



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil

Autores:

Jonnathan Fabricio Ortiz Navos
CI: 0302948625
jonnathanortiz24@gmail.com

Efraín Mateo Vélez Hernández
CI: 0105502223
mateovelez96@gmail.com

Director:

Lcdo. Christian Américo Cruzat Contreras, PhD.
CI: 0107985681

Codirector:

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco, PhD.
CI: 0301500476

Implementación de nanomateriales como Material Cementicio
Suplementario (SCM) en el desarrollo de Hormigones de Ultra
Alta Resistencia (UHPC)

Trabajo de titulación previo a
la obtención del título de
Ingeniero Civil

Cuenca, Ecuador
30 de marzo de 2021



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Implementación de nanomateriales como Material Cementicio Suplementario (SCM) en el desarrollo de Hormigones de Ultra Alta Resistencia (UHPC)

**Trabajo de titulación previo a
la obtención del título de
Ingeniero Civil**

Autores:

Jonnathan Fabricio Ortiz Navos
CI: 0302948625
jonnathanortiz24@gmail.com

Efraín Mateo Vélez Hernández
CI: 0105502223
mateovelez96@gmail.com

Director:

Lcd. Christian Américo Cruzat Contreras, PhD.
CI: 0107985681

Codirector:

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco, PhD.
CI: 0301500476

**Cuenca, Ecuador
30 de marzo de 2021**



RESUMEN

El presente Trabajo de Titulación engloba los resultados obtenidos tras la incorporación de Nanosílice (NS) al 1%, 2% y 3%, así como de Nanotubos de Carbono (CNT) al 0.05%, 0.25% y 0.45% a una Muestra Maestra (MM) enmarcada como Hormigón de Ultra Alta Resistencia (UHPC). Se implementaron materiales producidos nacionalmente a excepción del NS y CNT, los cuales fueron importados. Se elaboraron 389 muestras cúbicas de 50 mm de arista y 71 cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura. Los tiempos de mezcla variaron entre los 16 y 20 minutos. Se probaron dos regímenes de curado, 18 °C y 60 °C (por las primeras 48 horas) y se establecieron curvas de maduración generalmente entre 3 y 56 días, dependiendo del método de curado. Por último, se estudió la resistencia a compresión simple, tracción por compresión indirecta, módulo de elasticidad y velocidad de pulso. Se refleja una disminución en la trabajabilidad y aumento en la densidad mientras mayor es el porcentaje de incorporación del nanomaterial. Los mejores resultados (en ambos regímenes de curado) se obtuvieron con la adición de NS al 2% y CNT al 0.25%; se presenta una mejoría respecto a la MM de entre el 8% y 12% en la compresión simple y tracción, y una leve mejora en su módulo elasticidad. Los CNT-0.25% se enmarcaron como la mejor adición según costo/beneficio, sin embargo, incrementan en un 31% en la huella de carbono y un 14% en la demanda energética de acuerdo con el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) estudiado. El potencial de la inclusión de CNT mediante un correcto método de dispersión podría mejorar aún más las propiedades, reflejado un refuerzo a nanoescala, dispersándose uniformemente en la matriz, creando más puentes para una rápida formación de productos de hidratación con la combinación del efecto de nucleación. Se promueve profundizar en estudios para lograr un equilibrio en las emisiones provocadas mediante una producción de CNT industrializada y promover su uso en el mercado.

PALABRAS CLAVE:

Hormigón de Ultra Alto Desempeño. Desarrollo UHPC. Nanomateriales. Nanosílice NS. Nanotubos de Carbono CNT. Propiedades mecánicas. Curado Térmico. LCA.

ABSTRACT

The present work includes the results obtained after the incorporation of Nanosilica (NS) at 1%, 2% and 3%, as well as Carbon Nanotubes (CNT) at 0.05%, 0.25% and 0.45% to a Master Sample (MM) referred as Ultra-High Performance Concrete (UHPC). Nationally produced materials were implemented except for the NS and CNT, which were imported. 389 cubic samples of 50 mm edge and 71 cylinders of 10 x 20 were made. Mixing times varied between 16 and 20 minutes. Two curing regimes were tested, 18 ° C and 60 ° C (for the first 48 hours) and growth curves were established generally between 3 and 56 days, depending on the curing method. Lastly, resistance to simple compression, splitting tensile strength, modulus of elasticity and pulse velocity were studied. A decrease in workability and an increase in density is reflected as the higher the percentage of incorporation of the nanomaterial. The best results (in both curing regimes) were obtained with the addition of 2% NS and 0.25% CNT; There is an improvement with respect to MM of between 8% and 12% in compression and traction testing, and a slight improvement in its elasticity modulus. The CNT-0.25% were established as the best addition according to cost/benefit, however, they increase by 31% in the carbon footprint and 14% in the energy demand according to the Life Cycle Analysis (LCA) studied. The potential of the inclusion of CNT through a correct dispersion method could further improve the properties, induce a nanoscale reinforcement, dispersing uniformly in the matrix, creating more bridges for a rapid formation of hydration products with the combination of the nucleation effect. Further studies are encouraged to achieve a balance in the emissions caused by industrialized CNT production and promote its use in the market.

KEYWORDS:

Ultra-High Performance Concrete. UHPC Development. Nanomaterials. NS Nanosilica. CNT Carbon Nanotubes. Mechanical properties. Thermal Curing. LCA.



CONTENIDO

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
CONTENIDO	III
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	XII
CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL	XIV
AGRADECIMIENTOS	XVI
DEDICATORIA	XVII
LISTA DE ABREVIACIONES	XXI
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	2
1.1. ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA	2
1.2. JUSTIFICACIÓN, POTENCIALES SOLUCIONES E HIPÓTESIS	5
1.3. OBJETIVOS	6
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	6
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.4. ALCANCE Y LIMITACIONES	6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL Y NORMATIVO	7
2.1. HORMIGONES DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES (UHPC)	7
2.1.1. DEFINICIONES	7
2.1.2. APLICACIONES	8
2.1.3. NORMATIVAS Y GUÍAS.....	9
2.2. COMPONENTES DEL UHPC	10
2.2.1. CEMENTO HIDRÁULICO.....	10
2.2.2. ARENA	11
2.2.3. REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO (HRWR).....	11
2.2.4. FIBRAS DE ACERO.....	12
2.2.5. MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS (SCM).....	12
2.3. NANOTECNOLOGÍA	14

- 2.3.1. NANOMATERIALES 14
- 2.4. REGÍMENES DE CURADO 15**
- 2.5. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS 15**
 - 2.5.1. COMPRESIÓN SIMPLE 15
 - 2.5.2. TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL 16
 - 2.5.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD 16
 - 2.5.4. VELOCIDAD DE PULSO 16
 - 2.5.5. ENSAYO DE FLUIDEZ 16
- 2.6. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (LCA) 16**
 - 2.6.1. HUELLA DE CARBONO 16
 - 2.6.2. CONSUMO DE ENERGÍA 17
- CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS 18**
- 3.1. MATERIALES 18**
 - 3.1.1. CEMENTO HIDRÁULICO 18
 - 3.1.2. ARENA DE SÍLICE FINA 18
 - 3.1.3. HUMO DE SÍLICE 18
 - 3.1.4. REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO 18
 - 3.1.5. AGUA 18
 - 3.1.6. NANOMATERIALES: NANOSÍLICE (NS) Y NANOTUBOS DE CARBONO (CNT) 21
- 3.2. PLANIFICACIÓN 21**
- 3.3. EQUIPOS 23**
 - 3.3.1. FABRICACIÓN Y MOLDEO DE ESPECÍMENES 23
 - 3.3.2. CURADO DE ESPECÍMENES 23
 - 3.3.3. ENSAYOS SOBRE MUESTRAS ENDURECIDAS 24
- 3.4. DOSIFICACIONES 25**
- 3.5. PROCESO 25**
 - 3.5.1. ETAPA 1: PREMEZCLADO 27
 - 3.5.2. ETAPA 2: ADICIÓN DE LÍQUIDOS Y NANOMATERIALES 27
 - 3.5.3. ETAPA 3: MEZCLADO ENERGÉTICO Y MOLDEO 30
 - 3.5.4. ENDURECIMIENTO DE ESPECÍMENES 30
 - 3.5.5. CURADO DE ESPECÍMENES 32



3.5.6. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS 32

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... 34

4.1. VARIACIONES EN HRWR Y AGUA, Y SUS EFECTOS EN LA RESISTENCIA 34

4.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE SOBRE ESPECÍMENES CÚBICOS..... 34

