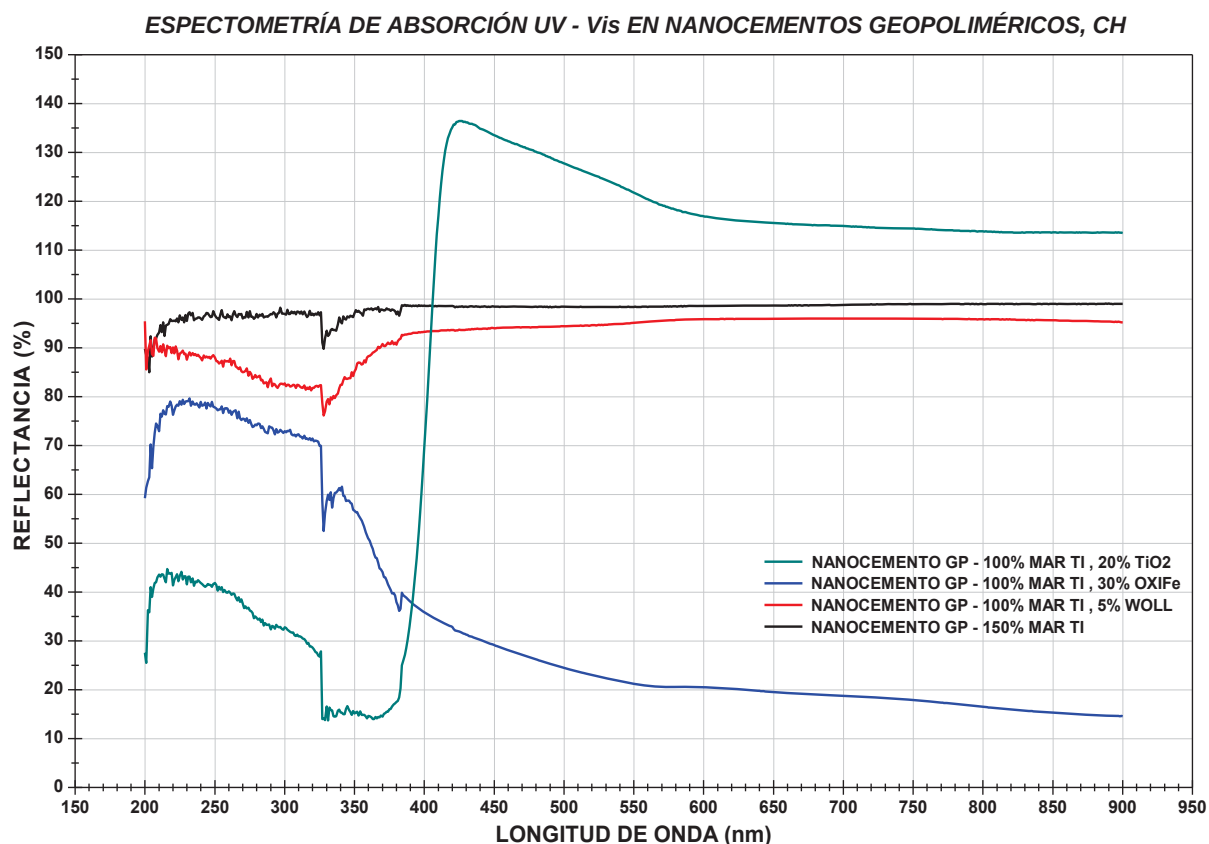


Figura 5.57. Combinación de Gráficos UV - Vis en Nanocemento Geopoliméricos – Corrida uno.

Análisis por UV-Vis de los diferentes nanocementos multifuncionales utilizando el nanocemento GP -150%MAR TI como referencia. El porcentaje de reflectancia se ve disminuido con la presencia de Wollastonita dentro de la matriz cuando es comparada con el Geopolimero 150%MAR TI. El porcentaje de reflectancia se incrementa aproximadamente un 35% en el rango de luz visible cuando se le incorpora Titania a la matriz generando una superficie con mayor capacidad de reflexión de luz visible, optimizando el consumo energético. Se observa también que absorbe una cantidad significativa de rayos UV. En el caso del nanocemento ferromagnético se encuentra una mayor absorción en el rango visible e infrarojo pero se tiene una reflectancia mayor en longitudes menores del espectro electromagnético.

5.2.12.2 CORRIDA NÚMERO DOS

Tabla 5.6. Lista de Compuestos – Corrida dos para prueba UV - Vis.

Compuestos	Formulación
Nanocemento GP – 150%MAR TI	Nanocemento Base + Agregado 1 Agregado 1 = 150% Marmolina Tipo I, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 30%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 2 Agregado 2 = 100% Marmolina Tipo I + 30%OXIFe, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 50%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 100% Marmolina Tipo I + 50%OXIFe, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 75%MAR TI , 100%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 75% Marmolina Tipo I + 100%OXIFe + 7%Agua, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 75%MAR TI , 150%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 75% Marmolina Tipo I + 150%OXIFe + 10%Agua, con Hiperfluidificante

5.2.12.2.1 CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP – 150%MAR TI, CH

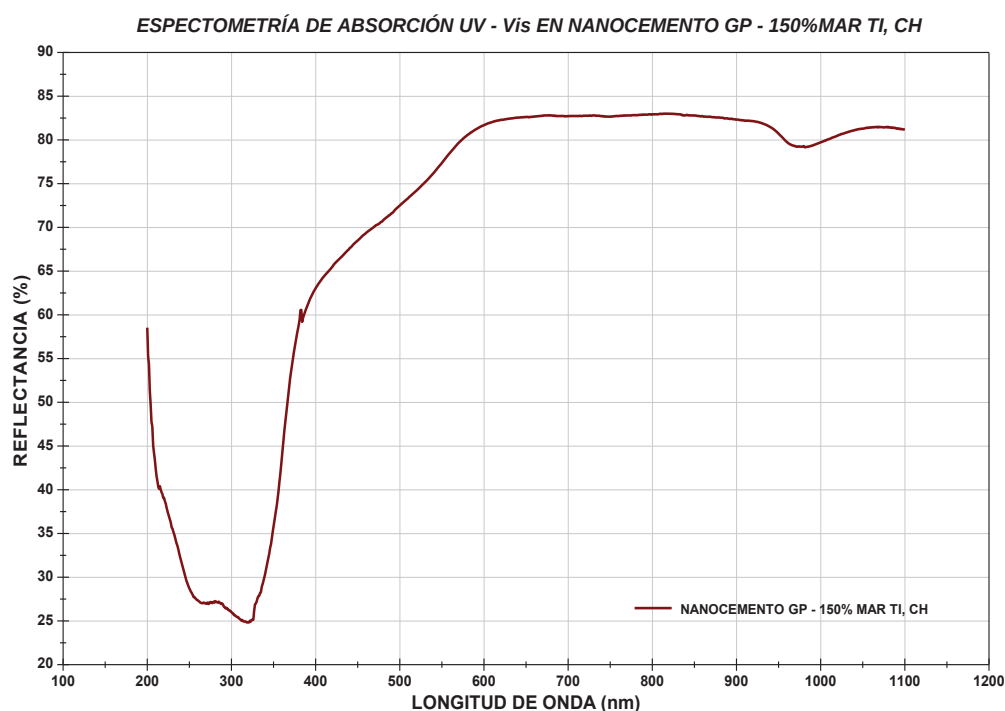


Figura 5.58. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 150%MAR TI, CH.

5.2.12.2.2 CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI,
30%OXIFe, CH

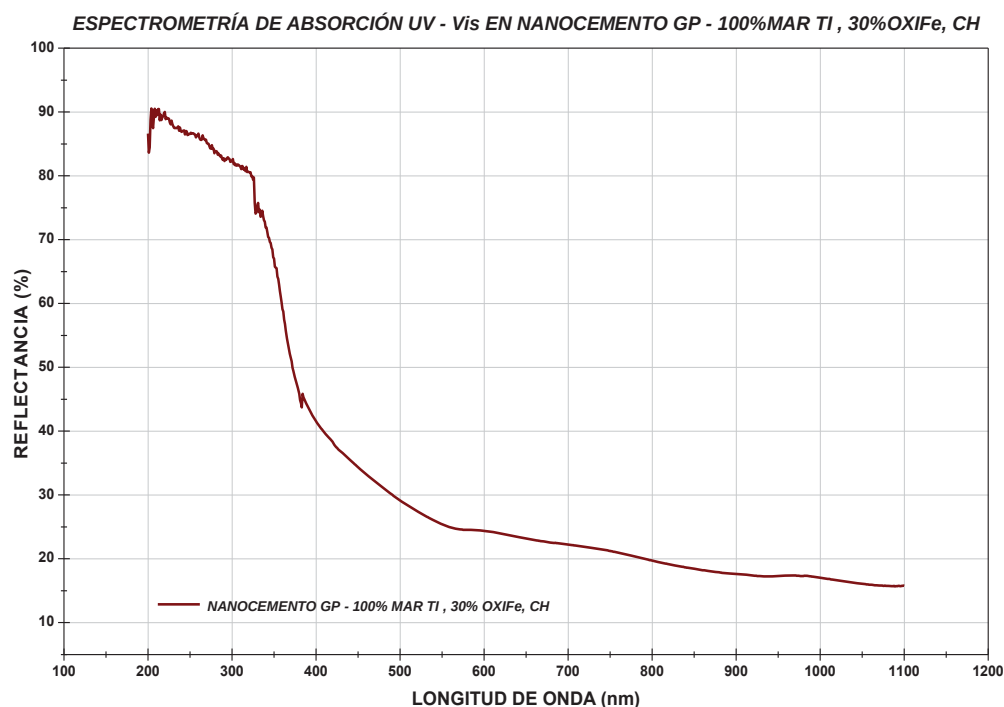


Figura 5.59. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 30%OXIFe, CH.

5.2.12.2.3 CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI,
50%OXIFe, CH

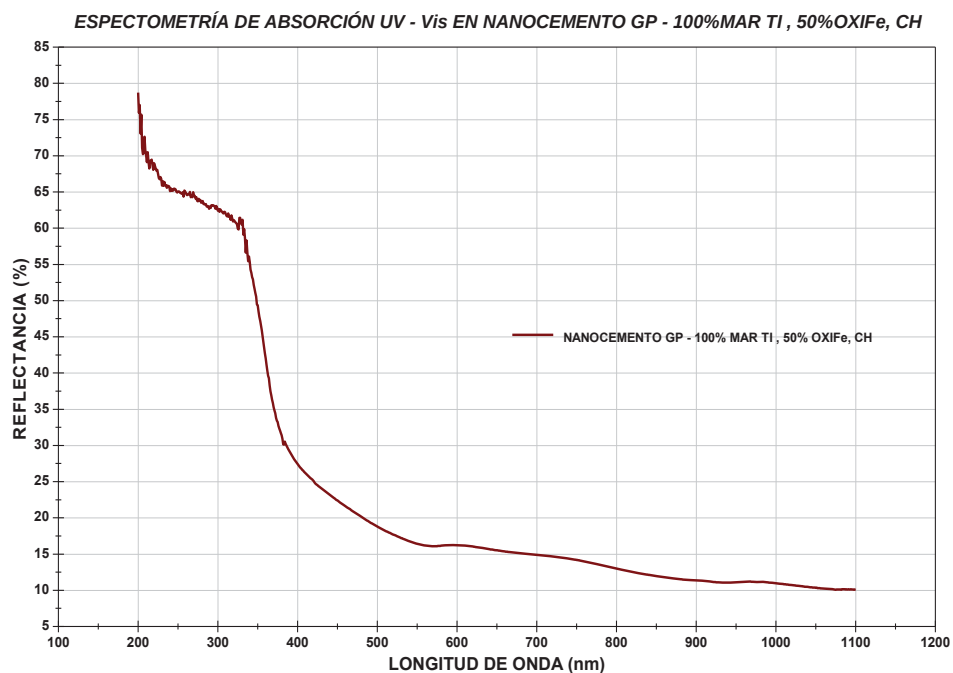


Figura 5.60. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 50%OXIFe, CH.

5.2.12.2.4 CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP - 75%MAR TI,
100%OXIFe, 7%AGUA, CH

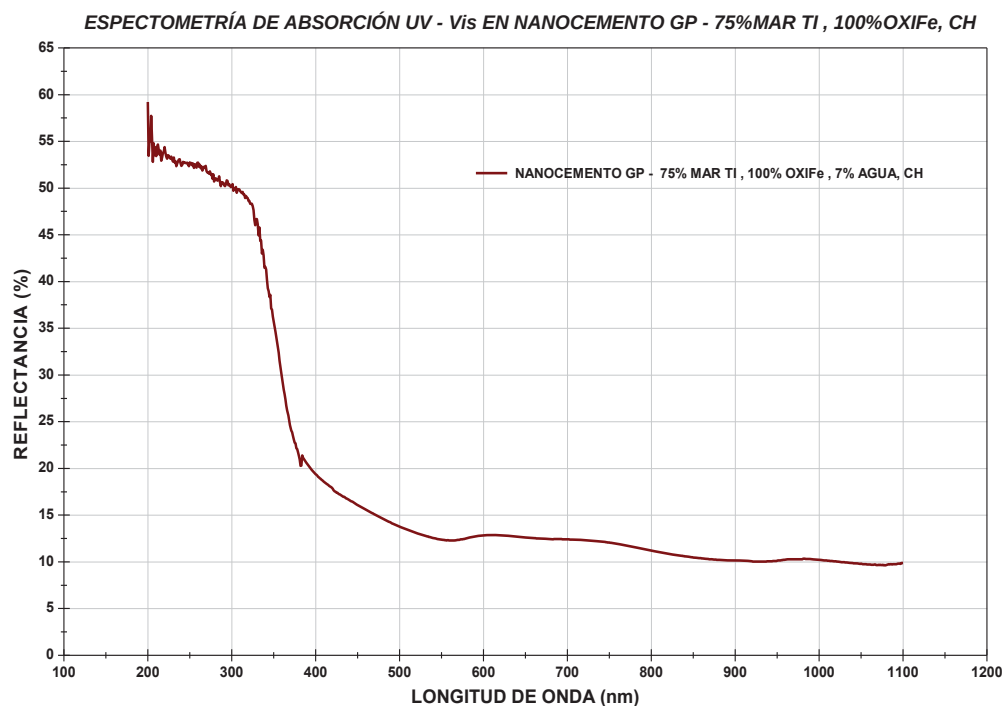


Figura 5.61. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 75%MAR TI, 100%OXIFe, 7%Agua, CH.

5.2.12.2.5 CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP - 75%MAR TI, 150%OXIFe,
10%AGUA, CH

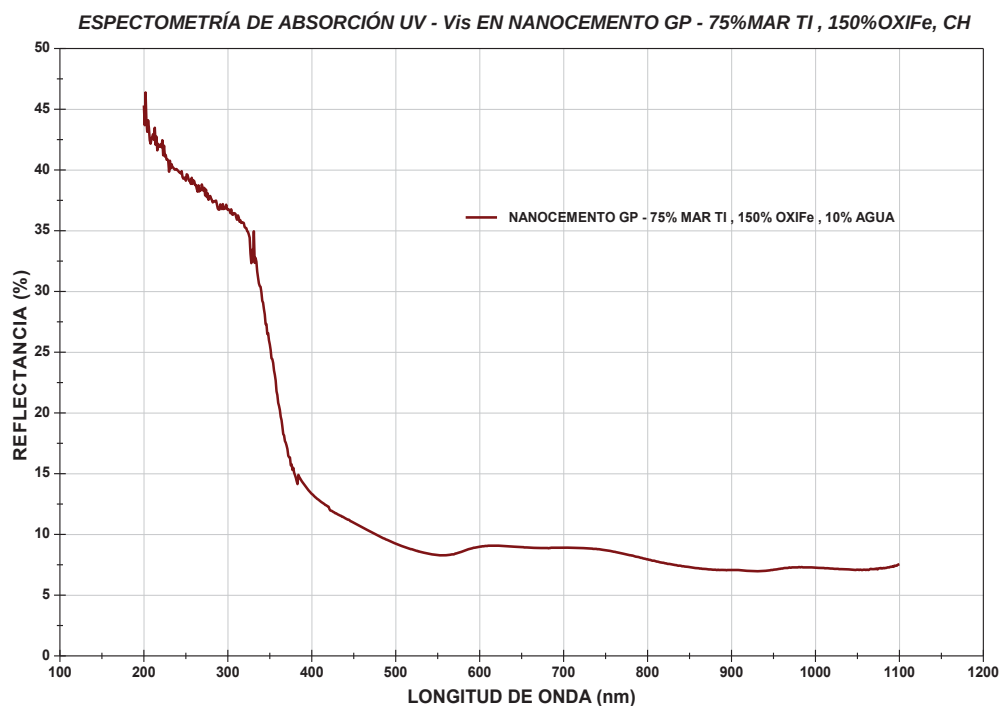


Figura 5.62. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 75%MAR TI, 150%OXIFe, 10%Agua, CH.

 **CARACTERIZACIÓN UV - Vis: COMBINACIÓN DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS
CH: CORRIDA NÚMERO DOS**

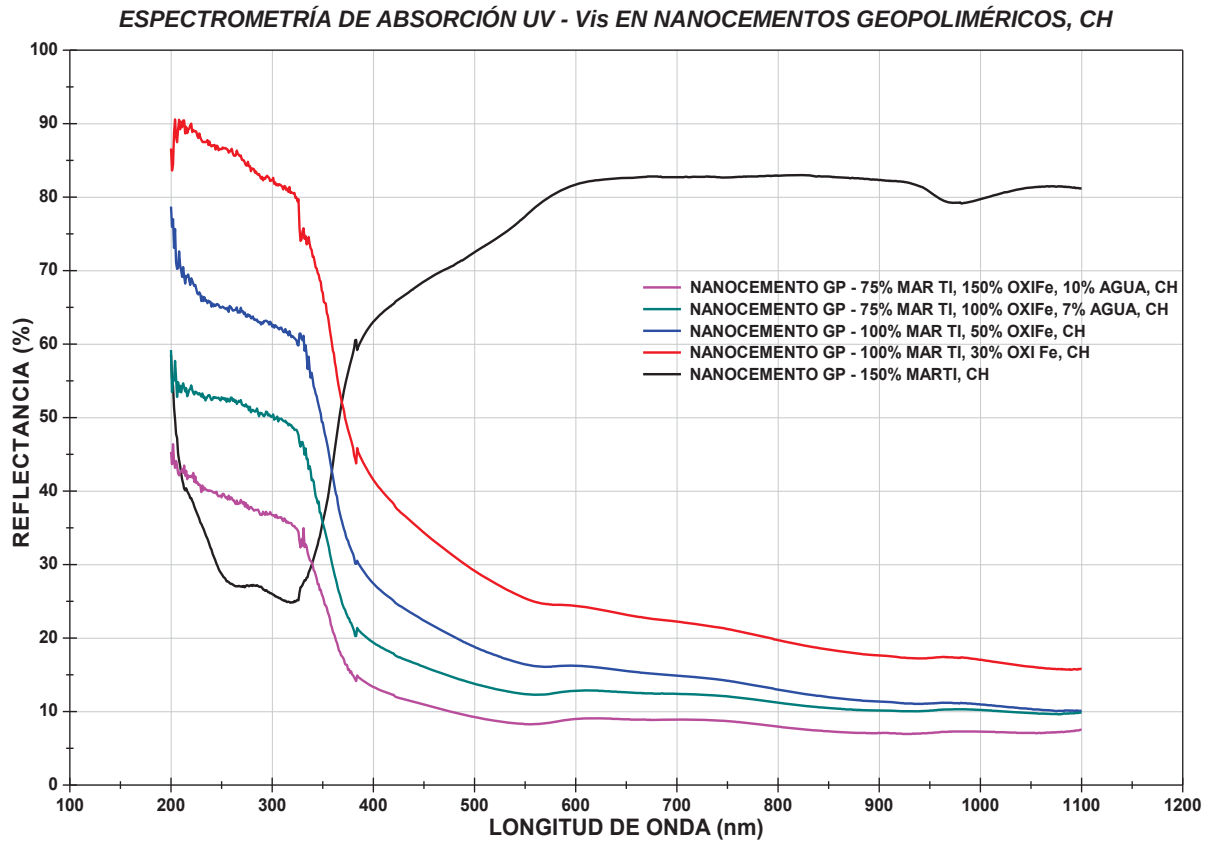


Figura 5.63. Combinación de Gráficos UV - Vis en Nanocemento Geopoliméricos – Corrida dos.

Análisis de UV-Vis utilizando el blanco de referencia del equipo y comparando con el nanocemento GP 150%MARTI se puede observar el porcentaje de reflectancia alto en el rango de la luz visible e infraroja y una caída para las longitudes de onda menores de 500nm. También se aprecia como la incorporación de Óxido de hierro genera cambios en la reflectancia conforme se incrementa el contenido del mismo, sin embargo presentan una tendencia generalizada a lo largo de las diferentes longitudes de onda.

5.2.12.3 CORRIDA NÚMERO TRES

Tabla 5.6. Lista de Compuestos – Corrida tres para prueba UV - Vis.

Compuestos	Formulación
Nanocemento GP – 150%MAR TI	Nanocemento Base + Agregado 1 Agregado 1 = 150% Marmolina Tipo I, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 5%TiO ₂	Nanocemento Base + Agregado 2 Agregado 2 = 100% Marmolina Tipo I + 30%OXIFe, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 10%TiO ₂	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 100% Marmolina Tipo I + 50%OXIFe, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 20%TiO ₂	Nanocemento Base + Agregado 4 Agregado 4 = 75% Marmolina Tipo I + 100%OXIFe + 7%Agua, con Hiperfluidificante

✚ CARACTERIZACIÓN UV – Vis EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 5%TiO₂, CH

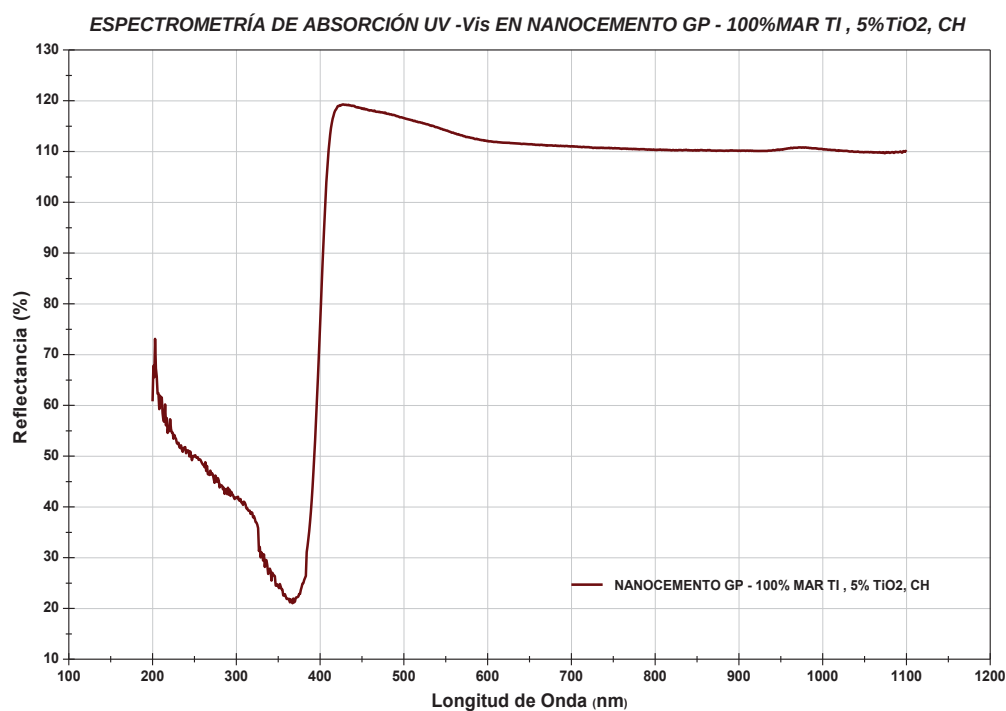


Figura 5.64. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%TiO₂, CH.

CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI, 10%TiO₂, CH

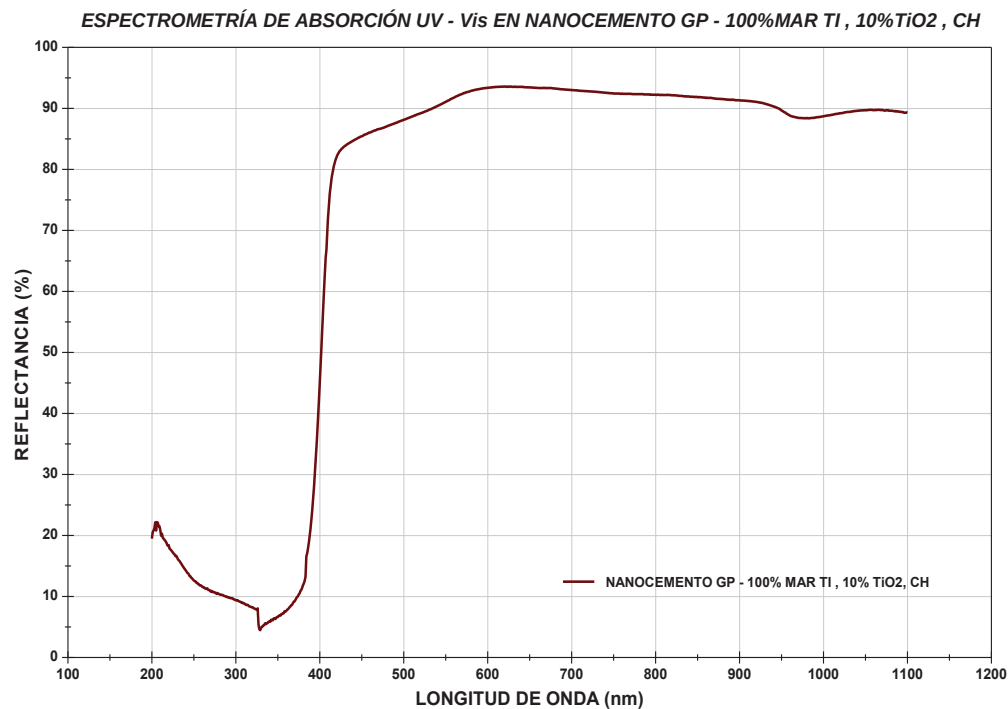


Figura 5.65. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP - 100%MAR TI, 10%TiO₂, CH.

CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI, 20%TiO₂, CH

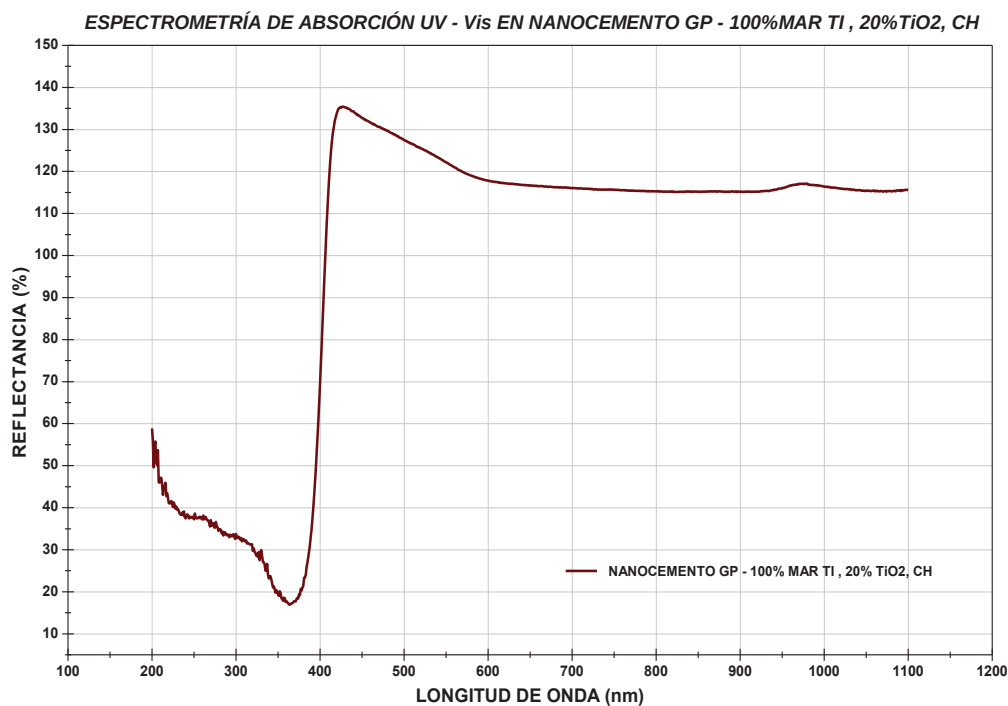


Figura 5.66. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP - 100%MAR TI, 20%TiO₂, CH.

**CARACTERIZACIÓN UV - Vis: COMBINACIÓN DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS
CH: CORRIDA NÚMERO TRES**

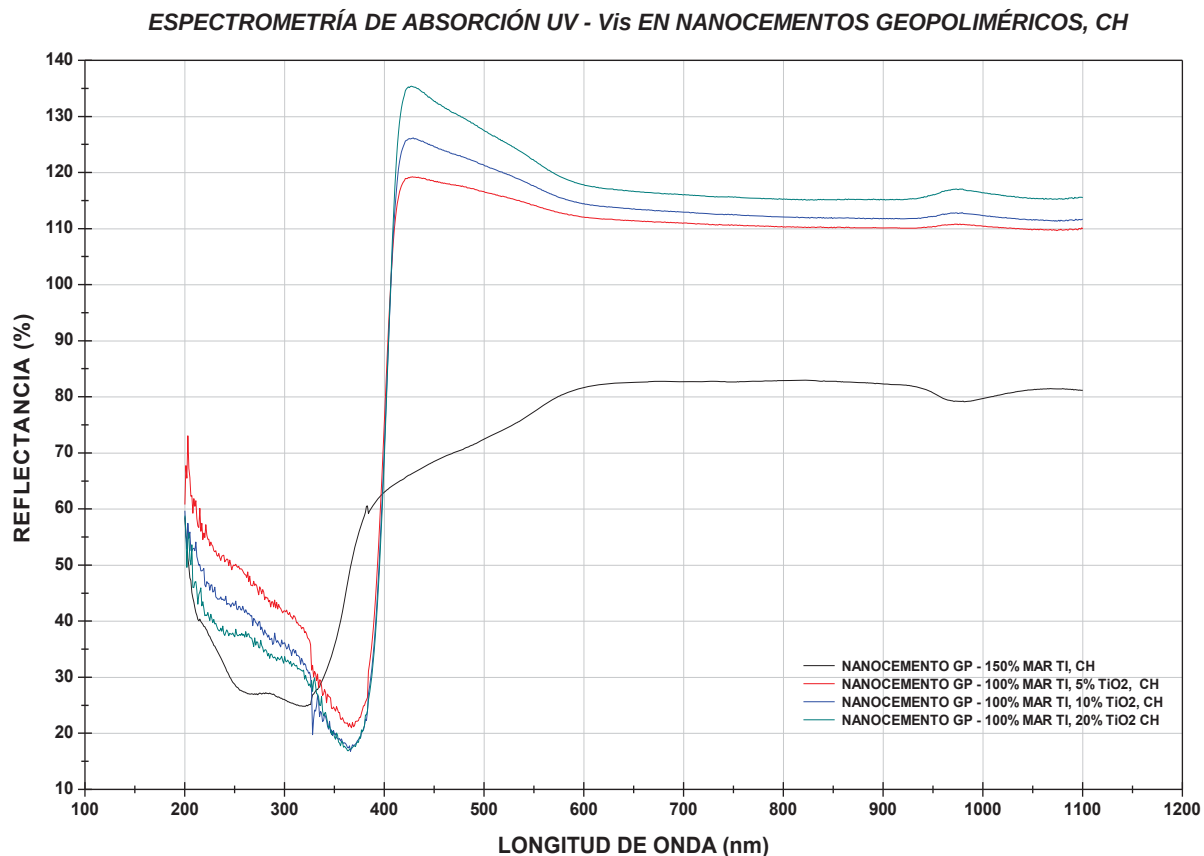


Figura 5.67. Combinación de Gráficos UV - Vis en Nanocemento Geopoliméricos – Corrida tres.

Análisis por UV-Vis utilizando el blanco de referencia del equipo. Observe el incremento de la reflectancia en el rango de la luz visible con la incorporación de Titania a diferentes porcentajes en relación al nanocemento GP 150MAR TI (nanocemento estándar), también observe la absorción de rayos UV en el rango de los 200 a 400 nm.

5.2.12.4 CORRIDA NÚMERO CUATRO

Tabla 5.7. Lista de Compuestos – Corrida cuatro para prueba UV - Vis.

Compuestos	Formulación
Nanocemento GP – 150%MAR TI	Nanocemento Base + Agregado 1 Agregado 1 = 150% Marmolina Tipo I, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 5%TiO ₂	Nanocemento Base + Agregado 2 Agregado 2 = 100% Marmolina Tipo I + 30%OXIFe, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 10%TiO ₂	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 100% Marmolina Tipo I + 50%OXIFe, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 20%TiO ₂	Nanocemento Base + Agregado 4 Agregado 4 = 75% Marmolina Tipo I + 100%OXIFe + 7%Agua, con Hiperfluidificante

5.2.12.4.1 CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP – 100%MAR TI, 5%TiO₂, CH

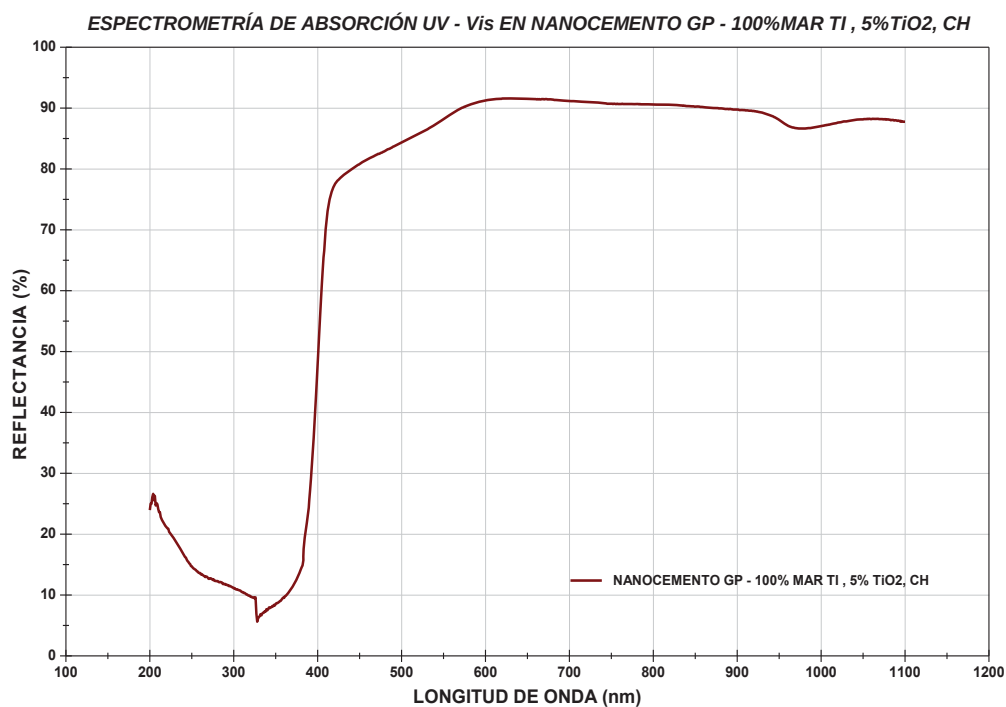


Figura 5.68. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%TiO₂, CH.

5.2.12.4.2 CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI, 10%TiO₂, CH

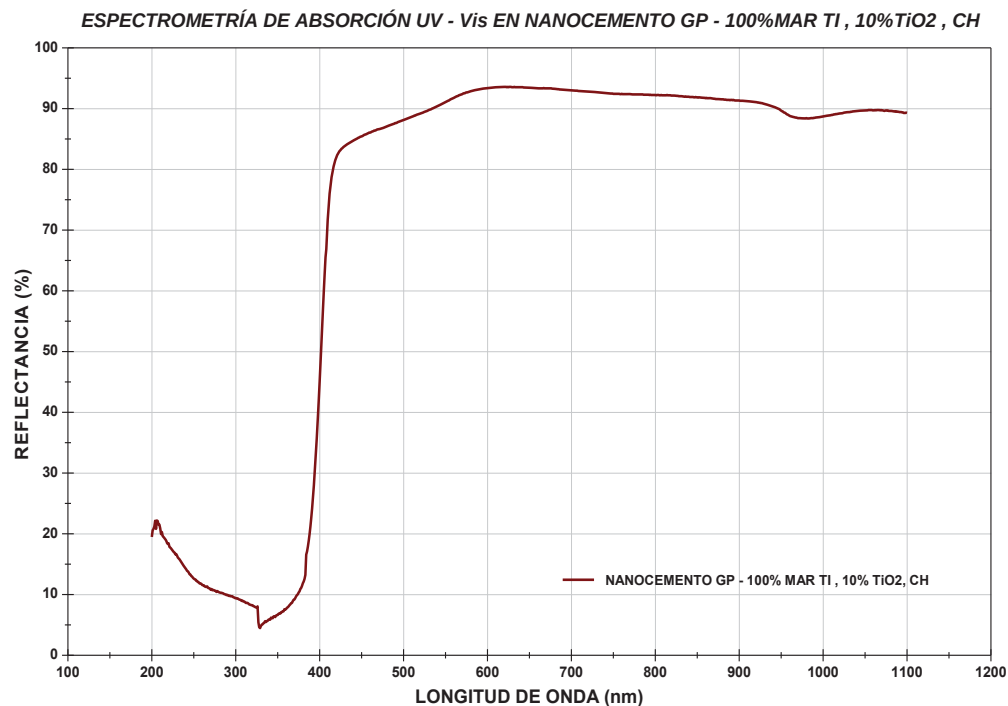


Figura 5.69. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 10%TiO₂, CH.

