



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y URBANISMO
MAESTRÍA DE ARQUITECTURA
ÁREA TECNOLÓGICA

TESIS DE MAESTRÍA

HORMIGÓN TRANSLÚCIDO CON FIBRA ÓPTICA
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Esp. Const. de Obra de Arquitectura
Arq. Adriana LUISI BUCHELLI

Montevideo, Uruguay

Setiembre, 2020



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

HORMIGÓN TRANSLÚCIDO CON FIBRA ÓPTICA

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Autor: Esp. Const. De Obra de Arquitectura Arq. Adriana LUISI BUCHELLI

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado de Maestría de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del Título de Magíster.

Tutor: Dr. Gemma Rodríguez

Montevideo, Uruguay

Setiembre, 2020

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Arq. Juan JOSÉ FONTANA

Dr. Arq. Bernardo MARTÍN

Mag. Arq. STELA SABALSAGARAY

Montevideo, Uruguay

Setiembre, 2020

Resumen

El tema de la tesis de maestría continúa el trabajo final del Diplomado en Construcción de Obras de Arquitectura, llamado *Hormigón translúcido*. El objetivo de ese trabajo fue estudiar la posibilidad de elaboración de un hormigón translúcido con materiales disponibles en el país. Los resultados obtenidos fueron muy alentadores y mostraron que, si bien la resistencia a compresión del hormigón disminuye con el empleo de fibra óptica, se puede alcanzar resistencias superiores a 48 MPa a los 28 días de edad con su empleo.

En esta tesis se aborda su estudio de forma diferente. Mediante la elaboración de un microhormigón con incorporación de fibra óptica, se elaboró artesanalmente un hormigón translúcido con materiales disponibles en el Uruguay. Para la realización del hormigón translúcido artesanal (HTA) se tomaron como variables el cemento (gris y blanco), el agregado fino (arena de río y arena de sílice) y la fibra óptica (de dos diferentes diámetros). Se estudió en ellos la resistencia a compresión, la transmitancia óptica, la absorción capilar y las resistencias a altas temperaturas (100 °C, 200 °C y 300 °C). Se compararon los resultados obtenidos con los de un hormigón translúcido industrializado de procedencia europea empleado en una obra de nuestro país (HTI) así como con el microhormigón sin fibra óptica (HC).

En el HTA se obtuvo mayor resistencia a compresión empleando cemento blanco y la fibra óptica de mayor diámetro, y su valor medio estuvo muy próximo al del HTI con las dos arenas empleadas. Se obtuvo una mayor transmitancia óptica utilizando cemento blanco, arena de río y fibra óptica de mayor espesor (superó el 35 %), mientras que con otras variables el menor valor obtenido en los HTA correspondió a 26 % aproximadamente, en tanto que el HTI presentó una transmitancia óptica del orden del 13 %. Los resultados obtenidos al someter las probetas a altas temperaturas fueron muy heterogéneos, existiendo diferencia estadísticamente significativa entre ellos; de allí que fue necesario realizar el análisis de varianza para cada temperatura estudiada y también para cada grupo, según las variables estudiadas. Bajo los efectos de altas temperaturas en las probetas sin fibra óptica se tuvieron mejores resistencias que con fibra óptica (HTA y HTI). Con cemento blanco y arena de sílice, al emplear fibra óptica se registró menor cantidad de agua absorbida que en el HC.

Los resultados obtenidos sirvieron para establecer correlaciones entre la resistencia a compresión y las otras propiedades estudiadas; se alcanzó una excelente reciprocidad en los resultados experimentales obtenidos con la transmitancia óptica, mientras que con las otras propiedades estudiadas los ajustes no fueron tan buenos.

Abstract

The subject of the Master's Thesis continues the final work of the Diploma in Construction of Architectural Works, called "Translucent Concrete". The objective of this work was to study the possibility of making translucent concrete with materials available in the country. The results obtained were very encouraging and showed that although the compressive strength of concrete decreases with the use of optical fiber, strengths greater than 48 MPa can be achieved at 28 days of age with its use.

In the Master's Thesis, their study is approached differently. Through the elaboration of a micro-concrete with fiber optic incorporation, a translucent artisanal concrete (HTA) was made with materials available in Uruguay. For the production of translucent artisan concrete, cement (gray and white), fine aggregate (river sand and silica sand) and fiber optics (two of different diameters) were taken as variables. Compressive strength, optical transmittance, capillary absorption and resistance to high temperatures (100 °C, 200 °C and 300 °C) were studied in them. The results obtained were compared with those of an industrialized translucent concrete of European origin used in a construction site in our country (HTI) as well as with micro-concrete without fiber optics (HC).

In the HTA, greater compression resistance was obtained using white cement and the optical fiber with the largest diameter, its average value being very close to that of the HTI with the two sands used. Greater optical transmittance was obtained using white cement, river sand and thicker optical fiber, exceeding 35 %, while with other variables the lowest value obtained in the HTA corresponded to approximately 26 %, while the HTI presented optical transmittance of approx. 13 %. The results obtained by subjecting the test pieces to high temperatures were very heterogeneous, there being a statistically significant difference between them, hence it was necessary to carry out analysis of variance for each temperature studied and also for each group, according to the variables studied; under the effects of high temperatures in the specimens without fiber optics, better resistances were obtained than with fiber optics (HTA and HTI). With white cement and silica sand, when using optical fiber, less amount of absorbed water was registered than in the HC.

The results obtained served to establish correlations between the compressive strength and the other properties studied, achieving excellent reciprocity the experimental results obtained with the optical transmittance, while with the other properties studied the adjustments were not as good.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ESTRUCTURA.....	3
1.4. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	3
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE SOBRE LOS HORMIGONES TRANSLÚCIDOS	6
2.1. INTRODUCCIÓN.....	6
2.2. ESTADO DE LA LITERATURA ESPECIALIZADA EN RELACIÓN AL MATERIAL	9
2.2.1. Resistencia a compresión	9
2.2.2 Transmisión óptica.	15
2.2.3. Resistencia a alta temperatura	21
2.2.4. Absorción capilar.....	22
CAPÍTULO 3. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL	25
3.1. METODOLOGÍA.....	25
3.2. MATERIALES	27
3.3. ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS AL HTI	30
3.3.1. Cantidad de fibra óptica en el HTI.....	30
3.3.2. Porcentaje de árido fino en el HTI	32
3.3.3. Diámetro de la fibra óptica	33
3.3.4. Material constituyente de las FOp	35
3.3.5. Densidad de la FOp.....	39
3.4. DOSIFICACIÓN	41
3.5. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	43
3.6. PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN Y CURADO DE LAS MUESTRAS	43
3.7. PROCEDIMIENTOS DE LOS ENSAYOS.....	47
3.7.1. Resistencia a compresión	47
3.7.2. Transmitancia óptica.....	51
3.7.3. Resistencia a altas temperaturas	53
3.7.4. Absorción capilar.....	56
CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN	58
4.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN	58
4.1.1. Comparación entre todos los resultados HTA – HC – HTI.....	60
4.1.2. Comparación entre los resultados HTA-HC	60
4.1.3. Comparación entre los resultados GR y GS, variable en común: cemento gris (G)	60
4.1.4. Comparación entre los resultados BR y BS, variable en común: cemento blanco (B)	61
4.1.5. Comparación entre los resultados GR y BR, variable en común: arena de río (R)	62
4.1.6. Comparación entre los resultados GS y BS, variable en común: arena de sílice (S).....	62
4.1.7. Comparación entre los resultados HC sin FOp.....	63
4.1.8. Comparación entre resultados de HTA con FOp.....	63
4.2. TRANSMITANCIA ÓPTICA.....	64
4.2.1. Comparación entre todos los grupos.....	65
4.2.2. Comparación entre los grupos de HTA	66
4.2.3. Comparación entre los dos tipos de FOp (FOp1 y FOp2)	66
4.2.4. Comparación entre los resultados GR y GS	67
4.2.5. Comparación entre los resultados BR y BS	67
4.2.6. Comparación entre los resultados GR y BR	68
4.2.7. Comparación entre los resultados GS y BS	68
4.3. RESISTENCIA A ALTAS TEMPERATURAS	69
4.3.1. Comparación entre todos los grupos.....	70

4.3.2. Comparación entre todos los grupos a temperatura 100 °C	71
4.3.3. Comparación entre todos los grupos a temperatura 200 °C	71
4.3.4. Comparación entre todos los grupos a temperatura 300 °C	72
4.3.5. Comparación de todos los resultados HTA y HC con todas las temperaturas	73
4.3.6. Comparación de los resultados considerando las variables en común cemento gris y arena de río (GR)	73
4.3.7. Comparación de los resultados considerando las variables en común cemento gris y arena de sílice (GS)	74
4.3.8. Comparación de los resultados considerando las variables en común cemento blanco y arena de río (BR)	75
4.3.9. Comparación del grupo BS, considerando las variables en común cemento blanco y arena de sílice	75
4.3.10. Comparación entre los resultados GR y GS, con la variable común de cemento gris	76
4.3.11. Comparación entre los resultados BR y BS, considerando la variable común del cemento blanco	77
4.3.12. Comparación entre los resultados de GR y BR, con la variable común de arena de río	77
4.3.13. Comparación entre los resultados de GS y BS, con variable común de arena de sílice	78
4.4. ABSORCIÓN CAPILAR	79
4.4.1. Comparación de los resultados GR, con las variables en común de cemento gris y arena de río	83
4.4.2. Comparación de los resultados del grupo GS, con variables comunes de cemento gris y arena de sílice	83
4.4.3. Comparación de los resultados con variable común en cemento blanco y arena de río (BR)	84
4.4.4. Comparación de los resultados BS, con variables comunes de cemento blanco y arena de sílice ...	84
4.4.5. Comparación de los resultados de GR y GS, con variable común de cemento gris	85
4.4.6. Comparación de los resultados de BR y BS, con variable común de cemento blanco	85
4.4.7. Comparación entre los resultados de GR y BR, con variable común arena de río	86
4.4.8. Comparación entre los resultados de GS y BS con la variable común de arena de sílice	87
4.5. CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES ESTUDIADAS	87
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXOS	107
ANEXO I. COMPLEMENTO DEL CAPÍTULO 2	108
I.1. HORMIGÓN TRANSLÚCIDO	108
I.2. CARACTERÍSTICAS, PRODUCTOS Y APLICACIONES	117
I.2.1. LiTraCon (Hungría)	117
I.2.1.1 LiTraCon Classic	118
I.2.1.2 LiTraCon pXL	121
I.2.1.3 LiTraCon Lamp	123
I.2.1.4 LiTraCon Jewellery	123
I.2.2. Luccon (Austria)	129
I.2.2.1 Luccon	130
I.2.2.2 Luccon therm	130
I.2.2.3 Luccon veneer	131
I.2.2.4 Luccon / láminas de vidrio	131
I.2.2.5 Luccon design	132
I.2.3. I-light (Italia)	138
I.2.4. Illum (México)	141
I.2.4.1 HT Illum	142
I.2.4.2 Aditivo Illum	142
I.2.5. Lucem (Alemania)	144
I.3. ANTECEDENTES DE SU APLICACIÓN EN EL URUGUAY	151
ANEXO II. DATOS TÉCNICOS DE ALGUNOS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS	153
II.1. CEMENTO BLANCO	154
II.2. FIBRA ÓPTICA N.º 1 (FOP DECO)	156
II.3. FIBRA ÓPTICA N.º 2 (FOP TIRA)	157

ANEXO III. CORRELACIONES ENTRE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y LAS OTRAS PROPIEDADES ESTUDIADAS	158
III.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN – TRANSMITANCIA ÓPTICA.....	158
III.1.1. Correlación considerando la variable FOp.....	159
III.1.2. Correlación considerando la variable árido fino.....	159
III.1.3. Correlación considerando la variable cemento	160
III.1.4. Consideraciones finales sobre las correlaciones resistencia a compresión – transmitancia óptica	161
III.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN – ALTAS TEMPERATURAS	161
III.2.1. Resistencia a compresión – temperatura 100 °C.....	161
III.2.1.1. Correlación considerando la variable FOp	161
III.2.1.2. Correlación considerando la variable árido fino.....	162
III.2.1.3. Correlación considerando la variable cemento.....	163
III.2.1.4. Consideraciones finales sobre las correlaciones entre resistencia a compresión y temperatura 100 °C	163
III.2.2. Resistencia a compresión – temperatura 200 °C.....	163
III.2.2.1. Correlación según la variable FOp	164
III.2.2.2. Correlación según la variable árido fino	165
III.2.2.3. Correlación según la variable cemento	165
III.2.2.4. Consideraciones finales sobre las correlaciones resistencia a compresión y temperatura 200 °C.....	166
III.2.3. Resistencia a compresión – temperatura 300 °C.....	166
III.2.3.1. Correlación según la variable FOp	167
III.2.3.2. Correlación según la variable árido fino	167
III.2.3.3. Correlación según la variable cemento	168
III.2.3.4. Consideraciones finales sobre las correlaciones resistencia a compresión y temperatura de 300 °C.....	168
III.3. RESISTENCIA A COMPRESIÓN – ABSORCIÓN CAPILAR.....	168
III.3.1. Resistencia a compresión – peso de la muestra en estado seco	168
III.3.1.1. Correlación según la variable FOp	169
III.3.1.2. Correlación según la variable árido fino	170
III.3.1.3. Correlación según la variable cemento	170
III.3.1.4. Consideraciones finales sobre las correlaciones entre resistencia a compresión – peso de la muestra en estado seco	171
III.3.2. Resistencia a compresión – absorción capilar a los 60 minutos.....	171
III.3.2.1. Correlación según la variable FOp	171
III.3.2.2. Correlación según la variable árido fino	172
III.3.2.3. Correlación según la variable cemento	172
III.3.2.4. Consideraciones finales sobre las correlaciones entre resistencia a compresión - absorción capilar a los 60 minutos	173
III.3.3. Resistencia a compresión – absorción capilar a los 294 minutos.....	173
III.3.3.1. Correlación según la variable FOp	174
III.3.3.2. Correlación según la variable árido fino	174
III.3.3.3. Correlación según la variable cemento	175
III.3.3.4. Consideraciones finales sobre la correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar a los 294 minutos.....	176

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 – CARACTERÍSTICAS DE LOS HT QUE SE COMERCIALIZAN MUNDIALMENTE	8
TABLA 2.2 – DIÁMETRO Y PORCENTAJE DE FOP.....	18
TABLA 3.1 – CANTIDAD DE FOP EN HTI.....	31
TABLA 3.2 – CANTIDAD DE MH Y FOP EN EL HTI.....	32
TABLA 3.3 – ÁRIDO FINO EN EL HTI.....	33
TABLA 3.4 – COMPONENTES APROXIMADOS DEL HTI	33
TABLA 3.5 – DIÁMETRO DE LA FOP HTI.....	34
TABLA 3.6 –DIÁMETRO DE LA FOP DEC.....	34
TABLA 3.7 –DIÁMETRO DE LA FOP TIRA.....	35
TABLA 3.8 –DIÁMETRO DE LA FOP CABLE	35
TABLA 3.9 – DENSIDAD RELATIVA DE LA FOP.....	41
TABLA 3.10 – DOSIFICACIÓN APROXIMADA DEL HTA	41
TABLA 3.11 – DOSIFICACIÓN FINAL DEL HTA	43
TABLA 4.1 – RESULTADOS Y GRÁFICA DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS	59
TABLA 4.2 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE TODOS LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE HTA Y HC.....	60
TABLA 4.3 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EMPLEANDO CEMENTO GRIS.....	61
TABLA 4.4 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EMPLEANDO CEMENTO BLANCO	61
TABLA 4.5 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EMPLEANDO ARENA DE RÍO	62
TABLA 4.6 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EMPLEANDO ARENA DE SÍLICE ..	63
TABLA 4.7 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS SIN FIBRA ÓPTICA (HC).....	63
TABLA 4.8 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS HTA CON FIBRA ÓPTICA	64
TABLA 4.9 – TRANSMITANCIA ÓPTICA	64
TABLA 4.10 – ANÁLISIS DE VARIANZA ENTRE TODOS LOS GRUPOS HTA	66
TABLA 4.11 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS GRUPOS DE FOP1 Y FOP2.....	67
TABLA 4.12 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS GRUPOS GR Y GS.....	67
TABLA 4.13 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS GRUPOS BR Y BS.....	68
TABLA 4.14 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS GRUPOS GR Y BR.....	68
TABLA 4.15 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS GRUPOS GS Y BS.....	69
TABLA 4.16 – RESISTENCIA A ALTAS TEMPERATURAS A LOS 28 DÍAS DE EDAD.....	69
TABLA 4.17 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE TODOS LOS RESULTADOS EN TODAS LAS TEMPERATURAS	71
TABLA 4.18 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE TODOS LOS RESULTADOS A TEMPERATURA 100 °C.....	71
TABLA 4.19 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE TODOS LOS RESULTADOS A TEMPERATURA 200 °C.....	72
TABLA 4.20 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE TODOS LOS RESULTADOS A TEMPERATURA 300 °C.....	73
TABLA 4.21 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS TODOS LOS GRUPOS HTA Y HC	73
TABLA 4.22 – ANÁLISIS DE VARIANZA DEL GRUPO GR EN TODAS LAS TEMPERATURAS.....	74
TABLA 4.23 – ANÁLISIS DE VARIANZA DEL GRUPO GS EN TODAS LAS TEMPERATURAS.....	75
TABLA 4.24 – ANÁLISIS DE VARIANZA DEL GRUPO BR EN TODAS LAS TEMPERATURAS.....	75
TABLA 4.25 – ANÁLISIS DE VARIANZA DEL GRUPO BS EN TODAS LAS TEMPERATURA	76
TABLA 4.26 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS GRUPOS GR Y GS EN TODAS LAS TEMPERATURAS	77
TABLA 4.27 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS GRUPOS BR Y BS EN TODAS LAS TEMPERATURAS	77
TABLA 4.28 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS GRUPOS GR Y BR EN TODAS LAS TEMPERATURAS	78
TABLA 4.29 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS GRUPOS GS Y BS EN TODAS LAS TEMPERATURAS	79
TABLA 4.30 – ABSORCIÓN CAPILAR.....	80
TABLA 4.31 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE TODOS LOS RESULTADOS DE AGUA ABSORBIDA	82
TABLA 4.32 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS RESULTADOS DE LA ABSORCIÓN CAPILAR	83
TABLA 4.33 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS RESULTADOS GR	83
TABLA 4.34 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS RESULTADOS CON GS.....	84
TABLA 4.35 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE TODOS LOS RESULTADOS BR	84
TABLA 4.36 – ANÁLISIS DE VARIANZA DEL RESULTADO BS	85
TABLA 4.37 – ANÁLISIS DE VARIANZA DEL RESULTADO GR Y GS	85
TABLA 4.38 – ANÁLISIS DE VARIANZA DEL RESULTADO BR Y BS	86
TABLA 4.39 – ANÁLISIS DE VARIANZA DEL RESULTADO GR Y BR	87

<i>TABLA 4.40 – ANÁLISIS DE VARIANZA DEL RESULTADO GS Y BS</i>	<i>87</i>
<i>TABLA 4.41 – CORRELACIONES: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN – TRANSMITANCIA ÓPTICA</i>	<i>88</i>
<i>TABLA 4.42 – CORRELACIONES: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN – ALTAS TEMPERATURAS</i>	<i>89</i>
<i>TABLA 4.43 – CORRELACIONES: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN – ABSORCIÓN CAPILAR.....</i>	<i>90</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - ORGANIGRAMA DE ESTUDIO DEL HT CON FIBRA OPTICA EN EL URUGUAY.	27
FIGURA 3.2 – ENSAYO Y TAMIZ PARA LA CLASIFICACIÓN GRANULOMÉTRICA.	28
FIGURA 3.3 – GRÁFICO DE GRANULOMETRÍA DE LOS ÁRIDOS.	29
FIGURA 3.4 – TIPOS DE FOP DISPONIBLES EN NUESTRO PAÍS.....	30
FIGURA 3.5 – ALGUNAS MUESTRAS DEL HTI DEL ESTUDIO DE CANTIDAD DE FOP.....	31
FIGURA 3.6 – EJEMPLO DE DOS MUESTRAS DEL HTI EMPLEADAS PARA ESTABLECER EL ÁREA DEL ÁRIDO FINO.....	32
FIGURA 3.7 – CALIBRE PARA ESTABLECER ESPESORES DE FIBRA ÓPTICA	33
FIGURA 3.8 – DESCRIPCIÓN GENERAL DE MATERIALES PARA LA FOP DISPONIBLES	36
FIGURA 3.9 – PROPAGACIÓN DE LA LUZ PARA LOS DOS TIPOS DE FOP (SI-FOP – GI-FOP)	36
FIGURA 3.10 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL POLIMETILMETACRILATO (PMMA)	37
FIGURA 3.11 – EQUIPO ESPECTOFOTÓMETRO INFRARROJO.	37
FIGURA 3.12 – LISTA DE LAS PRINCIPALES BANDAS DE ESPECTROSCOPIA IR	38
FIGURA 3.13 – ESPECTROS DE INFRARROJO DEL PMMA	38
FIGURA 3.14 – ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS FOP EN ESTUDIO.....	39
FIGURA 3.15 – EQUIPO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD RELATIVA	40
FIGURA 3.16 – MESA DE SACUDIDAS Y ACCESORIOS EMPLEADOS.	42
FIGURA 3.17 – MOLDE PARA MUESTRAS CÚBICAS DE 5 CM DE ARISTA	44
FIGURA 3.18 – ALGUNOS DE LOS MATERIALES Y EQUIPOS PARA LA ELABORACIÓN DEL MH	45
FIGURA 3.19 – SEPARACIÓN DE LOS DOS TIPOS DE FOP PARA LA REALIZACIÓN DE PROBETAS.....	45
FIGURA 3.20 – PROCEDIMIENTO DEL LLENADO DE LOS MOLDES POR CAPAS DEL HTA	46
FIGURA 3.21 – PROCESO DE DESMOLDADO DE LAS MUESTRAS Y LIMPIEZA DE LOS MOLDES DE ACERO.	46
FIGURA 3.22 – MUESTRAS EN PROCESO DE CURADO.....	48
FIGURA 3.23 – EQUIPO CONTROL UBICADO EN LA FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y URBANISMO DE UDELAR	48
FIGURA 3.24 – EQUIPO CONTROL UBICADO EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE UDELAR.....	49
FIGURA 3.25 – TESTIGOS HTI Y MUESTRAS HTA EN PROCESO DE ENSAYO.....	50
FIGURA 3.26 – MUESTRAS EN EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	51
FIGURA 3.27 – ALGUNAS MUESTRAS EN EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	51
FIGURA 3.28 – EQUIPO PARA LA TRANSMITANCIA ÓPTICA	52
FIGURA 3.29 – HORNO TIPO MUFLA	53
FIGURA 3.30 – MUESTRAS DESPUÉS DEL HORNO POR 24 H	54
FIGURA 3.31 – BANDEJAS CON LAS MUESTRAS A LAS DIFERENTES TEMPERATURAS QUE SE S ACARON DEL HORNO.	55
FIGURA 3.32 – MUESTRAS DE DIFERENTES TEMPERATURAS EN EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	56
FIGURA 3.33 – PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN	57
FIGURA 4.1 – NOMENCLATURA DE LAS MUESTRAS PARA EL HTA.....	58
FIGURA 4.2 – GRÁFICA DE VALORES MEDIOS DE LA TRANSMITANCIA ÓPTICA.	65
FIGURA 4.3 – COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA ENTRE LAS DIFERENTES TEMPERATURAS (100 °C, 200 °C Y 300 °C).....	70
FIGURA 4.4 – GRÁFICO DE AGUA ABSORBIDA EN FUNCIÓN DE LA RAIZ CUADRADA DEL TIEMPO.	81
FIGURA 4.5 – GRÁFICO DE CAPACIDAD DE ABSORCIÓN CAPILAR	81

Abreviaturas y siglas

3D	3 Dimensiones
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCD	Charge Coupled Device (en inglés) – Dispositivo de carga acoplado
CP	Cemento portland
FA	Ceniza volante
FBG	Fibras Bragg Grating
FOp	Fibra óptica
FOP	Fibra óptica plástica
GB	China National Standards
H	Hormigón
HA	Hormigón armado
HC	Hormigón convencional
HE	Hormigón especial
HT	Hormigón translúcido
HTA	Hormigón translúcido artesanal
HTI	Hormigón translúcido industrializado
IRAM	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
L23	Emulsión de polimetilmetacrilato
M20	M es la mezcla de hormigón y 20 denota la resistencia a compresión (FCK) de un cubo de 150 mm en 28 días, expresado en N/mm ²
MEB	Microscopio electrónico de barrido
MgCl₂	Cloruro de magnesio
MgO	Óxido de magnesio

MH	Microhormigón
MHAR	Microhormigón de alta resistencia
MOC	Oxicloruro de magnesio
PCE	Éter de policarboxilato
PKN	Polski Komitet Normalizacyjny
PMMA	Polimetilmetacrilato
PVA	Emulsión de alcohol polivinílico
SF	Humo de sílice
UNIT	Instituto Uruguayo de Normas Técnicas
UV	Ultravioleta

Capítulo 1. Introducción

1.1. Justificación

El uso de la luz artificial en el interior de los edificios genera consumo de los recursos naturales que la producen. Una manera de reducir su utilización es lograr que un mayor porcentaje de luz natural ingrese en el interior de los edificios.

Las alternativas tradicionales existentes de materiales que permitan el paso de la luz natural para la iluminación de espacios interiores no aportan solidez, resistencia y rigidez, y limitan significativamente el área disponible para materiales que aportan desde el punto de vista mecánico.

El material de mayor uso en la construcción es el hormigón (H), en cuyas propiedades, de acuerdo con el ACI (American Concrete Institute), no incluye la de ser translúcido. Los H impiden que la luz pase a través de ellos, razón por la cual tampoco permiten distinguir cuerpos, colores y formas. Resulta obvio que si se le confiere al H esta propiedad, contribuirá además a reducir el uso de luz artificial, con los beneficios medioambientales que ello trae.

En el hormigón translúcido (HT) la luz se transmite de un lado al otro destacando contornos, generando una ilusión óptica en la que parece que el espesor del muro desapareciera; donde hay solidez, firmeza y robustez pareciera que no lo hay, propio de la translucidez.

Ya hay casi dos décadas de innovación en el campo del HT, período que ha permitido, mediante la implementación de los avances de la ciencia, la renovación de la industria de la construcción, sobre todo en un material tan tradicional como es el H, posibilitando su translucidez.

Los estudios para desarrollar este material comenzaron por el año 1999 en la Universidad de Houston con los arquitectos Bill Price (durante su trabajo en el Estudio de Arquitectura OMA) y Rem Koolhaas, quienes iniciaron investigaciones sobre cuáles componentes serían aptos para incorporar al H o sustituir en él, para lograr translucidez. Así surgió el primer prototipo de HT compuesto con trozos de vidrio y resinas translúcidas (Shulman, 2001).

El desarrollo del HT continuó, y le corresponde la innovación como hoy se conoce a los arquitectos Aron Losonczy y Andreas Bittis. Se desarrolló un nuevo tipo de H que incorpora fibra óptica (FOp) como parte de sus agregados, lo que le permite trasladar la luz a través de su masa (hoy en día se conoce como LiTraCon – Light Transmitting Concrete) (Valambhiya et al., 2017).

Pocos años después, apareció en el mercado internacional otro HT, llamado LUCCON. Este producto es de la compañía alemana Heidelberg Cement AG, cuyo inventor es el arquitecto Jürgen Halm. Es un material similar al anterior, por la utilización de la FOp, pero con ciertas variantes en la FOp: utiliza menos cantidad y mayor espesor; además incorpora la innovación de utilizarlas en forma encadenada (tejidas).

A partir de estos HT se han producido y desarrollado otras variantes que se verán en el capítulo 2 y en los anexos I, en los que se presenta un resumen.

A nivel mundial se han desarrollado tres líneas de investigación alrededor de este tema: la primera de ellas se basa en el reemplazo del cemento portland (CP) por un aglomerante polimérico translúcido. Las otras dos se han concentrado en la adición o sustitución de materiales que permitan la transmisión de una onda electromagnética dentro del intervalo de luz visible (FOp y polímeros).

Desde que se dio a conocer mundialmente el HT, todavía continúa en desarrollo. Hay muy pocas investigaciones científicas en la materia y, además, las propiedades que informan los fabricantes son muy limitadas.

Los trabajos de investigación sobre el tema de HT se abocaron principalmente al estudio de algunas propiedades del material con variables en la incorporación de diferentes tipos de aditivos y diámetros de FOp. También se han estudiado las características físicas y mecánicas de las FOp empleadas en dichos trabajos.

La realización de esta tesis brindará mayor conocimiento sobre el material. Se basa en la elaboración de un hormigón translúcido artesanal (HTA, realizado en forma manual) compuesto principalmente de microhormigón (MH) y FOp. La diferencia entre el trabajo de esta tesis con otras investigaciones realizadas radica en que se estudiarán como variables el tipo de cemento (gris y blanco), el árido fino (de río y de sílice) y dos diferentes diámetros de FOp y su influencia en diferentes propiedades.

Otro aspecto a destacar en este trabajo de investigación es que se caracterizará un hormigón translúcido industrializado (HTI) importado que se ha utilizado en una obra en nuestro país, del cual no se conocen sus propiedades.

Desde el punto de vista de edificaciones sustentables o sostenibles, el HT tiene la ventaja frente a un H de que permite la entrada de la luz sin la necesidad de una ventana o un patio de luces, lo que posibilita reducir el gasto de electricidad en el interior de las viviendas, oficinas y otros. Por ello, conocer sus propiedades permitirá que el arquitecto tenga más elementos al momento de seleccionar materiales para un determinado proyecto. Se trata, con la realización de la tesis, de avanzar en el desarrollo y conocimiento de un nuevo material que permitirá ampliar los límites de la imaginación en el momento del diseño.

1.2. Objetivos

Objetivo principal

Evaluar el desempeño de algunas propiedades del HTA con un HTI utilizado en nuestro país y un hormigón convencional (HC).

Objetivos específicos

- Caracterizar el HTI que se ha empleado en nuestro país, mediante el estudio de algunas de sus características físicas y mecánicas.
- Con base en información disponible y obtenida en la tesis del HTI, elaborar un HTA considerando las variables tipos de cemento, áridos finos y FOp.

- Estudiar la resistencia a compresión (F_c) de los diferentes HTA elaborados con las variables mencionadas
- Estudiar la transmitancia óptica (T) de los diferentes HTA elaborados.
- Estudiar los efectos de la variación de la temperatura de los diferentes HTA elaborados.
- Estudiar la absorción capilar de los diferentes HTA elaborados
- Comparar los resultados obtenidos del HTA con los del HTI y HC.
- Establecer correlaciones entre la resistencia a compresión y las otras propiedades estudiadas.

1.3. Estructura

Este trabajo se estructura en cinco capítulos.

El capítulo uno corresponde a la introducción, en la que se presenta y justifica la temática a abordar en el trabajo, sus objetivos, su estructura y el alcance de la investigación.

El capítulo dos aporta una síntesis del estado del arte de la literatura especializada en relación al material. Dicha literatura son investigaciones científicas internacionales desde el año 2009 a la actualidad. En el anexo I se presenta la totalidad de la historia sobre este material, se describen los más usados en todo el mundo, sus aplicaciones y características, así como los requisitos a cumplir y los antecedentes de su aplicación en nuestro país.

El capítulo tres presenta el planeamiento de la investigación experimental, los componentes y dosificación a emplear y los métodos de ensayo a aplicar. Además, los materiales a utilizar en el diseño de HT, que serán accesibles en el mercado local o regional.

En el capítulo cuatro se presentan los resultados obtenidos y su discusión.

El capítulo cinco contiene las conclusiones finales y sugerencias para futuras investigaciones.

Finalmente, se incorporan las referencias bibliográficas consultadas hasta la fecha de la literatura especializada y un apartado con los anexos. En estos figuran, un complemento del capítulo dos que contiene un estado del arte completo de los productos que se comercializan hasta la fecha y los antecedentes de su aplicación en nuestro país (anexo I). También, las fichas técnicas (anexo II) de algunos de los materiales con los que se realizó la parte experimental de la tesis, que son presentados en el capítulo tres. Por último, se incorporan las correlaciones entre la resistencia a compresión y las otras propiedades estudiadas (transmitancia óptica, resistencia a altas temperaturas y absorción capilar (anexo III).

1.4. Alcance de la investigación

Las características y propiedades de cada material presentado como HT están bastante incompletos en la bibliografía y en los bancos de datos disponibles en páginas web de los fabricantes de los productos que se están comercializando. Por ello, para investigar sobre el HT se optó por trabajar con algunas de sus propiedades, tales como la resistencia a compresión (es la más importante para cualquier H), la transmitancia óptica (que se considera muy importante

para el HT), la temperatura (ya que no existe en la literatura información sobre su influencia en el HT ni de cómo influye en la FOp, a excepción del trabajo de diplomado Luisi (2015) y la absorción capilar (de la cual hay muy poca información disponible para los HT).

Las posibles variables de estudio para la elaboración de muestras de HT son muchas, y tienen que ver con en el tipo y porcentajes de los materiales constituyentes, o sea, del cemento, árido fino, FOp, agua y de la incorporación de diferentes aditivos.

Si bien nuestro país es pequeño y no se dispone de mucha variedad de materiales a emplear en el mercado, se establece lo siguiente:

- Con respecto al cemento, se dispone de ocho cementos: hay cinco cementos portland grises, de los cuales cuatro son de fábricas nacionales y uno de fabricación extranjera; además, dos cementos blancos que se están comercializando y un cemento portland compuesto.
 - En relación al árido fino (arena) hay muchísimas (terciada, fina, gruesa, natural, procedente de trituración, y a su vez de cada una de ellas hay incontables pues hay muchas areneras).
 - Para el agua, podemos emplear agua proveniente de la red de abastecimiento local (OSE) o de otra procedencia (la más empleada por las empresas de H premezcla es la que extraen mediante bomba, la cual analizan periódicamente, y que varía de acuerdo a la ubicación de la empresa).
 - Hay muy poca disponibilidad en el mercado de FOp (cable de transmisión de datos, tiras de luminarias y artefactos decorativos).
 - En relación a los aditivos, hay de diferentes tipos (plastificantes, superplastificantes, incorporadores de aire, entre otros) y de diferentes marcas. En relación a los porcentajes a emplear de cada uno de ellos, se puede decir que son muchos, y que se debe trabajar en el rango recomendado por el fabricante.

De las variables a considerar para la elaboración del HT, es necesario elegir algunas y limitar su número, y fijar las restantes, pues en un programa experimental, a medida que el número de variables a ser evaluadas aumenta, el número de combinaciones crece muy rápidamente, inviabilizando su ejecución. Por eso, este estudio se restringe al empleo en los HTA de dos cementos (uno gris y uno blanco), dos arenas (de río y de sílice) y dos FOp de diferentes diámetros.

En relación a la FOp, de las tres disponibles en nuestro país, solo dos sirven para transmitir luz, que fueron los que se emplearon para realizar los HTA. Además, se utilizó agua potable proveniente de la red de abastecimiento local (OSE), y un aditivo superplastificante compatible con los cementos a utilizar.

En relación al porcentaje de FOp y de la relación cemento/arena a emplear en los HTA, su valor fue fijo e igual al que tiene el HTI; la relación agua/cemento y el porcentaje de aditivo a emplear también fueron valores fijos.

El período de tiempo para la elaboración de este tesis de maestría comprende dos año de duración a partir de la entrega de actas del Seminario de Tesis, por lo que incluir más variables podría haber inviabilizado su realización en tiempo y forma.

En relación al planeamiento de los ensayos, como casi siempre los experimentos con materiales de construcción involucran muchos factores, y es necesario estudiar el efecto interligado de estos factores o variables sobre la respuesta del experimento, normalmente se realiza un estudio de todas las combinaciones posibles entre las variables involucradas.

En la medida en que el número de variables aumenta, el número de combinaciones crece muy rápidamente, por lo que se hace necesario limitar las variables, sea por cuestiones económicas, de tiempo o de trabajo a desarrollar.

Por eso, al realizar el estudio de las propiedades de los HTA, HTI y HC (sin FOp) se siguieron normas que rigen los ensayos realizados, y las edades a estudiar fueron también fijadas previamente, tal como se indica en el capítulo 3.

Capítulo 2. Estado del arte sobre los hormigones translúcidos

2.1. Introducción

En el siglo XXI, continúa el auge de la industria del H, con grandes avances tecnológicos. Se producen diferentes tipos de H según las necesidades constructivas, y con un elemento fundamental: la cultura medioambiental. Por ello, aparecen varias categorías de H y, principalmente dentro de la categoría de hormigones especiales (HE), se encuentra el material de estudio: HT.

El HT, también conocido como *hormigón transmisor de luz*, es un material de construcción elaborado con cemento y agregados con propiedades de transmisión de la luz, debido a elementos ópticos ligeros incorporados: el clásico es con FOp de PMMA, pero también se puede sustituir por resinas plásticas y varillas de vidrio. La luz se conduce de un extremo al otro, por lo cual las FOp, resinas plásticas o varillas de vidrio deben pasar por todo el objeto. Esto da como resultado un cierto patrón de luz en la superficie, siempre dependiendo de la estructura de la FOp, resinas plásticas o varillas de vidrio. Las sombras proyectadas en un lado aparecen como siluetas a través del material.

El HT, como se conoce hoy día, se utiliza en la arquitectura principalmente en fachadas y tabiquería interior. También se ha aplicado a varios diseños interiores y exteriores, como por ejemplo: mesadas, escaleras, bancos, monumentos, cartelera, logos empresariales, entre otros.

En este capítulo se presenta una reseña histórica bibliográfica sobre el material HT; sus aplicaciones, patentes, proyectos concretos, ensayos y prototipos encontrados, a los efectos de sintetizar la historia de los productos del HT que se presenta en su totalidad en el anexo I, junto con los antecedentes de su empleo en el Uruguay.

El nombre *hormigón translúcido* aparece a partir de los años 30 integrando el concepto de transmisión de la luz; principalmente luz natural hacia el interior de los edificios. Este concepto de transmisión de la luz se produce a través de un elemento transparente o translúcido, que es el vidrio, y que juega en combinación con el hormigón armado (HA). Generalmente son aplicables a cubiertas y a bóvedas.

El HT se menciona por primera vez en una patente canadiense del año 1935 (CA/353849), sin aplicación. Luego, este tipo de componente se aplicó en España, en el año 1947, donde se denominó *hormigón armado translúcido* (Toyos, 1947). A continuación, entre los años 1982 y 1985 se denominó *hormigón translúcido* (Fernández, 1986).

Los estudios en el desarrollo del material continuaron cambiando sus características, a los efectos de generar un HT específico. Los primeros estudios de investigación se realizaron en la Universidad de Houston (1999) con el arquitecto Bill Price, en los que se desarrolló el primer HT como se conoce hoy día, con materiales unificados en una misma masa, pero manteniendo la utilización del vidrio. Este HT fue llamado *Pixel Panels*. Un año más tarde, en la Universidad de Detroit Mercy (Michigan), el arquitecto Will Witting diseñó un prototipo de panel de HT muy similar al anterior. Pero ninguno de estos proyectos de investigación prosperó.

La invención y desarrollo de la FOp,¹ a partir de 1970, ha permitido que se desarrollen materiales como el HT. Por esto, comenzaron las investigaciones en la industria de la construcción con FOp. Una de ellas es la patente europea GB1561142 (1980) que utiliza varios tipos de fibras para conformar componentes decorativos en paredes, pisos y techos. No se encuentran antecedentes de su aplicación.

En el año 2001, al arquitecto Áron Losonczi (Hungría) se le atribuyó el inicio del HT como hoy día se conoce, con uno de sus componentes principales, la FOp. Losonczi desarrolló un primer prototipo en el año 2001 y obtuvo su primera patente certificada en el año 2003. Este producto se llama *LiTraCon* (Light Translucent Concrete) y su composición principal es MH y FOp de PMMA (se disponen en forma libre).

En el año 2004, apareció una variante similar llamado *Lucon*, de la empresa Heidelberg Cement AG (Alemania). A diferencia del anterior, reduce la cantidad de FOp, pero la emplea de mayor diámetro; además, pueden disponerse en forma libre o encadenada (tejido). La patente internacional certificada se obtuvo en el año 2007.

En el año 2005 surge otra variante de HT, llamado *I-light*, del Grupo Internacional Italcementi (Italia). En lugar de FOp, utiliza resinas plásticas, conformadas en moldes dentro del MH.

También en el año 2005, dos estudiantes de Ingeniería Civil, Joel Sosa y Sergio Omar Galván (actualmente ingenieros) de la Universidad Autónoma Metropolitana de Azcapotzalco (México), crearon una versión similar al *I-light*, sin FOp, sino con aditivos y resinas. Lo llamaron *Ilum* y tiene patente mexicana del año 2009.

Por último, en el año 2007 aparece otro HT con FOp, similar a los dos primeros, al que le incorporaron una variante: luces led y tejido de FOp. Lo llamaron *Lucem* y la invención es del Dr. Ing. Andreas Roye (Alemania), con patente internacional obtenida en el año 2010.

El HT con FOp o resinas plásticas que se ha producido por distintas partes del mundo con patentes publicadas en el empleo de los productos son *LiTraCon*, *Lucon*, *I-light*, *Ilum* y *Lucem*. A continuación, se exponen las características disponibles de los productos que se comercializan (tabla 2.1).

¹ En 1970, los investigadores Robert Maurer, Donald Keck, Peter Schultz, además de Frank Zimar que trabajaban para Corning Glass, fabricaron la primera FOp aplicando impurezas de titanio en sílice, de cientos de metros de largo, con la claridad cristalina que Kao y Hockman habían propuesto, aunque las pérdidas eran de 17 dB/km. Durante esta década, las técnicas de fabricación se mejoraron, consiguiendo pérdidas de tan solo 0,5 dB/km (DeCusatis, 2011).

Tabla 2.1 – Características de los HT que se comercializan mundialmente

Características actuales de los HT								
	LiTraCon				LUCCON	I-LIGHT	ILUM	LUCEM
	Classic	Lamp	pXL	Jewellery				
Material utilizado	MHAD + Fop vidrio	HT LiTraCon, vidrio y Al	MHAD + FOp plásticas	MHAD + Fop vidrio	MHAD + Fop	MHAD + resinas	MHAD + polímeros	MHAD + Fop
Forma	Bloque	Prisma	Paneles	Joyería	Bloque	Panel	Bloque	Panel
Tamaño	1200x400 mm	175x175x221 mm	1200x600 mm 3600x1200 mm	Anillos	1500x1000 mm 2000x1000 mm	1000x500mm	120x60cm50x50cm 45x45cm 30x30cm	120x0,60
Espesor	25 mm - 500 mm.	-----	40mm - 60 mm	-----	20 - 30 mm	50 mm	2 cm 2.5 cm 5 cm	15 - 30 mm
Densidad	2200 - 2400 kg/m ³	-----	2100-2400 kg/m ³	-----	2300 - 2400 kg/m ³	-----	-----	2400 kg/m ³
Peso	10 kg	-----	-----	-----	-----	50 kg	-----	-----
Colores	Blanco, gris y negro	Blanco, gris y negro	Blanco, gris y negro	-----	Blanco, negro y gris	-----	-----	Gris, gris oscuro y blanco
Terminación	Pulido	Pulido + iluminación E14 / 220V/ máx. 60W	Moldeado, lavado y pulido	-----	Pulida	Pulido	Pulido	Pulido + epoxi + luz LED
Diám. FOp	2 nm – 2 mm	----	----	----	0,4 mm	----	----	----
Producción	Trad.	Trad.	Trad.	----	Industrial	Industrial	Industrial	Industrial
Curado	Trad.	Trad.	Trad.	----	Trad.	Trad.	Trad.	Trad.
Transmitancia Óptica	1-Oct	1-Oct	----	----		92%	----	----
Resistencia a Alta Temp.	mejor HC	mejor HC	----	----	0,18 W/m ² k	Clase B2	----	----
A prueba de agua	----	----	----	----	Clase XC4	----	0,35%	----
Congelamiento.	----	----	----	----	Clase XF4	----	----	70 MPa
Descongelación.								
Resistencia a compresión	45 MPa	45 MPa	----	----	100 MPa	65 MPa	202 - 220 MPa	----
Resistencia a flexión	----	----	----	----	----	10 MPa	5 MPa	----
Módulo de tracción	----	----	----	----	----	3200 MPa	1750 MPa	----
Resistencia a tracción - doblado	7 MPa	7 MPa	----	----	10 MPa	----	----	----
Elongación a la rotura	----	----	----	----	----	3%	----	----
Módulo de elasticidad	----	----	----	----	----	39 MPa	60 MPa	----
Conducción térmica	----	----	----	----	----	----	0,21 W/m°C	----
Resistencia UV	----	----	----	----	----	Bueno	----	Durable ETAG 005 TR 010
Resistencia Químicos	----	----	----	----	----	Bueno a los ácidos y álcalis	----	----

2.2. Estado de la literatura especializada en relación al material

En esta tesis se estudió el material HT a través de varias propiedades: resistencia a compresión, transmitancia óptica, resistencia a altas temperaturas y absorción capilar.

Se cuenta con 18 investigaciones del HT encontradas hasta la fecha. Son trabajos desarrollados en varios países (internacionales, regionales y nacional), en los que las propiedades estudiadas son la resistencia a compresión, transmitancia óptica, resistencia a alta temperatura y absorción capilar.

A continuación, se presenta el análisis de estas investigaciones en cuanto a las propiedades mencionadas.

2.2.1. Resistencia a compresión

La *resistencia a compresión* es una de las propiedades más importantes del H. No obstante, la resistencia suele dar una imagen general de la calidad del H porque está directamente relacionada con la estructura de la masa del mortero (Neville, 1987).

Ha sido probado que las propiedades más importantes se relacionan directamente con la resistencia a compresión; además el H no solo se utiliza preponderantemente para sobrellevar esfuerzos de compresión, sino que los códigos y reglamentos se basan fundamentalmente en esta propiedad. Finalmente, y no menor importe, representa un ensayo económico y es de fácil realización (Metha y Monteiro, 1998).

La importancia de esta propiedad, es porque, debido a que tanto en proyectos de estructura de H, resistencia y propiedades generalmente específicas, son comparadas con la mayoría de las propiedades; la resistencia es relativamente fácil de ser ensayada. Con todo esto, muchas propiedades del H, como el módulo de elasticidad, estanqueidad, impermeabilidad y resistencia a intemperie, incluido aguas agresivas, son directamente relacionadas con la resistencia; por tanto, se pueden deducir los datos de la resistencia. Además, la resistencia a compresión es muchas veces mejor que otro tipo de resistencia, y la mayoría de las piezas de H son proyectadas tomando en cuenta la resistencia a compresión del material (UNIT, 2009)

Para el ensayo de resistencia a compresión, algunas investigaciones mencionan las siguientes normas: ASTM C109/C109M-05 y ASTM C109/C109M-08, GB 175-2007, PN-EN 206-1, NBR 13279:2005 y UNIT-ISO 679:2009.

Para el estudio de esta propiedad, se presentan 14 investigaciones, que se dividieron en 5 categorías según el tipo de material de inclusión en la matriz del MH.

La primera categoría incluye muestras con inclusión de FOp en la matriz del MH.

Por ejemplo, en el trabajo de Zhou et al. (2009), se analizan muestras que tienen en su matriz resina epoxi y carbón con inclusión de FOp de PMMA (diámetro: no especificado – cantidad: 0 %, 3,14 %, 3,8 % y 4,52 %) y muestras sin FOp. No especifica la edad de las muestras.

Se observó que disminuyó la resistencia a medida que aumentó la cantidad de FOp. Dicha disminución es menor al 10 %. Esto puede ser porque, a que mayor cantidad de FOp, se reduce la compactación de las muestras y puede debilitar la unión de la interface matriz/FOp.

Además, las muestras sin FOp (HC) tienen mayor resistencia que las muestras con FOp (HT).

En el trabajo de Bashbash et al. (2013), se trabaja con muestras que tienen una matriz de MH con inclusión de FOp de PMMA (diámetro: 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm y 3 mm – cantidad: 2 %, 4 % y 6 %) y con muestras sin FOp. El ensayo se realizó con muestras a edad de 7 y 28 días.

Se observó un aumento de la resistencia con contenido de FOp del 4 %; luego, la resistencia disminuye cuando el contenido de FOp aumenta (6 %), en todos los diámetros. Esto puede ser porque las FOp comienzan a disminuir los enlaces con el MH, o sea, también puede haber poca unión entre la interface matriz/FOp.

En el caso de Salih et al. (2014), hay muestras que tienen una matriz de MH con inclusión de FOp de PMMA (diámetros: 1,5 mm, 2 mm y 3 mm – cantidad: 2 %, 3 % y 4 %), y muestras sin FOp.

El ensayo se realizó con muestras a edades de 7, 28 y 90 días. Se observó lo siguiente:

1. Las muestras con FOp tienen menor resistencia en relación a las muestras sin FOp.
2. En las muestras con FOp, a los 7 días de edad, para todos los diámetros, la resistencia disminuye a medida que el contenido de FOp aumenta.
3. Para las muestras con FOp, a los 28 y 90 días de edad, la resistencia mejoró un poco debido a la hidratación del MH en la zona de interfaz (matriz/FOp). De igual modo, disminuyó, pero menos. Esto es debido a que la inclusión de la FOp en la matriz no afectó significativamente la resistencia.
4. Para las muestras a edades de 28 y 90 días, en todas las cantidades, cuando se incluye FOp de 2,0 mm de diámetro, tiene mayor resistencia en comparación con las FOp de 1,5 mm y 3 mm.
5. Con una cantidad de FOp del 3 %, disminuye la resistencia, pero con una cantidad de FOp del 4 %, aumenta la resistencia. Esto puede ser debido a la distribución desigual de la FOp en el MH.

En el trabajo de Li et al. (2015a), se trabaja con muestras que tienen una matriz de MH de alta resistencia con inclusión de FOp de PMMA (diámetro: 0,5 mm y 1 mm – cantidad: 1,23 % y 4,91 %) y con muestras sin FOp.

El ensayo de resistencia se realizó con muestras a 28 días de edad.

Las muestras con FOp tienen menor resistencia en comparación con las muestras sin FOp. La resistencia disminuye en forma lineal al aumentar la cantidad de FOp.

Además, las muestras con FOp, después del baño de agua a 80 °C tienen una resistencia mayor que la muestra con curado estándar.

En el trabajo de Halbiniak et al. (2015), son muestras que tienen una matriz de MH con inclusión de FOp de PMMA monomodo (diámetro: 1,5 mm – cantidad: 3,2 % – posicionado entre FOp: 5 mm); y muestras sin FOp. Se realizó el ensayo a los 28 días de edad.

Se posicionó la fuerza paralela y perpendicular a la FOp.

Se observó que las muestras sin FOp tienen mayor resistencia que las muestras con FOp.

En las muestras con FOp, cuando se ejerce una fuerza paralela a la FOp, tiene menor resistencia en relación a la fuerza que se ejerce en forma perpendicular a la FOp

Como conclusión final, establecen que las resistencias obtenidas en muestras con FOp son muy buenas para que el HT sea usado en la construcción. Hoy en día, se utiliza en elementos decorativos.

El HT tiene poca expansión debido a razones económicas. Sin embargo, a mayor escala podría reducir los costos.

En Luisi (2015) se realizaron muestras con una matriz de MH de alto desempeño e inclusión de FOp de PMMA de artefactos decorativos (diámetro: 0,34 mm – cantidad: 5 %) y muestras sin FOp. El ensayo se realizó a edad de 28 días.

El estudio concluyó lo siguiente:

1. Es notorio el aumento de resistencia a compresión con la edad tanto en las probetas realizadas con FOp como con las realizadas sin ella.
2. Si bien las probetas con FOp tienen menor resistencia a compresión que las probetas de referencia sin FOp, se tienen resistencias mayores a 45 MPa, 60 MPa y 70 MPa a los 7, 28 y 56 días, respectivamente, con empleo de FOp.

En el estudio de Wang et al. (2016), las muestras tienen una matriz de MH de alto rendimiento con inclusión de FOp de PMMA (diámetros: 0,15 mm, 1,5 mm y 2,1 mm – cantidad: no específica) y malla de fibra de vidrio.

Las propiedades físicas y mecánicas fueron mejoradas a través de la disposición de FOp en la matriz del MH. La interfaz FOp/MH se fortaleció mediante el tratamiento de acetona y un agente de acoplamiento.

Se observó que la resistencia aumenta en cierta medida con ceniza volante y humo de sílice, y se mantuvo una buena fluidez en el MH. También se mejoró la resistencia con el tratamiento en acetona de la FOp.

En el trabajo de Praveenkumar et al. (2017), hay muestras que tienen una matriz de MH de alto rendimiento con inclusión de FOp de PMMA (diámetro: 2 mm – cantidad: 4 %), y muestras sin FOp. El ensayo se realizó para muestras a edades de 7, 14 y 28 días.