4.2.1. MUESTRA MAESTRA 34

4.2.2. NANOSÍLICE 36

4.2.3. EFECTO DEL CONTENIDO DE NS 36

4.2.4. NANOTUBOS DE CARBONO..... 36

4.2.5. EFECTO DEL CONTENIDO DE CNT 39

4.2.6. EFECTO DEL RÉGIMEN DE CURADO 39

4.3. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS Y FACTOR DE FORMA 42

4.3.1. FACTOR DE FORMA 43

4.4. RESISTENCIA A TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL 43

4.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD 43

4.6. VELOCIDAD DE PULSO 44

4.7. DENSIDAD Y FLUIDEZ 44

4.8. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD Y COSTOS..... 46

4.8.1. EJEMPLO EXPLICATIVO: LCA A NIVEL DE UNIDAD DE MATERIAL PRODUCIDO 46

4.8.2. EJEMPLO EXPLICATIVO: LCA A NIVEL DE PROYECTO..... 46

4.8.3. EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA EN LA FASE DE PRODUCCIÓN PARA LAS DOSIFICACIONES MM, NS-2% Y CNT-0.25%. 48

4.8.4. COSTOS 50

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 52

5.1. CONCLUSIONES 52

5.2. RECOMENDACIONES 53

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 54

ANEXOS..... 60

ANEXO 1. TABLA DE RESULTADOS EN ESPECÍMENES DE 50 MM DE ARISTA CURADOS A TEMPERATURA AMBIENTE (18°C). 60

ANEXO 2. TABLA DE RESULTADOS EN ESPECÍMENES DE 50 MM DE ARISTA CURADOS A TEMPERATURA CONTROLADA (60°C). 66

ANEXO 3. TABLA DE RESULTADOS PROMEDIO EN ESPECÍMENES PRELIMINARES DE 50 MM DE ARISTA CURADOS A TEMPERATURA AMBIENTE (18°C). 70

ANEXO 4. TABLA DE RESULTADOS EN ESPECÍMENES CILÍNDRICOS CURADOS A TEMPERATURA AMBIENTE (18°C). 72

ANEXO 5. TABLA DE RESULTADOS EN ESPECÍMENES CILÍNDRICOS CURADOS A TEMPERATURA CONTROLADA (60°C). 74

ANEXO 6.	CURVAS DE MADURACIÓN GENERAL PARA ESPECÍMENES DE 50 MM DE ARISTA BAJO CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE (18°C).....	76
ANEXO 7.	CURVAS DE MADURACIÓN GENERAL PARA ESPECÍMENES DE 50 MM DE ARISTA BAJO CURADO A TEMPERATURA CONTROLADA (60°C).....	78
ANEXO 8.	TABLAS INFORMATIVAS REFERENTES AL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (LCA): EJEMPLO DE PUENTES.	80
ANEXO 9.	TABLAS DE CONSUMO ENERGÉTICO Y HUELLA DE CARBONO EN LA ETAPA DE PRODUCCIÓN DE UHPC SEGÚN DOSIFICACIÓN POR METRO CÚBICO PRODUCIDO.	83
ANEXO 10.	RESUMEN DE CONSUMO ENERGÉTICO Y HUELLA DE CARBONO EN LA ETAPA DE PRODUCCIÓN DE UHPC SEGÚN DOSIFICACIÓN POR METRO CÚBICO PRODUCIDO.	84
ANEXO 11.	DIAGRAMA SIMPLIFICADO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CNT MEDIANTE ELECTRÓLISIS EN UNA PLANTA DE CEMENTO C2CNT.....	85
ANEXO 12.	DIAGRAMA DEL PROCESO ECOLÓGICO DE FABRICACIÓN DE CNT Y CEMENTO, MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE CÁMARAS C2CNT.....	86
ANEXO 13.	PRECIOS REFERENCIALES DE COMPONENTES TÍPICOS EN UHPC SEGÚN EL MERCADO EUROPEO EN EL AÑO 2009.....	87
ANEXO 14.	PRECIOS REFERENCIALES DE COMPONENTES DE UHPC ENSAYADOS SEGÚN EL MERCADO ECUATORIANO.	87
ANEXO 15.	PRECIOS REFERENCIALES DE LAS DOSIFICACIONES AJUSTADO CON FIBRAS DE ACERO.	88



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. EDIFICACIONES Y ESTRUCTURAS CONSTRUIDAS CON HPC Y UHPC, FUENTE: ADAPTADO DE ABBAS ET AL. (2016); AZMEE & SHAFIQ (2018).	3
TABLA 2. GRANULOMETRÍA ARENA COLMA FINA.	18
TABLA 3. PROPIEDADES DE ARENA COLMA FINA.	18
TABLA 4. PROPIEDADES DEL CEMENTO GUAPÁN COMPUESTO PUZOLÁNICO TIPO IP, FUENTE: ADAPTADO DE FICHA TÉCNICA CEMENTO GUAPÁN PUZOLÁNICO IP.	19
TABLA 5. PROPIEDADES DEL CEMENTO HIDRÁULICO GUAPÁN HE, FUENTE: ADAPTADO DE FICHA TÉCNICA CEMENTO GUAPÁN HE.	19
TABLA 6. PROPIEDADES DE NANOSÍLICE, FUENTE: NANJING XFNANO MATERIALS TECH Co. (2018)	21
TABLA 7. PROPIEDADES DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE, FUENTE: NANJING XFNANO MATERIALS TECH Co. (2017)	21
TABLA 8. DOSIFICACIONES PARA CADA VARIACIÓN DE NANOMATERIAL.	25
TABLA 9. DOSIFICACIÓN DE MUESTRA MAESTRA (MM).	25
TABLA 10. DOSIFICACIONES DE DIFERENTES EMPRESAS Y AUTORES, FUENTE: ADAPTADO DE AZMEE & SHAFIQ, (2018); RUSSELL & GRAYBEAL (2013)	26
TABLA 11. DOSIFICACIONES BASE SEGÚN VARIACIONES A ACI 1996: RELACIONES PESO/PESO RESPECTO AL CEMENTO.	26
TABLA 12. DOSIFICACIONES BASE SEGÚN VARIACIONES A ACI 1996: RELACIONES PESO/PESO RESPECTO AL CEMENTANTE (CEMENTO Y HUMO DE SÍLICE).	26
TABLA 13. DOSIFICACIONES BASE SEGÚN VARIACIONES A ACI 1996: RELACIONES PESO/PESO RESPECTO AL CEMENTO [REPETICIÓN].	34
TABLA 14. CLASIFICACIÓN DEL HORMIGÓN SEGÚN VELOCIDAD DE PULSO PROPUESTA POR LESSLI Y CHESSMAN, FUENTE: ADAPTADO DE SOLÍS CARCAÑO ET AL. (2004).	44
TABLA 15. RESUMEN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y HUELLA DE CARBONO DE DOSIFICACIONES PARA LA ELABORACIÓN DE UN METRO CÚBICO DE UHPC.	48
TABLA 16. PRODUCCIÓN DE MATERIA PRIMA DE UHPC POR TONELADA.	49
TABLA 17. CONSUMO ENERGÉTICO Y HUELLA DE CARBONO EN LA PRODUCCIÓN DE MATERIA PRIMA SEGÚN DOSIFICACIÓN PARA UN METRO CUBICO DE UHPC.	49
TABLA 18. CONSUMO ENERGÉTICO Y HUELLA DE CARBONO EN EL TRANSPORTE DE MATERIA PRIMA SEGÚN DOSIFICACIÓN PARA UN METRO CÚBICO DE UHPC.	49
TABLA 19. CONSUMO ENERGÉTICO Y HUELLA DE CARBONO EN LA PRODUCCIÓN EN PLANTA DE UHPC POR METRO CÚBICO, FUENTE: SAMEER ET AL. (2019)	49
TABLA 20. COSTO DE MATERIAS PRIMAS PARA LA ELABORACIÓN DE UN METRO CÚBICO DE UHPC.	50