5.2.12.4.3 CARACTERIZACIÓN UV - Vis EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI, 20%TiO₂, CH

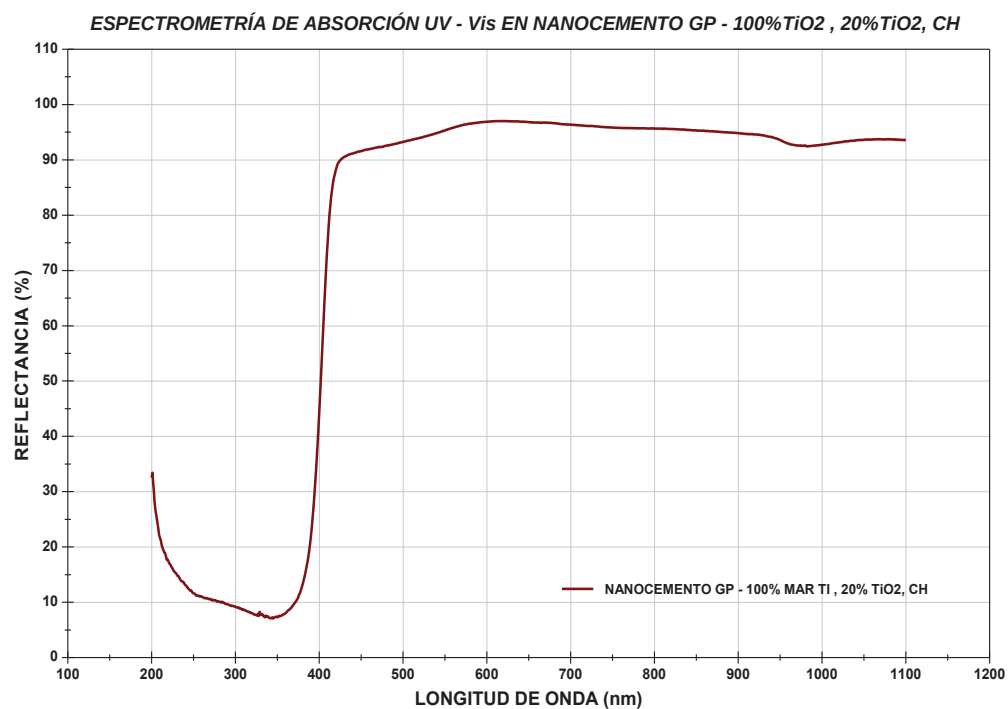


Figura 5.70. Gráfica UV - Vis en Nanocemento GP – 100%MAR TI, 20%TiO₂, CH.

**CARACTERIZACIÓN UV - Vis: COMBINACIÓN DE NANOCEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS
CH: CORRIDA NÚMERO CUATRO**

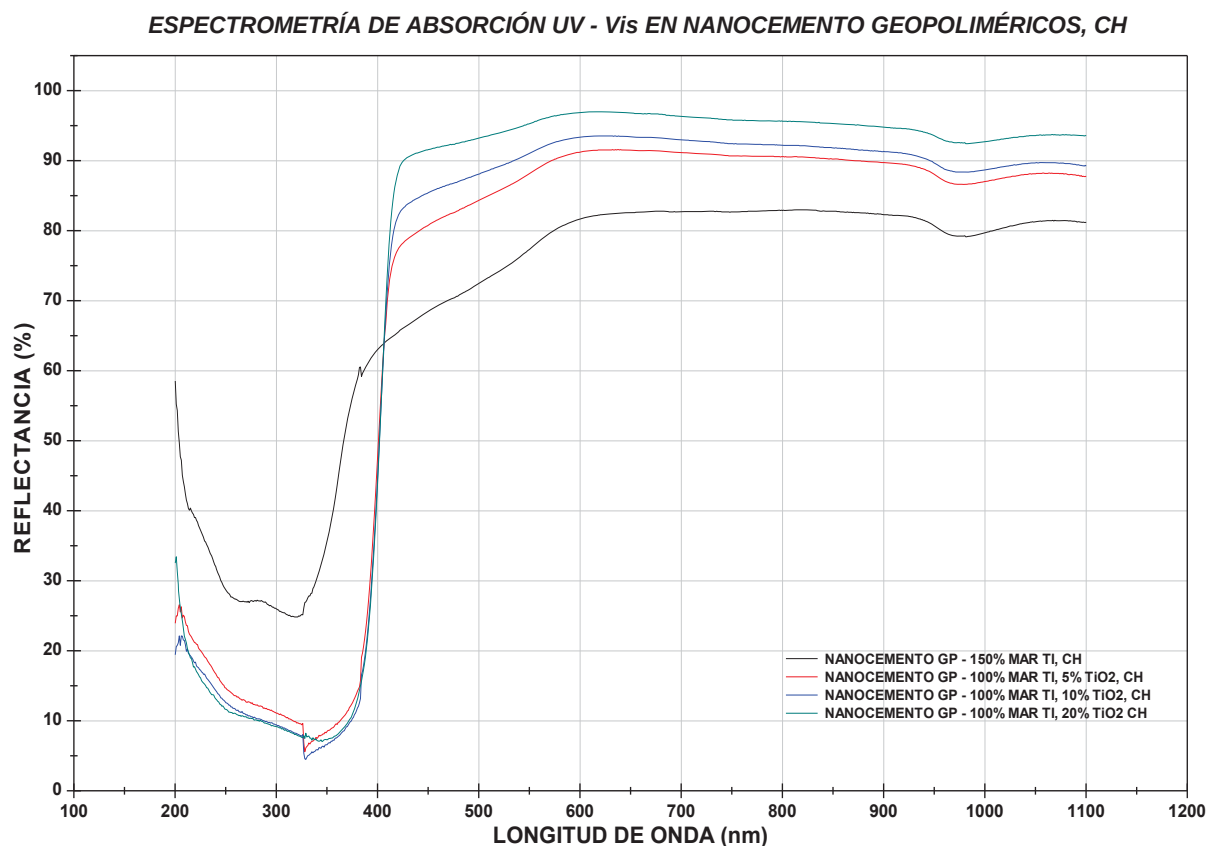


Figura 5.71. Combinación de Gráficos UV - Vis en Nanocemento Geopoliméricos – Corrida cuatro.

Análisis por UV-Vis de diferentes concentraciones de Titania mostrando una tendencia de absorción de rayos UV en el rango de los 200 a 400 nm.

5.2.13 DILATOMETRÍA

Esta prueba se realizó para ver los efectos producidos cuando un material se somete a un aumento de temperatura, para nuestro caso este aumento de temperatura se llevó hasta los 600 °C y así determinar cuantitativamente la expansión o contracción de nuestro material. Los especímenes fueron labrados de acuerdo a lo descrito en el subcapítulo 2.5.9 así como el equipo utilizado proporcionado por la facultad de Ciencias Metalúrgicas de la UMSNH.

Los compuestos sometidos a esta prueba fueron 8 compuestos diferentes, con dos especímenes cada uno; de los cuales 6 fueron nanocementos geopoliméricos, otro elaborado con cemento portland blanco y otro con CPC. La composición de cada compuesto se muestra en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Lista de Compuestos para prueba de Dilatometría.

Compuestos	Formulación
Nanocemento GP – 150%MAR TI	Nanocemento Base + Agregado 1 Agregado 1 = 150% Marmolina Tipo I, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 5%WOLLAS	Nanocemento Base + Agregado 2 Agregado 2 = 100% Marmolina Tipo I + 5%Wollastonita, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 10%TiO2	Nanocemento Base + Agregado 3 Agregado 3 = 100% Marmolina Tipo I + 10%TiO2, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 30%TiO2	Nanocemento Base + Agregado 4 Agregado 4 = 100% Marmolina Tipo I + 30%TiO2, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 100%OXIFe	Nanocemento Base + Agregado 5 Agregado 5 = 100% Marmolina Tipo I + 100%OXIFe, 7%Agua, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , 5%NEU	Nanocemento Base + Agregado 6 Agregado 6 = 100% Marmolina Tipo I + 5%NEU, con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , Cemento Blanco	Nanocemento Base + Agregado 7 Agregado 7 = 100% Marmolina Tipo I, Relación a/c = 0.4 con Hiperfluidificante
Nanocemento GP – 100%MAR TI , Cemento CPC	Nanocemento Base + Agregado 8 Agregado 8 = 100% Marmolina Tipo I, Cemento CPC Relación a/c = 0.4, con Hiperfluidificante

5.2.13.1 DILATOMETRÍA EN NANOCEMENTO GP - 150%MAR TI, CH

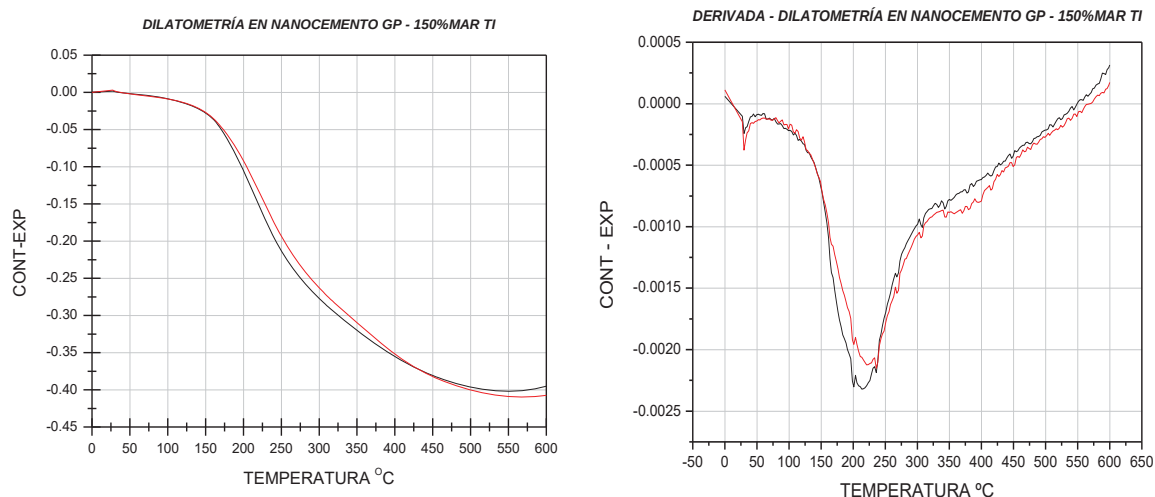


Figura 5.72. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Nanocemento GP – 150%MAR TI

5.2.13.2 DILATOMETRÍA EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI, 5%WOLLAS, CH

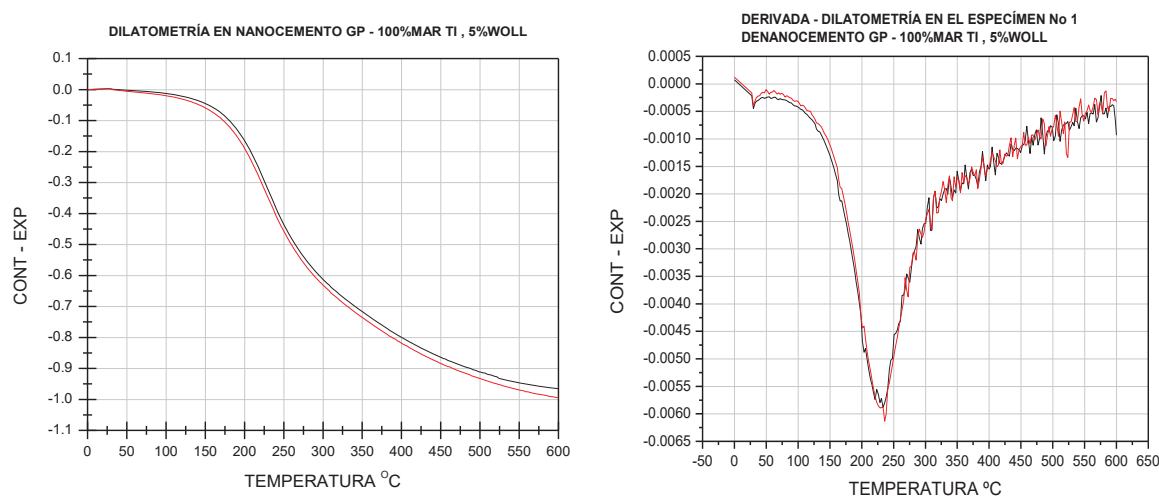


Figura 5.73. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Nanocemento GP – 100%MAR TI, 5%WOLLAS

5.2.13.3 DILATOMETRÍA EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI, 10%TiO₂, CH

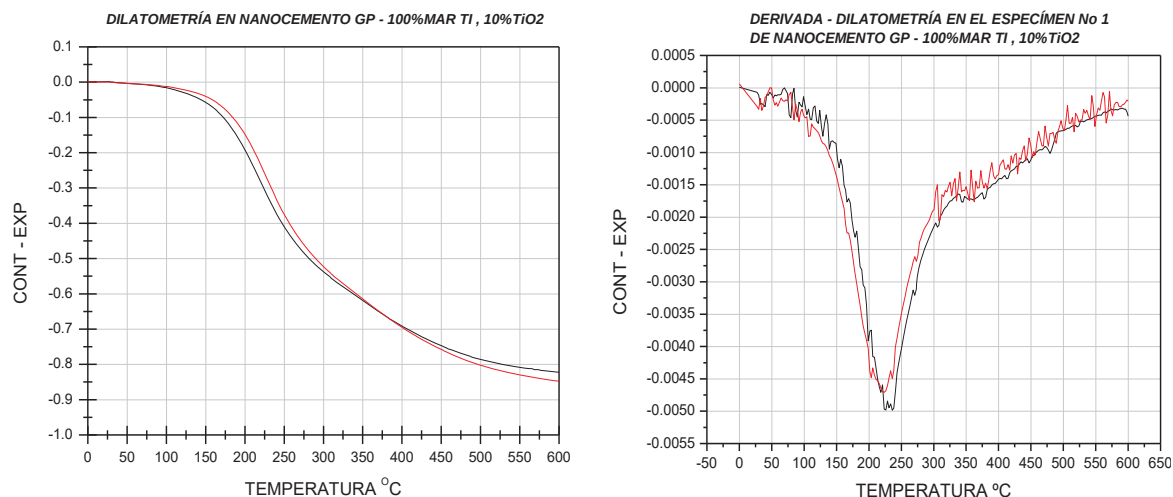


Figura 5.74. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Nanocemento GP - 100%MAR TI, 10%TiO₂

5.2.13.4 DILATOMETRÍA EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI, 30%TiO₂, CH

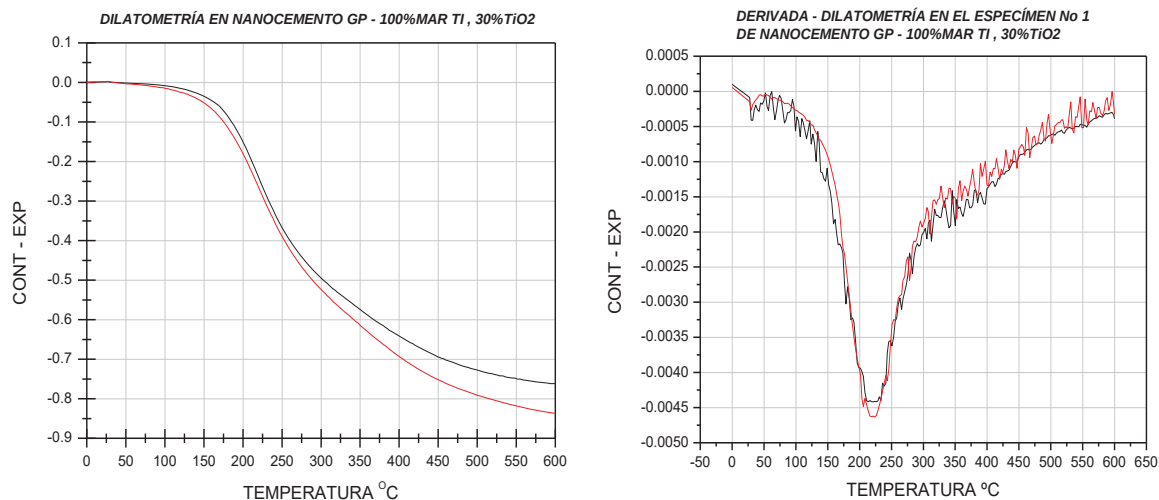


Figura 5.75. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Nanocemento GP - 100%MAR TI, 30%TiO₂

5.2.13.5 DILATOMETRÍA EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH

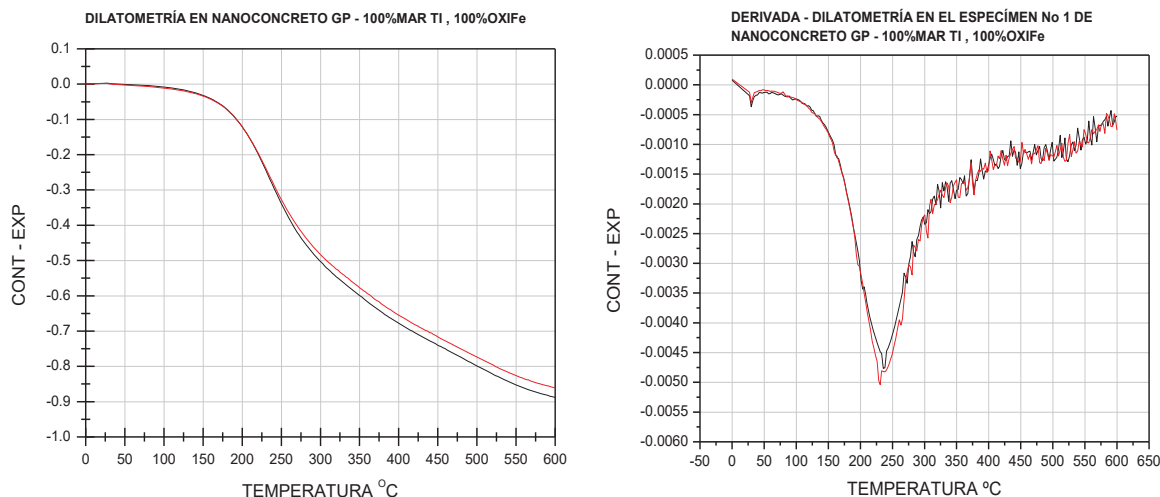


Figura 5.76. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Nanocemento GP - 100%MAR TI, 100%OXIFe, 7%AGUA.

5.2.13.6 DILATOMETRÍA EN NANOCEMENTO GP - 100%MAR TI, 5%NEU, CH

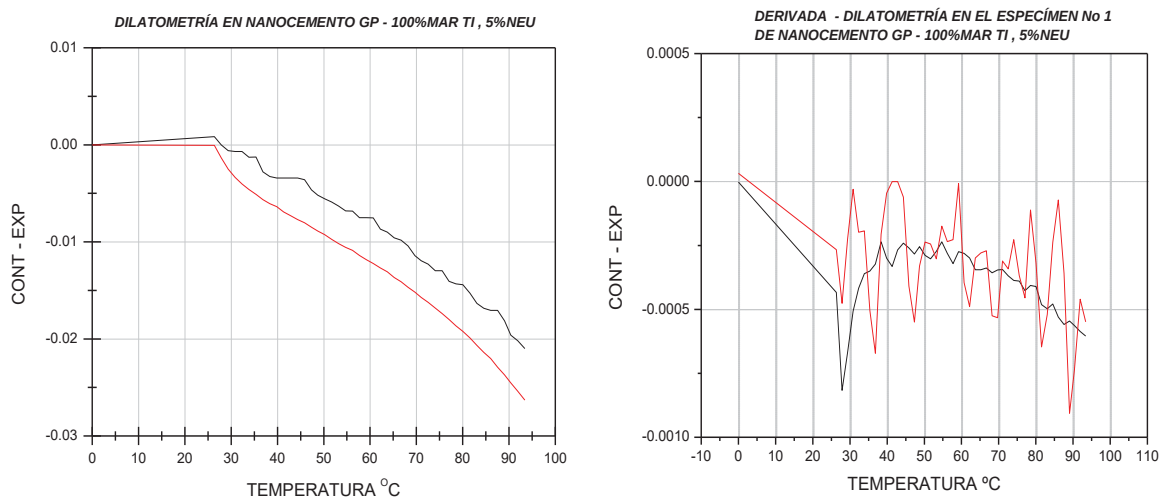


Figura 5.77. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Nanocemento GP - 100%MAR TI, 5%NEU.

5.2.13.7 DILATOMETRÍA EN COMPUESTO ELABORADO CON CEMENTO BLANCO $r/c = 0.4$, CH

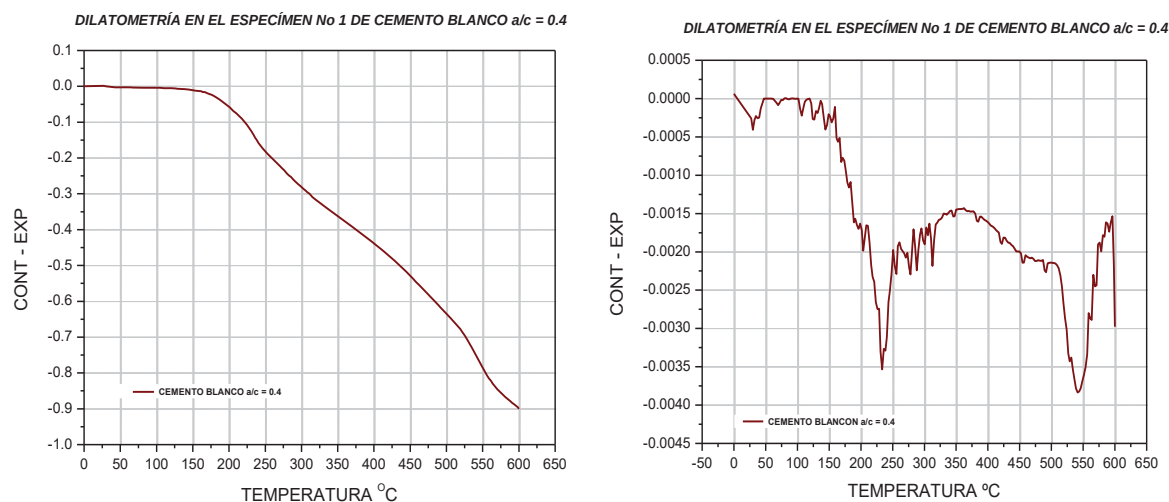


Figura 5.78. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Compuesto elaborado con Cemento Blanco relación $a/c = 0.4$.

5.2.13.8 DILATOMETRÍA CEMENTO ELABORADO CON CPC $r/c = 0.4$, CH

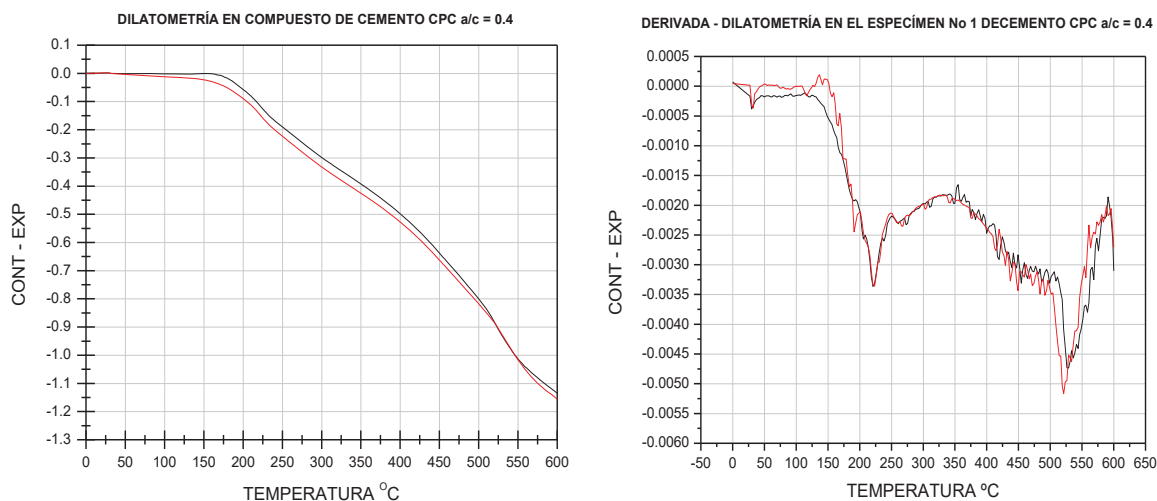


Figura 5.79. Curva Dilatométrica y derivada de la curva dilatometrica respectivamente del Compuesto elaborado con CPC relación $a/c = 0.4$.

5.2.14 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA, IES (RESISTIVIDAD-IMPEDANCIA)

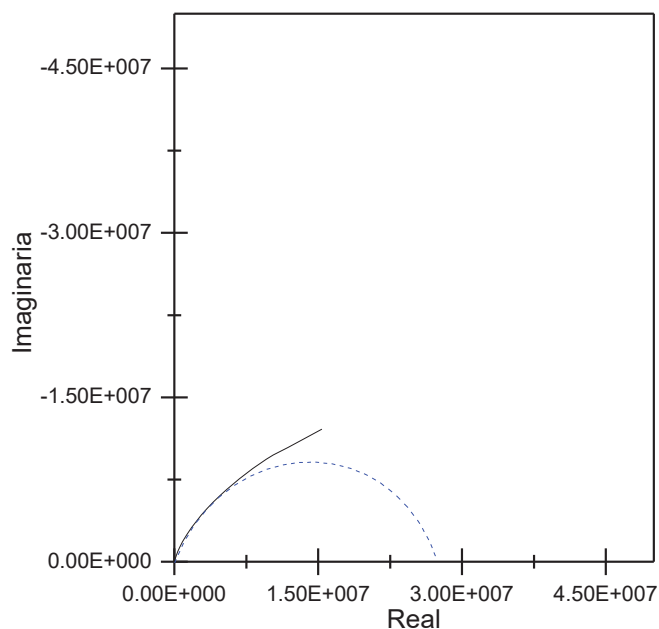


Figura 5.80. Grafica IES del espécimen de Nanocemento Gp – 150%MAR TI, CH.

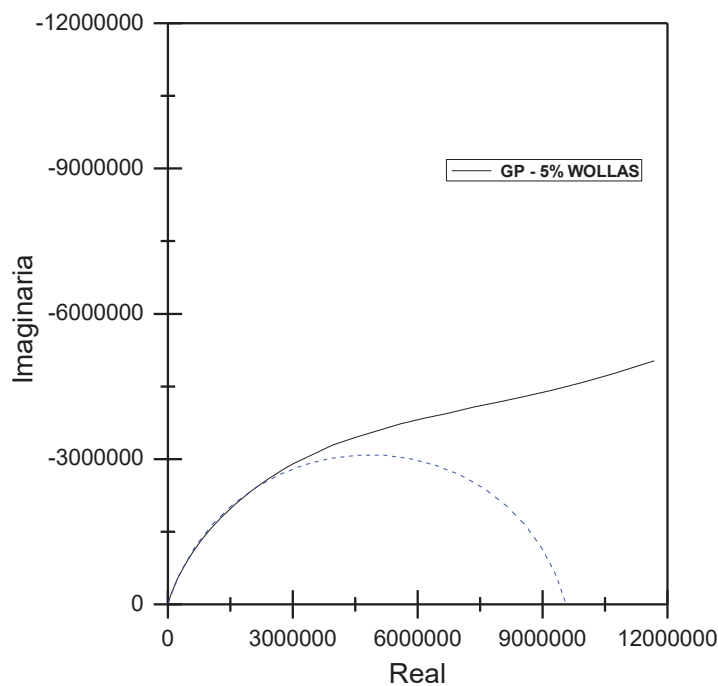


Figura 5.81. Grafica IES del espécimen de Nanocemento Gp – 100%MAR TI, 5%WOLLAS, CH

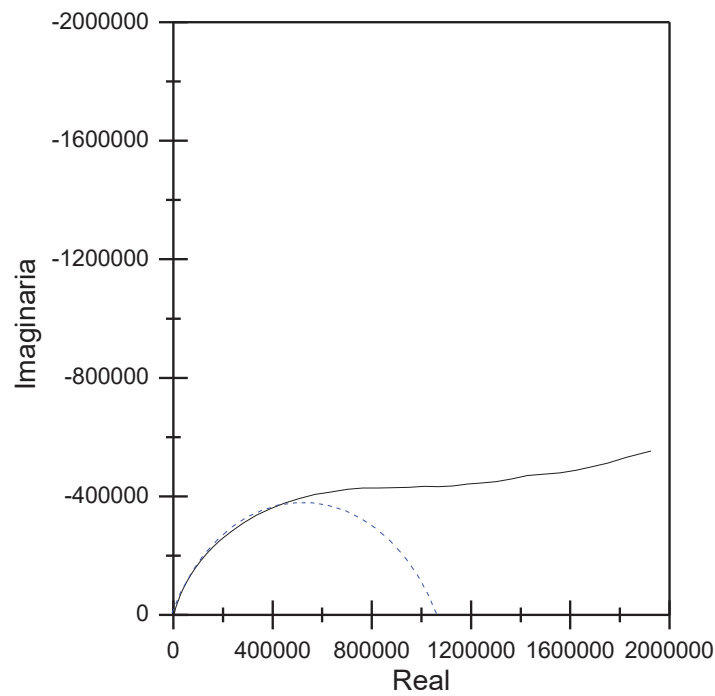


Figura 5.82. Grafica IES del espécimen de Nanocemento Gp – 100%MAR TI, 10%TiO₂, CH.

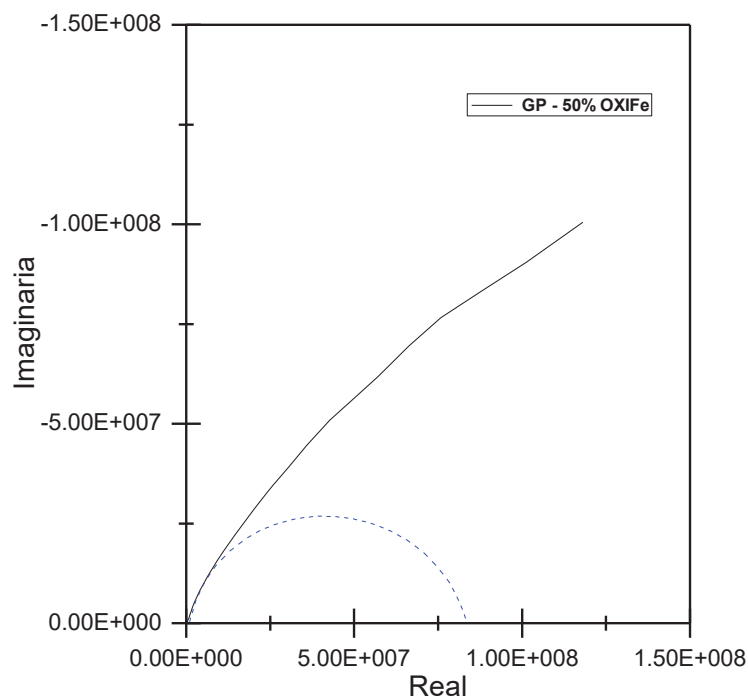


Figura 5.83. Grafica IES del espécimen de Nanocemento Gp – 100%MAR TI, 50%OXIFe, CH.

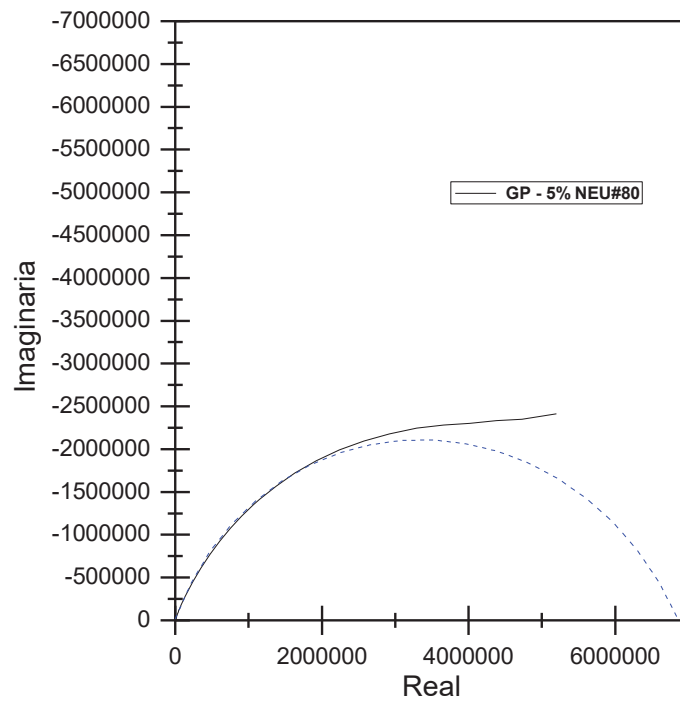


Figura 5.84. Grafica IES del espécimen de Nanocemento Gp – 100%MAR TI, 5%NEU#80, CH.

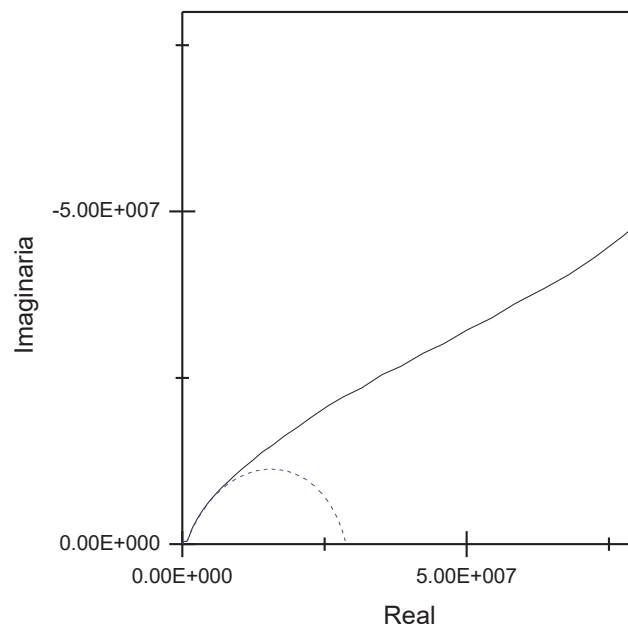


Figura 5.85. Grafica IES del espécimen de Nanocemento Gp – 100%MAR TI, 30%TiO₂, CH.

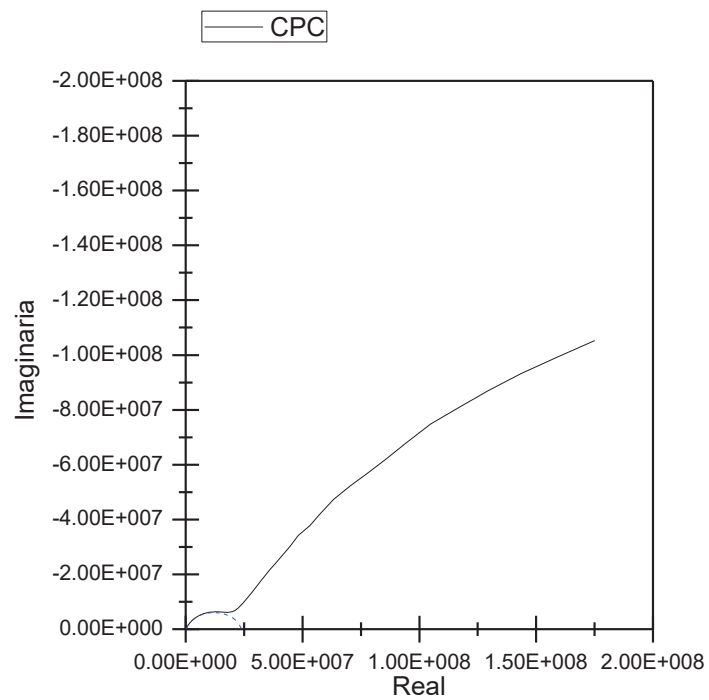


Figura 5.86. Grafica IES del espécimen de Elaborado con cemento CPC.

5.3 TERCERA FASE

En esta fase final se procedió a hacer las evaluaciones de tipo físicas y mecánicas en materiales denominados en esta investigación como nanoconcretos geopoliméricos, que a diferencia de los elaborados en la segunda fase, estos contienen agregados de granulometría más gruesa, esto con el fin de elaborar un material de uso más eficiente y eficaz en el ámbito de la construcción.

5.3.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE NANOCONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS A 45 DÍAS DE EDAD

En esta fase en primer lugar se procedió a evaluar las propiedades mecánicas de los nuevos compuestos. Estos nuevos compuestos contienen la misma composición en cuanto al nanocemento base, variando únicamente el tipo y cantidad de agregado. Los nuevos compuestos elaborados se denominaran en esta instancia con el nombre de Nanoconcretos Geopoliméricos puesto que el agregado o material pétreo utilizado es de una granulometría más gruesa. Estos agregados son Marmolina Tipo I, Grano 2 y Grano 3 utilizados y encontrados en el mercado muy fácilmente.