Se observó lo siguiente:

1. En muestras con FOp, la resistencia aumenta en comparación con las muestras sin FOp.

2. Para ambas muestras (con y sin FOp), a medida que pasa el tiempo, aumenta la resistencia.

En el trabajo de Henriques et al. (2018), las muestras tienen una matriz de MH de alta resistencia con inclusión de FOp de PMMA (diámetro: 0,4 mm – cantidad: 2 %, 3,5 % y 5 %) dispuestos de manera ordenada; y otras son muestras sin FOp.

El ensayo se realizó con la fuerza perpendicular a la longitud de la FOp.

Las siguientes son las conclusiones extraídas de esta investigación:

1. En las muestras con FOp con contenido del 2 %, la resistencia es levemente superior a las muestras sin FOp.
2. A medida que aumenta el contenido de FOp, disminuye la resistencia.
3. En el contenido superior al 5 % de FOp, demostró ser difícil de realizar las muestras manualmente para llenar los huecos entre las FOp sin dañarlas.
4. Se pueden obtener muestras con contenido de FOp superiores al 5 % a través de un molde diseñado para este propósito.
5. La disminución de la resistencia y la baja interfaz FOp/matriz se puede atribuir a la disposición paralela de las FOp, además de la superficie muy lisa de la FOp, lo que compromete la unión.
6. En general, el HT se está convirtiendo en un material de alta tecnología que proporciona un rendimiento excelente y una amplia gama de aplicaciones (tabiques, baldosas decorativas, pavimentos, escaleras), pero requiere un diseño y ejecución competente.

Por último, en el trabajo de Ravivarman et al. (2015), las muestras tienen una matriz de MH con inclusión de FOp de artefactos decorativos (diámetro: no especificado – cantidad 4 %) y otras son muestras sin FOp. El ensayo se realizó con muestras a edades de 7, 14 y 28 días.

Se observó que, a medida que aumenta la edad, aumenta la resistencia. Además, que la resistencia entre las muestras sin y con FOp son similares, y se obtiene mayor resistencia en las muestras con FOp.

Para esta primera categoría, se puede establecer lo siguiente:

1. En general, las muestras sin FOp tienen mayor resistencia que las muestras con FOp.
2. Para las muestras con FOp, a medida que aumenta el contenido de FOp, disminuye la resistencia. Esto puede ser porque se reduce la compactación de las muestras, generando un debilitamiento en la unión de la interfaz matriz/FOp, atribuida a la superficie muy lisa de la FOp.
3. Para ambas muestras (con y sin FOp), a medida que pasa el tiempo, aumenta la resistencia.

4. Con fuerza ejercida en forma perpendicular a las FOp se obtiene mayores resistencias en comparación con una fuerza paralela.

En una segunda categoría, se incluyen muestras en las que, además de la inclusión de FOp de PMMA en la matriz MH, se incorpora un tejido de fibra de vidrio.

Se cuenta con el trabajo de Roy et al. (2018), en el que las muestras tienen una matriz de MH con inclusión de FOp de PMMA de índice gradual multimodo (diámetro: 0,125 mm – cantidad: 0,75 %, 1,25 % y 1,75 %) y fibra de vidrio de tela tejida (diámetro: no especificado – cantidad: 0,5 % y 1 %). El ensayo fue realizado a los 7 y 28 días. La fuerza ejercida es perpendicular a las FOp.

Se observó lo siguiente:

1. Al aumentar la cantidad de FOp y con un 0,5 % de fibra de vidrio, aumenta la resistencia. Pero con la inclusión del 1 % de fibra de vidrio, disminuye la resistencia.
2. La inclusión del 0,5 % de fibra de vidrio en las muestras favorece la obtención de mejores resistencias.
3. A medida que aumenta la edad de las muestras, también aumenta la resistencia.
4. De ahora en adelante, este tipo de H se puede usar tanto para trabajos estéticos como material estructural de carga.

Para esta segunda categoría, se puede establecer lo siguiente:

1. Con la incorporación adicional de la fibra de vidrio mejora la resistencia, por lo cual hay que tener cuidado con las cantidades a utilizar para no comprometer la interfaz y desfavorecer su resistencia.
2. Al igual que en la primera categoría, a medida que aumenta la edad de las muestras, aumenta su resistencia.

La tercera categoría está conformada con muestras que tienen una matriz de MH con inclusión de varilla de vidrio.

En el trabajo de Momin et al. (2014), las muestras tienen una matriz de MH e inclusión de varillas de vidrio (diámetro: 0,5 mm – cantidad: 1,5 %, 3 % y 4,5 %). Estas se comparan con muestras que tienen una matriz de MH e inclusión de FOp de PMMA (diámetro: 0,2 mm – cantidad: 0,5 %, 1 % y 2 %).

Para la realización del ensayo no se especifica las edades de las muestras.

Las muestras con fibra de vidrio son volúmenes cúbicos de arista de 150 mm, y las muestras con FOp son prismáticas de 150 mm × 100 mm × 100 mm.

Las siguientes son las conclusiones extraídas de dicha investigación:

1. Las muestras con FOp tienen resistencias semejantes a las muestras sin FOp.

2. Las muestras con varilla de vidrio tienen mayor resistencia que las muestras sin FOp.
3. Además, las muestras con varilla de vidrio tienen mayor resistencia que las muestras con FOp.

Para la tercera categoría, se puede establecer lo siguiente:

1. Este trabajo hace referencia a muestras sin FOp, pero no especifica las dimensiones en volumen de las muestras. Tampoco presentan los resultados del ensayo.
2. Para las muestras con varilla de vidrio y FOp, utilizaron diferente tipo de diseño volumétrico, y no se especifica el porqué de dicha diferencia.
3. Como existen diferencias volumétricas entre las muestras, se considera que no es adecuada la comparación de resultados entre las muestras, ya que para la realización del ensayo es de importancia el área transversal donde se ejerce la carga para el cálculo de la resistencia.

La cuarta categoría corresponde a muestras con matriz de MH con inclusión de tejido de FOp de PMMA.

En el trabajo de Li et al. (2015b), se trabaja con muestras que tienen una matriz de MH de alta resistencia con inclusión de tejido de FOp de PMMA (diámetro: 0,5 mm y 1,0 mm – cantidad: 0,25 %, 0,5 %, 0,75 %, 1 %, 2 %, 3 % y 4 %) y con muestras sin FOp.

El ensayo se realizó con muestras de 28 días de edad.

Con base en la investigación presentada, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Las resistencias de las muestras con FOp fueron ligeramente menores que la de las muestras sin FOp.
2. A medida que aumenta la cantidad de FOp, la resistencia disminuye gradualmente, con leves diferencias.

Por último, la quinta categoría la constituyen muestras con matriz de MH e inclusión de resina.

En este caso, en el trabajo de Juan et al. (2019) las muestras tienen una matriz de MH de alto rendimiento con inclusión de resina poliéster insaturada (diámetro: 22 mm – cantidad: 1,13 %, 2,0 %, 3,62 %, 4,54 % y 6,2 % – longitud: 20 mm, 60 mm y 105 mm); y hay muestras de MH (sin resina).

El ensayo se realizó con muestras a edad de 28 días.

Se extrajeron las siguientes conclusiones:

1. En las muestras sin resina se obtuvieron mayores resistencias que en las muestras con resina. Dicha diferencia es muy poca.

2. Además, en las muestras con resina, a medida que aumenta la cantidad de resina, disminuye la resistencia.

Para esta última categoría, se puede establecer lo siguiente:

1. Las muestras sin resina tienen mayor resistencia que las muestras con resina.
2. A medida que aumenta la cantidad de resina, disminuye la resistencia.
3. La resistencia disminuye cuando se aumenta las cantidades de resina. Es que, cuanto mayor es la relación de volumen de resina, mayor es el área de la interfaz MH/resina, lo que provoca una grieta a lo largo de la interfaz. Por lo tanto, la cantidad de resina debe controlarse en la inclusión de la matriz de MH.

Como conclusión final, en las cinco categorías de estudio para la propiedad *resistencia a compresión*, se puede establecer lo siguiente:

1. Indistintamente al tipo de material a utilizar para la inclusión de la matriz MH, ya sea FOp de PMMA o resina, a medida que aumentan las cantidades, disminuye la resistencia. Esto es debido a que tiende a generar espacios en la interfaz, reduciendo la compactación de las muestras, así como además empeora la unión de la interfaz matriz/FOp-resina.
2. Teniendo una matriz de MH con inclusión de FOp de PMMA, al adicionar fibra de vidrio mejora la resistencia, pero se debe tener cuidado en las cantidades a utilizar porque puede desfavorecer a la interfaz provocando una reducción de la resistencia.
3. A medida que aumenta la edad de las muestras, aumenta la resistencia.
4. En general, las muestras sin FOp tienen mayor resistencia que las muestras con FOp.

2.2.2 Transmisión óptica.

La *propiedad óptica* es un tipo de característica que describe el comportamiento de un material ante radiaciones electromagnéticas, en especial aquellas cuya longitud de onda se encuentra entre 400 y 700 nm. Aquella que el ojo humano detecta y constituye lo que se conoce como *luz* o *radiación luminosa* (Horna Palomino, 2015).

La *transmitancia óptica* es una de las técnicas más utilizadas en el análisis de las propiedades ópticas. Esta propiedad se define como la fracción de luz incidente en relación a una longitud de onda específica, que pasa a través de una muestra. Cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo translúcido, una parte de esa luz es absorbida por este, y otra fracción de ese haz de luz atravesará la muestra, según su transmitancia (González, 2010).

Para mayor detalle, se presenta esta propiedad en el capítulo 3, apartado 3.7.2. “Transmitancia Óptica”.

No se cuenta con ninguna normativa específica (nacional, regional o internacional) para el ensayo de la transmitancia óptica.

Son 11 investigaciones que se presentan a continuación. Los trabajos utilizan materiales muy variados para conformar las muestras de HT y tienen diferentes puntos de vista para abordar la propiedad *transmitancia óptica*. Por ello, para su análisis, se dividen en 4 categorías.

En la primera categoría de investigaciones, se estudió la transmitancia óptica con distancia horizontal fija entre la muestra y el detector.

Por ejemplo, en el trabajo de Zhou et al. (2009), para elaborar la matriz de las muestras de HT se utilizaron resina epoxi y carbón, e inclusión de un 4 % de FOp de PMMA. Para otra variante de conformación de las muestras de HT, utilizaron para la matriz un MH e inclusión de FOp de PMMA (diámetro no especificado – cantidad: 3,14 %, 3,80 %, 4,52 % y 5,3 %) en conjunto con una red de Bragg en fibra (FBG). No se menciona el tipo de equipo a utilizar.

Se observó que la transmitancia óptica se mantiene casi constante en toda la longitud de onda, para todas las cantidades de FOp. Las muestras con resina epoxi y carbón tienen menor transmitancia óptica que las muestras con MH. Además, en relación a la segunda opción (MH + FOp 4 %), aumenta la transmitancia óptica a medida que aumentan las cantidades.

En el trabajo de Soumyajit et al. (2013), la matriz es polimérica (epoxi y policarbonato) con agregados de grava o arena, además fibra de vidrio, sílice, sol de sílice coloidal e inclusión de FOp de PMMA en forma variable (1 % al 6 %, diámetro de 1 mm).

El equipo utilizado fue diseñado por los investigadores con dos tipos de luminarias (halógena e incandescente).

Se observó que la transmitancia óptica del HT en cada tipo de luz se mantiene casi estable en toda la longitud de onda, igual que en la investigación de Zhou. Además, se observó que tienen mayor transmitancia óptica las muestras con FOp al 6 %; con la luminaria halógena llega al 1,8 % y con luminaria incandescente al 2,6 %.

Para Momin et al. (2014), la matriz es un MH con inclusión, como primera opción, de varillas de vidrio (variables 1,5 %, 3 % y 4,5 %) y, como segunda opción, de FOp de PMMA (variables 0,5 %, 1 % y 2 %). El equipo fue diseñado por los investigadores.

Observaron que la transmitancia de luz es del 7 % a 10 % para muestras con FOp y del 0,2 % a 1,5 % para muestras con varillas de vidrio. La transparencia óptica de las muestras con FOp es mayor que las muestras con varillas de vidrio.

En el trabajo de Wang et al. (2016), prepararon muestras con matriz de MH de alto rendimiento y FOp de PMMA. Utilizaron materiales como cloruro de magnesio (98 % $MgCl_2 - 6H_2O$), óxido de magnesio (MgO) quemado a la luz con hidratación al 64,9 %, ceniza volante (FA) y humo de sílice (SF). Las FOp de PMMA se utilizaron de diámetros de 1,5 mm y 2,1 mm y 0,15 mm. Otros materiales incluían malla de fibra de vidrio, acetona, aditivo de acoplamiento, metacrilato de metilo y alcohol polivinilo. También agua de grifo y agua doblemente destilada. La FOp previamente se sumergió en solución de acetona y luego de 5 minutos se pasó por un aditivo de acoplamiento (% en peso = 0,5 %) por 10 minutos, y se secó para su uso posterior.

Concluyeron que cuando la cantidad de FOp aumenta de 4,1 % a 19,6 %, la transmisión óptica del HT aumenta desde 8,9 % a 48,2 %.

Se pudo observar una relación proporcional entre la transmitancia óptica y la cantidad de FOp de PMMA. El diámetro de la FOp de PMMA no parece influir en la transmitancia de la luz.

El estudio de Henriques et al. (2018) se realizó con una matriz en un MH de alto rendimiento e inclusión de FOp de PMMA (diámetro 0,4 mm – cantidad 2 %, 3,5 % y 5 %). El equipo fue diseñado por los investigadores. Con respecto al tiempo de del ensayo, no existe un estándar específico para este tipo de evaluación.

Concluyeron lo siguiente:

1. El contenido superior al 5 % de la FOp demostró ser difícil de realizar manualmente para llenar los huecos entre las FOp sin hacer daño. Si se pueden obtener muestras con FOp superiores al 5 % a través de un molde diseñado para este propósito, resulta teóricamente en una mayor transmisión de luz.
2. Entre las cantidades de FOp del 2 % y 3,5 %, hubo un aumento del 75 % en el contenido de FOp y un aumento de la transmisión de luz del 47 %.
3. Entre las cantidades de FOp de 3,5 % y 5 %, hubo un aumento del 43 % en el contenido de FOp y un aumento de la transmitancia óptica del 120 %.
4. La transmitancia óptica aumenta cuando el contenido de la FOp aumenta.

Roy et al. (2018) utilizaron un MH para la matriz e inclusión de FOp de PMMA (diámetro 1,0 mm – cantidad 0,75 %, 1,25 % y 1,75 %).

El ensayo utilizado fue diseñado por los investigadores.

Se concluyó que la adición de un mayor porcentaje de FOp (0,75 % a 1,75 %) aumenta la capacidad de transmisión de luz (38,87 % a 40,51 %).

En el trabajo de Juan y Zhi (2019), para la matriz utilizaron un MH de alto rendimiento e inclusión de resina poliéster insaturada (diámetro 22 mm – longitud variable: 20 mm, 60 mm y 105 mm). El equipo utilizado fue diseñado por los investigadores con un reflector LED como fuente de luz y un medidor de potencia óptico.

Concluyeron que el material resina tiene una excelente transmitancia óptica dentro del espesor de 100 mm, que puede llegar al 93 %, y con un espesor superior a 100 mm es del 60 %.

En esta primera categoría de investigaciones con distancia horizontal fija entre la muestra y el detector, se concluye lo siguiente:

1. El estudio de la transmitancia óptica se realiza con equipos diseñados por los propios investigadores.
2. No existe una normativa específica para su estudio.
3. La transmitancia óptica se mantiene casi constante en toda la longitud de onda, para todas las variables de muestras de HT.

4. Cuando aumenta la cantidad de FOp, aumenta la transmitancia óptica independientemente de su diámetro.
5. La FOp de PMMA tiene mayor transmitancia óptica que las varillas de vidrio.

En una segunda categoría de investigaciones, se estudió la transmitancia óptica con distancia horizontal variable entre la muestra y el detector.

Por ejemplo, en el trabajo de Li et al. (2015a), las muestras fueron conformadas con una matriz de MH de alta resistencia e inclusión de FOp de PMMA (diámetro 0,5 mm y 1 mm – cantidad de 1,23 % y 4.91 % en relación a la matriz).

Estudiaron la transmitancia óptica según la distancia entre las muestras y el equipo detector.

Se concluyó lo siguiente:

1. Para la potencia óptica, la transmitancia óptica disminuye a una distancia creciente entre el detector y la muestra.
2. Para la misma distancia óptica, la potencia aumenta con el aumento del número de FOp.
3. Con respecto al mismo número de FOp, el poder óptico de la muestra con FOp de gran diámetro es mayor que la muestra con FOp de menor diámetro.
4. La transmitancia de luz de las muestras disminuye al aumentar la distancia entre el detector y la muestra.

En otro trabajo de Li et al. (2015b), para la matriz utilizaron un MH de alta resistencia con tejido de FOp de PMMA (diámetro 0,5 mm y 1,0 mm). En la tabla 2.2 se presenta las variantes de la FOp que utilizaron entre el diámetro y la cantidad.

El equipo fue diseñado por los investigadores.

Se observó que la transmitancia óptica disminuye al aumentar la distancia desde la fuente de luz hasta la muestra.

Tabla 2.2 – Diámetro y porcentaje de FOp

∅ FOp (mm)	% FOp	Cantidad de FOp que detecta el equipo
1	1	1
1	2	2
1	3	3
1	4	4
0,5	0,25	1
0,5	0,5	2
0,5	0,75	3
0,5	1	4

Para la misma distancia, la transmitancia óptica aumenta gradualmente con el aumento de la cantidad de FOp. Para las diferentes cantidades de FOp, independientemente de la luz blanca o roja, cuando la distancia aumenta, la transmitancia óptica tiende a ser la misma. Esto se debe a que la luz emergente de cada FOp se dispersa, el punto se agranda al aumentar la distancia y la onda de luz que incide en la pequeña superficie de detección disminuye gradualmente.

En esta segunda categoría de investigaciones con distancia variable entre las muestras y el detector, se establece lo siguiente:

1. El tipo de fuente de luz no influye en la transmitancia óptica.
2. La transmitancia óptica disminuye gradualmente en relación a la distancia creciente entre el detector y la muestra.
3. Para una misma distancia, la transmitancia óptica aumenta, con el aumento de la cantidad de FOp.
4. Para la misma cantidad de FOp, la transmitancia óptica aumenta con FOp de mayor diámetro en comparación con FOp de menor diámetro.
5. Cuando se tiene diferentes cantidades de FOp, al aumentar la distancia, la transmitancia óptica se mantiene igual.

En la tercera categoría de investigaciones, se estudió la transmisión óptica con variación en el ángulo de incidencia de la luz, tanto horizontal como vertical, entre la muestra y el detector.

En el trabajo de Mainini et al. (2012), estudiaron el HT I-Light, cuya matriz es un MH y como elemento translúcido tiene resina PMMA. Manifestaron que tiene una transparencia de al menos 92 %. El equipo fue diseñado por los investigadores. Se estudió la transmitancia óptica con base en la variación del ángulo de incidencia de la luz en 15°, 30°, 34° y 60°, tanto en horizontal como en vertical.

Los resultados obtenidos con mayor transmitancia óptica fueron con un ángulo de luz de 0°; los medidos en el laboratorio son próximos al 17 % y los simulados son próximos al 15 %.

Se concluyó lo siguiente:

1. Los valores simulados y medidos no son totalmente adecuados en caso de condiciones de cielo soleado.
2. Los resultados simulados no están completamente de acuerdo con los medidos, especialmente para el ángulo de alta incidencia (45°), en que se obtiene valores que son aproximadamente la mitad de los esperados.
3. Las simulaciones de cielo soleado todavía están bajo optimización y no se presentan aquí.

Como conclusión para la tercera categoría de investigaciones, se establece lo siguiente:

1. El método computarizado propuesto no pudo expresar la distribución real de luz y sombra en una habitación, especialmente en condiciones de cielo soleado.
2. El comportamiento de transmitancia bidireccional del panel no se pudo reproducir completamente.

En una última y cuarta categoría de investigaciones se estudió la luminosidad natural de ambientes a través del HT en conjunto con la iluminación artificial.

Por ejemplo, en el trabajo de Ahuja y Mosalam (2017), se diseñaron muestras tipo panel de HT, con una matriz de MH ligero e inclusión de FOp de PMMA (diámetro 5 mm – cantidad 6 %).

Se diseñó un modelo computarizado (HVAC) para estudiar el rendimiento de la FOp. El algoritmo de trazado de rayos del panel HT se combina con un modelo de radiación solar para estimar la cantidad de luz solar que transmite el panel (modelo de cielo de Pérez). Además, se utilizó otro software, RADI-ANCE, que puede modelar luminarias personalizadas y definir la distribución de intensidad de luz.

Para los paneles de HT, se estableció una simulación de luz diurna y la iluminancia (en lux) se calculó con 12 sensores. Para la distribución de la iluminación interior con diferente intensidad de luz, se observó tanto en la habitación como en los simuladores que la FOp emite luz difusa. Luego, se aplicó un modelo aleatorio de ocupación (método de Monte Carlo de la cadena de Markov no homogéneo), una oficina con tres ocupantes, situada en Cory Hall, UC Berkeley, para predecir la necesidad de iluminación. La situación se describe utilizando dos parámetros:

- Perfil de probabilidad de presencia de ocupantes durante una semana típica.
- Movilidad (frecuencia de las personas que entran y salen).

Estos parámetros se utilizaron para capturar las probabilidades de transiciones dependientes del tiempo.

La investigación incluyó tres tipos de actividades de cambio de luz que se observaron en oficinas y edificios comerciales. Estos son: encendido a la llegada, encendido intermitente y apagado intermedio.

Se concluyó lo siguiente:

1. Los usuarios rara vez operan interruptores mientras han estado presentes durante algún tiempo en la habitación.
2. Se demostró que el cambio intermedio de un evento depende del umbral de iluminancia de los usuarios. Tan pronto como la iluminancia se redujo por debajo del umbral, la probabilidad de activación aumentó bruscamente entre 1 % y 4 %.
3. La probabilidad de un evento de apagado intermedio es mucho menor que un evento de encendido intermedio. Esto indica que los usuarios apagan sus luces principalmente saliendo de la oficina mientras mantienen las luces encendidas durante el resto del día.

Para la última y cuarta categoría de investigación, se concluye que, con la cantidad de FOp del 6 % en una pared de HT con orientación sur se puede reducir el consumo total de energía en aproximadamente 18 %, en comparación con una habitación completamente privada de luz solar.

Como conclusión final, en las cuatro categorías de estudio de la propiedad transmitancia óptica, se puede establecer lo siguiente:

1. No existen normas de elaboración de muestras, ni procedimiento de ensayo, ni equipo a utilizar para la propiedad transmitancia óptica.
2. La utilización de la FOp de PMMA tiene mayor transmitancia óptica.
3. El tipo de fuente de luz no influye en la transmitancia óptica.
4. Si aumentamos la distancia entre la muestra y la fuente de luz, disminuye la transmitancia óptica.
5. Si se aumenta la cantidad de FOp, aumenta la transmitancia óptica.
6. Hay que tener en cuenta la cantidad de FOp a utilizar, para mantener la unión de la interface matriz/FOp y no perder resistencia.
7. Es posible reducir el consumo de energía artificial utilizando HT.

2.2.3. Resistencia a alta temperatura

La *resistencia a alta temperatura* es la capacidad de un producto de mantener sus propiedades en presencia del fuego, por un tiempo determinado. Esta capacidad se determina según diferentes criterios de rendimiento. El objetivo de la resistencia al fuego es determinar el tiempo que un elemento o sistema constructivo es capaz de mantener las características relacionadas con su capacidad portante, integridad o aislamiento.

El H sometido a altas temperaturas muestra dos ventajas: es incombustible y es un buen aislante, al tener baja difusión térmica. No obstante, hay que tener en cuenta algunos problemas relacionados con la alta temperatura en el H: el deterioro de sus propiedades mecánicas, a causa de transformaciones físico-químicas que tienen lugar en el material durante el calentamiento y pueden suponer significativas pérdidas de resistencia, además del fenómeno de *spalling* (rotura superficial o desconchamiento), que implica la pérdida de material, como reducción de las dimensiones de la sección (Khoury, 2000).

Además, esta propiedad es importante para el HT, por la combinación de dos materiales totalmente distintos: el H es incombustible y la FOp es combustible (el material PMMA — polímero termoplástico— es inflamable, pero su emisión de humo es débil). El interés es poder observar su comportamiento y principalmente en la interfaz MH/FOp).

A la fecha, el único trabajo que estudia esta propiedad es el de Luisi (2015), en el que se realizaron muestras con una matriz de MH de alto desempeño e inclusión de FOp de PMMA

de artefactos decorativos (diámetro: 0,34 mm – cantidad: 5 %) y muestras sin FOp. El ensayo se realizó a los 28 días de edad.

Primeramente, se colocaron muestras en el horno a temperatura variada (100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C y 600 °C) por 24 h. Luego, se realizó el ensayo de resistencia a compresión según norma UNIT–ISO 679:2009.

- Se concluyó lo siguiente:

1. Las probetas a la edad de 28 días, con y sin la incorporación de FOp, experimentan una reducción de la resistencia a compresión a medida que aumenta la temperatura (de 100 °C a 600 °C).
2. Con el aumento de la temperatura, las muestras con FOp reducen más rápido su resistencia mecánica con respecto a las muestras sin FOp.
3. En las temperaturas iniciales, las probetas con FOp tienen mayor resistencia mecánica, en comparación a las probetas de referencia sin FOp. Pero en las temperaturas finales, la resistencia se revierte y se obtiene mayor resistencia mecánica en las probetas sin fibra óptica.
4. Los resultados obtenidos en las muestras con y sin FOp a diferentes temperaturas, si bien parecen ser diferentes, no difieren significativamente desde el punto de vista estadístico.

2.2.4. Absorción capilar

La *absorción capilar* es un caso especial de transporte inducido por la energía (tensión superficial) del agua actuando sobre los capilares del H. Entonces, el H ejerce acciones sobre las moléculas situadas en la superficie del líquido, provocando con estas el llenado de los espacios existentes en su masa (Tazawa, 1998).

El porcentaje de absorción, *sorptivity* o velocidad de ascensión capilar es una propiedad hidráulica fácilmente mensurable, que caracteriza la tendencia de un material poroso a absorber y transmitir agua a través de su masa por succión capilar (ACI Committee 549.2R-04, 2007).

Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y, por lo tanto, a los agentes agresivos ambientales (Schuter, 2008).

Para el ensayo de absorción capilar, algunas investigaciones mencionan las siguientes normas: NBR 15259 (ABNT, 2003), ASTM C1185-03 (ASTM, 2003) y EMPA-SIA 162/1 (ASTM C1585).

En Luisi (2015), se realizaron muestras con una matriz de MH de alto desempeño e inclusión de FOp de PMMA de artefactos decorativos (diámetro: 0,34 mm – cantidad: 5 %) y muestras sin FOp. El ensayo se realizó a edad de 28 días.

Se concluyó lo siguiente:

1. Los resultados muestran que la capacidad de absorción capilar aumenta considerablemente a la hora, en las mezclas con y sin FOp, reduciéndose considerablemente a las 24 h.
2. En probetas con FOp, si bien el agua absorbida va aumentando progresivamente hasta las 24 h, se observa menor diferencia a lo largo del tiempo en relación a las probetas tomadas como referencia (sin FOp).

En el estudio de Praveenkumar et al. (2017), las muestras se realizaron con una matriz de MH e inclusión de FOp de PMMA (diámetro: 2 mm – cantidad: 4 %).

El tiempo del ensayo fue de 24 horas. No se especifica las edades de las muestras.

Se concluyó que la absorción de agua de las muestras con FOp es mayor en comparación con las muestras sin FOp.

En el trabajo de Salih et al. (2018), las muestras se realizaron con una matriz de MH autocompactante con inclusión de FOp de PMMA (diámetros: 2 mm y 3 mm – cantidad: 4 %) y muestras sin FOp.

El ensayo se realizó con muestras a una edad de 28 días.

La absorción capilar promedio de agua de las muestras se midió utilizando los tres tipos de espesor en las muestras (15 mm, 25 mm y 50 mm).

Concluyeron lo siguiente:

1. En las muestras con FOp, a medida que aumenta el espesor de las muestras, aumenta el porcentaje de absorción capilar.
2. En las muestras con FOp con el mismo espesor, cuando aumenta el diámetro de la FOp, también aumenta el porcentaje de absorción capilar.
3. Las muestras con FOp con mayor espesor (50 mm) y con mayor diámetro (3 mm), tienen mayor porcentaje de absorción capilar.
4. En el caso de las muestras sin FOp, a medida que aumenta el espesor de las muestras, disminuye el porcentaje de absorción capilar.
5. Las muestras con FOp tienen una mayor absorción capilar que las muestras sin FOp.

Por último, en el estudio de Henriques et al. (2018), se realizaron muestras con una matriz de MH de alta resistencia con inclusión de FOp de PMMA (diámetro: 0,4 mm – cantidad: 2 %, 3,5 % y 5 %) dispuestas de manera ordenada, y muestras sin FOp. El ensayo se realizó con muestras de 28 días de edad. El tiempo del ensayo fue entre 10 y 90 minutos.

Se concluyó lo siguiente:

1. La absorción de agua capilar aumenta a medida que aumenta el contenido de FOp.

2. Las muestras con FOp tienen una mayor absorción capilar que las muestras sin FOp.
3. Estadísticamente, las muestras con FOp con cantidad de 0 % y 2 % pertenecen al mismo grupo, y con cantidad de 3,5 % y 5 % pueden considerarse en otro grupo.

Finalmente, se puede concluir lo siguiente:

1. La absorción de agua de las muestras con FOp es mayor en comparación con las muestras sin FOp. Por lo cual, la pérdida de peso de las muestras sin FOp es menor.
2. En las muestras con FOp, aumenta el porcentaje de absorción de agua y disminuye su densidad.
3. Con el aumento del contenido de la FOp, aumenta la absorción de agua. Esto puede ser porque la FOp es muy lisa, prácticamente impermeable y resbaladiza, puede dañar la zona de transición con la matriz.
4. Al tener mayor absorción de agua las muestras con FOp, significa que la inclusión de FOp conduce a la formación de poros o microgrietas y, por lo tanto, aumenta la absorción y reduce la densidad. Otro aspecto a considerar es que la superficie suave y lisa de la FOp debilita la unión en la zona de interfaz matriz/FOp.
5. Como las muestras con FOp pueden contener mayor porosidad, a medida que aumente la cantidad de FOp la muestra es más porosa, lo que facilita en mayor grado su deterioro.

En estas investigaciones desarrolladas por todo el mundo, las propiedades en estudio abarcan la resistencia a compresión, la transmitancia óptica, la resistencia a altas temperaturas y la absorción capilar. Para cada propiedad estudiada, en general se llegó a conclusiones similares.

Esto es apropiado para el material HT, considerando que cuenta con una buena estética por el paso de la luz al interior de habitaciones, combinado con que es un material resistente. Pero hay que cuidar la compactación, porosidad y la unión de la interfaz matriz/FOp, para no desfavorecer su deterioro, provocando una disminución de la resistencia mecánica.

Capítulo 3. Investigación experimental

3.1. Metodología

A partir de los antecedentes del HT, con la recopilación de bibliografía, normativas vigentes, patentes, datos, procedencia, aplicación y evolución para la industria de la construcción, en la parte experimental este trabajo se centra en comparar propiedades entre diferentes HT y el HC.

Por lo presentado en el capítulo anterior, la mayoría de los HT que se comercializan a nivel mundial son realizados a base de MH y FOp. Se cuenta con muestras de un HT europeo, que se denomina HTI, cuyo componente principal para la translucidez es la FOp. La caracterización de este H se toma como referencia para establecer la dosificación del HTA a evaluar, como también de H sin FOp (HC). Con base en información disponible (principalmente de patentes publicadas) del HTI que se ha utilizado en nuestro país y en estudios previos realizados por la autora de esta tesis, se elaboró un HT considerando diferentes variables, tales como diferentes tipos de cementos, de áridos finos y de FOp.

La patente del HTI obtenido publicada internacionalmente, establece que la FOp con diámetros muy pequeños son de vidrio y con diámetros mayores son de polímero: polimetilmetacrilato, poliestireno, polietileno tereftalato y otros plásticos. Su diámetro está entre un rango de 0,10 mm a 1 mm; preferentemente entre 0,25 mm y 0,50 mm, aunque lo informado por el fabricante en su página web establece un diámetro de 0,40 mm. Por esto, se estudia el diámetro de la FOp que se empleó en las muestras de HTI.

En nuestro país se dispone de cables de transmisión de datos para telecomunicaciones que importa e instala una empresa estatal, y también los que comercializan empresas privadas. Estas últimas importan y comercializan cables de datos, tiras de iluminación y artefactos decorativos cuyo principal componente es la FOp.

Por lo estudiado y presentado en el trabajo final de diplomado *Hormigón translúcido* de autoría de quien escribe esta tesis, los cables de FOp de la empresa estatal son monomodo; el índice de refracción es menor, por lo cual su transmisión es muy lenta (se utiliza en cableados de grandes distancias), y genera una luz tenue. Por ello, esta FOp no es apta para el estudio del HT, porque su diámetro es muy pequeño (hasta 0,10 mm) y genera una transmisión de luz muy baja.

Los cables de transmisión de datos de las empresas privadas, son FOp multimodo. Actualmente, en el mercado local se comercializan cables con FOp cuya procedencia es de Brasil y de China. Estos cables están conformados por un núcleo y revestimientos adecuados para la transmisión de luz. También se comercializa tiras para iluminación con FOp libres de protección, con un diámetro de 0,75 mm en longitudes de 2 m y 4 m. Además, se comercializa artefactos decorativos luminosos que cuentan con FOp, también libres de protección con características multimodo; no se cuenta con datos técnicos con relación a su FOp.

Preferentemente, todas estas FOp son elaboradas con polímeros, y por la variedad de FOp que se cuenta, se estudia en esta tesis las características físicas de aquellas a emplear en los ensayos.

Otro aspecto a tomar en cuenta, para llevar a cabo el objetivo principal de este estudio, es que se caracterizó el HTI que se ha empleado en nuestro país. Para ello, se estudió varias de sus

características: diámetro, tipo y cantidad de FOp; para el HTI, la resistencia a compresión (F_c), la transmitancia óptica (T), su resistencia a altas temperaturas y la absorción capilar.

Del mismo modo, se estableció las características físicas y mecánicas para el HTA elaborado con similar dosificación al HTI y un HC (sin FOp).

Las variables que se consideraron en el HTA y el HC son: diferentes tipos de cemento, diferentes tipos de árido fino y diferentes diámetros de FOp.

Luego, se compararon los resultados obtenidos del HTA y el HC, con los del HTI que se ha empleado en nuestro país.

A continuación, se presenta con más detalle las actividades realizadas:

Primeramente, se estudió las características físicas de la FOp del HTI y de la FOp disponible en nuestro país. Se determinó en la FOp su diámetro, el material constituyente y su densidad (peso específico). Estos ensayos se realizaron con el Ing. Químico Pablo Raimonda, del Instituto de Ensayo de Materiales (IEM), Departamento de Polímeros de Facultad de Ingeniería.

Con la obtención de todas las características mencionadas de las FOp, se realizaron comparaciones. Además, se estableció cuál de las FOp que se comercializan en nuestro país es la más apropiada para su utilización en la parte experimental de este estudio.

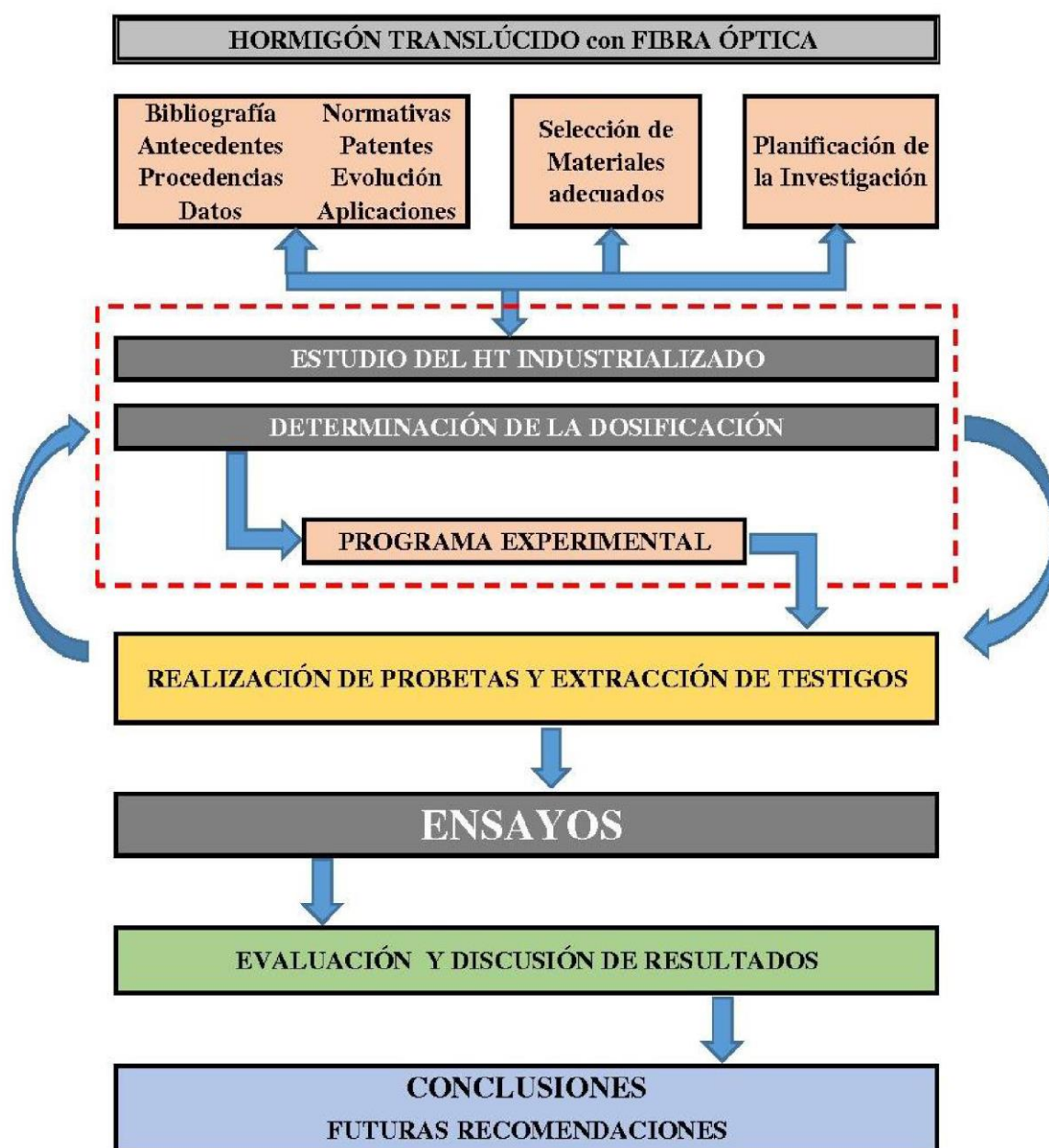
En relación al MH empleado para la elaboración del HTA, se debieron utilizar componentes similares y establecer aproximadamente la dosificación del HTI, de acuerdo a la patente publicada y a los resultados del estudio de las características físicas y mecánicas que se realizaron en las muestras. Por ello, es conveniente establecer previamente la cantidad de FOp que contienen las muestras. A partir de esto, se estableció las cantidades de los otros materiales que componen el HTI.

Con la dosificación determinada, con base en las muestras disponibles de HTI, se realizó un MH con variantes en el cemento, gris y blanco; en el árido fino, natural de río y de sílice; y con dos FOp seleccionadas. Con ellos se elaboraron muestras para su estudio comparativo con el HTI.

Se realizaron los ensayos en las muestras y testigos mencionados anteriormente; con los resultados obtenidos se realizó primeramente un análisis estadístico básico con el que se determinó la media, la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (CV). Luego, se comparó estadísticamente los resultados obtenidos entre los diferentes H: HC, HTA y HTI, mediante estudios de comparación de grupos. Finalmente, se establecieron correlaciones entre la resistencia a compresión y las otras propiedades estudiadas.

En la figura 3.1 se presenta el organigrama realizado para este trabajo, para el estudio de los HT.

Figura 3.1 - Organigrama de estudio del HT con fibra óptica en el Uruguay



3.2. Materiales

Como se mencionó anteriormente, el HTA se conformó con base en características semejantes al HTI, tomando en cuenta las patentes publicadas, información del fabricante y estudios previos realizados para su caracterización.

Los componentes para conformar el HTA realizado en la parte experimental fueron los siguientes:

1. *Cemento portland gris*: cemento portland normal ANCAP CPN 40, según norma UNIT 20:2017.

2. *Cemento portland blanco*: cemento portland blanco CIMSA Super White CPN 50 con áridos calcáreos y aditivos orgánicos e inorgánicos. Producto importado de Argentina. Se ajusta a la norma IRAM 50.000:2000 y a la norma IRAM 50.001:2000. Se adjunta ficha técnica en el anexo II.

3. Agregado fino:

- *Arena de Río (AR)*: Como agregado se utilizaron arena natural, proveniente de río.
- *Arena de Sílice (AS)*: Comercializada por una empresa privada en nuestro país: son bolsas de 2 kg con una granulometría no establecida por el fabricante, la cual fue determinada en esta tesis.

En ambos agregados finos, se realizó el estudio granulométrico, según norma UNIT-NM 248:2002. La figura 3.2 muestra fotos del estudio.

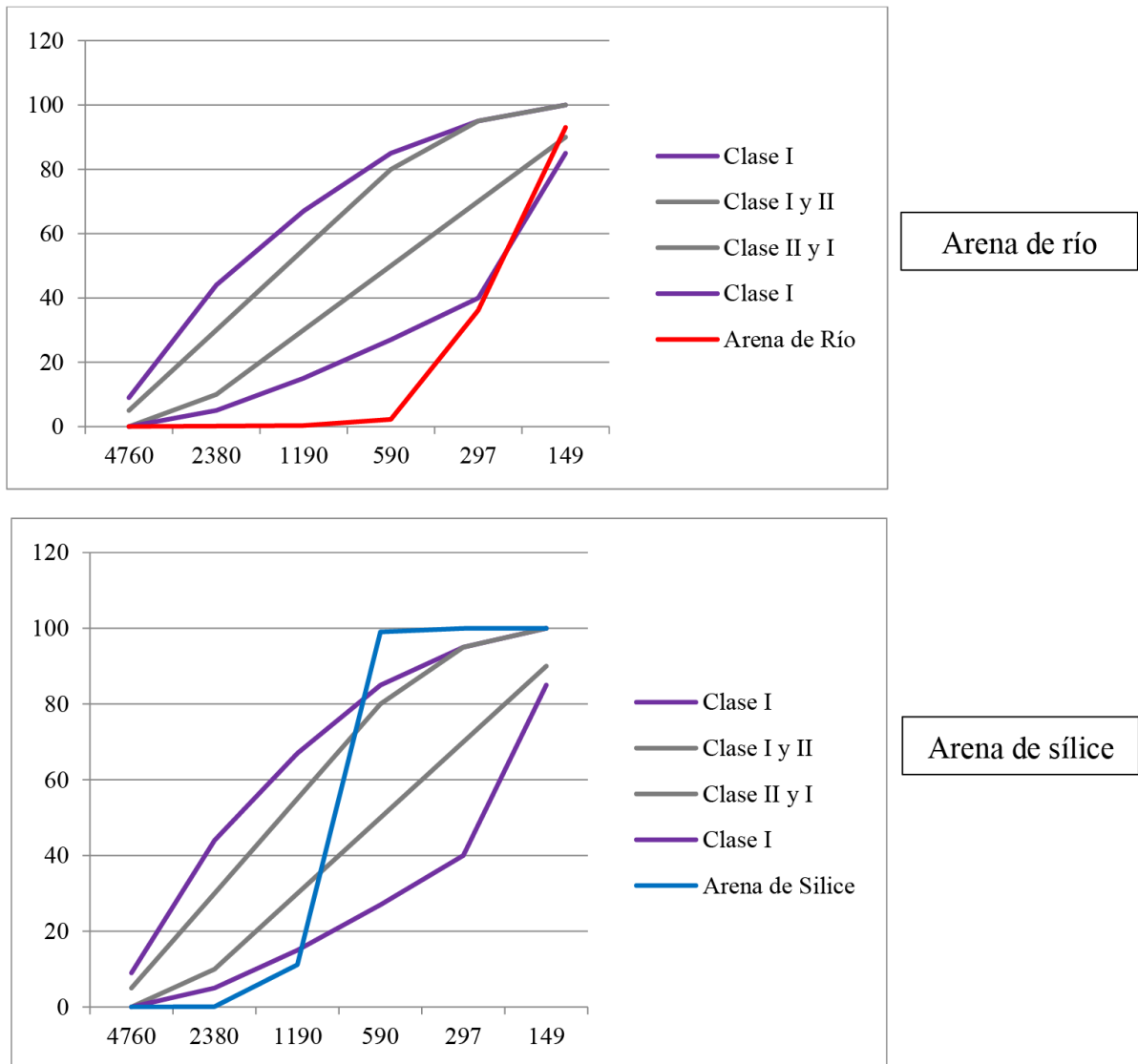
Figura 3.2 – Ensayo y tamiz para la clasificación granulométrica.



En la figura 3.3 se presentan resultados del estudio granulométrico:

- a) La AR cuenta con un módulo de finura de 1,32.
- b) La AS cuenta con un módulo de finura de 3,10.

Figura 3.3 – Gráfico de granulometría de los áridos.



4. *Aditivo*: superfluidificante con base en policarboxilatos.
5. *Agua*: de la red de agua potable, a temperatura ambiente.
6. *FOp*: por ser uno de los principales componente para la obtención del HT, debido al principio de confinamiento de la luz, se realizó un estudio previo, a los efectos de seleccionar las FOp más adecuadas para su empleo en el HT.

De acuerdo a las especificaciones de la patente internacional del HTI, las fibras empleadas son FOp, con diámetro en el rango de 0,10 mm a 1 mm (preferentemente entre 0,25 mm y 0,55 mm) y dispuestas en forma paralelo, y debe ser determinada en la parte experimental de esta investigación, al igual que sus características. La cantidad a emplear es entre un 2 % y un 10 % del volumen, preferentemente entre 5 % y 8 %.

Los tipos de FOp disponibles en nuestro país se presentan en la figura 3.4.

Figura 3.4 – Tipos de FOp disponibles en nuestro país.



3.3. Estudios previos realizados al HTI

En el estudio previo del HTI, se determinó la cantidad de la FOp y el área del árido fino de las muestras para establecer su dosificación aproximada, tomando en cuenta los datos de la patente publicada internacionalmente.

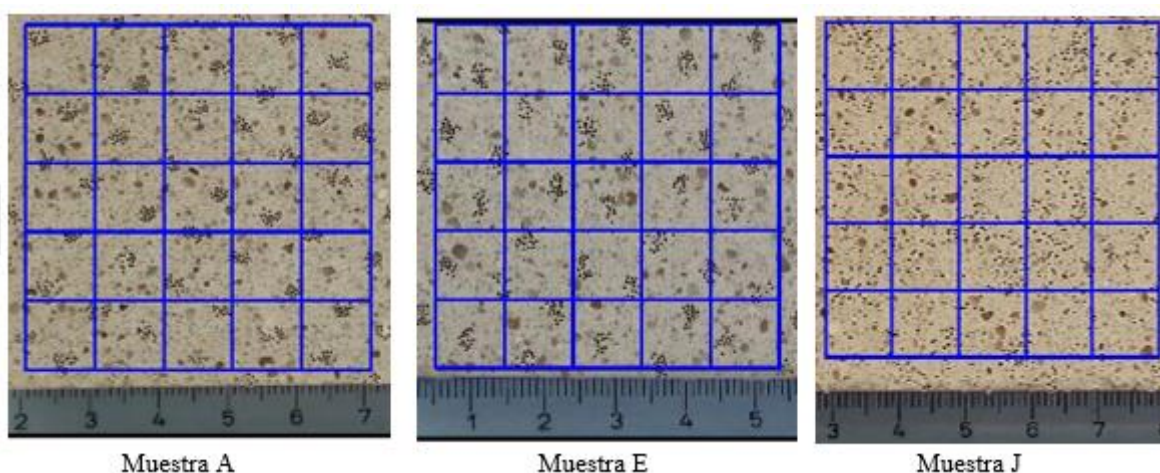
Conjuntamente con este estudio previo, se determinó el diámetro de la FOp de este H y de las FOp disponibles en nuestro país.

3.3.1. Cantidad de fibra óptica en el HTI

Para establecer la cantidad de FOp se estudiaron muestras seleccionadas sobre diez áreas de 50 mm × 50 mm en el HTI. En cada una de estas áreas, se recolectó la cantidad de FOp y luego se realizó un cálculo estadístico.

Un aspecto a tomar en cuenta en la recolección de la información de la FOp es que se realizó a simple vista con auxilio del software de diseño asistido por computadora AutoCAD 2014, realizando ampliaciones sucesivas para una mejor visualización y conteo. En la figura 3.5 se observan algunas de las áreas de las muestras seleccionadas del HTI que se estudiaron.

Figura 3.5 – Algunas muestras del HTI del estudio de cantidad de FOp



Los resultados obtenidos se observan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 – Cantidad de FOp en HTI

Muestra	Cantidad	Unidad	Media	σ	CV (%)
A	557	u	562,2	26,52	4,72%
B	580	u			
C	573	u			
D	578	u			
E	529	u			
F	587	u			
G	595	u			
H	563	u			
I	503	u			
J	557	u			

El coeficiente de variación es de 4,72 %, por lo cual son muestras con poca variabilidad.

A partir del resultado obtenido, se calculó el volumen de FOp de las muestras de HTI, el cual es del 2 %, tal como se muestra en la tabla 3.2; el porcentaje de MH es del 98 %. Además, la proporción de las FOp en la matriz debe ser adaptada de manera que esta garantice la resistencia requerida y la resistencia del bloque moldeado.

Como se expresó anteriormente, la patente internacional del HTI empleado en Uruguay establece una cantidad de FOp en el rango entre el 2 % y el 10 % del volumen de la matriz, preferentemente entre el 5 % y el 8 % para una transmitancia de luz óptima, por lo cual fue aceptada.

Tabla 3.2 – Cantidad de MH y FOp en el HTI

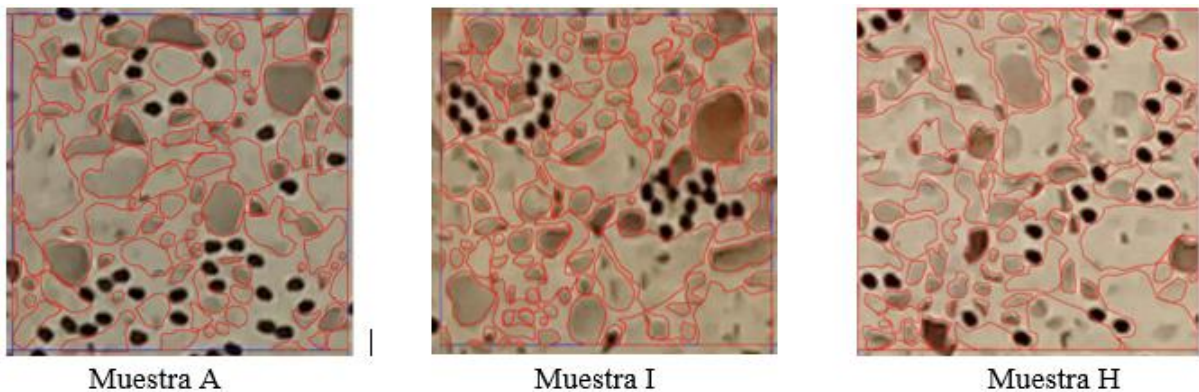
Contenido	Volumen (cm ³)	Porcentaje (%)
HTI	62,5	100
FOp	1,28	2
MH	61,22	98

3.3.2. Porcentaje de árido fino en el HTI

Se estableció el área del árido fino a los efectos de determinar la dosificación del HTI; la relación cemento/arena se realizó en muestras anteriormente seleccionadas. En el estudio se consideraron diez áreas de 10 mm × 10 mm. En cada una de estas áreas se recolectó el área aproximada; luego se realizó un cálculo estadístico. Un aspecto a tomar en cuenta es que la recolección de la información del cálculo de las áreas se realizó a simple vista con auxilio del software de diseño asistido por computadora AutoCAD 2014, mediante ampliaciones sucesivas para una mejor visualización y cálculos.

En la figura 3.6 se observan algunas de las áreas de las muestras seleccionadas del HTI.