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. TWO UNION SQUARE, SEATTLE, USA, FUENTE: LIGHTGALLERIES (2020).	2
FIGURA 2. LAKE POINT TOWER, CHICAGO, FUENTE: LOOPNET (2020)	4
FIGURA 3. SHERBROOKE FOOTBRIDGE, CANADÁ, FUENTE: RdCONCRETE (2020).	4
FIGURA 4. MILLAU VIADUCT TOLL GATE, FRANCIA, FUENTE: STRUCTURAE (2020).	4
FIGURA 5. MUCEM, MARSEILLE, FUENTE: KLM (2020).	4
FIGURA 6. BURJ KHALIFA, DUBAI, FUENTE: GUINNESS WORLD RECORDS (2010).	4
FIGURA 7. PAPATOETOE FOOTBRIDGE, NUEVA ZELANDA, FUENTE: ARCHILOVERS (2014).	4
FIGURA 8. JEAN BOUIN STADIUM, FRANCIA, FUENTE: SADEV (2013).	4
FIGURA 9. FONDATION LOUIS VUITTON, FRANCIA, FUENTE: ZOONTJENTS (2014).	4
FIGURA 10. PUENTE PEATONAL EAFIT, UNIVERSIDAD EAFIT, MEDELLÍN, COLOMBIA, FUENTE: CONINSA (2017).	8
FIGURA 11. EL TAMAÑO DE PARTÍCULA Y LA ESCALA DE SUPERFICIE ESPECÍFICA RELACIONADA CON LOS MATERIALES DEL HORMIGÓN, FUENTE: ADAPTADO DE SANCHEZ & SOBOLEV (2010).	11
FIGURA 12. AGUA POTABLE CONVENCIONAL, FUENTE: DEPOSITPHOTOS (2020).	13
FIGURA 13. REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO, FUENTE: SIKA USA (2020).	13
FIGURA 14. HUMO DE SÍLICE, FUENTE: GRECO (2020).	13
FIGURA 15. CEMENTO HIDRÁULICO, FUENTE: UCEM (2020).	13
FIGURA 16. ARENA DE SÍLICE FINA, FUENTE: COMIPEZ (2020).	13
FIGURA 17. NANOTUBOS DE CARBONO, FUENTE: NANJING XFNANO MATERIALS TECH Co. (2020A).	13
FIGURA 18. NANOSÍLICE, FUENTE: NANJING XFNANO MATERIALS TECH Co. (2020B).	13
FIGURA 19. MATERIALES UTILIZADOS EN LABORATORIO: 12) AGUA POTABLE, 13) HRWR, 14) HUMO DE SÍLICE, 15) CEMENTO, 16) ARENA DE SÍLICE, 17) NANOTUBOS DE CARBONO, 18) NANOSÍLICE.	13
FIGURA 20. DE IZQUIERDA A DERECHA: A) NANOPARTÍCULA, B) NANOFIBRA Y C) NANOPLACA, FUENTE: ISO (2015B).	14
FIGURA 21. ESQUEMATIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE SÍLICE BAJO TEM (MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE TRANSMISIÓN).	14
FIGURA 22. ESQUEMATIZACIÓN DE LOS TIPOS DE NANOTUBOS DE CARBONO: A) PARED SIMPLE (SWNT) Y B) PARED MÚLTIPLE (MWNT), FUENTE: THE ROYAL SOCIETY (2004)	15
FIGURA 23. GRANULOMETRÍA ARENA COLMA FINA.	18
FIGURA 24. CEMENTO HIDRÁULICO GUAPÁN TIPO HE, UNIÓN CEMENTERA NACIONAL UCEM.	20
FIGURA 25. ARENA FINA COLMA, SIKA ECUATORIANA S.A.	20
FIGURA 26. HUMO DE SÍLICE SIKAFUME, SIKA ECUATORIANA S.A.	20
FIGURA 27. REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO VISCOCRETE 4100, SIKA ECUATORIANA S.A.	20
FIGURA 28. NANOSÍLICE, NANJING XFNANO MATERIALS TECH Co.	20



FIGURA 29. NANOTUBOS DE CARBONO, NANJING XFNANO MATERIALS TECH Co.	20
FIGURA 30. A) IMAGEN SEM DE NS, FUENTE: NANJING XFNANO MATERIALS TECH Co. (2018) Y B) IMAGEN SEM DE CNT, FUENTE: NANJING XFNANO MATERIALS TECH Co. (2017).	21
FIGURA 31. DIAGRAMA DE PLANIFICACIÓN.	22
FIGURA 32. BATIDORA HOBART N-50, FUENTE: MANUAL DE USUARIO.	24
FIGURA 33. BALANZA OHAUS EXPLORER, FUENTE: MANUAL DE USUARIO.	24
FIGURA 34. MOLDE ESPÉCIMENES CÚBICOS DE 50 MM, FUENTE: FICHA TÉCNICA.	24
FIGURA 35. MOLDE CILÍNDRICO DE 10 X 20 CM, FUENTE: FICHA TÉCNICA.	24
FIGURA 36. MESA DE FLUJO ELE C-50, FUENTE: ELE SOILTEST.	24
FIGURA 37. BAÑO DE AGUA HUMBOLDT H1390, FUENTE: MANUAL DE USUARIO.	24
FIGURA 38. PRENSA SHIMATZU CONCRETO 2000X, FUENTE: MANUAL DE USUARIO.	24
FIGURA 39. INSTRUMENTO ULTRASÓNICO TICO, FUENTE: MANUAL DE USUARIO.	24
FIGURA 40. LÍNEA DE TIEMPO DEL PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO.	28
FIGURA 41. SIMBOLOGÍA DEL PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO Y CÓDIGO QR DE ENLACE MULTIMEDIA.	28
FIGURA 42. PREMEZCLADO DE CEMENTO, HUMO DE SÍLICE Y ARENA.	29
FIGURA 43. MEZCLA CON EL 80% DE LA FASE LÍQUIDA.	29
FIGURA 44. MEZCLA CON ADICIÓN DE NANOMATERIAL.	29
FIGURA 45. MEZCLA CON EL 100% DE ADICIÓN DE LA FASE LÍQUIDA.	29
FIGURA 46. MEZCLA HÚMEDA.	29
FIGURA 47. FORMACIÓN DE GRUMOS.	29
FIGURA 48. FORMACIÓN DE MASA.	29
FIGURA 49. MASA POCO FLUIDA.	29
FIGURA 50. MASA SEMIFLUIDA.	29
FIGURA 51. MEZCLA FLUIDA.	29
FIGURA 52. ESPÉCIMEN CÚBICO DE 50 MM DE ARISTA BAJO ENSAYO A COMPRESIÓN SIMPLE.	31
FIGURA 53. ESPÉCIMEN CILÍNDRICO BAJO ENSAYO A COMPRESIÓN SIMPLE.	31
FIGURA 54. ESPÉCIMEN CILÍNDRICO BAJO ENSAYO A TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL.	31
FIGURA 55. ESPÉCIMEN CILÍNDRICO BAJO ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD.	31
FIGURA 56. ESPÉCIMEN CÚBICO ENSAYADO BAJO COMPRESIÓN SIMPLE.	31
FIGURA 57. ESPÉCIMEN CILÍNDRICO ENSAYADO BAJO COMPRESIÓN SIMPLE.	31