Se realizaron 8 diferentes tipos de compuestos, con el mismo nanocemento base e hiperfluidificante PRECAST (15gr/1000gr nanocemento), en especímenes de 10x10x10 cm probados a 45 días de edad; obteniéndose de ellos los siguientes resultados:

Tabla 5.9. Lista de Compuestos Tercera Fase.

Compuestos	Formulación
Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3	Nanocemento Base + Pétreos 1 Pétreos 1 = 50% Marmolina Tipo I + 50% Grano2 + 50% Grano3, con Hiperfluidificante
Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS	Nanocemento Base + Pétreos 2 Pétreos 2 = 33% Marmolina Tipo I + 33% Grano2 + 33% Grano3 + 5% Wollastonita, con Hiperfluidificante
Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe	Nanocemento Base + Pétreos 3 Pétreos 3 = 25% Marmolina Tipo I + 25% Grano2 + 25% Grano3 + 50% Óxido de Hierro, con Hiperfluidificante
Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe	Nanocemento Base + Pétreos 4 Pétreos 4 = 25% Marmolina Tipo I + 25% Grano2 + 25% Grano3 + 100% Óxido de Hierro, 7% Agua con Hiperfluidificante
Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80	Nanocemento Base + Pétreos 5 Pétreos 5 = 33% Marmolina Tipo I + 33% Grano2 + 33% Grano3 + 5% Neumático #80, con Hiperfluidificante
Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO2	Nanocemento Base + Pétreos 5 Pétreos 5 = 33% Marmolina Tipo I + 33% Grano2 + 33% Grano3 + 10% Neumático #80, con Hiperfluidificante
Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO2	Nanocemento Base + Pétreos 5 Pétreos 5 = 33% Marmolina Tipo I + 33% Grano2 + 33% Grano3 + 20% Neumático #80, con Hiperfluidificante
Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO2	Nanocemento Base + Pétreos 5 Pétreos 5 = 33% Marmolina Tipo I + 33% Grano2 + 33% Grano3 + 30% Neumático #80, con Hiperfluidificante



Fotografía 5.13. a y b. Determinación de la Resistencia a la Compresion del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO2.



Fotografía 5.14. a y b. Determinación de la Resistencia a la Compresion del Nanoconcreto GP - 50%MAR TI, 50%GR2-3.



Fotografía 5.15. a y b. Determinación de la Resistencia a la Compresion del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS.



Fotografía 5.16. a y b. Determinación de la Resistencia a la Compresión del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe.



Fotografía 5.17. a y b. Determinación de la Resistencia a la Compresión del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80.

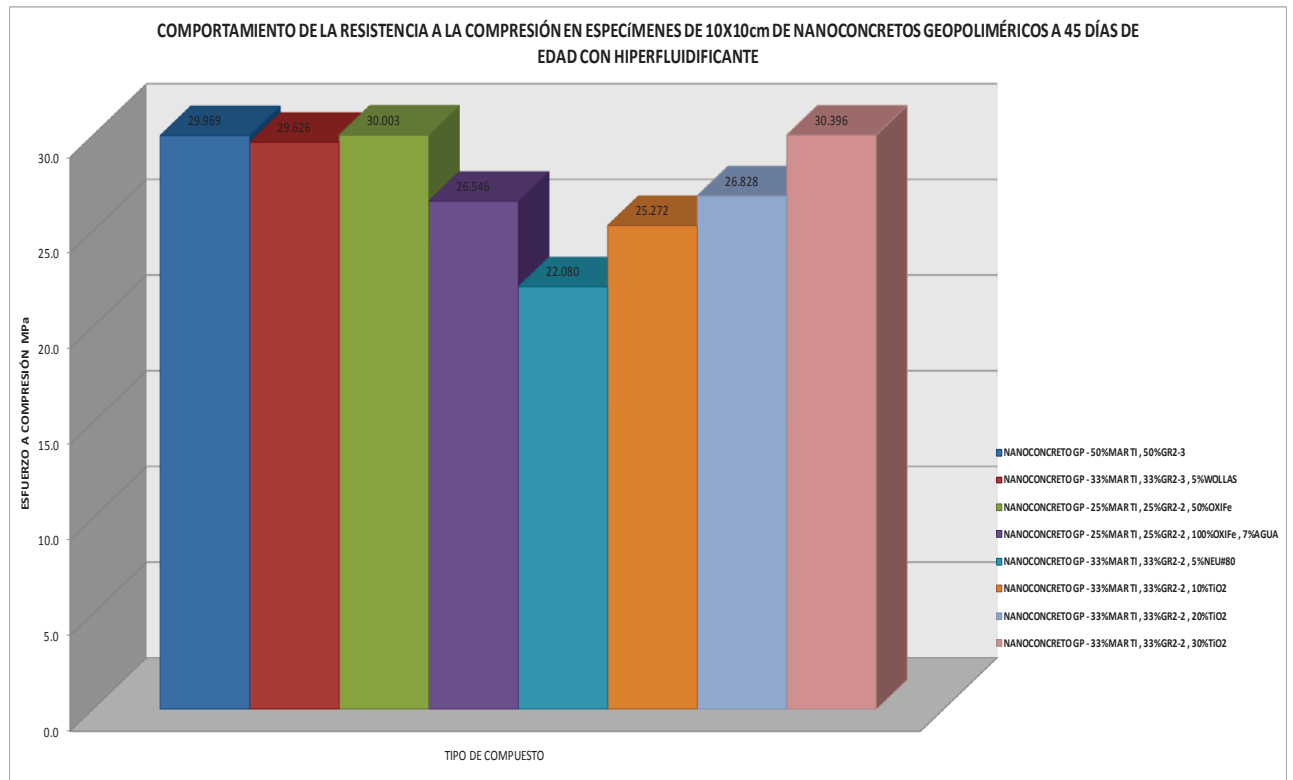


Figura 5.87. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión en especímenes de 10x10x10 cm de nanocementos geopoliméricos a 45 días de edad, CH.

5.3.2 MEDIDA DE LA DUREZA MEDIANTE INDENTACIÓN VICKERS

Una vez obtenida la resistencia a compresión de los especímenes antes descritos (compuestos de la Tabla 5.9) se procedió a la obtención de la dureza de estos materiales, mediante la indentación tipo Vickers para comparar estos, con un concreto tradicional elaborado con CPC. La prueba se realizó en especímenes elaborados conforme a lo descrito en el subcapítulo 2.5.8; tomándose un total de 80 lecturas para cada muestra con el fin de asegurar una buena medida y tener un valor representativo de la dureza del material; de estas 80 lecturas 20 se realizaron en sentido longitudinal y 20 en sentido transversal, de las cuales 10 fueron en la matriz y 10 en los agregados. Obteniéndose los siguientes resultados.

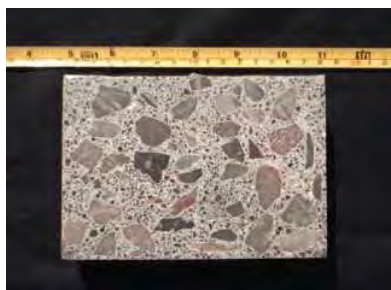


Fotografía 5.18. a y b. Indentaciones en las diferentes mezclas de concretos.

5.3.2.1 DUREZA VICKERS EN CONCRETO ESTÁNDAR ELABORADO CON CPC



Fotografía 5.87. a.

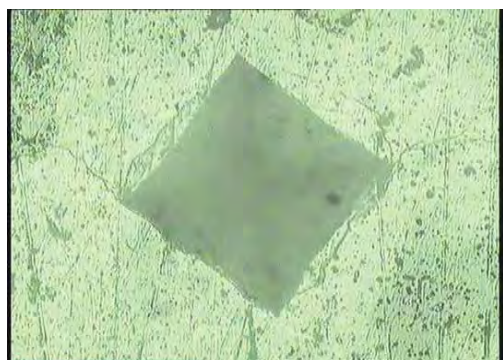


Fotografía 5.87. b.

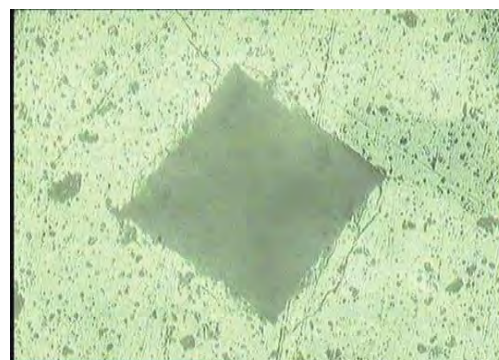


Fotografía 5.87. c.

Fotografía 5.19. a, b y c. Especimen labrado de Compuesto elaborado con cemento CPC y agregados de AGC.

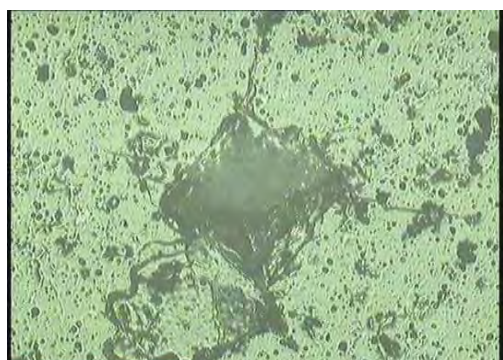


CEST MH1 - 32



CEST MH1 - 36

Figura 5.88. a, y b. Indentacion en la matriz del concreto elaborado con CPC y agregados de AGC.



CEST - AV5-24



CEST - AV5-12

Figura 5.89. a, y b. Indentacion en agregados del concreto elaborado con CPC y agregados de AGC.

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN NANO, MICRO Y MACRO ESTRUCTURAL DE GEOPOLÍMEROS
MULTIFUNCIONALES PARA SU USO EN ULTRA-THIN COMPOSITE PAVEMENTS (ETAPA CERO).**

Tabla 5.10. Dureza Vickers medidas en la matriz del compuesto elaborado con CPC.

No	Load Application	Load	Diagonal(μ m)		Hardness
		Kgf,N	D1	D2	HV
1	CEST-MV1	9807	235.20	213.1	36.9
2	EST-MV1	9807	295.10	273.50	2.9
3	CEST-MV1	9807	288.30	285.10	22.5
4	CEST-MV	9807	294.40	288.0	21.8
5	CEST-M	9807	262.00	254.80	27.7
	CEST-MV1	9807	273.10	269.40	25.2
7	C ST-MV1	9807	273.00	267.70	25.3
8	CEST-MV1	9807	289.30	275.40	23.2
9	CEST-MV1	9807	288.20	283.30	22.7
10	CEST-MH1	9807	275.70	269.80	24.9
11	CEST-MH1	9807	272.30	268.20	25.3
12	CEST-MH1	9807	239.90	227.00	34.0
13	CEST-MH1	9807	287.20	277.60	23.2
14	CEST-MH1	9807	265.10	274.60	25.4
15	CEST-MH1	9807	268.30	266.20	25.9
16	CEST-MH1	9807	253.40	249.00	29.3
17	CEST-MH1	9807	294.50	286.00	22.0
18	CEST-MH1	9807	280.20	279.20	23.7
19	CEST-MH1	9807	257.00	255.00	28.2
20	CEST-MV5	49.03	523.90	519.60	34.0
21	CEST-MV10	98.07	889.90	905.20	23.0
22	CEST-MV20	196.1	877.80	886.10	47.6
23	CEST-MV30	294.2	999.90	999.90	55.6
24	CEST-MH5	49.03	591.20	592.10	26.4
25	CEST-MH10	98.07	839.40	844.70	26.1
26	CEST-MH20	196.1	976.20	960.60	39.5
27	CEST-MH30	294.2	999.90	999.90	55.6
Promedio Dureza Vickers =					29.6

Tabla 5.11. Dureza Vickers medidas en los agregados del compuesto elaborado con CPC.

No	Load Application	Load	Diagonal(μ m)		Hardness
		Kgf,N	D1	D2	HV
1	CEST-AV10	98.07	313.80	337.00	175.1
2	CEST-AV5	49.03	333.90	324.0	85.4
3	CEST-AV5	49.03	206.60	214.00	209.6
4	CES -AV5	49.03	202.80	207.50	220.3
5	CEST AV5	49.03	219.50	213.00	198.2
6	CEST-A 5	49.03	399.0	48.00	76.1
7	CEST-AV5	49.03	190.10	187.10	260.6
8	CEST-AV5	49.03	238.40	239.30	162.5
9	CEST-AV5	49.03	329.60	397.80	70.0
10	CEST-AV5	49.03	269.70	249.60	137.5
11	CEST-AH5	49.03	285.50	274.80	118.1
12	CEST-AH5	49.03	364.40	366.20	69.4
13	CEST-AH5	49.03	256.00	286.80	125.8
14	CEST-AH5	49.03	204.40	202.60	223.8
15	CEST-AH5	49.03	184.00	178.70	281.9
16	CEST-AH5	49.03	379.40	355.20	68.7
17	CEST-AH5	49.03	247.80	253.80	147.4
18	CEST-AH5	49.03	197.80	188.40	248.6
19	CEST-AH5	49.03	181.90	172.70	294.9
20	CEST-AH5	49.03	235.10	230.10	171.3
21	CEST-AV30	294.20	450.50	444.80	277.6
Promedio Dureza Vickers =					172.5

5.3.2.2 DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH



Fotografía 5.20. a.



Fotografía 5.20. b.

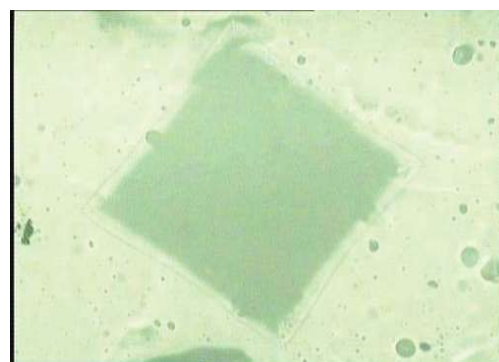


Fotografía 5.20. c.

Fotografía 5.20. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.



MAR 1-1.5-AH5-35

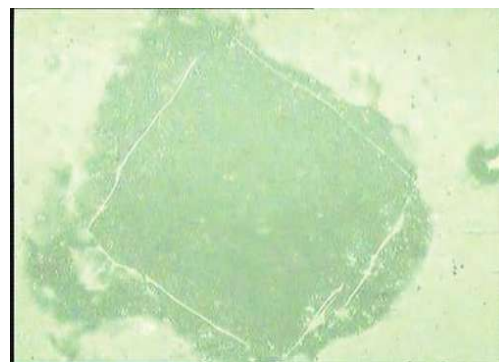


MAR 1-1.5-MV1-5

Figura 5.90. a, y b. Indentación en la matriz del Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.



MAR 1-1.5-AH5-35



MAR 1-1.5-AV5-20

Figura 5.91. a, y b. Indentación en agregados del Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN NANO, MICRO Y MACRO ESTRUCTURAL DE GEOPOLÍMEROS
MULTIFUNCIONALES PARA SU USO EN ULTRA-THIN COMPOSITE PAVEMENTS (ETAPA CERO).**

Tabla 5.12. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

No	Load	Load KgF,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
	Aplication		D1	D2	
1	MAR 1-1.5-MV1	9807	321.00	323.60	17.8
2	MAR 1-1.5-MV1	9807	343.40	348.80	15.4
3	MAR 1-1.5 MV	9807	349.50	332.50	15.9
4	MAR 1-1.5-MV1	9807	326.90	322.00	17.6
5	MAR -1.5-MV1	9807	3 9.40	330.80	16.5
6	MAR 1-1.5-MV1	9807	292.40	291.30	21.7
7	MAR 1-1.5-MV1	9807	344.90	358.50	14.9
8	MAR 1-1.5-MV1	9807	314.20	301.20	19.5
9	MAR 1-1.5-MV1	9807	303.80	298.90	20.4
10	MAR 1-1.5-MV1	9807	340.40	341.50	15.9
11	MAR 1-1.5-MH1	9807	356.40	352.00	14.7
12	MAR 1-1.5-MH1	9807	356.50	361.70	14.3
13	MAR 1-1.5-MH1	9807	340.50	332.60	16.3
14	MAR 1-1.5-MH1	9807	373.50	379.60	13.0
15	MAR 1-1.5-MH1	9807	354.00	334.60	15.6
16	MAR 1-1.5-MH1	9807	338.30	336.40	16.2
17	MAR 1-1.5-MH1	9807	343.80	345.60	15.6
18	MAR 1-1.5-MH1	9807	336.20	337.30	16.3
19	MAR 1-1.5-MH1	9807	342.30	343.40	15.7
20	MAR 1-1.5-MH1	9807	348.60	348.50	15.2
21	MAR 1-1.5-MH5	49.03	671.90	658.30	20.9
22	MAR 1-1.5-MH10	98.07	999.90	999.90	18.5
23	MAR 1-1.5-MH20	196.1	999.90	999.90	37.0
Dureza Vickers Promedio =					17.6

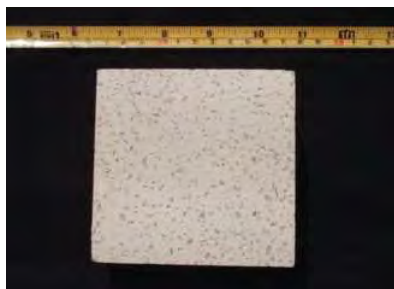
Tabla 5.13. Dureza Vickers medidas en los agregados del Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

No	Load	Load KgF,N	Diagonal(μ)		Hardness HV
	Aplication		D1	D2	
1	MAR 1-1.5-AV5	49.03	356.00	359.00	72.5
2	MAR 1-1.5-AV5	49.03	327.30	318.60	88.9
3	MAR 1-1.5-AV5	49.03	331.90	328.50	85.0
4	MAR 1-1.5-AV5	49.03	323.00	319.10	89.9
5	MAR 1-1.5-AV5	49.03	322.80	323.90	88.6
6	MAR 1-1.5-AV5	49.03	283.50	334.30	97.1
7	MAR 1-1.5-AV5	49.03	311.90	309.10	96.1
8	MAR 1-1.5-AV5	49.03	353.50	313.20	83.4
9	MAR 1-1.5-AV5	49.03	308.20	315.10	95.4
10	MAR 1-1.5-AV5	49.03	323.60	331.60	86.3
11	MAR 1-1.5-AH5	49.03	325.50	319.40	89.1
12	MAR 1-1.5-AH5	49.03	314.80	296.00	99.4
13	MAR 1-1.5-AH5	49.03	294.70	299.90	104.9
14	MAR 1-1.5-AH5	49.03	318.90	336.30	86.3
15	MAR 1-1.5-AH5	49.03	325.20	314.40	90.6
16	MAR 1-1.5-AH5	49.03	320.80	312.50	92.4
17	MAR 1-1.5-AH5	49.03	322.30	336.00	85.5
18	MAR 1-1.5-AH5	49.03	319.10	305.50	95.0
19	MAR 1-1.5-AH5	49.03	298.40	320.10	96.9
20	MAR 1-1.5-AH5	49.03	323.70	328.40	87.2
21	MAR 1-1.5-AH10	98.07	480.50	473.80	81.4
22	MAR 1-1.5-AH20	196.1	561.90	549.70	120.0
23	MAR 1-1.5-AH30	294.2	846.40	853.50	77.0
Dureza Vickers Promedio =					90.8

**5.3.2.3 DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3,
5%WOLLAS, CH**



Fotografía 5.21. a.

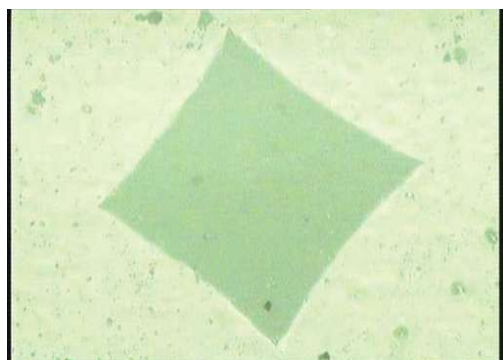


Fotografía 5.21. b.

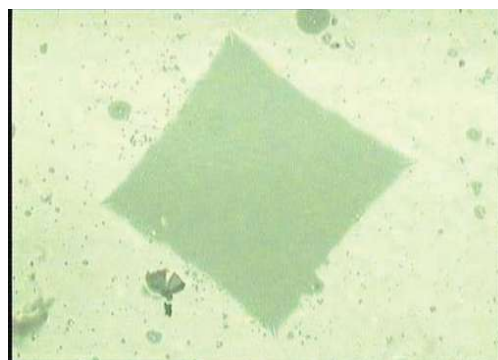


Fotografía 5.21. c.

Fotografía 5.21. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3,
5%WOLLAS, CH.

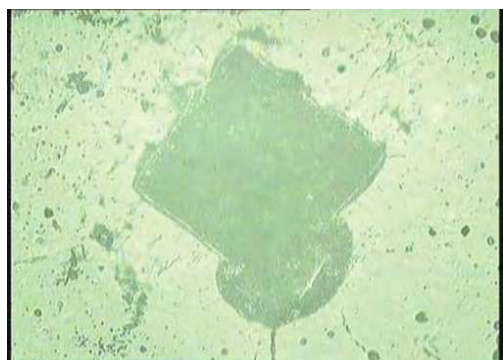


MARWOLL-MH1-24



MARWOLL-MV1-8

Figura 5.92. a, y b. Indentacion en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3,
5%WOLLAS, CH.



MARWOLL-AH5-33



MARWOLL-AV5-18

Figura 5.93. a, y b. Indentacion en agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3,
5%WOLLAS, CH.

Tabla 5.14. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

No	Load	Load Kg _f ,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
	Aplication		D1	D2	
1	MARWOLLAS-MV1	9807	358.10	349.90	14.7
2	MARWOLLAS-MV1	9807	332.50	321.70	17.3
3	MARWOLLAS-MV1	9807	300.80	307.50	20.0
4	MARWOLLAS-MV1	9807	335.30	331.50	16.6
5	MARWOLLAS-MV1	9807	329.40	324.70	17.3
6	MARWOLLAS-MV1	9807	328.60	326.40	17.2
7	MARWOLLAS-MV1	9807	338.70	333.30	16.4
8	MARWOLLAS-MV1	9807	318.50	316.70	18.3
9	MARWOLLAS-MV1	9807	328.70	331.30	17.0
10	MARWOLLAS-MV1	9807	320.60	319.20	18.1
11	MARWOLLAS-MH1	9807	339.70	334.50	16.3
12	MARWOLLAS-MH1	9807	355.50	353.80	14.7
13	MARWOLLAS-MH1	9807	327.20	337.40	16.7
14	MARWOLLAS-MH1	9807	329.10	325.50	17.3
15	MARWOLLAS-MH1	9807	307.90	305.80	19.6
16	MARWOLLAS-MH1	9807	339.00	347.80	15.7
17	MARWOLLAS-MH1	9807	338.10	347.90	15.7
18	MARWOLLAS-MH1	9807	350.70	357.60	14.7
19	MARWOLLAS-MH1	9807	336.50	333.40	16.5
20	MARWOLLAS-MH1	9807	352.90	344.90	15.2
21	MARWOLLAS-MH5	49.03	711.70	694.80	18.7
22	MARWOLLAS-MH10	98.07	999.90	999.90	18.5
Dureza Vickers Promedio =					16.9

Tabla 5.15. Dureza Vickers medidas en los agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

No	Load	Load Kg _f ,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
	Aplication		D1	D2	
1	MARWOLLAS-AV5	49.03	343.30	333.30	81.0
2	MARWOLLAS-AV5	49.03	312.40	313.50	94.6
3	MARWOLLAS-AV5	49.03	321.30	324.40	88.9
4	MARWOLLAS-AV5	49.03	310.50	298.40	100.0
5	MARWOLLAS-AV5	49.03	339.60	324.5	84.0
6	MARWOLLAS-AV5	49.03	311.60	303.90	97.8
7	MARWOLLAS-AV5	49.03	310.10	306.70	97.4
8	MARWOLLAS-AV5	49.03	314.50	310.90	94.8
9	MARWOLLAS-AV5	49.03	316.90	321.40	91.0
10	MARWOLLAS-AV5	49.03	322.00	326.40	88.2
11	MARWOLLAS-AH5	49.03	311.30	314.70	94.6
12	MARWOLLAS-AH5	49.03	317.10	301.30	96.9
13	MARWOLLAS-AH5	49.03	254.60	245.00	148.5
14	MARWOLLAS-AH5	49.03	322.10	319.30	90.1
15	MARWOLLAS-AH5	49.03	319.40	309.80	93.6
16	MARWOLLAS-AH5	49.03	326.40	308.50	92.0
17	MARWOLLAS-AH5	49.03	317.40	308.00	94.8
18	MARWOLLAS-AH5	49.03	330.20	331.20	84.7
19	MARWOLLAS-AH5	49.03	316.00	362.30	80.6
20	MARWOLLAS-AH5	49.03	367.70	375.60	67.1
21	MARWOLLAS-AH10	98.07	439.30	423.90	99.5
22	MARWOLLAS-AH20	196.1	640.60	656.90	88.1
23	MARWOLLAS-AH30	294.2	951.00	915.60	63.8
Dureza Vickers Promedio =					91.8

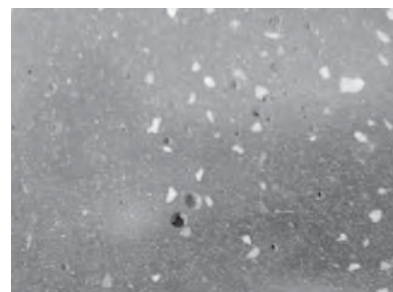
5.3.2.4 DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP - 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH



Fotografía 5.22. a.

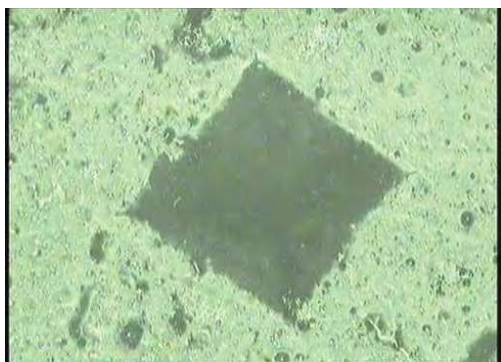


Fotografía 5.22. b.



Fotografía 5.22. c.

Fotografía 5.22. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

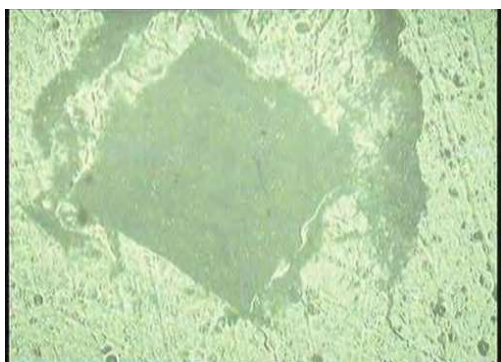


OXI 50%-MH1-28

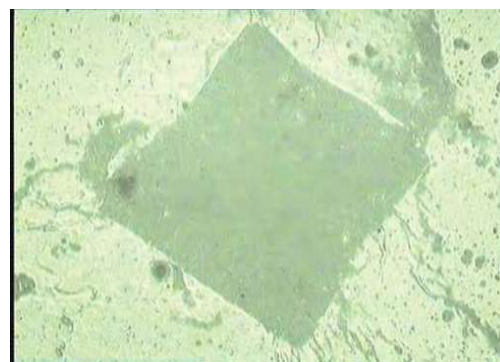


OXI 50%-MV1-3

Figura 5.94. a, y b. Indentación en la matriz del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.



OXI 50%-AH5-40



OXI 50%-AV5-11

Figura 5.95. a, y b. Indentación en agregados del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN NANO, MICRO Y MACRO ESTRUCTURAL DE GEOPOLÍMEROS
MULTIFUNCIONALES PARA SU USO EN ULTRA-THIN COMPOSITE PAVEMENTS (ETAPA CERO).**

Tabla 5.16. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

N	Load	Load Kgf,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
	Aplication		D1	D2	
1	OXI 50%-MV1	9807	291.90	290.30	21.8
2	OXI 50%-MV1	9807	284.00	275.80	23.6
3	OXI 50%-MV1	9807	289.60	293.30	21.8
4	OXI 50%-MV1	9807	290.80	287.90	22.1
5	OXI 50%-MV1	9807	291.50	283.20	22.4
6	OXI 5 % MV1	9807	278.30	279.70	23.8
7	OXI 50%-MV1	9807	423.20	406.90	10.7
8	OXI 50%-MV1	9807	313.70	318.50	18.5
9	OXI 50%-MV1	9807	301.00	304.90	20.2
10	OXI 50%-MV1	9807	302.40	293.10	20.9
11	OXI 50%-MH1	9807	269.20	255.80	26.9
12	OXI 50%-MH1	9807	291.70	292.30	21.7
13	OXI 50%-MH1	9807	291.70	285.70	22.2
14	OXI 50%-MH1	9807	316.90	295.70	19.7
15	OXI 50%-MH1	9807	297.20	294.10	21.2
16	OXI 50%-MH1	9807	345.30	337.20	15.9
17	OXI 50%-MH1	9807	316.20	302.90	19.3
18	OXI 50%-MH1	9807	301.50	288.00	21.3
19	OXI 50%-MH1	9807	302.50	302.80	20.2
20	OXI 50%-MH1	9807	336.10	332.00	16.6
21	OXI 50%-MH5	49.03	600.00	591.70	26.1
22	OXI 50%-MH10	98.07	866.90	840.70	25.4
23	OXI 50%-MH20	196.1	999.90	999.90	37.0
Dureza Vickers Promedio =					21.7

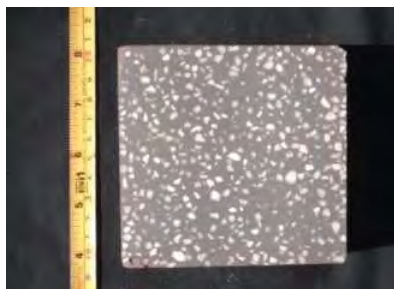
Tabla 5.17. Dureza Vickers medidas en los agregados del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

No	Load	Load Kgf,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
	Aplication		D1	D2	
1	OXI 50%-AV5	49.03	332.20	333.20	83.7
2	OXI 50%-AV5	49.03	326.90	348.00	81.4
3	OXI 50%-AV5	49.03	302.20	299.30	102.5
4	OX 50%-AV5	49.03	319.90	314.30	92.2
5	OXI 50%-A 5	49.03	305.30	324.80	93.4
	OXI 50%-AV5	49.03	304.70	328.00	92.6
7	OXI 50%-AV5	49.03	359.70	344.10	74.8
8	OXI 50%-AV5	49.03	223.60	226.50	183.0
9	OXI 50%-AV5	49.03	234.40	226.80	174.3
10	OXI 50%-AV5	49.03	314.70	303.20	97.1
11	OXI 50%-AH5	49.03	330.50	276.90	100.5
12	OXI 50%-AH5	49.03	318.60	308.10	94.4
13	OXI 50%-AH5	49.03	368.90	328.40	76.2
14	OXI 50%-AH5	49.03	354.50	355.40	73.5
15	OXI 50%-AH5	49.03	315.10	310.70	94.7
16	OXI 50%-AH5	49.03	305.40	296.50	102.3
17	OXI 50%-AH5	49.03	320.30	310.60	93.1
18	OXI 50%-AH5	49.03	323.70	333.20	85.9
19	OXI 50%-AH5	49.03	327.50	315.00	89.8
20	OXI 50%-AH5	49.03	295.70	282.30	111.0
21	OXI 50%-AH10	98.07	433.20	380.00	112.1
Dureza Vickers Promedio =					100.4

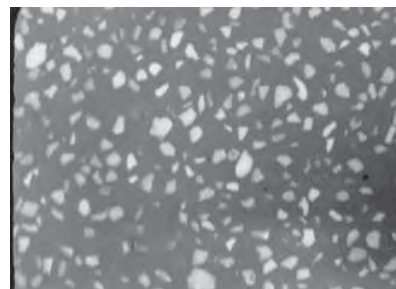
5.3.2.5 DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP - 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH



Fotografía 5.23. a.

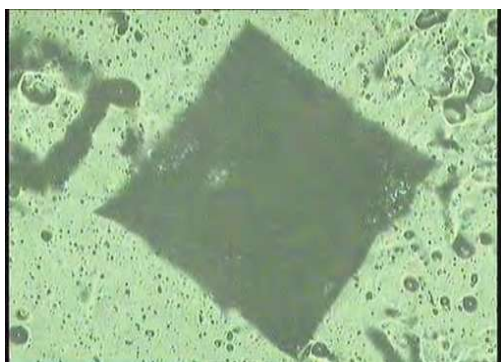


Fotografía 5.23. b.



Fotografía 5.23. c.

Fotografía 5.23. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.



OXI100%-MV1-8



OXI100%-MH1-29

Figura 5.96. a, y b. Indentacion en la matriz del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.



OXI100%-AV5-14



OXI100%-AH5-33

Figura 5.97. a, y b. Indentacion en agregados del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

Tabla 5.18. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

No	Load Application	Load Kgf,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
			D1	D2	
1	OXI100%-MV1	9807	359.20	361.90	14.2
2	OXI100%-MV1	9807	347.70	366.00	14.5
3	OXI100%-MV1	9807	354.10	355.70	14.7
4	OXI100%-MV1	9807	337.20	334.10	16.4
5	OXI100%-MV1	9807	356.60	340.40	15.2
6	OXI100%-MV1	9807	362.00	356.10	14.3
7	OXI100%-MV1	9807	351.50	367.60	14.3
8	OXI100%-MV1	9807	350.00	346.50	15.2
9	OXI100%-MV1	9807	353.30	359.60	14.5
10	OXI100%-MV1	9807	357.80	355.90	14.5
11	OXI100%-MH1	9807	356.90	349.70	14.8
12	OXI100%-MH1	9807	392.10	390.20	12.1
13	OXI100%-MH1	9807	355.00	360.70	14.4
14	OXI100%-MH1	9807	355.00	349.40	14.9
15	OXI100%-MH1	9807	363.40	344.60	14.7
16	OXI100%-MH1	9807	358.30	363.30	14.2
17	OXI100%-MH1	9807	385.30	387.80	12.4
18	OXI100%-MH1	9807	357.00	356.80	14.5
19	OXI100%-MH1	9807	354.80	362.50	14.4
20	OXI100%-MH1	9807	357.30	362.40	14.3
21	OXI100%-MH5	49.03	790.00	808.30	14.5
Dureza Vickers Promedio =					14.4

Tabla 5.19. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

No	Load Application	Load Kgf,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
			D1	D2	
1	OXI100%-AV5	49.03	347.10	350.50	76.2
2	OXI100%-AV5	49.03	323.80	318.50	89.8
3	OXI100%-AV5	49.03	331.70	342.70	81.5
4	OXI100%-AV5	49.03	322.90	319.20	89.9
5	OXI100%-AV5	49.03	295.20	283.50	110.7
6	OXI100%-AV5	49.03	295.00	300.40	104.6
7	OXI100%-AV5	49.03	309.00	300.50	99.8
8	OXI100%-AV5	49.03	306.50	315.00	96.0
9	OXI100%-AV5	49.03	299.40	302.30	102.4
10	OXI100%-AH5	49.03	324.30	322.50	88.6
11	OXI100%-AH5	49.03	292.10	290.00	109.4
12	OXI100%-AH5	49.03	308.00	308.70	97.5
13	OXI100%-AH5	49.03	295.40	284.50	110.2
14	OXI100%-AH5	49.03	316.20	311.20	94.2
15	OXI100%-AH5	49.03	303.00	307.00	99.6
16	OXI100%-AH5	49.03	328.90	331.40	85.0
17	OXI100%-AH5	49.03	341.90	325.00	83.3
18	OXI100%-AH5	49.03	308.10	316.60	95.0
19	OXI100%-AH5	49.03	334.60	315.60	87.7
20	OXI100%-AH10	98.07	439.50	473.00	89.0
21	OXI100%-AH20	196.1	624.30	649.40	91.4
22	OXI100%-AH30	294.2	779.70	742.30	96.0
Dureza Vickers Promedio =					94.4

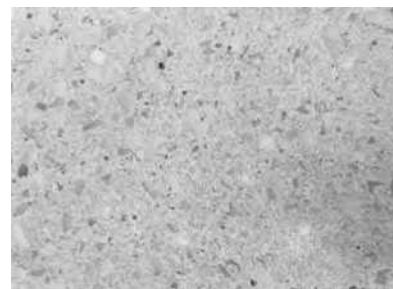
5.3.2.6 UREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH



Fotografía 5.24. a, b y c.



Fotografía 5.24. a, b y c.

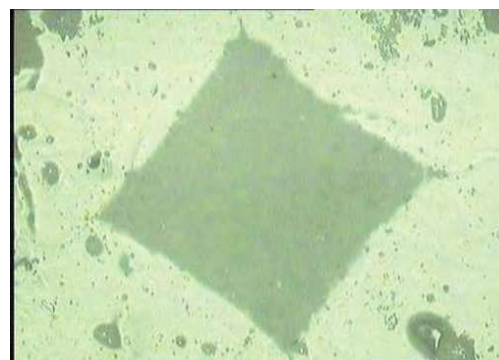


Fotografía 5.24. a, b y c.