Figura 3.6 – Ejemplo de dos muestras del HTI empleadas para establecer el área del árido fino



Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 3.3. Como el coeficiente de variación obtuvo un resultado aceptable, 6,90 %, entonces se consideró suficiente la cantidad de muestras utilizadas.

Tabla 3.3 – Árido Fino en el HTI

Muestra	Área (cm ²)	Media	S ²	σ	CV (%)
A1	0,58	0,628	0,0019	0,0433	6,9
B1	0,58				
C1	0,55				
D1	0,7				
E1	0,64				
F1	0,67				
G1	0,65				
H1	0,65				
I1	0,63				
J1	0,63				

A partir de este resultado obtenido, se calculó los volúmenes en porcentaje de los principales componentes, como el MH y la FOp ya obtenida anteriormente, expresados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 - Componentes aproximados del HTI

Contenidos	Área (cm ²)	Porcentaje (%)
Área HTI	1	100%
Área FOp	0,0204	2%
Área MH	0,9796	98%
Área Árido Fina	0,628	63%
Área Cemento	0,3516	35%

3.3.3. Diámetro de la fibra óptica

Se estudió los diámetros de todas las FOp por medio de un calibre para establecer su espesor (ver figura 3.7).

Figura 3.7 – Calibre para establecer espesores de fibra óptica



En el estudio del diámetro, se tomaron tres medidas para cada muestra, en un total de 20 muestras por cada FOp.

La FOp del HTI se denomina 'FOp HTI'; la FOp de los artefactos decorativos se denomina 'FOp DEC'; la FOp de las tiras se denomina 'FOp TIRA'; y las FOp de los cables de transmisión de datos se denominan 'FOp CABLE'. Las tres últimas (FOp DEC, FOp TIRA y FOp CABLE) fueron compradas en el mercado local.

Con los resultados de cada FOp se establecieron tablas, con los siguientes resultados:

- a) La tabla 3.5 corresponde a la FOp HTI. Se obtuvo un resultado con un diámetro medio de 0,34 mm. Se considera aceptable según lo que establece la patente internacional, ya que tiene que estar en el rango de 0,10 mm a 1 mm, preferentemente entre 0,25 mm y 0,55 mm. El coeficiente de variación fue de 10,99 %, por lo que se consideran muestras muy variables.

Tabla 3.5 - Diámetro de la FOp HTI

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Diámetro (mm)	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,35	0,3	0,3	0,3	0,35	0,3	0,4	0,4	0,35	0,3	0,35	0,3	0,3
	0,3	0,4	0,4	0,35	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,35	0,35	0,35	0,3	0,3	0,4	0,35	0,3	0,35	0,35	0,3
	0,3	0,4	0,35	0,3	0,4	0,3	0,3	0,35	0,3	0,4	0,4	0,35	0,3	0,3	0,45	0,35	0,3	0,35	0,4	0,3
Media	0,3	0,4	0,38	0,32	0,4	0,3	0,3	0,37	0,3	0,35	0,35	0,35	0,3	0,33	0,42	0,35	0,3	0,35	0,35	0,3
Media total	0,34																			
σ	0,0092																			
CV (%)	10,99																			

- b) En la tabla 3.6 se presenta el estudio de la FOp DEC. Se obtuvo un diámetro medio de 0,37 mm, que también se considera aceptable según el rango preferencial que establece la patente internacional. Con un coeficiente de variación de 11,53 %, también son muestras muy variables.

Tabla 3.6 –Diámetro de la FOp DEC

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Diámetro	0,35	0,35	0,35	0,35	0,4	0,3	0,4	0,45	0,3	0,35	0,35	0,35	0,3	0,35	0,4	0,4	0,45	0,4	0,4	0,35
	0,4	0,4	0,35	0,35	0,35	0,3	0,4	0,45	0,3	0,35	0,35	0,35	0,3	0,3	0,4	0,4	0,45	0,4	0,4	0,35
	0,4	0,4	0,35	0,35	0,3	0,35	0,4	0,45	0,35	0,3	0,35	0,35	0,3	0,3	0,4	0,4	0,45	0,45	0,4	0,35
Media	0,38	0,38	0,35	0,35	0,35	0,32	0,4	0,45	0,32	0,33	0,35	0,35	0,3	0,32	0,4	0,4	0,45	0,42	0,4	0,35
Media total	0,37																			
σ	0,0425																			
CV (%)	11,53																			

- c) La tabla 3.7 corresponde a la FOp TIRA. Se obtuvo un diámetro medio de 0,73 mm. Se considera aceptable según el rango preferencial que establece la patente internacional. Con un coeficiente de variación de 3,05 %, son muestras más homogéneas.

En este estudio, la FOp TIRA cuenta con diámetros variados desde 0,70 mm hasta 0,75 mm, generando un diámetro medio total de 0,73 mm. Pero la ficha técnica de la FOp TIRA establece un diámetro de 0,75 mm.

Tabla 3.7 –Diámetro de la FOp TIRA

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Diámetro	0,75	0,71	0,7	0,7	0,7	0,75	0,72	0,75	0,7	0,75	0,71	0,7	0,75	0,75	0,73	0,71	0,75	0,75	0,7	0,75
	0,75	0,70	0,7	0,7	0,7	0,75	0,74	0,75	0,7	0,75	0,70	0,7	0,75	0,75	0,74	0,72	0,75	0,75	0,7	0,75
	0,75	0,72	0,7	0,7	0,7	0,75	0,72	0,75	0,7	0,75	0,72	0,7	0,75	0,75	0,73	0,71	0,74	0,75	0,7	0,75
Media	0,75	0,71	0,7	0,7	0,7	0,75	0,73	0,75	0,7	0,75	0,71	0,7	0,75	0,75	0,4	0,4	0,45	0,75	0,7	0,75
Media total	0,73																			
σ	0,02																			
CV (%)	3,05																			

d) Por último, en la tabla 3.8 se presenta el estudio de la FOp CABLE. Se obtuvo un diámetro medio de 0,10 mm. Este dato se ubica en el límite mínimo del rango, pero no son consideradas desde el punto de vista preferencial según la patente internacional, con un coeficiente de variación de 0 %. Por esto, son muestras muy homogéneas, ya que todos los resultados obtuvieron el mismo valor. En definitiva, estas FOp son muy homogéneas en su diámetro y entre ellas.

Tabla 3.8 –Diámetro de la FOp Cable

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Diámetro	0,75	0,71	0,7	0,7	0,7	0,75	0,72	0,75	0,7	0,75	0,71	0,7	0,75	0,75	0,73	0,71	0,75	0,75	0,7	0,75
	0,75	0,70	0,7	0,7	0,7	0,75	0,74	0,75	0,7	0,75	0,70	0,7	0,75	0,75	0,74	0,72	0,75	0,75	0,7	0,75
	0,75	0,72	0,7	0,7	0,7	0,75	0,72	0,75	0,7	0,75	0,72	0,7	0,75	0,75	0,73	0,71	0,74	0,75	0,7	0,75
Media	0,75	0,71	0,7	0,7	0,7	0,75	0,73	0,75	0,7	0,75	0,71	0,7	0,75	0,75	0,4	0,4	0,45	0,75	0,7	0,75
Media total	0,73																			
σ	0,02																			
CV (%)	3,05																			

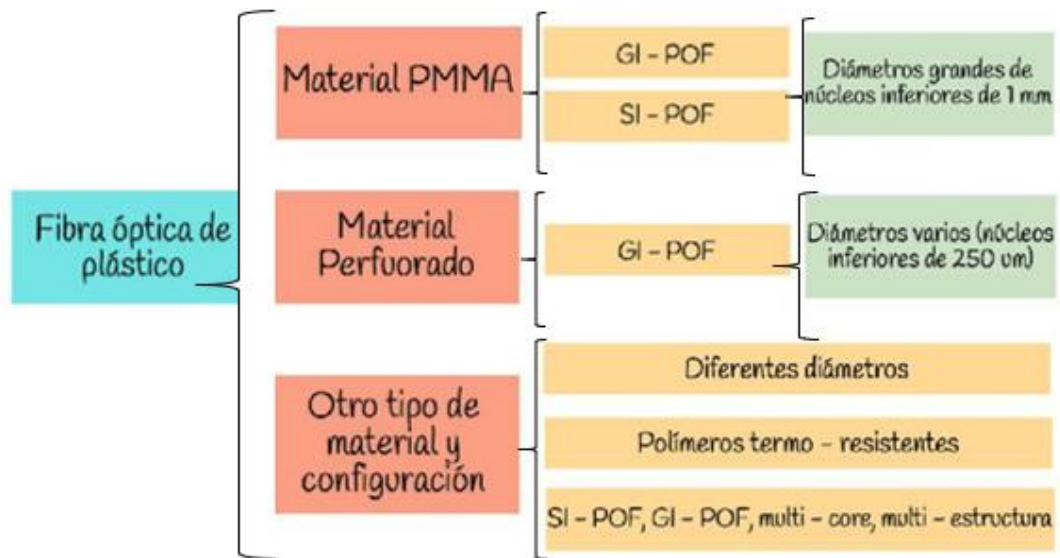
La FOp disponible en nuestro país con mayor similitud a la FOp HTI (0,34 mm) para la fabricación del HTA es la FOp DEC, con un diámetro de 0,37 mm. Por ello, las variables de FOp a utilizar por el momento para esta investigación son con diámetros de 0,37 mm (FOp DECO) y 0,75 mm (FOp TIRA).

Según la patente internacional del HTI, la primera se ubica en el rango preferencial (0,20 mm- 0,55 mm) y la segunda en el rango aceptable (0,1 mm-1,00 mm).

3.3.4. Material constituyente de las FOp

Primeramente, en la figura 3.8 se presenta una descripción general de los materiales frente a los tipos de FOp generalmente usados (Eberle, 2017).

Figura 3.8 – Descripción general de materiales para la FOp disponibles

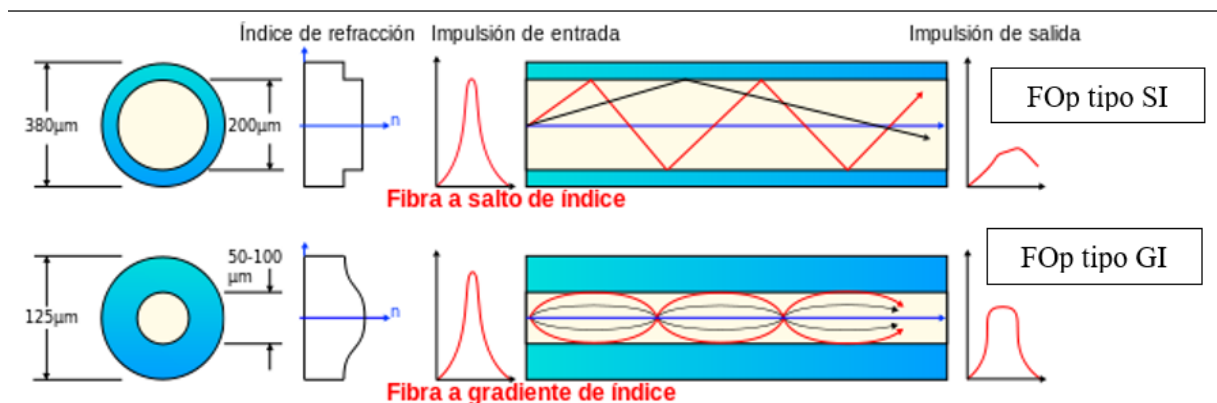


La FOp se fabrica con estructura de salto de índice (FOp-SI) o de índice gradual (FOp-GI), siempre hablando de FOp multimodo. La diferencia entre ambos tipos de fibra se representa de forma esquemática en la figura 3.9.

Las FOp-GI sufren de menor dispersión multimodal, por lo que pueden alcanzar mayores tasas de transmisión que con las FOp-SI.

En el caso de la estructura FOp-SI, durante la propagación los rayos de luz se confinan en el núcleo por medio de reflexiones, recorriendo una distancia distinta en función de su ángulo de incidencia. Por el contrario, en la estructura FOp-GI, el confinamiento de la señal se realiza mediante refracción, de tal forma que los rayos de luz recorren trayectorias parabólicas. Al igual que la anterior, los rayos recorren una distancia diferente en función de su ángulo de incidencia, pero debido a la diferencia de índices de refracción, los rayos que recorren mayor distancia viajan más rápido que los que recorren una distancia menor, compensándose de este modo la dispersión multimodal. Por esto, es indiferente para esta investigación si la FOp es del tipo SI o GI.

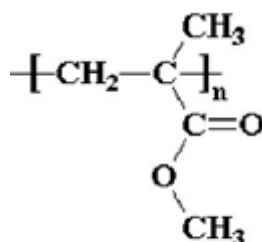
Figura 3.9 – Propagación de la luz para los dos tipos de FOp (SI-FOp – GI-FOp)



En general, el material típico utilizado en las FOp es polimetilmetacrilato (PMMA) como núcleo y polímero fluorado como cubriente.

El PMMA proviene de la familia de los polimetacrilatos que son polímeros de los ésteres de ácidos metacrílicos. La fórmula química de la unidad repetitiva es $C_5H_8O_2$ (Delgadillo, 2014). (figura 3.10).

Figura 3.10 Composición química del Polimetilmetacrilato (PMMA)



La FOp tiene una excelente claridad óptica, alto brillo en la superficie (es lisa) y es de alta transparencia. Además, transmite luz en el rango de 360 – 1000 nm, casi sin pérdida. Es estable a la luz solar y es clasificado como un material duro, rígido, pero quebradizo (Mendoza, 2008).

Para el estudio del material constituyente, se utilizó un equipo espectrofotómetro infrarrojo, llamado FTIR (figura 3.11). La espectroscopía infrarroja (espectroscopia IR) implica la interacción de la radiación infrarroja con la materia.

Figura 3.11 – Equipo espectrofotómetro infrarrojo.

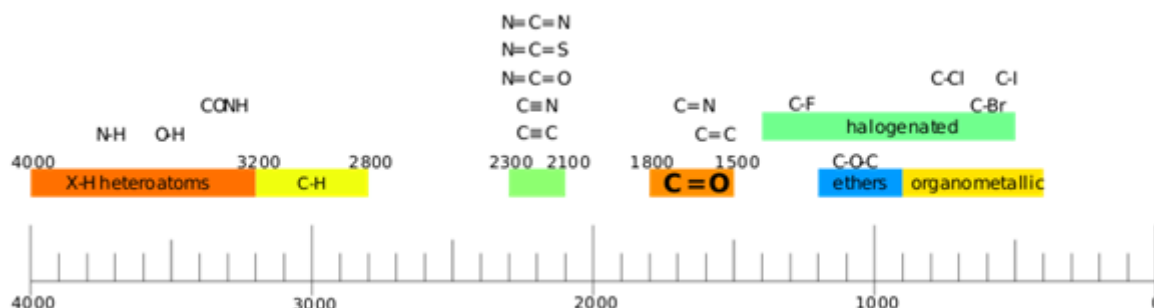


En la práctica, el espectro infrarrojo de una muestra se registra al pasar un haz de luz infrarroja a través de la muestra. Cuando la frecuencia del IR es la misma que la frecuencia de vibración de un enlace o colección de enlaces, se produce la absorción. El examen de la luz transmitida revela cuánta energía fue absorbida en cada frecuencia (o longitud de onda). Esta medición se puede lograr al escanear el rango de longitud de onda utilizando un monocromador.

Alternativamente, todo el rango de longitud de onda se mide utilizando un instrumento de transformada de Fourier, y luego se genera un espectro de transmitancia. La espectroscopía IR se usa a menudo para identificar estructuras, porque los grupos funcionales dan lugar a bandas

características tanto en términos de intensidad como de posición (frecuencia). Las posiciones de estas bandas se resumen en tablas de correlación, como se muestra a continuación en la figura 3.12.

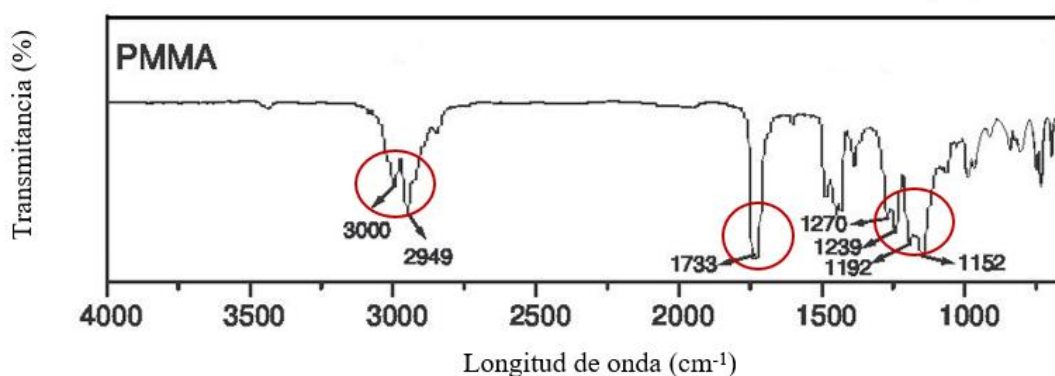
Figura 3.12 – Lista de las principales bandas de espectroscopia IR



La espectroscopía infrarroja del PMMA está en el rango de 4000 – 600 cm⁻¹, como se muestra en la figura 3.13. Se aprecian las bandas características:

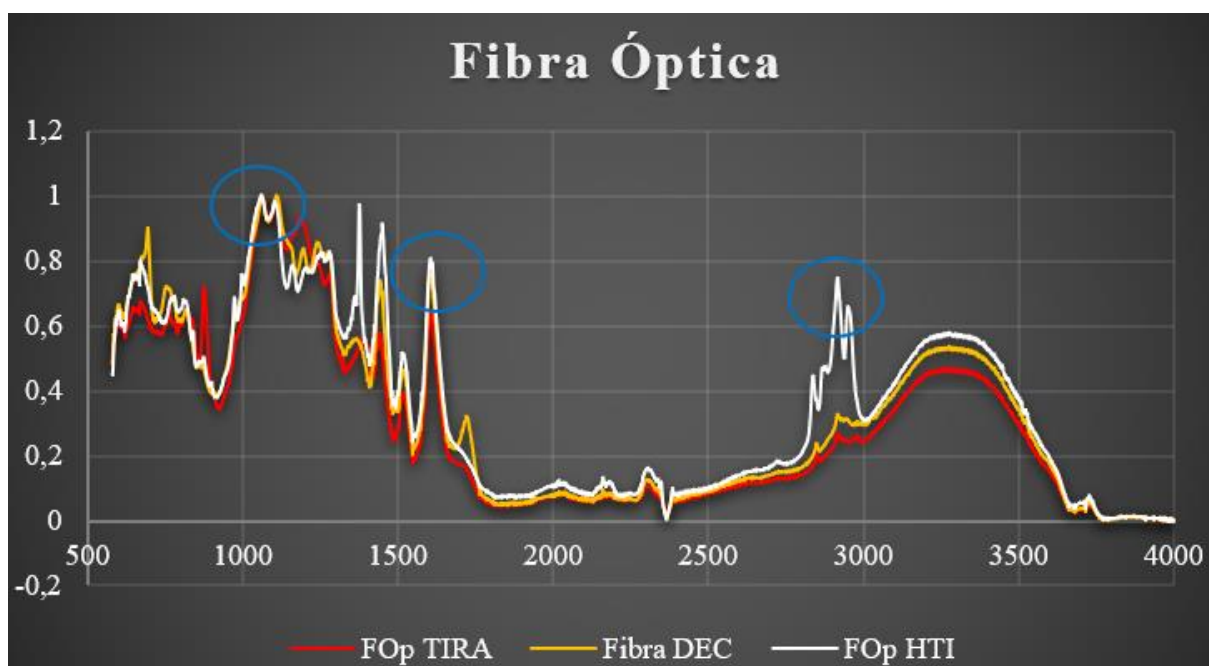
- 1) La absorción de banda a 3000 y 2949 cm⁻¹ corresponden al estiramiento de CH₂ (metileno) y CH₃ (metilo).
- 2) La absorción de banda a 1733 cm⁻¹ corresponde al estiramiento C=O (óxido de carbono).
- 3) La absorción de banda a 1270, 1239, 1192 y 1152 cm⁻¹ se atribuyen al estiramiento de C-O-C.

Figura 3.13 – Espectros de infrarrojo del PMMA



Se estudió la espectroscopía infrarroja de los tres tipos de FOp: FOp HTI, FOp DEC y FOp TIRA, y luego se juntaron en un solo gráfico (figura 3.14).

Figura 3.14 – Espectros de infrarrojo de las FOp en estudio.



Podemos concluir lo siguiente:

1. Se aprecia similitud con los picos de bandas características del PMMA.
2. El mayor pico de absorción de banda se encuentra en el rango entre 1000 – 1300 cm⁻¹, que coincide efectivamente con el mayor pico con el material PMMA.
3. Se observa leves diferencias entre las FOp, que podría ser por procesos diferentes de fabricación en sus componentes principales PMMA (núcleo) y polímero fluorado (cubriente).
4. Entre las tres gráficas, las que tienen mayor similitud son FOp DECO y FOp HTI.

Por lo tanto, la FOp disponible en nuestro país con mayor similitud en material constituyente a la FOp HTI (0,34 mm) para la fabricación del HTA es la FOp DEC (0,37 mm).

3.3.5. Densidad de la FOp

Para estudiar la densidad (peso específico) de un material se utilizó la norma ASTM D792-07. Este método de prueba describe la determinación de la gravedad específica (densidad relativa) y la densidad de los plásticos en forma de láminas, varillas, tubos o artículos moldeados. En este caso, se estudió la densidad de las FOp.

Para este estudio se utilizó el método A de la norma:

para probar plásticos sólidos en agua. Implica pesar una muestra de FOp en agua usando una platina con plásticos que son más livianos que el agua. Es adecuado para plásticos que están húmedos, pero que no se ven afectados por el agua.

El equipo que se usó es una balanza analítica (figura 3.15), marca AND HR-120, con una precisión de 0,1 mg y una precisión relativa en 0,05 % (es decir, 0,05 % de la masa de la muestra en el aire). La balanza está equipada con un soporte estacionario para el recipiente de inmersión por encima de la bandeja de balance. El equipo está ubicado en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería.

Figura 3.15 – Equipo para determinar la densidad relativa



El procedimiento del ensayo fue el siguiente:

- 1) Agua destilada a temperatura ambiente.
- 2) Pesarse la muestra en el aire.
- 3) Pesarse la muestra en el agua.
- 4) Calcular la gravedad específica del plástico:

$$Sp = \frac{a}{a - b}$$

a = masa aparente de la muestra en el aire

b = masa aparente de la muestra en el agua

- 5) Calcular la densidad del plástico:

$$D = Sp \times 997,6$$

La tabla 3.9 representa los valores obtenidos de la densidad relativa de las FOP.

Tabla 3.9 – Densidad relativa de la FOp

Muestra	Peso aire (g)	Peso agua (g)	Sp (g)	D (kg/m ³)
FOp TIRA	0,0254	0,00399	0,000544	0,543
FOp DECO	0,0056	0,0007	0,000027	0,027
FOp HTI	0,0052	0,0013	0,00002	0,02

Los resultados tienen coherencia, porque la densidad del material es la relación entre su masa y volumen. Por ejemplo, la FOp TIRA tiene mayor densidad debido a que tiene mayor peso: se debe a que tiene un mayor diámetro (0,73 mm). Las otras dos FOp (FOp DECO y FOp HTI) se asemejan en su densidad, porque sus diámetros son semejantes (0,37 mm y 0,34 mm respectivamente) y menores que la anterior.

La FOp disponible en nuestro país con mayor similitud en densidad relativa a la FOp HTI (0,34 mm) para la fabricación del HTA es la FOp DEC (0,37 mm). Por ello, las variables de FOp a utilizar en esta investigación son con diámetros de 0,37 mm (FOp DECO) y 0,73 mm (FOp TIRA).

3.4. Dosificación

Con los datos obtenidos de los porcentajes en áreas de los componentes presentados del HTI: FOp, AF y cemento, se estableció una relación aproximada de cemento/arena de 0,6. Dicho valor se puede considerar dentro del rango aceptable según la patente internacional del HTI (1/1-1/2-1/3). Entonces, para una mejor proporción de los materiales se considera una relación cemento/arena de 0,5 = 1/2.

A partir de este dato, se estableció la dosificación aproximada que se presenta en la tabla 3.10 y que tiene una relación agua/cemento próxima a 0,4.

Tabla 3.10 – Dosificación aproximada del HTA

Material	Cantidad (%)	Relación cemento/arena	Relación agua/cemento
Cemento	29	0,5	0,4
Árido fina	58		
Agua	11		
Fibra Óptica	2		

Con la dosificación planteada y la FOp seleccionada, se verificó el asentamiento del MH en estado fresco, y luego se ajustó la dosificación para la realización de las probetas de este estudio.

Como se dijo anteriormente, el MH debe tener una consistencia blanda, por lo que se define para ello un asentamiento de 15 ± 2 cm.

Este equipo se encuentra en el laboratorio del Instituto de Construcción (IC) de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (figura 3.16).

Figura 3.16 – Mesa de sacudidas y accesorios empleados.



El método de ensayo para la determinación de la consistencia es según la norma UNE-EN 1015-3:2000 / A1:2005 / A21:2007 (AENOR, 2000). Por ello, una vez finalizado el amasado se determinó la consistencia de la muestra mediante el asentamiento del tronco de cono en la mesa de sacudidas.

El procedimiento que se realizó es el siguiente: se limpia y humedece la superficie de la mesa y el molde cónico; después, se coloca el molde en el centro de la mesa. A continuación, se introduce en el molde dos capas de MH y se compacta 10 veces por cada capa con el compactador. La presión del compactador debe ser suficiente para asegurar un llenado uniforme y lograr una superficie plana. Luego, se levanta el molde cónico y se vibra a una frecuencia de un golpe por segundo, total 15 segundos, desde una altura de caída de 1,25 cm. Se determina la fluidez midiendo los diámetros perpendiculares, y estableciendo el promedio.

El asentamiento del MH se determinó por el aumento del diámetro promedio de la muestra, expresado como un porcentaje del diámetro de la base mayor del molde, según la siguiente fórmula:

$$F = \frac{DP - Di}{Di} \times 100$$

Dp = Diámetro promedio de las dos medidas realizadas.

Di = Diámetro inicial de la masa.

La consistencia del MH en estado fresco se determinó según lo indicado en la tabla 3.11. Se trató de obtener un asentamiento de 15 ± 2 cm, o sea, una consistencia blanda (entre 30 % y 70 %), a los efectos de que no requirir compactación del MH y que no influya para la incorporación de la FOp. Con la evaluación del asentamiento del MH se obtuvo la dosificación indicada en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 – Dosificación final del HTA

<i>Material</i>	<i>Cantidad (%)</i>	<i>Relación cemento/arena</i>	<i>Relación agua/cemento</i>	<i>Relación agua/agregados</i>
Cemento	29	0,5	0,4	0.1
Árido fina	58			
Aditivo	0.3			
Agua	11			
Fibra Óptica	2			

3.5. Programa experimental

Con la dosificación determinada en la sección anterior, para la elaboración de las muestras de HTA se realizó probetas cúbicas de 50 mm de arista que fueron ensayadas a una edad determinada de acuerdo al ensayo realizado. Se consideró como variables dos tipos de cemento: gris y blanco; dos tipo de agregado fino: natural de río y natural de sílice, y dos tipos de FOp en diámetro.

Mientras que en las muestras de HTI se extrajeron testigos prismáticos de 50 mm × 50 mm × 25 mm, el espesor de 25 mm es fijo dado que lo determina el propio material.

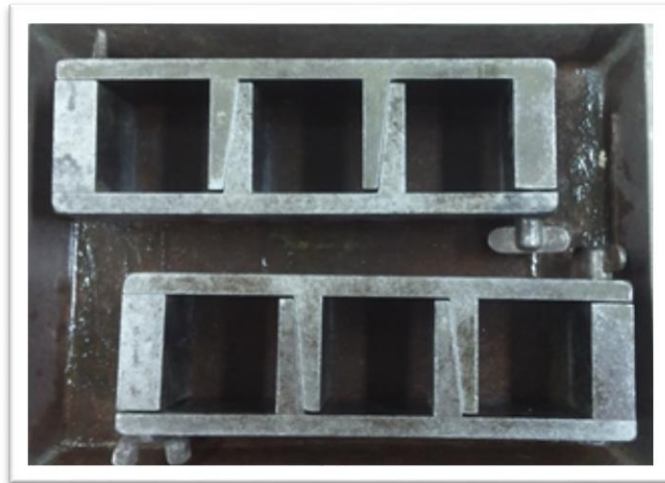
También se elaboró un HC (sin FOp) para realizar probetas cúbicas de 50 mm de aristas, tomando en cuenta solo las variables de cemento y árido fino, a una edad determinada igual a la del HTA.

En los testigos del HTI y en las muestras del HTA y del HC en estado endurecido, se estudió la resistencia a compresión (F_c), la transmitancia óptica (T), la resistencia a altas temperaturas y la absorción capilar.

3.6. Procedimiento de elaboración y curado de las muestras

Para su confección, se contó con moldes de acero (figura 3.17), con capacidad para elaborar 3 muestras cúbicas de arista 50 mm por cada molde.

Figura 3.17 – Molde para muestras cúbicas de 5 cm de arista



El MH como se dijo anteriormente, debió tener una consistencia blanda a los efectos de que no requiera mucha compactación para no alterar la ubicación de las FOp. Por tal motivo, se consideró un asentamiento de 15 ± 2 cm; se determinó en ensayos previos a la realización de cada probeta.

Durante el proceso de elaboración del HTA se tomó en cuenta la patente internacional (WO2007096083, 2007) del HTI.

El procedimiento y el curado, se realizó siguiendo la Norma UNIT-ISO 679:2009. En dicha Norma hace referencia a probetas prismáticas de $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$, pero las dimensiones fueron modificadas, adaptándose a las medidas del testigo HTI ($50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$). Esto se debe a que el espesor de 25 mm del testigo fue fijo, determinado por el propio material (referenciado en ítem 3.5. “Programa experimental”).

En la figura 3.18 se presentan algunos de los materiales (FOp, agua, aditivo) y equipos (cronómetro, balanza y mezcladora) que se emplearon para la elaboración de probetas para la elaboración de MH.

Figura 3.18 – Algunos de los materiales y equipos para la elaboración del MH



Luego se procedió a la separación de los dos tipos de FOp para incorporar en los moldes.

Al tener 6 moldes para cada tipo de FOp, primeramente se separan en 6 grupos por cada FOp (FOp1 y FOp2), luego por cada grupo se separan en 5 subgrupos, y así se estableció 5 capas en cada muestra elaborada (figura 3.19).

Figura 3.19 – Separación de los dos tipos de FOp para la realización de probetas.



En el llenado de los moldes, se procedió a la colocación del MH y de las FOp en capas; máximo 11 capas, 5 capas de FOp y 6 capas de MH. La primera capa fue de MH con un espesor aproximado de 6 mm, luego se procedió a la incorporación de una capa de FOp, y se continuó incorporando en forma intercalada los materiales capa por capa hasta llenar al borde del molde con MH. En la figura 3.20 se muestra el procedimiento realizado.

Figura 3.20 – Procedimiento del llenado de los moldes por capas del HTA



Luego, para el procedimiento del curado se esperó por 24 horas para su desmolde.

En la figura 3.21 se presenta el desmolde de las muestras y limpieza de los moldes de acero para su próximo uso.

Figura 3.21 – Proceso de desmoldado de las muestras y limpieza de los moldes de acero



Una vez desmoldadas las muestras, se colocaron 6 unidades dentro de un recipiente plástico separadas del fondo con agua saturada en cal por un período de tiempo según el tipo de ensayo a realizar.

En la figura 3.22 se presentan las muestras en el proceso de curado.

Figura 3.22 – Muestras en proceso de curado



3.7. Procedimientos de los ensayos

3.7.1. Resistencia a compresión

En primera instancia, la rotura a compresión del MH se realizó tomando en cuenta la Norma UNIT-ISO 679:2009, pero se modificaron las dimensiones de las probetas llevándolas a semejanza de los testigos HTI (50 mm × 50 mm × 25 mm), esto se debió a que su espesor de 25 mm fue fijo, determinado por el propio material. Por lo cual, con probetas y testigos en igualdad de condiciones en su dimensión, se obtuvieron resultados acordes.

La evaluación de la resistencia a compresión (F_c) se realizó con un total de 36 muestras cúbicas de 50 mm de arista a la edad de 28 días; luego fueron cortadas y pulidas, ajustándose a las dimensiones de los testigos de HTI (50 mm × 50 mm × 25 mm). Ello corresponde a 24 probetas con FOp de HTA con variables en cemento, árido fino y FOp; y 12 probetas de HC también con variables en cemento y árido fino pero sin FOp de acuerdo a la normas mencionadas anteriormente para su elaboración.

Además se extrajeron 3 testigos prismáticos de HTI de 50 mm × 50 mm × 25 mm de arista. Su antigüedad se determinó a la fecha del inicio de la construcción del edificio donde se instalaron los paneles HTI en nuestro país. Antigüedad 4 años. A partir de dicha antigüedad, se utilizó la fórmula de conversión a los 28 días (Metha y Monteiro, 1998).

En el ensayo, se ubican las muestras con la FOp perpendicular a la carga.

Para la determinación de la resistencia a compresión se emplearon dos equipos de la misma marca pero diferente modelo, debido a la disponibilidad de los laboratorios para la realización de los ensayos.

El equipo utilizado para las muestras de HTA es CONTROLS, modelo C46Z00, se ubica en el laboratorio del ICE de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de UdelaR (ver figura 3.23).

Figura 3.23 – Equipo CONTROL ubicado en la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de UdelaR



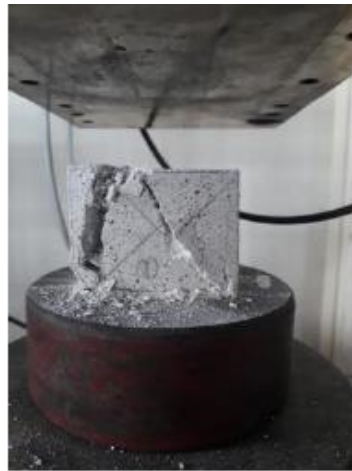
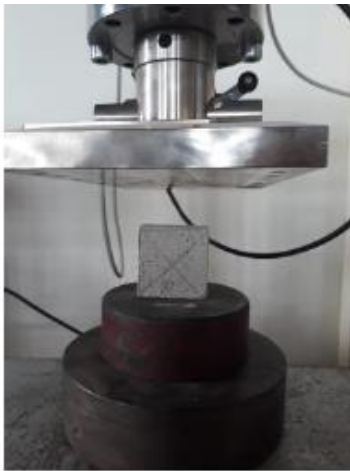
El equipo utilizado para los testigos HTI es CONTROLS, modelo C47C02, se ubica en el IEM de la Facultad de Ingeniería de UdelaR (ver figura 3.24).

Figura 3.24 – Equipo CONTROL ubicado en la Facultad de Ingeniería de Udelar



Los testigos prismáticos en la incorporación a la máquina no necesitaron preparación, debido a que el molde utilizado permite asegurar la planitud, perpendicularidad y paralelismo de las caras, como se observa en la figura 3.25.

Figura 3.25 – Testigos HTI y Muestras HTA en proceso de ensayo



Testigos de HTI



Muestras de HTA

Los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión se presentan en el capítulo 4. En las figuras 3.26 y 3.27 se observan algunas muestras en proceso de ensayo.

Figura 3.26 – Muestras en el ensayo de resistencia a la compresión



Figura 3.27 – Algunas muestras en el ensayo de resistencia a la compresión



3.7.2. Transmitancia óptica

Para la transmitancia óptica se elaboraron un total de 24 probetas cúbicas de HTA de 50 mm de arista, con las variables de cementos, áridos fino y FOp de acuerdo a las normas mencionadas anteriormente en su elaboración.

A las 24 horas se desmoldaron sin curar, luego se cortaron y pulieron ajustándose a las dimensiones de los testigos de HTI (50 mm × 50 mm × 25 mm).

Se extrajeron 3 testigos prismáticos de HTI de 50 mm × 50 mm × 25 mm de arista.

La transmitancia óptica se define como la fracción de luz incidente, a una longitud de onda específica, que pasa a través de un material.

Su expresión matemática es:

$$T = \frac{I}{I_0}$$

T = transmitancia óptica

I₀ = intensidad del rayo incidente

I = intensidad de la luz que proviene del material.

La transmitancia de una probeta está normalmente dada porcentualmente, definida como:

$$T (\%) = \frac{I}{I_0} \times 100 \%$$

No se encontró ningún tipo de norma para el ensayo de transmitancia óptica y tampoco se menciona ninguna norma en la literatura especializada del material HT presente en el capítulo 2. Además se menciona que los ensayos fueron realizados con equipos diseñados y construidos por los propios investigadores.

Para el ensayo en esta tesis, el equipo utilizado fue diseñado y confeccionado por la maestranda Arquitecta Erika Fross (figura 3.28). Su diseño admite ejemplares de secciones de hasta 50 mm de ancho × 50 mm de alto y un espesor variable, máximo 100 mm. Por lo cual se utilizaron probetas de MH con FOp (HTA) y testigos de HTI con dimensiones de 50 mm × 50 mm × 25 mm.

El principal objetivo del equipo óptico es el de realizar medidas de reflectancia y transmitancia. A grandes rasgos, el equipo actúa como un espectrofotómetro compuesto por un lado por una caja oscura con protección por dentro, para no permitir la salida de la luz. En ella se encuentra una fuente de luz (iluminación LED) en la que se ubica la muestra a una distancia determinada. Por otro lado, cuenta con un monocromador, un lector digital y una llave conectora con cable para conectar a la energía eléctrica.

Los resultados obtenidos del ensayo transmitancia óptica se presentan en el capítulo 4.

Figura 3.28 – Equipo para la transmitancia óptica



3.7.3. Resistencia a altas temperaturas

Para evaluar la resistencia a altas temperatura, se estudiaron tres temperaturas: 100 °C, 200 °C y 300 °C; para ello, fueron necesarias un total de 108 muestras cúbicas de 50 mm de arista, que fueron cortadas y pulidas ajustándose a las dimensiones prismáticas de 50 mm × 50 mm × 25 mm igual a los testigos de HTI. Corresponde 72 probetas con FOp de HTA y 36 probetas sin FOp de HC, con las variables de cementos y áridos finos y las FOp que las contengan, de acuerdo a las normas mencionadas anteriormente. Se extrajeron testigos prismáticos del HTI de 50 mm × 50 mm × 25 mm de arista para cada estudio de temperatura, un total de 9 testigos.

El equipo de ensayo utilizado fue un horno tipo mufla, con un controlador de temperatura y llaves de corte de seguridad; este equipo está ubicado en el laboratorio del Instituto de Construcción – IC de la Facultad de Arquitectura (ver figura 3.29).

Figura 3.29 – HORNO TIPO MUFLA

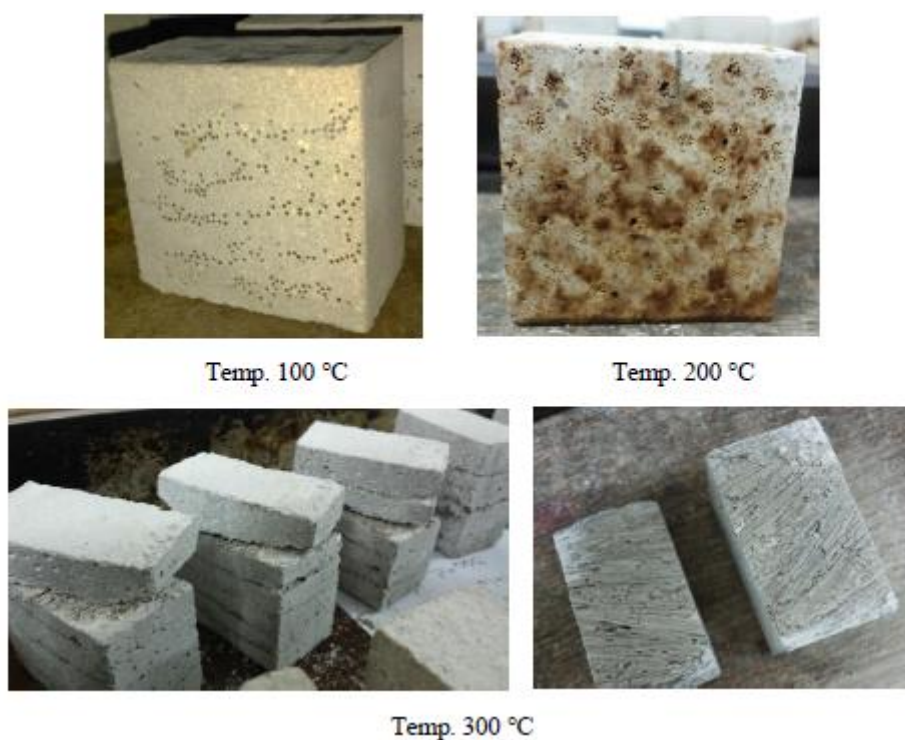


El ensayo de resistencia a altas temperatura se realizó a una edad de 28 días. Una vez que se desmoldaron las muestras, se procedió a la etapa de curado con agua saturada en cal, por un período de 19 días. Luego, se retiraron del curado y se secaron con un paño, para cortar y pulir dejándolas con dimensiones prismáticas de 50 mm × 50 mm × 25 igual a las de los testigos HTI y se dejaron a temperatura controlada (20 °C ± 2). A los 27 días, se colocaron las muestras en el horno tipo mufla por 24 horas. Terminado el plazo de 28 días, se dejaron enfriar para poder manipularlas, y a continuación se realizó el ensayo de resistencia a compresión según norma UNIT–ISO 679:2009.

Como se dijo anteriormente, se modificaron las dimensiones de las probetas HTA y HC llevándolas a las dimensiones del HTI, para respetar el concepto de igualdad en el ensayo entre probetas y testigos, y así poder observar resultados acordes. Con respecto a las propiedades del H, no solo sufrió deformaciones al cambiar la temperatura, sino también tuvo variaciones en su resistencia. Cuando la temperatura superó los 100 °C, el agua inicialmente añadida se evaporó, induciendo cambios en la constitución del H.

En la figura 3.30 se observa el comportamiento de las muestras frente a las altas temperaturas. Casi todas las muestras presentaron oscurecimiento en el propio H; principalmente con mayor incidencia en las muestras a temperatura de 200 °C con FOp. Las FOp quedaron chamuscadas hasta su desgrano en polvo.

Figura 3.30 – Muestras después del Horno por 24 h



Por ejemplo, como se observa en muestras a temperatura de 100 °C, la FOp parece inalterable a simple vista, y deja manchas poco visibles de chamuscado de la FOp en la superficie. A medida que aumenta la temperatura, en las muestras a temperatura de 200 °C se observa que la FOp se fundió en el H, generando una capa viscosa y dejando una superficie pegajosa, así como también manchas sobre la superficie de H.

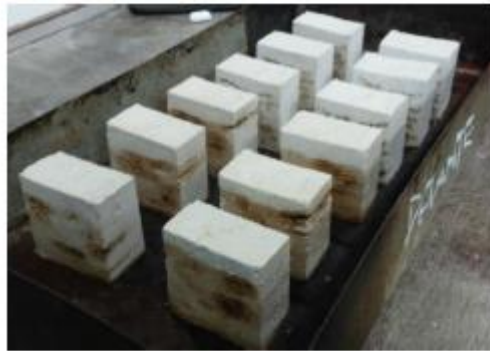
Aumentando la temperatura de las muestras a 300 °C, no se observó la FOp conformada como tal; se degradaron, dejando residuos tipo polvo. También, algunas muestras se desprendieron entre las capas de FOp y MH. Esto se debió a que la FOp desapareció y dejó huecos donde estaba, debido a que conformaba una única masa con el MH.

En la figura 3.31 se exponen las bandejas con las muestras sacadas del horno.

Figura 3.31 – Bandejas con las muestras a las diferentes temperaturas que se sacaron del horno.



Temp. 100 °C



Temp. 200 °C



Temp. 300 °C

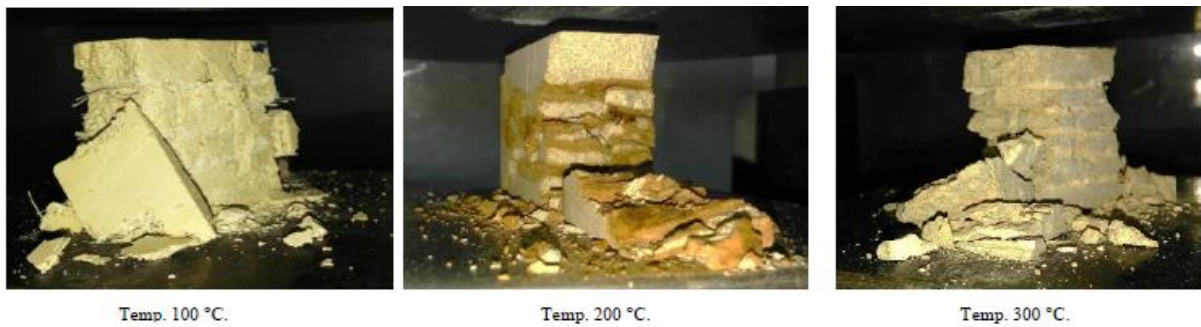
Una vez terminado el procedimiento de la exposición a altas temperaturas en el horno por 24 horas, se dejaron enfriar las muestras para luego proceder al ensayo de resistencia.

El equipo utilizado fue el mismo que se utilizó para la resistencia a compresión, ubicado en el laboratorio del IC de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (figura 3.23).

Los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a alta temperatura se presentan en el capítulo 4.

En la figura 3.32 se observan algunas de las muestras en el ensayo.

Figura 3.32 – Muestras de diferentes temperaturas en el ensayo de resistencia a la compresión



3.7.4. Absorción capilar

El ensayo de absorción se realiza por capilaridad. Los fenómenos capilares influyen en los mecanismos de transporte de líquidos en el H, dadas las características de su sistema de poros, que puede asimilar a un conjunto de tubos cilíndricos paralelos y de muy pequeño espesor. La absorción capilar es el mecanismo de transferencia de líquidos más rápido. Una herramienta confiable para caracterizar la estructura de poros en forma comparativa es la determinación de la capacidad de absorción capilar.

Para el ensayo de absorción capilar de agua se realizaron 36 probetas cúbicas de 50 mm de arista, que luego fueron cortadas y pulidas ajustándose a las dimensiones de los testigos de HTI de 50 mm × 50 mm × 25 mm. Corresponde 24 probetas con FOp de HTA y 12 probetas sin FOp de HC, con las variables de cementos, áridos finos y por último FOp para las que contengan.

Se extrajeron 3 testigos prismáticos de HTI de 50 mm × 50 mm × 25 mm de arista. Las dimensiones de las probetas de HTA y HC están condicionadas a la de los testigos HTI, para así poder tener el concepto de igualdad de dimensiones entre probetas y testigos; se obtiene resultados acordes.

Para determinar la capacidad de absorción capilar del MH en estudio a los 28 días de edad se utilizó la norma Swiss Standard-SIA 162/1 (ASTM C1585) – Succión Capilar.

Previamente, a los 21 días de la fecha estipulada, se quitaron las muestras del curado de agua saturado en cal, se secaron con un paño y luego se dejaron secar a temperatura ambiente por un período de 7 días hasta tener un peso constante.

Posteriormente, las muestras se colocaron en un recipiente, separadas del fondo, y con una altura de agua de 3 cm ± 1 mm.

Se recolectaron los datos para el ensayo, en cuanto al peso:

1. En estado seco
2. Con agua, a la hora (60 minutos)
3. Con agua, a las 24 horas (1440 minutos)

A los tiempos estipulados, las muestras en agua se sacaron con un paño, se pesaron y se determinó su masa. Para cada muestra o testigo, en el instante de la lectura (t), se determinó el incremento de la masa.

Todo el procedimiento desarrollado se observa en la figura 3.33.

Figura 3.33 – Procedimiento del ensayo de absorción



A partir de las leyes de Darcy y de Laplace, es posible deducir que el peso de agua absorbida por unidad de superficie (W/A) en el tiempo (t) se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{W}{A} = S \times \sqrt{t}$$

S = capacidad de absorción capilar.

A = área de la muestra

W = peso de agua absorbida

Los resultados obtenidos del ensayo de absorción capilar se presentan en el capítulo 4.

Capítulo 4. Resultados obtenidos y discusión

En este capítulo se presentan, analizan y discuten los resultados de los ensayos expuestos en el capítulo 3, correspondientes al estudio realizado sobre muestras de HTA (hormigón translúcido artesanal), con las variables en cemento, árido fino y fibra óptica (FOp) mencionadas en ese capítulo, de HC (hormigón convencional sin fibra óptica) y de testigos de HTI (hormigón translúcido industrializado).

Se consideraron 12 variantes para las muestras realizadas, que se denominan: GR0, GR1, GR2, GS0, GS1, GS2, BR0, BR1, BR2, BS0, BS1 y BS2, de acuerdo a las variables presentadas. Cabe observar que, de acuerdo a la denominación adoptada, el HC con sus diferentes variables se designó como GR0, GS0, BR0, BS0, mientras que el resto corresponde al HTA. Para cada variante se realizó como mínimo 3 probetas para cada tipo de ensayo efectuado.

En la figura 4.1 se presenta la composición y nomenclatura para cada resultado de muestras.

Figura 4.1 - Nomenclatura de las Muestras para el HTA

<i>Composición de las muestras</i>	<i>Nomenclatura</i>
GR0 = G + R + 0	G = Cemento portland Gris
GR1 = G + R + 1	B = Cemento Blanco
GR2 = G + R + 2	R = Arena de río
GS0 = G + S + 0	S = Arena de sílice
GS1 = G + S + 1	0 = Sin Fibra Óptica
GS2 = G + S + 2	1 = Fibra Óptica tipo 1
BR0 = B + R + 0	2 = Fibra Óptica tipo 2
BR1 = B + R + 1	
BR2 = B + R + 2	
BS0 = B + S + 0	
BS1 = B + S + 1	
BS2 = B + S + 2	

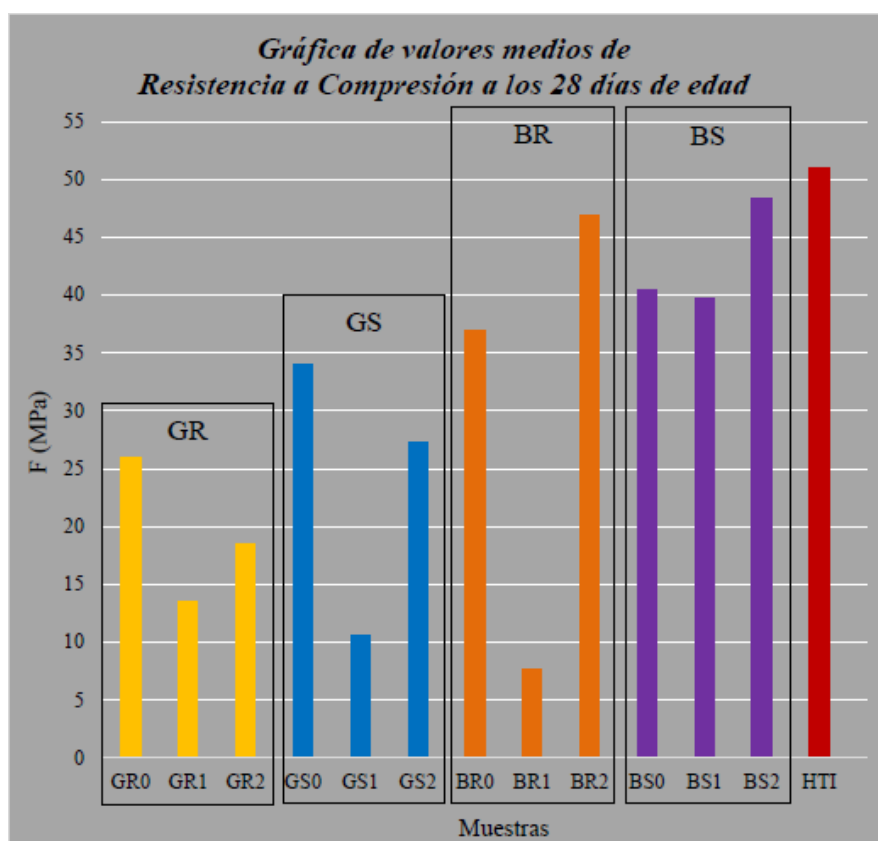
4.1. Resistencia a compresión

Los parámetros estadísticos básicos de los resultados obtenidos de la resistencia a compresión a 28 días de edad se presentan en la tabla 4.1, siendo F_c la resistencia media, σ la desviación estándar y CV el coeficiente de variación.

La tabla 4.1 presenta los valores y el gráfico de los resultados de la resistencia a compresión media de las diferentes muestras estudiadas.