FIGURA 58. ESPÉCIMEN CILÍNDRICO ENSAYADO BAJO TRACCIÓN INDIRECTA.	31
FIGURA 59. TERMINADO LISO MEDIANTE CORTE DE ESPÉCIMENES CILÍNDRICOS.	31
FIGURA 60. PROCESO DE CURADO BAJO RÉGIMEN CON IRRADIACIÓN DE CALOR A 60 °C.	32
FIGURA 61. ENLACE MULTIMEDIA: ROTURA DE ESPÉCIMEN CILÍNDRICO A COMPRESIÓN SIMPLE.	33
FIGURA 62. ENLACE MULTIMEDIA: ENSAYO A TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL.	33
FIGURA 63. CURVAS DE MADURACIÓN, DOSIFICACIONES ACI 1996.	35
FIGURA 64. CURVAS DE MADURACIÓN MUESTRA MAESTRA BAJO REGÍMENES DE CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE (18°C) Y TEMPERATURA CONTROLADA (60°C).	35
FIGURA 65. IMAGEN SEM – POROS EN MATRIZ POR EXCESO DE NANOSÍLICE, FUENTE: YU ET AL. (2014)	36
FIGURA 66. CURVAS DE MADURACIÓN CON ADICIÓN DE NANOSÍLICE AL 1%, 2% Y 3%.	37
FIGURA 67. CURVAS DE MADURACIÓN CON ADICIÓN DE NANOSÍLICE AL 1%, 2% Y 3% BAJO CURADO A 60°C.	37
FIGURA 68. CURVAS DE MADURACIÓN DE MUESTRA MAESTRA BAJO REGÍMENES DE CURADO.	38
FIGURA 69. CURVAS DE MADURACIÓN EN 1% DE ADICIÓN P/P DE NANOSÍLICE BAJO REGÍMENES DE CURADO.	38
FIGURA 70. CURVAS DE MADURACIÓN EN 2% DE ADICIÓN P/P DE NANOSÍLICE BAJO REGÍMENES DE CURADO.	38
FIGURA 71. CURVAS DE MADURACIÓN EN 3% DE ADICIÓN P/P DE NANOSÍLICE BAJO REGÍMENES DE CURADO.	38
FIGURA 72. IMAGEN SEM - PUENTE DE MICROGRIETAS Y ROTURA DE LOS MWNT EN LA MATRIZ DE UNA MUESTRA FRACTURADA, FUENTE: ABU AL-RUB ET AL. (2012).	39
FIGURA 73. IMAGEN SEM - DISPERSIÓN DEL 1% DE CNT EN LA MATRIZ DE CEMENTO, FUENTE: SANJEEV ET AL. (2012).	39
FIGURA 74. CURVAS DE MADURACIÓN CON ADICIÓN DE NANOTUBOS DE CARBONO AL 0.05%, 0.25% Y 0.45%.	40
FIGURA 75. CURVAS DE MADURACIÓN CON ADICIÓN DE NANOTUBOS DE CARBONO AL 0.05%, 0.25% Y 0.45% BAJO CURADO A 60°C.	40
FIGURA 76. CURVAS DE MADURACIÓN DE MUESTRA MAESTRA BAJO REGÍMENES DE CURADO [REPETICIÓN].	41
FIGURA 77. CURVAS DE MADURACIÓN EN 0.05% DE ADICIÓN P/P DE NANOTUBOS DE CARBONO BAJO REGÍMENES DE CURADO.	41
FIGURA 78. CURVAS DE MADURACIÓN EN 0.25% DE ADICIÓN P/P DE NANOTUBOS DE CARBONO BAJO REGÍMENES DE CURADO.	41
FIGURA 79. CURVAS DE MADURACIÓN EN 0.45% DE ADICIÓN P/P DE NANOTUBOS DE CARBONO BAJO REGÍMENES DE CURADO.	41
FIGURA 80. RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS CON 28 DÍAS DE EDAD BAJO CURADO NATURAL.	42
FIGURA 81. RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN EN CILINDROS CON 28 DÍAS DE EDAD BAJO CURADO A 60°C.	42
FIGURA 82. RESISTENCIA PROMEDIO A TENSIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL EN CILINDROS DE 28 DÍAS DE EDAD.	43
FIGURA 83. RESISTENCIA PROMEDIO A TENSIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL EN CILINDROS DE 28 DÍAS DE EDAD BAJO CURADO A 60°C.	43
FIGURA 84. MÓDULOS DE ELASTICIDAD SEGÚN DOSIFICACIÓN BAJO CURADO NATURAL.	44
FIGURA 85. MÓDULOS DE ELASTICIDAD SEGÚN DOSIFICACIÓN BAJO CURADO A TEMPERATURA CONTROLADA.	44
FIGURA 86. VELOCIDAD DE ONDA PROMEDIO POR MEZCLA BAJO CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE.	45



FIGURA 87. VELOCIDAD DE ONDA PROMEDIO POR MEZCLA BAJO CURADO A TEMPERATURA CONTROLADA.	45
FIGURA 88. DENSIDAD PROMEDIO EN ESTADO ENDURECIDO SEGÚN DOSIFICACIÓN.	45
FIGURA 89. FLUIDEZ PROMEDIO EN ESTADO FRESCO SEGÚN DOSIFICACIÓN.	45
FIGURA 90. HUELLA DE CARBONO DEL UHPC (M3Q Y M2Q) EN COMPARACIÓN CON EL HORMIGÓN CONVENCIONAL (C35/45 Y C50/60) POR M ³ , FUENTE: SAMEER ET AL., (2019).	46
FIGURA 91. PROPORCIÓN DE MATERIALES DE LA HUELLA DE CARBONO PARA LAS ETAPAS DEL CICLO DE VIDA A1-A3, FUENTE: SAMEER ET AL. (2019).	46
FIGURA 92. DIAGRAMA DE PROCESOS DE EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA DESDE LA CUNA A LA TUMBA DEL UHPC Y HORMIGÓN CONVENCIONAL (CC), FUENTE: ADAPTADO DE SAMEER ET AL. (2019).	47
FIGURA 93. HUELLA DE CARBONO CON DISEÑO DE HORMIGÓN CONVENCIONAL (CC-DESIGN) Y HORMIGÓN CONVENCIONAL MEJORADO CON UHPC (UHPC-DESIGN), FUENTE: SAMEER ET AL., (2019).	48
FIGURA 94. PROPORCIÓN DE MATERIALES DE LA HUELLA DE CARBONO PARA LAS ETAPAS DEL CICLO DE VIDA A1-A3, FUENTE: SAMEER ET AL. (2019).	48
FIGURA 95. CONTRIBUCIÓN DE MATERIAS PRIMAS AL COSTO TOTAL DEL UHPC, FUENTE: ADAPTADO DE STENGEL & SCHIEBL (2013).	50

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Jonnathan Fabricio Ortiz Navos, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Implementación de nanomateriales como Material Cementicio Suplementario (SCM) en el desarrollo de Hormigones de Ultra Alta Resistencia (UHPC)”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 30 de marzo de 2021


Jonnathan Fabricio Ortiz Navos
C.I: 030294862-5



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Efraín Mateo Vélez Hernández en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Implementación de nanomateriales como Material Cementicio Suplementario (SCM) en el desarrollo de Hormigones de Ultra Alta Resistencia (UHPC)”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 30 de marzo de 2021

Efraín Mateo Vélez Hernández
C.I: 010550222-3

Cláusula de Propiedad Intelectual

Jonnathan Fabricio Ortiz Navos, autor del trabajo de titulación “Implementación de nanomateriales como Material Cementicio Suplementario (SCM) en el desarrollo de Hormigones de Ultra Alta Resistencia (UHPC)”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 30 de marzo de 2021



Jonnathan Fabricio Ortiz Navos
C.I: 030294862-5



Cláusula de Propiedad Intelectual

Efraín Mateo Vélez Hernández, autor del trabajo de titulación “Implementación de nanomateriales como Material Cementicio Suplementario (SCM) en el desarrollo de Hormigones de Ultra Alta Resistencia (UHPC)”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 30 de marzo de 2021



Efraín Mateo Vélez Hernández
C.I: 010550222-3

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a Dios por esta gran oportunidad brindada para llegar a este punto tan importante en nuestras vidas.

Agradecemos al grandioso esfuerzo que nuestros padres y familiares han realizado para no desistir de este camino junto con nosotros; su apoyo motivacional, económico y siempre incondicional fue nuestra inspiración.

Agradecemos a todos nuestros amigos y compañeros de aula; ellas y ellos han hecho de esta pequeña pero increíble etapa de vida, un viaje lleno de risas, tristezas, experiencias y anécdotas.

Agradecemos a nuestros directores, Lcdo. Christian Cruzat e Ing. Daniel Mogrovejo, que han sido la guía para culminar este proyecto que parecía muy lejano.

Agradecemos a los docentes y a las autoridades de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y Urbanismo por su flexibilidad, compromiso y comprensión en los momentos más difíciles de la carrera y trabajo de titulación.

Agradecemos a todos los laboratoristas, Tec. Sandro Verdurgo y Tec. Andrés Cartagena en la Facultad de Ingeniería, y al Arq. Juan Uyaguari de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, quienes supieron asistirnos en todos los procesos prácticos.

Agradecemos a UCEM S.A., Sika Ecuatoriana S.A. y SV Concrete Lab por facilitarnos el material necesario para el desarrollo del trabajo de titulación; además, a todas las personas que nos guiaron y ayudaron en todos los procesos intermedios.

Por último, queremos agradecer al ACI Universidad de Cuenca Student Chapter, quien nos motivó a conocer esta rama tan importante y amplia a la vez.

Jonnathan y Mateo



DEDICATORIA

Dedico el presente Trabajo de Titulación principalmente a mis padres, quienes, con su amor y apoyo incondicional han hecho posible cumplir una meta más en mi vida. Gracias queridos padres Washington y María por enseñarme a valorar su esfuerzo y trabajo en todos estos años.

A mis hermanos, por siempre apoyarme y alentarme a seguir adelante en cada etapa de mi vida. Gracias queridos hermanos Carlos, Beatriz, Washington y Joselyn por todos los buenos y malos momentos que vivimos juntos, los llevo en el corazón.

A mis sobrinos, quienes con su ternura y cariño han hecho de días difíciles los mejores momentos de mi vida. Gracias mis pequeños Carlos, Ismael y Daniel por ser la alegría de la familia.

A todos mis amigos, porque con sus consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona. Gracias por apoyarme y extender su mano en momentos difíciles.

A Dios, por permitirme llegar a esta etapa de mi vida profesional. Gracias por la vida y salud de cada día.

Jonnathan Ortiz N.

DEDICATORIA

Dedico de corazón a mi padre Efraín y mi madre Esneda; el apoyo paterno y materno es lo que en verdad forjó mi carácter y la fuerza para seguir siempre adelante.