Fotografía 5.24. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

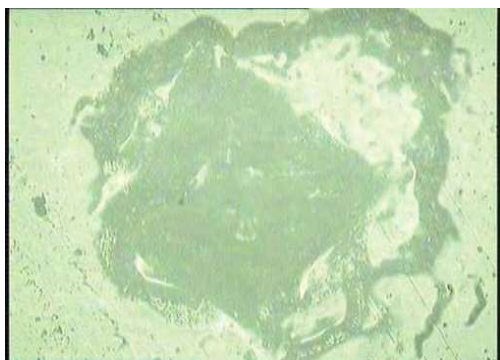


NEU5%-MV1-8

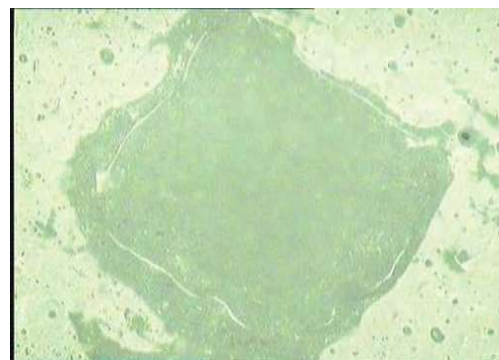


NEU5%-MH1-26

Figura 5.98. a, y b. Indentacion en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.



NEU5%-AH5-14



NEU5%-AV5-34

Figura 5.99 a, y b. Indentacion en agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Tabla 5.20. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

No	Load Application	Load Kgf,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
			D1	D2	
1	NEU5%-MV1	9807	368.70	372.50	13.5
2	NEU5%-MV1	9807	316.50	317.70	18.4
3	NEU5%-MV1	9807	375.20	385.30	1 .8
4	NEU5%-MV1	9807	388.50	399.70	11.9
5	NEU5%-MV1	9807	368.70	364.90	13.7
6	NEU5%-MV1	9807	75.90	369.00	13.3
7	NEU5%-MV1	9807	397.10	379.40	12.3
8	NEU5%-MV1	9807	289.30	286.10	22.4
9	NEU5%-MV1	9807	342.80	330.30	16.3
10	NEU5%-MV1	9807	412.80	389.10	11.5
11	NEU5%-MH1	9807	397.00	378.70	12.3
12	NEU5%-MH1	9807	355.50	347.10	15.0
13	NEU5%-MH1	9807	362.00	363.20	14.1
14	NEU5%-MH1	9807	400.90	397.10	11.6
15	NEU5%-MH1	9807	384.70	357.20	13.4
16	NEU5%-MH1	9807	343.50	346.80	15.5
17	NEU5%-MH1	9807	392.10	383.10	12.3
18	NEU5%-MH1	9807	382.80	369.60	13.1
19	NEU5%-MH1	9807	373.80	367.60	13.4
20	NEU5%-MH1	9807	427.70	410.50	10.5
21	NEU5%-MV5	49.03	797.80	779.10	14.9
22	NEU5%-MV10	98.07	999.90	999.90	18.5
Dureza Vickers Promedio =					14.1

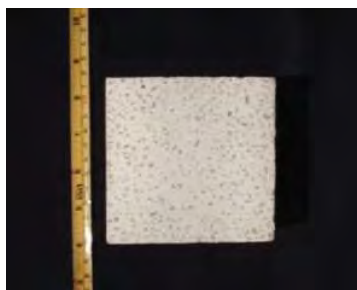
Tabla 5.22. Dureza Vickers medidas en los agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

No	Load Application	Load Kgf,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
			D1	D2	
1	NEU5%-AH5	49.03	350.60	321.40	82.1
2	NEU5%-AH5	49.03	369.00	361.70	69.4
3	NEU5%-AH5	49.03	341.90	375.60	72.0
4	NEU5%-AH5	49.03	299.90	311.70	99.1
5	NEU5%-AH5	49.03	279.70	239.60	137.5
6	NEU5%-AH5	49.03	340.80	326.30	83.3
7	NEU5%-AH5	49.03	331.10	319.90	87.5
8	NEU5%-AH5	49.03	315.40	335.10	87.6
9	NEU5%-AH5	49.03	289.80	291.20	109.8
10	NEU5%-AH5	49.03	322.30	297.90	96.4
11	NEU5%-AV5	49.03	330.30	327.00	85.8
12	NEU5%-AV5	49.03	335.70	318.80	86.5
13	NEU5%-AV5	49.03	345.20	307.70	87.0
14	NEU5%-AV5	49.03	362.20	358.90	71.3
15	NEU5%-AV5	49.03	370.80	366.30	68.2
16	NEU5%-AV5	49.03	357.00	361.10	71.9
17	NEU5%-AV5	49.03	340.70	353.40	76.9
18	NEU5%-AV5	49.03	339.60	345.00	79.1
19	NEU5%-AV5	49.03	353.10	359.10	73.1
20	NEU5%-AV5	49.03	364.40	347.80	73.1
21	NEU5%-AV10	98.07	441.20	434.40	96.7
22	NEU5%-AV20	196.1	807.40	755.80	60.7
Dureza Vickers Promedio =					84.3

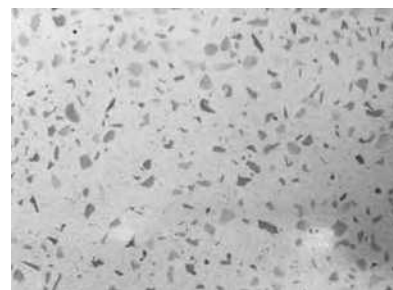
5.3.2.7 DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH



Fotografía 5.25. a.

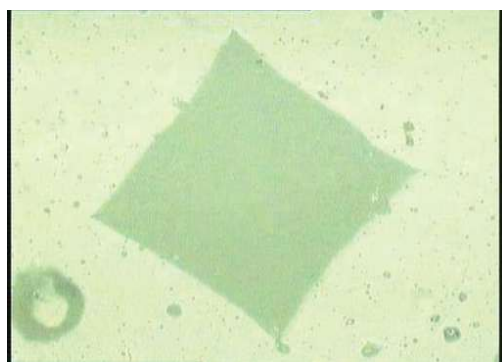


Fotografía 5.25. b.

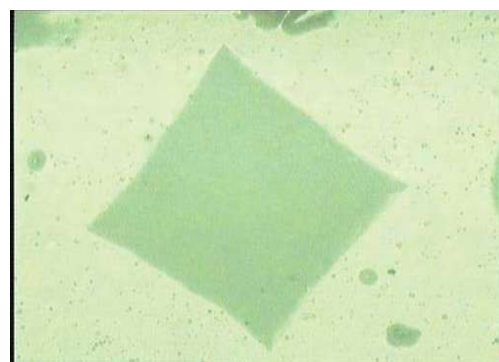


Fotografía 5.25. c.

Fotografía 5.25. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

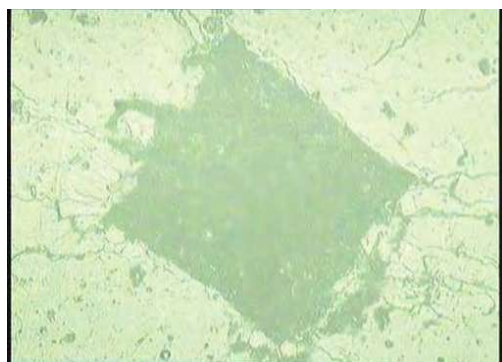


TiO₂ 10%-MH1-22



TiO₂ 10%-MV1-8

Figura 5.100. a, y b. Indentación en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.



TiO₂ 10%-AH5-36



TiO₂ 10%-AV5-16

Figura 5.101. a, y b. Indentación en agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Tabla 5.23. Dureza Vickers medidas en la matriz del

Tabla 5.24. Dureza Vickers medidas en el agregado del

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN NANO, MICRO Y MACRO ESTRUCTURAL DE GEOPOLÍMEROS
MULTIFUNCIONALES PARA SU USO EN ULTRA-THIN COMPOSITE PAVEMENTS (ETAPA CERO).**

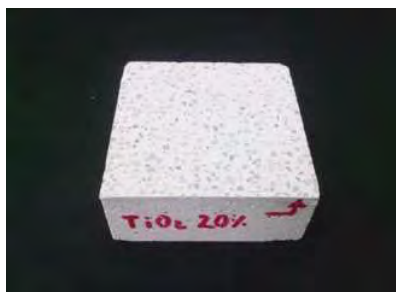
Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂,
CH.

No	Load Aplication	Load Kgf,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
			D1	D2	
1	TiO2 10%-MV1	98.07	999.90	999.90	18.5
2	TiO2 10%-MV1	9807	304.30	319.90	19.0
3	TiO2 10%-MV1	9807	22.50	325.20	17.6
4	TiO2 10%-MV1	9807	313.00	306.70	19.3
5	TiO2 0%-MV1	9807	319.90	315.10	18.3
6	TiO2 10%-MV1	9807	331.90	334.10	16.7
7	TiO2 10%-MV1	9807	375.50	358.10	13.7
8	TiO2 10%-MV1	9807	319.70	308.90	18.7
9	TiO2 10%-MV1	9807	322.30	328.30	17.5
10	TiO2 10%-MV1	9807	319.40	311.80	18.6
11	TiO2 10%-MH1	9807	312.20	313.90	18.9
12	TiO2 10%-MH1	9807	332.10	319.00	17.4
13	TiO2 10%-MH1	9807	324.30	331.80	17.2
14	TiO2 10%-MH1	9807	328.10	315.60	17.9
15	TiO2 10%-MH1	9807	332.90	336.20	16.5
16	TiO2 10%-MH1	9807	327.20	326.60	17.3
17	TiO2 10%-MH1	9807	321.20	320.10	18.0
18	TiO2 10%-MH1	9807	315.30	315.70	18.6
19	TiO2 10%-MH1	9807	328.60	321.60	17.5
20	TiO2 10%-MH1	9807	326.80	305.10	18.5
21	TiO2 10%-MH5	49.03	710.00	663.10	19.6
22	TiO2 10%-M10	98.07	999.90	999.90	18.5
Dureza Vickers Promedio =					17.9

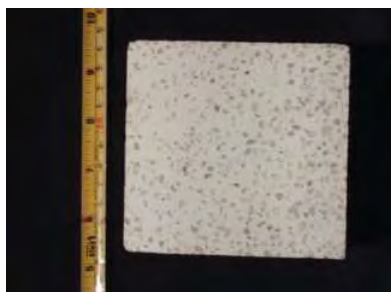
Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂,
CH.

No	Load Aplication	Load Kgf,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
			D1	D2	
1	TiO2 10%-AV5	49.03	275.10	279.80	120.4
2	TiO2 10%-AV5	49.03	299.60	281.40	109.8
3	TiO2 10%-AV5	49.03	295.40	305.20	102.8
4	TiO2 10%-AV5	49.03	287.30	290.80	110.9
5	TiO2 10%-AV5	49.03	287.30	299.90	107.5
6	TiO2 10%-AV5	49.03	278.10	296.90	112.1
7	TiO2 10%-AV5	49.03	327.50	351.50	80.4
8	TiO2 10%-AV5	49.03	328.60	333.50	84.6
9	TiO2 10%-AV5	49.03	304.40	308.00	98.8
10	TiO2 10%-AV5	49.03	288.00	299.60	107.4
11	TiO2 10%-AH5	49.03	274.70	290.80	115.9
12	TiO2 10%-AH5	49.03	288.20	277.10	116.0
13	TiO2 10%-AH5	49.03	266.40	268.70	129.5
14	TiO2 10%-AH5	49.03	318.00	283.70	102.4
15	TiO2 10%-AH5	49.03	280.30	294.00	112.4
16	TiO2 10%-AH5	49.03	317.90	318.80	91.4
17	TiO2 10%-AH5	49.03	304.90	303.20	100.2
18	TiO2 10%-AH5	49.03	340.20	339.30	80.3
19	TiO2 10%-AH5	49.03	274.70	311.20	108.0
20	TiO2 10%-AH5	49.03	260.80	306.00	115.4
21	TiO2 10%-AH10	98.07	476.10	496.50	78.4
22	TiO2 10%-AH20	196.1	617.20	624.40	96.2
23	TiO2 10%-AH30	294.2	753.90	788.80	93.5
Dureza Vickers Promedio =					103.2

5.3.2.8 DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO₂, CH



Fotografía 5.26. a.

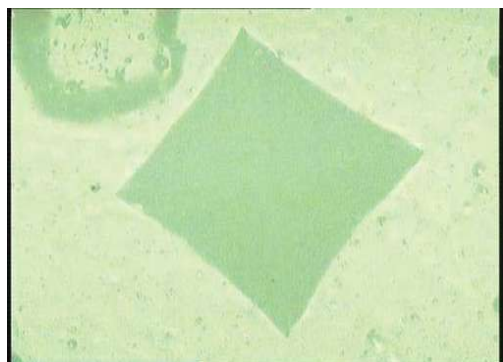


Fotografía 5.26. b.

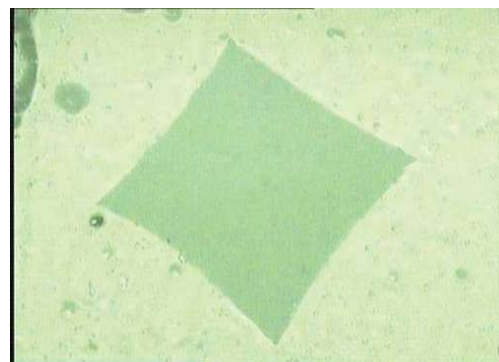


Fotografía 5.26. c.

Fotografía 5.26. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO₂, CH.



TiO₂ 20%-MH1-25



TiO₂ 20%-MV1-5

Figura 5.102. a, y b. Indentación en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO₂, CH.



TiO₂ 20%-AH5-39



TiO₂ 20%-AV5-19

Figura 5.103. a, y b. Indentación en agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO₂, CH.

Tabla 5.25. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO₂, CH.

No	Load Application	Load Kg _f ,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
			D1	D2	
1	TiO ₂ 20%-MV1	9807	308.00	336.40	17.8
2	TiO ₂ 20%-MV1	9807	297.60	302.90	20.5
3	TiO ₂ 20%-MV1	9807	323.20	314.60	18.2
4	TiO ₂ 20%-MV1	9807	354.90	349.20	14.9
5	TiO ₂ 20%-MV1	9807	327.50	312.10	18.1
6	iO ₂ 20%-MV1	9807	319.70	315.40	18.3
7	TiO ₂ 20%-MV1	9807	318.20	308.80	18.8
8	TiO ₂ 20%-MV1	9807	312.90	328.90	18.0
9	TiO ₂ 20%-MV1	9807	315.00	316.50	18.6
10	TiO ₂ 20%-MV1	9807	311.10	306.60	19.4
11	TiO ₂ 20%-MH1	9807	314.70	313.50	18.7
12	TiO ₂ 20%-MH1	9807	342.70	327.50	16.5
13	TiO ₂ 20%-MH1	9807	316.40	320.10	18.3
14	TiO ₂ 20%-MH1	9807	336.50	335.90	16.4
15	TiO ₂ 20%-MH1	9807	311.00	312.80	19.0
16	TiO ₂ 20%-MH1	9807	311.10	305.30	19.5
17	TiO ₂ 20%-MH1	9807	338.90	355.30	15.3
18	TiO ₂ 20%-MH1	9807	309.90	307.80	19.4
19	TiO ₂ 20%-MH1	9807	312.40	308.20	19.2
20	TiO ₂ 20%-MH1	9807	321.90	325.60	17.6
21	TiO ₂ 20%-MH5	49.03	706.00	697.10	18.8
22	TiO ₂ 20%-MH10	98.07	971.40	963.10	19.8
Dureza Vickers Promedio =					18.2

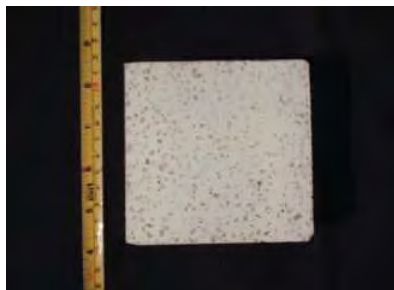
Tabla 5.26. Dureza Vickers medidas en el agregado del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO₂, CH.

No	Load Application	Load Kg _f ,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
			D1	D2	
1	TiO ₂ 20%-AV5	49.03	283.40	305.10	107.0
2	TiO ₂ 20%-AV5	49.03	313.20	301.10	98.2
3	TiO ₂ 20%-AV5	49.03	287.80	313.00	102.7
4	TiO ₂ 20%-AV5	49.03	310.60	301.60	98.9
5	TiO ₂ 20%-AV5	49.03	279.90	312.30	1 5.7
6	TiO ₂ 20%-AV5	49.03	296.90	291.30	107.1
7	TiO ₂ 20%-AV5	49.03	296.20	271.70	114.9
8	TiO ₂ 20%-AV5	49.03	336.70	324.90	84.7
9	TiO ₂ 20%-AV5	49.03	296.90	309.80	100.7
10	TiO ₂ 20%-AV5	49.03	309.10	349.40	85.5
11	TiO ₂ 20%-AH5	49.03	286.60	310.30	104.0
12	TiO ₂ 20%-AH5	49.03	305.00	325.60	93.2
13	TiO ₂ 20%-AH5	49.03	295.80	285.10	109.9
14	TiO ₂ 20%-AH5	49.03	291.20	287.30	110.8
15	TiO ₂ 20%-AH5	49.03	287.60	311.10	103.4
16	TiO ₂ 20%-AH5	49.03	272.50	274.90	123.7
17	TiO ₂ 20%-AH5	49.03	297.40	267.80	116.0
18	TiO ₂ 20%-AH5	49.03	291.10	291.80	109.1
19	TiO ₂ 20%-AH5	49.03	285.10	287.90	112.9
20	TiO ₂ 20%-AH5	49.03	307.90	294.30	102.2
21	TiO ₂ 20%-AH10	98.07	416.10	395.80	112.5
22	TiO ₂ 20%-AH20	196.1	655.30	638.20	88.6
23	TiO ₂ 20%-AH30	294.2	914.30	954.00	63.7
Dureza Vickers Promedio =					102.4

5.3.2.9 DUREZA VICKERS EN NANOCONCRETO GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH



Fotografía 5.27. a.

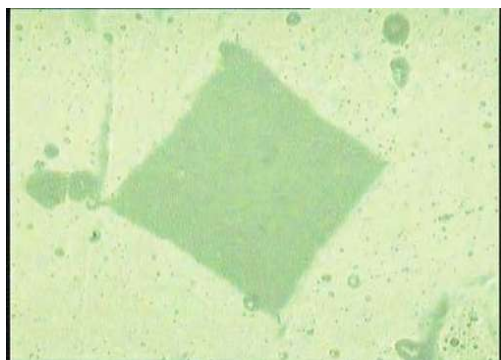


Fotografía 5.27. b.

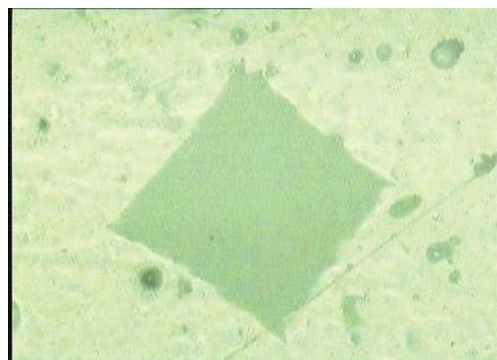


Fotografía 5.27. c.

Fotografía 5.27. a, b y c. Especimen labrado de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.



TiO₂ 30%-MH1-24



TiO₂ 30%-MV1-1

Figura 5.104. a, y b. Indentación en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.



TiO₂ 30%-AH5-36



TiO₂ 30%-AV5-13

Figura 5.105. a, y b. Indentación en agregados del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Tabla 5.27. Dureza Vickers medidas en la matriz del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

No	Load Application	Load Kgf,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
			D1	D2	
1	TiO ₂ 30%-MV1	9807	305.20	309.00	19.6
2	TiO ₂ 30%-MV1	9807	292.00	300.10	21.1
3	TiO ₂ 30%-MV1	9807	304.30	307.10	19.8
4	TiO ₂ 30%-MV1	9807	315.90	310.30	18.9
5	TiO ₂ 30%-MV1	9807	291.00	290.30	21.9
6	iO ₂ 30%-MV1	9807	351.30	346.90	15.2
7	TiO ₂ 30%-MV1	9807	299.20	287.00	21.5
8	TiO ₂ 30%-MV1	9807	306.40	305.90	19.7
9	TiO ₂ 30%-MV1	9807	310.70	302.00	19.7
10	TiO ₂ 30%-MV1	9807	313.70	309.30	19.1
11	TiO ₂ 30%-MH1	9807	308.40	305.60	19.6
12	TiO ₂ 30%-MH1	9807	300.90	302.60	20.3
13	TiO ₂ 30%-MH1	9807	302.90	306.80	19.9
14	TiO ₂ 30%-MH1	9807	306.50	298.70	20.2
15	TiO ₂ 30%-MH1	9807	299.40	299.00	20.7
16	TiO ₂ 30%-MH1	9807	305.80	304.40	19.9
17	TiO ₂ 30%-MH1	9807	368.40	365.10	13.7
18	TiO ₂ 30%-MH1	9807	374.60	385.40	12.8
19	TiO ₂ 30%-MH1	9807	333.40	333.60	16.6
20	TiO ₂ 30%-MH1	9807	315.40	319.20	18.4
21	TiO ₂ 30%-MH5	49.03	690.60	681.80	19.6
22	TiO ₂ 30%-MH10	98.07	891.30	881.90	23.5
23	TiO ₂ 30%-MH20	196.1	999.90	999.90	37.0
Dureza Vickers Promedio =					19.9

Tabla 5.28. Dureza Vickers medidas en el agregado del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

No	Load Application	Load Kgf,N	Diagonal(μm)		Hardness HV
			D1	D2	
1	TiO ₂ 30%-AV5	49.03	316.00	297.90	98.4
2	TiO ₂ 30%-AV5	49.03	345.70	304.30	87.7
3	TiO ₂ 30%-AV5	49.03	307.30	325.70	92.5
4	TiO ₂ 30%-AV5	49.03	309.30	291.10	102.8
5	TiO ₂ 30%-AV5	49.03	288.10	296.40	10 .5
6	TiO ₂ 30%-AV5	49.03	383.20	340.40	70.8
7	TiO ₂ 30%-AV5	49.03	331.30	347.30	80.5
8	TiO ₂ 30%-AV5	49.03	329.40	332.30	84.7
9	TiO ₂ 30%-AV5	49.03	358.00	311.20	82.8
10	TiO ₂ 30%-AV5	49.03	336.40	288.80	94.8
11	TiO ₂ 30%-AH5	49.03	352.20	342.30	76.8
12	TiO ₂ 30%-AH5	49.03	293.40	299.80	105.3
13	TiO ₂ 30%-AH5	49.03	321.70	296.80	96.9
14	TiO ₂ 30%-AH5	49.03	316.40	344.10	85.0
15	TiO ₂ 30%-AH5	49.03	330.90	352.50	79.4
16	TiO ₂ 30%-AH5	49.03	280.10	263.40	125.5
17	TiO ₂ 30%-AH5	49.03	380.40	325.50	74.4
18	TiO ₂ 30%-AH5	49.03	346.50	353.70	75.6
19	TiO ₂ 30%-AH5	49.03	335.50	345.20	80.0
20	TiO ₂ 30%-AH5	49.03	309.50	302.60	98.9
21	TiO ₂ 30%-AH10	98.07	448.10	450.80	91.7
22	TiO ₂ 30%-AH20	196.1	670.40	671.90	82.3
23	TiO ₂ 30%-AH30	294.2	875.90	833.90	76.1
Dureza Vickers Promedio =					89.2

Resumen de Indentaciones Vickers en Nanoconcretos Geopoliméricos.

Especímen	Indentacion Vickers en la Matriz	Indentacion Vickers en Agregado
Concreto con CPC	29.6	172.5
Nanoconcreto GP - 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH	17.6	90.8
Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH	16.9	91.8
Nanoconcreto GP - 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH	21.1	100.4
Nanoconcreto GP - 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH	14.4	94.4
Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH	14.1	84.3
Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO ₂ , CH	17.9	103.2
Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 20%TiO ₂ , CH	18.2	102.4
Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO ₂ , CH	19.9	89.2

5.3.3 MÓDULO DE RUPTURA EN NANOCONCREOTOS GEOPOLIMÉRICOS

Un parámetro importante en el diseño de pavimentos y pisos es el modulo de ruptura de los materiales; por lo que se procedió a la obtención de este por medio de la prueba de resistencia a la flexion empleando el método decrito en la norma ASTM C 78 – 02.

El procedimiento experimental que es mostrado a continuación se desarrollo de acuerdo a los resultados obtenidos en su momento fue el siguiente. Este se mostrara por fases para su mayor compresión:

PRIMERA FASE.

Primeramente se procedió a desarrollar especímenes de 15x15x60 cm de los materiales descritos en la Tabla 5.9 del sbcapítulo 5.3.1. Estos especímenes fueron elaborados colando en primer lugar un espesor de 10x15x60 cm de concreto elaborado con CPC dejando lugar para colar posteriormente un espesor de 5x15x60 cm de nanoconcreto geopolimérico y asi simular una microcarpeta Ultra-Thin Composite. Se elaboraron en esta fase también cilindros de 15x30cm para obtener el módulo de elasticidad posteriormente.

Es importante describir en este punto las características y elaboración del material objeto de comparación utilizado en todos los especímenes. Este material es un concreto elaborado con cemento CPC, y agregados de la región de Valle de Santiago y de AGC en Morelia. El concreto fue elaborado empleando el método ACI utilizando para el diseño una relación agua/cemento de 0.5. Se muestran las características de los agregados a continuación:

Arena de Valle de Santiago

PVSS = 1.569 gr/cm³
PVSV = 1.649 gr/cm³

PI = 200 gr
VR = 75 ml
Ps = 192.7 gr

Grava del Banco AGC

Tamaño máx = ¾ plg.
PVSS = 1.474 gr/cm³
PVSV = 1.596 gr/cm³

PI = 300 gr
VR = 100 ml
Ps = 291.4 gr

Malla	Peso Retenido (gr)
4	8
8	62
16	173.6
30	161.1
50	50
100	38.7
200	11.7
TOTAL	500

Malla	Peso Retenido (gr)
2	0
1 1/1	0
1	2
3/4	1690
½	7630
3/8	6330
¼	850
4	90
TOTAL	16900

Se procedió a elaborar la mezcla mediante una revolvedora, obteniéndose un **revenimiento de 12cm y un PVS de 28kg**. Los especímenes fueron desarrollados de acuerdo a los procedimientos tradicionales: el llenado de las vigas se realizó en dos capas y los cilindros en tres capas, varillándolos y vibrándolos posteriormente.



Fotografía 5.28. a.



Fotografía 5.28. b.



Fotografía 5.28. c.



Fotografía 5.28. d.



Fotografía 5.28. e.



Fotografía 5.28. f.

Fotografía 5.28. a, b, c, d, e y f. Proceso de elaboración de Vigas de 15x15x60cm y 15x10x60 de concreto elaborado con CPC.

Los especímenes fueron desmoldados y curados en un promedio de 5 días sumergidos en agua y posteriormente al aire libre, para asumir condiciones normales de obra donde alcanzaron una edad de 45 días para su posterior evaluación.



Fotografía 5.29. a.



Fotografía 5.29. b.

Fotografías 5.29. a y b. Desmolde y curado de Vigas de Concreto CPC.

Una vez que alcanzaron la edad de 45 días se procedió a ponerlos en el molde en el que fueron elaborados para la posterior colada de las mezclas de los diferentes Nanoconcretos Geopoliméricos y de los cuales se elaboraron también dos especímenes cilíndricos para la evaluación posterior del Módulo de Elasticidad. Para cada tipo de mezcla se realizó la medición del revenimiento y extensibilidad, propiedades muy importantes en cuanto a trabajabilidad y manejo de las mezclas; midiéndose para el caso de la extensibilidad con y sin el anillo; el cual trata de simular como fluye o distribuye el nanocemento a través de un armado.



Fotografía 5.30. Medida de la Extensibilidad.

Se presenta la siguiente recolección fotográfica a fin de que el lector perciba las características de cada tipo de material y el procedimiento de elaboración: elaboración del nanocemento base, incorporación de los agregados, obtención de la extensibilidad y colado. Mostrándose al final los resultados de la extensibilidad y el revenimiento para cada tipo de mezcla.

✚ **Espécimen ultra-thin compuesto de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH**



Fotografías 5.31. a y b. Preracion de moldes y elaboración de la mezcla de Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3,CH.



Fotografía 5.32. a, b, c y d. Preracion de area de trabajo para obtención de extensibilidad y Revenimiento.



Fotografía 5.33. a, b, c y d. Medición de la Extensibilidad en Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3,CH.



Fotografía 5.34. a, b, c, d e, f, g respectivamente. Medición de la Extensibilidad y Revenimiento en Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3,CH.



Fotografía 5.35. a, b, c y d respectivamente. Colado del Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

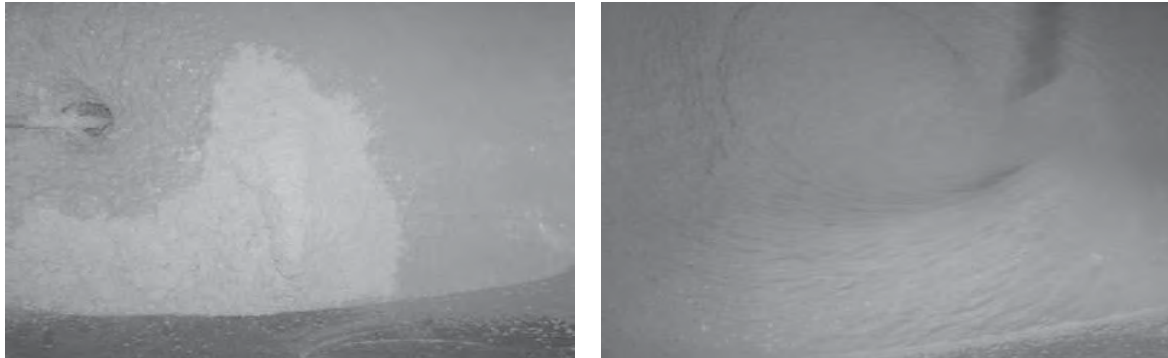


Fotografía 5.36. a, b, c y d respectivamente. Desmolde a las 24 horas de colado del Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

➤ Resultados de Extensibilidad y Revenimiento Mezcla de Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH

- ✚ Revenimiento = 24 cm
- ✚ Extensibilidad sin anillo = 40.5 cm

❖ Espécimen ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH



Fotografía 5.37. a, y b respectivamente. Preparación de la mezcla del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.





Fotografía 5.38. a, b, c, d, e y f respectivamente. Medición de la Extensibilidad y Revenimiento de la mezcla del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.



Fotografía 5.39. a, b, c y d respectivamente. Colado de la mezcla del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

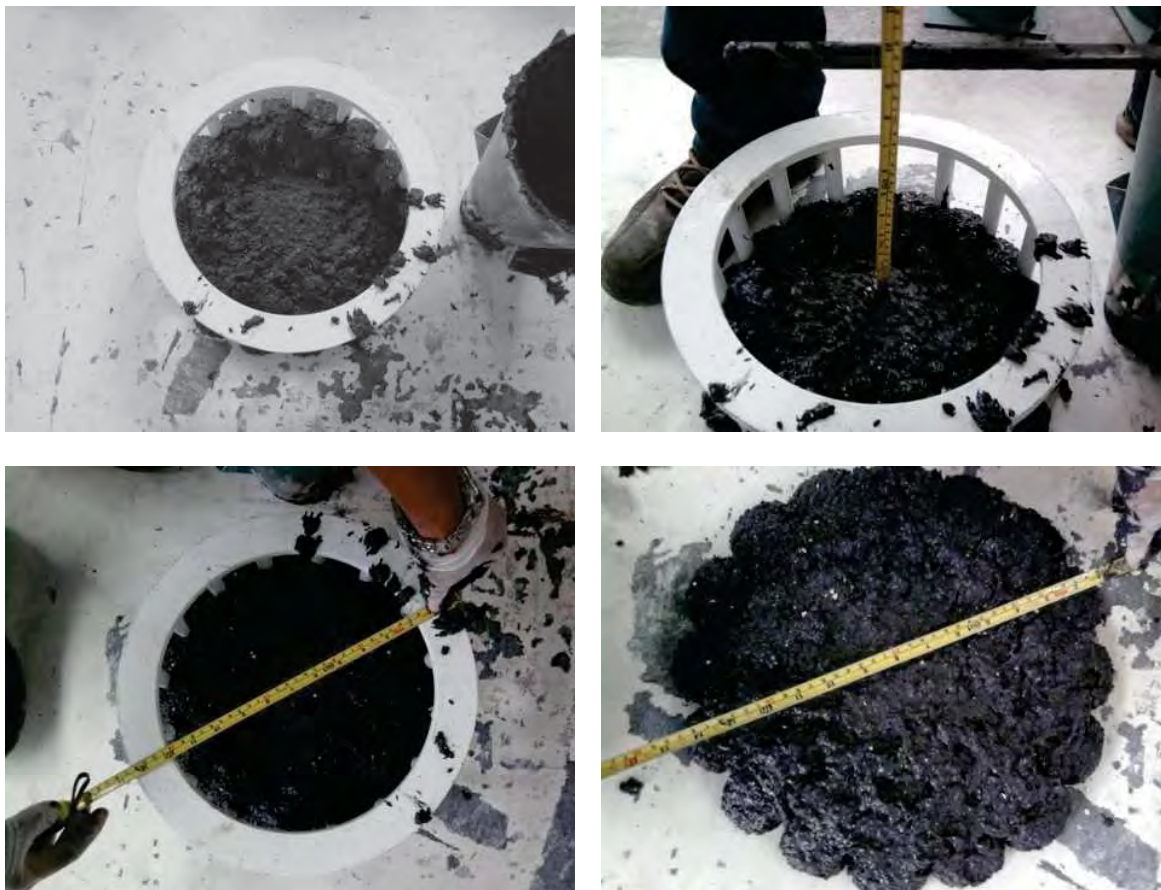


Fotografía 5.40. Desmolde y almacenamiento del Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH, presentando pequeños agrietamientos y contracción.

➤ **Resultados de Extensibilidad y Revenimiento Mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH**

- ✚ Revenimiento = 27 cm
- ✚ Extensibilidad con anillo = 52cm
- ✚ Extensibilidad sin anillo = 55 cm

❖ **Espécimen ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH**

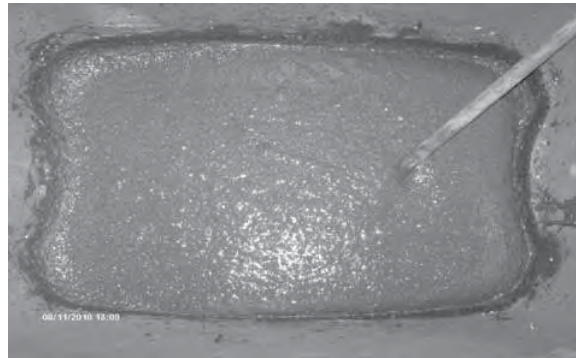


Fotografías 5.41 a, b, c y d respectivamente. Medición del Revenimiento y Extensibilidad del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

➤ **Resultados de Extensibilidad y Revenimiento Mezcla de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH**

- ✚ Revenimiento = 23.5 cm
- ✚ Extensibilidad con anillo = 36 cm
- ✚ Extensibilidad sin anillo = 38 cm

- ❖ **Espécimen ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH**



Fotografías 5.42 a y b. Elaboración de la mezcla del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA CH.





Fotografías 5.43 a, b, c, d, e y f. Medición del Revenimiento y Extensibilidad de la mezcla del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA CH.



Fotografías 5.48 a, b, c y d. Colado de la mezcla del Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA CH.

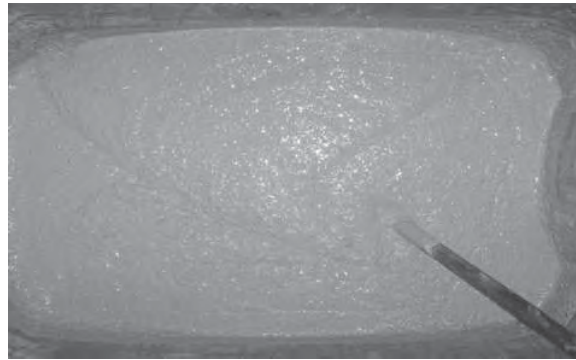


Fotografías 5.49 a, b y c. Desmolde y almacenamiento de especímenes de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA CH, (grietas superficiales).

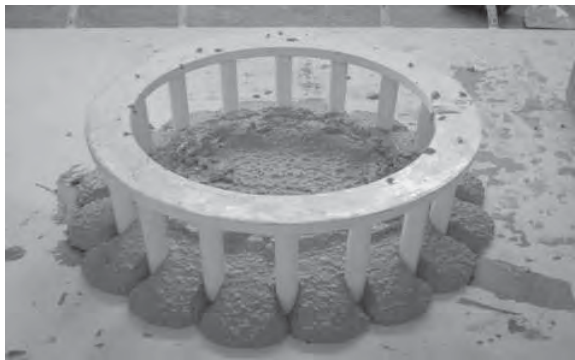
➤ **Resultados de Extensibilidad y Revenimiento Mezcla de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH**

- ✚ Revenimiento = 24 cm
- ✚ Extensibilidad sin anillo = 39 cm

❖ **Espécimen ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH**

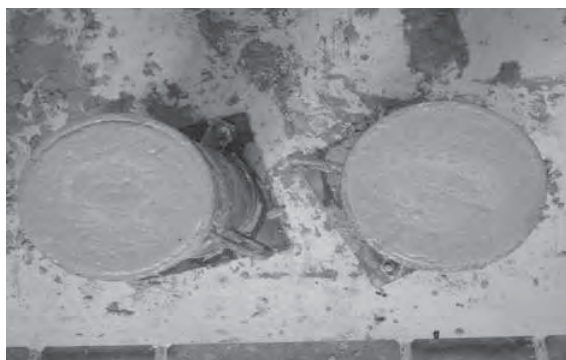


Fotografías 5.50 a y b. Preparación y elaboración de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.