Tabla 4.1 - Resultados y gráfica de la resistencia a compresión a los 28 días

Muestra	F_c media (MPa)	σ (MPa)	CV (%)
GR0	25,9	1,7	6,58
GR1	13,56	1,13	8,33
GR2	18,48	1,8	9,74
GS0	34	0,59	1,73
GS1	10,57	0,88	8,35
GS2	27,3	1,4	5,14
BR0	36,95	3,55	9,62
BR1	7,74	0,59	7,69
BR2	46,97	2,48	5,27
BS0	40,48	1,76	4,35
BS1	39,69	0,19	0,47
BS2	48,31	2,69	5,56
HTI	50,92	0,67	1,31



A continuación, con los valores medios obtenidos se realizó un análisis comparativo, primeramente de todos los resultados y luego de los diferentes grupos de acuerdo a las variables utilizadas. Para ello, se utilizó como herramienta estadística el análisis de varianza, que permite contrastar la hipótesis nula de que los grupos son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que sean diferentes.

4.1.1. Comparación entre todos los resultados HTA – HC – HTI

En la tabla 4.1 se muestra que:

- El resultado con mayor resistencia fue el HTI con 51 MPa.
- Tuvo mayor resistencia a compresión el HTI que el HTA sin y con FOp

A partir de estas observaciones generales, se realizó una comparación entre todos los grupos HTA.

4.1.2. Comparación entre los resultados HTA y HC

- En general, los resultados con FOp de mayor espesor tienen mayor resistencia que los resultados con FOp de menor espesor.
- El resultado con menor resistencia es el BR1 con 8 Mpa y el resultado con mayor resistencia es el BS2 con 48 Mpa.
- En general, los resultados con cemento blanco tienen mayor resistencia que con el empleo del cemento gris.
- En general, los resultados con arena de sílice tienen mayor resistencia que con el empleo de la arena de río.

En la tabla 4.2, del análisis de varianza de todos los resultados obtenidos de HTA y HC: la columna F presenta el valor del estadístico de prueba y la columna probabilidad entrega el menor nivel de significación para rechazar la hipótesis nula o hipótesis de trabajo de igualdad de medias. Como la probabilidad es mayor que 0,05, no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe diferencia estadísticamente significativa entre todos los resultados. Presentan mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre los grupos.

Tabla 4.2 – Análisis de varianza de todos los resultados obtenidos de HTA y HC

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	938,25	3	312,75	2,01	0,19	4,07
Dentro de los grupos	1244,71	8	155,59			
Total	2182,19	11				

4.1.3. Comparación entre los resultados GR y GS, variable en común: cemento gris (G)

La figura 4.1 muestra que:

- Los resultados en muestras sin FOp son las que tienen mayor resistencia; con el empleo de la FOp la resistencia a compresión disminuye en comparación con los resultados de las muestras sin FOp.
- Las muestras con la variable FOp de mayor espesor es la que tiene mayor resistencia.

- En general, el grupo GS, que contiene arena de sílice, tiene mayor resistencia en comparación con el grupo GR, que contiene arena de río. Es una excepción la muestra GR1, que tiene mayor resistencia que la muestra GS1.

Del análisis de varianza de los resultados presentados en la tabla 4.3 surge que la probabilidad es mayor que 0,05, entonces no se rechaza la hipótesis. El valor F es mucho menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados de los grupos estudiados. Los resultados no se comportan en forma similar, porque el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre los grupos.

Tabla 4.3 – Análisis de varianza de los resultados obtenidos empleando cemento gris

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	32,34	1	32,34	0,35	0,59	7,71
Dentro de los grupos	368,44	4	92,11			
Total	400,78	5				

4.1.4. Comparación entre los resultados BR y BS, variable en común: cemento blanco (B)

En la figura 4.1 se muestra que:

- Las muestras con mayor resistencia son las que incorpora FOp de mayor espesor (FOp2), que además se aproximan al resultado HTI.
- Comparando los resultados sin FOp con el empleo de la FOp más fina (FOp1), la resistencia disminuye, y aumenta con la FOp de mayor espesor (FOp2).
- El grupo BS tiene mayor resistencia que el grupo BR.

En la tabla 4.4, la probabilidad es mayor que 0,05, entonces no se rechaza la hipótesis. El valor F es mucho menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los dos grupos. Los dos resultados no se comportan en forma similar, porque el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre los grupos.

Tabla 4.4 – Análisis de varianza de los resultados obtenidos empleando cemento blanco

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	225,95	1	225,95	1,03	0,37	7,71
Dentro de los grupos	876,28	4	219,07			
Total	1102,24	5				

4.1.5. Comparación entre los resultados GR y BR, variable en común: arena de río (R)

La tabla 4.1 muestra que:

- En general, el grupo BR tiene mayor resistencia que el grupo GR, a excepción del resultado BR1 que tiene menor resistencia que el GR1.
- El resultado BR2 es el de mayor resistencia, con 47 MPa, y el resultado BR1 es el de menor resistencia, con 8 MPa. Ambos pertenecen al grupo BR.

Del análisis de varianza de los resultados presentados en la tabla 4.5 surge que la probabilidad es mayor que 0,05, entonces no se rechaza la hipótesis. El valor F es mucho menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados de los grupos estudiados. Los resultados no se comportan en forma similar, porque el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre los grupos. En relación a ello cabe observar que en el grupo GR, GR1 presenta resistencia mucho menor en comparación a GR0, que es el de mayor resistencia. Con mayor significación, ocurre lo mismo en el grupo BR, donde la resistencia de BR2 es mucho mayor que la de BR1 (que presenta la menor resistencia de todos los grupos).

Tabla 4.5 – Análisis de varianza de los resultados obtenidos empleando arena de río

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	189,51	1	189,51	0,83	0,41	7,71
Dentro de los grupos	908,05	4	227,01			
Total	1097,56	5				

4.1.6. Comparación entre los resultados GS y BS, variable en común: arena de sílice (S)

En la tabla 4.1 se muestra que:

- El grupo BS tiene mayor resistencia que el grupo GS.
- El resultado BS2 es el de mayor resistencia, con 48 Mpa, y el resultado GS1 es el de menor resistencia, con 11 Mpa; pertenecen a diferentes grupos.

En la tabla 4.6 se observa que la probabilidad es levemente mayor que 0,05, pero no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los dos grupos. Los dos resultados no se comportan en forma similar, porque el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan mayor variación los resultados entre grupos que dentro de los grupos.

Tabla 4.6 – Análisis de varianza de los resultados obtenidos empleando arena de sílice

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	534,12	1	534,12	6,35	0,07	7,71
Dentro de los grupos	336,66	4	84,17			
Total	870,78	5				

4.1.7. Comparación entre los resultados HC sin FOp

En la tabla 4.1 se muestra que:

- Las muestras realizadas con cemento blanco tienen mayor resistencia a compresión que las realizadas con cemento gris.
- En los resultados presentados de resistencia a compresión se observa que las muestras con mayor resistencia son las realizadas con cemento y arena de sílice (BS0) mientras que la menor resistencia a compresión se obtiene con cemento gris y arena de río (GR0).

En la tabla 4.7 se presenta el análisis de varianza de todos los resultados obtenidos sin FOp (en los casos anteriores se había empleado la media para el análisis). La probabilidad es menor a 0,05, por lo cual se rechaza la hipótesis. El valor F es mayor al valor crítico para F, por lo cual existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Presenta una mayor variación de resultados entre grupos que dentro de los grupos. Ello se demuestra claramente observando que la muestra de mayor resistencia es BS0 (cemento blanco + arena de sílice) que se aproxima al valor de mayor resistencia HTI y la de menor resistencia es GR0 (cemento gris + arena de río); ambas pertenecen a diferentes grupos.

Tabla 4.7 – Análisis de varianza de los resultados obtenidos sin FOp (HC)

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	374,06	3	124,7	6,36	0,02	4,07
Dentro de los grupos	156,96	8	19,62			
Total	531,06	11				

4.1.8. Comparación entre resultados de HTA con FOp

En la tabla 4.1 se muestra que:

- Entre las muestras HTA, el resultado con mayor resistencia es la BS2.
- Las muestras con FOp de mayor espesor tienen mayor resistencia que las muestras con FOp de menor espesor.
- Con la FOp de menor espesor (FOp1), disminuye la resistencia empleando GS en comparación con GR; continúa disminuyendo en BR y aumenta considerablemente en BS.

- Con la FOp de mayor espesor (FOp2), aumenta la resistencia a compresión en GS en relación al resultado GR; continúa aumentando con BR hasta el resultado BS, que es el de mayor resistencia, aproximándose al valor máximo obtenido con el testigo HTI.

En la tabla 4.8 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos de HTA con FOp. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo cual no se rechaza la hipótesis. El valor F es mucho menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados.

Tabla 4.8 – Análisis de varianza de los resultados obtenidos HTA con FOp

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	948,03	3	316,01	1,32	0,38	6,59
Dentro de los grupos	958,7	4	239,67			
Total	1906,73	7				

4.2. Transmitancia óptica

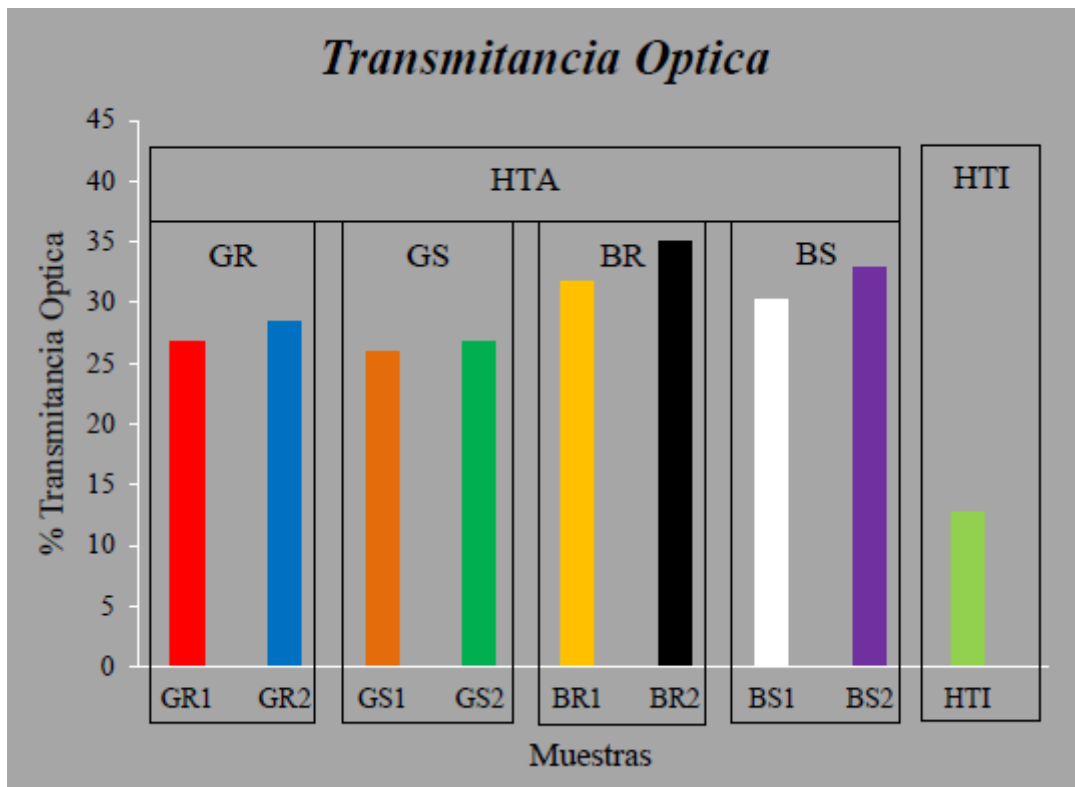
Los parámetros estadísticos básicos de los resultados obtenidos para la transmitancia óptica se presentan en la tabla 4.9, donde T es la transmitancia óptica media, σ la desviación standard y CV el coeficiente de variación.

Tabla 4.9 – Transmitancia Óptica

Muestras y testigos	T media (%)	σ (%)	CV (%)
GR1	26,83	0,76	2,85
GR2	28,4	0,69	2,44
GS1	25,9	0,7	2,7
GS2	26,82	0,17	0,62
BR1	31,77	0,31	0,96
BR2	35,03	0,29	0,82
BS1	30,3	1,41	4,66
BS2	32,8	0,35	1,06
HTI	12,77	0,46	3,61

En la figura 4.2 se presenta el gráfico de los valores medios de la transmitancia óptica de los datos de los ensayos presentados en la tabla 4.7.

Figura 4.2 - Gráfica de valores medios de la transmitancia óptica.



A continuación se analizaron los resultados obtenidos.

4.2.1. Comparación entre todos los grupos

En la figura 4.2 se muestra que:

- Los resultados obtenidos para cada una de las variables estudiadas tienen un coeficiente de variación menor al 5 %, lo cual indica que hubo una buena ejecución de las probetas y de los ensayos realizados.
- Presenta mayor transmitancia óptica la muestra BR2, resultante de la combinación de un cemento blanco (B), un árido de menor diámetro (R – arena de río) y la FOp de mayor diámetro (2); esto indica que posiblemente esa combinación de variables potencia la transmisión de luz.
- Con la FOp2 se obtiene mayor transmitancia óptica que con la FOp1.
- Otro resultado interesante es que las muestras HTI presentan menor transmitancia óptica en comparación con todas las muestras de HTA.

Tabla 4.10 – Análisis de varianza entre todos los grupos HTA

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	65,22	3	21,74	8,62	0,03	6,59
Dentro de los grupos	10,09	4	2,52			
Total	75,04	7				

Como todos los resultados HTA se aproximaron entre ellos gráficamente y presentaron diferencias significativas con el testigo HTI, a continuación se realizó un análisis gráfico y estadístico de los resultados obtenidos con los HTA.

4.2.2. Comparación entre los grupos de HTA

En la figura 4.2 se muestra que:

- Con respecto a los dos cementos, las muestras con incorporación de cemento blanco tienen mayor transmitancia óptica que las realizadas con cemento gris.
- Con respecto a la variable arena fina, con empleo de arena de río hay aumento de la transmitancia óptica en relación a la arena de sílice. Esto se confirma con el análisis de varianza entre grupos GR-BR y GS-BS, con mayor variación de los resultados entre grupos.

En la tabla 4.10 se presenta el análisis de varianza de todos los resultados HTA obtenidos, la probabilidad es menor que 0,05, por lo cual se rechaza la hipótesis. El valor F es mayor al valor crítico para F, por lo cual existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, porque el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan una mayor diferencia entre grupos que dentro de los grupos.

Como la probabilidad es menor a 0,05, a continuación se realiza un análisis comparativo entre grupos HTA.

4.2.3. Comparación entre los dos tipos de FOp (FOp1 y FOp2)

En la figura 4.2 se muestra que comparando todos los resultados HTA, la FOp de mayor espesor (FOp2) es la que tiene mayor incidencia en la transmitancia óptica con resultados superiores en relación a la FOp de menor espesor (FOp1).

En la tabla 4.11 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos de los dos tipos de FOp del HTA. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo cual no se rechaza la hipótesis. El valor F es mucho menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos. Se acepta lo que se expresa en la gráfica.

Tabla 4.11 – Análisis de varianza de los grupos de FOp1 y FOp2

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	8,51	1	8,51	0,76	0,42	5,99
Dentro de los grupos	66,81	6	11,13			
Total	75,32	7				

4.2.4. Comparación entre los resultados GR y GS

La figura 4.2 muestra que entre los resultados GR y GS con la variable en común de cemento gris, GR tiene mayor transmitancia óptica con el empleo de arena de río que con arena de sílice. Lo mismo ocurre con los resultados de GS. Ambos grupos en sus resultados se aproximan en valor.

En la tabla 4.12 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos de los grupos GR y GS. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo cual no se rechaza la hipótesis. El valor F es mucho menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan un leve aumento de variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.12 – Análisis de varianza de los grupos GR y GS

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1,58	1	1,58	1,9	0,3	18,51
Dentro de los grupos	1,66	2	0,83			
Total	3,23	3				

4.2.5. Comparación entre los resultados BR y BS

La figura 4.2 muestra que entre los resultados BR y BS con la variable en común de cemento blanco, BR tiene mayor transmitancia óptica con el empleo de la arena de río en relación a la arena de sílice, que son los resultados BS.

En la tabla 4.13 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos de los grupos BR y BS. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo cual no se rechaza la hipótesis. El valor F es mucho menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan mayor variación de los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.13 – Análisis de varianza de los grupos BR y BS

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	3,42	1	3,42	0,81	0,46	18,51
Dentro de los grupos	8,44	2	4,22			
Total	11,86	3				

4.2.6. Comparación entre los resultados GR y BR

La figura 4.2 muestra que entre los resultados GR y BR con la variable común de arena de río, tiene mayor incidencia el resultado BR con una transmitancia óptica mayor cuando se incorpora la variable cemento blanco.

En la tabla 4.14 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos de los grupos GR y BR. La probabilidad es levemente mayor que 0,05, por lo cual no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan mayor variación los resultados entre grupos que dentro de los grupos.

Tabla 4.14 – Análisis de varianza de los grupos GR y BR

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	33,47	1	33,47	10,22	0,09	18,51
Dentro de los grupos	6,55	2	3,27			
Total	40,01	3				

4.2.7. Comparación entre los resultados GS y BS

La figura 4.2 muestra que entre los resultados GS y BS con la variable común de arena de sílice, tiene mayor transmitancia óptica el grupo BS cuando se incorpora cemento blanco que cuando se emplea cemento gris.

En la tabla 4.15 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos de los grupos GS y BS. La probabilidad es levemente mayor que 0,05, por igual no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan mayor variación los resultados entre grupos que dentro de los grupos.

Tabla 4.15 – Análisis de varianza de los grupos GS y BS

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	26,94	1	26,94	15,18	0,06	18,51
Dentro de los grupos	3,55	2	1,77			
Total	30,48	3				

4.3. Resistencia a altas temperaturas

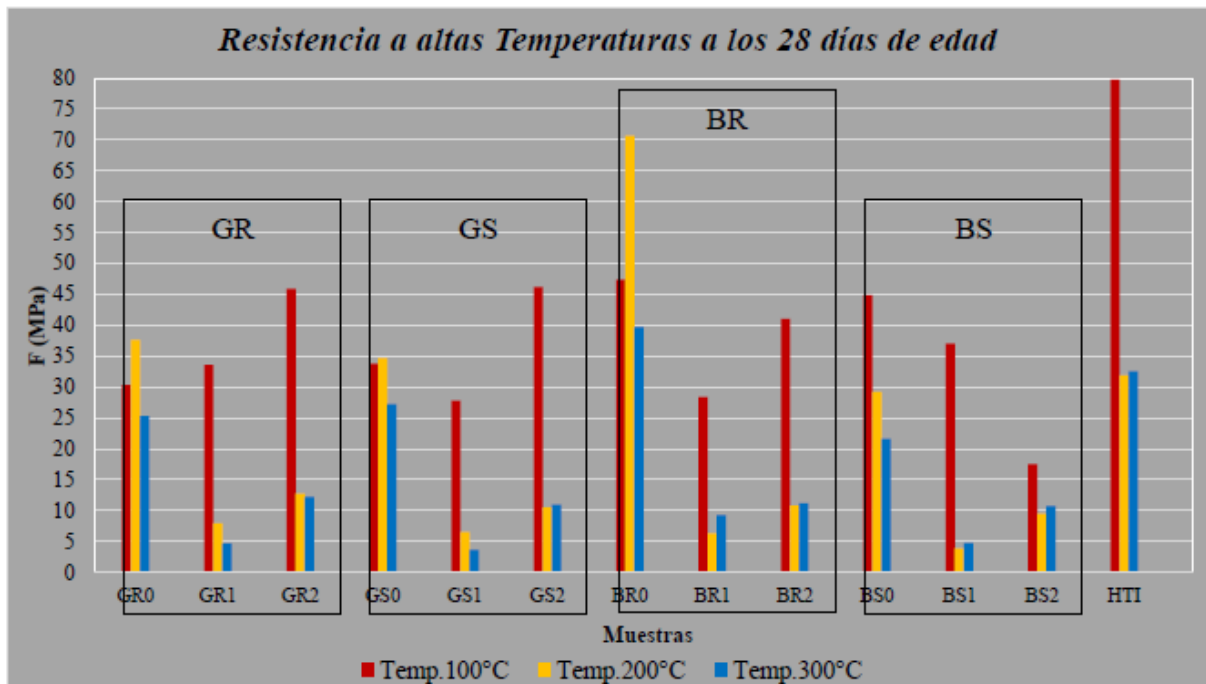
La evolución de la resistencia a compresión en probetas a 28 días de edad expuestas durante 24 horas a temperaturas de 100 °C, 200 °C y 300 °C se aprecia en la tabla 4.16. En ella se presentan los parámetros estadísticos básicos: F_c es la resistencia media, σ la desviación estándar y CV el coeficiente de variación. Es de observar que el valor correspondiente a BR0 es dudoso (dos probetas dieron como resultado 70,65 y una 32,23); parece excesivo el aumento de resistencia obtenido con 200 °C con las muestras de BR0.

Tabla 4.16 – Resistencia a altas temperaturas a los 28 días de edad

Muestras y testigos	Temp. 100 °C			Temp. 200 °C			Temp. 300 °C		
	Media (MPa)	s	CV (%)	Media (MPa)	s	CV (%)	Media (MPa)	s	CV (%)
		(MPa)			(MPa)			(Mpa)	
GR0	30,29	1,86	6,14	37,63	2,66	7,07	25,31	0,96	3,79
GR1	33,57	1,78	5,3	7,91	0,15	1,94	4,69	0,35	7,53
GR2	45,94	1,87	4,08	12,76	0,72	5,64	12,23	0,74	6,05
GS0	33,79	2,72	8,05	34,72	0,66	1,9	27,25	1,91	7
GS1	27,87	3,27	11,73	6,52	0,54	8,28	3,65	0,02	0,55
GS2	46,22	3,82	8,26	10,49	0,82	7,82	11	0,09	0,85
BR0	47,43	0,85	1,79	70,65	0,01	0,01	39,69	1,05	2,64
BR1	28,43	2,41	8,49	6,32	0,31	4,96	9,27	0,59	6,33
BR2	41,03	1,59	3,87	10,83	1,01	9,36	11,16	0,97	8,66
BS0	44,9	0,49	1,1	29,25	2,4	8,21	21,62	1,65	7,65
BS1	37,09	2,49	6,71	3,9	0,31	8,04	4,76	0,36	7,53
BS2	17,51	0,29	1,68	9,46	0,9	9,51	10,76	0,32	2,97
HTI	79,73	4,69	5,88	31,86	2,09	6,56	32,52	3,14	9,64

La figura 4.3 presenta la comparación de los resultados de los valores medios obtenidos con las diferentes temperaturas.

Figura 4.3 – Comparación de la resistencia entre las diferentes temperaturas (100 °C, 200 °C y 300 °C)



4.3.1. Comparación entre todos los grupos

La figura 4.3 muestra que:

- El testigo HTI, a los 100 °C presenta la mayor resistencia a compresión que todos los resultados HTA. Pero con 200 °C y 300 °C la resistencia es mucho menor a BR0.
- Los resultados dentro de los grupos y entre los grupos en general son muy heterogéneos, por lo que se realizó un análisis de varianza para cada temperatura (en el que no se emplea la media, sino todos los valores obtenidos) y luego se realiza un análisis de varianza con todos los grupos, que incluye todas las temperaturas.

En la tabla 4.17 se presenta el análisis de varianza de todos los resultados en todas las temperaturas (no se empleó la media para este estudio, sino que se empleó todos los resultados obtenidos). La probabilidad es menor que 0,05, por lo cual se rechaza la hipótesis. El valor F es mayor al valor crítico para F, por lo cual existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportaron en forma similar, porque el valor F y el valor crítico para F no son similares. Hay una mayor diferencia entre grupos que dentro de los grupos.

Debido a que la probabilidad es menor a 0,05, a continuación se presenta un análisis comparativo entre todos los grupos para cada temperatura estudiada.

Tabla 4.17 – Análisis de varianza de todos los resultados en todas las temperaturas

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	15687,3	12	1307,27	6,72	1,67 ⁻⁸	1,86
Dentro de los grupos	17699,4	91	194,5			
Total	33386,4	103				

4.3.2. Comparación entre todos los grupos a temperatura 100 °C

La figura 4.3 muestra que:

- El testigo HTI, a los 100 °C presenta la mayor resistencia a compresión (80 MPa). Este resultado difiere significativamente de todos los resultados HTA y HC.
- En general, entre los resultados HTA y HC también hay diferencias significativas, pero no tanto en comparación con el testigo HTI. Los resultados que presentan mayor resistencia a compresión sometidos a 100 °C son los GR2, con aproximadamente 46 MPa, y los que presentan menor resistencia son los BS2, con aproximadamente 18 MPa.

En la tabla 4.18 se presenta el análisis de varianza de todos los resultados obtenidos (no se emplean las medias) a temperatura de 100 °C. La probabilidad es menor que 0,05, por lo cual se rechaza la hipótesis. El valor F es mayor al valor crítico para F, por lo cual existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, porque el valor F y el valor crítico para F no son similares. Hay una mayor diferencia entre grupos que dentro de los grupos. Ello concuerda con lo que se observa en la figura 4.3.

Tabla 4.18 – Análisis de varianza de todos los resultados a temperatura 100 °C

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	7782,42	12	648,54	20,22	3,50 ⁻¹⁰	2,15
Dentro de los grupos	833,83	26	32,07			
Total	8616,4	38				

4.3.3. Comparación entre todos los grupos a temperatura 200 °C

La figura 4.3 muestra que:

- Los resultados que presentan mayor resistencia a compresión son los de las probetas en que no se usó fibra óptica (BR0, GR0, BS0 y GB0), y luego, el siguiente es el testigo HTI.
- El resultado de menor resistencia a compresión es BS1, con 4 MPa, significativamente menor al testigo HTI.

- Observando los resultados dentro de cada grupo de los HTA y HC, se obtiene mayor resistencia con HC (sin fibra óptica). Le siguen los resultados con el empleo de la FOp2 y presentan menor resistencia las probetas con empleo de la FOp1.

En la tabla 4.19 se presenta el análisis de varianza de todos los resultados a temperatura 200 °C (no se emplean las medias). La probabilidad es menor que 0,05, por lo cual se rechaza la hipótesis. El valor F es mayor al valor crítico para F, por lo cual existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, porque el valor F y el valor crítico para F no son similares. Hay una mayor diferencia entre grupos que dentro de los grupos. Ello concuerda con lo que se observa en la figura 4.3.

Tabla 4.19 – Análisis de varianza de todos los resultados a temperatura 200 °C

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6725,34	12	560,45	5,83	0,0017	2,6
Dentro de los grupos	1248,65	13	96,05			
Total	7973,99	25				

4.3.4. Comparación entre todos los grupos a temperatura 300 °C

La figura 4.3 muestra que:

- El resultado con mayor resistencia a compresión es BR0, con 40 MPa. Le sigue el testigo HTI, con 33 MPa.
- El resultado de menor resistencia a compresión es GS1, con 4 MPa, significativamente menor al testigo HTI y parecido al resultado de GR1.
- Considerando los resultados dentro de cada grupo HTA y HC, los de mayor resistencia son los HC (sin fibra óptica), le siguen los resultados de los HTA con el empleo de la FOp2 y con menor resistencia los resultados con el empleo de la FOp1.

En la tabla 4.20 se presenta el análisis de varianza de todos los resultados a temperatura 300 °C (no se emplean las medias). La probabilidad es menor que 0,05, por lo cual se rechaza la hipótesis. El valor F es mayor al valor crítico para F, por lo cual existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, porque el valor F y el valor crítico para F no son similares. Hay una mayor diferencia entre grupos que dentro de los grupos. Ello concuerda con lo que se observa en la figura 4.3.

Tabla 4.20 – Análisis de varianza de todos los resultados a temperatura 300 °C

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	5768,75	12	480,73	24,85	3,30 ⁻¹¹	2,15
Dentro de los grupos	502,97	26	19,34			
Total	6271,72	38				

4.3.5. Comparación de todos los resultados HTA y HC con todas las temperaturas

En la figura 4.3 se muestra que:

- Existe gran heterogeneidad en los resultados entre grupos y dentro de los grupos. Según el análisis de varianza, hay mayor variación dentro de los grupos que entre los grupos.
- BR0 presenta mayor resistencia a compresión en todas las temperaturas estudiadas (100°C, 200 °C y 300 °C).
- Presentan menor resistencia a compresión sometidos a temperatura de 100 °C los ejemplares de BS2, a temperatura de 200 °C los BS1 y a temperatura de 300 °C los GS1.

En la tabla 4.21 se presenta el análisis de varianza de todos los resultados obtenidos de todos los grupos HTA y HC con todas las temperaturas. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Comparando los resultados estadísticos obtenidos aquí con los de todos los resultados incluyendo HTI, se podría concluir que existe diferencia estadísticamente significativa entre los resultados obtenidos a altas temperaturas con el HTI en relación a todos los resultados de los elaborados artesanalmente (HTA y HC).

Tabla 4.21 – Análisis de varianza de los todos los grupos HTA y HC

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	439,85	3	146,62	0,52	0,67	2,9
Dentro de los grupos	9049,47	32	282,8			
Total	9489,32	35				

Como el análisis de varianza tuvo mayor variación de resultados dentro de los grupos, a continuación se realizó un análisis estadístico dentro de los grupos (GR; GS; BR; BS) y luego entre los grupos (GR-GS; BR- BS; GR-BR; GS-BS).

4.3.6. Comparación de los resultados considerando las variables en común cemento gris y arena de río (GR)

En la figura 4.3 se muestra que:

- A temperatura de 100 °C, los resultados con el empleo de la FOp (HTA) tienen mayores resistencias a compresión, las que disminuyen drásticamente en las temperaturas más altas.
- En cambio, los resultados HC (sin FOp) denominados GR0 tienen menor resistencia a temperatura 100 °C que los HTA, aumentan la resistencia a los 200 °C y luego disminuye a los 300 °C. El valor es muy superior a los obtenidos con HTA para la misma temperatura.

En la tabla 4.22 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos del grupo GR en todas las temperaturas. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Es de observar que si bien los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F son diferentes, presentan mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos, aunque dicha variación es leve.

Tabla 4.22 – Análisis de varianza del grupo GR en todas las temperaturas

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	830,69	2	415,34	2,89	0,13	5,14
Dentro de los grupos	862,38	6	143,73			
Total	1693,07	8				

4.3.7. Comparación de los resultados considerando las variables en común cemento gris y arena de sílice (GS)

En la figura 4.3 se muestra que:

- El resultado de GS2 con FOp de mayor espesor (FOp2) tiene mayor resistencia a temperatura de 100 °C que los otros. Para las siguientes temperaturas, los resultados sin FOp GS0 presentan las mayores resistencias.
- Las muestras GS1 con FOp de menor espesor son las que presentan menor resistencia en todas las temperaturas estudiadas.
- A medida que aumenta la temperatura a 200 °C y 300 °C, las mayores resistencias están en las muestras sin fibra óptica GS0, y presentan una gran disminución de la resistencia las muestras con fibra óptica.

En la tabla 4.23 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos del grupo GS en todas las temperaturas. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.23 – Análisis de varianza del grupo GS en todas las temperaturas

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	844,76	2	422,38	2,72	0,14	5,14
Dentro de los grupos	933,14	6	155,52			
Total	1777,89	8				

4.3.8. Comparación de los resultados considerando las variables en común cemento blanco y arena de río (BR)

En la figura 4.3 se muestra que:

- El grupo BR0 (HC sin FOp) es el que presenta mayor resistencia en todas las temperaturas.
- El resultado BR0 sin FOp aumenta su resistencia a 200 °C (aunque el valor obtenido es dudoso, tal como se mencionara al inicio de esta sección), y luego a los 300 °C; Disminuye levemente por debajo de los 100 °C. Estas mezclas son las que tienen mejor comportamiento frente a altas temperaturas en relación a los resultados obtenidos con FOp.
- Cuando se emplea FOp, BR2 con FOp de mayor espesor tiene mayor resistencia en todas las temperaturas, comparándolo con BR1, en que se emplea FOp de menor espesor. Con ambas fibras disminuye la resistencia considerablemente a 200 °C. Luego, a los 300 °C presentan un leve aumento.

En la tabla 4.24 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos del grupo BR en todas las temperaturas. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan una mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.24 – Análisis de varianza del grupo BR en todas las temperaturas

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	537,25	2	268,62	0,48	0,64	5,14
Dentro de los grupos	3346,92	6	557,82			
Total	3884,17	8				

4.3.9. Comparación del grupo BS, considerando las variables en común cemento blanco y arena de sílice

En la figura 4.3 se muestra que:

- Las muestras sin FOp (BS0) son las que tienen mayor resistencia en todas las temperaturas, al igual que ocurría en el grupo anterior (BR).
- Las muestras sin FOp disminuyen paulatinamente su resistencia a medida que aumenta la temperatura.
- En las muestras con FOp hay una alta disminución de su resistencia a los 200°C, y luego, un aumento leve a los 300°C.

En la tabla 4.25 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos del grupo BS en todas las temperaturas. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan una mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.25 – Análisis de varianza del grupo BS en todas las temperatura

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	795,02	2	397,51	2,65	0,15	5,14
Dentro de los grupos	899,32	6	149,89			
Total	1694,34	8				

4.3.10. Comparación entre los resultados GR y GS, con la variable común de cemento gris

En la figura 4.3 se muestra que:

- Los resultados con FOp de mayor espesor (FOp2) tienen mayor resistencia a 100 °C que los resultados sin FOp y con FOp de menor espesor (FOp1).
- Empleando FOp disminuye significativamente la resistencia en las temperaturas de 200 °C y 300 °C.
- Con la inclusión de la FOp de menor espesor, la disminución de resistencia es leve entre las temperaturas 200 °C y 300°C.
- Con la inclusión de arena de sílice, el resultado GS2 tiene un aumento leve de resistencia en la temperatura 300°C con respecto a la de 200°C. Pero la situación es inversa en el GR2 con la inclusión de arena de río.
- Los resultados de HC sin FOp muestran que aumenta la resistencia a 200 °C y luego disminuye a 300 °C.

En la tabla 4.26 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos de los grupos GR y GS en todas las temperaturas. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan una mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.26 – Análisis de varianza de los grupos GR y GS en todas las temperaturas

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	4,32	1	4,32	0,02	0,89	4,49
Dentro de los grupos	3470,96	16	216,94			
Total	3475,28	17				

Cabe observar que en el análisis estadístico de los resultados GR y GS en forma separada y conjunta presentaron una mayor variación los resultados *dentro* de los grupos que *entre* grupos.

4.3.11. Comparación entre los resultados BR y BS, considerando la variable común del cemento blanco

En la figura 4.3 se muestra que:

- Los resultados de HC (sin FOp) en todas las temperaturas tienen una incidencia mayor en la resistencia. BR0 es el que presenta mayor resistencia.
- En todas las temperaturas, cuando se emplea FOp hay comportamiento diferente según el agregado fino y la FOp empleados.

En la tabla 4.27 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos de los grupos BR y BS en todas las temperaturas. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan una mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.27 – Análisis de varianza de los grupos BR y BS en todas las temperaturas

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	406,7	1	406,7	1,17	0,3	4,49
Dentro de los grupos	5578,51	16	348,66			
Total	5985,2	17				

4.3.12. Comparación entre los resultados de GR y BR, con la variable común de arena de río

En la figura 4.3 se muestra que:

- En todas las temperaturas, las muestras sin FOp que incluyen cemento gris tienen menor resistencia en relación a las muestras que incluyen cemento blanco, excepto los resultados en que se emplea FOp de menor espesor.
- En los dos grupos, con la inclusión de la arena de río y diferente cemento, los resultados HC sin FOp mantienen el mismo patrón gráfico: aumenta su

resistencia a los 200 °C, y disminuye a los 300 °C por debajo de los valores obtenidos a 100 °C.

- Para todas las temperaturas, cuando no se tiene FOp, la mayor resistencia se obtiene con cemento blanco.
- Los resultados HTA con FOp, también en los dos grupos mantienen el mismo padrón gráfico, con una caída abrupta de la resistencia a los 200 °C, y a los 300 °C en relación a los 100 °C.
- Los HTA con FOp de mayor espesor tienen mayor resistencia que cuando se emplea FOp de menor espesor.

En la tabla 4.28 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos de los grupos GR y BR en todas las temperaturas. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan una mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.28 – Análisis de varianza de los grupos GR y BR en todas las temperaturas

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	164,89	1	164,89	0,47	0,5	4,49
Dentro de los grupos	5577,23	16	348,58			
Total	5742,13	17				

4.3.13. Comparación entre los resultados de GS y BS, con variable común de arena de sílice

En la figura 4.3 se muestra que:

- En los HC (sin FOp) empleando cemento blanco (BS0) se tiene mayor resistencia a 100 °C; pero a 200 °C y 300 °C se obtiene mayor resistencia con cemento gris (GS0).
- Los HC (sin FOp) con cemento gris (GS0), a los 200 °C aumentan levemente su resistencia, y luego disminuyen a los 300 °C; mientras que con cemento blanco (BS0), a medida que aumenta la temperatura, disminuye su resistencia.
- Los resultados de HTA con FOp de mayor espesor y cemento gris (GS2) presentan mayor resistencia a los 100 °C, mientras que con cemento blanco (BS2) tienen menor resistencia. A los 200 °C, superan en valor GS2 a GS1, Luego, a los 300 °C, supera BS2 a BS1. Los resultados de GS1-BS1 tienen el mismo comportamiento gráfico pero a la inversa.

En la tabla 4.29 se presenta el análisis de varianza de los resultados obtenidos de los grupos GS y BS en todas las temperaturas. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma

similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan una mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.29 – Análisis de varianza de los grupos GS y BS en todas las temperaturas

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	27,53	1	27,53	0,13	0,73	4,49
Dentro de los grupos	3472,23	16	217,01			
Total	3499,76	17				

El análisis estadístico de todos los resultados GR-GS, BR-BS y GR-BR y GS-BS en forma separada y entre ellos, tienen un comportamiento similar en el que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Presentan mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre los grupos.

4.4. Absorción capilar

En relación a la capacidad de absorción capilar, se estudiaron probetas sin y con FOp a los 28 días de edad y testigos extraídos del HTI. En la tabla 4.30 se presentan los parámetros resultantes del análisis estadístico básico de los resultados de los ensayos de absorción capilar. P es el peso, σ la desviación estándar y CV el coeficiente de variación. La veracidad de los resultados obtenidos se observa claramente en los resultados de los CV. El mayor valor obtenido es 2,83.

En la figura 4.4, se expresa la cantidad de agua absorbida por capilaridad W, en función de la raíz cuadrada del tiempo. En la figura 4.5 se observa la capacidad de absorción capilar.

Tabla 4.30 – Absorción capilar

v_t (seg.)	Muestra	P medio (g)	σ (g)	CV (%)
0	GR0	129,12	1,05	0,81
60		130,03	1,05	0,81
294		131,39	1,84	1,4
0	GR1	139,1	1,88	1,35
60		141,52	3,15	2,22
294		143,03	2,1	1,47
0	GR2	149,08	3,67	2,46
1		150,14	3,18	2,12
24		151,5	2,4	1,58
0	GS0	140,01	0,52	0,37
60		140,76	0,27	0,19
294		141,67	0,69	0,49
0	GS1	154,52	3,44	2,22
60		157,25	1,89	1,2
294		159,06	1,89	1,19
0	GS2	155,13	0,91	0,59
60		156,34	1,05	0,67
294		157,1	0,94	0,6
0	BR0	139,71	3,95	2,83
60		140,61	3,96	2,81
294		141,07	3,95	2,8
0	BR1	127,31	2,77	2,18
60		128,22	2,77	2,16
294		129,73	2,72	2,1
0	BR2	137,89	0,91	0,66
60		138,5	0,69	0,5
294		138,95	0,69	0,5
0	BS0	146,06	2,4	1,64
60		147,57	1,89	1,28
294		148,02	1,89	1,28
0	BS1	148,33	0,46	0,31
60		148,93	0,26	0,17
294		149,84	0,69	0,46
0	BS2	141,83	2,62	1,85
60		142,43	2,76	1,94
294		142,88	2,76	1,93
0	HTI	149,67	0,58	0,39
60		151,5	1,58	1,04
294		152,4	1,57	1,03

Figura 4.4 – Gráfico de agua absorbida en función de la raíz cuadrada del tiempo.

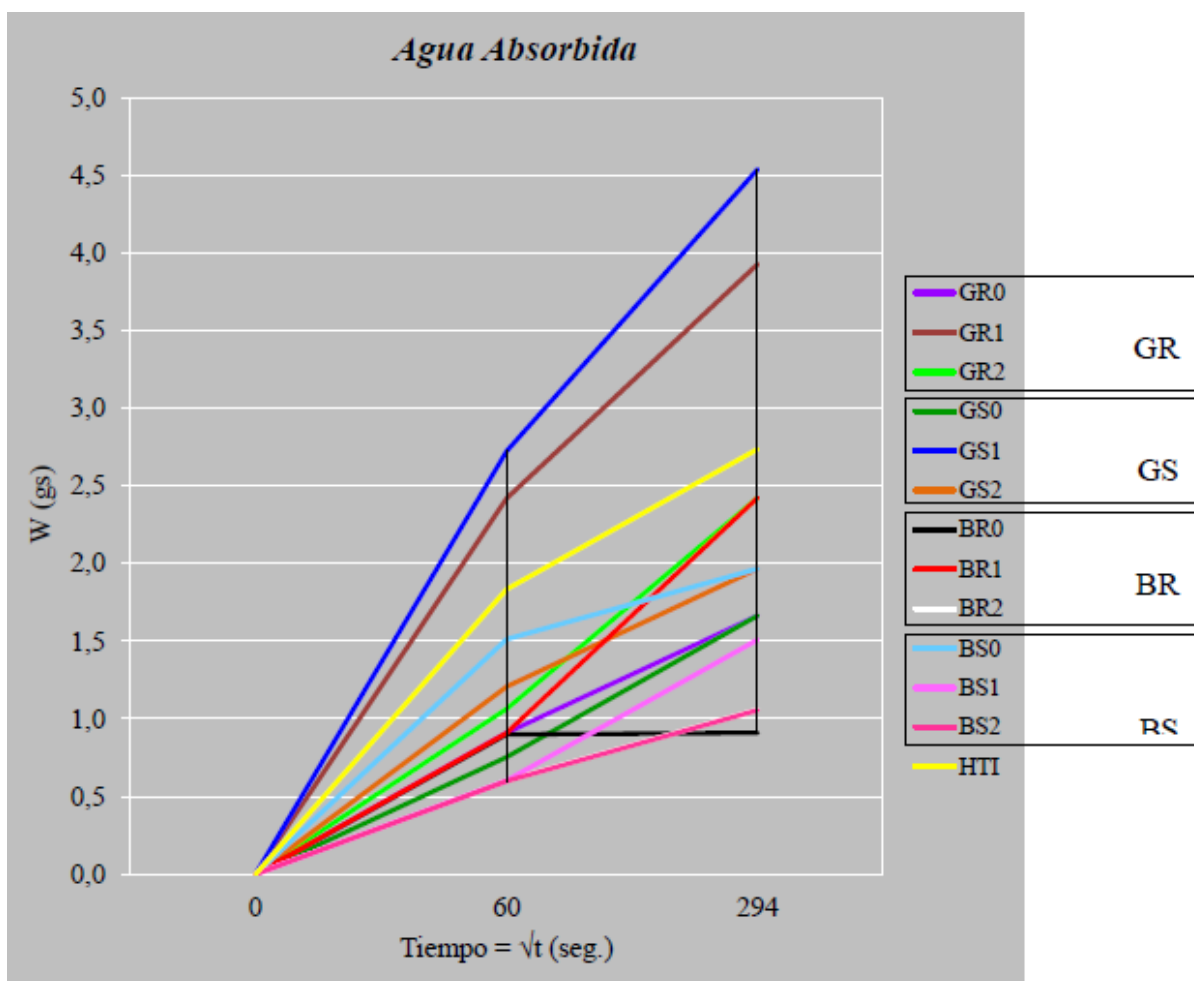
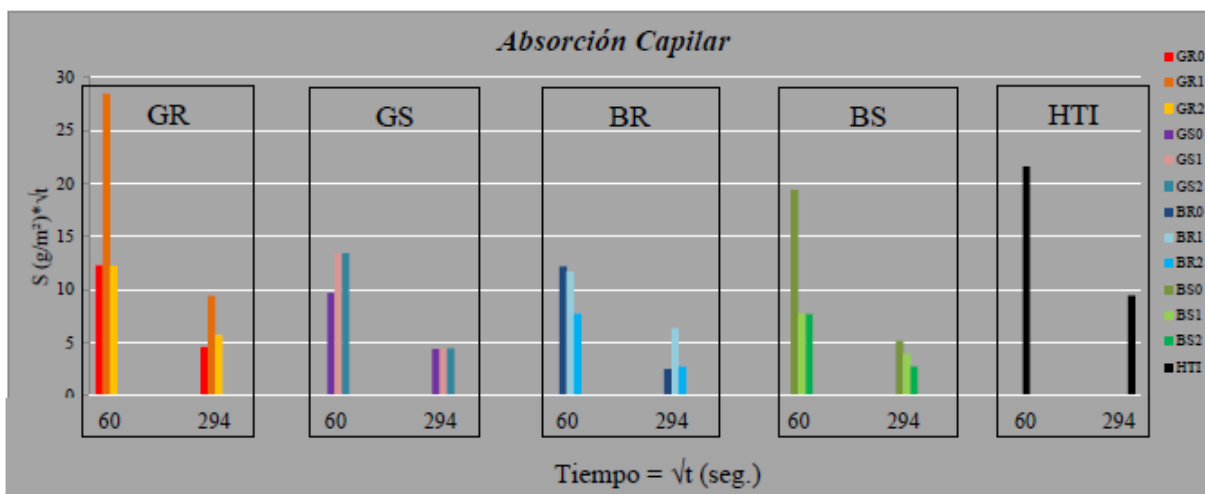


Figura 4.5 – Gráfico de capacidad de absorción capilar



En la figura 4.4 se observa lo siguiente:

- Aumenta la cantidad de agua absorbida en función del tiempo, en general con mayor incidencia en las muestras con inclusión de FOp. Las muestras sin FOp presentan menor agua absorbida con cemento blanco y arena de sílice.
- GS1 (FOp de menor espesor + cemento gris + arena de sílice) presenta mayor cantidad de agua absorbida en los dos tiempos considerados; es la de mayor absorción. Le sigue GR1, con arena de río, y continúa el testigo HTI.
- Los resultados de HC (sin FOp) que fueron realizados con cemento blanco y arena de río son los que tienen menor agua absorbida (BR0).
- BS (con cemento blanco y arena de sílice) con FOp tiene menor cantidad de agua absorbida que sin FOp.

En la tabla 4.31 se presenta el análisis de varianza de todos los resultados. La probabilidad es menor que 0,05, por lo cual se rechaza la hipótesis. El valor F es mayor al valor crítico para F, por lo cual existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, porque el valor F y el valor crítico para F no son similares. Hay una mayor diferencia entre grupos que dentro de los grupos.

Tabla 4.31 – Análisis de varianza de todos los resultados de agua absorbida

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2820,01	12	235	155,01	5,22 ⁻²¹	2,15
Dentro de los grupos	39,42	26	1,52			
Total	2859,42	38				

En la figura 4.5 se grafica la capacidad de absorción capilar S en función de la raíz cuadrada del tiempo. Se observa lo siguiente:

- GR1 presenta la mayor capacidad de absorción capilar a los 60 segundos; HTI le continúa en los dos tiempos estudiados.
- Todos los resultados presentan mayor capacidad de absorción capilar a los 60 segundos que a los 294 segundos.

En la tabla 4.32 se presenta el análisis de varianza de todos los resultados de HTA y HC obtenidos. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos. Por tal motivo, se estudia a continuación los resultados dentro de los diferentes grupos (GR; GS; BR; BS) y luego entre los grupos (GR-GS; BR-BS; GR-BR; GS-BS).

Tabla 4.32 – Análisis de varianza de los resultados de la absorción capilar HTA y HC

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	126,01	3	42	0,77	0,52	3,1
Dentro de los grupos	1088,69	20	54,43			
Total	1214,69	23				

4.4.1. Comparación de los resultados GR, con las variables en común de cemento gris y arena de río

En la figura 4.5 se muestra que:

- Tienen mayor capacidad de absorción capilar las probetas con FOp que las sin FOp; presentan poca diferencia los valores de GR0 y GR2.
- En relación a los dos tipos de FOp empleadas, GR1 con FOp de menor espesor tienen mayor capacidad de absorción capilar que GR2, cuyas FOp son de mayor espesor.

En la tabla 4.33 se presenta el análisis de varianza del grupo GR. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan una mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.33 – Análisis de varianza de los resultados GR

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	184,48	1	184,48	3,93	0,12	7,71
Dentro de los grupos	187,84	4	46,96			
Total	372,32	5				

4.4.2. Comparación de los resultados del grupo GS, con variables comunes de cemento gris y arena de sílice

La figura 4.5 muestra gráficamente que con empleo de arena de sílice se tiene un comportamiento similar al observado con arena de río. Por ello, cuando se emplea cemento gris las observaciones a ser realizadas son iguales, independientemente del tipo de arena empleado.

En la tabla 4.34 se presenta el análisis de varianza del grupo GS. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan una mayor variación los resultados entre grupos que dentro de los grupos.

Tabla 4.34 – Análisis de varianza de los resultados con GS

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	205,92	1	205,92	2,7	0,24	18,51
Dentro de los grupos	152,59	2	76,3			
Total	358,51	3				

4.4.3. Comparación de los resultados con variable común en cemento blanco y arena de río (BR)

En la figura 4.5 se muestra que:

- En los resultados hay ciertas variaciones. En el primer período de tiempo, el resultado sin FOp es el que tiene mayor capacidad de absorción capilar. En cambio, en el segundo período de tiempo disminuye su capacidad en relación a los resultados con FOp.
- En relación a los resultados con FOp, las de menor espesor tienen mayor absorción capilar que las de mayor espesor.

En la tabla 4.35 se presenta el análisis de varianza de todos los resultados BR. La probabilidad es menor que 0,05, por lo cual se rechaza la hipótesis. El valor F es mayor al valor crítico para F, por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, porque el valor F y el valor crítico para F no son similares. Hay una mayor diferencia entre grupos que dentro de los grupos. Concuere da con lo que se especificó, según se observa en la figura 4.5.

Tabla 4.35 – Análisis de varianza de todos los resultados BR

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	66,4	1	66,4	12,69	0,02	7,71
Dentro de los grupos	20,93	4	5,23			
Total	87,3	5				

4.4.4. Comparación de los resultados BS, con variables comunes de cemento blanco y arena de sílice

En la figura 4.5 se muestra que:

- Con BS también hay variantes, en función del período de tiempo estudiado. La muestra sin FOp es la que tiene mayor capacidad de absorción capilar en relación a las muestras con FOp.
- En las muestras con FOp, empleando FOp de menor espesor se tiene mayor absorción capilar que con FOp de mayor espesor.

En la tabla 4.36 se presenta el análisis de varianza del grupo BS. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo

que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan una mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.36 – Análisis de varianza del resultado BS

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	87,86	1	87,86	3,74	0,13	7,71
Dentro de los grupos	93,86	4	23,46			
Total	181,72	5				

4.4.5. Comparación de los resultados de GR y GS, con variable común de cemento gris

La figura 4.5 muestra que:

- Los resultados de los dos grupos se comportan en forma similar, pero los resultados en cada grupo tienen mucha variación y diferencias significativas, especialmente el grupo GR.
- Los resultados sin FOp con mayor capacidad de absorción capilar son los de GR0 con arena de río.
- Los resultados con FOp tienen comportamiento diferente según la arena empleada, la FOp y el período de tiempo en que se evalúa la capacidad de absorción capilar.

En la tabla 4.37 se presenta el análisis de varianza de todos los resultados GR y GS. La probabilidad es menor que 0,05, por lo cual se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, porque el valor F y el valor crítico para F no son similares. Hay una mayor diferencia dentro de los grupos que entre grupos. Concuere con lo que se mencionó según se observó en la figura 4.5.

Tabla 4.37 – Análisis de varianza del resultado GR y GS

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,04	1	0,04	0,004	0,00053	4,96
Dentro de los grupos	819,63	10	81,96			
Total	819,68	11				

4.4.6. Comparación de los resultados de BR y BS, con variable común de cemento blanco

En la figura 4.5 se muestra que:

- En general, los resultados con FOp con mayor capacidad de absorción capilar son los del grupo BS elaborados con arena de sílice. La FOp de menor espesor tiene mayor incidencia en los resultados que la FOp de mayor espesor.
- Cuando no se emplea FOp, en el primer período de tiempo estudiado, los dos grupos tienen mayor capacidad de absorción capilar. La capacidad de absorción disminuye con el tiempo transcurrido; presentan una disminución significativa en el segundo período de tiempo las muestras que contienen arena de río en relación a las que contienen arena de sílice.