A mis hermanos Ruky, Vane y Pancho que siempre fueron un lugar de descanso y comprensión.

A mis amigos universitarios y colegiales que, sin ellos, la carrera no hubiese sido llevadera.

Y por supuesto a mi querida Cleo, quien fue mi pequeña y peluda niña quien me acompañó durante toda la carrera y a quien recuerdo siempre.

Por último, dedico este trabajo a las siguientes generaciones de ingenieros. Quiero decirles que aún queda mucho por descubrir, investigar y trabajar, y que no busquen lo más fácil y ligero, sino algo que en verdad pueda servir a la sociedad.

Mateo Vélez H.



LISTA DE ABREVIACIONES

ACI: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE

AFGC: ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL

ASTM: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS

C: CEMENTO

C₃A: ALUMINATO TRICÁLCICO

CC: (CONVENTIONAL CONCRETE), HORMIGÓN CONVENCIONAL

CH: HIDRÓXIDO DE CALCIO

CNT: (CARBON NANOTUBES), NANOTUBOS DE CARBONO.

CSH: SILICATO DE CALCIO HIDRATADO

FHWA: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION

GEI: GAS DE EFECTO INVERNADERO

GPA: GIGAPASCALES

HPC: (HIGH PERFORMANCE CONCRETE), HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA.

HRWR: (HIGH RANGE WATER REDUCER), REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO.

ISO: INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION

JSCE: JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS

LCA: (LIFE CYCLE ASSESSMENT), ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

MM: MUESTRA MAESTRA.

MM-IP: MUESTRAS MAESTRA CON CEMENTO COMPUESTO TIPO IP

MPa: MEGAPASCALES

MWNT: (MULTI-WALLED CARBON NANOTUBE) NANOTUBO DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE

NS: (NANOSILICA), NANOSÍLICE, ÓXIDO DE SILICIO.

P/P: RELACIÓN PESO/PESO

PCA: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION

SCC: (SELF-COMPACTING CONCRETE), HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

SCM: (SUPPLEMENTARY CEMENTING MATERIAL), MATERIAL CEMENTICIO SUPLEMENTARIO.

SF: (SILICA FUME), HUMO DE SÍLICE.

SFS: (SILICA FINE SAND), ARENA DE SÍLICE FINA.

SWNT: (SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBE), NANOTUBO DE CARBONO DE PAREL SIMPLE

UHPC: (ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE), HORMIGÓN DE ULTRAS ALTAS PRESTACIONES

UHPFRC: (ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBER REFORCED CONCRETE) HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA DE ULTRA ALTO RENDIMIENTO

W: (WATER), AGUA.

W/B: (WATER/BINDER), RELACIÓN AGUA/CEMENTANTE.

W/C: (WATER/CEMENT), RELACIÓN AGUA/CEMENTO.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La presente investigación sintetiza el proceso para la elaboración de Hormigones de Ultra Alta Resistencia (UHPC) en base a una Muestra Maestra (MM) con dos diferentes regímenes de curado: a temperatura ambiente (Aprox. 18°C) y temperatura controlada (Aprox. 60°C). El objetivo es establecer las bases en la investigación y desarrollo sobre la región y el país respecto a un material novedoso (UHPC) con características físicas extraordinarias que ha sido aplicado en distintas estructuras en todo el mundo desde finales del siglo pasado.

Se incorporan dos tipos muy distintos de nanofillers a la MM, en este caso Nanosílice (NS) como nanomaterial en tres dimensiones y Nanotubos de Carbono (CNT) como nanomaterial en dos dimensiones. Finalmente, se procede a comparar bajo el ensayo a compresión simple (ASTM C109) los especímenes cúbicos de 50 mm de arista con edades de 3, 7, 14, 28 y 56 días respecto a la MM en curado a temperatura ambiente; de manera paralela, se ensayan a la edad de 7 y 28 días los mismos especímenes curados a temperatura controlada.

Con el fin de obtener los resultados deseados, se realizarán los siguientes ensayos a la edad de 28 días de cada muestra bajo curado a temperatura ambiente y temperatura controlada:

- Ensayo a Compresión simple para especímenes cilíndricos de diámetro 100 mm y altura 200 mm según ASTM C39.
- Ensayo a Tracción por Compresión Diametral para especímenes cilíndricos de diámetro 100 mm y altura 200 mm según ASTM C496.

- Ensayo de Módulo de Elasticidad para especímenes cilíndricos de diámetro 100 mm y altura 200 mm según ASTM C469.
- Ensayo de Velocidad de Pulso a través de hormigón para especímenes cilíndricos de diámetro 100 mm y altura 200 mm según ASTM C597.

1.1. ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA

Los estándares continuamente más exigentes han promovido la investigación de nuevos materiales de construcción más competentes y sostenibles para los nuevos requerimientos de proyectos más sofisticados y complejos. El hormigón es uno de los principales productos utilizados en la industria de la construcción (Azme & Shafiq, 2018), la cual se encuentra en constante desarrollo y mejora; consecuencia directa ha sido la implementación de hormigones de alto desempeño (High Performance Concrete - HPC) como una de las principales soluciones en estructuras con cargas exigentes; se reduce la relación agua/cemento del hormigón y se incorpora determinados minerales y agentes químicos para mejorar su trabajabilidad y comportamiento en estado fresco y endurecido (Russell & Graybeal, 2013).

Sin embargo, existe una rama alterna que refiere a Hormigones de Ultra Altas Prestaciones (Resistencias) o su homólogo en inglés Ultra High Performance Concrete (UHPC), el cual se sitúa más allá de lo típicamente conocido y presenta capacidades mucho mayores en todo sentido. Según el ACI Committee 239 (2018), un Hormigón de Ultra Altas Prestaciones (UHPC), debe cumplir con las

siguientes propiedades mecánicas: resistencia a la compresión simple entre 150 MPa y 250 MPa, resistencia a tracción directa entre 6 MPa y 12 MPa, y un módulo de elasticidad entre 40 GPa y 50 GPa.



Figura 1. Two Union Square, Seattle, USA, Fuente: Lightgalleries (2020).



La industria de la construcción avanza a pasos agigantados, desarrollando hormigones más resistentes y aplicándolos en los proyectos más complejos, altos, asimétricos y fuera de la común (Azmeem & Shafiq, 2018). Elaborar edificios y estructuras más complicadas han desencadenado en la creación de materiales cada vez más resistentes que puedan sostener y cumplir con las exigencias de seguridad de un proyecto; en este sentido, el

hormigón ha atravesado por una larga trayectoria de mejoras donde, actualmente se desarrollan hormigones de aproximadamente 200 MPa de resistencia a la compresión con agregados semejantes a los hormigones ordinarios (Alsalman, Dang, & Micah Hale, 2017).

En la Tabla 1 se da a conocer algunas de las grandes y famosas edificaciones construidas gracias

al desarrollo de los hormigones de altas y ultra altas prestaciones.

A principios de la década de 1970, ya se trabajaron morteros/pastas con resistencias a la compresión de 509 MPa y 318 MPa bajo regímenes de curado extremos (Shin et al., 2018). En la década de 1980, Bache (1981) logró desarrollar mortero densificado de partícula pequeña mediante la adición de microsílíce y superplastificante, alcanzando resistencias de 250 MPa a compresión simple. Posteriormente investigadores japoneses fabricaron mezclas con resistencias superiores a 150 MPa a la compresión con una relación Agua/Cemento de 0.15; en el proceso se premezcló el cemento con humo de sílice (microsílíce) y se añadió agregado grueso de la ciudad de Morioka, Japón (Shin et al., 2018).

La aplicación de las micropartículas y nanopartículas han logrado crear “hormigones inteligentes” con mejores propiedades mecánicas y ecoeficientes. Éstas adiciones específicamente modifican sustancialmente las microestructuras y nanoestructuras del hormigón, convirtiéndolas en formas más compactas, homogéneas y densas, con menor cantidad de microporos y defectos estructurales (Cornejo A., 2015).

La aplicación en la industria de la construcción de nanomateriales se encuentra en fase de desarrollo, desde ideas conceptuales hasta productos disponible comercialmente, sin embargo, el conocimiento y conciencia en su existencia, es remarcablemente baja (Alcaraz, 2015).

Según The Royal Society & The Royal Academy of Engineering (2004) en Reino Unido, se define

Tabla 1. Edificaciones y estructuras construidas con HPC y UHPC, Fuente: adaptado de Abbas et al. (2016); Azmeem & Shafiq (2018).