Fotografías 5.51 a, b, c, d y f. Medición del Revenimiento y Extensibilidad de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.



Fotografías 5.52 a, b, c y d. Colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.



Fotografías 5.53 a, y b. Desmolde y almacenamiento de especímenes de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

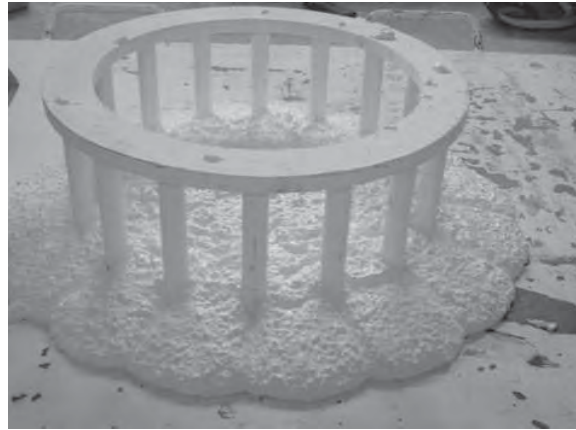
➤ **Resultados de Extensibilidad y Revenimiento Mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH**

- ✚ Revenimiento = 25 cm
- ✚ Extensibilidad con anillo = 39 cm
- ✚ Extensibilidad sin anillo = 41 cm

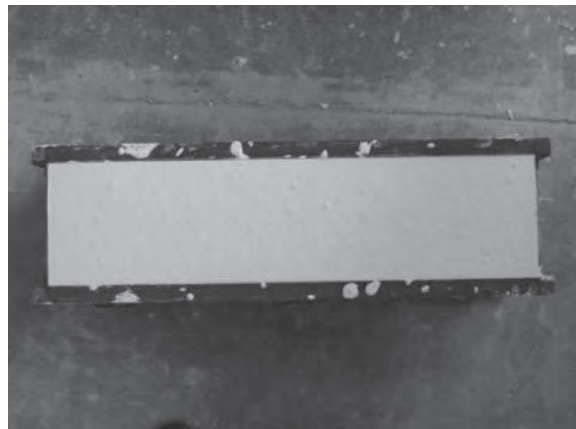
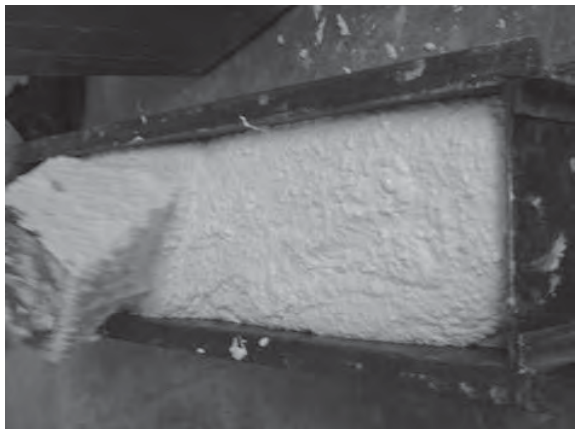
❖ **Especimen ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH**



Fotografías 5.54 a, y b. Preparación y Elaboración de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.



Fotografías 5.55 a, b, c y d. Medición del Revenimiento y Extensibilidad de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.





Fotografías 5.56 a, b, c y d. Colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.



Fotografías 5.57 a y b. Desmolde y Almacenamiento de especímenes de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

➤ **Resultados de Extensibilidad y Revenimiento Mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH**

- ✚ Revenimiento = 25.5 cm
- ✚ Extensibilidad con anillo = 46 cm
- ✚ Extensibilidad sin anillo = 49 cm

❖ **Espécimen ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH**

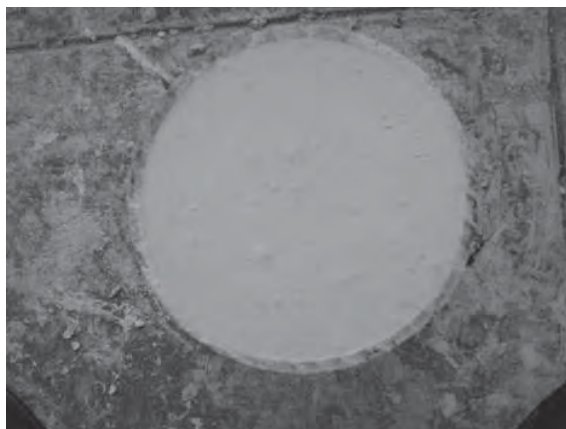


Fotografías 5.58 a, y b. Preparación y Elaboración de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.





Fotografías 5.59 a, b, c, d, e y f. Medición del Revenimiento y Extensibilidad de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.



Fotografías 5.60 a, b, c y d. Colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.



Fotografías 5.61 a y b. Desmolde y almacenamiento de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

➤ **Resultados de Extensibilidad y Revenimiento Mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH**

- ✚ Revenimiento = 26 cm
- ✚ Extensibilidad con anillo = 46 cm
- ✚ Extensibilidad sin anillo = 49 cm

 RESUMEN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS DIFERENTES MEZCLAS.

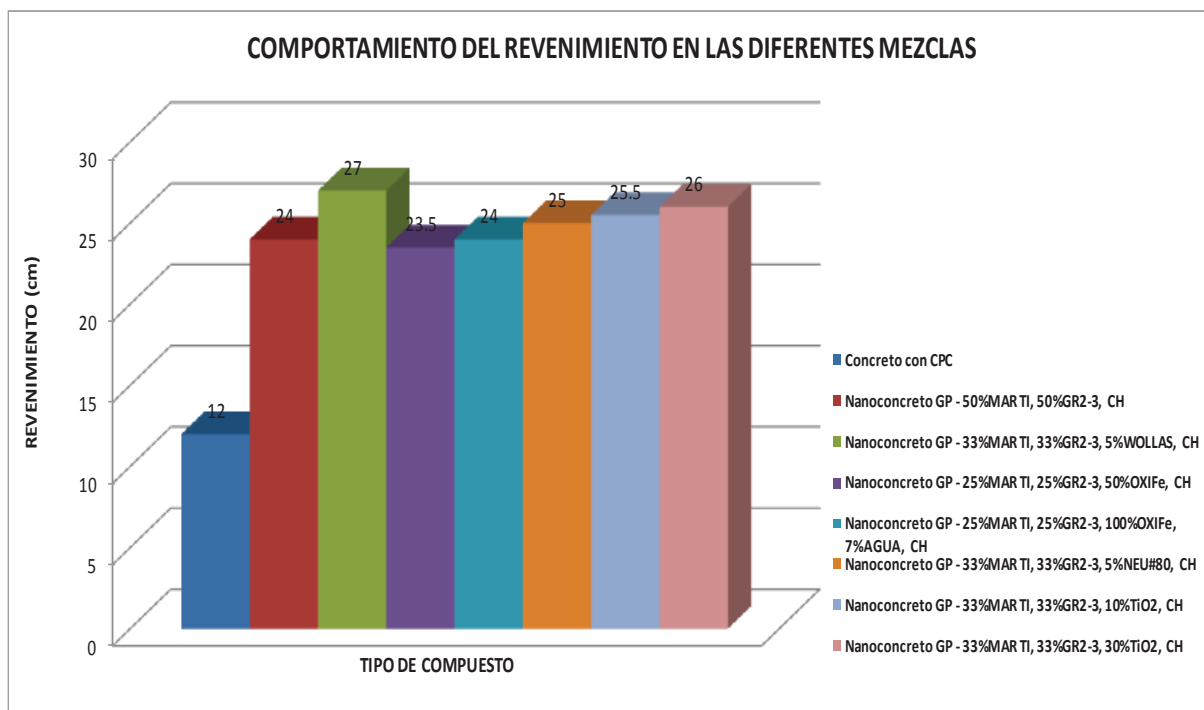


Figura 5.106. Comportamiento del Revenimiento de las diferentes mezclas.

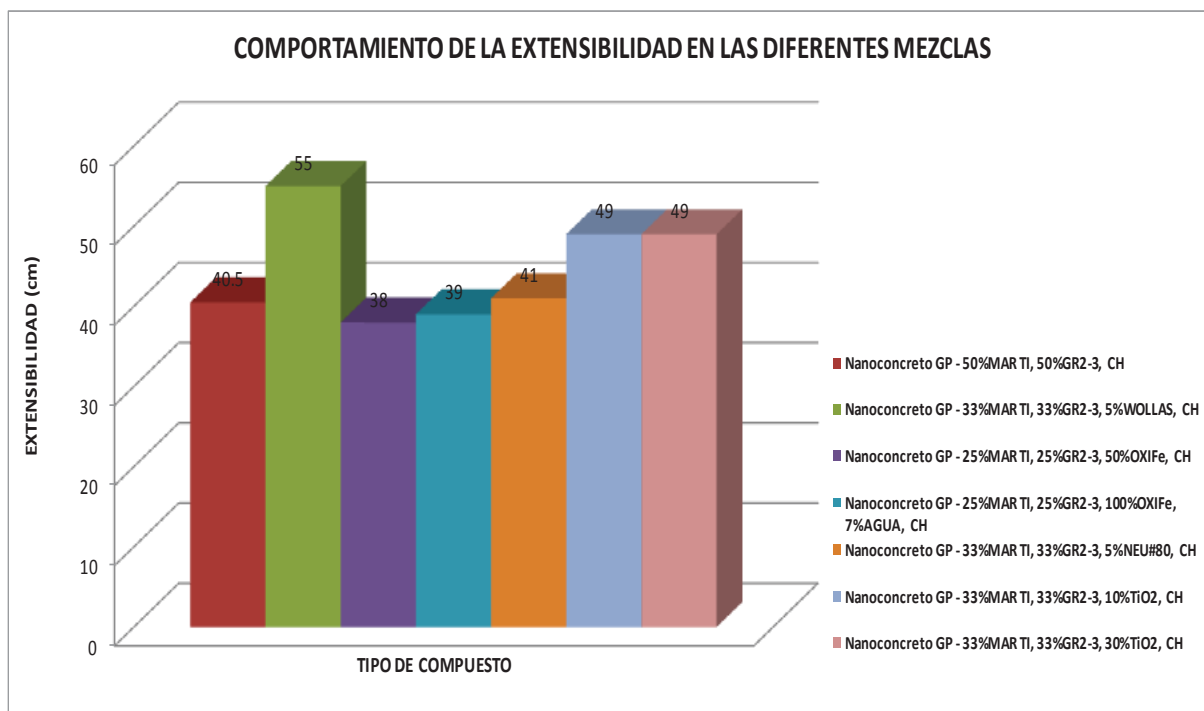
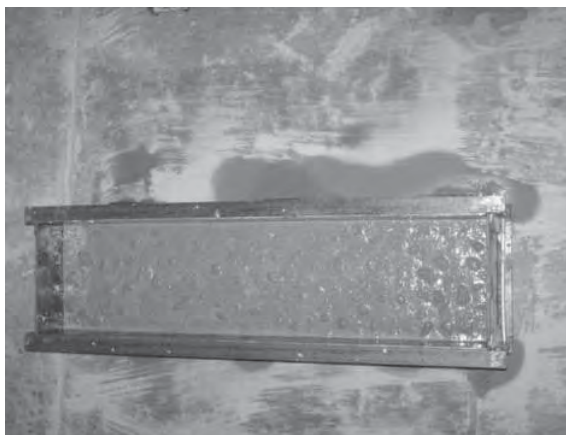


Figura 107. Comportamiento de la extensibilidad de las diferentes mezclas.

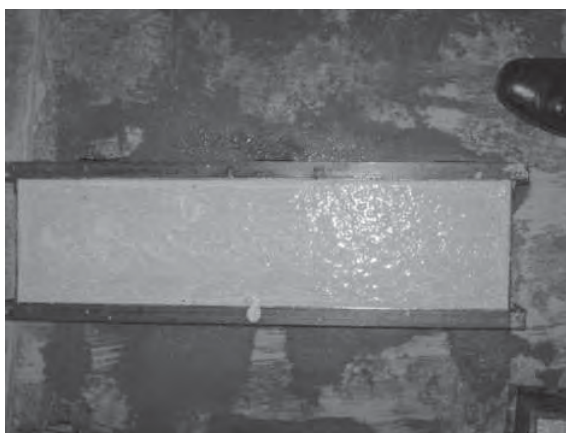
SEGUNDA FASE: MEJORAMIENTO DE ESPECÍMENES.

Como una segunda fase, después de haber observado que los especímenes después de desmoldarlos y haber transcurrido un tiempo presentaban problemas de contracciones y adherencia entre cada fase de los dos tipos de material, se procedió a elaborar vigas, al igual que en el procedimiento anterior pero coladas en estado fresco y vigas completas (de 15x15x60cm) de Nanoconcreto Geopolimérico. Se elaboró la colada de concreto CPC y una vez que este alcanzó el fraguado inicial se procedió a colar el nanoconcreto Geopolimérico; los compuestos geopoliméricos elaborados fueron: Nanoconcreto GP- 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH y Nanoconcreto GP- 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU, CH.

❖ ***Especímenes ultra-thin de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS y GP - 33%MAR TI, 33%GR2-35%, 5%NEU, CH, elaborado en ESTADO FRESCO***

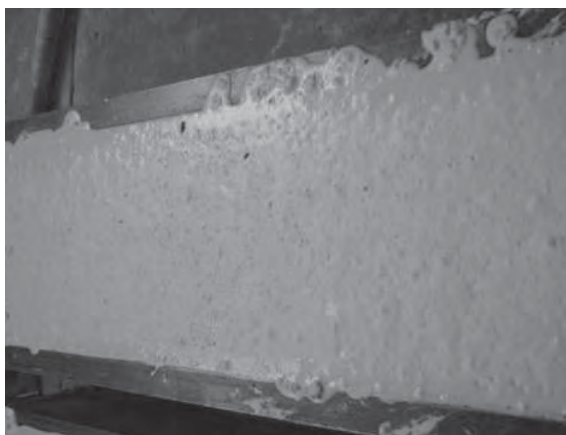


Fotografías 5.62 a y b. Elaboración y colado de la mezcla de concreto con CPC en dimensiones de 10x15x60 cm.



Fotografías 5.63 a y b. Elaboración y colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU, CH de 5x15x60cm una vez que el concreto elaborado con CPC alcanza su fraguado inicial.

- ❖ **Espécimen de 15x15x60 cm compuesto de la mezcla de Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3,CH y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU, CH, 50%AGREGADO AGC**

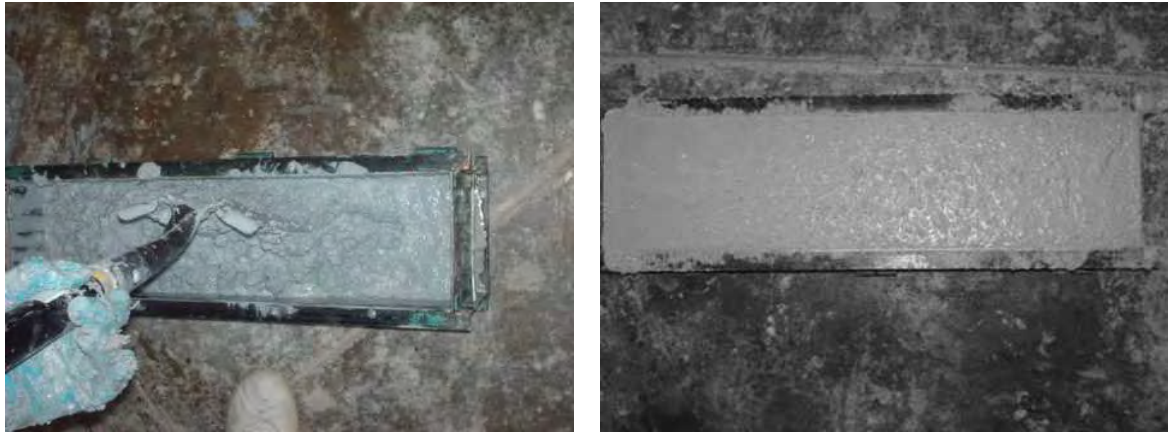


Fotografías 5.64 a y b. Elaboración y colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH de 15x15x60cm.



Fotografías 5.65 a y b. Elaboración y colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, 5%NEU#80, CH de 15x15x60cm.





Fotografías 5.66 a, b, c y d. Elaboración y colado de la mezcla de Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, 5%NEU#80, 50%Agregado AGC, CH de 15x15x60cm.



Fotografías 5.67. Desmolde y almacenamiento de vigas de 15x15x60 cm de nanocementos geopolimericos.



Fotografías 5.68. Almacenamiento de especímenes para posterior caracterización.

TERCERA FASE: OBTENCION DE LOS ESFUERZOS A FLEXIÓN.

❖ Modulos de Ruptura.

Posterior a la Fase uno y dos se almacenaron todos los especímenes elaborados para que alcanzaran la edad de prueba de 45 días y evaluar su resistencia a la flexión así como sus módulos de elasticidad.

Como se menciona anteriormente el esfuerzo a la flexión del concreto se realizo conforme a la norma ASTM C 78 – 02 utilizando la siguiente fórmula, debido a que en todos ellos la falla ocurrio en el tercio medio del claro, obteniéndose los siguientes resultados:

$$MR = PL / bd^2$$

Donde

MR = Módulo de Ruptura en MPa,
P = Máxima carga aplicada en kg,
L = Claro en cm,
b = Ancho promedio en cm,
d = Peralte promedio en cm.

a) Concreto Elaborado con CPC.



Fotografías 5.69. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes de Concreto elaborado con CPC.

b) Módulos de ruptura en Espécimen ultra-thin compuesto de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.



Fotografías 5.70. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH

- c) **Modulos de ruptura en Espécimen ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH**



Fotografías 5.71. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

d) *Modulos de ruptura en Espécimen ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH*



Fotografías 5.72. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

e) **Modulos de ruptura en Espécimen ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH**



Fotografías 5.73. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

f) **Modulos de ruptura en Espécimen ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH**



Fotografías 5.74. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH

g) *Modulos de ruptura en Espécimen ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH*



Fotografías 5.75. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

h) Modulos de ruptura en Espécimen ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH



Fotografías 5.76. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

🚩 **Modulos de ruptura en Espécímenes ultra-thin de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH y GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH, elaborado en ESTADO FRESCO.**

a) **Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH**



Fotografías 5.77. Prueba de Resistencia a Flexión en Espécímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

b) **Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH**



Fotografías 5.78. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes ultra-thin compuesto de Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH. (Estado Fresco).

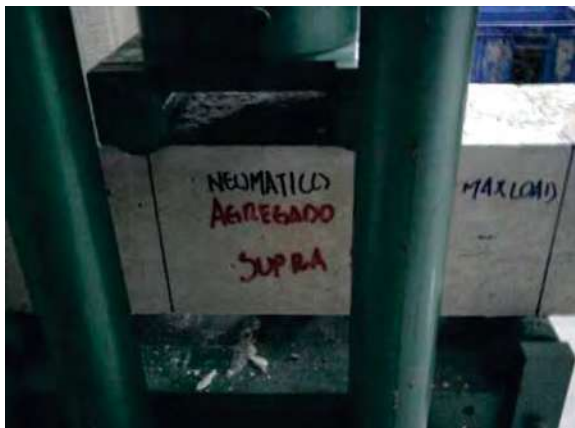


Fotografías 5.79. Vigas sometidas a esfuerzo de flexión.

✚ **Modulos de Ruptura en Especímenes de 15x15x60 cm de Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3,CH y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU, CH, 50%AGREGADO AGC.**



Fotografías 5.80. a y b. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes de Nanoconcreto (especimen completo de nanoconcreto GP) GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, 5%NEU#80, CH.



Fotografías 5.81 a y b. Prueba de Resistencia a Flexión en Especímenes de Nanoconcreto (especimen completo de nanoconcreto GP) GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, 5%NEU#80, 50%AGREGADO AGC, CH.

Resumen de Resultados: Módulos de Ruptura de los diferentes tipos de mezclas de Nanoconcretos Geopoliméricos comparados con el Concreto elaborado con CPC.

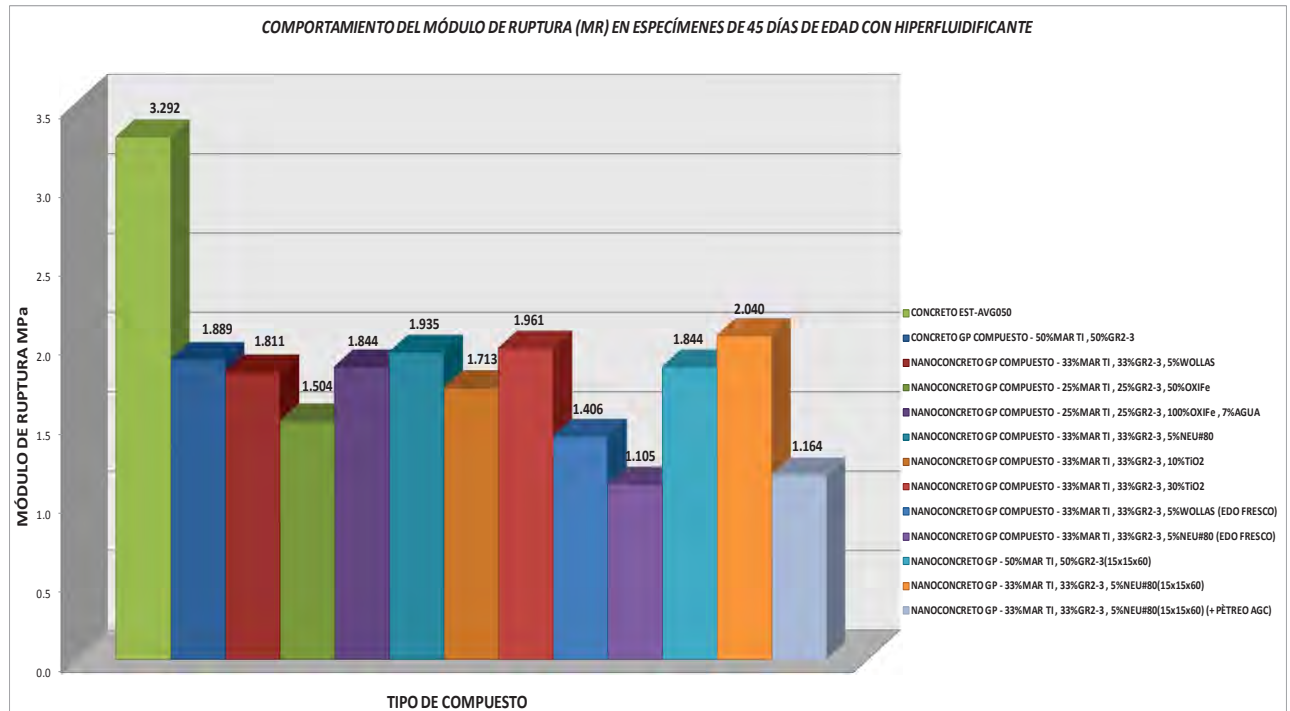


Figura 5.108 Resumen de Resultados de los diferentes tipos de mezclas y especímenes ultra-thin.

5.3.4 MÓDULOS DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON EN NANOCONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS

Un parámetro importante en el diseño de pavimentos y pisos es también el conocimiento el modulo de elasticidad de los materiales; por lo que se procedió a la obtención de este por medio de la prueba de Módulo de elasticidad y relación de Poisson empleando el procedimiento descrito en la norma ASTM C 469– 02, en el donde después de obtener las deformaciones necesarias; se somete a compresión el espécimen para la obtención de su resistencia a la compresión mediante el procedimiento descrito en la norma C 39/C 39M – 03, cabeceando los especímenes conforme a la norma C 617 – 98.

Al igual que en el subcapítulo anterior se procederá a mostrar el procedimiento empleado y los resultados obtenidos para cada tipo de compuesto.



Fotografía 5.82 a, b, c y d. Cabeceo cilindros.

a) Módulos de Elasticidad en Especímenes elaborados con CPC.



Fotografía 5.83 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en especímenes de concreto elaborado con CPC.

Tabla 5.29. Resumen: ME y Relación de Poisson en Concreto CPC.

	RESUMEN DE RESULTADOS					
	ESPÉCIMEN 1		ESPÉCIMEN 3		ESPÉCIMEN 4	
	ME (Mpa)	RP	ME (Mpa)	RP	ME (Mpa)	RP
Ciclo 1	18802.036	0.400	18379.617	0.422	17889.194	0.432
Ciclo 2	18545.191	0.389	18685.569	0.411	18825.047	0.400
Ciclo 3	18811.549	0.434	18604.582	0.422	19032.014	0.389
Promedio	18719.592	0.408	18556.589	0.418	18582.085	0.407

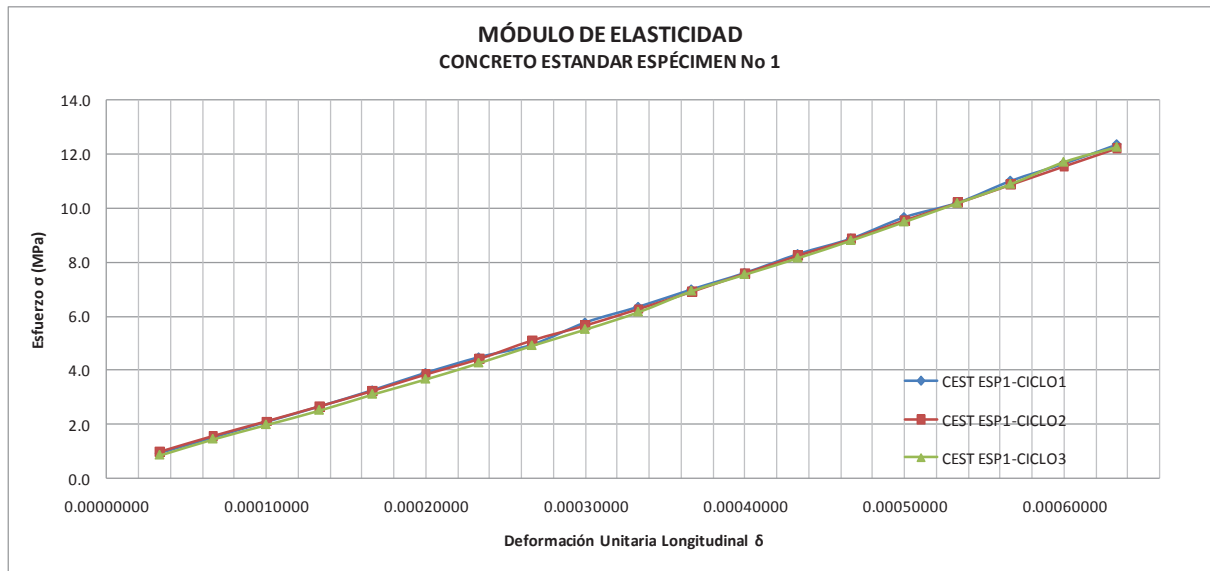


Figura 5.109 a.

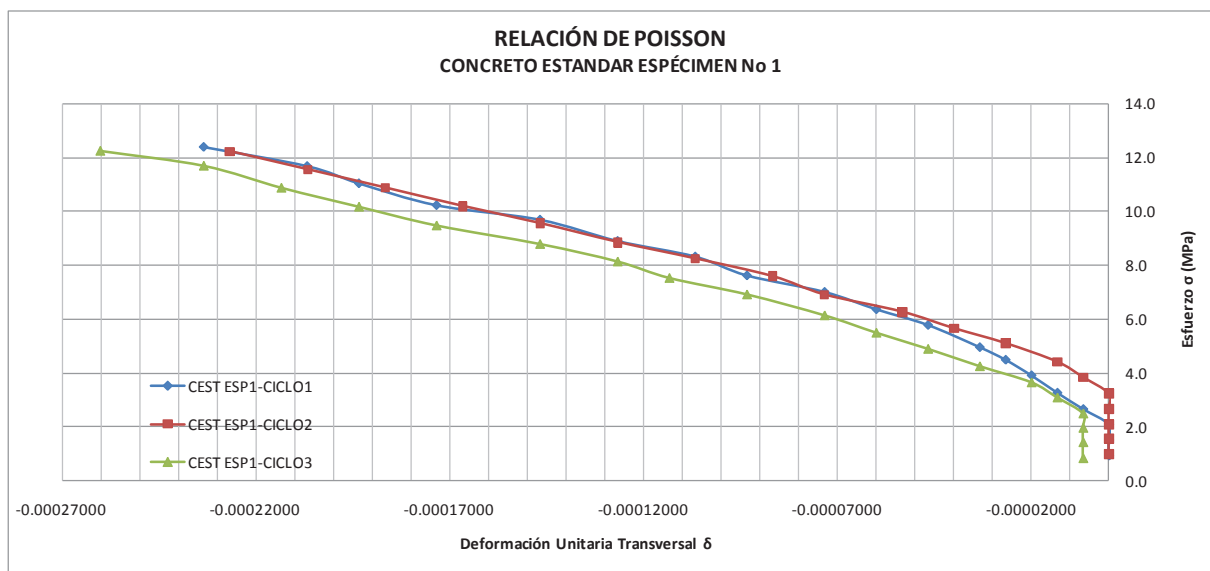


Figura 5.109 b.

Figura 5.109 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 elaborados con concreto CPC.

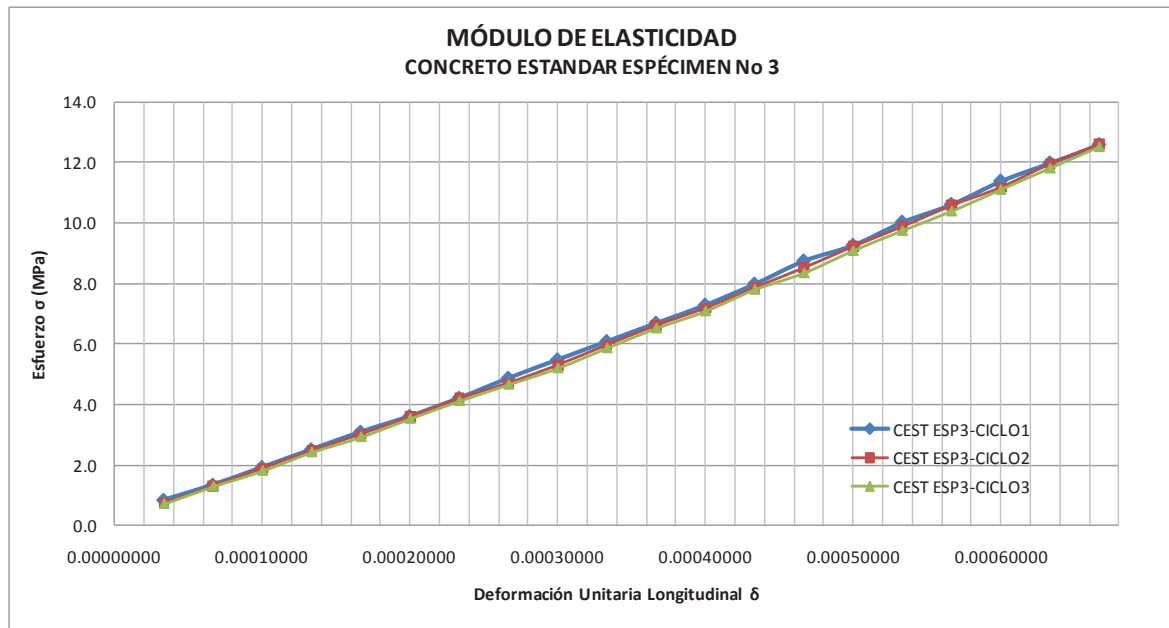


Figura 3434 a.

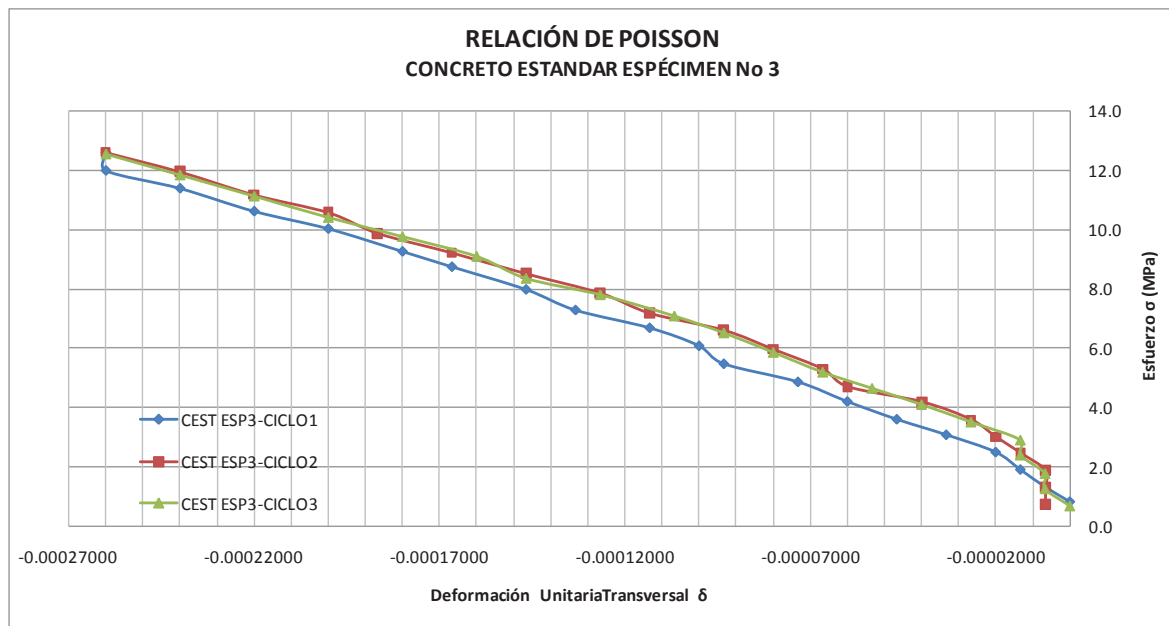


Figura 5.110 b.

Figura 5.110 a y b. Gráficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 3 elaborados con concreto CPC.

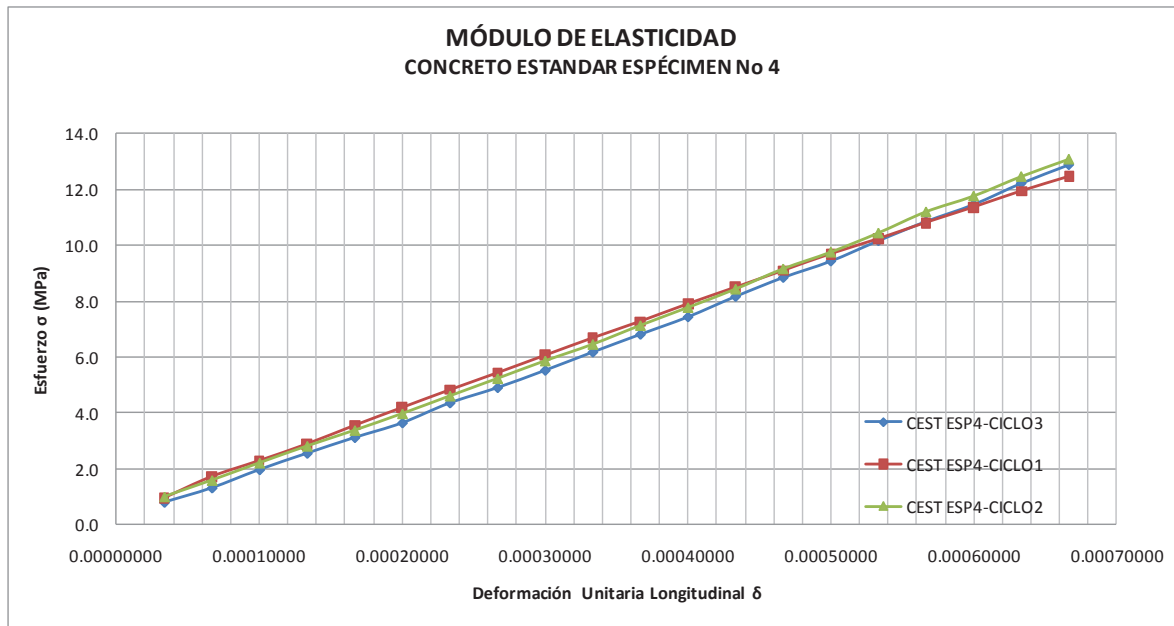


Figura 5.111 a.