En la tabla 4.38 se presenta el análisis de varianza de los grupos BR y BS. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan una mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.38 – Análisis de varianza del resultado BR y BS

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1,02	1	1,02	0,04	0,85	4,94
Dentro de los grupos	269,05	10	26,91			
Total	270,07	11				

4.4.7. Comparación entre los resultados de GR y BR, con variable común arena de río

En la figura 4.5 se muestra que:

- GR1 (FOp de menor espesor y cemento gris) tiene mayor capacidad de absorción capilar.
- El empleo de FOp de menor espesor tiene mayor incidencia en la capacidad de absorción que el empleo de FOp de mayor espesor.
- En general, el empleo de cemento gris incide más en la capacidad de absorción capilar que el de cemento blanco.

En la tabla 4.39 se presenta el análisis de varianza de los grupos GR y BR. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan una mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.39 – Análisis de varianza del resultado GR y BR

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1,02	1	1,02	0,04	0,85	4,94
Dentro de los grupos	269,05	10	26,91			
Total	270,07	11				

4.4.8. Comparación entre los resultados de GS y BS con la variable común de arena de sílice

En la figura 4.5 se muestra que a los 60 segundos, cuando se emplea FOp, las probetas GS tienen mayor capacidad de absorción capilar que BS. A los 294 segundos, existen resultados muy variados dentro de los grupos, lo cual se confirma en el análisis estadístico de varianza. Entre los resultados con FOp, las de mayor incidencia en la capacidad de absorción capilar son las que tienen menor espesor.

En la tabla 4.40 se presenta el análisis de varianza de los grupos GS y BS. La probabilidad es mayor que 0,05, por lo que no se rechaza la hipótesis. El valor F es menor al valor crítico para F, por lo que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados. Los resultados no se comportan en forma similar, dado que el valor F y el valor crítico para F no son similares. Presentan una mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos.

Tabla 4.40 – Análisis de varianza del resultado GS y BS

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	53,21	1	53,21	0,85	0,38	4,96
Dentro de los grupos	629,03	10	62,9			
Total	682,25	11				

4.5. Correlación entre las propiedades estudiadas

La determinación de la transmitancia óptica, resistencia a altas temperaturas y absorción capilar, requirieron equipos o complicados procedimientos de ensayo cuando son comparados con los ensayos de resistencia a compresión.

Estas propiedades pueden ser estimadas empleando relaciones entre ellas y los valores de resistencia a compresión, motivo por el cual la mayoría de las normas existentes para H presentan fórmulas que establecen las respectivas relaciones. Las correlaciones existentes son para HC, y no hay ninguna para HT. De allí que en esta sección se presentaron los modelos de regresión que relacionan las propiedades estudiadas con la resistencia a compresión.

Para establecer la correlación entre las propiedades estudiadas, se tuvo que estudiar el coeficiente de determinación, también llamado R^2 , que representa la dispersión alrededor de la línea de regresión. Ese coeficiente refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que se pretende explicar, y oscila entre 0 y 1.

Mediante los gráficos que se presentan a continuación, se expresó la mejor línea de tendencia para los datos, o sea, la que más se ajusta a los resultados experimentales obtenidos. Una línea de tendencia es más confiable cuando R^2 se sitúa más cerca de 1, representando con ello que mayor será el ajuste del modelo de la varianza que intentamos explicar. De forma inversa, cuando más cerca de 0 es el valor de R^2 , menos ajustado estará el modelo y, por lo tanto, menos fiable será.

A partir de todo lo anterior, podemos indicar qué tan “buena” es la correlación o la explicación de los movimientos entre los dos grupos de propiedades o variables en estudio.

En el anexo IV se presentan los modelos que correlacionan de mejor forma (o sea, con el valor de R^2 mayor) la resistencia a compresión con las diferentes propiedades estudiadas. Un resumen se presenta en esta sección.

La tabla 4.41 presenta las correlaciones que más se ajustan a los resultados obtenidos de resistencia a compresión y transmitancia óptica. Todas las funciones son polinómicas.

Tabla 4.41 – Correlaciones: resistencia a la compresión – transmitancia óptica

Correlación	R^2
$T(\%) = -2E-05x^5 + 0,0022x^4 - 0,114x^3 + 2,6802x^2 - 28,711x + 138,85$	1
$T_{FOP1}(\%) = 0,0329x^2 - 1,5758x + 40,998$	0,7
$T_{FOP2}(\%) = 0,0154x^2 - 0,8281x + 38,273$	0,9
$T_{ARENA DE RIO}(\%) = 0,016x^2 - 0,772x + 36,106$	0,9
$T_{ARENA DE SILICE}(\%) = 0,0055x^2 - 0,1342x + 26,648$	1
$T_{CEMENTO GRIS}(\%) = -0,0281x^2 + 1,1304x + 16,953$	1
$T_{CEMENTO BLANCO}(\%) = 0,0109x^2 - 0,5519x + 35,375$	0,6

Para designar el nivel de correspondencia entre las propiedades según el valor de R^2 , fue empleado el criterio indicado en Hernández et al. (2006).

Todos los resultados se ajustaron excelentemente, mediante una función polinómica de quinto grado, siendo, $R^2 = 0,99$, muy cercano a 1.

Separando los valores según las variables utilizadas en las muestras, se observó claramente que todas correlaciones son funciones polinómicas de segundo grado.

Considerando el tipo de FOp se tuvo valores de R^2 que se aproximaron al valor 0,90 para el caso de la FOp2, siendo muy buena la correlación obtenida. Por otro lado, R^2 con la FOp1 se acerca a 0,70, siendo una correlación considerable. Se tiene mejor correspondencia entre ambas propiedades con el empleo de la variable FOp2.

Considerando el tipo de agregado fino empleado, ambos valores R^2 obtenidos dieron próximos a 1, por lo cual la correspondencia o relación recíproca entre estas dos propiedades se consideraron excelente en el caso del empleo de arena de sílice y muy buena en el caso de arena de río.

Agrupando los datos según el tipo de cemento, los valores R^2 fueron muy diferentes. Con el empleo de cemento gris se tuvo valor más próximo a 1, con una excelente correlación obtenida. Con cemento blanco, el valor de R^2 fue 0,64. Los resultados presentados muestran claramente que las correlaciones entre la resistencia a compresión y la transmitancia óptica con mayor reciprocidad son aquellas en que se emplea FOp2, arena de sílice y cemento gris.

En la tabla 4.42 se presenta las correlaciones que más se ajustaron a los resultados obtenidos de resistencia a compresión y altas temperaturas. También en este caso, todas las funciones son polinómicas.

Tabla 4.42 – Correlaciones: resistencia a la compresión – altas temperaturas

Correlación con 100 °C	R²
$T(\%) = 3E-06x^6 - 0,0004x^5 + 0,0294x^4 - 0,9774x^3 + 16,837x^2 - 139,4x + 459,11$	0,73
$T_{FOp1}(\%) = -0,0211x^2 + 1,3035x + 18,595$	0,88
$T_{FOp2}(\%) = -0,0476x^2 + 2,5926x + 13,172$	0,6
$T_{ARENA DE RIO}(\%) = -0,0003x^4 + 0,0305x^3 - 1,1393x^2 + 17,209x - 50,912$	0,63
$T_{ARENA DE SILICE}(\%) = -0,0014x^3 + 0,0712x^2 - 0,2463x + 24,473$	0,73
$T_{CEMENTO GRIS}(\%) = -0,0002x^4 + 0,0192x^3 - 0,8909x^2 + 17,365x - 78,001$	0,46
$T_{CEMENTO BLANCO}(\%) = -0,0062x^3 + 0,5282x^2 - 12,426x + 95,873$	0,64
Correlación con 200 °C	R²
$T(\%) = 5E-07x^6 - 7E-05x^5 + 0,0031x^4 - 0,0572x^3 + 0,3565x^2 + 1,2472x - 8,1984$	0,47
$T_{FOp1}(\%) = -0,0128x^2 + 0,5397x + 2,7035$	0,96
$T_{FOp2}(\%) = 0,0069x^2 - 0,5462x + 20,407$	0,79
$T_{ARENA DE RIO}(\%) = -0,0097x^3 + 0,6951x^2 - 12,513x + 68,406$	0,98
$T_{ARENA DE SILICE}(\%) = 0,0012x^4 - 0,1514x^3 + 6,7566x^2 - 120,58x + 690,14$	0,51
$T_{CEMENTO GRIS}(\%) = -0,0025x^4 + 0,68089x^2 - 87,731x + 401,22$	0,63
$T_{CEMENTO BLANCO}(\%) = 0,0409x^3 - 3,9549x^2 + 108,77x - 617,34$	0,76
Correlación con 300 °C	R²
$T(\%) = 7E-07x^6 - 0,0001x^5 + 0,0066x^4 - 0,2123x^3 + 3,7245x^2 - 33,173x + 119,87$	0,61
$T_{FOp1}(\%) = 0,0377x^2 - 1,9477x + 22,715$	0,69
$T_{FOp2}(\%) = -0,0146x^3 + 1,3784x^2 - 40,002x + 372,87$	1
$T_{ARENA DE RIO}(\%) = 0,0005x^4 - 0,0481x^3 + 1,7262x^2 - 23,616x + 111,4$	0,99
$T_{ARENA DE SILICE}(\%) = 0,0009x^4 - 0,1125x^3 + 4,9682x^2 - 87,654x + 496,7$	0,58
$T_{CEMENTO GRIS}(\%) = 0,0008x^5 - 0,0854x^4 + 3,3404x^3 - 62,266x^2 + 554,95x - 1893,8$	1
$T_{CEMENTO BLANCO}(\%) = -0,003x^4 + 0,4236x^3 - 20,81x^2 + 397,81x - 2008,2$	0,75

Con respecto a estas correlaciones, se estudiaron tres temperaturas (100 °C, 200 °C y 300 °C). Para las tres temperaturas, todos los resultados se pueden ajustar mediante una función polinómica de sexto grado. La que mejor se ajusta es la función que corresponde a 100 °C, con un $R^2 = 0,73$; para 200 °C se tiene $R^2 = 0,47$ y para 300 °C es $R^2 = 0,61$. A partir de allí, para las diferentes temperaturas se separan los valores según las variables utilizadas en las muestras. Todas las correlaciones son funciones polinómicas, pero de segundo, tercer y cuarto grado.

Considerando el tipo de FOp, se tienen valores muy diferentes. La mejor correspondencia entre ambas propiedades se tiene con temperaturas de 100 °C y 200°C, empleando FOp1.

Considerando el tipo de agregado fino empleado, ambos valores R^2 son próximos entre ellos (0,63 y 0,73) pero no tan cercanos al valor 1, por lo cual la correspondencia o relación recíproca entre estas dos propiedades puede considerarse como considerablemente buena en el caso de emplearse arena de sílice y considerablemente aceptable en el caso de arena de río.

Agrupando los datos según el tipo de cemento, los valores R^2 dieron muy diferentes. Con el empleo de cemento blanco se tiene un valor $R^2 = 0,64$, con lo que la correlación obtenida es considerablemente aceptable, mientras que es débil con cemento gris (con $R^2 = 0,46$).

Los resultados presentados muestran claramente que las correlaciones con mayor reciprocidad entre la resistencia a compresión y alta temperatura es con el empleo de FOp1, arena de sílice y cemento blanco.

En la tabla 4.43 se presenta las correlaciones que más se ajustan a los resultados obtenidos de resistencia a compresión y absorción capilar. También todas las funciones son polinómicas. Con respecto a esta correlación, contamos con tres estados de tiempo (0 min, 60 min y 294 min).

Tabla 4.43 – Correlaciones: resistencia a la compresión – absorción capilar

<i>Correlación en estado seco (0 minutos)</i>	R^2
$T(\%) = -2E-07x^6 + 4E-05x^5 - 0,0042x^4 + 0,1972x^3 - 4,6705x^2 + 52,978x - 77,928$	0,31
$T_{FOp1}(\%) = -0,067x^2 + 3,6296x + 109,75$	0,31
$T_{FOp2}(\%) = 0,0079x^3 - 0,7895x^2 + 24,225x - 78,945$	1
$T_{ARENA DE RIO}(\%) = -0,0003x^4 + 0,0365x^3 - 1,4498x^2 + 22,924x + 19,805$	0,69
$T_{ARENA DE SILICE}(\%) = -0,0008x^4 + 0,1013x^3 - 4,5131x^2 + 80,766x - 304,61$	0,97
$T_{CEMENTO GRIS}(\%) = 0,0009x^4 - 0,0836x^3 + 2,853x^2 - 41,486x + 360,38$	0,18
$T_{CEMENTO BLANCO}(\%) = -0,0054x^3 + 0,4861x^2 - 11,962x + 193,26$	0,86
<i>Correlación a los 60 minutos</i>	R^2
$T(\%) = -2E-07x^6 + 5E-05x^5 - 0,0051x^4 + 0,2324x^3 - 5,4299x^2 + 60,803x - 105,59$	0,34
$T_{FOp1}(\%) = -0,078x^2 + 4,1312x + 107,74$	0,3
$T_{FOp2}(\%) = 0,008x^3 - 0,8005x^2 + 24,582x - 81,385$	1
$T_{ARENA DE RIO}(\%) = -0,0003x^4 + 0,0396x^3 - 1,5661x^2 + 24,67x + 12,952$	0,74
$T_{ARENA DE SILICE}(\%) = -0,0008x^4 + 0,1057x^3 - 4,6992x^2 + 83,869x - 318,61$	0,98
$T_{CEMENTO GRIS}(\%) = 0,0007x^4 - 0,0692x^3 + 2,4216x^2 - 36,311x + 341,64$	0,22
$T_{CEMENTO BLANCO}(\%) = -0,0057x^3 + 0,5157x^2 - 12,727x + 198,47$	0,86
<i>Correlación a los 294 minutos</i>	R^2
$T(\%) = -2E-07x^6 + 5E-05x^5 - 0,0051x^4 + 0,2345x^3 - 5,4857x^2 + 61,443x - 106,49$	0,34
$T_{FOp1}(\%) = -0,0789x^2 + 4,1515x + 109,25$	0,28
$T_{FOp2}(\%) = 0,008x^3 - 0,7952x^2 + 24,331x - 76,956$	1
$T_{ARENA DE RIO}(\%) = -0,0003x^4 + 0,0388x^3 - 1,5426x^2 + 24,371x + 15,704$	0,75
$T_{ARENA DE SILICE}(\%) = -0,0008x^4 + 0,1034x^3 - 4,5919x^2 + 81,831x - 304,72$	0,98
$T_{CEMENTO GRIS}(\%) = 0,0008x^4 - 0,0756x^3 + 2,6243x^2 - 39,035x + 356,31$	0,25
$T_{CEMENTO BLANCO}(\%) = -0,0059x^3 + 0,5346x^2 - 13,269x + 203,13$	0,84

En este caso, para los tres tiempos estudiados, todos los resultados se ajustan mediante una función polinómica de sexto grado. Los R^2 obtenidos son pésimos (0,31-0,34).

Separando los valores según las variables utilizadas en las muestras, todas las correlaciones son funciones polinómicas de segundo, tercer y cuarto grado, y se registran valores de R^2 para cada una de las variables bastante similares en los tres tiempos estudiados.

Considerando el tipo de FOp, se tienen valores excelentes para la FOp2 (con R^2 que tienden a 1), y pésimos para la FOp1 (con R^2 próximos a 0,30).

Considerando el tipo de agregado fino empleado, los valores de R^2 son bastante diferentes. Son excelentes con arena de sílice (con un valor próximo a 0,98), mientras que con arena de río el valor de R^2 está entre 0,75 y 0,69, lo que implica una correlación entre buena y fuerte.

Agrupando los datos según el tipo de cemento, los valores de R^2 son muy diferentes. Con el empleo de cemento blanco se tienen valores próximos a 0,85 (la correlación obtenida es muy buena), mientras que con cemento gris los valores están entre 0,18 y 0,25 (correlaciones muy débiles).

Los resultados presentados muestran claramente que las correlaciones con mayor reciprocidad entre la resistencia a compresión y la absorción capilar se obtienen empleando FOp2, arena de sílice y cemento blanco.

Capítulo 5. Conclusiones

Este trabajo continuó con la investigación desarrollada en el diplomado, en virtud de que el hormigón translúcido es un material nuevo, innovador y en pleno desarrollo, con diversas investigaciones realizadas en todo el mundo —que fueron presentadas en el capítulo 2—, muchos aspectos a ser estudiados y futuros desarrollos a ser realizados en la temática.

El empleo del hormigón translúcido no está extendido a nivel mundial, y en nuestro país se utilizó en una sola obra de construcción. Esto e también se debe a su alto costo y al poco conocimiento que se tiene de las características del material.

Por ello, en esta investigación se elaboraron en laboratorio varios tipos de hormigón translúcido con materiales locales, que se denominaron *hormigón translúcido artesanal*, para los que se consideraron diferentes variables (dos tipos de cemento: cemento portland y cemento blanco; dos tipos de árido fino: arena de río y arena de sílice; dos tipos de fibra óptica, con diámetros de 0,37 mm y 0,75 mm). A los efectos de comparación, se elaboró un microhormigón de igual dosificación que el hormigón translúcido artesanal, pero sin fibra óptica (hormigón convencional) y se empleó también un hormigón translúcido, comercializado internacionalmente que se usó en la única obra de Uruguay en la que hasta la fecha se empleó hormigón translúcido (industrial).

En todos ellos se estudiaron la resistencia a compresión, la transmitancia óptica, la resistencia a alta temperatura y la absorción capilar.

Las conclusiones más importantes que se pueden extraer de los resultados obtenidos son las siguientes:

- i. De la caracterización de las fibras ópticas disponibles en nuestro país, surgió que la que presenta mayor similitud a las empleadas en el hormigón translúcido industrial (hormigón translúcido industrial) en espesor, material constituyente y densidad es la fibra óptica n.º 1 (con diámetro de 0,37 mm).
- ii. En relación a la *resistencia a compresión* a los 28 días:
 - El hormigón translúcido industrial presenta la mayor resistencia a compresión, con una media de los resultados que supera los 50 MPa. Esto se debe a su elaboración semindustrializada, con la cual se puede realizar una mayor compactación del microhormigón, y con ello lograr una mejor interfase con la fibra óptica que en los elaborados artesanalmente (el hormigón translúcido artesanal y el convencional).
 - Considerando los resultados obtenidos del hormigón translúcido artesanal y convencional, en general, con cemento blanco y arena de sílice (BS) se tienen las mayores resistencias a compresión, con resultados que se aproximan al de los testigos hormigón translúcido industrial. Con cemento gris y arena de río (GR) se tienen las menores resistencias a compresión.
 - En el hormigón translúcido artesanal se tiene mayor resistencia empleando cemento blanco, arena de sílice y fibra óptica de mayor diámetro (FOp2), en el que se obtiene un valor medio de 48 MPa, muy próximo al del hormigón

translúcido artesanal. Con igual cemento y fibra óptica, pero empleando arena de río se obtiene un resultado algo menor, aunque también próximo al del hormigón translúcido industrial.

- Se obtiene mayor resistencia a compresión empleando fibra óptica de mayor diámetro (FOp2) que cuando se emplea fibra óptica de menor diámetro (FOp1).
- En las muestras elaboradas con cemento gris, la inclusión de fibra óptica disminuye la resistencia a compresión en relación a las muestras elaboradas sin fibra óptica. En cambio, con el empleo de cemento blanco, la resistencia a compresión disminuye con la inclusión de la fibra óptica de menor diámetro y aumenta con la fibra óptica de mayor espesor en relación a las muestras sin fibra óptica elaboradas con dicho cemento.
- Estadísticamente, se estudiaron todos los resultados obtenidos de las probetas elaboradas artesanalmente (hormigón translúcido artesanal y hormigón convencional). Para ello, se realizaron diferentes análisis de varianza, que fueron presentados en el capítulo 4, resultando que no existen diferencias estadísticamente significativas, excepto en el hormigón convencional (sin fibra óptica). Solo existe diferencia estadísticamente significativa entre los resultados de los hormigón convencional (sin fibra óptica). Con empleo de cemento gris no existe una diferencia estadísticamente significativa de los resultados. La misma situación se observa con el empleo de cemento blanco. Considerando el tipo de arena empleado, de río (R) o de sílice (S), tampoco existe diferencia estadísticamente significativa en los resultados. Los resultados dentro de los grupos presentan mayor variación que los resultados entre los grupos.
- La diferencia de resultados entre los hormigones convencionales (sin fibra óptica) se debe principalmente al cemento empleado. En general, se obtiene mayores resistencias a compresión con cemento blanco que con cemento gris, a igualdad de arena. Sucede lo mismo a igualdad de arena y fibra óptica, excepto con BR1. Por ello, no se puede generalizar la significancia del cemento para los hormigones translúcidos artesanales como indicaron los análisis de varianza en sus resultados.

iii. En relación a la *transmitancia óptica*:

- El hormigón translúcido industrial presentó el menor porcentaje de transmitancia óptica (aproximadamente el 13 %), resultado muy diferente a los obtenidos en los hormigones translúcidos artesanales, cuyo valor menor correspondió a 26 % aproximadamente.
- Las muestras en que se utilizó cemento blanco, arena de río y fibra óptica de mayor espesor (BR2) presentaron la mayor transmitancia óptica, superando el 35 %. Con la inclusión de fibra óptica de menor diámetro (BR1) se redujo la transmitancia, con un porcentaje del 32 % aproximadamente. Sucedió algo similar al emplear cemento gris y arena de río, cemento blanco y arena de sílice, o cemento gris y arena de sílice. Por ello, se puede concluir que a igualdad de cemento y de arena con fibras ópticas de mayor espesor (a igualdad de peso, como se estudió en esta tesis) se aumenta la transmitancia óptica.

- A igualdad de cemento y fibra óptica, con empleo de arena de río se obtiene mayor transmitancia que con empleo de arena de sílice.
- A igualdad de arena y fibra óptica, con empleo de cemento blanco se obtiene mayor transmitancia óptica que con empleo de cemento gris.
- Los análisis estadísticos de varianza realizados a los hormigones translúcidos artesanales mostraron que existe diferencia estadísticamente significativa entre los resultados, y que hay mayor variación entre los grupos que dentro de ellos.

iv. En relación a la *resistencia a altas temperatura* a los 28 días:

- A 100 °C, el hormigón translúcido industrial tiene mayor resistencia que los hormigones translúcidos artesanales, pero a los 200 °C y 300 °C su resistencia disminuye mucho, resultando inferior incluso a la de algunos de los hormigones translúcidos artesanales elaborados sin fibra óptica (GR0 y BR0).
- Bajo los efectos de altas temperaturas en las probetas sin fibra óptica se tuvieron mejores resistencias que en las probetas con fibra óptica.
- Para el caso de 200 °C y 300 °C, la muestra hormigones translúcidos artesanales sin fibra óptica BR0 (cemento blanco + arena de río) es la que tiene mayor resistencia, aunque con una cierta diferencia en relación con los hormigones translúcidos industriales.
- Bajo los efectos de las altas temperaturas, en las muestras con fibra óptica la resistencia disminuye bruscamente a partir de los 200 °C, presenta un leve aumento de resistencia 300 °C, cuando se emplea cemento blanco, y presenta disminución cuando se emplea cemento gris.
- Los resultados obtenidos al someter las probetas a altas temperaturas fueron muy heterogéneos. Existe diferencia estadísticamente significativa entre ellos; de allí que fuera necesario realizar análisis de varianza para cada temperatura estudiada y también para cada grupo, según las variables estudiadas.
- En cada una de las temperaturas estudiadas (100 °C, 200 °C y 300 °C) existió diferencia estadísticamente significativa de los resultados obtenidos en los hormigones translúcidos artesanales (con y sin fibras), y se registró mayor variación entre los grupos que dentro de ellos.
- Considerando todas las temperaturas, en el análisis estadístico de varianza de todos los resultados de hormigones translúcidos artesanales (con y sin fibras) no existió diferencia estadísticamente significativa, pero sí mayor variación dentro de los grupos que entre los grupos. Por ese motivo, fue necesario estudiar la varianza dentro de los diferentes grupos (GR; GS; BR; BS) y luego entre ellos (GR–GS; BR–BS; GR–BR; GS–BS). No hubo diferencia estadísticamente significativa en los resultados.

v. En relación a la *absorción capilar* a los 28 días:

- La cantidad de agua absorbida por capilaridad W aumenta en función del tiempo, en general con mayor incidencia en las muestras con fibra óptica que en las que no las tienen.

- Con cemento blanco y arena de sílice (BS), se registra menor cantidad de agua absorbida cuando se emplea fibra óptica que cuando no se emplea.
- Los análisis de varianza de los resultados de agua absorbida por capilaridad indican que existe diferencia estadísticamente significativa. Hay mayor diferencia entre los grupos que dentro de los grupos.
- Todos los resultados presentaron mayor capacidad de absorción capilar a los 60 segundos que a los 294 segundos. Se registró una disminución significativa de la capacidad de absorción a medida que avanzaba el tiempo.
- A los 60 segundos, GR1 (elaborados con cemento gris, arena de río y FOp1) registra la mayor capacidad de absorción capilar. Luego continúa el hormigón translúcido artesanal.
- Los análisis de varianza de todos los resultados de capacidad de absorción capilar de los hormigones translúcidos artesanales y convencionales indicaron que no existe diferencia estadísticamente significativa. Presentaron mayor variación los resultados dentro de los grupos que entre grupos. Esto motivó la realización de análisis de varianza de los diferentes grupos por separado (GR; GS; BR; BS), y luego, considerando una variable común al grupo (cemento gris, GR-GS; cemento blanco, BR-BS; arena de río, GR-BR; arena de sílice, GS-BS).
- Considerando los diferentes grupos por separado, solo registraron diferencia estadísticamente significativa los resultados de las probetas realizadas con cemento blanco y arena de río (BR). Presentaron mayor variación los resultados entre grupos que dentro de los grupos.
- Considerando como grupo las probetas con una variable común, solo registraron diferencia estadísticamente significativa las probetas en que se empleó cemento gris (GR-GS). Presentaron muchísima variación dentro de los grupos, mientras que entre los grupos apenas se registró variación.

vi. En relación a las *correlaciones entre las diferentes propiedades*:

- Los resultados fueron muy satisfactorios, principalmente entre la resistencia a compresión y la transmitancia óptica. Considerando las diferentes variables estudiadas, se alcanzó una excelente reciprocidad entre ambas propiedades con funciones polinómicas cuando se emplea la FOp2, arena de sílice y cemento gris (R^2 es aproximadamente 0,90, 0,99 y 0,96, respectivamente, para cada una de esas variables). Con esas variables se tiene una buena transmisión de luz (de 35 % aproximadamente), con una buena resistencia a compresión a los 28 días de edad (47 MPa). Esto hace muy estético al material, que aporta luz a espacios interiores y, a la vez, resistencia.
- Se establecieron también correlaciones entre la resistencia a compresión y la exposición a altas temperaturas, y entre la resistencia a compresión y la absorción capilar, que no se ajustaban excelentemente como en el caso anterior a los resultados obtenidos experimentalmente.
- Para las correlaciones entre la resistencia a compresión y las altas temperaturas, mejores ajustes se obtuvieron con la temperatura de 100 °C, con $R^2 = 0,73$, de

reciprocidad buena. Tomando en cuenta las variables estudiadas en dicha temperatura, las mejores correlaciones se obtuvieron con la FOp1, arena de sílice y cemento blanco (siendo R^2 aproximadamente 0,88, 0,73 y 0,64, respectivamente, para cada variable). Con estas variables se obtuvo una resistencia a compresión a los 28 días de edad de 40 MPa a temperatura ambiente. En las muestras y testigos sometidos a temperatura de 100 °C se obtuvo resistencia a compresión a los 28 días de edad de 37 MPa: el valor de la resistencia bajó muy poco, pero con mayores temperaturas se tuvieron descensos muy importantes de resistencia.

- En relación a las correlaciones resistencia a compresión con la absorción capilar, la reciprocidad obtenida fue pésima en los tres tiempos estudiados (0 min, 60 min y 294 min). Con funciones polinómicas de grados seis, R^2 estuvo entre 0,31 y 0,34. Para los tres tiempos, las variables estudiadas que mejor se correlacionaban eran con el empleo de FOp2 (R^2 tiende al valor 1), arena de sílice (R^2 próximo a 0,98) y cemento blanco (R^2 próximo a 0,86). Cuando se emplean estas variables, la resistencia a compresión es de 48 MPa. Para el caso de la absorción capilar en función del tiempo, el peso de las muestras y testigos, presentó valores poco variables, por lo cual los resultados de las correlaciones en los tres tiempos estudiados contaron con valores semejantes.

Como sugerencia para futuras investigaciones en hormigón translúcido se podría plantear:

1. Estudiar mediante MEB la microestructura de los hormigones translúcidos artesanales, industriales y de los convencionales estudiados, a los efectos de poder relacionarla con los resultados obtenidos de los ensayos realizados.
2. Estudiar la influencia de distintos porcentajes de fibra óptica y cantidad de capas en las propiedades del hormigón translúcido, ya que en este trabajo se usó solo el 2 % de fibra óptica sobre el volumen de la matriz, y las muestras se realizaron con 5 capas de fibra óptica (seltas) alternándolas con el microhormigón.
3. Desarrollar un hormigón translúcido con un posicionamiento fijo de las fibras ópticas en trama ortogonal, desarrollando un molde adecuado.
4. Estudiar y comparar la transmitancia óptica del hormigón translúcido según el posicionamiento de las fibras ópticas: sueltas y fijas, así como también para otras propiedades que no han sido estudiadas como, por ejemplo, la resistencia a compresión a diferentes edades y los efectos de la carbonatación en el hormigón translúcido.

Referencias bibliográficas

- ACI Committee 549.2R-04 (2007). Report on thin reinforced cementitious products. En *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 6, 1-28.
- Ahuja A. y Mosalam K. M. (2017). Evaluating energy consumption saving from translucent concrete building envelope. *Energy and Buildings*, 153, 448-460.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.062>
- Bashbash, B. F., Hajrus, R. M., Wafi, D. F. y Alqedra, M. A. (marzo, 2013). Basics of Light Transmitting Concrete. *Global Advanced Research Journal of Engineering, Technology, and Innovation*, 2(3), 76-83.
- Concrete: the once & future liquid stone. (22 de marzo de 2005). *Interior + Sources*.
<https://www.interiorsandsources.com/article-details/articleid/2374/title/concrete-the-once-future-liquid-stone>
- DeCusatis, C. [Ed.]. (2011). *Handbook of fiber optic data communication: a practical guide to optical networking*. Elsevier Academic Press.
<https://books.google.co.ve/books?id=ynvMx7mMgJAC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Delgadillo, F. (2014). *Preparación y caracterización de nuevas membranas fibrosas fotocatalíticas de PMMA + TiO₂ por la técnica de electrohilado*. Tesis de maestría en Ciencias de Materiales. Universidad de Sonora, México. Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, División Ingeniería.
- Dhonghak, A. (2016). A glowing future: transparent concrete. *IJARIE-International Journal of Advance Reserach and Innovative Ideas in Education*, 2(5), 1465-1470.
- Eberle, P. (2017). *Estudio y análisis de la fibra óptica de plástico para transmisión de medios multimedia en entornos HAN*. Proyecto curricular de Ingeniería Electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Facultad de Ingeniería.
- Fernández, A. (1986). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. *El Croquis*, 25, 24-93. <http://oa.upm.es/30863/>
- González, M. (8 de noviembre de 2010). Transmitancia y absorbancia. *La Guía, Química*.
<https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/transmitancia-y-absorbancia>
- Halbiniak, J. y Sroka, P. (febrero, 2015). Translucent concrete as the building material of the 21.st Century. *Teka, Commission of Motorization and Energetics in Agriculture-2015*, 15(1), 23-28.

- Hart, S. (enero, 2005). Concrete gets glamorous in the 21.st century. *Revista Architectural Record*, 175-183.
<https://www.architecturalrecord.com/ext/resources/archives/backissues/2005-01.pdf?1104555600#%5B%7B%22num%22%3A3317%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22Fit%22%7D%5D>
- Henriques, T.D., Molin, D.C. y Masuero, Â.B. (2018). Study of the influence of sorted polymeric optical fibers (POFs) in samples of a light-transmitting cement-based material (LTCM). *Construction and Building Materials*, 161, 305-315.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2006). *Metodología de la investigación* (4.^a ed.). Mc GrawHill Interamericana.
- Horna Palomino, H. (22 de octubre de 2015). *Propiedades ópticas-Color*. .
- Hoyos, A. (2012). *Concreto translúcido: transmisión de luz visible a través de morteros con fluorita como agregado fino*. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería de Materiales.
- Hoyos, A., Tobón, J. y Farbiarz, Y. (mayo, 2014). Avances en el desarrollo de los concretos translúcidos. *Revista Colombiana de Materiales [Edición especial, artículos cortos]*, 5, 81-86.
- Juan, S. y Zhi, Z. (abril, 2019). Preparation and study of resin translucent concrete products. *Advances in Civil Engineering* [Article ID 8196967].
- Khoury, G., (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in structural engineering and materials*, 2, 429-447.
- Kuang, C., (2010). The beauty of fiber optic concrete, yes fiber optic concrete. *Fast Company*.
<https://www.fastcompany.com/1662953/beauty-fiber-optic-concrete-yes-fiber-optic-concrete>.
- La Salle. (s. f.) *LST4, Estructures d'edificació*. <https://docplayer.es/4169247-Http-lst40809-wordpress-com-lst4-estructures-d-edificacio-arquitectura-la-salle.html>
- Li, Y., Li, J. y Guo, H. (2015a). Preparation and study of light transmitting properties of sulfoaluminate cement-based materials. *Materials & Design*, 83, 185-192.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.021>
- Li, Y., Li, J., Wan, Y. y Xu, Z. (2015b). Experimental study of light transmitting cement-based material (LTCM). *Construction and Building Materials*, 96, 319-325. DOI:
- Luisi, A. (2015). *Hormigón translúcido* [Trabajo de Diploma de Especialización de Construcción de Obra de Arquitectura]. UdelaR- Facultad de Arquitectura.
<http://www.fadu.edu.uy/sepep/tesis/hormigon-translucido/>

- Mainini A., Poli T., Zinzi M. y Cangiano S. (2012). Spectral light transmission measure and radiance model validation of an innovative transparent concrete panel for façades. *Energy Procedia*, 30, 1184-1194.
- Mallo, D., (2012a). *Hormigón translúcido*. *Revista Edificación, Construcción y Estructura*, (Parte 1). <http://diegomallof.blogspot.com.uy/2012/05/el-hormigon-translucido.html>.
- Mallo, D., (2012b). Hormigón translúcido. *Revista Edificación, Construcción y Estructura*, (Parte 2).
- Martínez, J. (2013). *Caracterización termomecánica y óptica de una fibra óptica de núcleo polimérico* [Trabajo de titulación en Ingeniería Técnica en Mecánica]. Universidad Carlos III, Madrid. <http://e-archivo.uc3m.es> y
- Maxx. (6 de enero de 2009). Concreto translúcido made in México. *Simbiosis News, Architecture*. <http://simbiosisgroup.net/4788/concreto-translucido-made-in-mexico>.
- Mendoza, L. (2008). *Síntesis de nanopartículas de NiO y su incorporación en una matriz de PMMA* [Tesis de maestría en Tecnología de Polímeros]. Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila.
- Metha, P. y Monteiro, P. (1998). *Concreto: estructura, propiedades y materiales*. IMCYC.
- Mollagas, C. y Páez, A. (2016). Uso de bloques de concreto translúcido para mejorar el arriostramiento de estructuras metálicas y su contribución al ahorro energético. [Trabajo de grado de Ingeniero Civil]. Universidad Nueva Esparta, Venezuela.
- Momin, A., Kadiranaidar, R., Jagirdar, V. y Inamdar, A. (2014). Study on light transmittance of concrete using optical fibers and glass rods. *IOSR-JMCE: Journal of Mechanical and Civil Engineering*, e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, 67-72. <http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/ICAET-2014/ce/volume-1/11.pdf?id=7622>
- Neville, A. (1987). *Concrete Technology* (2.^a ed.) Pearson Education Limited.
- Páez, A. (octubre, 2016). Uso de bloques de concreto translúcido para mejorar el arriostramiento de estructuras metálicas y su contribución al ahorro energético [Trabajo Académico]. Universidad Nueva Esparta, Escuela de Ingeniería Civil, Venezuela.
- Praveenkumar, R., Goumathy S., Nomitha, K.M., Raj A. y Mathew, S. (marzo, 2017). An experimental study on smart transparent concrete. *IJIRSET: International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6 (3), 3878-3887. http://www.ijirset.com/upload/2017/march/158_praveen4_NEW.pdf
- Ravivarman S., Mageswari, M. y Kanagalakshmi, A. (noviembre-diciembre, 2015). Experimental study of LiTraCon. *IOSR-JMCE: Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12 (6, versículo I), 7-13.

- Roy, S., Shurthi, C., Sanjith, J. y Sudhakar, G. (junio/febrero, 2018). *Mechanical properties of concrete using optical and glass fibre. IOSR-JMCE: Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 15(1, Ver. III), 56-65. <http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol15-issue1/Version-3/I1501035665.pdf>
- Saleh, S. (agosto, 2018). Translucent Concrete as a Construction Material. *International Journal of Research*, 7(8), 270-276.
- Salih, S. Joni, H. y Mohamad, S. (abril, 2018). *Evaluation of the mechanical properties of translucent concrete. IJETT- International Journal of Engineering Trends and Technology*, 58 (3), 158-164. <http://ijettjournal.org/2018/volume-58/number-3/IJETT-V58P230.pdf>
- Salih, S., Joni, H. y Mohamad, S. (2014). Effect of plastic optical fiber on some properties of translucent concrete. *Eng. & Tech. Journal*, 32 -Parte A(12)
- Schuter, G. (2008). *Self-compacting concrete*. CRC Press.
- Shulman, K. (abril, 2001). X-Ray Architecture. *Revista Metropolis American Magazine*. 72-75; 98-99.
- Soumyajit, P. y Avik, D. (octubre, 2013). *Translucent concrete. International Journal of Scientific and Research Publications*, 3 (10). <http://www.ijsrp.org/research-paper-1013/ijsrp-p2283.pdf>
- Tazawa, E. (1998). *Autogenous shrinkage of concrete*. E & F.N. Spon.
- Toyos, J. (agosto, 1947). Una cubierta de hormigón armado translúcido. *Revista de Obras Públicas*, 95, tomo I, 2788, 331-338. http://ropdigital.ciccp.es/detalle_articulo.php?registro=16464&anio=1947&numero_revista=2788
- Valambhiya, H., Tuvar, T. y Rayjada, P. (junio, 2017). History and case study on light transmitting concrete. *JETIR: Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 4(1), 22 -30. <http://www.jetir.org/papers/JETIR1701004.pdf>
- Wang, F., Shu, C., Zheng, D., Yang, L. y Liu, P. (11 de enero de 2016). Preparation and processability of light-transmitting magnesian cementitious materials. *ACI Materials Journal*, 113 (6), 719-724. DOI 10.14359/51689237
- Zhi, Z., Ge, O., Ying, H., Genda, CH. y Jinping, O. (2009). Research and development of plastic optical fiber based smart transparent concrete. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 7293. DOI:
- Zhou, Z. (2009). *Research and Development of Plastic Optical Fiber Based Smart Transparent Concrete*. En N.G. Meyendorf, K.J. Peters y W. Ecke. (Edits.) *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems* DOI: 10.1117/12.816638

Bibliografía consultada

- Aguas, J. (2015). *Hormigón translúcido con fibra de vidrio y cuarzo*. Trabajo académico. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador. Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción, Ingeniería Civil.
- Barreno A. y Rodrigo J. (2015). *Hormigón translúcido con fibra de vidrio y cuarzo*. Tesis de bachillerato. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador. Carrera de Ingeniería Civil.
- Baruwala, M. y Parikh, K. (enero, 2017). Study on various aspects of translucent concrete. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 4(1), 230-232.
- Berazaluce, I. (2013). ¡Luz, más luz! Llega el cemento translúcido. *Revista La Información*. <https://www.lainformacion.com/opinion/futuretech/cemento-translucido/7375/>
- Bhushan, P., Johnson, D., Pasha A. B. y Prasanthi, K. (mayo/junio, 2013). Optical fibres in the modeling of translucent concrete blocks. *IJERA: International Journal of Engineering Research and Applications*, 3(3), 13-17.
- Cadavid, L. (2013). Concreto translúcido: estudo experimental sobre a de fabricação de painéis de concreto com fibra óptica e as suas aplicação na arquitetura. Tesis de maestría. Universidad de Brasilia, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- Cruz, M. (2011). *Hormigón translúcido con fibra óptica*. Trabajo académico. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación.
- Florsheim, S. (junio, 2005). La noche de la ciudad translúcida. *Revista de Urbanismo*, 12, DOI 10.534/0717-5051.2010.6219
- Gawatre, D., Giri, S. y Bande, B. (marzo, 2016). Transparent concrete as an eco-friendly material for building. *International Journal of Engineering Science Invention*, 5(3), 55-62.
- Kamble, S. R., Raut, S. R. y Mishra, H. D. (2019). Transparent concrete: an evolution towards better India. *International Journal of Innovations in Engineering and Science*, 4(4), 92-97. <http://www.ijies.net/finial-docs/finial-pdf/1704194422.pdf>
- Kashiyani, B., Raina, V., Ptroda, J. y Shah, B. (febrero, 2013). A study on transparent concrete: a novel architectural material to explore construction sector. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 3(8). 83-87. https://www.researchgate.net/publication/281178537_A_Study_on_Transparent_Concrete_A_Novel_Architectural_Material_to_Explore_Construction_Sector
- Rbk, O. y Adrián C. (2011). Concreto translúcido (invento mexicano). *En2patas*. .

- Sharma, S. y Reddy, O. (marzo, 2017). Transparent Concrete. *IJESRT: International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 6 (3), 305-308.
- Shweta, R., Sagar, R. y Hitshkumar, D. (2019). Transparent concrete: an evolution towards better India. *International Journal of Innovations in Engineering and Science*, 4(4), 92-97.
- Subharajit, R., Shurthi, C. G., Sanjith, J. y Sudhakar, G. N. (junio y febrero 2018) Mechanical properties of concrete using optical and glass fibre. *IOSR-JMCE: Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 15(1, Ver. III), 56-65.

Patentes

Cangiano, S. (24/11/2014) Patente Italia WO/2014/184242/A1

Carminati, A. (11/09/2015). Patente Italia WO/2015/132287

Galván, S. (29/06/2009). Patente México MX/E/2009/004497

Gast, I. (17/09/2008). Patente Hungría EP1970497

Gast, I. (21/04/2010). Patente Hungría EP2177332

Jürgen, H. (03/05/2007). Patente Alemania DE20/2007/000753

Jürgen, H. (30/08/2007). Patente Alemania WO/2007/096083

Lake, H. (13/02/1980). Patente Inglaterra GB/1561142/A

Long, B. (19/10/1935). Patente Canadá CA/353849

Losonczy, A. (16/05/2003). Patente Hungría WO/2003/097954/A1

Losonczy, A. (15/01/2009). Patente Hungría WO/2009/007765/A2

Rapp, A. (25/03/1987). Patente Estados Unidos US/4811770

Roye, A., (05/03/2009). Patente Alemania WO/2009/027113/A1

Normas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Métodos de prueba estándar para muestreo y prueba de láminas planas de fibrocemento sin asbesto, tejas y tejas de revestimiento y tablillas. ASTM C1185 – 03, vol. 15.01. ASTM International, Filadelfia, Pensilvania, Estados Unidos, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes*. ASTM C1585 – 11. ASTM International, Filadelfia, Pensilvania, Estados Unidos, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM C109/C109M-05. ASTM International, Filadelfia, Pensilvania, Estados Unidos, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM C109/C109M-08. ASTM International, Filadelfia, Pensilvania, Estados Unidos, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes*. ASTM C1585 – 11. ASTM International, Filadelfia, Pensilvania, Estados Unidos, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. ASTM D792-07. ASTM International, Pennsylvania, Estados Unidos, 2007.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (AENOR). *Hormigón. Parte 9: Requisitos adicionales para el hormigón autocompactante*. UNE-EN 206-9:2013. España dentro de la estructura del Comité Europeo de Normalización, España, 2013.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (AENOR). Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). UNE-EN 1015-3:2000/A1:2005/A2:2007, España dentro de la estructura del Comité Europeo de Normalización, España, 2007.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (AENOR). Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). UNE-EN 1015-3:2000/A1:2005/A2:2007, España dentro de la estructura del Comité Europeo de Normalización, España, 2007.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Mortars applied on walls and ceilings - Determination of the flexural and the compressive strength in the hardened stage. NBR 13279:2005. ABNT de Brasil, Brasil, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Mortero para colocación y revestimiento de paredes y techos - Determinación de la absorción de agua por capilar y coeficiente capilar. NBR 15259: 2003. Río de Janeiro, Brasil, 2003.
- CHINA NATIONAL STANDARDS (GB). *Common Portland Cement*. GB 175-2007, China, 2007.
- INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (IRAM). *Cementos para uso general*. IRAM 50.000:2000, Argentina, 2000.
- INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (IRAM). *Cemento con propiedades especiales*. IRAM 50.00012000, Argentina, 2000.
- INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS (UNIT). *Cementos portland para uso general - Definiciones y requisitos*. UNIT 20:20017, Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, Montevideo, Uruguay, 2017.
- INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS (UNIT). *Métodos de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas*. UNIT-ISO 679:2009, Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, Montevideo, Uruguay, 2009.
- INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS (UNIT). *Agregados. Determinación de la composición granulométrica*. UNIT-NM 248:2002, Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, Montevideo, Uruguay, 2002.
- POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY (PKN). *Hormigón. Requisitos, propiedades, producción y cumplimiento*. PN-EN 206-1: 2003. PKN de Polonia, Polonia, 2003.

Webgrafía

CRE PANEL	www.crepanel.com
DURO CONCRETOS.	www.duroconcretos.com
I-LIGHT.	www.italcementi.it
ITALCEMENTI	www.italcementigroup.com
JOLO	www.jolo.at
LITRACON.	www.litracon.hu
LUCCON.	www.luccon.com
LUCEM Lichtbeton.	www.lucem.com

ANEXOS

Anexo I. Complemento del capítulo 2

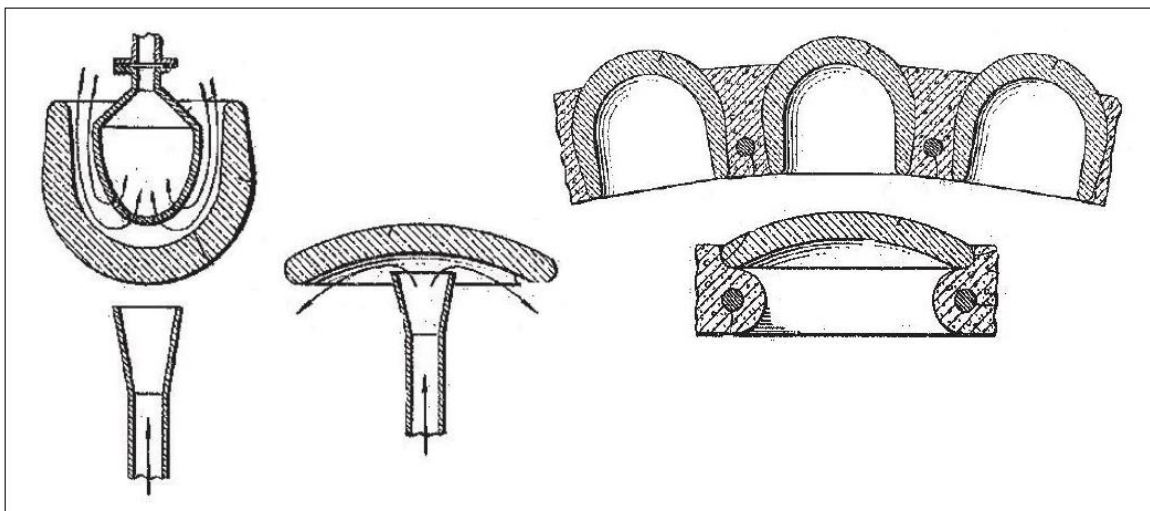
I.1. Hormigón translúcido

En el anexo I se presenta la reseña histórica bibliográfica sobre el material *hormigón translúcido*, sus aplicaciones, patentes, proyectos concretos, ensayos y prototipos encontrados.

El nombre *hormigón translúcido* aparece a partir de los años 30, integrando el concepto de transmisión de la luz, principalmente luz natural hacia el interior de los edificios. El concepto de transmisión de la luz se produce a través de un elemento transparente o translúcido: el vidrio juega en combinación con el hormigón estructural.

Por lo que se ha estudiado, se menciona, por primera vez en 1935, en una patente canadiense (Long, 1935) (ver figura I.1). Se basa en la construcción de cubiertas modulares de HA con un elemento translúcido incrustado: vidrio (Datos según patente, no hay datos de su aplicación).

Figura I.1 – Diseño constructivo de la patente canadiense de 1935, con el nombre “Light Transmitting Concrete Structure”.



Más adelante, en el año 1947, se conoce un componente similar, denominado *hormigón armado translúcido* (Toyos, 1947). Es una cubierta que da paso a la luz y se adapta a las formas más variadas, otorgando flexibilidad en el sistema. El inventor es el Ing. de caminos José Martín Toyos, y se ha aplicado en varias obras, como en el Banco de España, el Banco de Bilbao, el Banco Ibérico, la Academia de Bellas Artes de San Fernando y la Equitativa Fundación Rosillo. Toyos dice que los materiales, vidrio y hormigón, colaboran en la resistencia del conjunto poniendo en manifiesto el estudio teórico. En las figuras I.2 y I.3 se presenta dicha solución.

Figura I.2 – Diseño de cubierta sobre patio del Edificio Banco de Crédito de España, Madrid.

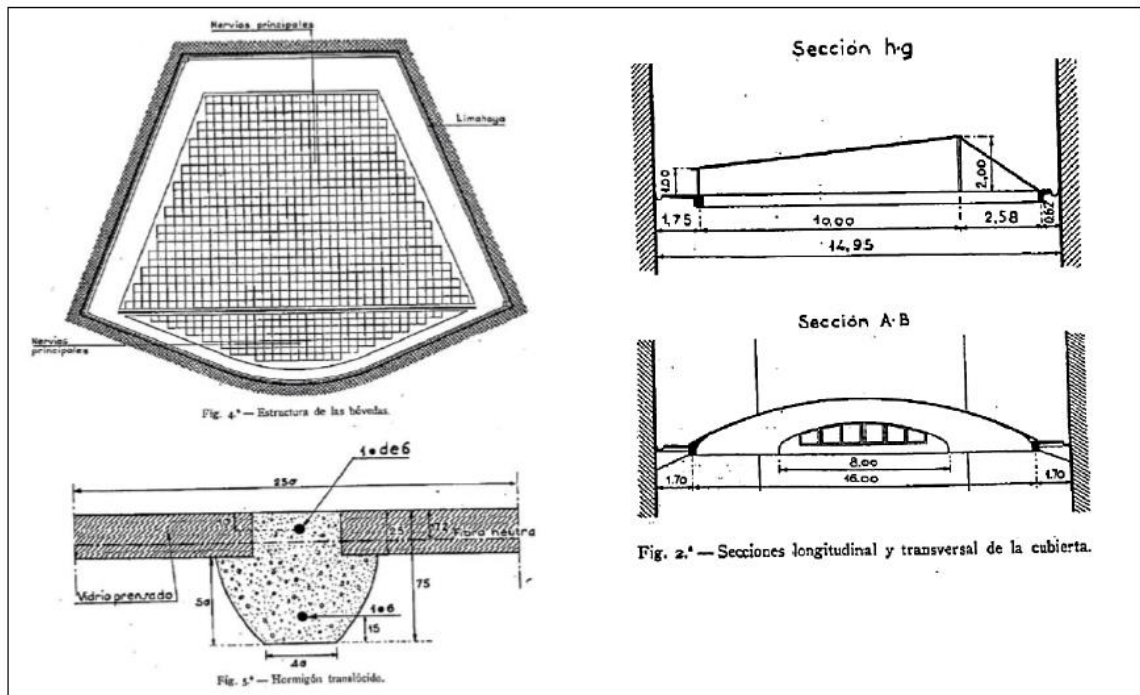
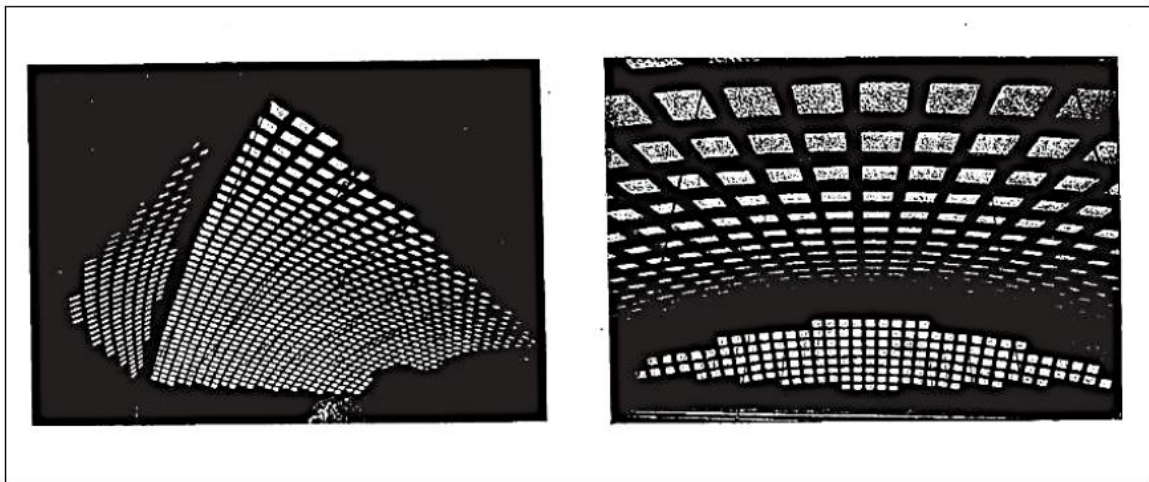


Figura I.3 – Diseño de cubierta sobre patio del Edificio Banco de Crédito de España, Madrid.