AÑO	LUGAR	OBRA	TIPO DE ESTRUCTURA	RESISTENCIA $f'c$
1970	Chicago, USA	Lake Point Tower	Edificio	55 MPa
1990	Chicago, USA	South Wacker Drive	Edificio	84 MPa
1990	Chicago, USA	Two Prudential Plaza	Edificio	84 MPa
1997	Sherbrooke, Canadá	Sherbrooke footbridge	Puente peatonal	200 MPa
2001	Illinois, USA	Joppa clinker silo	Silo	220 MPa
2003	Seattle, USA	Two Union Square	Edificio	133 MPa
2003	Malasia	Torres Petronas de Kuala Lumpur	Edificio	89 MPa
2004	A75 Motorway, Francia	Millau Viaduct toll gate	Cubierta	165 MPa
2005	Valence, Francia	Puente Vehicular	Puente	>150 MPa
2006	Auckland, New Zealand	Papatoetoe footbridge	Puente peatonal	160 MPa
2010	Dubai	Burj Khalifa	Edificio	80 MPa
2012	Alemania	Sewer pipes	Alcantarillado	151 MPa
2013	Marseille, Francia	MUCEM	Edificación	>150 MPa
2013	Paris, Francia	Jean Bouin Stadium	Estadio	>150 MPa
2014	Francia	Fondation Louis Vuitton	Edificación	>150 MPa



Figura 2. Lake Point Tower, Chicago, Fuente: Loopnet (2020)



Figura 3. Sherbrooke footbridge, Canadá, Fuente: RdConcrete (2020).



Figura 4. Millau Viaduct toll gate, Francia, Fuente: Structurae (2020).



Figura 5. MUSEM, Marseille, Fuente: KLM (2020).



Figura 6. Burj Khalifa, Dubai, Fuente: Guinness World Records (2010).



Figura 7. Papatōetoe footbridge, Nueva Zelanda, Fuente: Archilovers (2014).



Figura 8. Jean Bouin Stadium, Francia, Fuente: SADEV (2013).



Figura 9. Fondation Louis Vuitton, Francia, Fuente: Zootjents (2014).



como nanomateriales a los materiales estructurados al menos con una dimensión menor que 100 nm o que tienen una dimensión en la nanoescala (fina película o recubrimiento superficial). Los materiales a nanoescala en dos dimensiones incluyen nanocables y nanotubos. Los materiales a escala nanométrica en tres dimensiones son nanopartículas. Por otra parte, aproximadamente el 95% de las partículas del cemento son menores que 45 micrómetros, con un promedio de partículas de 15 micrómetros.

Finalmente, en Ecuador no se hallaron indicios del desarrollo y uso de UHPC. Sin embargo, se han realizado investigaciones sobre el desarrollo de HPC con resistencias a la compresión mayores a 100 MPa. Entre las investigaciones más recientes se tiene:

- Diseño de hormigones de alto desempeño: alta resistencia a la compresión, trabajabilidad adecuada y alta resistencia a la erosión - abrasión para obras hidráulicas (Yépez & Calderón, 2014).
- Diseño de una mezcla de hormigón de alta resistencia y su comportamiento en una viga de hormigón armado sometida a cargas de flexión (Bacuilima & Guillén, 2019).
- Diseño y elaboración de hormigones especiales de alto desempeño (Castro & Ojeda, 2019)

Adicionalmente, se han realizado investigaciones sobre la incorporación de nanosílice en los HPC, entre las cuales están:

- Hormigón de alta resistencia con nanosílice (Arellano & Fierro, 2019)
- Análisis experimental de las propiedades físico-mecánicas de un hormigón de alta resistencia elaborado con partículas de nanosílice (Landázuri & Vásconez, 2019).

Los HPC han sido principalmente utilizados en obras hidroeléctricas como el Proyecto Coca Codo Sinclair, el Proyecto Toachi Pilatón, y con menor frecuencia en obras de gas/petróleo (Cabrera, 2018). No obstante, en otros sectores no se ha logrado apreciar ningún avance ni construcción significativa que implemente HPC y UHPC como lo vienen haciendo países de Latinoamérica y varias partes del mundo. Surge entonces la necesidad de potenciar este importante aspecto en el país con investigaciones y pruebas que asienten las bases de nuevas tecnologías y aplicaciones.

1.2. JUSTIFICACIÓN, POTENCIALES SOLUCIONES E HIPÓTESIS

Las nuevas tecnologías apuntan a solventar los problemas de grandes proyectos que poseen grandes volúmenes de hormigón; en consecuencia, se obtienen espesores de elementos reducidos con espacio de uso optimizado y estructuras complejas sometidas a diferentes cargas. Un balance rápido podría justificarse con la reducción de cargas muertas por peso propio hasta del 65%, reducción o eliminación en la armadura de las secciones a cortante, diseños innovadores, entre otros (Azmeé & Shafiq, 2018). La aplicación de HPC y UHPC pueden solventar muchos inconvenientes constructivos, sin poner en riesgo la ductilidad de la estructura frente a cargas sísmicas y reduciendo en muchos casos el acero de refuerzo. Los UHPC tienen ventajas como:

- Disminución de las dimensiones del elemento. No solo implica una menor cantidad de hormigón, sino una superestructura más liviana, mayor amplitud espacial en la fase de operación, y una simplificación de la subestructura (Abbas et al., 2016).

- Módulo de elasticidad considerablemente superior, pero con reducciones sustanciales en su ductilidad debido a su carácter explosivo (sin fibras) frente a cargas últimas. Sin embargo, se logra controlar y superar la ductilidad frente a otros hormigones armados mediante la incorporación de fibras o microfibras de acero (Alsaman, Dang, Prinz, et al., 2017).
- Mayor durabilidad, elementos más resistentes e impermeables que protegen la armadura de acero. Los UHPC poseen una vida útil mayor a 150 años (Dong, 2018).

Las ventajas del UHPC pueden brindar una solución a los altos costos de construcción de proyectos complejos que enfrentan esfuerzos altos o geometrías extrañas, así como una mejor estabilidad estructural en comparación al hormigón ordinario (Shin, Yoo, & Lee, 2018) y en aplicaciones más comunes, disminución de los tiempos de construcción, menor personal y mantenimiento mínimo o nulo (Azmeé & Shafiq, 2018; Dong, 2018). Sin embargo, la información y las recomendaciones que se pueden encontrar en la literatura actual, y sus fundamentos, pueden no estar tan desarrolladas y probadas como las tecnologías más maduras y tradicionales (ACI Committee 239, 2018).

La adición de Materiales Cementicios Suplementarios (SCM) es una puerta a hormigones inteligentes; entre los más novedosos se encuentran los nanomateriales. Las sobresalientes propiedades mecánicas y la interacción química que poseen los nanomateriales, permiten alcanzar propiedades en la pasta que resultan mucho más eficientes al momento de la hidratación y formación de su microestructura (Janković et al., 2019):

- La composición del grano de las partículas cambia, lo que afecta las propiedades reológicas de la matriz en estado fresco.
- Proporcionan un área de superficie adicional para mejorar el proceso de hidratación también llamado efecto de nucleación (Cariño et al., 2018; Lee et al., 2018).
- Aceleran el desarrollo de los productos de hidratación (Janković et al., 2019).
- Actúan como puente de partículas, reducen la distancia entre los productos de hidratación (Jung et al., 2020).
- Con la aplicación de nanopartículas reactivas, se obtiene una cierta proporción de nuevo producto de hidratación.

Hasta la fecha, en el campo de la Ingeniería Civil, se han estudiado incorporaciones de nanomateriales de muchas características, entre ellos: Nanosílice (nano SiO₂), Nanoóxido de titanio (nano TiO₂), Nanoalúmina (nano Al₂O₃) y Nanoóxido de hierro (nano Fe₂O₃). Varias investigaciones han concluido que gracias a la adición de nano SiO₂, se puede controlar la segregación que se produce en las pastas de cemento (Alcaraz, 2015), entre otros beneficios.

HIPÓTESIS

El rendimiento y la mejora de las capacidades bastan para tomar en cuenta la inclusión de nanomateriales a una mezcla de hormigón. El presente Trabajo de Titulación plantea la elaboración de una mezcla lo suficientemente resistente para enmarcarse en el rango de los UHPC, implementando nanomateriales como Materiales Cementicios Suplementarios (SCM) que impulsen o resulten en una mejora en las resistencias del hormigón y su trabajabilidad. Entonces nace la pregunta, ¿La

aplicación de los nanomateriales como lo es el Nanosílice (NS) y Nanotubos de Carbono (CNT) permite(n) obtener resistencias mayores a una mezcla patrón óptima predeterminada para así catalogarse como un UHPC?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Desarrollo de Hormigones de Ultra Alta Resistencia (UHPC) con la implementación de nanomateriales como Material Cementicio Suplementario (SCM).