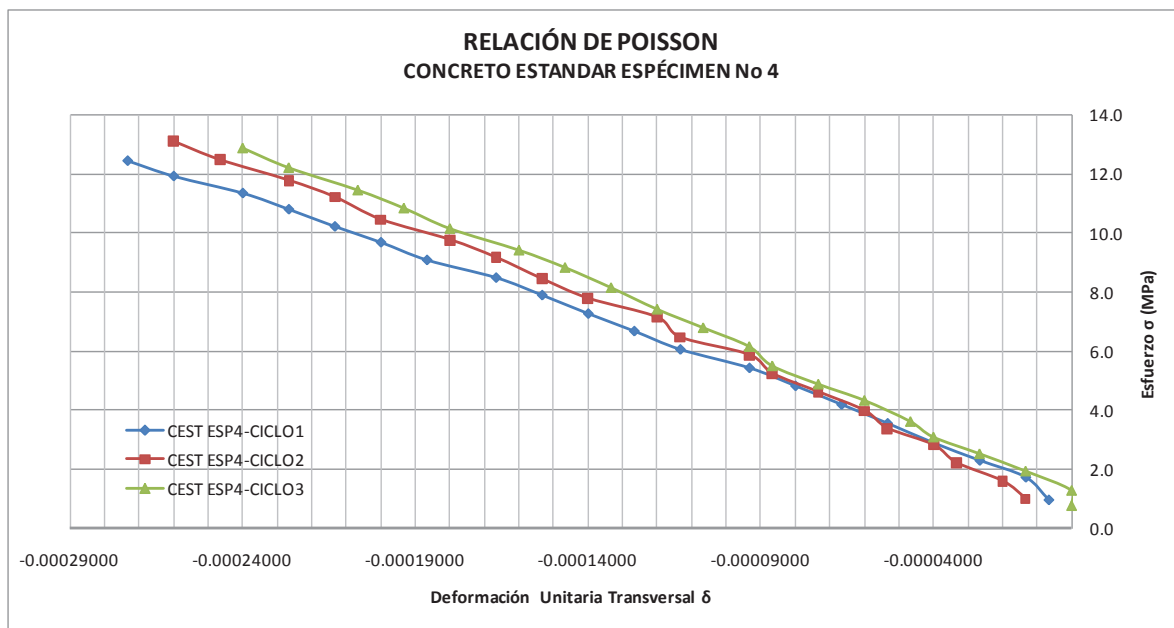


Figura 5.111 b.

Figura 5.111 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 4 elaborados con concreto CPC.

b) Módulos de Elasticidad en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH



Fotografía 5-84 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH

Tabla 5.30. Resumen: ME y Relación de Poisson Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH

	RESUMEN DE RESULTADOS					
	ESPÉCIMEN 1		ESPÉCIMEN 2		ESPÉCIMEN 3 (PLACA)	
	ME (Mpa)	RP	ME (Mpa)	RP	ME (Mpa)	RP
Ciclo 1	6175.350	0.273	6296.823	0.351	7647.557	0.372
Ciclo 2	5291.648	0.432	6364.646	0.360	7684.139	0.336
Ciclo 3	5117.295	0.509	6370.812	0.365		
Promedio	5528.098	0.405	6344.094	0.359	7665.848	0.354

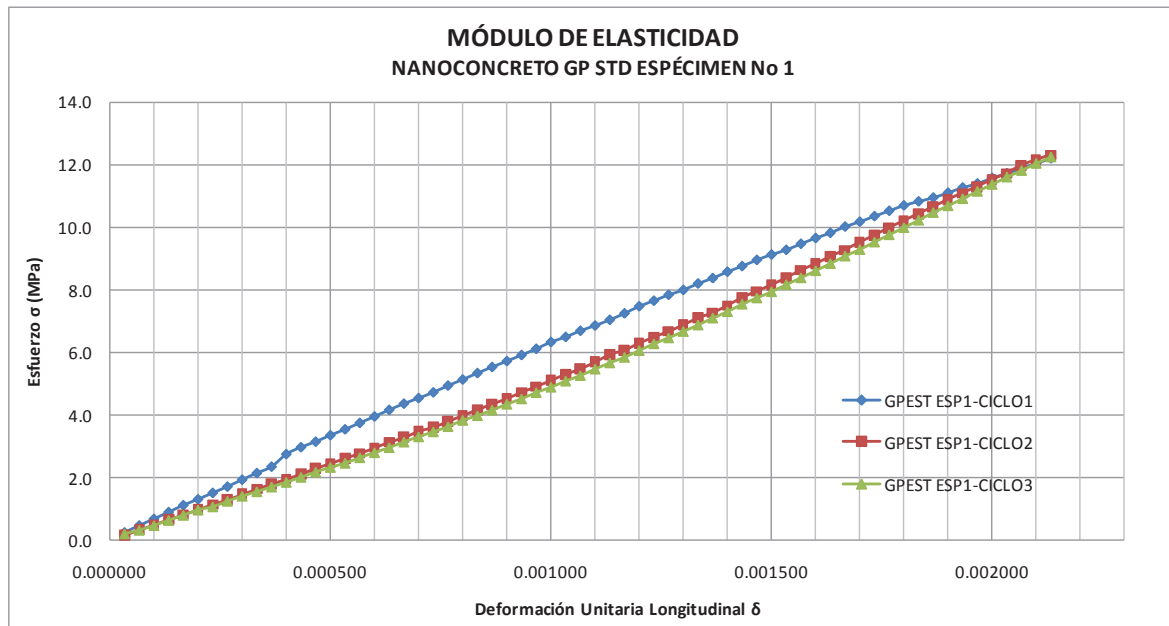


Figura 5.112 a.

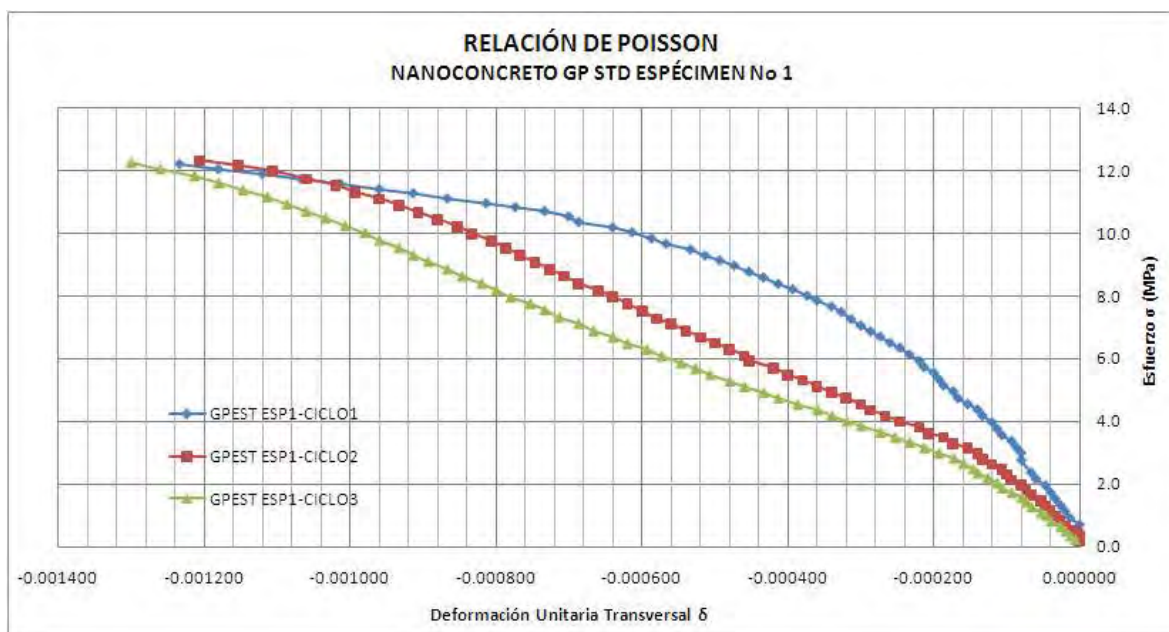


Figura 5.112 b.

Figura 5.112 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

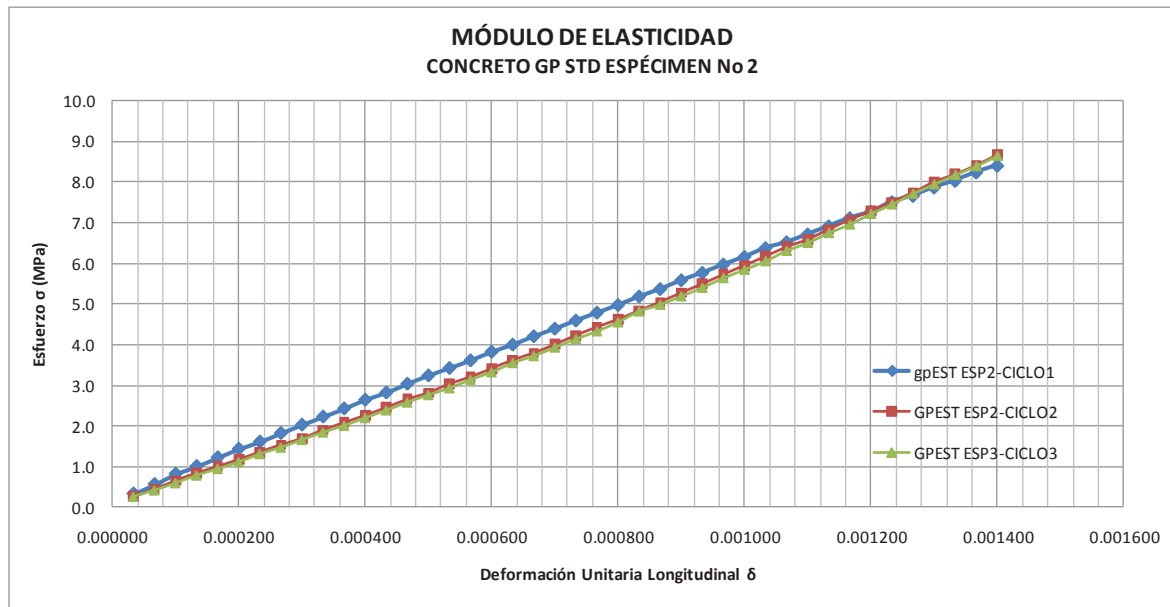


Figura 5.113 a.

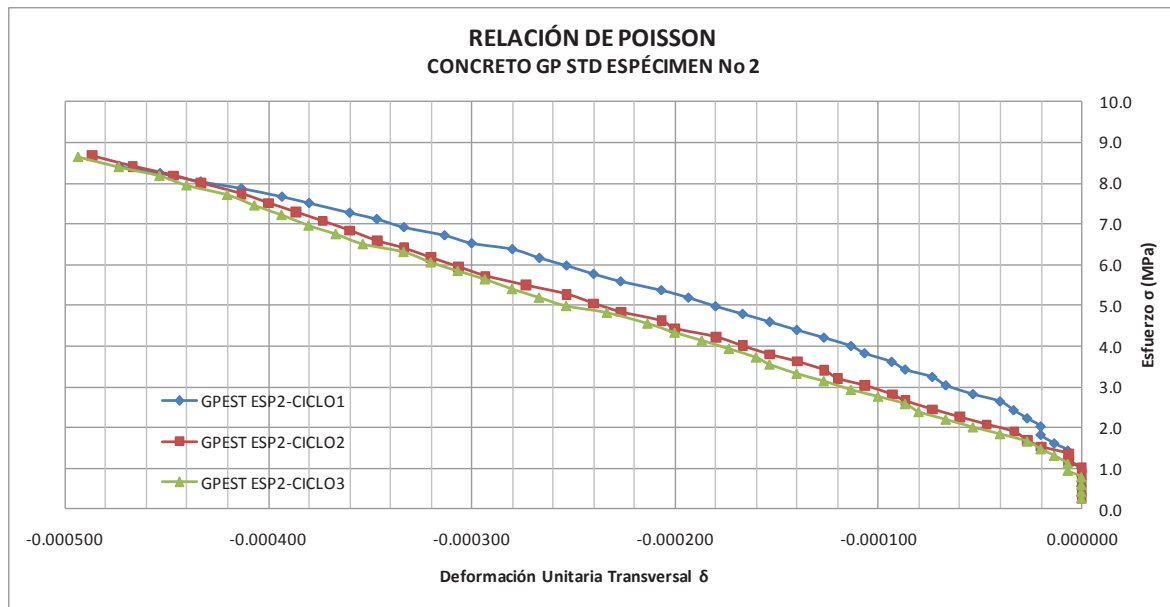


Figura 5.113 b.

Figura 5.113 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 2 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

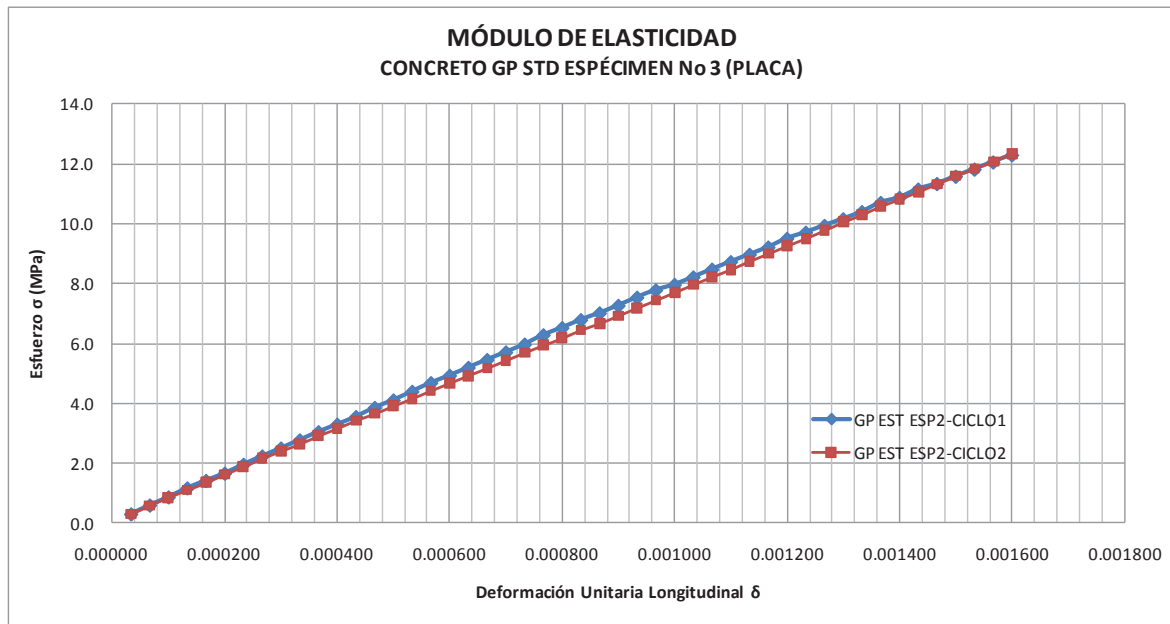


Figura 5.114 a.

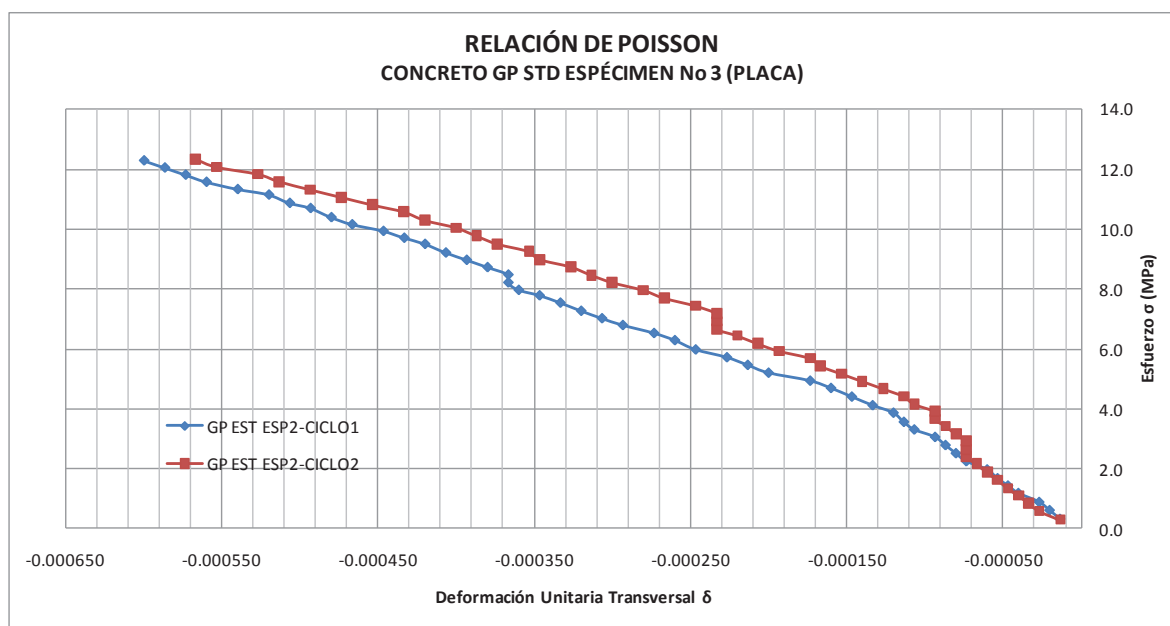


Figura 5.114 b.

Figura 5.114 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 3 (PLACA) ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH.

c) **Módulos de Elasticidad en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.**



Fotografía 5.85 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

Tabla 5.31. Resumen: ME y Relación de Poisson en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH.

	RESUMEN DE RESULTADOS			
	ESPÉCIMEN 1		ESPÉCIMEN 2	
	ME (Mpa)	RP	ME (Mpa)	RP
Ciclo 1	5422.035	0.338	5479.917	0.241
Ciclo 2	5425.162	0.314	5405.168	0.253
Ciclo 3	5350.602	0.341	5364.899	0.267
Promedio	5399.266	0.331	5416.661	0.254

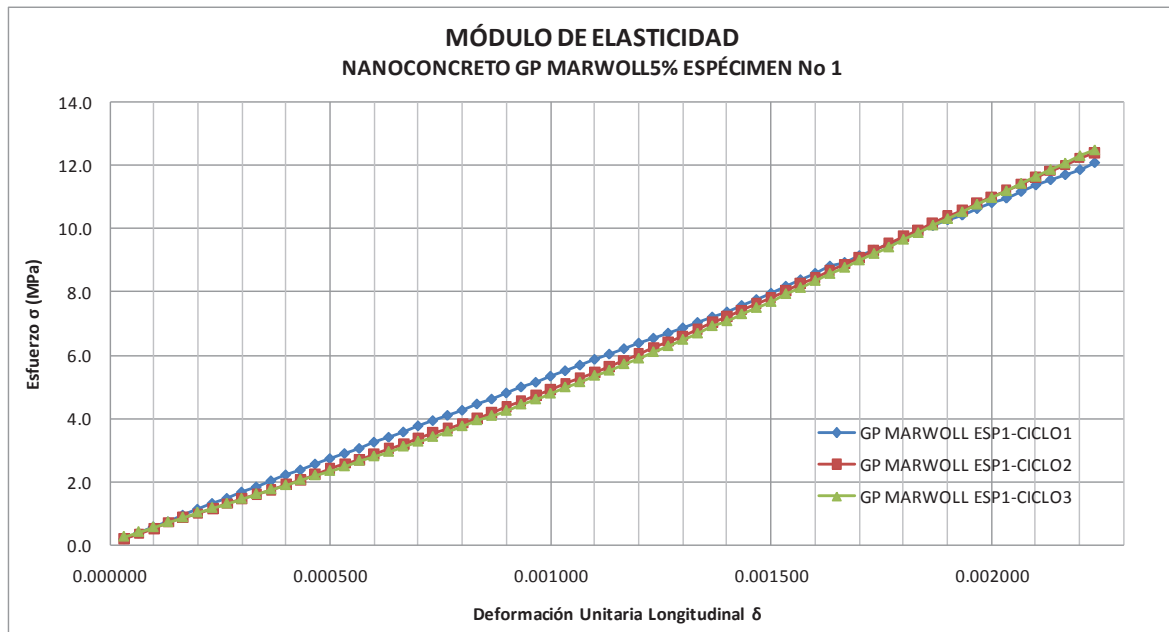


Figura 5.115 a.

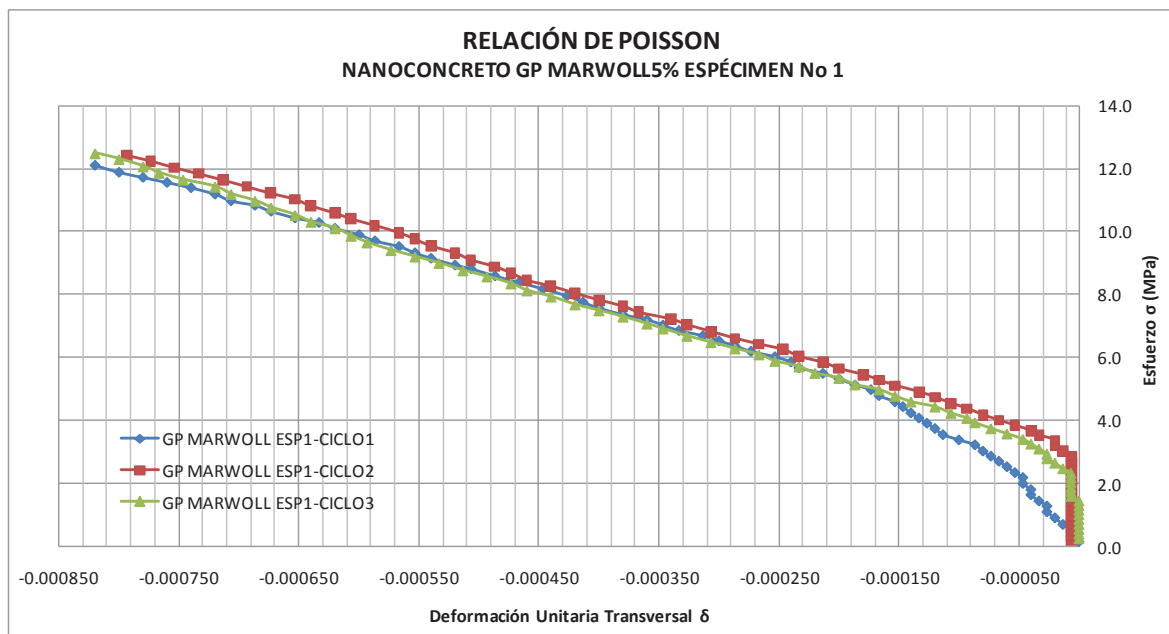


Figura 5.115 b.

Figura 5.115 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLAS, CH.

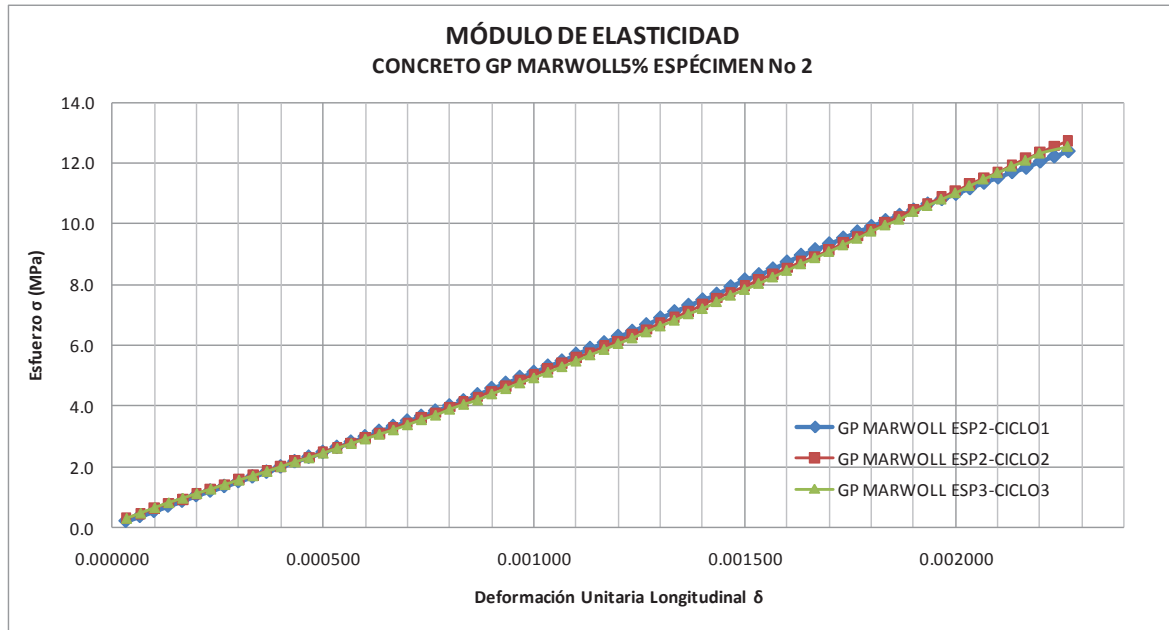


Figura 5.116 a.

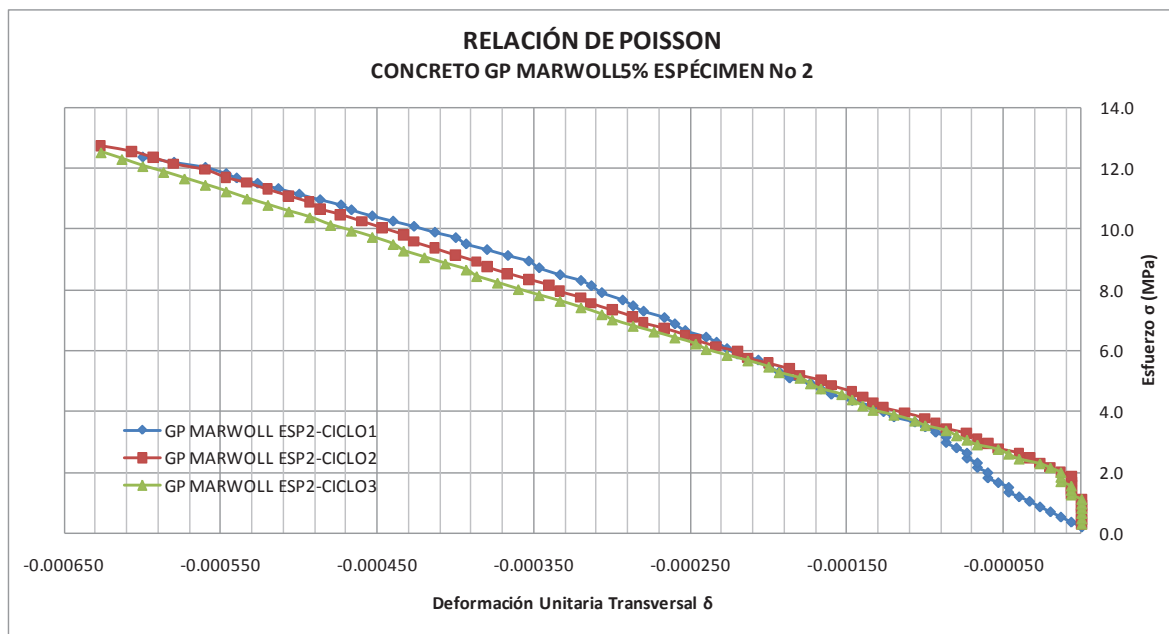


Figura 5.116 b.

Figura 5.116 a y b respectivamente. Gráficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 2 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLAS, CH.

d) **Módulos de Elasticidad en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH**



Fotografía 5.86 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

Tabla 5.32. Resumen: ME y Relación de Poisson en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

	RESUMEN DE RESULTADOS			
	ESPÉCIMEN 1		ESPÉCIMEN 2	
	ME (Mpa)	RP	ME (Mpa)	RP
Ciclo 1	6474.465	0.198	5974.965	0.476
Ciclo 2	6438.777	0.202	6036.021	0.469
Ciclo 3	6382.275	0.187	5990.475	0.479
Promedio	6431.839	0.196	6000.487	0.475

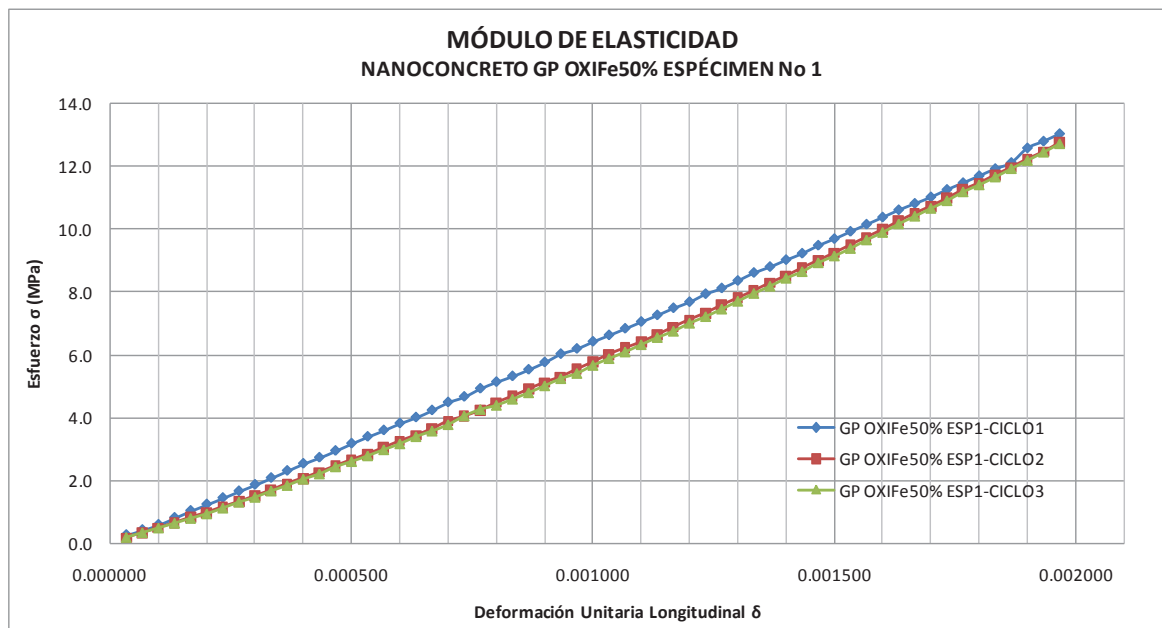


Figura 5.117 a.

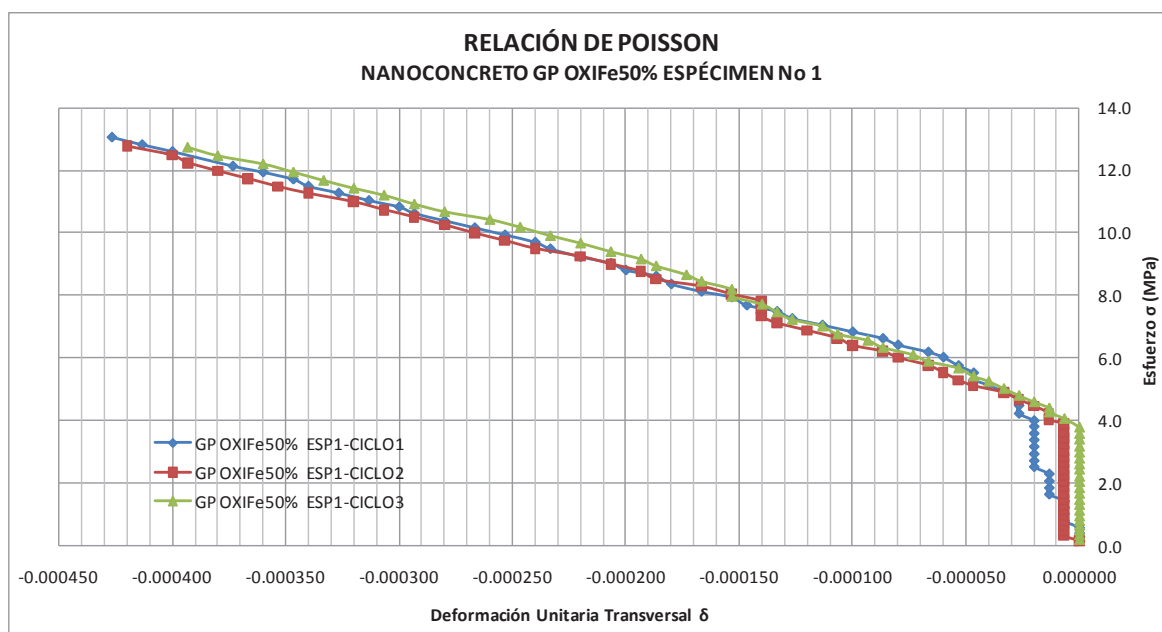


Figura 5.117 b.

Figura 5.117 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

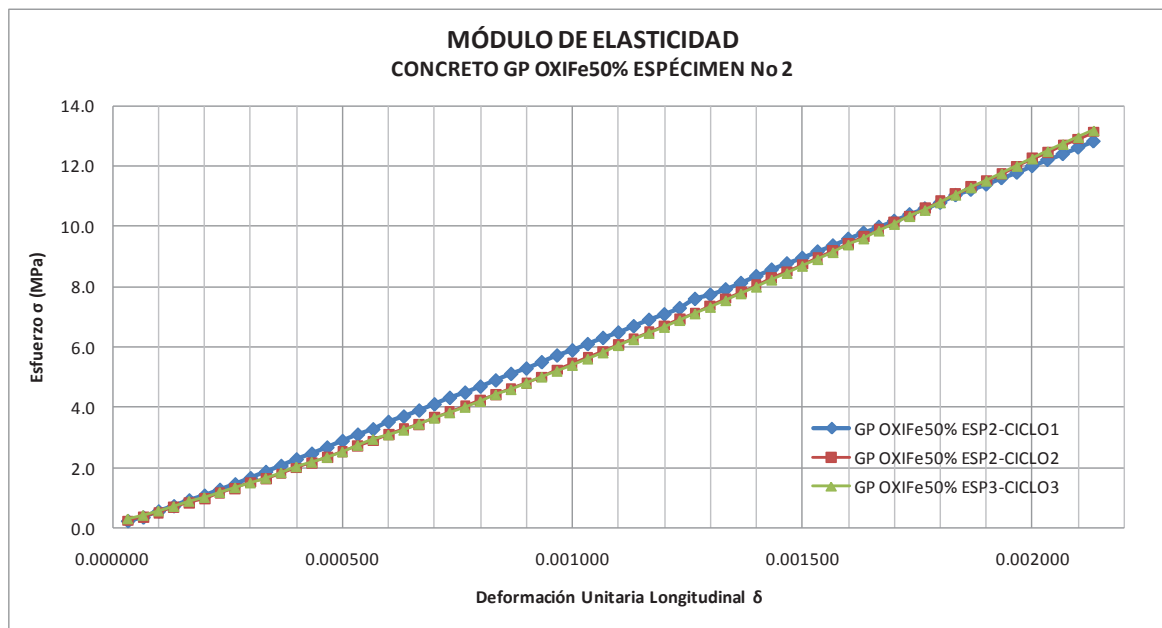


Figura 5.118 a.

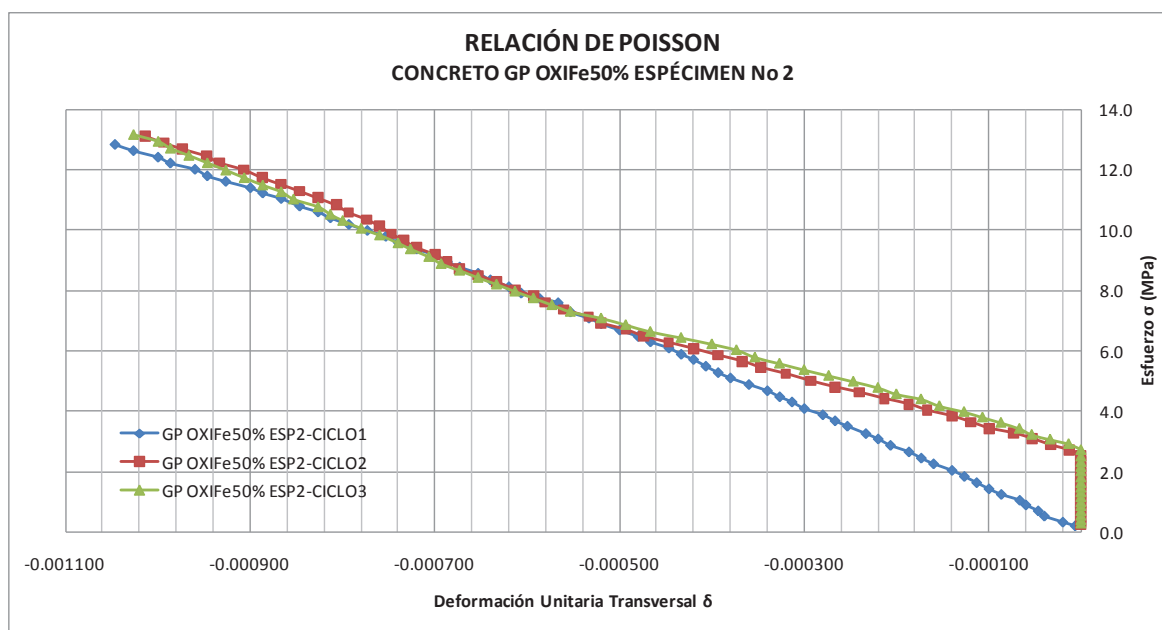


Figura 5.118 b..