Otro ejemplo es la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Valladolid, España, del arquitecto Antonio Fernández Alba, construido entre los años 1982 y 1985 (Fernández, 1986). El artículo donde presenta el HT hace referencia a una bóveda de hormigón translúcido que se puede pisar, modelo Novalux, de 135/135/50 mm reforzado con zunchos de H, armado cada 6 metros y de una sección de 25/100 cm. Dichos zunchos se protegen en su parte exterior por chapa plegada tipo Perfrisa². Se presenta en la figura I.4.

² La empresa Perfrisa formaba parte de la empresa Ensidesa; luego formó parte de las empresas Aceralia y Arcelor. Actualmente, integra la empresa internacional Arcelor-Mittal.

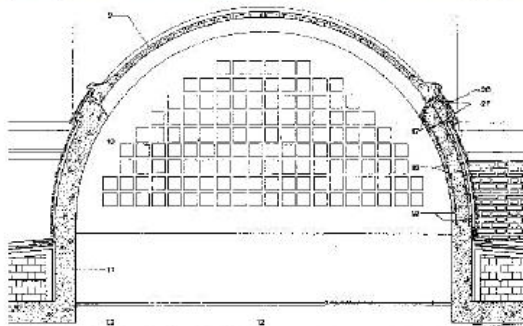
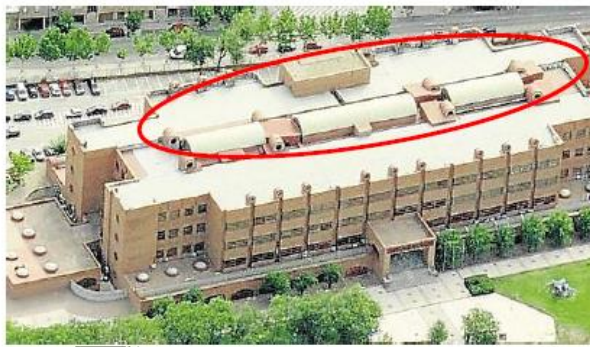
Este sistema de bóvedas de hormigón translúcido también se ha utilizado en la Facultad de Ciencias de la Educación, en Salamanca, España (1981).

En los ejemplos mencionados en el concepto de *hormigón translúcido*, trasmisor de luz, se hacía referencia a un material con componentes separados de HA y vidrio.

Los estudios en el desarrollo del material continuaron cambiando sus características, a los efectos de generar un hormigón translúcido específicamente.

En el año 1999, el arquitecto Bill Price³ desarrolló el primer hormigón translúcido como se conoce hoy día (con materiales unificados en una misma masa), presentando una propuesta innovadora que cambió el espectro académico y profesional del área de la arquitectura y la construcción. Su estudio en relación al desarrollo de este nuevo material comenzó en 1998.

Figura 1.4 – Bóveda de “hormigón translúcido” la Escuela Técnica Ingenieros Industriales Valladolid, España, 1982-1985.



En la entrevista del artículo “X-Ray Architecture”, de la *Revista Metropolis American Magazine*, el arquitecto Bill Price, manifiesta que, en conjunto con el arquitecto Robert Dunay (decano asociado al Departamento de Arquitectura y director de Diseño Industrial), definieron al hormigón translúcido como:

Translucent concrete might give us the ability to deal with some of the attributes of concrete -strength, stability, and molding - but also give the qualities people normally associate with glass. This would have both large - and small - scale applications. [Se puede traducir como: El HT podría darnos la capacidad para hacer frente a algunos de los atributos del hormigón:

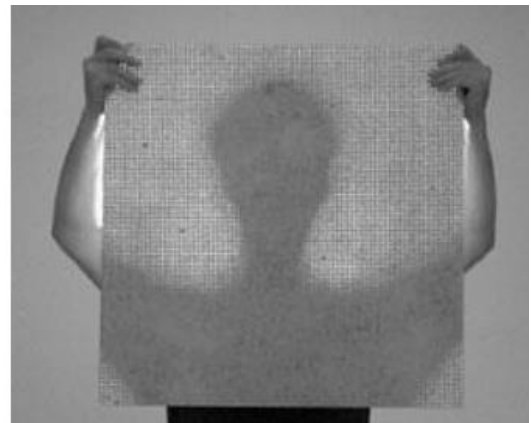
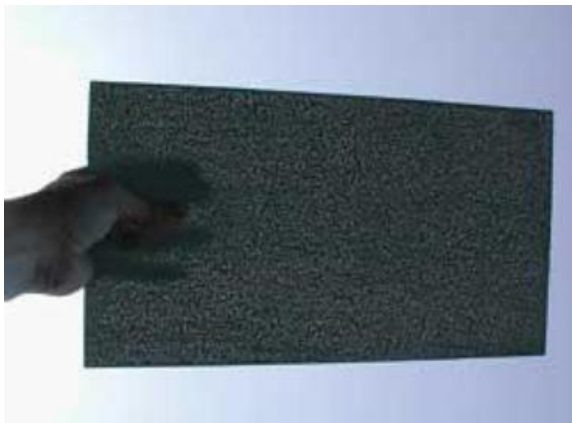
³ Bill Price, arquitecto y profesor de la Universidad de Houston (EE. UU.).

fortaleza, estabilidad y moldeo, pero también dar las cualidades que normalmente asociamos con el vidrio, lo que tendría aplicaciones a pequeña y gran escala]. (Shulman, 2001).

Además, habla de su trabajo junto a Rem Koolhaas en Rotterdam, y comenta que su inspiración proviene de una pregunta del propio Koolhaas: “Could we make the concrete translucent?”, donde dice Price: “Rem was very much into researching transparency”.

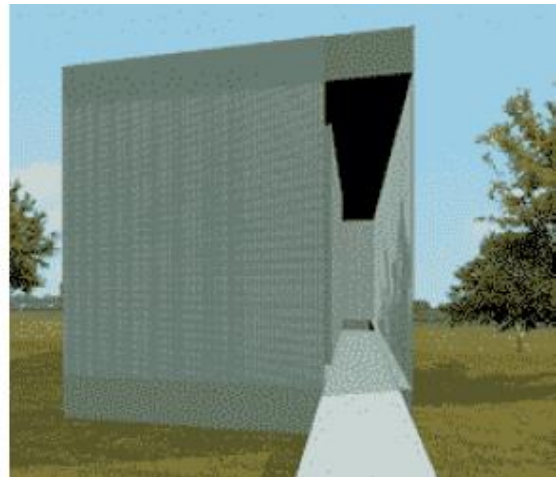
Este hormigón translúcido, llamado “Pixel Panels” (figura I.5) se logra con el uso de polímeros y vidrio molido combinado con un MH, generando un diagrama en píxeles. Para transmitir la luz, crea una serie de productos de HT, como paneles, ladrillos y bloques (Hart, 2005). En las primeras muestras se realizaron ensayos de compresión y resistencia a flexión. Son muestras pequeñas, y se trabajó en conjunto con algunos fabricantes para acelerar su investigación. No se dispone de datos de los resultados obtenidos experimentalmente por Price.

Figura I.5 Paneles delgados, con aprox. 3 cm de espesor con un 35 % de transmisión de luz; otro de 2,5 cm de espesor y transmite la luz 25 %



Puso en marcha el proyecto, fabricando una maqueta de una capilla a escala 1:1 (figura I.6), donde surgieron algunos problemas que ponían en duda la posibilidad real de obtener un material con estas características, como por ejemplo, el precio, que según Price, sería cinco veces mayor que el del HC. Presentó su trabajo hasta abril de 2006 en la exhibición *Liquid Stone: New Architecture in Concrete* en el National Building Museum, en Washington, D.C., (Interiors+Sources, 2005).

Figura 1.6 – Capilla de píxeles propuesta por Bill Price



Luego, se encuentra al arquitecto Will Witting, profesor de la Universidad de Detroit Mercy en Michigan (EE. UU.), quien diseñó un prototipo de panel de HA mezclando arena blanca, cemento portland blanco y hebras cortas de vidrio. Estos paneles son delgados como una moneda en el centro y con 1cm de espesor en los bordes. Los ensayos en laboratorio mostraron que eran demasiado frágiles para soportar el viento y la lluvia. También presentó su trabajo en la exhibición *Liquid Stone: New Architecture in Concrete*, en el National Building Museum, en Washington, D.C.

Con la invención de la FOp en 1970⁴ y su gran desarrollo en los años 80, se encuentran dos tipos: de vidrio y de polímeros. La tasa de inventos y desarrollos en este campo ha aumentado drásticamente, lo que permitió, a principios de la década del 90, que se desarrollaran materiales como el HT con FOp.

Por esto, comienzan las investigaciones en la industria de la construcción con las fibras ópticas. Una de ellas es la patente europea GB1561142, con la utilización de fibra de nylon, fibra de vidrio o fibra de polietileno con espesores entre 12 y 15 mm. Son utilizadas en componentes decorativos en paredes, pisos y techos. La invención es de los arquitectos británicos David Kenneth y John Richardson, y fue registrada el 13 de febrero de 1980. No se encuentra antecedentes de su aplicación.

En el año 2001, se le atribuye el inicio del HT con FOp al arquitecto húngaro Áron Losonczi.⁵ Desarrolló el primer prototipo de LiTraCon en 2001 y obtuvo su primera patente en 2002. Fundó la empresa Litracon KFT en 2004, que se ubica en la ciudad húngara de Csongrád y se

⁴ En 1970, los investigadores Robert Maurer, Donald Keck, Peter Schultz, además de Frank Zimar, que trabajaban para Corning Glass, fabricaron la primera fibra óptica aplicando impurezas de titanio en sílice, con cientos de metros de largo, con la claridad cristalina que Kao y Hockman habían propuesto, aunque las pérdidas eran de 17 dB/km. Durante esta década, se mejoraron las técnicas de fabricación, consiguiendo pérdidas de tan solo 0,5 dB/km

⁵ Áron Losonczi obtuvo su título de grado en Arquitectura en la Universidad Técnica de Budapest. Entre 2001 y 2003 estudió un posgrado en el Royal Art College de Estocolmo.

dedica al desarrollo, fabricación y venta de productos de hormigones transmisores de luz. Presentó su segunda patente para LiTraCon pXL® en el año 2007.

El inventor fue honrado con varios premios personales: Premio Húngaro de Patrimonio (2014), Premio especial – Icono del año (2013), Premio Gábor Dénes (2011), Premio Juventud de Marzo (2010), Premio de Creación del Condado de Csongrad (2009), Embajador honorario de Hungría durante el Año Europeo de la Creatividad y la Innovación, 2009, Premio especial “*Innovador valiente*” (Ernst & Young: Emprendedor del año – 2008), Premio Pro Urbe de la ciudad de Csongrad (2005), Premio Departamento de Arquitectura de TUB (2001).

Realizó una mezcla de MH y FOp que dio como resultado un tipo de material con carácter trasmisor de la luz. La resistencia del material que desarrolló es mayor que la del HC, pero permite visualizar las siluetas en la cara opuesta de la transmisión de luz.

Este es el primer HT que se comercializó, bajo el nombre LiTraCon (Light Translucent Concrete). Para conformar la mezcla, se disponen miles de FOp de un diámetro que puede ir de los 2 nm a los 2 mm, en capas o en celdas, en forma paralela a las dos caras del bloque. Por este motivo, las sombras originadas en el lado más iluminado aparecen en el otro lado destacando su contorno, lo que da la impresión de que el espesor del muro de H desaparece.

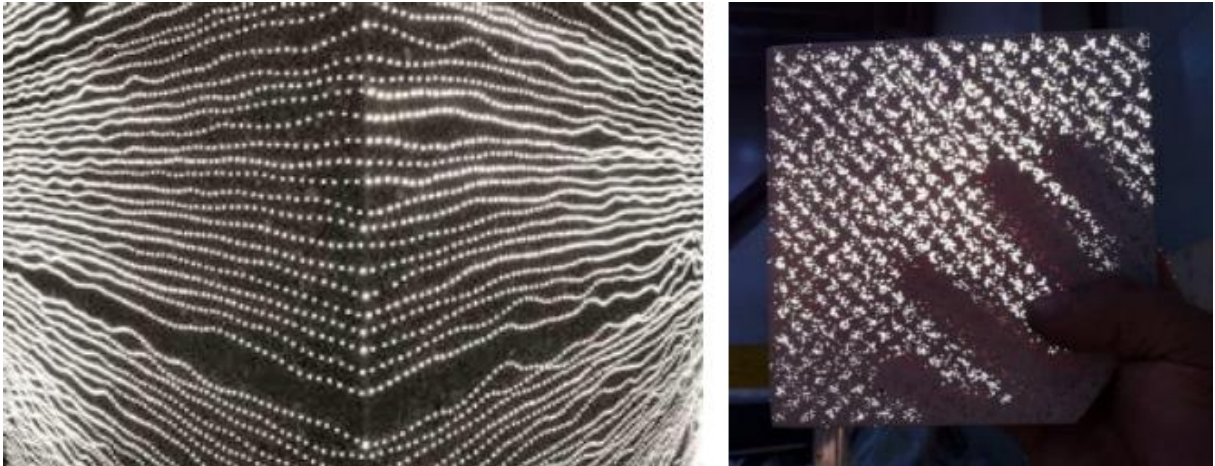
Se expusieron diversos prototipos en exposiciones por varias partes del mundo: en la exhibición *Liquid Stone: New Architecture in Concrete*, en el National Building Museum (Washington D.C.), en la BAU2005 (Munich), en Big Sight (Tokio), entre otros. Como ejemplo de ellos, se presenta la figura I.7. Se exhibieron prototipos en colores gris, blanco, marrón, y rojo; así como también lisos o con relieve, que depende de los moldes utilizados. Ofrece diferentes texturas, colores y expresión arquitectónica.

Figura I.7 – Exhibición de LiTraCon en el Museo Nacional de Construcción de Washington D.C., EE. UU.



En el año 2004, aparece otra variante, similar al LiTraCon, llamado Luccon, producido por la compañía alemana Heidelberg Cement AG, que empleó otro método de fabricación: redujo la cantidad de FOp, pero las empleó de mayor espesor y las dispuso en forma encadenada, tipo tejido, que dieron como resultado líneas de luz, como se observa en la figura I.8.

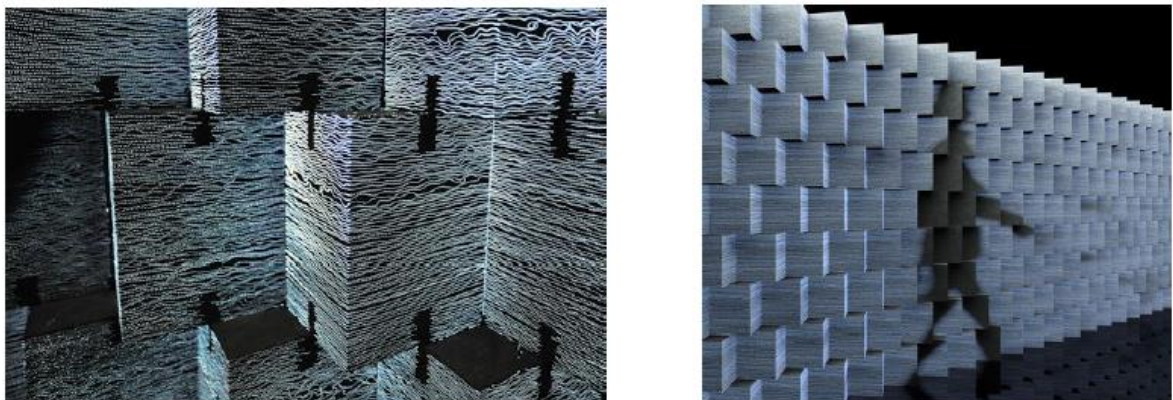
Figura I.8 – Material hormigón translúcido Luccon



El cemento y los áridos empleados tienen una granulometría muy fina; con la mezcla se producen bloques y placas prefabricadas que pueden ser taladrados, pulidos o cortados. Luccon es un MH de color gris, blanco o negro, pero puede ser pigmentado. Posibilita la realización de piezas hasta 1500 mm × 1000 mm o 2000 mm × 1000 mm y espesores entre 20 y 30 mm.

En la figura I.9, se presenta un producto diseñado por el arquitecto Kengo Kuma, que fue mostrado por primera vez en el 2009, en la exhibición Senseware (Tokio) y fue vuelto a presentar en el año 2010, en el Museo Holon Design (Israel) (Kuang, 2010).

Figura I.9 – Exposición del Arq. Kengo Kuma con el material Luccon en la exposición “Senseware” (Tokio)



En el año 2005, aparece otra variante de HT, pero sin FOp, que utiliza resinas plásticas, llamado I-light, producido por el Grupo Internacional Italcementi (Italia). Es un panel de HT

prefabricado, desarrollado por el arquitecto Giampaolo Imbrighi, que está compuesto por la combinación de un 96 % de MH, 4 % de resinas plásticas.

En la figura I.10, se presenta el material exhibido en el pabellón italiano para la Expo Shanghái 2010. Conforman paneles con dimensiones de 500 mm × 1000 mm × 500 mm y un peso de 50 kg, y cada uno contiene más de 50 filas de resinas en un diseño rectangular y garantizando al menos el 20 % de transparencia.

El enfoque de Italcementi en relación al material es *low-tech*, o sea, “mínima tecnología”, por tanto, es más accesible, según la empresa. En palabras del director de Innovación de la compañía, Enrico Borgarello:

la capacidad del H con resina plástica para capturar la luz es mayor, en tanto la resina contiene un ángulo visual más amplio que la FOp. Esta característica, aumenta las propiedades transparentes del material y la luminosidad de los edificios que lo incorporan.

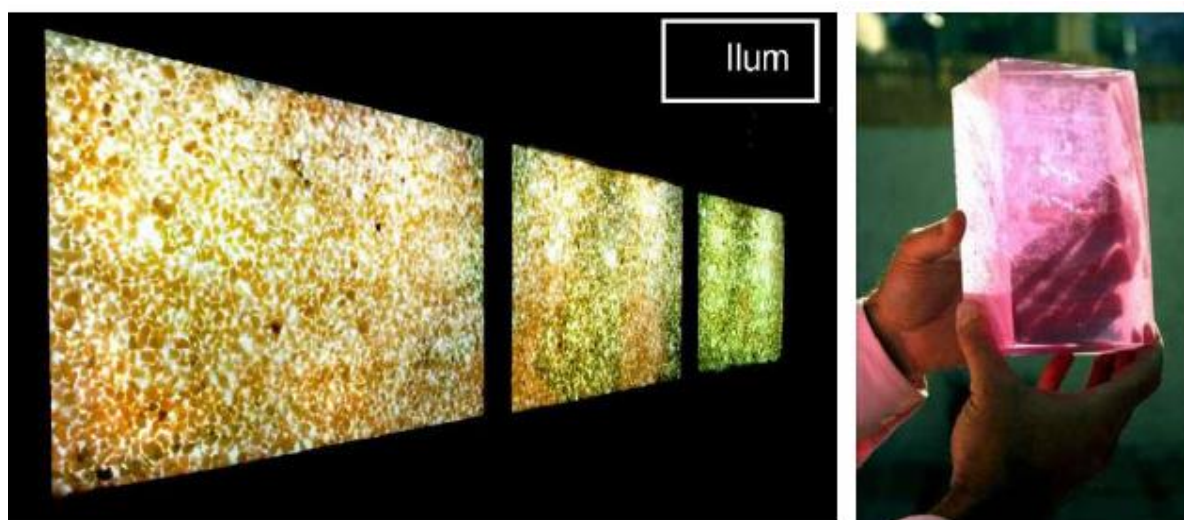
Figura I.10 – Pabellón de Italia en la Exposición de Shanghái, 2010. (www.italcementigroup.com)



En México, en el año 2005, dos estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) de Azcapotzalco, Joel Sosa y Sergio Omar Galván (actualmente ingenieros), crearon una versión similar al I-light, sin FOp, compuesto con un aditivo llamado Ilum, que le brinda la característica de translucidez, por lo cual, llamaron a este HT “Ilum”. Cuenta con patente mexicana e internacional (Maxx, 2009).

Fundaron la empresa Concretos Traslúcidos S.L.R. de C.V. La página web en la que promocionaban el producto actualmente está desactivada, pero se comercializa a través de la empresa mexicana Duro Concretos. En la figura I.11, se presenta el producto.

Figura I.11 – Hormigón translúcido ILUM



Por último, en el año 2007, otro HT con FO, al que se le incorpora una variante: luces led. Fue llamado Lucem; es procedente de Alemania, y su inventor es el Dr. Ing. Andreas Roye, fundador de la empresa Lucem GmbH. Obtuvo patente internacional en el año 2010.

El producto no tuvo mucha difusión mundial hasta después de 2015, aunque su primera aparición (sin mucha trascendencia) fue en el año 2010, como expositor oficial para el pabellón de Alemania en Expo Shanghái, China.

En el año 2012, este material fue utilizado en su primera obra: la fachada completa de uno de los edificios en la Universidad Técnica de Aquisgrán, Alemania (oficialmente RWTH Aachen), y en el año 2015 fue utilizada en una fachada en la mezquita Al Aziz en Abu Dhabi, entre otros. Todos estos ejemplos se verán más adelante. En la figuras I.12 y I.13 se presenta el producto.

Figura I.12 – LUCEM en la Universidad RWTH Aachen, Alemania, 2012. Fachada interactiva – paneles de hormigón translúcido con fibra óptica y luces led

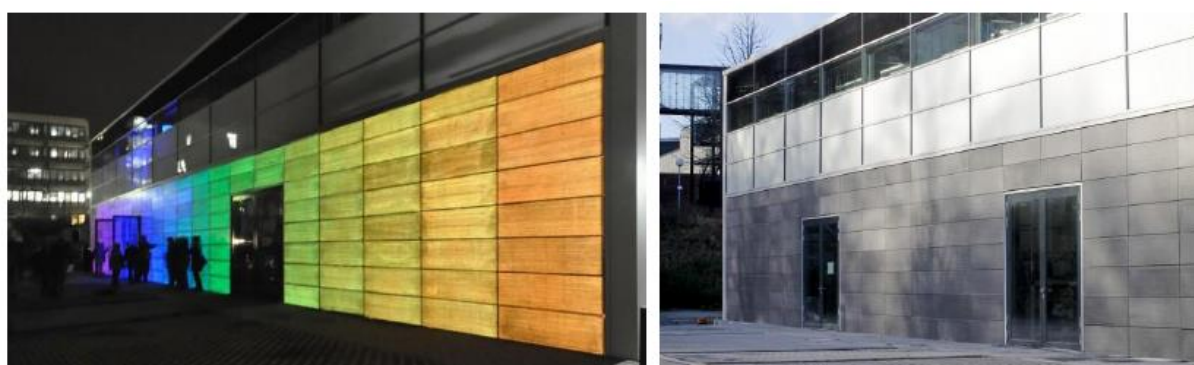
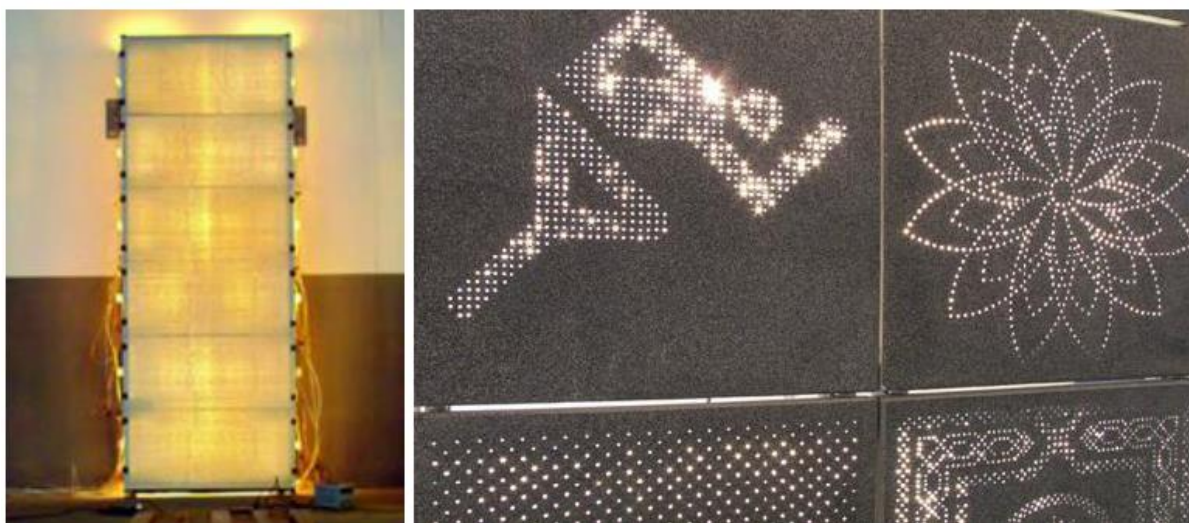


Figura I.13 – Ejemplos de algunos tipos de hormigón translúcido LUCEM



Cabe observar que en todas las referencias mencionadas anteriormente, el material con el cual se hace el HT no contiene agregado grueso, a excepción del producto Ilum, por lo que desde el punto de vista técnico podría ser considerado un MH especial.

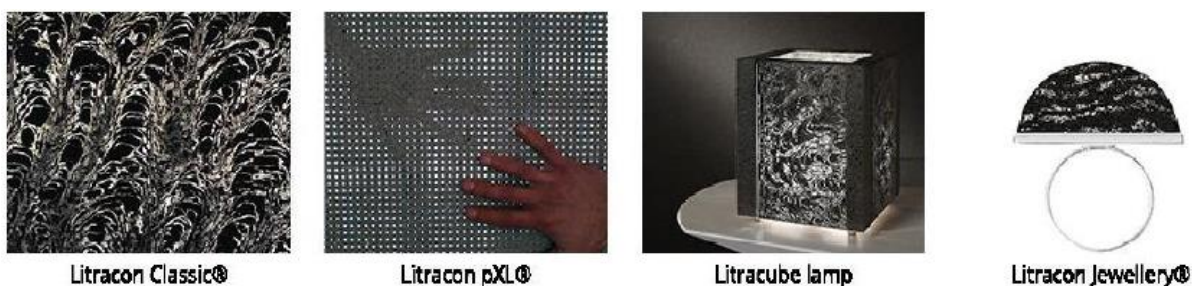
I.2. Características, productos y aplicaciones

El hormigón translúcido con FOp o resinas, que se ha producido por distintas partes del mundo con patentes publicadas en el empleo de los productos, son LiTraCon, Luccon, I-light y Lucem. A continuación, se exponen las características y las propiedades de los productos que comercializa cada empresa y las aplicaciones existentes.

I.2.1. LiTraCon (Hungría)

LiTraCon (Light Transmitting Concrete) fue el primer producto disponible para su comercialización en el mundo del HT. Producen varios tipos de HT: LiTraCon Classic con FOp, (producen bloques) y el LiTraCon pXL con resinas plásticas (producen paneles). También producen lámparas y joyería. En la figura I.14 se presentan todos los productos.

I.14 – Productos LiTraCon



LiTraCon Classic fue patentado en el año 2003 (patente europea WO2003097954, 2003) y el producto LiTraCon pXL fue patentado en el año 2009 (patente europea WO2009007765, 2009). Posteriormente, se extendió las publicaciones de las patentes a EE. UU. y al resto de Europa.

En la página oficial de LiTraCon solamente se aporta las características físicas de cada producto (ver tabla I.1 y figura I.15), su forma, tamaños, colores y terminaciones.

Figura I.15 – Colores blanco, gris y negro – LiTraCon

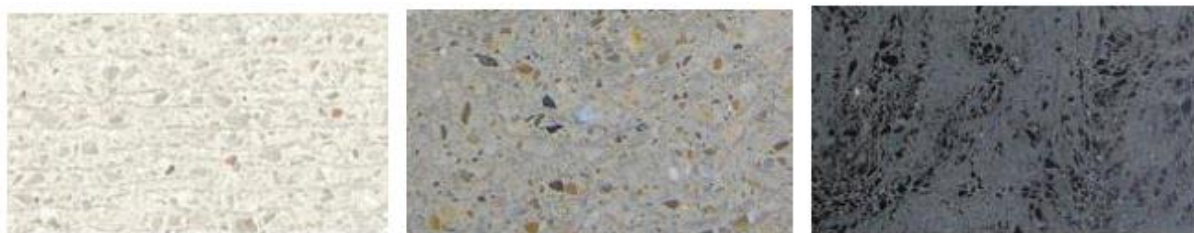


Tabla I.1 – Características físicas del LiTraCon (www.litracon.com)

LiTraCon® classic		LiTraCon® pXL		LiTracube® lamp	
Forma:	Bloques prefabricados	Forma:	Paneles reforzados prefabricados	Forma	Lámpara para ambientes interiores
Componentes	Hormigón y fibras ópticas de vidrio	Componentes	Hormigón y fibras plásticas transparentes	Componentes	LiTracon, vidrio, acero inoxidable
Tamaño máximo	1200 x 400 mm	Tamaño máximo (40)	1200 x 600 mm	Tamaño	175 x 175 x 221 mm
Espesor	25 - 500 mm	Tamaño máximo (60)	3600 x 1200 mm	Iluminación	E14 / 220V / máx. 60 W
Colores	blanco, gris, negro	Espesor	40 mm - 60 mm		
Terminación	Pulido	Colores	Blanco, gris, negro		
		Terminación	Moldeado, lavado y pulido		

I.2.1.1 LiTraCon Classic

Fue el primer producto en el mundo en comercializarse en bloques prefabricados basados en MH y FOp. Es aplicable en fachadas y tabiquería interior, mesadas, obras de arte, esculturas, escaleras, bancos y decoración en general (figura I.16).

La patente WO2003097954, con su primera publicación en el año 2003, corresponde al procedimiento y método de fabricación del producto LiTraCon Classic: bloque de H prefabricado con FOp.

Según la invención, las FOp están dispuestas de forma uniforme en un material fundido homogéneo (por ejemplo, un MH).

La patente establece lo siguiente:

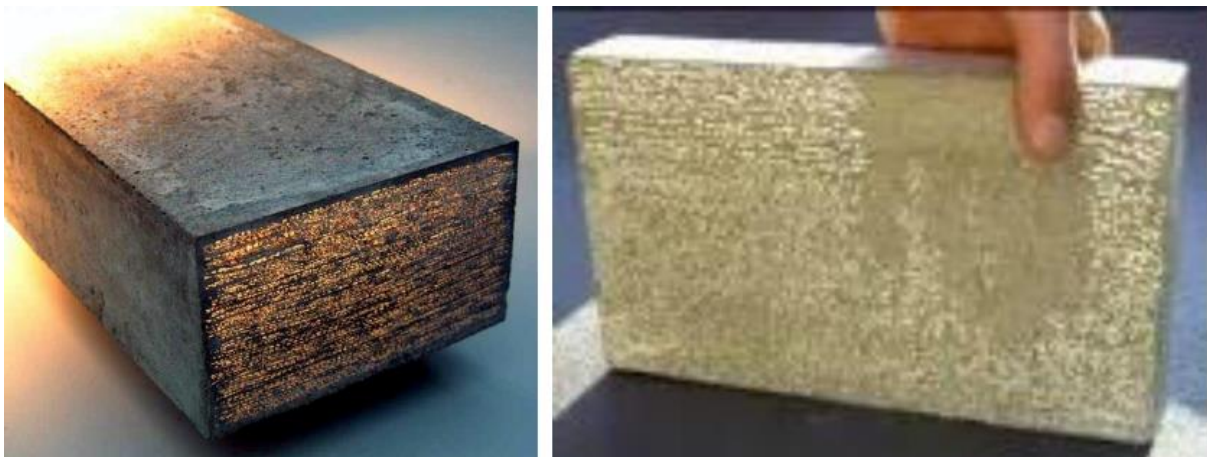
El material de fundición puede ser H, yeso, plástico, metal o similares. Las fibras trasmisoras de luz pueden ser fibras de vidrio, FOp, fibras de plástico transparentes o similares.

Las fibras están dispuestas lateralmente sobre una primera capa de material fundido, mediante el cual los extremos de las fibras permiten la transferencia de luz a través del bloque de construcción emitida desde una fuente de luz.

Para el desarrollo del bloque, debido al pequeño tamaño de las fibras (espesor de entre algunas décimas de milímetros hasta unos pocos milímetros), se mezclan en el MH, convirtiéndose en un componente más del material y generando una mezcla homogénea en su estructura interna y en la superficie, con lo que se logra un producto final pulido.

Con respecto a su forma, son bloques prefabricados, con una relación del MH/FOp entre 1:15 y 1:8 máximo: la relación promedio es 1:13 y tiene una densidad de entre 2100 y 2400 kg/m³. La transmitancia luminosa del bloque depende del número de fibras, pero puede ser adecuada un 1/10.

Figura I.16 – Producto LiTraCon Classic



La patente no menciona otras propiedades; tampoco figuran en la página oficial, pero según el artículo “LST4 Estructures d’edificació” cuenta con una resistencia de hasta 45 NPa, el 90 % de la resistencia se obtiene en menos de 7 días, es impermeable, posee una mayor resistencia al fuego que el HC, la preparación del MH se efectúa con maquinaria tradicional, el curado es tradicional, no requiere de tratamientos térmicos o de laboratorio, y el espesor de la FOp está entre 2 nm y 2 mm.

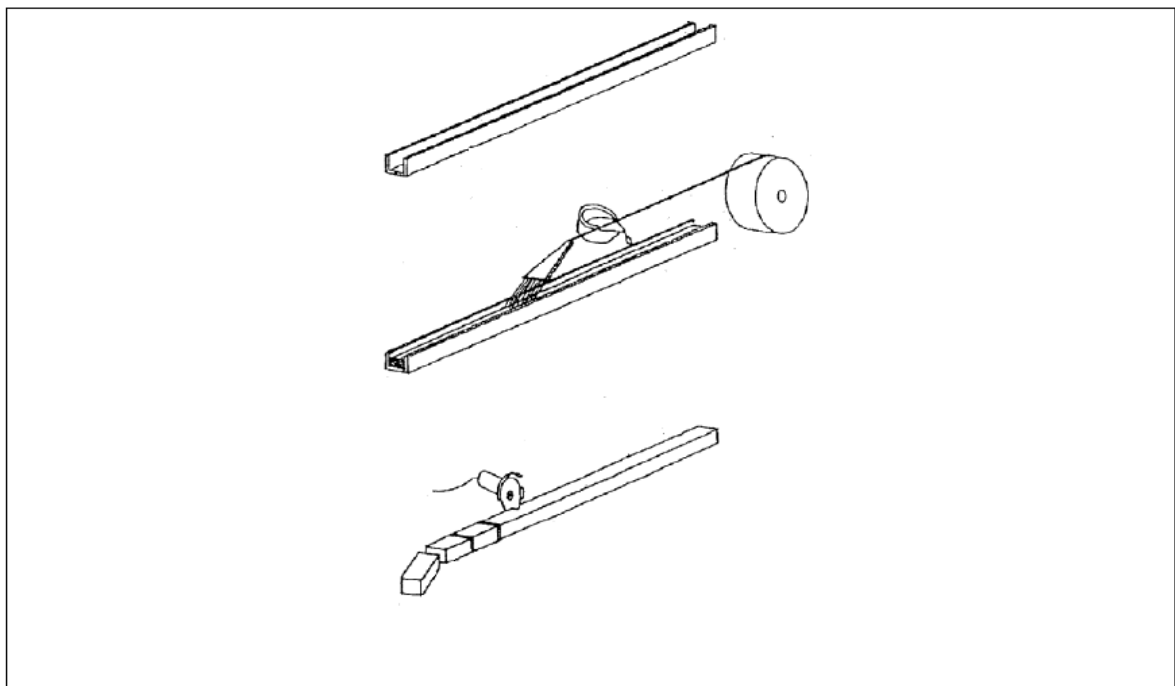
En la tabla I.2. se presenta un resumen de todas las propiedades expresadas del LiTraCon Classic.

Tabla I.2 – Propiedades del LiTraCon Classic

Forma:	Bloques prefabricados
Componentes	MH y FOP de vidrio
Tamaño máximo	1200 x 400 mm
Espesor	25 - 500 mm
Colores	blanco, gris, negro
Terminación	Pulido
Relación micro-hormigón/fibra óptica	1:15 – 1:8 (7-13 %)-Promedio 1:13 (8 %)
Densidad micro-hormigón	2200 – 2400 kg/m ³ .
Transmitancia	1-Oct
Diámetro Fibra Óptica	2 nm - 2 mm
Resistencia al fuego	mejor que el HC
Resistencia a la Compresión antes 7 días	45 N/mm ²
Producción	Maquinaria tradicional
	Tradicional

La presente invención se refiere a un bloque de construcción que comprende fibras de transmisión de luz incrustadas en un MH. También se refiere a un método para producirlo; presenta en forma uniforme una pluralidad de FOP individuales que se disponen en el MH en forma longitudinal al encofrado. Con la incorporación de las FOP, permite que la luz se transfiera a través del bloque. Además, se forma una estructura homogénea con alta resistencia. La figura I.17 muestra el método de producción.

Figura I.17 – Método de producción del hormigón translúcido LiTraCon Classic



I.2.1.2 LiTraCon pXL

Según la patente internacional WO/2009/007765, este HT no contiene FOp . El elemento transmisor de luz puede ser vidrio o plástico: polimetilmetacrilato (PMMA), policarbonato (PC) o copolímero de olefina cíclica (COC). Este elemento se dispone en una estructura retenedora que puede ser de un material aislante térmico. También puede haber una pieza de refuerzo como una malla de varillas dispuestas a lo largo de la estructura y a lo largo de los elementos translúcidos, o entre ellos. La estructura retenedora y los elementos translúcidos pueden ser del mismo material o diferente.

Este producto tiene forma de panel, basado en MH y resinas plásticas o vidrio. Los puntos de luz aparecen con distribución regular en la superficie de los paneles, al igual que los píxeles en una pantalla LCD.

Los paneles están reforzados y pueden ser posicionados a nivel del suelo en altura, haciendo la instalación más fácil. Se pueden aplicar tanto en el interior como en el exterior, pero no son portantes.

Como tiene una forma de fabricación más industrializada y utiliza resinas plásticas o vidrio, en cuanto al precio, es más accesible que el LiTraCon Classic. Según el fabricante, es fácil de crear los patrones o logotipos, incluso los colores fuera de los píxeles (figura I.18). Es posible crear no solo paneles lisos, sino también objetos 3D con formas dobladas o curvas, y cuerpos huecos. Entre muchos otros, esta opción puede dar ideas para diseñar, por ejemplo, estatuas públicas o mobiliario urbano iluminado.

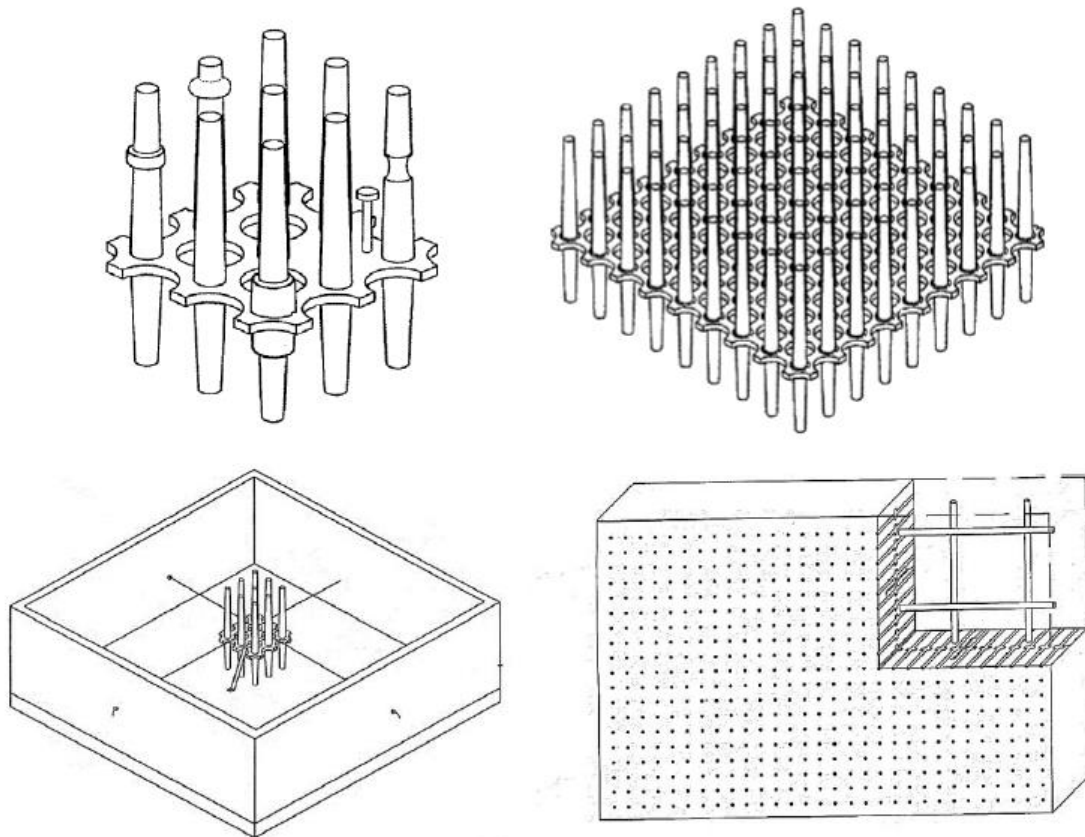
La patente hace referencia a la invención de un bloque de HT que tiene al menos dos superficies de unión, con al menos un elemento translúcido rodeado de MH. El elemento translúcido está conectado a una estructura auxiliar. También describe las etapas y la forma como se dispone el elemento translúcido dentro de un encofrado, y el proceso de llenado con el MH. Además, hace referencia a un encofrado con sus superficies delimitadoras y medios de sujeción. Por último, supera las deficiencias de la técnica anterior (proceso manual): posibilita que se pueda producir a un costo más bajo y con tamaños arbitrarios, y ser capaz de organizar figuras translúcidas (signos, figuras e incluso obras de arte en paredes sólidas que aparezcan por medio de la luz natural o artificial).

El elemento transmisor de luz debe ser rígido y bien pulido, con una estructura retenedora que sirva de sujeción. Se ubican las dos piezas dentro del encofrado para que luego se incorpore el MH. También se introducen piezas de refuerzo, pernos o ganchos de acero o plástico, que se colocan en la estructura retenedora; otros son anillos ubicados en el elemento translúcido; y por último, un refuerzo en forma de H para mejorar aún más la resistencia del bloque de HT.

En la figura I.18 se muestra un tipo de elemento translúcido con su estructura de sujeción, y cómo se introduce dentro del encofrado; además, se muestran los tipos de refuerzos a colocar.

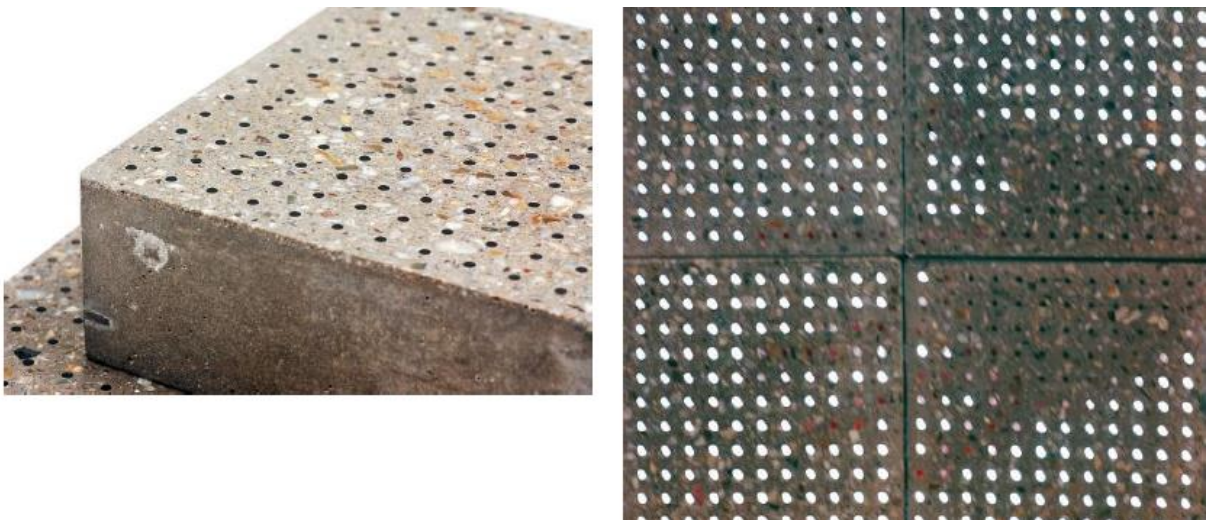
Después de que el bloque de HT es retirado del encofrado, puede ser mecanizado según las necesidades.

Figura I.18 – Proceso de fabricación de HT LiTraCon pXL



Según la página oficial de LiTraCon, son paneles reforzados prefabricados. Están compuestos de H y fibras plásticas transparentes. Su tamaño máximo es de 1200 × 600 mm × 40 mm y 3600 mm × 1200 × 60 mm. Se fabrican en colores blanco, gris y negro, con diferentes tipos de terminación: moldeado, lavado y pulido (ver tabla I.2). Al igual que el anterior, tiene una densidad entre 2100 y 2400 kg/m³. El producto terminado se observa en la figura I.19.

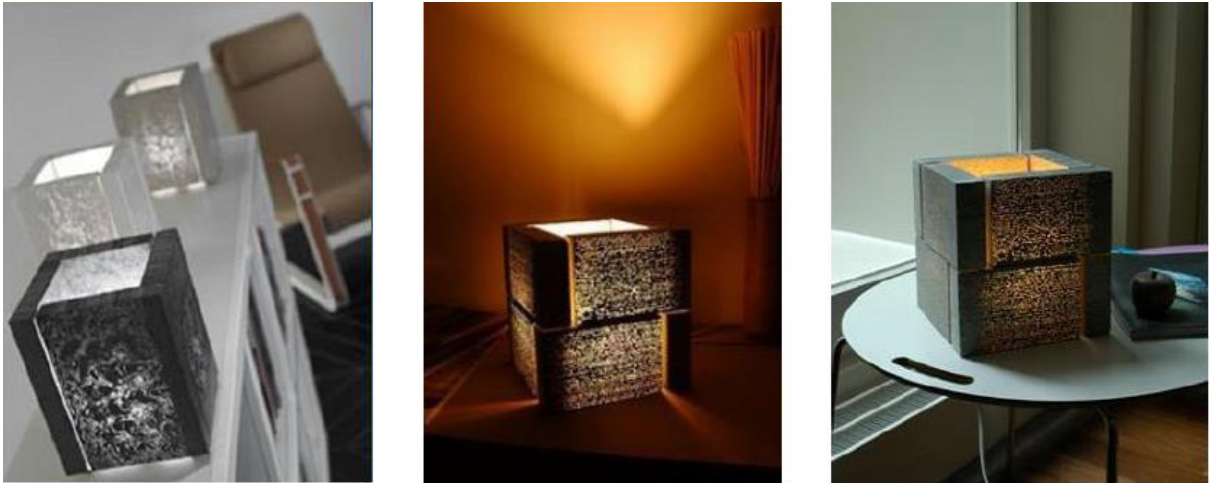
Figura I.19 – Producto LiTraCon pXL



I.2.1.3 LiTraCon Lamp

Es una lámpara de mesa (ver figura I.20). En cuanto a las características físicas, cuenta con un diseño en prisma. Su tamaño es de 221 mm × 175 mm × 175 mm. El material utilizado es el HT LiTraCon Classic, vidrio y acero inoxidable, con un peso de 10 kg y una conexión a corriente eléctrica E14 / 220V / 60W máximo. Es de color blanco. Es aplicable en decoración de interiores.

Figura I.20 – Producto LiTraCon Lamp



I.2.1.4 LiTraCon Jewellery

Son joyas de diseño artesanal realizadas con HT LiTraCon Classic. Consta de dos tipos de colección: Urbano y Diamante Urbano. Los diseños son del fundador de la empresa LiTraCon, el arquitecto Áron Losonczy junto con la diseñadora de joyas Gabriela Faludi. En las figuras I.21 y I.22 se presentan los diferentes diseños.

Figura I.21 – Diseño de joyería con hormigón translúcido LiTraCon Classic



Figura I.22 – Diseño de joyería con hormigón translúcido LiTraCon Classic



Algunas de las aplicaciones de este material se pueden apreciar en la página oficial, donde presenta una variedad de proyectos realizados, tales como fachadas, tabiquería interior, monumentos, exposiciones, mostradores, carteles empresariales, entre otros. Se expresa desde la figura I.23 hasta la I.36.

Figura I.23 – Exposición energía para el Futuro – Islandia, 2015



“You Are Energy” consiste en un muro interactivo con bloques de HT Litracon Classic que se ilumina desde el interior cuando se le aplica una fuerza. Para el 50 aniversario de Landsvirkjun, National Power Company de Islandia (una de las hidroeléctricas más antiguas de Islandia).

Nombre de la exposición: Impulsando el futuro, Islandia.

Arquitecto: Tvihof

Diseño de la exposición: Gagarin

Figura I.24 – Pabellón de Jardín, Zúrich, Suiza, 2013



La idea era crear una estructura simple que se asentara silenciosamente en el jardín, pero que posea riqueza y complejidad en su materialidad que desarrolle varias relaciones con el entorno. Los arquitectos querían que el Pabellón creara un refugio, pero al mismo tiempo permitiera una percepción sutil del jardín y la luz del sol. Compuesto de paneles Litracon pXL de 80 mm de espesor y un tamaño de 360 cm x 230 cm. Su diseño es muy cuidadoso para que sea autoportante y así evitar estructura secundaria. La fundición fue una operación delicada debido al patrón muy denso de los elementos translúcidos de PMMA y el refuerzo de acero inoxidable cuidadosamente colocado por la delgadez de los paneles

El resultado es de una ingeniería altamente precisa y avanzada. El espacio del pabellón está definido por cinco paneles de hormigón prefabricado translúcidos que conectan el suelo, las paredes y el techo, pero la sorpresa radica en el efecto de la estructura y la percepción de un material pesado y sólido que se convierte en algo etéreo delicado.

Arquitecto: Gianni Botsford.

Arquitecto Paisajista: Longstaffe-Gowan

Ingeniero estructural: Engineers & Hemmerlein

Ingeniero de control: HTB Ingenieure Planer AG

Contratista: Hemmerlein Ingenieurbau GmbH

Constratista de paisaje: Bahnsen Gartengestalter

Figura I.25 – Panel de información de la muestra – Museo für Naturkunde, Berlín, Alemania, 2015



Panel de información para la muestra del esqueleto de T-Rex "Tristan Otto". Los lados de las pantallas son de bloques de hormigón translúcido Litracon Classic negro de 30 mm de espesor.

Contructor de las pantallas: Hertzner GmbH, Berlin.

Figura I.26 – Mostrador de recepción HIPO, Budapest, Hungría, 2014



Mostrador de recepción de la Oficina de Propiedad Intelectual de Hungría (HIPO), construido con paneles de hormigón translúcido Litracon pXL blanco. El logotipo coloreado de HIPO se fijó en la parte posterior de los paneles, de ésta manera, sólo se puede ver si la luz está encendida.