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterización Físico-Mecánica de los materiales.
- Desarrollo de una dosificación maestra de hormigón.
- Aplicación de Nanopartículas y Nanotubos.
- Diseñar y fabricar hormigones que se engloben como UHPC mediante la adición de nanomateriales en diferentes porcentajes.
- Evaluación de resultados y comparación de la sostenibilidad del hormigón obtenido.

1.4. ALCANCE Y LIMITACIONES

El presente Trabajo de Titulación fue limitado por la latente emergencia Sanitaria de nivel mundial que afectó a todas las actividades académicas. El mayor obstáculo fue la falta de recursos económicos y, por ende, el tiempo necesario para culminar con toda la muestra de especímenes planificados en primera instancia. A pesar de todo esto, el presente documento contiene resultados contundentes que

fueron reorganizados para obtener información confiable en miras a nuevas investigaciones a futuro.

- Se procedió a importar los nanomateriales.
- Se redujo sustancialmente la disponibilidad de laboratorios y tiempos de trabajo.
- Los altos costos de materias primas no permitieron desarrollar la cantidad de especímenes previstos.
- El Análisis del Ciclo de Vida (LCA), se enmarcó en las fases de extracción de materias primas, transporte y producción de UHPC.



CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL Y NORMATIVO

A continuación, se presentan los lineamientos teóricos y normativos referentes al desarrollo de Hormigones de Ultra Altas Prestaciones. Se introducen las definiciones aceptadas por las instituciones competentes alrededor del mundo, sus ventajas y desventajas, los componentes principales y recomendaciones en general.

2.1. HORMIGONES DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES (UHPC)

Un Hormigón de Ultra Altas Prestaciones se puede diferenciar de los materiales convencionales similares de hormigón, por sus excepcionales propiedades mecánicas y durabilidad como resultado de una mayor densificación de la microestructura.

Generalmente este tipo de hormigones presentan resistencias a la compresión superiores a 120 o 150 MPa y usualmente se suele reforzar con fibras de acero ($\geq 2\%$ en volumen) con el objetivo de mejorar la capacidad a la tracción y la ductilidad. Estos compuestos a veces se denominan Hormigón Reforzado con Fibra de Ultra Alto Desempeño o Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC) (Arora et al., 2018). En la presente investigación, tanto la versión no reforzada con fibra como la versión reforzada con fibra se abrevia bajo UHPC.

2.1.1. DEFINICIONES

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI)

El American Concrete Institute define al UHPC como una clase de materiales cementantes avanzados

con mayor resistencia, ductilidad a la tracción y propiedades de durabilidad en comparación con el hormigón convencional, o incluso de alto rendimiento. Destaca por sus elevadas resistencias a compresión simple (del orden de 150 - 250 MPa), resistencia a la tracción directa (del orden 6 - 12 MPa) y módulo elástico (del orden de 40 - 50 GPa); las fibras se incluyen generalmente para lograr los requisitos especificados. Además, tiene una permeabilidad muy baja debido a su estructura densa y discontinuidad de poros (ACI Committee 239, 2018).

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA)

La Federal Highway Administration de los Estados Unidos, define al UHPC como un material cementicio compuesto por una gradación optimizada de componentes granulares, una relación agua/cementante (W/B) inferior a 0,25 y un alto porcentaje de refuerzo de fibra interna discontinua. Las propiedades mecánicas del UHPC incluyen una resistencia a la compresión entre 140 MPa y 200 MPa, una resistencia a la tracción directa posterior a la fisuración entre 6 MPa y 10 MPa y un módulo elástico entre 40 GPa y 70 GPa. Los UHPC tiene una estructura de poros discontinuos que reduce la entrada de fluidos, mejorando significativamente la durabilidad en comparación con el hormigón convencional (Haber et al., 2018).

ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL (AFGC)

Las recomendaciones provisionales francesas definen al UHPC como un hormigón con resistencia a la compresión característica de 150 MPa a 250 MPa

con el uso de fibra de acero de refuerzo para asegurar un comportamiento dúctil a tracción directa de 8 MPa y un módulo elástico de 55 GPa. Los UHPC con resistencias a la compresión de 130 MPa a 150 MPa reforzados con acero u otras fibras, se consideran UHPC de menor resistencia. El UHPC tiende a poseer un contenido de agua muy bajo, además, puede lograr excelentes propiedades reológicas mediante una combinación de empaquetamiento granular optimizado y la adición de HRWR (Association Française de Génie Civil AFGC, 2002).

JAPANESE SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (JSCE)

En las recomendaciones de la JSCE el UHPC se define como un hormigón con resistencia a la compresión mayor a 150 MPa, una resistencia a la tracción directa mayor a 5 MPa y un módulo de elasticidad de 50 GPa. Generalmente se incorpora fibras de acero para garantizar un comportamiento dúctil a tracción directa (Japanese Society of Civil Engineers, 2009).

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA)

La Portland Cement Association define al UHPC como un material cementicio que tiene resistencia a la compresión de 120 MPa a 150 MPa y módulo de elasticidad de 45 GPa a 50 GPa con requisitos especificados de durabilidad, ductilidad a la tracción y tenacidad; las fibras se incluyen generalmente en la mezcla para lograr requisitos específicos (Portland Cement Association, 2019).

2.1.2. APLICACIONES

Durante los últimos 20 años, el UHPC ha ganado rápidamente popularidad en todo el mundo como una tecnología revolucionaria, con el potencial de ser una solución viable para mejorar la sostenibilidad de los edificios y otros componentes de la infraestructura.

Hoy en día, el UHPC puede reemplazar el hormigón convencional en varias aplicaciones estructurales; sus propiedades mecánicas pueden alinearse con las necesidades de cualquier proyecto de ingeniería civil (Azme & Shafiq, 2018; Graybeal, 2019). Por lo general, la mayoría de las aplicaciones actuales de UHPC se han realizado mediante la tecnología de prefabricados y ensamblaje in situ debido a su durabilidad estructural mejorada y su vida útil prolongada (Alsalman, Dang, & Micah Hale, 2017).

El excelente desempeño del UHPC ofrece nuevas oportunidades para una variedad de aplicaciones (Azme & Shafiq, 2018; Haber et al., 2018; Russell & Graybeal, 2013), entre estas se incluyen:

- Edificios.
- Carreteras y puentes de carreteras.
- Estructuras hidráulicas.
- Estructuras marinas.
- Elementos estructurales y no estructurales.
- Puentes peatonales.
- Pilotes.
- Material de revestimiento.
- Trabajos de reparación y rehabilitación.
- Material de relleno en juntas de unión entre elementos prefabricados.
- Mobiliario.
- Acabados y fachadas arquitectónicas.



Figura 10. Puente Peatonal EAFIT, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, Fuente: Coninsa (2017).

Entre todas estas aplicaciones, la construcción de carreteras y puentes son las más comunes. Incluyen vigas de puentes prefabricados, pretensados, paneles reticulares prefabricados y como material de unión entre vigas y paneles de cubierta de hormigón prefabricado (Azme & Shafiq, 2018).

En Latinoamérica se empieza a evidenciar una creciente aplicación de este tipo de materiales. El caso pionero fue el puente peatonal de la Universidad EAFIT (antigua Escuela de Administración, Finanzas e Instituto Tecnológico), en la ciudad de Medellín en 2017; cuenta con 110 metros de longitud, 43 metros de luz principal, y 29 dovelas prefabricadas de 120 MPa de resistencia a la compresión (Argos, 2017).

VENTAJAS

Puede proporcionar un enfoque rentable en el diseño y construcción económica de nuevas estructuras de hormigón; se pueden fabricar

estructuras más ligeras correspondiente a secciones transversales más pequeñas, al mismo tiempo, que se consumen menos recursos naturales. Se mejora la capacidad de resistencia a la carga, la rigidez de estos elementos, y se eleva la ductilidad de las estructuras de enlace (Abbas et al., 2016).

Tienden a presentar comportamientos reológicos similares al hormigón autocompactante (SCC). Así pues, los esfuerzos de fundición se minimizan, y se reduce el tiempo y los costos de mano de obra referente a la colocación. Como contraste, posiblemente se necesite una preparación adicional del molde o encofrado (Alsalman et al., 2020; Alsalman, Dang, & Micah Hale, 2017) para evitar flujos indeseados y/o permitir adición de calor para resultados óptimos.

Proporciona una solución viable a largo plazo para una construcción sostenible mejorada. Sus propiedades de resistencia extremadamente altas, comportamiento mejorado a la fatiga y excelente durabilidad, pueden convertirse en una solución práctica para mejorar la sostenibilidad de los edificios y otros componentes de la infraestructura (Abbas et al., 2016; Azme & Shafiq, 2018).