Figura 5.118 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 2 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH.

e) **Módulos de Elasticidad en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH**



Fotografía 5.87 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

Tabla 5.33. Resumen: ME y Relación de Poisson en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

	RESUMEN DE RESULTADOS			
	ESPÉCIMEN 1		ESPÉCIMEN 2	
	ME (Mpa)	RP	ME (Mpa)	RP
Ciclo 1	6289.421	0.173	6413.320	0.355
Ciclo 2	6122.278	0.186	6231.388	0.360
Ciclo 3	-	-	-	-
Promedio	6205.849	0.180	6322.354	0.357

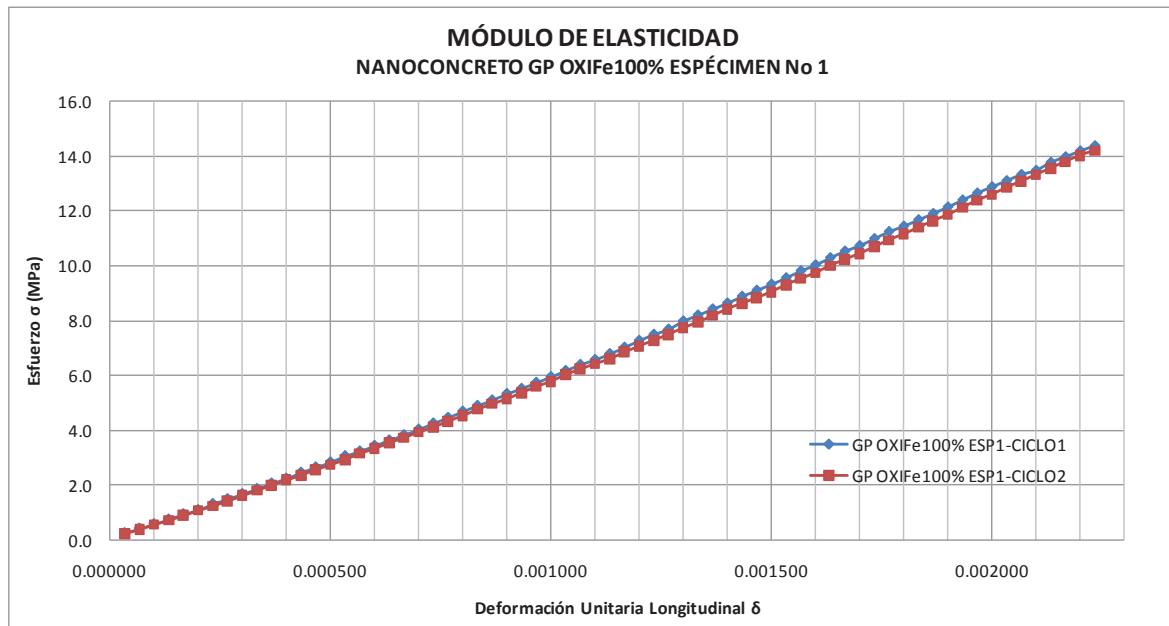


Figura 5.119 a.

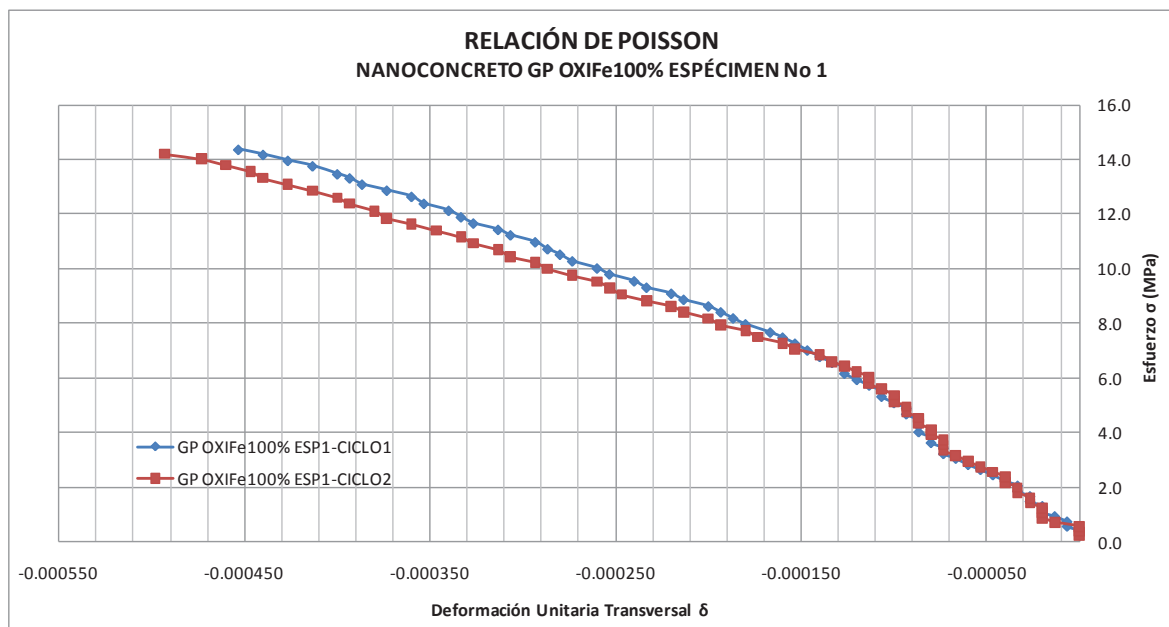


Figura 5.119 b.

Figura 5.119 a y b. Gráficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

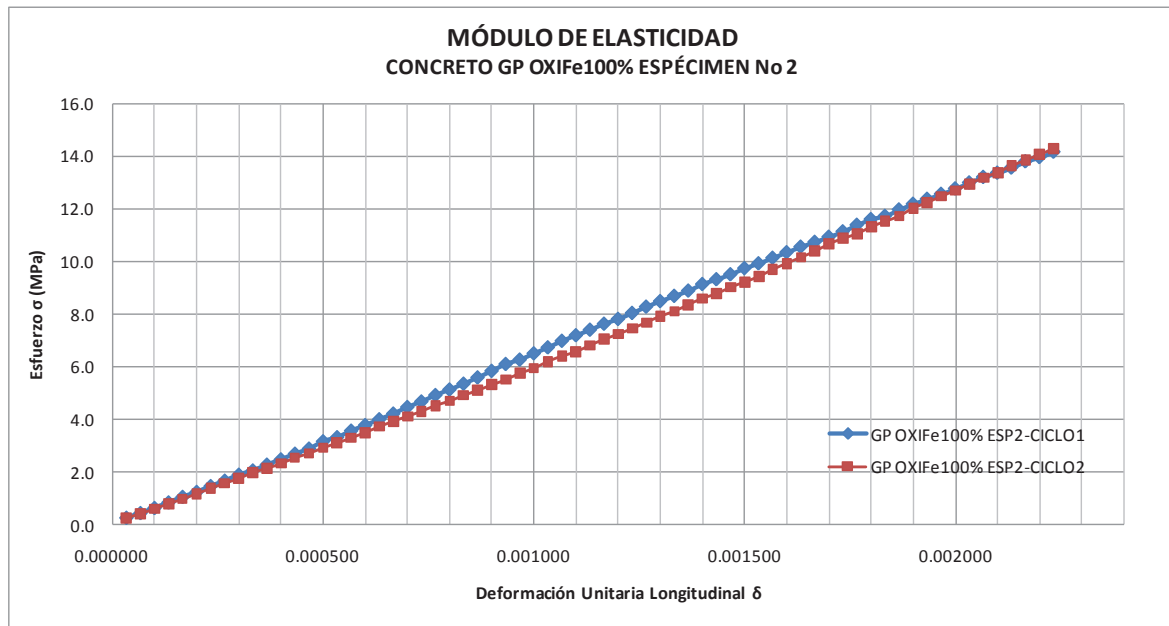


Figura 5.120 b.

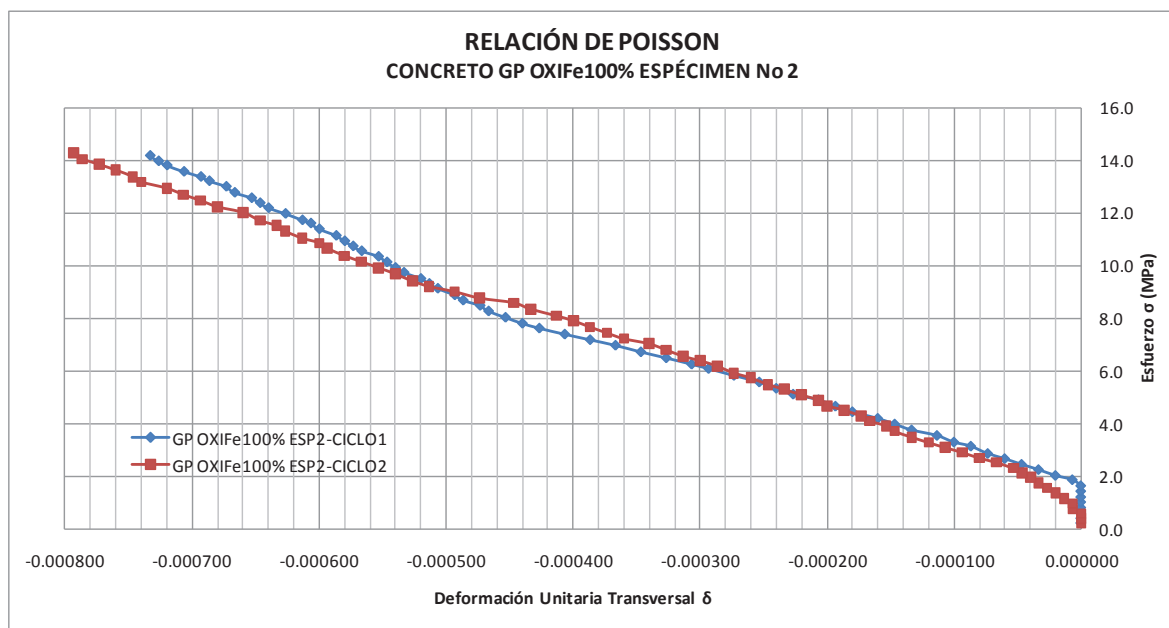


Figura 5.120 a.

Figura 5.120 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 2 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH.

f) **Módulos de Elasticidad en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH**



Fotografía 5.88 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

Tabla 5.34. Resumen: ME y Relación de Poisson en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

RESUMEN DE RESULTADOS				
	ESPÉCIMEN 1		ESPÉCIMEN 2	
	ME (Mpa)	RP	ME (Mpa)	RP
Ciclo 1	4943.338	0.349	4479.515	0.312
Ciclo 2	4750.254	0.271	4433.372	0.350
Ciclo 3	-	-	-	-
Promedio	4846.796	0.310	4456.443	0.331

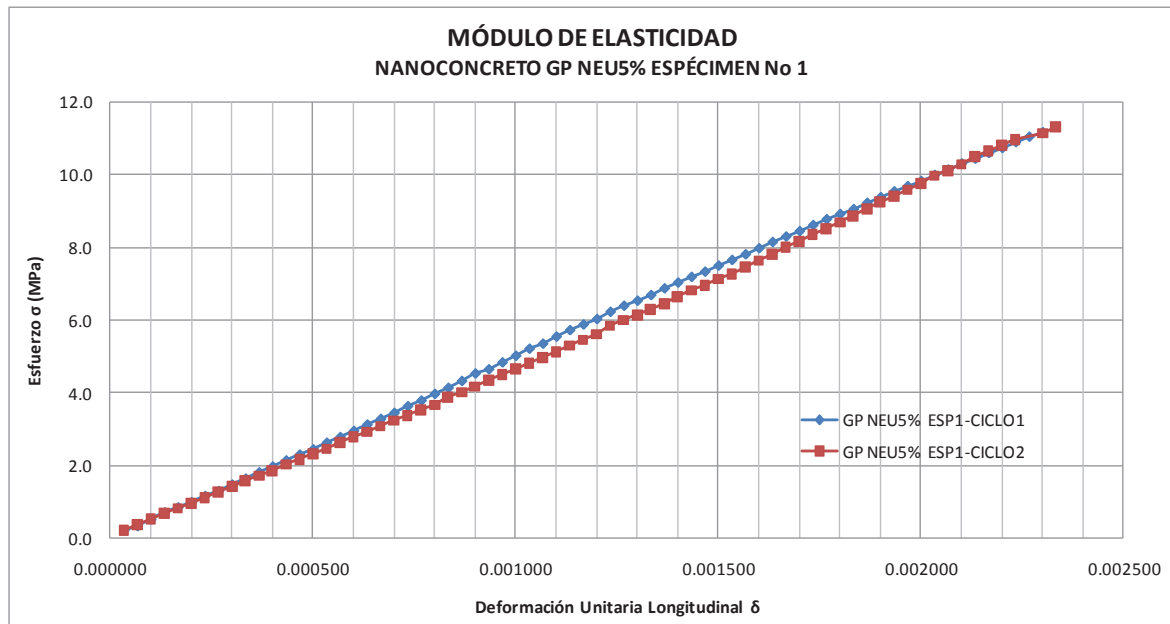


Figura 5.121 a.

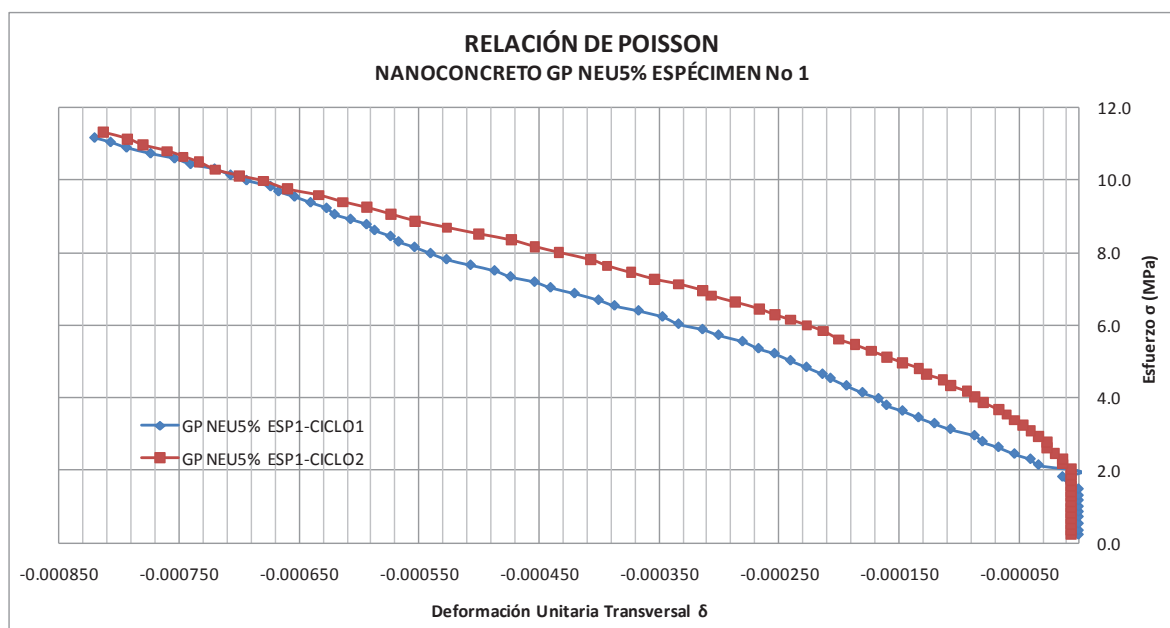


Figura 5.121 a.

Figura 5.121 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

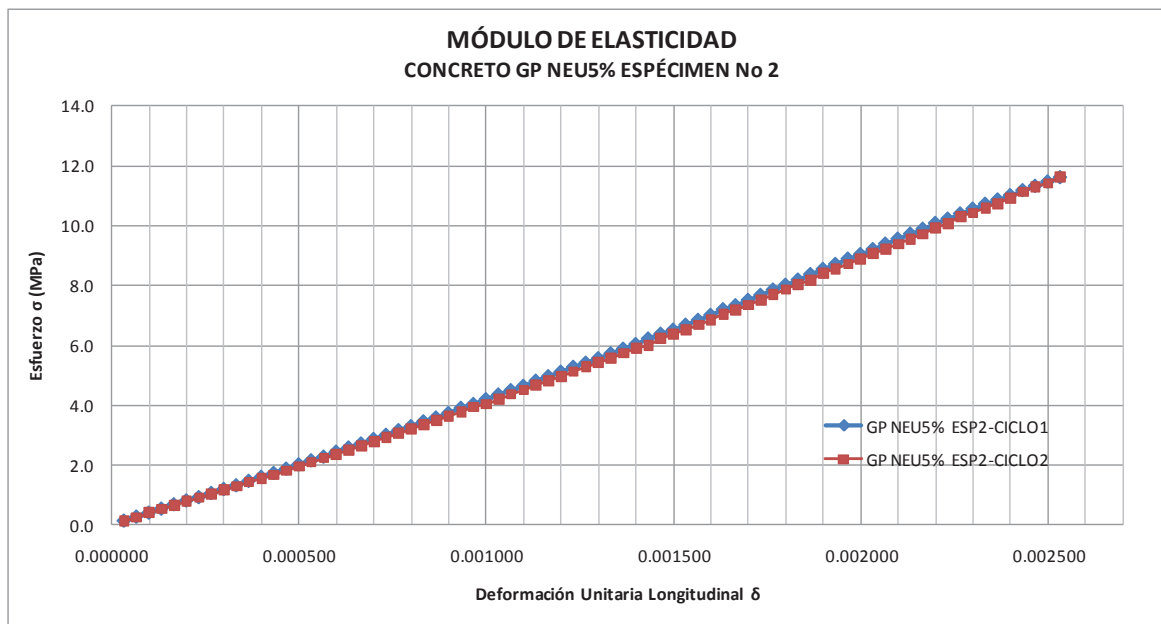


Figura 5.122 a.

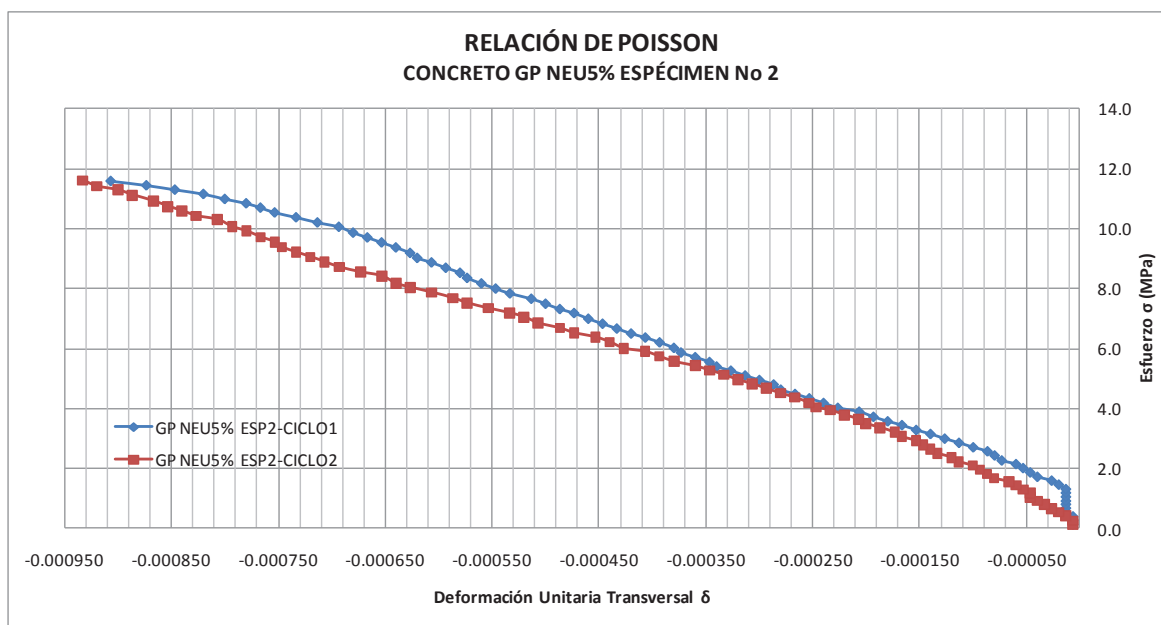


Figura 5.122 b.

Figura 5.122 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 2 ultra-thin Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH.

g) **Módulos de Elasticidad en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH**



Fotografía 5.89 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP –33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

Tabla 5.35. Resumen: ME y Relación de Poisson en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP –33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

	RESUMEN DE RESULTADOS					
	ESPÉCIMEN 1		ESPÉCIMEN 2		ESPÉCIMEN 3	
	ME (Mpa)	RP	ME (Mpa)	RP	ME (Mpa)	RP
Ciclo 1	5242.197	0.319	5255.521	0.400	5428.918	0.362
Ciclo 2	4962.503	0.411	4705.050	0.506	5347.717	0.301
Ciclo 3	4863.076	0.456	--	--	--	--
Promedio	5022.592	0.396	4980.285	0.453	5388.317	0.331

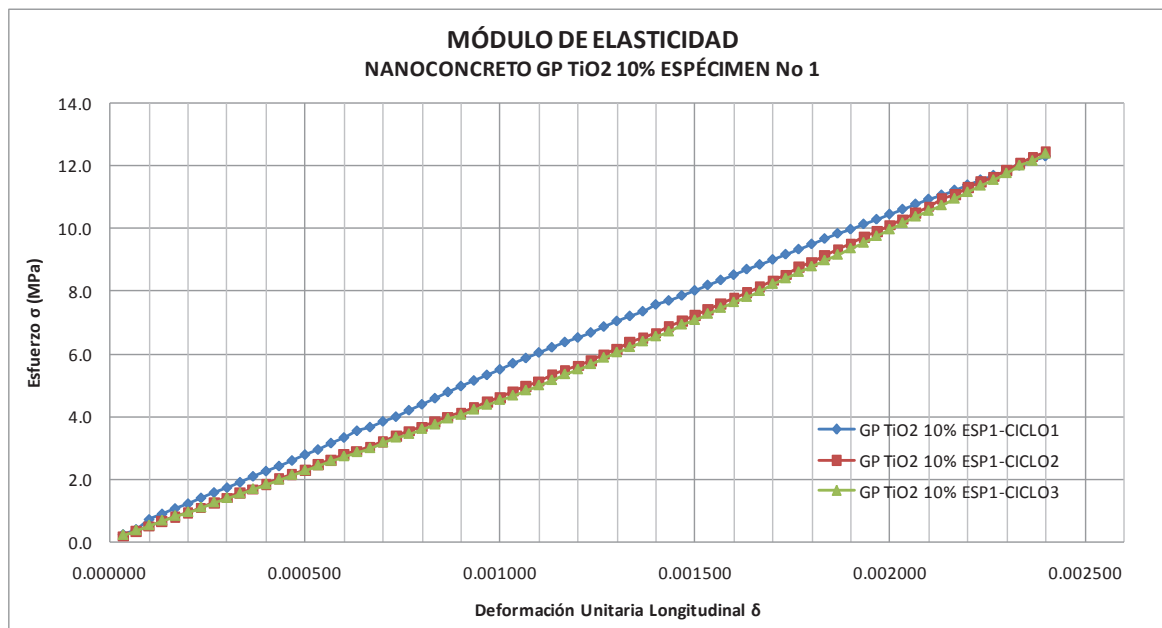


Figura 5.123 a.

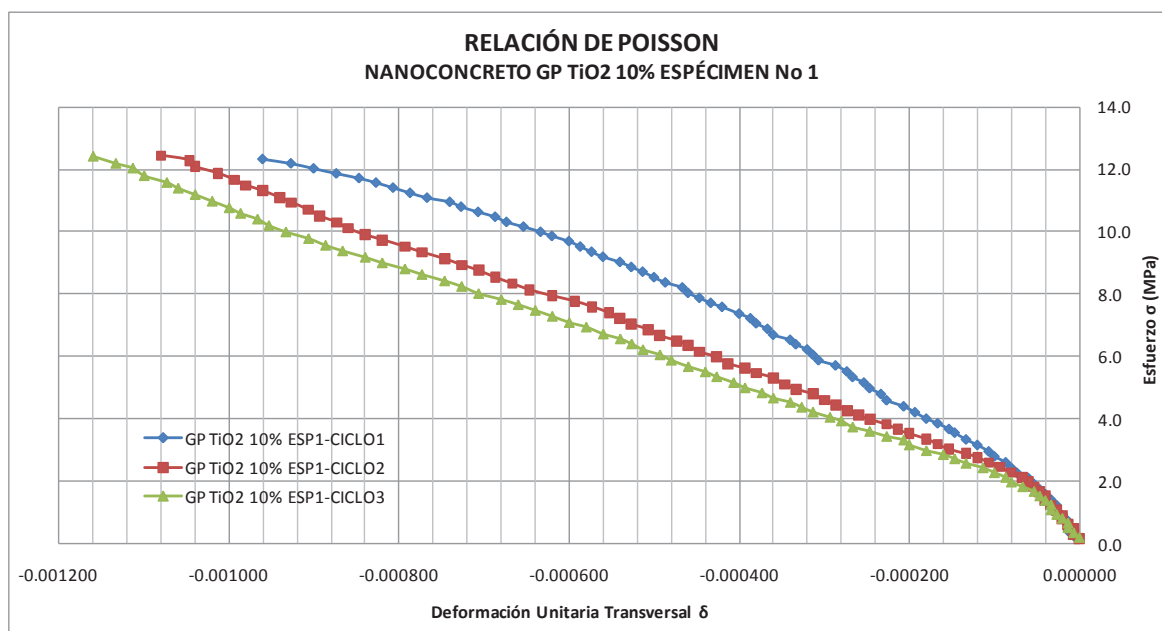


Figura 5.123 b.

Figura 5.123 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP –33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

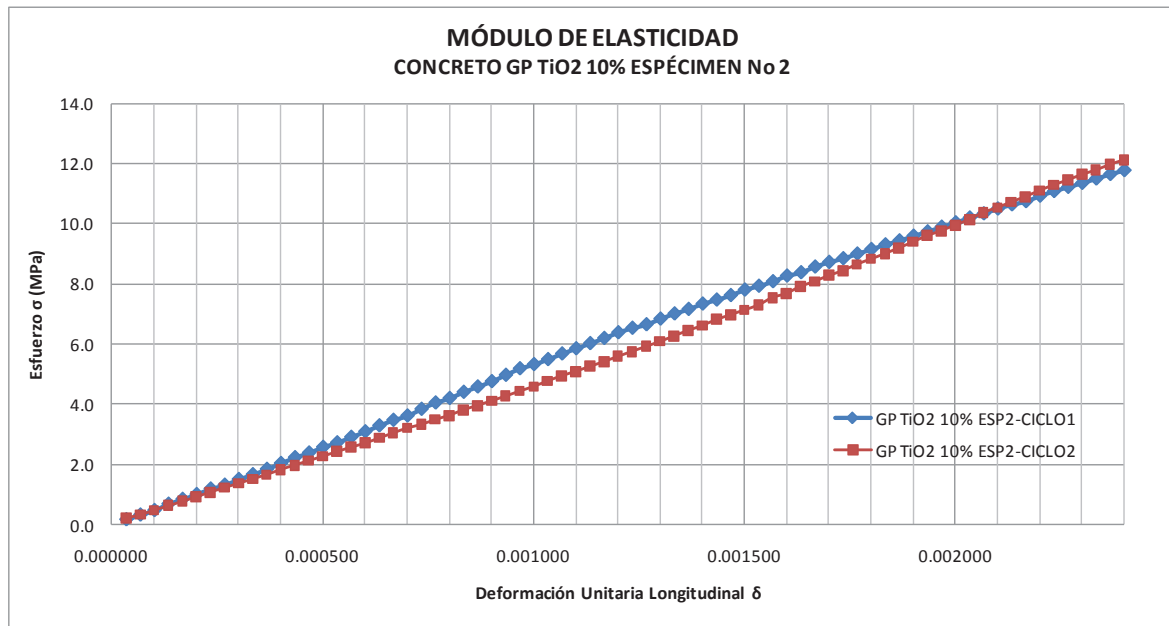


Figura 5.124 a.

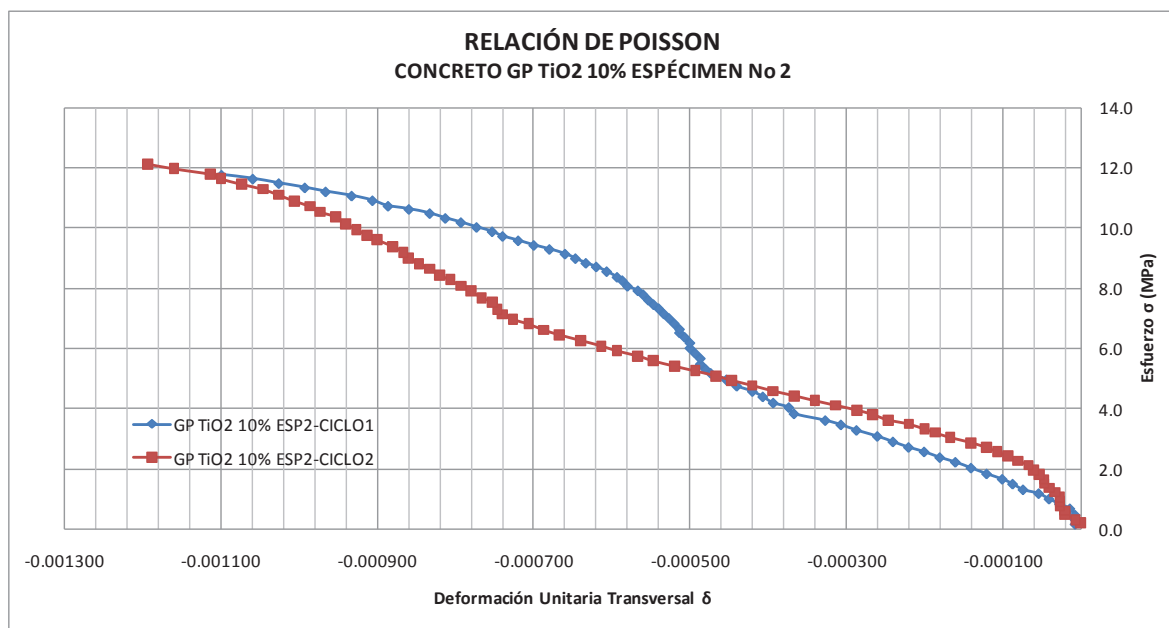


Figura 5.124 b.

Figura 5.124 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 2 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP –33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

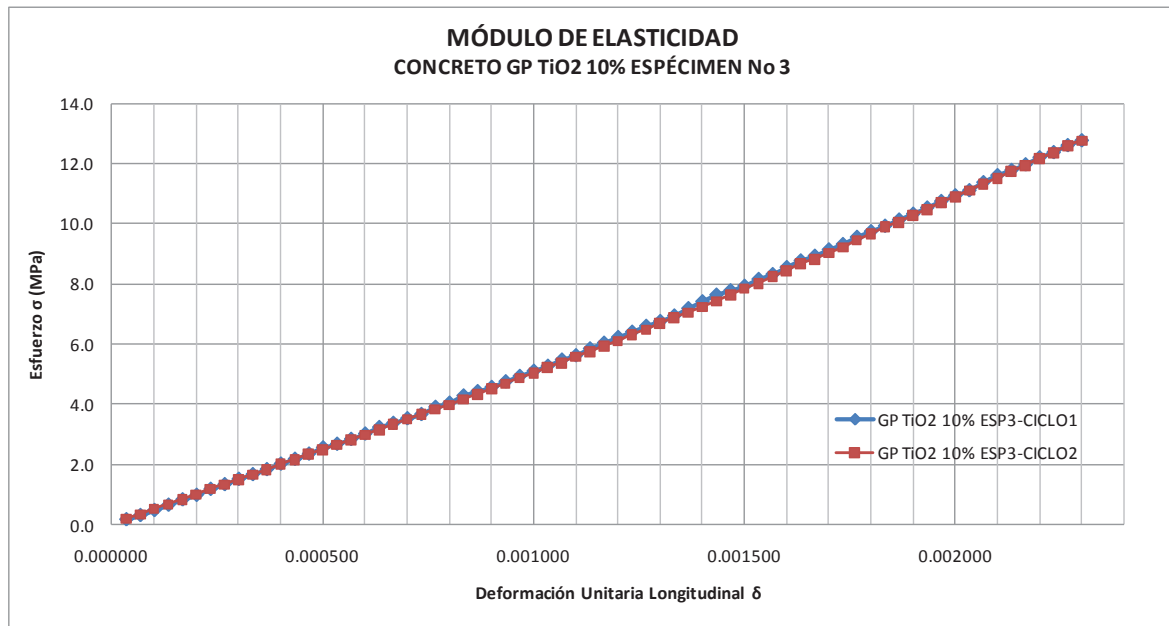


Figura 5.125 a.

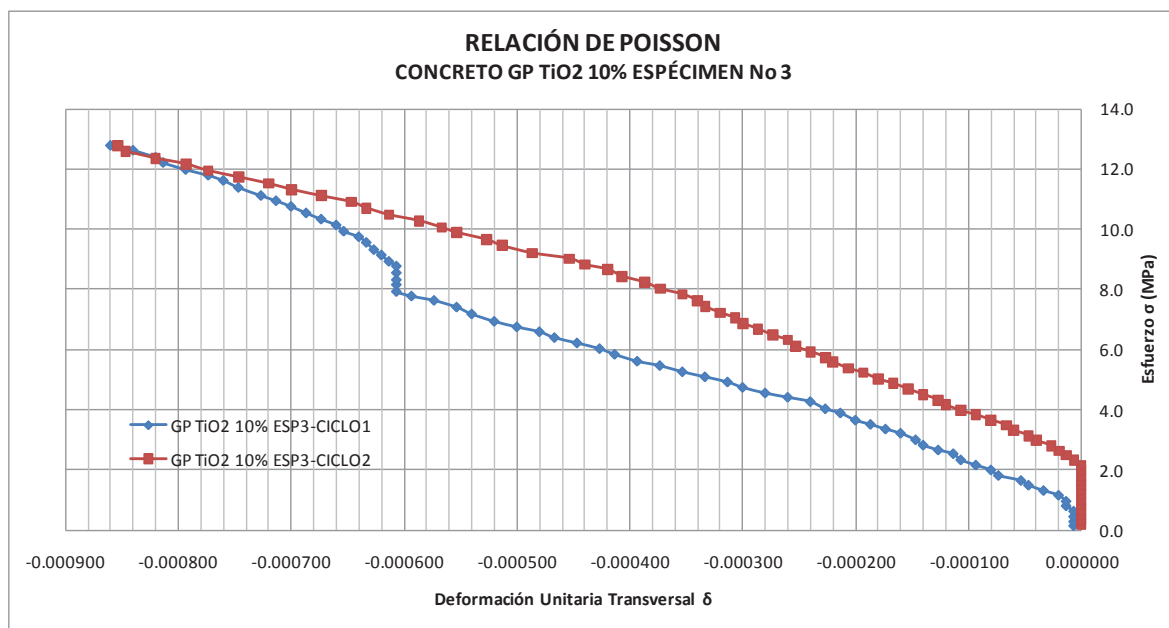


Figura 5.125 b.

Figura 5.125 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 3 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP –33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO₂, CH.

h) Módulos de Elasticidad en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP – 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH



Fotografía 5.90 a, b y c. Preparación y medidas de las deformaciones en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP –33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

Tabla 5.36. Resumen: ME y Relación de Poisson en Especímenes ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP –33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO₂, CH.

RESUMEN DE RESULTADOS		
ESPÉCIMEN 1		
	ME (Mpa)	RP
Ciclo 1	5260.483	0.280
Ciclo 2	4848.710	0.320
Ciclo 3	4735.781	0.372
Promedio	4948.325	0.324

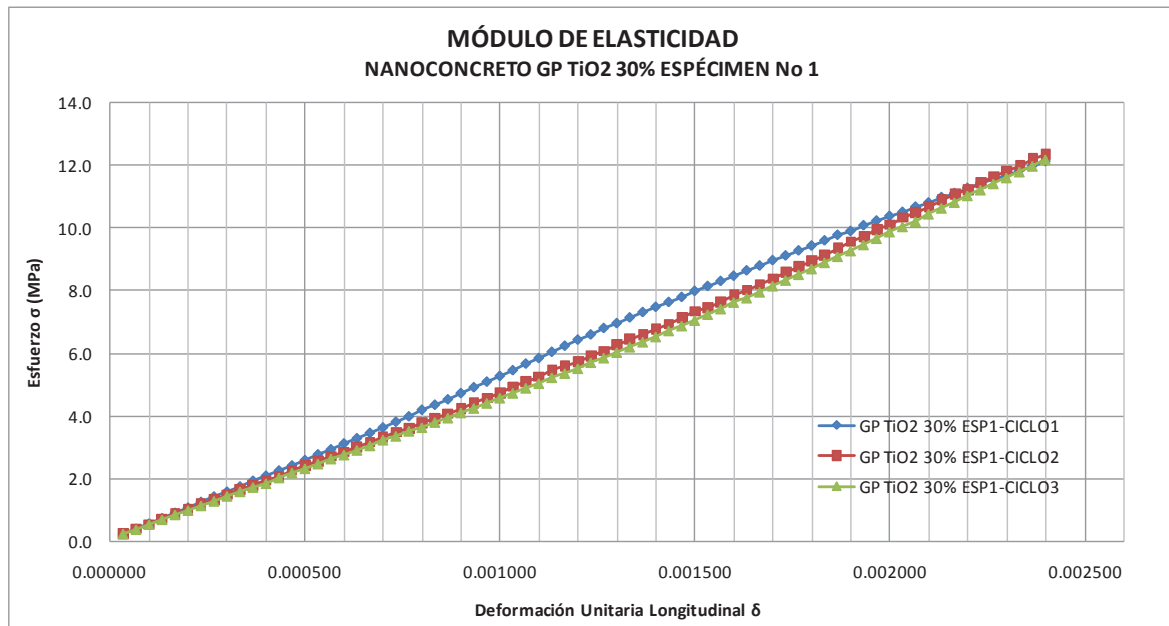


Figura 5.126 a.