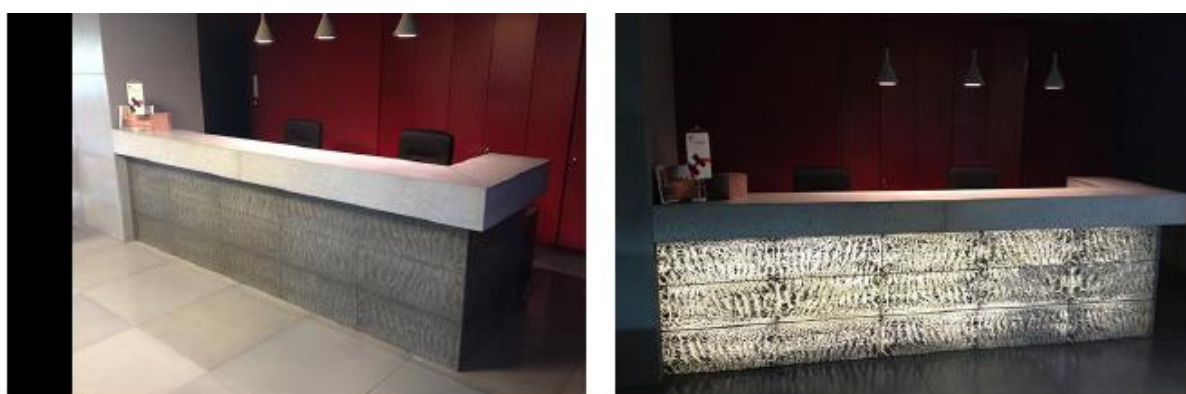
Diseñadores: Eszter Paller, Judit Koczoh

Figura I.27 –Plaza Erzsebet, Budapest, Hungría, 2013



12 bancos ubicados en el corazón de la capital húngara. Las piezas están hechas de paneles Litracon pXL de 80 mm de espesor y pueden iluminarse por la noche,

Figura I.28 – Mostrador de la Empresa Holcim, calle Madarász u. 47-49, Budapest, Hungría, 2013



Mostrador de recepción de las oficinas de la Compañía Cementera Holcim, realizada con paneles de hormigón translúcidos Litracon Classic negros de 40 mm de espesor.

Figura I.29 - ON Club, Praga, República Checa, 2011



Figura I.30 – Estudio Hibiya, Tokio, Japón, 2011



Tabique interior con bloques negros de HT Litracon Classic de 25 mm de espesor, se encuentra en el vestíbulo del estudio. Hay una sala de proyección detrás, de esta manera uno puede ver videos e imágenes en movimiento en la pared.

Figura I.31 - Punto de Europa, Parque Millenáris, Budapest, Hungría, 2010



Primera aplicación de paneles de HT Litracon pXL en tabique divisorio. El proyecto está ubicado en la oficina de Budapest de la Unión Europea.

Figura I.32 – Apartamento privado, Budapest, Hungría, 2010



Tabique interior con HT Litracon Classic ubicado entre la sala de estar y el jardín japonés. Tamaño: 472 cm largo x 248 cm alto x 6,5cm espesor. Arquitecto: Julia SZÜCS.

Figura I.33 – Monumento en Grand Parade, Halifax, NS, Canadá, 2007



Arco de hormigón de 4 m altura, primer monumento de Nueva Escocia dedicado a oficiales de la paz asesinados en el cumplimiento del deber. Las bases del arco son bloques blancos de hormigón translúcido Litracon Classic, 70 mm de espesor, con iluminación interior (simboliza la fragilidad del ser humano).
Arquitecto: Adam Collins
Cliente: Halifax Regional Municipality

Figura I.34 – Museo Cella Septichora, Pécs, Hungría, 2006



Acceso al Museo Cella Septichora con bloques de HT Litracon Classic de 10 cm de espesor.
Arquitecto: Bachmann Architects (H)

Figura I.35 – Monumento a los Veteranos de la Parroquia de Iberville. Baton Rouge, Louisiana, Estados Unidos, 2008



Tamaño: 60 m² de bloques negros de hormigón translúcido Litracon Classic
Arquitecto: Jerry Hebert.
Arquitecto: Grace & Hebert Architects

Figura I.36 – Edificio de oficinas Studium, Universidad Corvinus, Budapest, Hungría, 2007



Mostrador de recepción principal y el púlpito del auditorio principal construido con bloques blanco y negro Litracon Classic respectivamente.
Cliente: Wallis
Arquitecto: MCXVI Építészmueterem (H)

1.2.2. Luccon (Austria)

El HT Luccon fue el segundo producto en comercializarse mundialmente. Patentado en Europa, internacionalmente, y en Alemania, respectivamente con los números WO2007096083 y DE202007000753, y registradas en el año 2007, estas dos patentes tienen diferentes procesos de fabricación. Luego, la primera fue registrada en Estados Unidos (US2009/0200703) en el año 2009. Otros productos fueron patentados como peldaños de escalera (patente EP1970497) en el año 2008 y bloques con aislante térmico (patente EP2177332) en el año 2010.

Luccon Lichtbeton GmbH, fabricante de HT, se declaró en bancarrota a principios del año 2017. Pero a mediados de abril de ese año, CRE Panel GmbH se hizo cargo y la fabricación del HT Luccon comenzó en el segundo semestre de ese año, en la ciudad de Götzis, Hopbach, Austria.

La empresa Jolo (Josef Loacker GmbH) a través de la filial CRE Panel, adquirió la marca Luccon el 23 de mayo de 2017. Es una empresa que cuenta con más de 60 años de experiencia en la industria del H prefabricado.

Actualmente, la página web del fabricante solo hace referencia a los paneles *Luccon Clásico*, ahora llamado *Luccon design*. No se mencionan los variados productos presentados en la tesis de diplomado (Luisi, 2015). Esto quizás se deba a la transición del cambio de empresas.

Según lo recopilado en la tesis de diplomado, Luccon fabricaba y comercializaba varios productos, que se detallan a continuación.

I.2.2.1 Luccon

Son paneles compuestos de MH de alta resistencia (MHAR) con FOp, organizadas en forma de tejido o tela colocadas por capas en moldes prefabricados. Con el corte del panel se obtienen elementos con formas y espesores variables. Es aplicable en muros interiores y decoración interior. Se producen en dimensiones de 120 cm × 60 cm × 2 cm, 200 cm × 70 cm × 2,5 cm, 250 cm × 70 cm × 3 cm, y 270 cm × 70 cm × 3 cm.

Otros tamaños fuera de lo estándar se realizan bajo pedido. El espesor es de 20 mm. Los colores son lava, gris y blanco. Su procesamiento consiste en corte, biselado, perforación y pulido. Según información del fabricante, tiene una resistencia a compresión mayor a 90 MPa, resistencia a tracción por flexión mayor a 12 MPa y una densidad aparente de 2100 – 2300 kg/m³.

Figura I.37 – Paneles Luccon



I.2.2.2 Luccon therm

Son bloques con aislamiento térmico, compuestos de MH, FOp y aislamiento térmico integrado. Es aplicable en muros exteriores, pero también en losas. Según información del fabricante, es resistente a las heladas y al salitre. Su proceso de producción consiste en pegado, cortado, lijado, perforación y lustrado. Son bloques estándar de dimensiones de hasta 250 cm × 80 cm, con un espesor de 15 cm. Tiene una conducción térmica de hasta 0,18 W/m², y una resistencia a los UV.

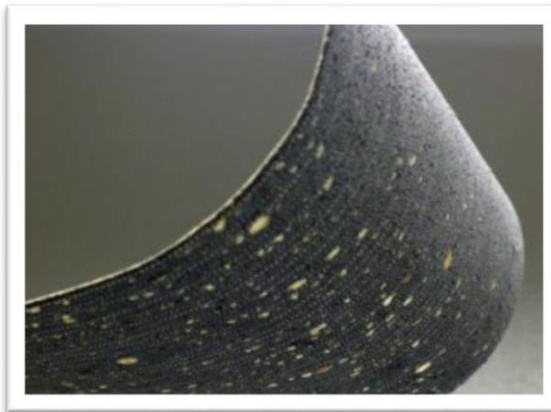
Figura I.38 – Paneles con aislante térmico



I.2.2.3 Lucon veneer

Son láminas con dimensiones de hasta 100 cm × 50 cm y con 8 mm de espesor, compuesto de HT con FOp o con fibra de cuarzo. Su proceso de su producción consiste en cortar, pegar, perforar, etcétera. La característica principal del producto es la flexibilidad tridimensional a través del revestimiento con una lámina de soporte. Hay información disponible acerca de que son resistentes a los rayos UV. Es aplicable en la ingeniería automotriz y marítima (en yates), como decoración.

Figura I.39 – Laminado



I.2.2.4 Lucon / láminas de vidrio

Mediante una técnica especial que permite combinar el producto Lucon con vidrio de seguridad o aislamiento, se constituye una unidad indivisible, brillante, para fachadas, escaleras, pavimentos o muebles. Presenta incontables posibilidades en la arquitectura y el diseño.

Figura I.40 Lámina de vidrio



I.2.2.5 Luccon design

Como se expresó anteriormente, este producto aparece solo en la página web actual. Los paneles *Luccon design* están compuestos de MHAR con FOP organizadas paralelamente o en tejido, que colocadas por capas en moldes prefabricados. Con el corte del bloque se obtienen elementos con formas y espesores variables.

Figura I.41 – Colores estándar: blanco, gris y negro



Figura I.42 – Otros colores bajo pedido



Sus características y propiedades se pueden observar en la tabla I.3. Es aplicable en muros interiores y en decoración interior.

Tabla I.3 – Características y propiedades del HT LUCCON design

Componentes	Fibra óptica
	Arena de cuarzo
	Cemento
	Agua
	Aditivos
Tamaño recomendable	1500 x 1000 mm
	2000 x 1000 mm
Espesores	20 - 30 mm
Colores	Standard: blanco, negro y gris
	Otros colores bajo pedido
Superficie terminada	Molida, cepillada, chamuscada, satinada, impregnada, esmerilada, taladrada, pulida, aserrada, etc.
Tipo de hormigón	Alta resistencia
Cantidad de fibras	300.000 fibras/m ² - Ø 0,4 mm
Resistencia a la Compresión	> 100 N/mm ²
Resistencia a la Tracción	> 10 N/mm ²
Densidad	2.300 – 2.400 kg/m ³
Resistencia a alta temperatura	$K=0,18 W/m^2 k$
A prueba de agua	Clase XC4
Congelamiento	Alta resistencia XF4
Descongelamiento	
Normas	DIN EN 1341 - Losas de piedra natural para pavimentación externa - Requisitos y métodos de prueba. Alemania.

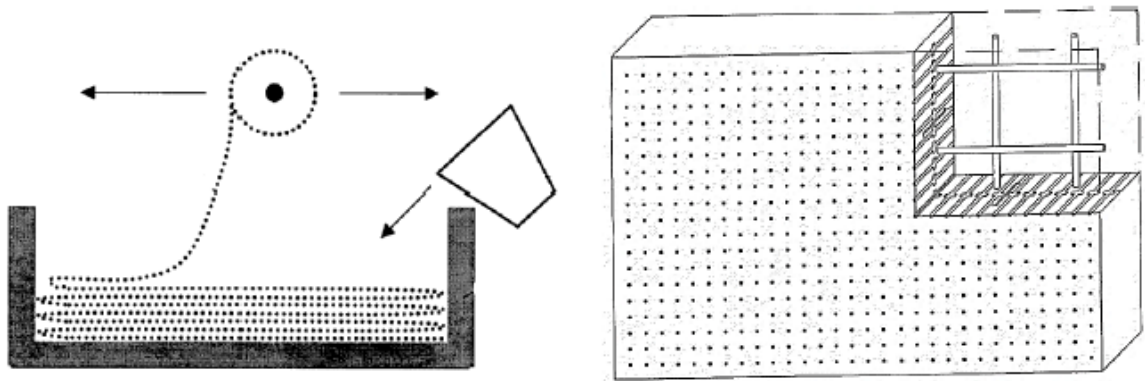
Pertenece a la clase XC4, que corresponde a la norma UNE-EN 206-9:2013 de exposición con ciclos de humedad y sequedad. Para obtener dicha clase, la norma aconseja usar una relación máxima agua/cemento de 0,50, mínimo contenido de cemento de 300 kg/m³ y H tipo C30/37.

Como se expresó anteriormente, el producto Luccon cuenta con dos patentes (WO2007096083 y DE202007000753), ambas tienen diferentes métodos de fabricación, pero su proceso es mixto: prefabricado y artesanal:

La patente DE202007000753 hace referencia a un componente moldeado con FOp mezclado con un MH. La intención es que con este proceso de fabricación, sea un producto más económico (ver figuras I.43 y I.44).

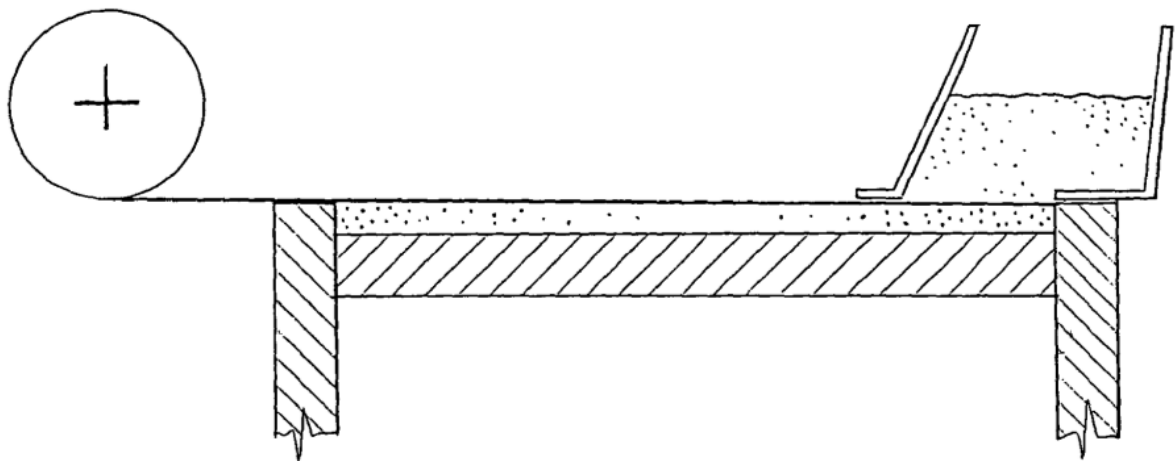
El proceso de fabricación es por capas, una capa de MH y una capa de tejido de FOp y se continúa sucesivamente hasta llegar a la altura del encofrado. Luego del secado se procede al corte.

Figura I.43 – Patente DE202007000753: Proceso de fabricación con tejido de fibra óptica



La patente WO2007096083 cuenta con otro proceso de fabricación del producto Lucon. La invención presenta un método y dispositivo para producir bloques moldeados hechos con MH y fibras. Se emplea un encofrado compuesto de un bastidor y una base móvil vertical. El llenado del encofrado también se realiza en capas de MH y fibras.

Figura I.44 – Esquema del dispositivo de fabricación del HT Lucon



En la figura I.44 se presenta un esquema completo del proceso de fabricación.

Las aplicaciones del producto Lucon se puede apreciar en su página oficial, donde presenta una variedad de proyectos realizados en diseño, exteriores e interiores, que se presentan en las figuras I.45 a I.48.

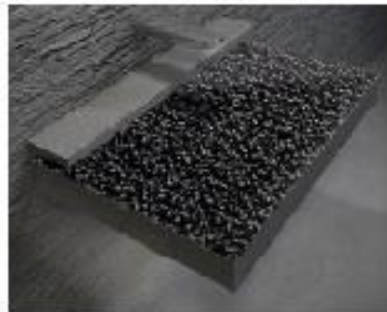
Figura I.45 – Diseño de interiores – Mesada y estufa



Figura I.46 – Diseños interiores con el HT Luccon



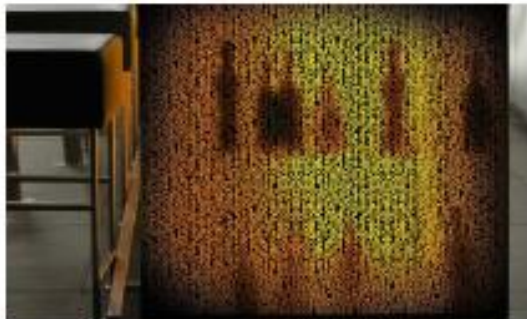
Ducha



Lavatorio



Escalera



Mostrador



Respaldo

Figura I.47 – Banco público



Figura I.48 – Diseños exteriores para HT Luccon



Proyecto de fachada para edificio de oficinas



Portón exterior

1.2.3. I-light (Italia)

El HT I-Light, fabricado por el Grupo Empresarial Internacional Italcementi, fue presentado en el pabellón italiano la Exposición de Shanghái, en el año 2010.

Según información suministrada por el fabricante en su página oficial, es un panel de H prefabricado que puede transmitir luz. Está formado por la unión de resinas especiales en un cemento innovador, que es la matriz. No solo permite la entrada de luz natural y artificial, sino que también permite que el ojo humano reconstruya imágenes de los objetos ubicados detrás del panel, sin cambio de colores, lo que crea un efecto transparente.

Es un material muy versátil, cuya ventaja frente al componente a base de cemento y los insertos transparentes a base de polímeros es que se puede diseñar en tamaños y colores personalizados. Su utilización es en elementos que no soportan carga, como cubiertas de techo, elementos decorativos, paredes, particiones en balcones y terrazas, escaleras y artículos de diseño de interiores. Su instalación es por medio de elementos de fijación a una estructura de soporte.

I-light ha sido desarrollado para cumplir con los requerimientos específicos del diseño arquitectónico de las paredes exteriores del pabellón italiano de la Expo Mundial 2010 en Shanghái. Las propiedades de fluidez de la mezcla permiten la unión de la resina en el panel, y combina la robustez y trasmisión de luz, tanto hacia el interior como hacia el exterior.

Las dimensiones de los paneles son: 50 mm de espesor, 1000 mm de largo y 500 mm de ancho; una masa de 50 kg, que contiene más de 50 filas de resinas que se adaptan a una forma rectangular, y logra una transparencia máxima del 20 % (porcentaje respecto a la superficie total). La superficie del panel es pulida, y sus bordes son biselados. La cantidad de paneles utilizados fueron 3.774, o sea, un 40 % de fachada del pabellón. Se establece que hasta la actualidad no ha dado signos de deterioro; se comprobó que en el ensayo de envejecimiento después de más de un año de exposición natural al aire libre no se observó degradación (ensayos realizados en el Politécnico de Milán). En cuanto a la resistencia a flexión, el límite elástico es de 1,92 MPa con prueba interna (desplazamiento controlado), y las tensiones máximas de 7,70 MPa con prueba interna (desplazamiento controlado); el endurecimiento por deformación comportamiento plástico (sin material suelto / separado) se observó durante la fase de post-pico.

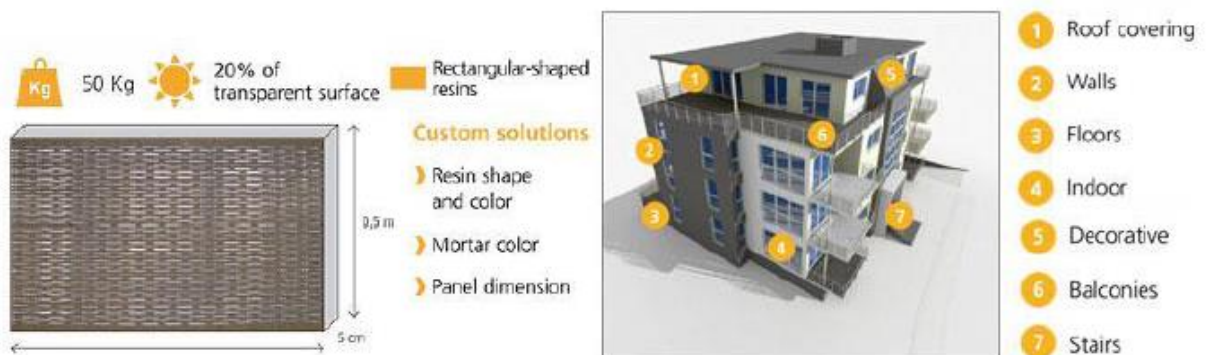
En la tabla I.4 se presenta la composición, propiedades mecánicas y características con la incorporación de resina del producto I-Light.

En cuanto la versatilidad de los paneles, se presenta en las figura I.49, donde se muestra que se puede cambiar el color de las resinas, el formato interior de la rejilla del panel, la dimensión del panel y el color del mortero. Además, puede ser utilizado como elemento decorativo, en balcones, cubierta del tejado, paredes, pisos, escaleras y terrazas.

Tabla I.4 – Características y propiedades del hormigón translúcido I-light.

Composición		
Cemento	52,5 R de tipo I	Para asegurar un rápido endurecimiento y alta resistencia.
Selección de arena / grava con tamaño de partícula adecuada	Silicio / calcárea	Para obtener un esqueleto granular compacto
Fibras de acero inoxidable	Para proporcionar alta tenacidad (ductilidad)	
Fibras de polipropileno	Para minimizar el riesgo de craqueo en edades tempranas	
	Para atenuar fenómenos lentos de deformación	
Propiedades mecánicas:		
Resistencia a la compresión	65 MPa	EN 12390-3
Resistencia a la flexión	10 MPa	EN 12390-5
Módulo de elasticidad	39000 MPa	UNI 9771
Características con la incorporación de resina:		
Resistencia a la tracción	65 MPa	ISO 527-1/-2
Módulo de tracción:	3200 MPa	ISO 527-1/-2
Elongación a la rotura	3 %	ISO 527-1/-2
Factor de transmisión (óptica)	92 %	DIN 5036
Resistencia al fuego	Clase B2	DIN 4102
Resistencia a los rayos UV	Bueno	Ensayo propio
Resistencia química	Bueno a los ácidos y álcalis	Ensayo propio

Figura I.49 – Paneles de hormigón translúcido I-light

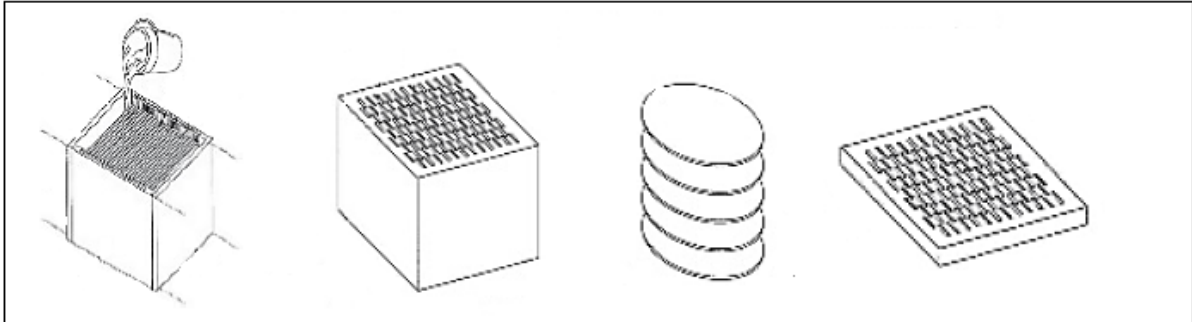


La patente WO2014184242, fue publicada en el año 2014, y luego en Australia (AU2015226217) y Estados Unidos (US2016185016) en el año 2016. A este producto se le podría llamar *I-light clásico*, porque existe una patente alternativa, con el número WO2015132287, que se refiere a un producto con armaduras, publicada en el año 2015, que posteriormente fue publicada en Estados Unidos en el año 2017 (US20170072591).

La patente WO2014184242, con el título *Method for manufacturing panels having translucent elements*, hace referencia a un método para la fabricación de paneles que comprenden una pluralidad de elementos translúcidos que atraviesan todo el panel para transmitir la luz. El alcance de dicha patente es proporcionar un método de producción que permite reducir los costos de producción para producir paneles de diferentes espesores, sin necesidad de modificar el equipo. También procura establecer exactitudes en el posicionamiento de los elementos translúcidos, aumentando la calidad final y facilitando su posterior instalación. En la producción se obtienen varios paneles en una sola producción. Por ello, a diferencia de la técnica anterior,

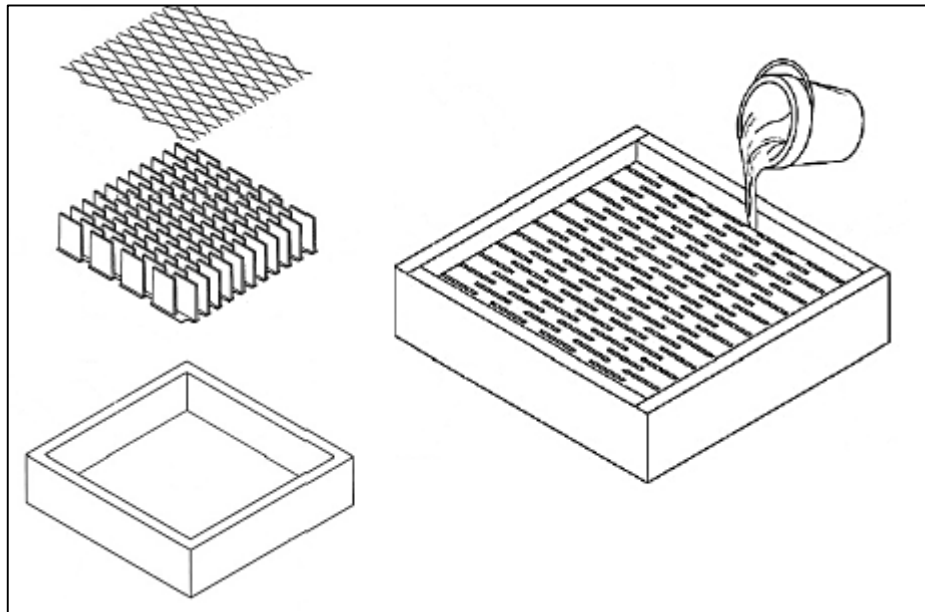
los paneles no son obtenidos por medio de operaciones de colada individuales, sino por medio de una única operación de vertido, fabricando el producto semiterminado y por una operación de corte subsiguiente (ver figura I.50).

Figura I.50 – Proceso de fabricación para un encofrado cúbico



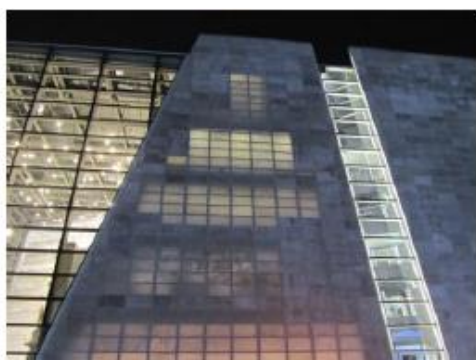
La patente WO2015132287, con el título *Method for marking a cementitious mortar bases composite panel with light translucency properties and a structure of light translucent material;* como se dijo anteriormente, está compuesta con armaduras y tiene la posibilidad de acoplarse de un panel con otro (figura I.51).

Figura I.51 – HT I-light en el inicio del proceso de fabricación



Las aplicaciones del I-light se pueden apreciar en la página oficial de la empresa o en varios artículos. Presenta varias obras realizadas: el pabellón italiano en la Expo de Shanghái, el Centro Pompidou en Málaga, así como fachadas, tabiquería interior, monumentos, exposiciones, mostradores y carteles empresariales, entre otros (ver figura I.52).

Figura 1.52 – Aplicación del HT I-light



Expo de Shanghai, Pabellón Italiano, 2010



Centro Pompidou Málaga 2015



Centro de Investigación e Innovación i.lab de Italcementi. Bérgamo (Italia).



1.2.4. Ilum (México)

El HT Ilum, como se especificó anteriormente, fue creado por dos estudiantes de Ingeniería que, luego de graduarse, fundaron la empresa Concretos Traslúcidos S.L.R., que promocionaba y comercializaba el producto a través de su página web. Actualmente la página se encuentra desactivada, y este producto es comercializado por la empresa Duro Concretos.

Los creadores registraron la invención con la patente MX 267847 B (fecha de puesta en circulación 05/08/2009) en el Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual (IMPI).

La empresa Duro Concretos promueve y comercializa el HT Ilum. En su página web lo llama *concreto translúcido*, establece que es con base de polímeros y que permite el paso de la luz aproximadamente en un 70 %. Su fabricación es igual a la del HC. Para ello, se emplea agregados finos y gruesos, fibras y aditivos, especialmente el también llamado *Ilum*, que proporciona la translucidez. En este hormigón translúcido pueden introducirse objetos, luminarias e imágenes, ya que es translúcido hasta dos metros de espesor.

Incorpora varias ventajas, tales como un alto nivel estético, gran variedad de acabado, fácil aplicación de colores y realza la decoración de una construcción. No cuenta con una ficha técnica para mayores especificaciones que las detalladas anteriormente.

Cuando aún estaba la página web de los inventores activa, en el trabajo final de diplomado se expusieron las propiedades expuestas por el fabricante. Las dimensiones en que se fabricaron fueron de: 120 cm × 60 cm, 50 cm × 50 cm, 45 cm × 45 cm; 30 cm × 30 cm, con espesores de

2 cm, 2,5 cm y 5 cm. En cuanto a la resistencia a compresión, es mayor a 60 MPa y, como mínimo, de 45 MPa; la resistencia a flexión es de 2,55 MPa, la deformación de flexión máxima de 1,55 mm. La resistencia a corrosión es buena; es resistente a la acción de los sulfatos de calcio, magnesio y sodio, al ataque de los ácidos sulfúrico, clorhídrico y sódico, y es resistente al hidróxido de sodio, potasio y calcio. Tiene una permeabilidad del 0,05 %, un módulo de elasticidad de 24 GPa y un peso volumétrico de hasta un 30 %. En cuanto a lo térmico, es mejor comparado con el vidrio, el metal y el HC.

La colocación en sitio se diferencia con la del HC en que requiere de un encofrado especial y de personal calificado por la empresa para su aplicación. No se recomienda utilizar tachos para su transporte. Los agregados a utilizar pueden ser cualquier tipo de agregado pétreo poroso, pero no se puede utilizar agregados orgánicos ni de superficie lisa. En la transmisión de la luz, depende del espesor de la placa, y del tipo y tamaño del agregado. Lo mínimo que se alcanza es a distinguir las siluetas.

La información especificaba una vida útil de 50 años, validada por el Instituto de Investigaciones de Materiales de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) de México. Además, poseía propiedades fungicidas, lo cual lo hace útil en aplicaciones clínicas y de laboratorios.

La empresa que lo fabricaba comercializaba dos tipos de productos:

I.2.4.1 HT Ilum

Son piezas prefabricadas de HT de alta resistencia, que se puede fabricar con o sin agregados, en diferentes dimensiones o colados en sitio. Las dimensiones son las mencionadas anteriormente.

I.2.4.2 Aditivo Ilum

Es un aditivo para la producción de un H que permite el paso de la luz y mejora algunas importantes características mecánicas.

La patente MX 267847 B hace referencia a un aditivo para la fabricación de un H con uso estructural y arquitectónico con propiedades ópticas.

El aditivo objeto de la presente invención comprende su incorporación en el H como aglutinante; es polimérico, puede ser una resina epóxica o una policarbonatada, acompañada cada una de su respectivo catalizador.

El aglutinante epoxídico es el éter diglicídico del bisfenol A (DGEBA), que se deshidrata al vacío a 80 °C durante 8 horas antes de su empleo. El equipo epoxídico de la resina fue determinado por método potenciométrico. El aditivo para endurecer el H es la dietilentriamina (DETA), que debe ser deshidratada sobre tamices moleculares antes de su empleo.

La otra opción de aglutinante es un policarbonato (distinto al policarbonato de bisfenol A), que se logra a partir de un monómero, porque tiene dos grupos acrílicos en los extremos y contiene enlaces dobles carbono-carbono; por ello, tiene una polimerización vinílica por radicales libres. Así, todas las cadenas se unirán con otras para formar el material entrecruzado.

Utiliza cemento portland, preferentemente blanco.

Los agregados utilizados pueden ser fibra de vidrio, sílice, sílice sol coloidal y FOp. Las fibras de vidrio son cortadas y molidas en longitudes mayores a los 0,02 mm, con la función de mejorar las resistencias a compresión, flexión, tensión y torsión del H. Las FOp son hilos de vidrio o plástico que guía la luz. El tipo de FOp es monomodo y sin protección con finalidad de transmisor de luz y conductor eléctrico.

Deberá utilizarse entre un 0,5 y 10 % del peso de la resina para que, una vez fraguado, le proporcione una mayor resistencia a la sílice y más dureza al H.

Como aditivo se usan pigmentos; agente antiestático para eliminar la electricidad estática; agente de puente para favorecer la unión de los materiales, dar resistencia y protección contra el envejecimiento; agente lubricante para dar protección superficial; agente filmógenos colantes para dar integridad, rigidez, protección e impregnación: agente tixotrópicos (hojuelas de materiales inorgánicos, microesferas de vidrio, carbonatos de calcio, dióxido de silicio, etcétera); agente retardador de llama (elemento que contiene coloro, bromo, fósforo, etcétera), y por último, agente de protección UV (estabilizadores).

Opcionalmente, pueden utilizarse elementos pétreos como agregados, por ejemplo, arenas.

El proceso de fabricación consiste en la mezcla en dos procesos; uno es la mezcla del cemento con el agua y el otro es donde se mezclan los aglutinantes, cualquiera que sea, con el catalizador o endurecedor. La proporción debe de ser de al menos 1,5 de aglutinante por cada parte de mortero. El proceso de mezclado puede ser manual o mecánico. El aglutinante epóxica desde 0 % hasta 90 % y el aglutinante policarbonatado desde 0 % hasta 60 %; fibra de vidrio desde 0 % hasta 10 %; sílice sol coloidal desde 0,5 % hasta 5 %; sílice desde 0,5 % hasta 10 %; dietilentriamina (DETA) desde 10 % hasta 50 %; FOp desde 0 % hasta 3 %; y cemento portland desde 0 % hasta 15 %.

Establece que la resistencia a compresión con agregado epoxi (bisfenol A) es de hasta 220 MPa, y con un agregado de policarbonato es de hasta 202 MPa.

Es un HT que puede ser utilizado como conductor eléctrico; es impermeable, y su peso volumétrico es hasta 3 % menos que el de un HC. Además, tiene una absorción máxima de agua de 0,35 %, un índice máximo de oxígeno de 25 %, una conductividad térmica de 0,21 W/m °C, un límite elástico mayor a los 60 MPa y un Módulo de Young que va desde 1750 MPa hasta MPa.

En la figura I.53 son presentadas algunas de las aplicaciones del HT Ilum.

Figura I.53 – Varios diseños de HT Ilum



Cubierta



Mesada

I.2.5. Lucem (Alemania)

El HT Lucem es un producto de origen alemán, producido por la empresa LUCEM GmbH, en un proceso de desarrollo que comenzó en el año 2011. El proceso de producción ha utilizado la base de la tecnología de Andreas Roye y Marijan Barlé, quienes lo desarrollaron entre los años 2007 y 2009, a través de la empresa Robatex (Royer Barlé Textiles). Por ello, la fabricación de este HT se desarrolló sistemáticamente con la creación de una línea de producción.

Si bien, desde el año 2007 se distribuyeron los productos Robatex en todo el mundo como la marca Lucem, el cambio de nombre de la empresa de Robatex a Lucem Lichtbeton GmbH tuvo lugar en octubre 2010, con el objetivo de lograr una apariencia exterior uniforme.

Lucem Lichtbeton GmbH tiene actualmente una plantilla de 15 empleados en la planta de producción. Las técnicas se actualizan regularmente para satisfacer las demandas del mercado. Tiene un desarrollo continuo del producto, para poder expandirse dentro de la industria de la construcción en forma mundial.

La primera aparición del HT Lucem fue en el pabellón en la feria mundial Expo 2010 en Shanghái (China). La marca Lucem combina la más alta calidad con un diseño atemporal y estético: se trata de un MHAR y fibras translúcidas que son duraderas y resistentes al clima, a la luz ultravioleta y al impacto, y no es inflamable.

La superficie pulida, brillante o mate, es característica de todo HT, y de igual manera se rescata en el producto Lucem. Las superficies se pueden diseñar individualmente con la adición de pigmentos de color o con diferentes disposiciones de fibras.

Los componentes del HT Lucem son agua, arena y cemento; forman un microhormigón de alto desempeño fluido que, junto con las FOP ultrafinas, logra que las propiedades mecánicas y las características ópticas permanezcan intactas.

Conformando un tabique o entrepiso, el producto Lucem está iluminado con una fuente de luz artificial para garantizar una iluminación en la cara opuesta del panel. La luz indirecta crea un efecto especial para el espacio interior, especialmente cuando los paneles son la única fuente

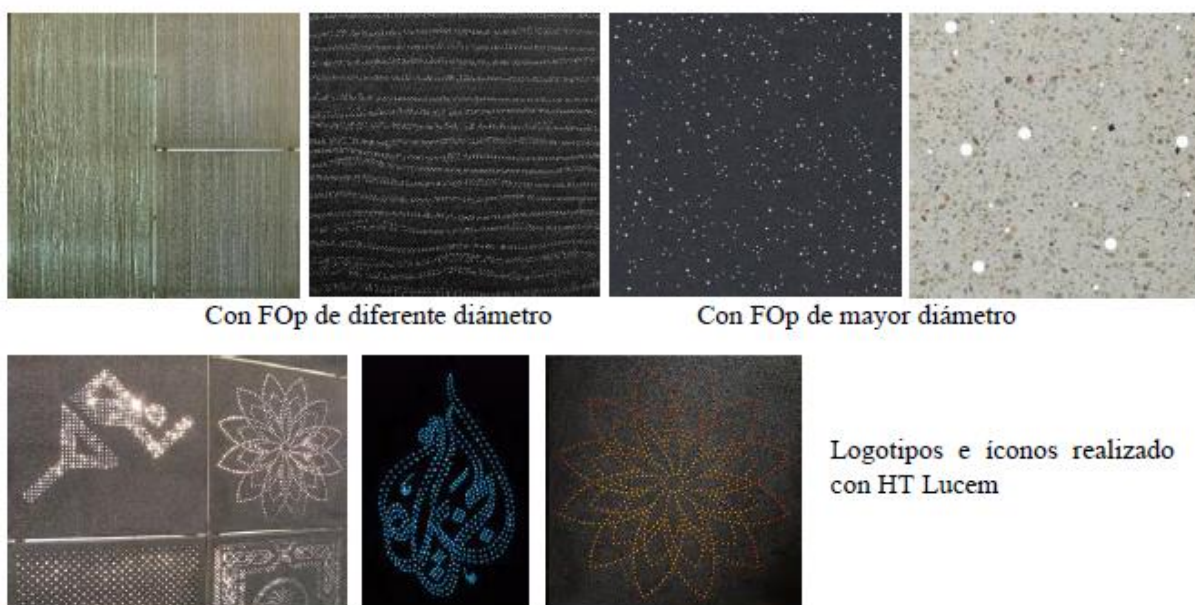
de luz. Debido al efecto óptico de las FOp en los paneles, varía en colores desde todos los ángulos de la habitación.

La estructura de malla fina que conforma las FOp genera una estructura ligera que, conjuntamente con la iluminación, revela objetos oblicuos.

Si se usan FOp de diferentes diámetros en distancias irregulares, los puntos de luz individuales aparecen más brillantes, formando una transparencia puntual como la impresión de una noche estrellada, y el MH desaparece en el fondo.

En cambio, si se usan FOp con diámetros mayores, aparecen puntos de luz individuales más brillantes, de una brillantez localizada, aunque menos del 1 % de la superficie consiste en puntos claros. También, si se desea, las FOp se pueden organizar para generar logotipos, nombres e íconos (ver figura I.54).

Figura I.54 – Aspectos del HT



La producción del HT Lucem se basa en cemento blanco, por lo cual es un producto de color blanco. También se producen en color gris y gris oscuro, que tienen pigmentos de óxidos de hierro férrico. Además del cemento blanco y los pigmentos, cuenta con un 50 % de arena, con una granulometría de 3 mm con huecos de aire de 2 mm máximo.

Los paneles Lucem son placas pequeñas de 1,20 m × 0,60 m, con un espesor de entre 4 mm a 10 mm, se iluminan lateralmente con luz LED (ahorro de energía de alta eficiencia). El uso de LED RGB⁶ permite cambios de color en forma estático o intermitente. Los elementos

⁶ El LED RGB es un componente electrónico muy usado en paneles de publicidad, formados por matrices de cientos o miles de estos diodos. En la imagen se puede observar un diodo de este tipo, conteniendo en su interior tres diodos, rojo, verde y azul. cuya conexión común se realiza por el cátodo o ánodo. LED RGB significa LED rojo, azul y verde. Los productos LED RGB combinan estos tres colores para producir más de 16 millones de

individuales pueden estar interconectados y el sistema puede atenuar el brillo. A diferencia de otros hormigones translúcidos, la iluminación es lateral, dependiendo del tamaño del panel y de la luminosidad deseada: los LED se pueden instalar en uno, dos o en cada lado. Para la seguridad se usa baja tensión (12 V) con un grado de protección IP67.⁷ Las luces LED tienen una vida útil de 80.000 horas.

El hormigón translúcido Lucem fue patentado internacionalmente con el n.º WO2009027113 con fecha 05/03/2009. También fue publicado en Estados Unidos con el n.º US20110185660, con fecha 14/03/2008; en Alemania con el n.º DE102007045898, con fecha 23/04/2009 y en Egipto con el n.º EP2180989, con fecha 05/05/2010.

La patente WO2009027113, con el título *Light-conducting component and device and method for the production of said component* hace referencia a un dispositivo de transmisión de luz de MHAD con fibra translúcida; un equipo para producir el dispositivo de transmisión de luz y un procedimiento para la preparación del elemento permeable a la luz.

La idea es generar una producción mecanizada y proporcionar una distribución homogénea de la fibra conductora de luz en el MH.

Las FOp utilizadas son monomodo o multimodo, y pueden estar distribuidas en tejido, tricotado, trenzado o retorcido, generando un material compuesto en conjunto con hilos de algodón, por ejemplo, llamado *fibra de material compuesto*.

Por ejemplo, las FOp tejidas pueden estar en una dirección o en las dos direcciones. Estas fibras se organizan en un rodillo, o también se pueden posicionarse en forma individuales por medio de una cinta transportadora. Estos dos tipos de distribución de las FOp hacen el procedimiento más simple y con una alimentación continua, en un proceso mecanizado.

El procedimiento del llenado del encofrado es por capas sucesivas de MH y FOp. Luego se realiza el proceso de curado y más adelante el corte, perpendicularmente a las FOp. Los paneles son pulidos y en las superficies donde están expuestas las FOp se aplica una capa epoxi por protección de las influencias ambientales (figuras I.55 y I.56).

tonos de luz. Pero no todos los colores son posibles. Algunos se encuentran "fuera" del triángulo formado por los LED RGB. Además, los colores pigmento, como el marrón o el rosa, son difíciles o imposibles de lograr.

⁷ El grado de protección IP67 indica lo siguiente: las letras IP identifican al estándar (del inglés: Ingress Protection). El valor 6 describe el nivel de protección ante polvo, en este caso: El polvo no debe entrar bajo ninguna circunstancia. El valor 7 describe el nivel de protección frente a líquidos (normalmente agua); debe resistir sin filtración alguna, la inmersión completa a un metro durante 30 minutos.

Figura I.55 – Equipos y procedimientos para la fabricación del hormigón translúcido Lucem

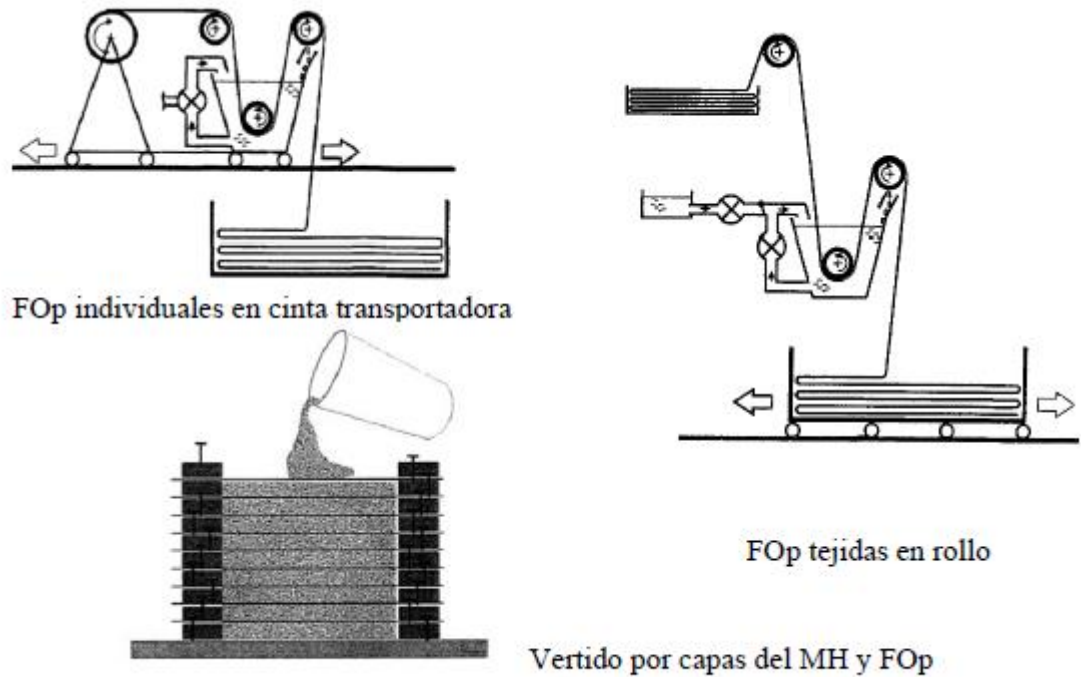
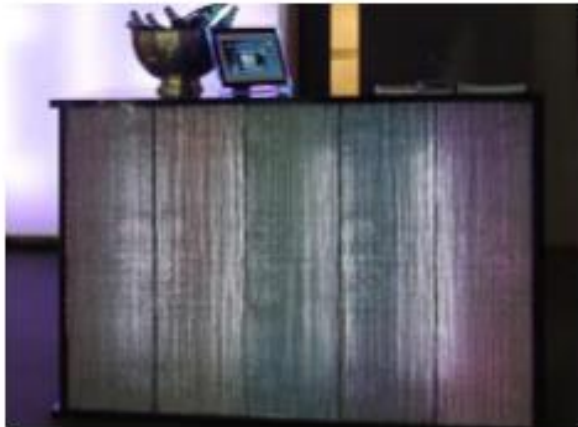


Figura I.56 – Etapas del proceso de fabricación del HT Lucem



El HT Lucem puede utilizarse para una amplia gama de aplicaciones: iluminando escaleras, encimeras radiantes, vitrinas y estantes, lavatorios, escenarios, fachadas, terrazas o entradas de vehículos. Cuenta con una tecnología de iluminación basada en LED con luz blanca y colores. La luz puede ser en degradé o alternada en colores y se puede ajustar al ritmo de la música. Se pueden apreciar algunos ejemplos en las figuras I.57 a I.64.

Figura I.57 – Algunos ejemplos de diseño interior del HT Lucem



Mostrador.



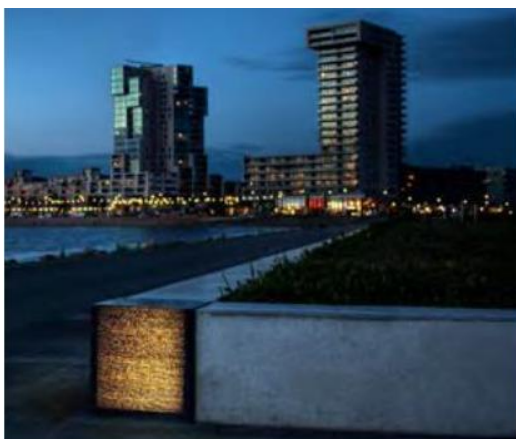
Tabique interior

Figura I.58 - Clinic Genk, Bélgica, 2011



Para el montaje de los paneles, un sistema de unión machihembrada de perfiles de acero. La altura del tabique se determina por 3 paneles y en el ancho son 10 paneles. Entre secciones de 3 paneles y 3 paneles se colocó una barra rectangular vertical de 70 mm x 10 mm, con accesorio de sujeción en el techo de hormigón y en el contrapiso de hormigón. Superficie 30 m². Diseño: Arquitecto Buero B.

Figura I.59 - Iluminación exterior - paseo en Oeverpark, Nesselande, Rotterdam, 2011



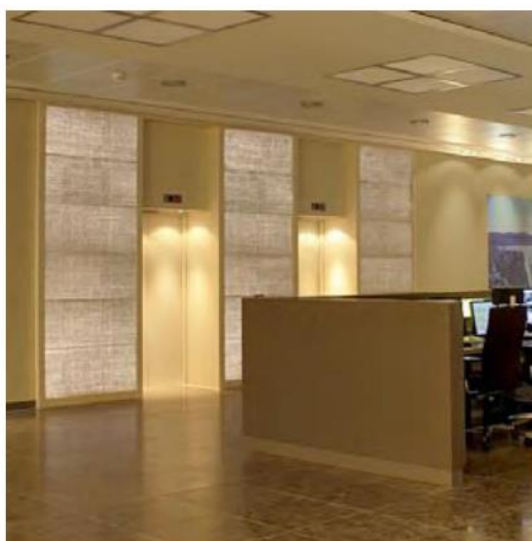
Forma: 45 x 45 cm, espesor 30 mm.
Propietario Empresas Stadt Rotterdam, cooperación
Cuprohaag Lichttechnik.

Figura I.60 – Mostrador, Hotel Arabella Sheraton, Spitzingsee, Alemania, 2011



Forma 120 cm x 60 cm, espesor 15 mm. Arquitectos Bayerische Hausbau Projektentwicklung

Figura I.61 - Ampliación del edificio de administración principal de Signal Iduna, Dortmund, Alemania, 2010



Son 9 paneles Lucem con marcos especiales con proporciones de 1,20 m x 3,5 m que se instalaron para acompañar a los ascensores a través de tres pisos superpuestos.

Superficie 33 m²
Arquitectos HPP Hentrich-Petschnigg und Partner
Artista: Sassan Philipp Haschemi & Associates

Figura I.62 – Residencia privada, Luxemburgo, 2010



Figura I.63 - Villa en Ahmedabad, India, 2011



Figura I.64 – Stand en BAU 2011



Superficie 50 m². LUCEM GmbH.

I.3. Antecedentes de su aplicación en el Uruguay

HT Luccon ha llegado a nuestro país importado de Austria por la empresa Trafigura Corporate. El director en ejercicio durante el período de construcción, construyó su sede de oficinas (Edificio Tribute) en Zonamérica, a través de la empresa constructora Saceem entre los años 2014-2016.

Las muestras que se emplearon en esta tesis con la denominación HTI (hormigón translúcido industrializado) se obtuvieron a través de una empresa uruguaya que estuvo en la adecuación y montaje del tabique que conforma el logo de la empresa.

Esta empresa tiene una estricta política de privacidad, por lo cual no se pudo hablar con ningún representante. Por ello, lo que se escribe a continuación surge de comentarios de algunos proveedores de servicio en el proceso de la construcción del edificio:

La selección del empleo de un HT para implantar el logo de la empresa se debió al gusto personal de su presidente que era austríaco y que conocía el producto.

Se importaron los paneles de HTI y ningún personal en Uruguay estaba capacitado para su acopio y montaje; por ello, muchos de los paneles se rompieron y se tuvo que realizar otra importación para terminar con los trabajos. También tuvieron que hacer dos veces la estructura para sujetar los paneles; la primera estructura se translucía a través del HT. Al ver este aspecto del material, tuvieron que adecuar la estructura para mejorar el aspecto visual del logo.

Los tabiques de HT se ubicaron en el hall principal de planta baja (figura I.65) y en el hall de Presidencia, en el tercer piso.