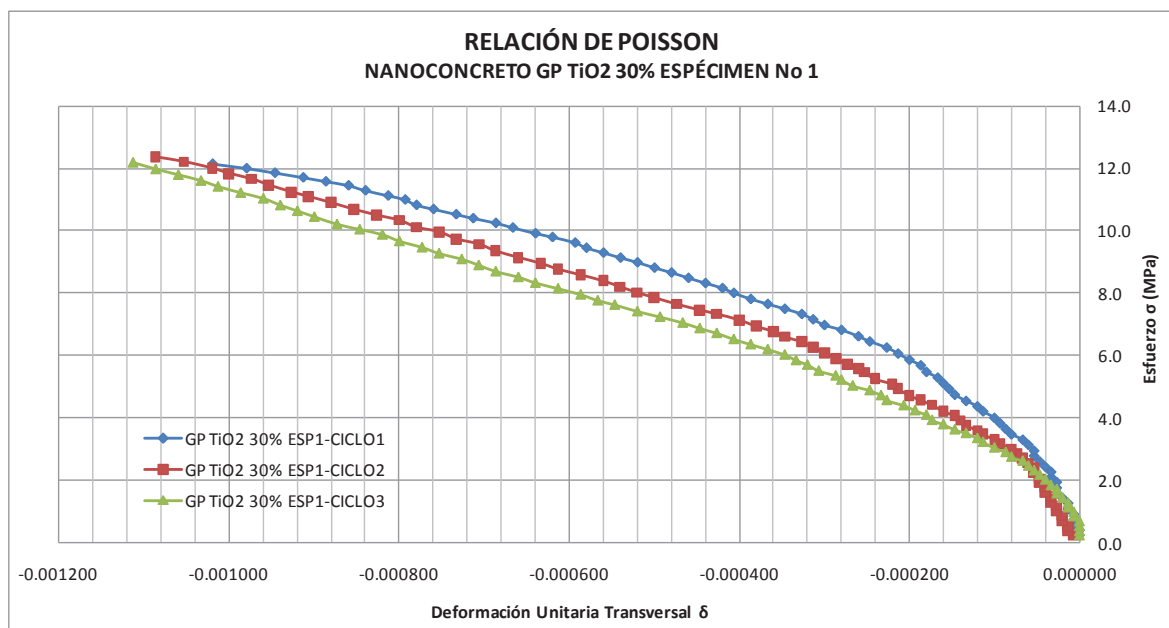


Figura 5.126 a.

Figura 5.126 a y b. Graficas: Módulos de Elasticidad y Relación de Poisson en espécimen No 1 ultra-thin de Concreto CPC y Nanoconcreto GP –33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO2, CH.

❖ **Resumen de resultados: ME, RP y Resistencia a la compresión.**

Tabla 5.37. Resumen: ME, RP y Resistencia a la Compresión: Diferentes Mezclas.

Espécimen	Resistencia a la Compresión Mpa	Módulo de Elasticidad Mpa	Relación de Poisson
Concreto con CPC	33.82	18619.42	0.411
Nanoconcreto GP - 50%MAR TI, 50%GR2-3, CH	22.786	6512.68	0.377
Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%WOLLAS, CH	25.277	5407.96	0.292
Nanoconcreto GP - 25%MAR TI, 25%GR2-3, 50%OXIFe, CH	28.557	6216.16	0.335
Nanoconcreto GP - 25%MAR TI, 25%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA, CH	26.24	6264.1	0.268
Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 5%NEU#80, CH	20.45	4651.61	0.32
Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 10%TiO2, CH	21.351	5130.39	0.393
Nanoconcreto GP - 33%MAR TI, 33%GR2-3, 30%TiO2, CH	20.028	4948.325	0.324

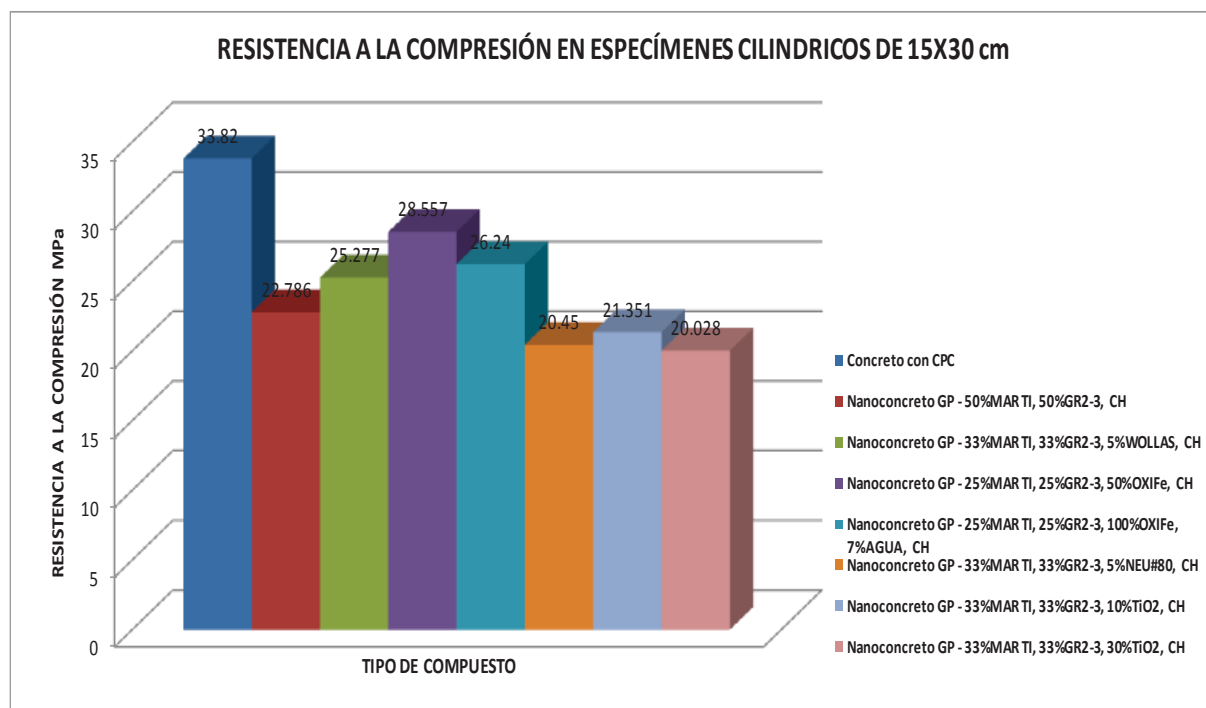


Figura 5.127. Resistencia a la Compresión en Especímenes Cilíndricos de las diferentes mezclas trabajadas.

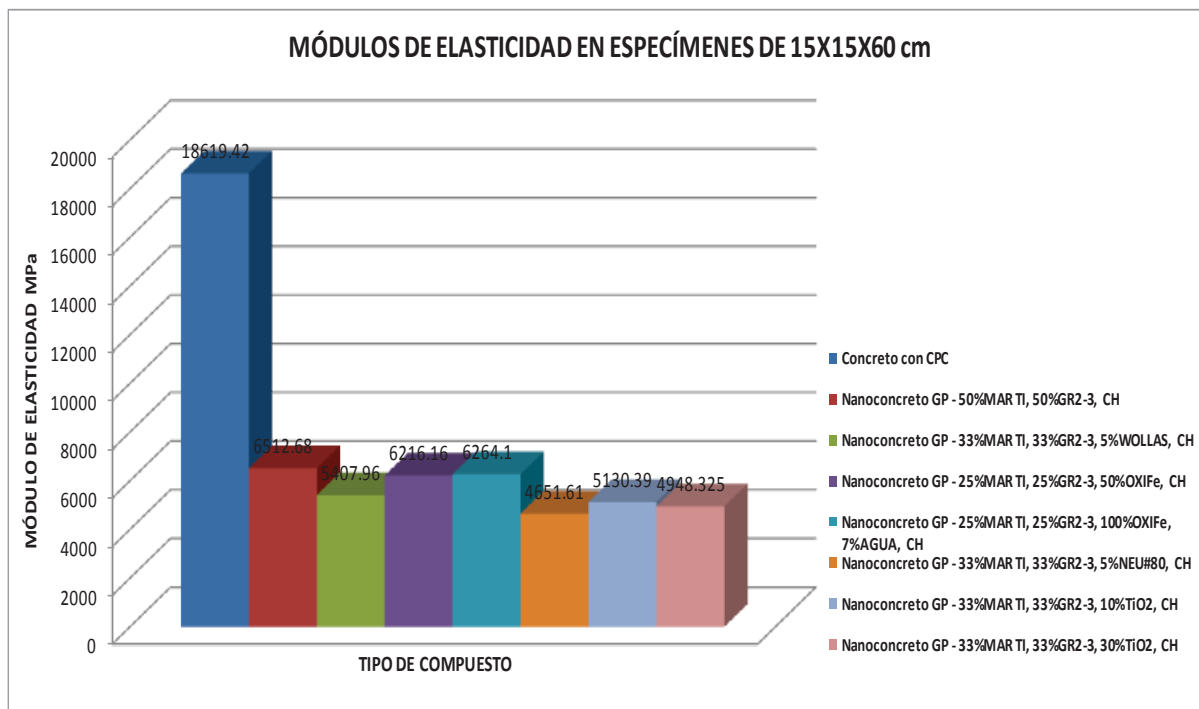


Figura 5.128. Módulos de Elasticidad de las diferentes mezclas trabajadas.

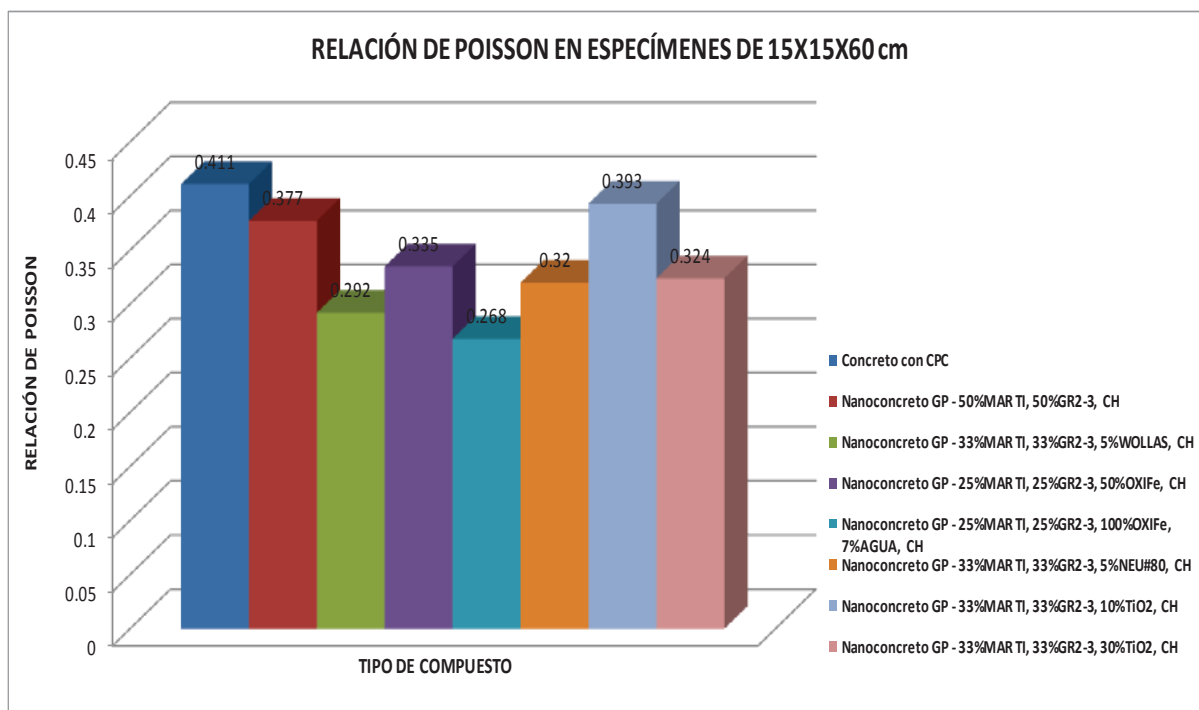


Figura 5.129. Relación de Poisson de las diferentes mezclas trabajadas.

6 DISEÑO DE PISO INDUSTRIAL GEOPOLIMÉRICO MULTIFUNCIONAL (INNOVACIÓN TECNOLÓGICA: PRODUCTO SÓLIDO MODELOS DE MICROCARPETAS)

Los resultados anteriores dieron una pauta para afrontar este capítulo, donde se abordará la utilización de estos materiales para pisos industriales. Para la simulación del comportamiento de este material, comportamiento principalmente a escala mayor y ante el intemperismo ambiental, se procedió a desarrollar placas del tamaño de 60x60x1.5 cm, de igual forma que el procedimiento mostrado en el capítulo anterior.

Se eligieron solamente cuatro tipos de materiales, por el motivo de comportamiento-funcionalidad. Estas mezclas son las siguientes:

1. Material Nanogeopolimérico Estándar.
2. Material Nanogeopolimérico Magnético.
3. Material Nanogeopolimérico Reflectivo.
4. Material Nanogeopolimérico Ecológico.

Tabla 6.1. Lista de materiales y composición sin Fibras: Fase Innovación Técnica.

Material Nanogeopolimérico	Composición
ESTÁNDAR	Nanocemento Base + Material Pétreo e Hiper Nanoconcreto GP – 75%MAR TI, 37.5%GR2-3
MAGNÉTICO	Nanocemento Base + Material Pétreo e Hiper Nanoconcreto GP – 60%MAR TI, 20%GR2-3, 100%OXIFe, 7%AGUA
REFLECTIVO	Nanocemento Base + Material Pétreo e Hiper Nanoconcreto GP – 60%MAR TI, 20%GR2-3, 10%TiO2
ECOLÓGICO	Nanocemento Base + Material Pétreo e Hiper Nanoconcreto GP – 75%MAR TI, 0.375%GR2-3, 2.5%NEU#80

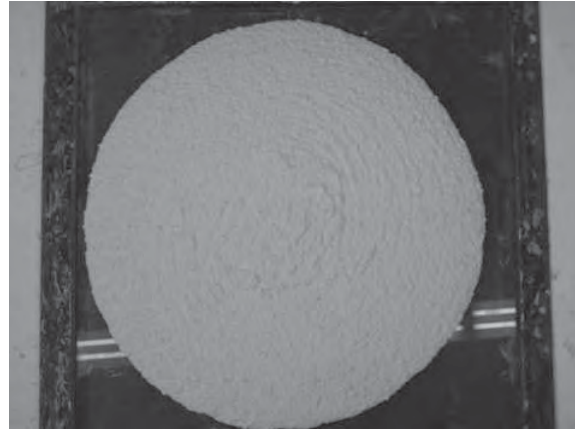
A continuación se presenta el proceso de elaboración de las placas de dos de los materiales objeto de este estudio:

 PROCESO DE ELABORACIÓN.

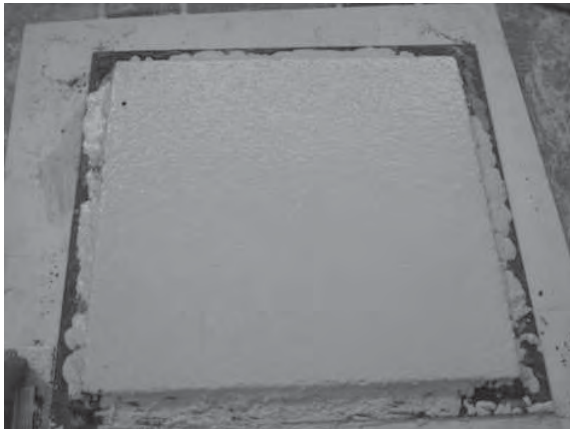
a) *Material Nanogeopolimérico Estándar.*



Fotografías 6.1 a.



Fotografías 6.1 b.



Fotografía 6.1 c.



Fotografías 6.1 d.

Fotografías 6.1 a, b c y d. Elaboración y colado del material Nanogeopolimérico Estándar.

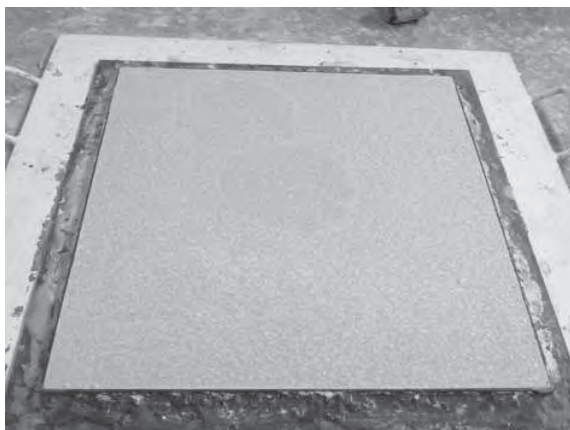
b) Material Nanogeopolimérico Ecológico.



Fotografía 6.2 a.



Fotografía 6.2 a.



Fotografía 6.2 a.



Fotografía 6.2 a.

Fotografías 6.2 a, b c y d. Elaboración y colado del material Nanogeopolimérico Ecológico.

Las placas elaboradas con los diferentes materiales presentaron varios problemas de proceso, tales como pandeo y agrietamientos, las cuales se procedió a mejorarlas en primer lugar aumentando el contenido de finos, quitando de su composición la granulometría gruesa (grano dos y grano 3); y en segundo lugar agregando fibras de acero. Tales composiciones de los materiales para esta parte se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 6.2. Lista de materiales y composición con Fibras: Fase Innovación Técnica.

Material Nanogeopolimérico	Composición
ESTÁNDAR	Nanocemento Base + Material Pétreo e Hiper Nanoconcreto GP – 150%MAR TI, 10%Fibra de Acero
MAGNÉTICO	Nanocemento Base + Material Pétreo e Hiper Nanoconcreto GP – 100%MAR TI, 100%OXIFe, 7%AGUA, 10%Fibra de Acero
REFLECTIVO	Nanocemento Base + Material Pétreo e Hiper Nanoconcreto GP – 120%MAR TI, 10%TiO ₂ , 10%Fibra de Acero
ECOLÓGICO	Nanocemento Base + Material Pétreo e Hiper Nanoconcreto GP – 75%MAR TI, 2.5%NEU#80, 10%Fibra de Acero

PROCESO DE ELABORACIÓN.

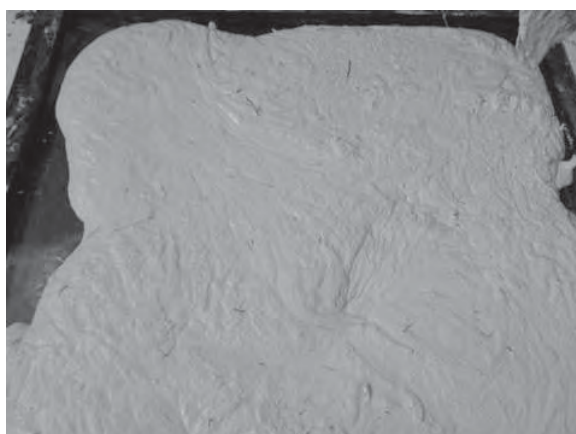
a) Material Nanogeopolimérico Estándar.



Fotografía 6.3 a.



Fotografía 6.3 b.



Fotografía 6.3 c.



Fotografía 6.3 d.

Fotografías 6.3 a, b c y d. Elaboración y colado del material Nanogeopolimérico Estándar.

b) Material Nanogeopolimérico Reflectivo.



Fotografía 6.4 a.



Fotografía 6.4 b.



Fotografía 6.4 c.



Fotografía 6.4 d.

Fotografías 6.4 a, b c y d. Elaboración y colado del material Nanogeopolimérico Reflectivo.

c) Material Nanogeopolimérico Magnético.



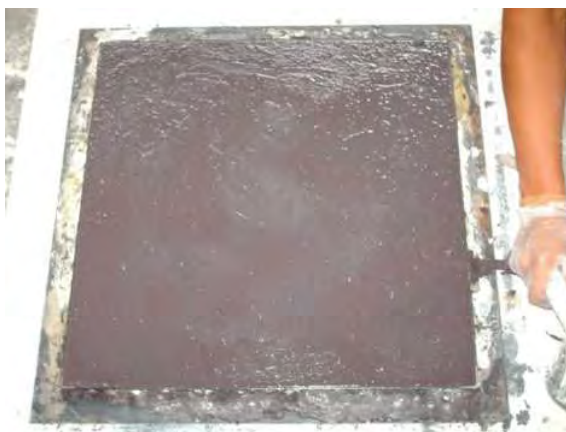
Fotografías 6.5 a.



Fotografías 6.5 b.



Fotografías 6.5 c.



Fotografías 6.5 d.

Fotografías 6.5 a, b c y d. Elaboración y colado del material Nanogeopolimérico Magnético.

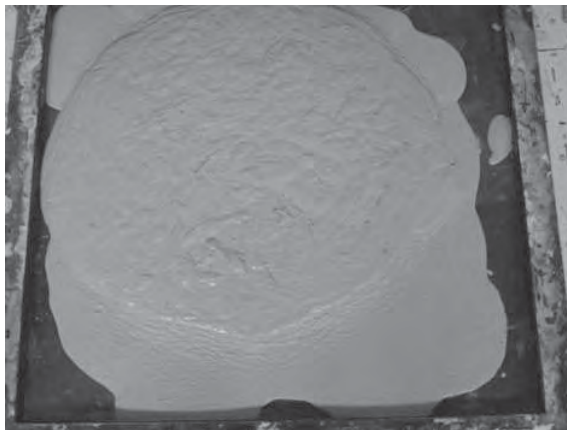
d) Material Nanogeopolimérico Ecológico.



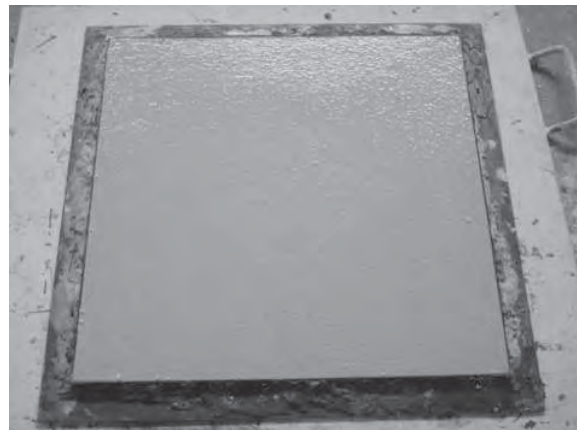
Fotografías 6.6 a.



Fotografías 6.6 b



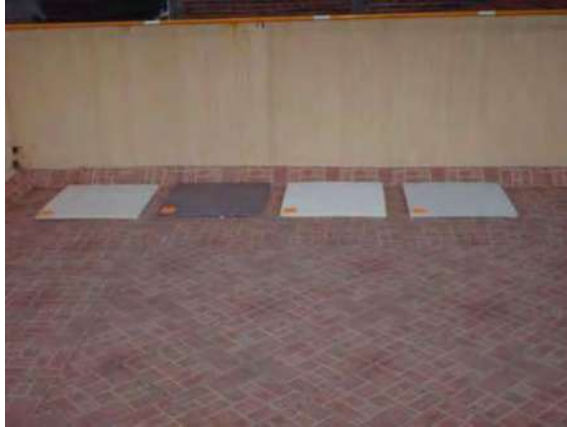
Fotografías 6.6 c.



Fotografías 6.6 d.

Fotografías 6.6 a, b c y d. Elaboración y colado del material Nanogeopolimérico Ecológico.

Las placas se sometieron a intemperismo ambiental, como se menciona anteriormente, por alrededor de 3 meses, no mostrando nuevos problemas patológicos y tampoco agravándose los ya tenidos. A continuación se presenta una memoria fotográfica para cada tipo de material antes y después del someterlos al intemperismo.



Fotografías 6.7 a.



Fotografías 6.7 b.



Fotografías 6.7 c.



Fotografías 6.7 d.

Fotografías 6.7 a, b c y d. Colocación de los materiales a intemperismo ambiental.

🚧 **NANOCONCRETOS GEOPOLIMERICOS ANTES DEL INTEMPERISMO AMBIENTAL**

a) **Material Nanogeopolimérico Estándar.**

➤ **Sin fibra**



Fotografías 6.8 a y b respectivamente. Placa de Material Geopolimérico Estándar Sin Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

➤ **Con fibra**



Fotografías 6.9 a y b respectivamente. Placa de Material Geopolimérico Estándar Con Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

b) Material Nanogeopolimérico Magnético.

➤ *Sin fibra*



Fotografías 6.10 a y b respectivamente. Placa de Material Geopolimérico Magnético Sin Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

➤ *Con fibra*



Fotografías 6.11 a y b respectivamente. Placa de Material Geopolimérico Magnético Con Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

c) **Material Nanogeopolimérico Reflectivo.**

➤ **Sin Fibra**



Fotografías 6.12 a y b respectivamente. Placa de Material Geopolimérico Reflectivo Sin Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

➤ **Con Fibra**



Fotografías 6.13 a y b respectivamente. Placa de Material Geopolimérico Reflectivo Con Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

d) Material Nanogeopolimérico Ecológico.

✓ **Sin Fibra**



Fotografías 6.14 a y b respectivamente. Placa de Material Geopolimérico Ecológico Sin Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

✓ **Con Fibra**



Fotografías 6.15 a y b respectivamente. Placa de Material Geopolimérico Ecológico Sin Fibra antes de Intemperismo Ambiental.

🚧 **NANOCONCRETOS GEOPOLIMERICOS DESPUÉS DEL INTEMPERISMO AMBIENTAL**



Fotografías 6.16 a, b c y d. Materiales después de 3 meses sometidos a intemperismo ambiental.

a) Material Nanogeopolimérico Estándar.

➤ **Sin Fibra**



➤ **Con Fibra**



Fotografías 6.17 a y b respectivamente. Placa de Material Geopolimérico Estándar Con y Sin Fibra después de Intemperismo Ambiental.

b) Material Nanogeopolimérico Magnético.

➤ **Sin Fibra**



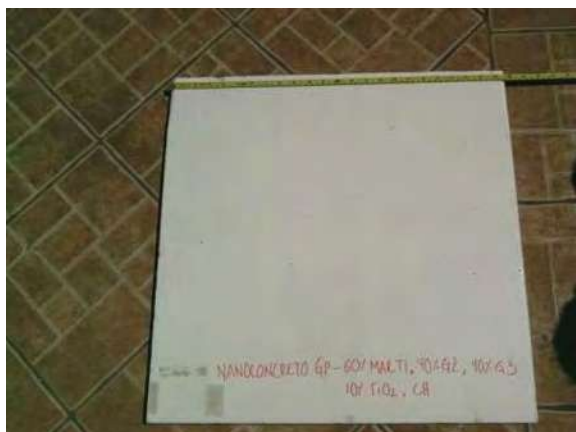
➤ **Con Fibra**



Fotografías 6.18 a y b respectivamente. Placa de Material Geopolimérico Magnético Con y Sin Fibra después de Intemperismo Ambiental.

c) Material Nanogeopolimérico Reflectivo.

➤ **Sin Fibra**



➤ **Con Fibra**



Fotografías 6.19 a y b respectivamente. Placa de Material Geopolimérico Reflectivo Con y Sin Fibra después de Intemperismo Ambiental.

b) Material Nanogeopolimérico Ecológico.

➤ **Sin Fibra**



➤ **Con Fibra**



Fotografías 6.20 a y b respectivamente. Placa de Material Geopolimérico Ecológico Con y Sin Fibra después de Intemperismo Ambiental.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. A través de este trabajo de investigación sobre nanocementos geopoliméricos multifuncionales (Etapa Cero) se pudo observar que fue posible realizar la síntesis de nanocementos y aplicarlos de manera exitosa en el desarrollo de microcarpetas multifuncionales.
2. A partir de su caracterización nanoestructural se pudo observar la formación de nanocristales dentro de su matriz amorfa, así como observar a través de AFM su densidad atómica para una composición. Queda pendiente para la etapa uno realizar con mayor profundidad la caracterización de TEM y AFM.
3. Con la caracterización microestructural por medio de SEM se pudo observar la densidad de la matriz así como las fases formadas en ella. Se requiere continuar con la caracterización por SEM de más composiciones.
4. Realizando la caracterización óptica se pudo observar la eficiencia de estos nanomateriales, sus limitantes y alcances. Se recomienda continuar con más estudios que permitan analizar el comportamiento óptico de los nanocementos y sus materiales funcionales para lograr una mayor optimización en la relación costo-beneficio.
5. Mediante estudios de FTIR fue posible analizar la influencia de los policarboxilatos dentro de los nanocementos, sin embargo se requiere la identificación completa de todos y cada uno de los picos obtenidos para tener una mayor precisión del tipo de enlace químico presente dentro de los nanocementos.
6. La espectroscopia de impedancia IES nos permitió conocer el comportamiento eléctrico de las diferentes composiciones desarrolladas, observando que se obtienen resistividades diferentes. Sin embargo debido a la profundidad del estudio se requiere continuar en la etapa uno una caracterización eléctrica con mayor profundidad, realizando una mayor interpretación de IES, obtener la resistencia de polarización (R_p) de los nanocementos geopoliméricos y realizar celdas electroquímicas para evaluar la velocidad de corrosión de los aceros embebidos en este tipo de nanomateriales.
7. Los análisis de DRX ratificaron la estructura amorfa de los nanocementos e identificaron claramente las fases cristalinas presentes en cada composición. Se recomienda continuar en la etapa uno con más análisis cuantitativos de cada una de las fases utilizando el método de Rietveld.

8. A través de los análisis macroestructurales: esfuerzo a compresión simple, módulo de ruptura, módulo de elasticidad, relaciones de Poisson, indentaciones, densidad, absorción fue posible correlacionar sus propiedades físicas y mecánicas con su nano y micro estructura y tener una mejor aproximación del comportamiento del nanomaterial desarrollado y proyectar su durabilidad en función de las síntesis, composición, propiedades y desempeño.
9. Utilizando evaluaciones térmicas (Dilatometrias) se pudo observar el comportamiento de las diferentes composiciones de nanocementos desde temperaturas ambientes hasta 600°C apreciando la estabilidad de los nanomateriales en condiciones de servicio-ambiente y detectando las temperaturas críticas de desintegración o inestabilidad de las matrices.
10. Adicionalmente con los resultados obtenidos se obtuvo un producto sólido (Innovación Tecnológica) que permite generar tecnología con valor. Es importante mencionar que en esta etapa queda como modelo de laboratorio y que se requiere continuar con las investigaciones en diferentes etapas para lograr su viabilidad y aplicación comercial.
11. El presente trabajo de investigación es pionero en el área de nanomateriales para la construcción y nanocementos en México. Para su realización se requirió de la participación de diferentes instituciones públicas y privadas que permitieran lograr los avances aquí presentados. Es importante mencionar que se requirió la participación de diferentes especialistas en el área y una inversión de tiempo de dos años y medio para lograr establecer los parámetros iniciales en la investigación de nanotecnología para la construcción de la siguiente década.
12. Con los resultados obtenidos se están estructurando dos artículos para revistas internacionales indizadas (calidad CONACYT), así como conferencias internacionales y nacionales y artículos de divulgación científica.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Erich Rodríguez*, Ruby Mejía de Gutiérrez, Susan Bernal, Marisol Gordillo, (2009). *“Efecto de los módulos SiO₂/Al₂O₃ y Na₂O/SiO₂ en las propiedades de sistemas geopoliméricos basados en un metacaolín.*
- [2] <http://es.wikipedia.org/wiki/Ciencia>
- [3] <http://es.wikipedia.org/wiki/Investigaci%C3%B3n>
- [4] <http://es.wikipedia.org/wiki/Tecnolog%C3%ADa>
- [5] <http://es.wikipedia.org/wiki/Idea%C3%ADa>
- [6] <http://www.mtycic.com.mx/?p=innovacion>
- [7] <http://es.wikipedia.org/wiki/Desarrollo%C3%ADa>
- [8] Wilmer Córdova Ames, (Noviembre 2008). *“TRIZ, la herramienta del pensamiento e innovacion sistemática”.*
- [9] <http://www.nebrija.com/innovacion/informacion/quees.htm>
- [10] <http://www.mtycic.com.mx/?p=triz>
- [11] Ciro Villegas Chamorro
“Metodología TRIZ para la Innovacion Tecnologica e Inventiva”
- [12] <http://www.aiteco.com/qfd.htm>
- [13] <http://www.aiteco.com/qfdfases.htm>
- [14] Viñas Tubau, David; Tresserras Picas, Josep; Gonzalez Santamaria, Paula
“QFD: Competitividad e Innovacion cara al Mercado”.
- [15] Ralf Rummelsberg
Asociacion Latinoamericana de AGD *“La Jornada hacia la Innovacion”.*
- [16] Enrique Yacuzzi (Universidad del CEMA), Fernando Martín (Aventis Pharma)
“QFD: Comceptos, Aplicaciones y Nuevos Desarrollos”.
- [17] <http://www.unizar.es/aeipro/finder/PREVENCION%20Y%20SEGURIDAD/EB03.htm>
- [18] Marta González Con, Francisco Aguayo González, Juan Ramón Lama y José Ramon Perez Gutiérrez.
Ingenieria Kansei para un diseño de productos centrado en los usuarios.

- [19] http://www.webandmacros.com/Investigacion_desarrollo_innovacion.htm
- [20] http://www.munilabaya.gob.pe/~transparencia/archivos/que_es_el_foda.pf
- [21] <http://www.gestiopolis.com/canales7/ger/tecnologia-del-conocimiento-investigacion-desarrollo-e-innovacion.htm>
- [22] Emmanuel Alejandro Martínez Hernández (2008).
“Corrosion en Estructuras de Concreto Reforzado con Acero”.
- [23] Rebeca Paz Aguilar Mundaca, Valdivia-Chile
“Determinacion de la Influencia de las Nanomoleculas de Silice en el concreto frente a un factor que afecta su durabilidad”
- [24] Código de diseño de concreto ACI
- [25] RAMÍREZ CRUZ, Elmer, (1994).
“Tesis Doctoral “Corrosión de las Armaduras Embebidas en Concreto en Ambientes de Extrema Agresividad: Posibilidades de Protección Mediante Inhibidores”.
Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas.
<http://webs.demasiado.com/forjados/patología/corrosión.htm>
- [26] MARIA JOSE SANCHEZ DE ROJAS NOGUERA. (2004).
“Tesis de Doctorado “Extracción Electroquímica de Cloruros del Hormigón Armado: Estudio de Diferentes Variables que Influyen en la Eficiencia del Tratamiento”.
Departamento de la Ingeniería de la Construcción de la Escuela Politécnica Superior de Alicante.
<http://www.cervantesvirtual.com/FichaObra.html?Ref=13870&ext=pdf&portal=0>
<http://descargas.cervantesvirtual.com/servlet/SirveObras/04702848688026806532268/013870.pdf>
- [27] James A. Farny, (2007).
“Diseño y construcción de pisos en concreto”.
- [28] IMCYC, acpa.
Pavimentos de Concreto “Diseño y construcción, juntas, sobrecarpetas, apertura rápida al tráfico”.
- [29] Dirección de puentes, (Enero 2007).
“Manual de inspección de puentes”.
- [30] RODRIGUEZ, J.; AROGONCILLO, J.; ANDRADE, C.; IZQUIERDO, D.
“Manual de Evaluación de Estructuras Afectadas por Corrosión de la Armadura”.
Manual CONTECVET IN 309021
<http://webs.demasiado.com/forjados/patología/corrosión.htm>
- [31] NANOCEM
www.nanocem.net

[32] Fernando Palacio Parada
“NANOMATERIALES”

[33] http://es.wikipedia.org/wiki/Material_compuesto

[34] Z.L. Wang, Z. L. Kang
“Functional and Smart Materials”.

[35] LUZ STELLA ARIAS MAYA, LIBARDO VANEGAS USECHE (2004)
Scientia et Technica Año X, No 25, Agosto 2004. UTP. ISSN 0122-1701
“Materiales Compuestos Inteligentes”

[36] <http://es.wikipedia.org/wiki/Geopol%C3%ADmero>

[37] Joseph Davidovits,
Geopolymer 2002 Conference, October 28-29, 2002, Melbourne, Australia,
“30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and
Potential Breakthroughs”.

[38] José Carretero Gonzaga (2008)
“EPOXIDACIÓN REGIOSELECTIVA DE DIOFELINAS TERPÉNICAS MEDIANTE
CATALIZADORES HETEROGÉNEOS”.

[39] Mònica Ardanuy Ras, (2007).
“SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE NANOCOMPUESTOS DE POLIOLEFINAS E
HIDRÓXIDOS DOBLES LAMINARES”.

[40] Marta Suárez Menéndez (2009).
“Materiales Cerámicos Policristalinos de Al₂O₃ y YAG Funcionalidad Óptica”.

[41] Manuela Alba Bueno, (2006).
“ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN CON MICROSCOPIAS DE ESCANEEO DE NANO-
MATERIALES EMPLEABLES EN NUEVAS ARQUITECTURAS PARA MEMORIAS”.

[42] Encuentro de Investigación en Ingeniería Eléctrica – Zacatecas, Marzo 2005-
“Microscopio de Fuerza Atómica – Mary Cruz Reséndiz González y Jesús Castellón-
Uribe”.

[43] Cynthia Edth Yañez Zamora
“Síntesis y caracterización de películas delgadas del sistema ZrO₂ mediante la técnica
Sol-Gel”.

[44] www.asylum.com.mx

[45] Impedancia Electroquímica (JMF, RDR, JGLL).

[46] William F. Smith

“Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales”.

[46] A.G.Guy

“Fundamentos de Ciencia de Materiales”.

[47] ASTM C 78 – 02

“Esfuerzo a Flexión en especímenes de concreto”.

[48] ASTM 469 - 02

“Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson en especímenes de concreto en Compresión”.

[49] ASTM C 39/ C39M - 03

“Esfuerzo a Compresión en especímenes cilíndricos de concreto”.

[50] C 617 - 98

“Cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto”.