Figura I.65 - Tabique logo de la Empresa Trafigura de HTI



Anexo II. Datos técnicos de algunos de los materiales empleados

II.1 Cemento blanco

II.2 Fibra Óptica n.º 1 (FOp DECO)

II.3 Fibra Óptica n.º 2 (FOp TIRA)

II.1. Cemento blanco

WHITE PORTLAND CEMENT TS 21 BPC 52,5 R / 85 EUROPEAN STANDARD EN 197-1 CEM I 52,5

Chemical Properties		Çimsa Values	EN 197-1 Limits	
			Min.	Max.
Insoluble Residue	%	0,18	-	5,0
SiO ₂	%	21,6	-	-
Al ₂ O ₃	%	4,05	-	-
Fe ₂ O ₃	%	0,26	-	-
CaO	%	65,7	-	-
MgO	%	1,30	-	-
SO ₃	%	3,30	-	4,0
Loss on Ignition	%	3,20	-	5,0
Na ₂ O	%	0,30	-	-
K ₂ O	%	0,35	-	-
Chloride (Cl)	%	0,01	-	0,1
Free CaO	%	1,60	-	-

Physical and Mechanical Properties				
Specific Weight	gr/cm ³	3,06	-	-
Specific Surface Area (Blaine)	cm ² /gr	4600	-	-
Whiteness (Y value as per CIE system)	%	85,5	85,0	-
Initial Setting	minute	100	45,0	-
Final Setting	minute	130	-	-
Water	%	30,0	-	-
Volume Consistency (Le Chatelier)	mm	1,0	-	10,0
Residue in 0,045 mm Sieve	%	1,0	-	-
Residue in 0,090 mm Sieve	%	0,1	-	-
Compressive Strength (2 days)	MPa	37,0	30,0	-
Compressive Strength (7 days)	MPa	50,0	-	-
Compressive Strength (28 days)	MPa	60	52,5	-

WHITE PORTLAND CEMENT ASTM STANDARD C-150 TYPE 1

Chemical Properties		Çimsa Values	ASTM C-150 Type 1 Limits	
			Min.	Max.
Insoluble Residue	%	0,18	-	0,75
MgO	%	1,30	-	6,0
SO ₃	%	3,30	-	3,50
Loss on Ignition	%	2,60	-	3,0

Physical and Mechanical Properties				
Whiteness (Hunter Lab System)	L,a,b	92,25	-	-
		-1,63		
		3,12		
Specific Surface Area (Blaine)	m ² /kg	460	-	-
Initial Setting	minute	100	45,0	-
Final Setting	minute	130	-	375
Autoclave Expansion	mm	0,09	-	0,8
Compressive Strength (2 days)	PSI	4360	1740	-
Compressive Strength (7 days)	PSI	5220	2760	-
Compressive Strength (28 days)	PSI	6430	4060	-

Aesthetical Super White

- It has minimum 85% whiteness.
- It has been produced from the raw material with high purity
- It allows the preparation of perfect mixtures with the color pigments.
- It allows cement based paint manufacturing.
- It allows acquisition of bright and decorative surfaces in the floorings.

II.2. Fibra óptica n.º 1 (FOp DECO)

• Marca	:	Sin datos
• Tipo	:	Tira de luces.
• Modelo	:	Sin datos
• Origen	:	China
• Embalaje	:	Paquete de tira de luces con conector
• Diámetro	:	0,34 mm
• Cantidad de Luces	:	20 unidades
• Cantidad de Fibra Óptica	:	
• Longitud de Fibra Óptica	:	5 cm
• Temperatura de funcionamiento	:	Sin datos
• Durabilidad	:	Sin datos
• Venta	:	Mercado interno de Uruguay.
• Uso	:	Adorno decorativo navideño.
• Funcionamiento	:	Conexión directa a la red eléctrica.



II.3. Fibra óptica n.º 2 (FOp TIRA)

• Marca	:	CHINLY
• Tipo	:	Cable de Fibra Óptica de PMMA
• Modelo	:	FO2201
• Origen	:	Guangdong, China (Mainland)
• Embalaje	:	Paquete tipo rollo
• Diámetro	:	0,75mm
• Cantidad de Fibra Óptica	:	100 unidades
• Longitud de Fibra Óptica	:	3 m
• Temperatura de funcionamiento	:	entre 50 °C y 75 °C
• Durabilidad	:	20 años
• Venta	:	Mercado interno de Uruguay.
• Uso	:	Cielo estrellado.
• Funcionamiento	:	En conjunto con un conductor eléctrico LED



Anexo III. Correlaciones entre la resistencia a compresión y las otras propiedades estudiadas

III.1. Resistencia a compresión – Transmitancia óptica

III.2. Resistencia a compresión – Alta temperatura

III.2.1_ Resistencia a compresión – Resist. temp. 100 °C

III.2.2_ Resistencia a compresión – Resist. temp. 200 °C

III.2.3_ Resistencia a compresión – Resist. temp. 300 °C

III.3. Resistencia a Compresión – Absorción capilar

III.3.1_ Resist. compresión – Peso de la muestra en estado seco

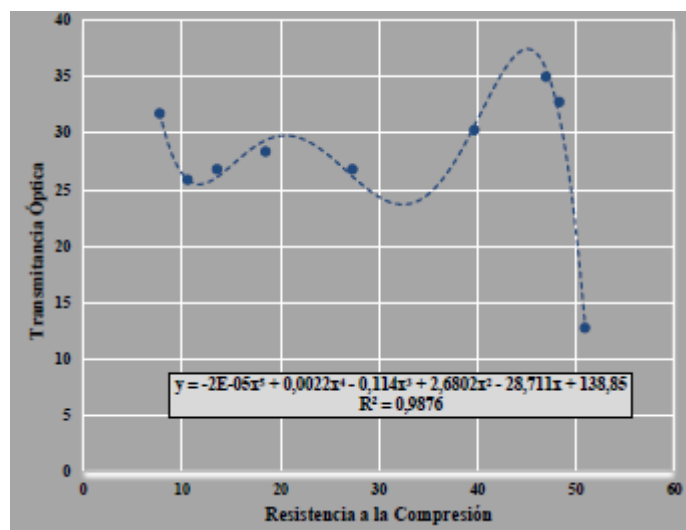
III.3.2_ Resist. compresión – Abs. capilar a los 60 min

III.3.3_ Resist. compresión – Abs. capilar a los 294 min

III.1. Resistencia a compresión – transmitancia óptica

La figura III.1 presenta la correlación que más se ajusta a los resultados obtenidos de resistencia a compresión y transmitancia óptica, y con todos los resultados muestra que mediante una línea de tendencia polinómica de quinto grado se tiene como resultado $R^2 = 0,99$. Este valor es muy cercano a 1, lo que determina una excelente relación recíproca entre las dos propiedades. El modelo planteado explica muy satisfactoriamente la relación existente entre la resistencia a compresión y la transmitancia óptica, aunque los resultados fueron muy fluctuantes.

Figura III.1 – Gráfico de correlación entre la resistencia a compresión y transmitancia óptica, con todos los datos



Separando los valores según las variables utilizadas en las muestras, se pueden establecer también las correlaciones que se indican a continuación:

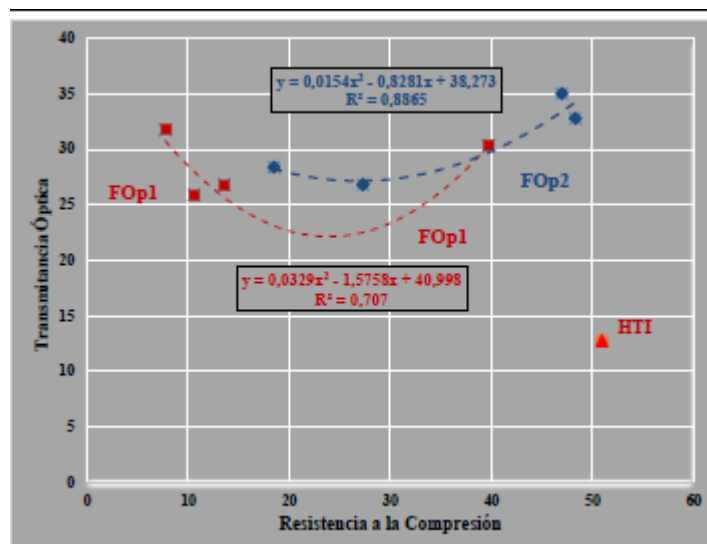
III.1.1. Correlación considerando la variable FOp

En la figura III.2, se presenta la correlación entre la resistencia a compresión y la transmitancia óptica, agrupando los datos según el tipo de FOp empleada.

Los valores R^2 para las correlaciones, de acuerdo al tipo de FOp, se aproximan al valor 0,90.

Por ello, la correspondencia o relación recíproca entre estas dos propiedades según el tipo de FOp empleada es muy buena en el caso de la FOp2 y fuerte en el caso de la FOp1, y se tiene mejor correspondencia entre ambas propiedades con el empleo de la variable FOp2 que con la variable FOp1.

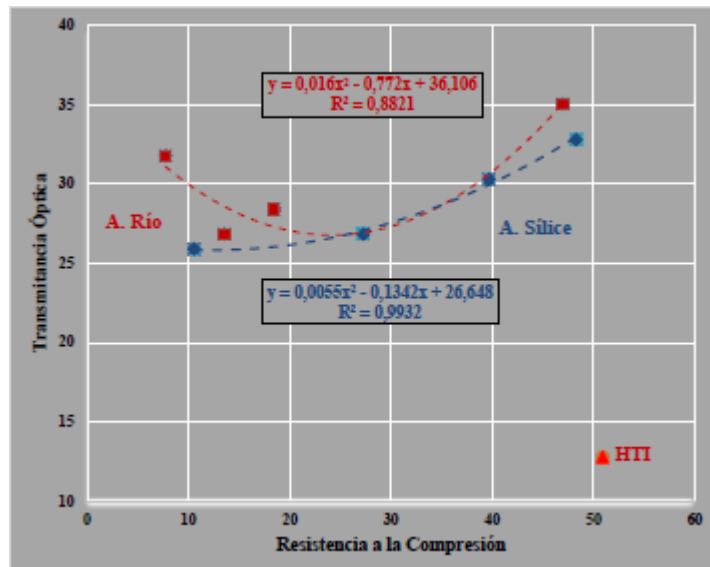
Figura III.2 – Gráfico de correlación entre la resistencia a la compresión y transmitancia óptica, según la variable fibra óptica



III.1.2. Correlación considerando la variable árido fino

En la figura III.3, se presenta la correlación agrupando los datos según el tipo de árido fino empleado. Ambos valores R^2 obtenidos dieron próximos a 1. Por ello, la correspondencia o relación recíproca entre estas dos propiedades según el tipo de árido fino puede considerarse excelente en el caso de emplearse arena de sílice y muy buena en el caso de arena de río, ya que se tiene mejor correspondencia con los resultados experimentales obtenidos con el uso de la arena de sílice que con la de río.

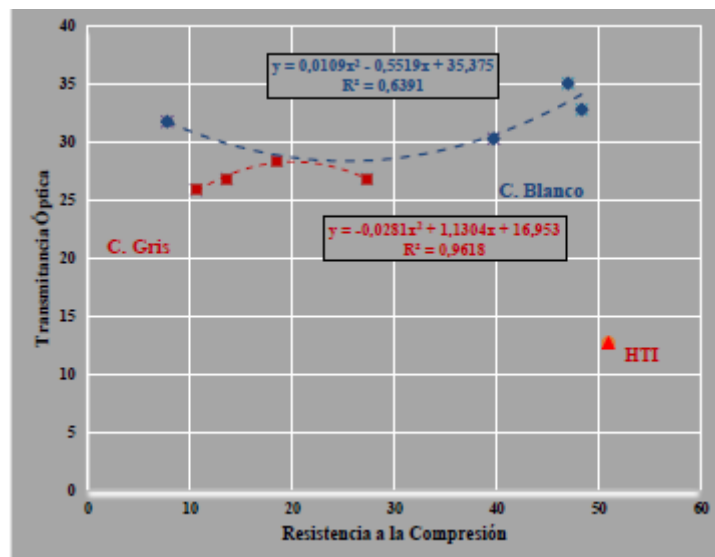
Figura III.3 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y transmitancia óptica, según la variable árido fino



III.1.3. Correlación considerando la variable cemento

En la figura III.4, se expresan las correlaciones agrupando los datos según el tipo de cemento. Los valores R^2 presentes dieron valores muy diferentes; con el empleo de cemento gris se tiene el valor más próximo al valor 1. Por lo cual, la correspondencia o relación recíproca entre las propiedades es excelente con el empleo del cemento gris. O sea, tiene mejor correspondencia con el uso de la variable *cemento gris* que con la variable *cemento blanco*.

Figura III.4 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y transmitancia óptica, según la variable cemento



III.1.4. Consideraciones finales sobre las correlaciones resistencia a compresión – transmitancia óptica

Se observa que en la correlación entre las propiedades resistencia a compresión y transmitancia óptica con mayor reciprocidad es con el empleo de la FOp2, arena de sílice y cemento gris.

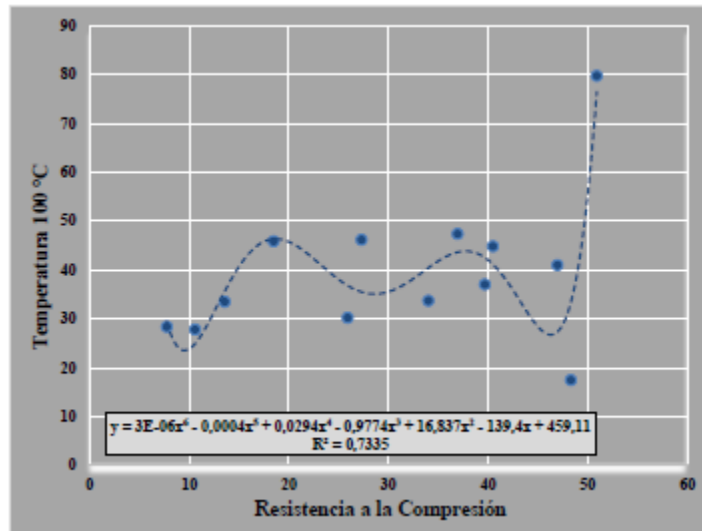
III.2. Resistencia a compresión – altas temperaturas

En los ensayos se estudiaron tres rangos de altas temperaturas (100°C, 200°C y 300°C), y a continuación se establece, por cada rango de temperatura, la correlación con la resistencia a compresión:

III.2.1. Resistencia a compresión – temperatura 100 °C

En la figura III.5, el modelo planteado explica la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a temperatura 100 °C, y con todos los resultados muestra que mediante una línea de tendencia polinómica de sexto grado se tiene como resultado $R^2 = 0,73$. Las pruebas de relevancia global afirman que el modelo está planteado de forma correcta, ya que esta relación es buena, pero no muy ajustada a dicha relación.

Figura III.5 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y temperatura 100 °C, con todos los datos



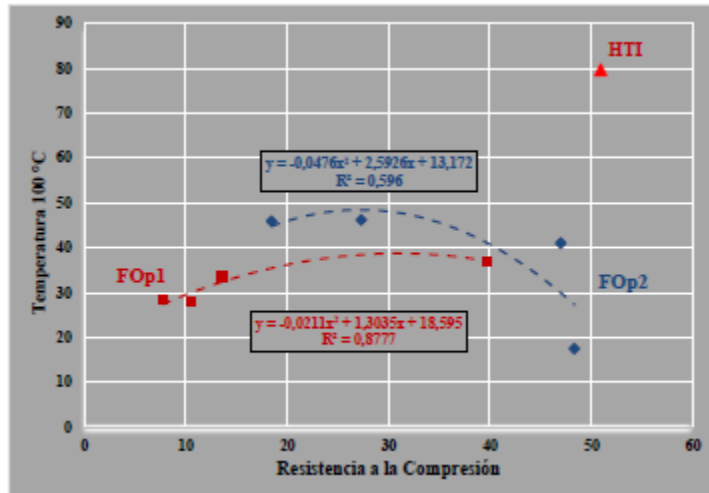
Separando los valores según las variables utilizadas en las muestras, se pueden establecer también correlaciones que se indican a continuación:

III.2.1.1. Correlación considerando la variable FOp

En la figura III.6, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de FOp. Los valores R^2 , de acuerdo al tipo de FOp, dieron valores muy diferentes entre ellos, y solo con una de las FOp el valor se aproxima a 1. La correspondencia o relación recíproca entre estas dos propiedades es mucho más ajustada con el empleo de la FOp1 que con la FOp2. Con el

empleo de la FOp1 tiene un valor que se aproxima al valor 0,90, por lo cual, se dice que es una relación ajustada, o sea, estadísticamente significativa.

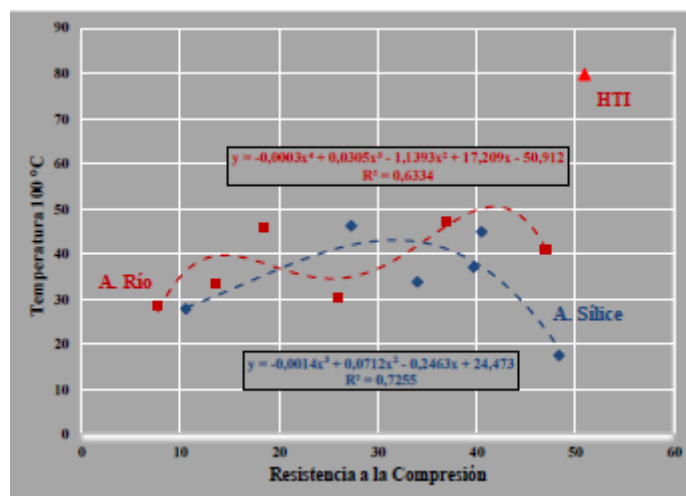
Figura III.6 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y temperatura 100°C, según la variable FOp



III.2.1.2. Correlación considerando la variable árido fino

En la figura III.7, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de árido fino. Los valores R^2 , de acuerdo al tipo de árido fino, dieron valores próximos entre ellos (0,63 y 0,73) pero un poco alejados al valor 1. La correspondencia o relación recíproca entre estas dos propiedades es más ajustada con el empleo de la arena de sílice que con la arena de río. Con el empleo de la arena de sílice el modelo polinómico no se aproxima lo suficiente a los resultados obtenidos experimentalmente, por lo cual, se dice que es una relación poco ajustada.

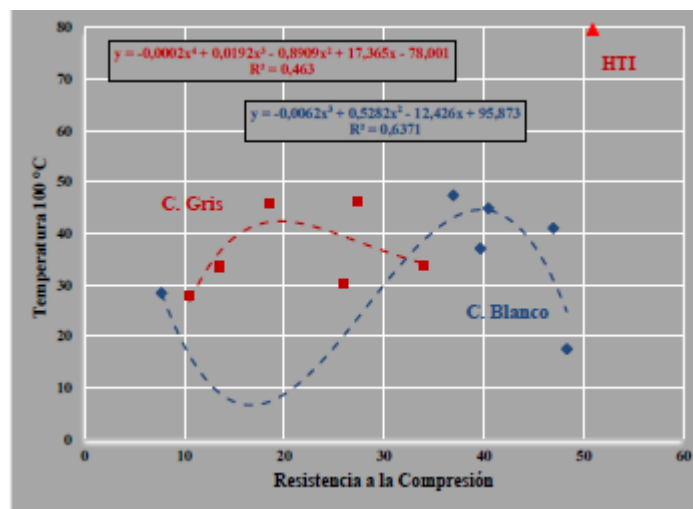
Figura III.7 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y temperatura 100°C, según la variable árido fino



III.2.1.3. Correlación considerando la variable cemento

En la figura III.8, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de cemento. Los valores R^2 , de acuerdo al tipo de cemento, dieron valores diferentes entre ellos y alejados al valor 1. La correspondencia o relación recíproca entre estas dos propiedades es más ajustada con el empleo del cemento blanco que con el cemento gris. Con el empleo del cemento blanco, se obtiene el valor que más se aproxima al valor 1, por lo que se dice que es una relación poco ajustada.

Figura III.8 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y temperatura 100°C, según la variable cemento



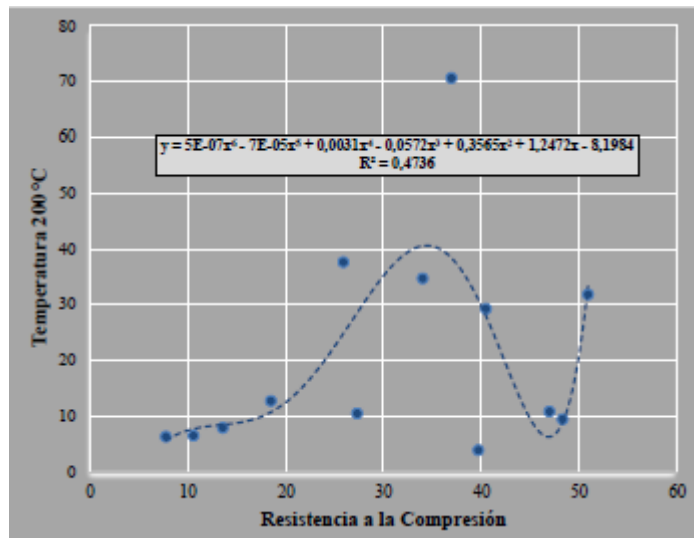
III.2.1.4. Consideraciones finales sobre las correlaciones entre resistencia a compresión y temperatura 100 °C

Se observa que en la correlación entre las propiedades resistencia a compresión y temperatura 100 °C con mayor reciprocidad es con el empleo de la FOp1, arena de sílice y cemento blanco.

III.2.2. Resistencia a compresión – temperatura 200 °C

En la figura III.9, el modelo planteado explica la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a temperatura 200 °C. Las pruebas de relevancia global afirman que el modelo está planteado con una relación estadísticamente poco significativa. Se obtuvo un coeficiente de determinación de 47,36 %, con una función polinómica de sexto grado. Esta relación no es muy buena, o sea, es una relación no muy ajustada.

Figura III.9 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y temperatura 200 °C, con todos los datos

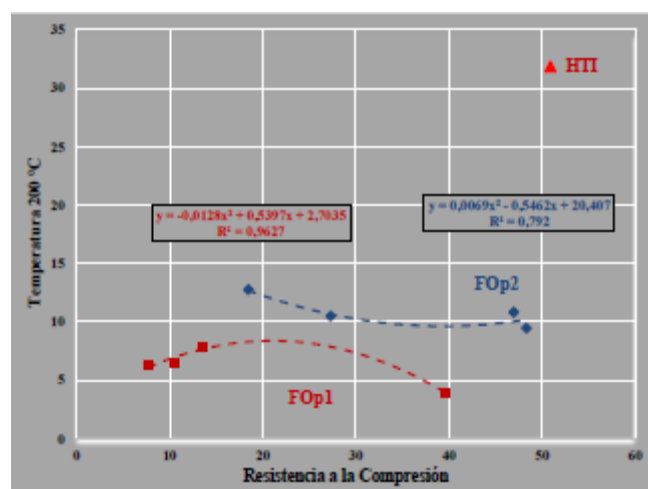


Separando los valores según las variables utilizadas en las muestras, se pueden establecer también correlaciones que se indican a continuación:

III.2.2.1. Correlación según la variable FOp

En la figura III.10, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de FOp. Los valores R^2 , de acuerdo al tipo de FOp, dieron valores muy diferentes y separados entre sí, y solo un valor se aproxima al valor 1. La correspondencia o relación recíproca entre estas dos propiedades es mucho más ajustada con el empleo de la FOp1 que con la FOp2. Con el empleo de la FOp1 se obtiene el valor que se aproxima más al valor 1, por lo cual, se dice que es una relación ajustada, o sea, estadísticamente significativa.

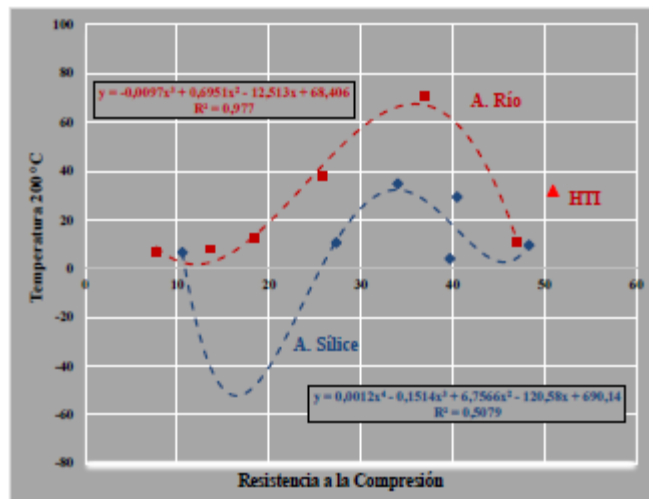
Figura III.10 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y temperatura 200°C, con la variable FOp



III.2.2.2. Correlación según la variable árido fino

En la figura III.11, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de árido fino. Los valores R^2 dieron valores muy diferentes y separados entre sí. Solo con el empleo de arena de río su valor se aproxima bastante al valor 1, por lo cual, se dice que es una relación ajustada, o sea, estadísticamente significativa.

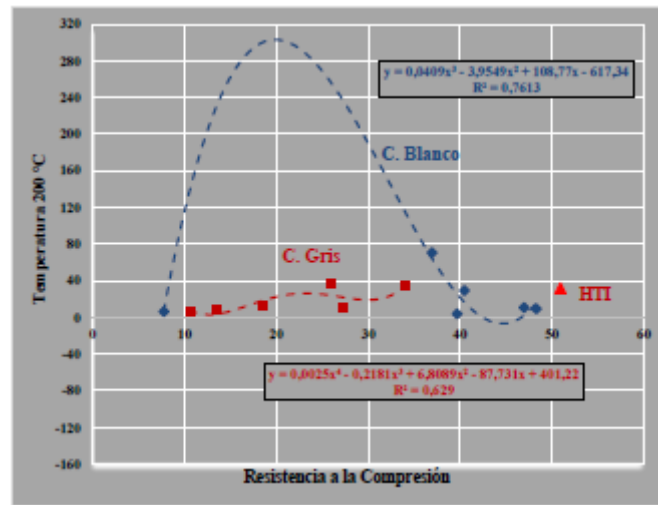
Figura III.11 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y temperatura 200°C, con la variable árido fino



III.2.2.3. Correlación según la variable cemento

En la Figura III.12, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de cemento; los valores R^2 dieron muy diferentes y separados entre sí, y solo un valor se aproxima al valor 1. La correspondencia o relación recíproca entre estas dos propiedades es más ajustada con el empleo del cemento gris que con el cemento blanco. Con el empleo del cemento gris, su valor se aproxima al valor 1, por lo cual, se dice que es una relación ajustada, o sea, estadísticamente significativa.

Figura III.12 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y temperatura 200 °C, con la variable cemento



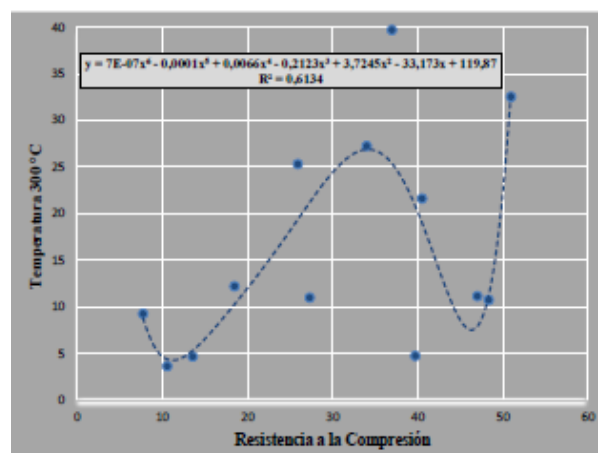
III.2.2.4. Consideraciones finales sobre las correlaciones resistencia a compresión y temperatura 200 °C

Se observa que en la correlación entre las propiedades resistencia a compresión y temperatura 200 °C, la mayor reciprocidad es con el empleo de la FOP1, arena de río y cemento gris.

III.2.3. Resistencia a compresión – temperatura 300 °C

En la figura III.13, el modelo planteado explica la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a temperatura 300 °C, y con todos los resultados muestra que, mediante una línea de tendencia polinómica de sexto grado, se tiene como resultado $R^2 = 0,61$. Las pruebas de relevancia global afirman que el modelo está planteado con una relación estadísticamente poco significativa; esta relación no es buena, o sea, no muy ajustada.

Figura III.13 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y temperatura 300 °C, con todos los datos

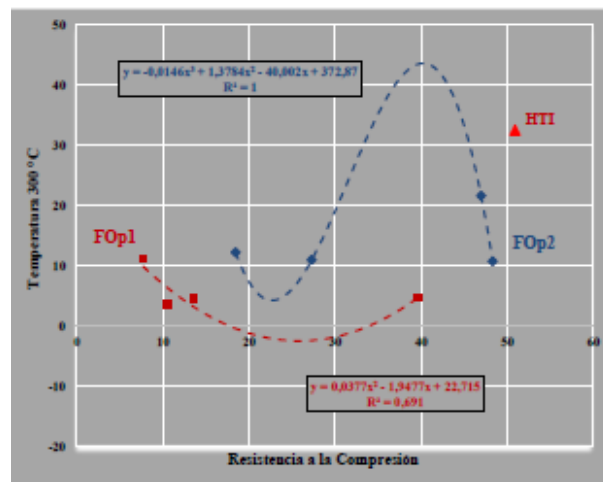


Separando los valores según las variables utilizadas en las muestras, se pueden establecer también correlaciones que se indican a continuación:

III.2.3.1. Correlación según la variable FOP

En la figura III.14, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de FOP. Los valores R^2 dieron valores próximos entre ellos y al valor 1. La correspondencia o relación recíproca entre estas dos propiedades es estadísticamente significativa para ambas FOP empleadas.

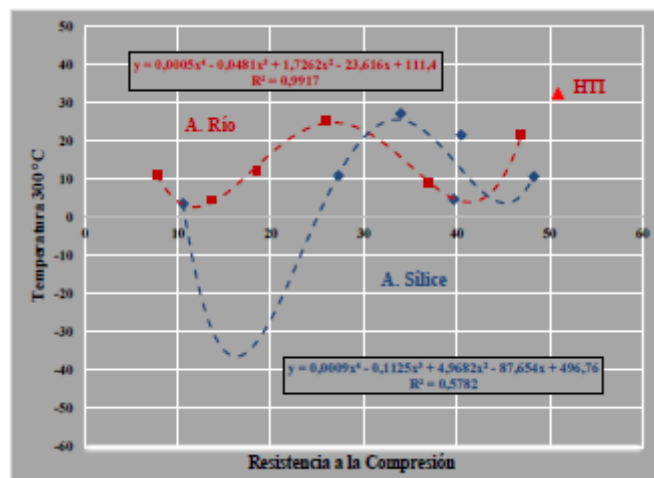
Figura III.14 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y temperatura 300 °C, con la variable FOP



III.2.3.2. Correlación según la variable árido fino

En la figura III.15, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de árido fino. Los valores R^2 dieron valores muy diferentes y solo un valor, el correspondiente al empleo de arena de río, se aproxima al valor 1. Con arena de sílice tiene valor 0,58, por lo que es poco significativo.

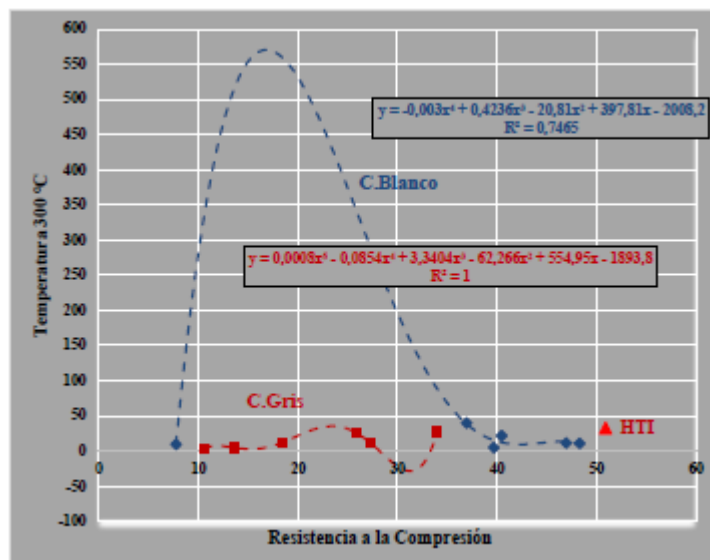
Figura III.15 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y temperatura 300 °C, con la variable árido fino



III.2.3.3. Correlación según la variable cemento

En la figura III.16, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de cemento. Los valores R^2 , de acuerdo al tipo de cemento, dieron valores muy diferentes y muy separados entre ellos, y solo un valor se aproxima al valor 1. La correspondencia o relación recíproca entre estas dos propiedades es más ajustada con el empleo del cemento gris que con el cemento blanco. Con el empleo de cemento gris, su valor se aproxima bastante al valor 1, por lo cual se dice que es una relación ajustada, o sea, estadísticamente significativa.

Figura III.16 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y temperatura 300 °C, con la variable cemento



III.2.3.4. Consideraciones finales sobre las correlaciones resistencia a compresión y temperatura de 300 °C

Se observa que la correlación entre las propiedades resistencia a compresión y temperatura 300 °C la mayor reciprocidad es con el empleo de la FOp2, arena de río y cemento blanco. Además, la correlación con mayor relación recíproca entre las propiedades resistencia a compresión y resistencia a alta temperatura con todos los valores es con temperatura 100 °C.

III.3. Resistencia a compresión – absorción capilar

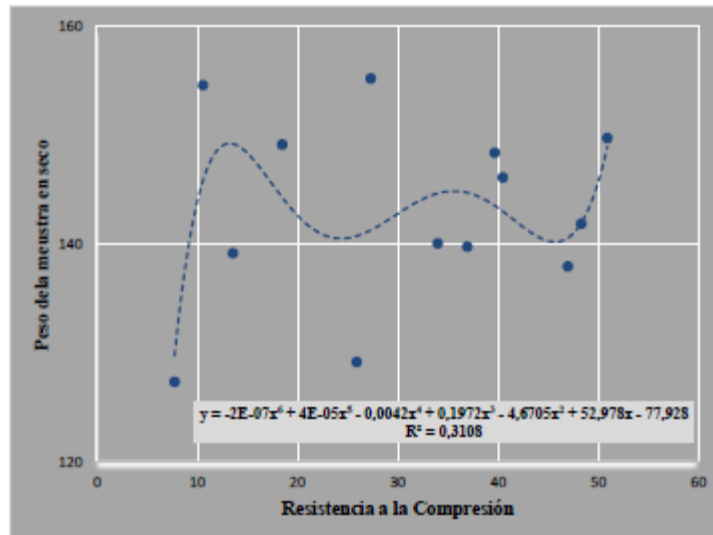
En los ensayos experimentales se cuenta con tres constantes del tiempo estudiadas relacionadas al peso de la muestra en la absorción capilar. A continuación se establece la correspondencia de cada una de ellas con la resistencia a compresión:

III.3.1. Resistencia a compresión – peso de la muestra en estado seco

En la figura III.17, el modelo planteado explica la relación entre la resistencia a compresión y el peso de la muestra antes de iniciar el ensayo, o sea, en estado seco (0 min), y con todos los resultados muestra que mediante una línea de tendencia polinómica de sexto grado se tiene como resultado $R^2 = 0,31$.

Las pruebas de relevancia global afirman que el modelo está planteado con una relación estadísticamente muy poco significativa; esta relación no es buena, o sea, no se ajusta a los valores experimentales.

Figura III.17 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar, en estado seco, con todos los valores

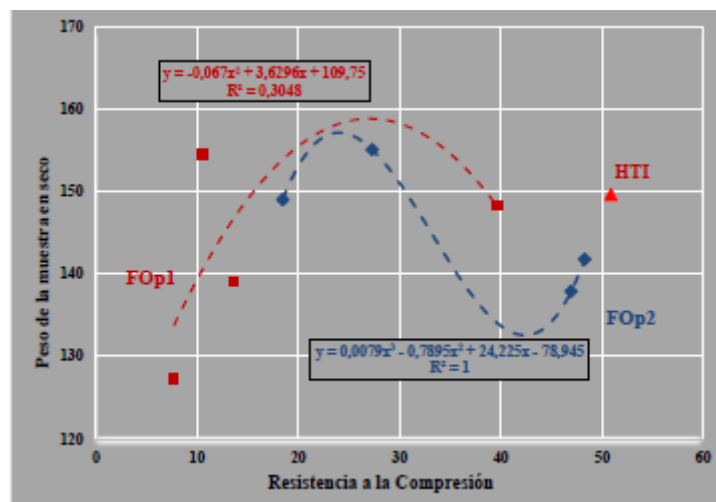


Separando los valores según las variables utilizadas en las muestras, se pueden establecer también correlaciones que se indican a continuación:

III.3.1.1. Correlación según la variable FOp

En la figura III.18, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de FOp. Los valores R^2 dieron valores muy diferentes y separados entre ellos, y solo con FOp2 se aproxima al valor 1, por lo cual se dice que es una excelente relación, estadísticamente significativa.

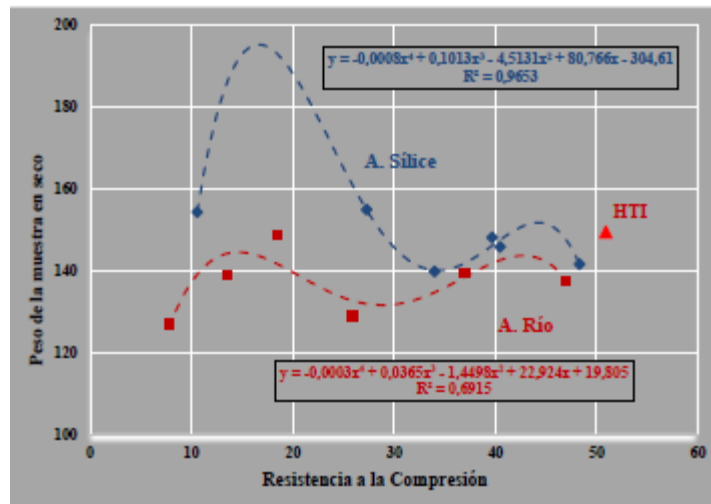
Figura III.18 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar, en estado seco, según la variable FOp



III.3.1.2. Correlación según la variable árido fino

En la figura III.19, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de árido fino. Los valores R^2 dieron muy diferentes y solo empleando arena de sílice se acerca al valor 1. Su valor se aproxima bastante al valor 1, por lo cual, se dice que es una excelente relación, o sea, estadísticamente significativa.

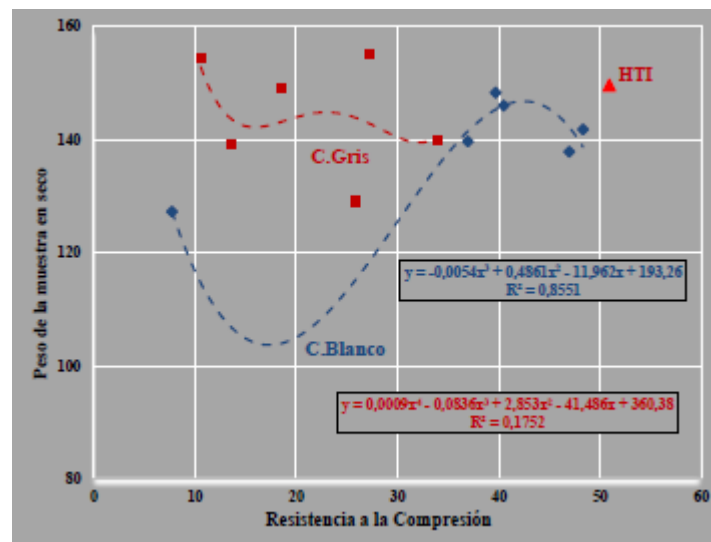
Figura III.19 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar, en estado seco, según la variable árido fino



III.3.1.3. Correlación según la variable cemento

En la figura III.20, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de cemento. Los valores R^2 presentes dieron valores muy separados; el cemento gris tiene el valor más próximo al valor 0,86. Por ello, la correspondencia o relación recíproca entre las propiedades es cercana a muy buena con el empleo del cemento gris, y con cemento blanco es pésima.

Figura III.20 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar, en estado seco, según la variable cemento



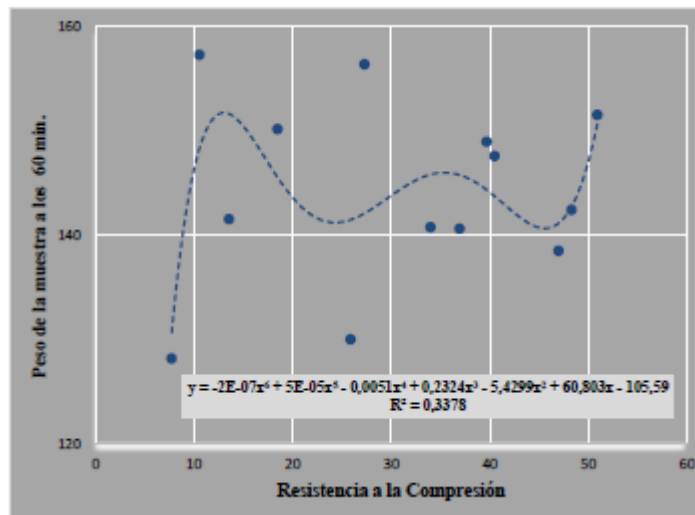
III.3.1.4. Consideraciones finales sobre las correlaciones entre resistencia a compresión – peso de la muestra en estado seco

Se observa que en la correlación entre las propiedades resistencia a compresión y absorción capilar, con mayor reciprocidad en estado seco, es con el empleo de la FOp2, arena de sílice y cemento blanco.

III.3.2. Resistencia a compresión – absorción capilar a los 60 minutos

En la figura III.21, el modelo planteado explica la relación entre la resistencia a compresión y la absorción capilar a los 60 min, y con todos los resultados muestra que mediante una línea de tendencia polinómica de sexto grado se tiene como resultado $R^2 = 0,34$. Las pruebas de relevancia global afirman que el modelo está planteado con una relación estadísticamente muy poco significativa (igual que el anterior). Esta relación no es buena, o sea, no se ajusta a los resultados experimentales.

Figura III.21 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar, a los 60 min, con todos los datos

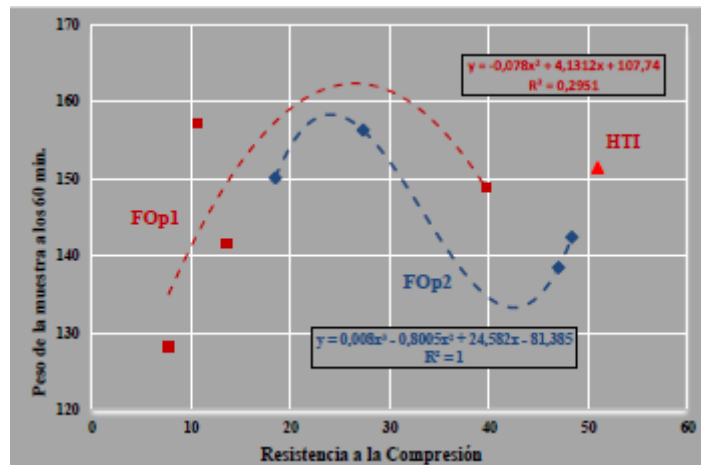


Separando los valores según las variables utilizadas en las muestras, se pueden establecer también correlaciones que se indican a continuación:

III.3.2.1. Correlación según la variable FOp

En la figura III.22, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de FOp. Los valores R^2 dieron valores muy diferentes, separados entre ellos, con solo un valor que se aproxima al 1. La correspondencia o relación recíproca entre estas dos propiedades es estadísticamente significativa con el empleo de la FOp2, tiende al valor 1. Esta relación es excelente, por lo cual se dice que es una relación muy ajustada a los resultados experimentales obtenidos. La FOp1 con el valor 0,20 tiene una correlación muy pobre.

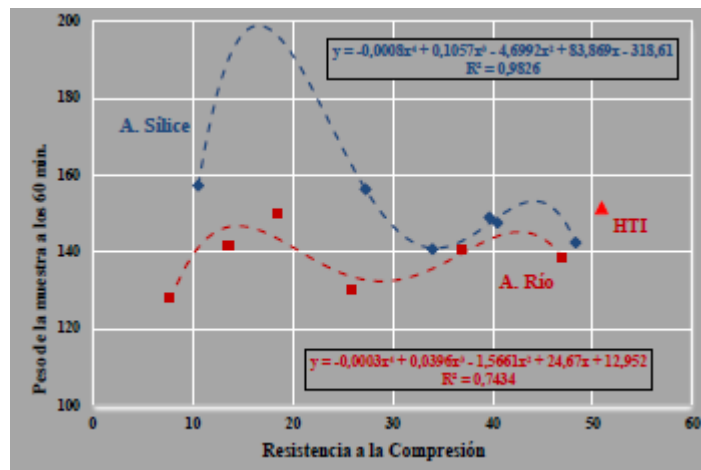
Figura III.22 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar, a los 60 min, según la variable FOp



III.3.2.2. Correlación según la variable árido fino

En la figura III.23, se presenta la correlación agrupando los datos según el tipo de árido fino. Los valores R^2 dieron diferentes y solo con arena de sílice es próxima a 1. Por ello, se puede indicar que con arena de sílice se tiene una excelente relación, estadísticamente significativa, mientras que con la otra arena es una buena correlación, con un valor de R^2 es próximo a 0,75.

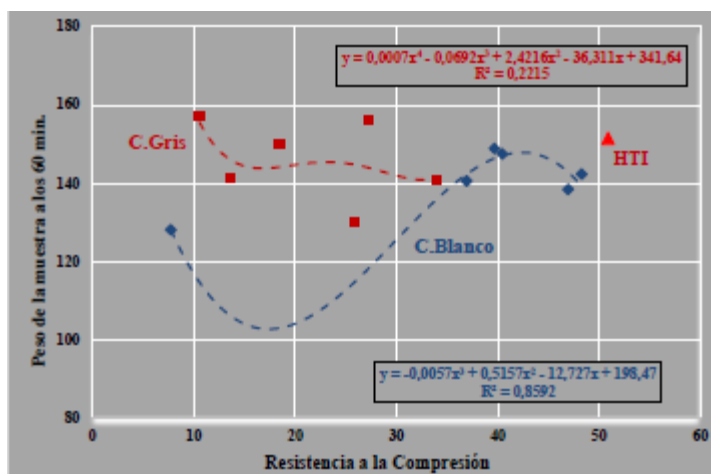
Figura III.23 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar, a los 60 min, según la variable árido fino



III.3.2.3. Correlación según la variable cemento

En la figura III.24, se presenta la correlación agrupando los datos según el tipo de cemento. Los valores R^2 presentes dieron valores muy separados; el cemento gris tiene el valor más próximo al valor 0,86. Por ello, la correspondencia o relación recíproca entre las propiedades es muy buena con el empleo del cemento gris. Se tiene mejor correspondencia con el uso de cemento gris que con cemento blanco donde la correlación es muy pobre, con $R^2 = 0,22$.

Figura III.24 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar, a los 60 min, según la variable cemento



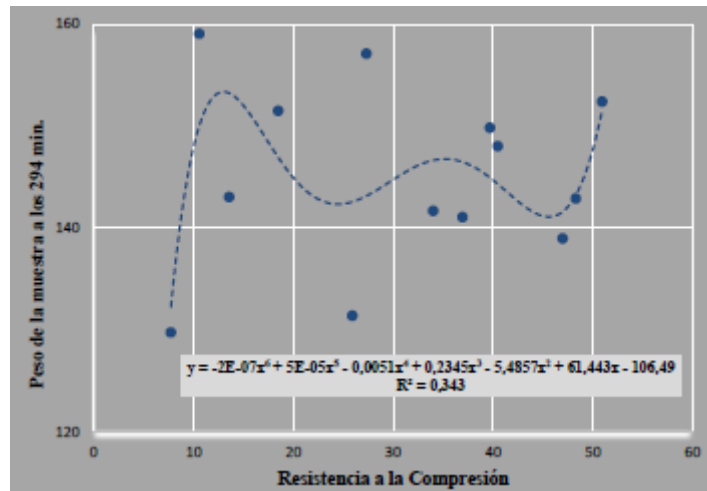
III.3.2.4. Consideraciones finales sobre las correlaciones entre resistencia a compresión - absorción capilar a los 60 minutos

Se observa que la correlación entre las propiedades resistencia a compresión y absorción capilar con mayor reciprocidad a los 60 minutos es con el empleo de la FOp2, arena de sílice y cemento blanco.

III.3.3. Resistencia a compresión – absorción capilar a los 294 minutos

En la figura III.25, el modelo planteado explica la relación entre la resistencia a compresión y la absorción capilar a los 294 min. Es una relación estadísticamente muy poco significativa (como en el caso anterior). Se obtuvo un coeficiente de determinación de 34,30 %, que no se ajusta a los resultados experimentales.

Figura III.25 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar, a los 294 min, con todos los datos

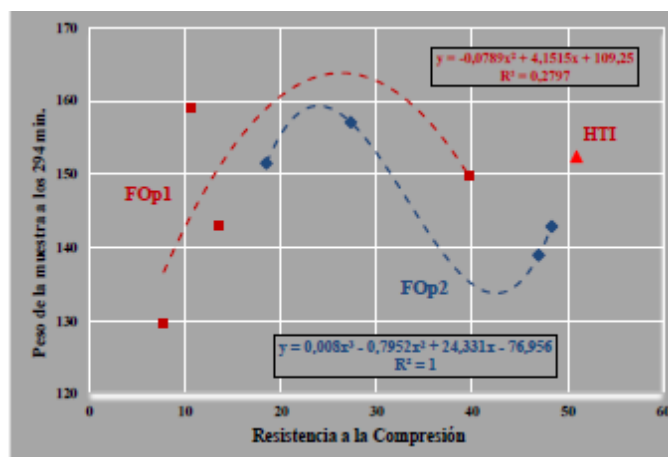


Separando los valores según las variables utilizadas en las muestras, se pueden establecer también correlaciones que se indican a continuación:

III.3.3.1. Correlación según la variable FOp

En la figura III.26, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de FOp. Los valores R^2 dieron valores muy diferentes y separados entre ellos; solo un valor se aproxima al valor 1. La correspondencia o relación recíproca entre estas dos propiedades es estadísticamente significativa con el empleo de la FOp2, tiende al valor 1. Por ello se dice que es una relación muy ajustada a los resultados experimentales; en cambio, la FOp1 es muy pobre, con una correspondencia en la que $R^2 = 0,28$.

Figura III.26 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar, a los 294 min, según la variable FOp

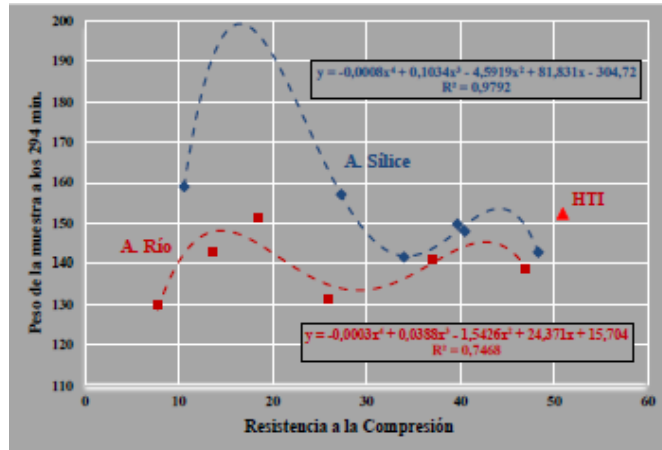


III.3.3.2. Correlación según la variable árido fino

En la figura III.27, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de árido fino.

Los valores R^2 dieron valores diferentes y solo con empleo de arena de sílice es próxima al valor 1, por lo cual, se dice que es una excelente relación, estadísticamente significativa. Con arena de río, R^2 se aproxima a 0,75.

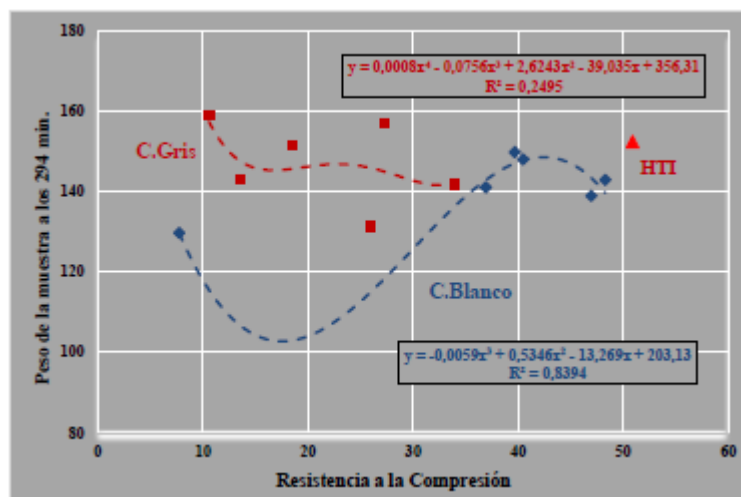
Figura III.27 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar, a los 294 min, según la variable árido fino



III.3.3.3. Correlación según la variable cemento

En la figura III.28, se define la correlación agrupando los datos según el tipo de cemento. Los valores R^2 presentes dieron valores muy separados; el cemento blanco tiene el valor más próximo a 0,85. Por ello, la correspondencia o relación recíproca entre las propiedades es muy buena con el empleo del cemento blanco, y es muy pobre con cemento gris.

Figura III.28 - Gráfico de correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar, a los 294 min, según la variable cemento



III.3.3.4. Consideraciones finales sobre la correlación entre resistencia a compresión y absorción capilar a los 294 minutos

Separando los valores según las variables utilizadas en las muestras, la correlación entre estas propiedades con mayor reciprocidad es con el empleo de la FOp2, arena de sílice y cemento blanco. La correlación entre las propiedades resistencia a compresión y absorción capilar, con todos los valores, en los tres tiempos no es muy buena, obtiene valores alejados al valor 1.