Otras ventajas del UHPC según Nilsson (2018):

- Disminución de cuantías de refuerzo de acero.
- Menos mantenimiento en comparación con otros materiales.
- Alta resistencia.
- Alta ductilidad (con adición de fibras).
- Baja permeabilidad.
- Baja porosidad.
- Excelente resistencia contra entornos agresivos.



- La ausencia de grandes agregados facilita el llenado de encofrados complejos con refuerzo de acero densos.

DESVENTAJAS

El costo inicial relativamente alto (entre 10 y 20 veces más caro que el hormigón convencional) ha restringido su uso en la industria de la arquitectura, la ingeniería y la construcción. Por lo tanto, debe usarse solo donde estas propiedades superiores sean realmente necesarias (Abbas et al., 2016; Kang et al., 2018). Actualmente es necesario una investigación adicional con el fin de producir un UHPC innovador con un costo inicial reducido, sin sacrificar sus propiedades beneficiosas; simplificar la dosificación de la mezcla de UHPC y comprender mejor su comportamiento (Alsalman et al., 2020).

Al parecer, la falta de códigos de diseño, el conocimiento limitado del material y tecnologías de producción, y los altos costos, limitan la implementación de este material excepcional más allá de los proyectos (Azmeem & Shafiq, 2018) mostrados al inicio del documento. Por otra parte, el tipo de material de relleno eleva la resistencia a la compresión, pero también directamente los costos del UHPC. El uso de materiales locales puede reducir el coste y promover el uso de UHPC en la práctica, pero dependiendo de la localidad, el uso de materiales locales puede reducir la resistencia drásticamente (Alsalman, Dang, & Micah Hale, 2017).

La contracción autógena es un efecto adverso muy importante. Consiste en la reducción macroscópica del volumen de los materiales cementicios debido a la presión capilar inducida por la autodesecación y el proceso químico de hidratación

del cemento (L. Wu et al., 2017; Yang et al., 2019). Esto se debe a la baja proporción de agua/cementante (W/B) y uso de cantidades altas de SCM. Una contracción alta puede resultar en un posible agrietamiento y eventualmente una reducción de la resistencia y durabilidad del UHPC (L. Wu et al., 2017; Yang et al., 2019).

Dado que el desarrollo sostenible es actualmente un problema mundial urgente, varias industrias se han esforzado por lograr ahorros de energía, no obstante, el alto costo de los materiales, el alto consumo de energía y las emisiones de CO₂ del UHPC son las desventajas típicas que restringen su aplicación más amplia (Yu et al., 2015). Hoy en día la aplicación de UHPC se limita principalmente a proyectos emblemáticos; esto responde al alto costo de fabricación que a menudo involucra materiales especializados (arenas especialmente clasificadas, SCM, microfibras, etc.) y la necesidad de regímenes complejos de mezclado y curado (Sobuz et al., 2016).

2.1.3. NORMATIVAS Y GUÍAS

Se hace necesario recurrir a guías o normativas internacionales que detallan recomendaciones y especificaciones técnicas, que faciliten la caracterización de las propiedades mecánicas y de diseño. Actualmente existe solo una normativa internacional aprobada para la aplicación del UHPC, además de una serie de guías que han ayudado eficazmente al desarrollo de nuevas formulaciones, las cuales se adaptan de acuerdo con las condiciones demandadas por el proyecto.

A mediados de 2016, se publicaron dos normativas francesas para UHPC conocidas como NF

P18-470 y NF P18-710. El objetivo fue sustituir las especificaciones técnicas y recomendaciones profesionales generalmente utilizadas en el diseño de UHPC existentes. Estas normas se elaboraron técnicamente sobre la base de las recomendaciones anteriores de la Association Française de Génie Civil (AFGC) y la retroalimentación técnica de más de 15 años de proyectos y experiencia en el desarrollo de UHPC (Azmeem & Shafiq, 2018). Francia es uno de los países con más desarrollo en esta rama.

A continuación, se hace referencia a varias guías de recomendaciones para diseñar y producir UHPC; se presentan algunas de las guías disponibles hasta la fecha a las que los investigadores han recurrido habitualmente.

FRENCH ASSOCIATION OF CIVIL ENGINEERING (2002)

- Association Française de Génie Civil (AFGC) French Interim Recommendations of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC).

GERMAN COMMITTEE OF REINFORCED CONCRETE (2008)

- Progress Report on Ultra-High Performance Concrete

JAPANESE SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (2009)

- Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structure (Draft).

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (2013)

- FHWA-HRT-13-060: Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, (2016)

- NF P18-470: Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete – Specifications, Performance, Production and Conformity.
- NF P18-710: Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRC).

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2018)

- Committee 239: Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report.

Sin embargo, estas guías y recomendaciones profesionales se han encontrado limitadas, ya que la mayoría de los documentos no tienen un estatus oficial. Esto dificulta su referencia legal y uso en proyectos. La disponibilidad de los nuevos estándares permite especificaciones claras y codificadas, originando una mayor aceptación del UHPC a nivel internacional (Azmeem & Shafiq, 2018).

2.2. COMPONENTES DEL UHPC

La producción exitosa de UHPC depende de sus ingredientes y de la proporción de la mezcla. El factor clave en la producción es mejorar las micro y macro propiedades de los ingredientes de la composición, asegurando la homogeneidad mecánica, máxima densidad de empaquetamiento de las partículas y el tamaño mínimo de los defectos (Abbas et al., 2016). Los componentes del UHPC, por lo regular, consisten

en una combinación de cemento portland, arena fina, cuarzo molido, humo de sílice, aditivo reductor de agua de alto rango (HRWR), fibras (generalmente acero) y proporciones de W/C que normalmente oscilan entre 0.12 y 0.25. En ocasiones se utilizan agregados pequeños, así como una variedad de aditivos químicos (Alsalmán, Dang, & Micah Hale, 2017; Azmeem & Shafiq, 2018; Russell & Graybeal, 2013).

Algunos investigadores han indicado que el UHPC no es un hormigón debido a la ausencia de agregado grueso en la mezcla. Sin embargo, se emplea el término "hormigón" en lugar de "mortero" para definir el UHPC que incorpora finas fibras de acero para mejorar la ductilidad (Azmeem & Shafiq, 2018); si bien las fibras son un componente muy importante, su implementación afecta solamente en las características a tracción y ductilidad del hormigón.

El agregado grueso se excluye en muchas dosificaciones de UHPC con el propósito de reducir las microfisuras. Estas se encuentran presentes en el agregado grueso y en la zona de transición interfacial entre la matriz de la pasta y el agregado grueso. Las microfisuras pueden llegar a provocar una disminución en la resistencia y un aumento de la permeabilidad del hormigón. La exclusión del agregado grueso es necesaria para mejorar la resistencia y durabilidad del UHPC (Alsalmán, Dang, & Micah Hale, 2017).

La Figura 11 muestra la escala de la superficie específica y el tamaño de la partícula en diferentes tipos de hormigones. Se evidencia una evolución en la disminución de la gradación en los componentes del hormigón, mejorando el empaquetamiento y

brindando nuevas propiedades. No obstante, es conocido que las nanopartículas y materiales con gran superficie específica reducen la fluidez de la mezcla (Reches, 2018). Mientras mayor es el área específica, existirán más átomos en la superficie de la partícula, lo que impartirá un cambio considerable en las energías y morfologías superficiales (Sobolev, 2016) y una gran actividad química.

2.2.1. CEMENTO HIDRÁULICO

El Cemento Hidráulico es la base esencial para la creación de cualquier tipo de mortero u hormigón. Es un conglomerante por excelencia formado a partir de la mezcla de caliza y arcilla calcinada que luego de hidratarse, tiene la capacidad de endurecerse. Entre los tipos más comunes de cemento hidráulico a nivel mundial se encuentra el Cemento Portland, el cual posee características específicas en su composición según la Norma ASTM C150. Por otra parte, existe otra clasificación normada para Cementos Hidráulicos Compuestos según la Norma ASTM C595 en la cual se incorporan cemento portland, clínker con escoria o puzolana, o en su defecto, escoria con cal. La norma ASTM C1157 especifica los parámetros de rendimiento que debe tener un cemento hidráulico.

En el desarrollo de UHPC, normalmente se emplea una proporción de cemento relativamente alta en comparación con la proporción que se emplea en los hormigones convencionales y en los de alto rendimiento (Abbas et al., 2016). Generalmente se recomienda el uso de cemento portland, con las siguientes propiedades (Russell & Graybeal, 2013; Wille & Boisvert-Cotulio, 2015):

- Bajo contenido de Aluminato Tricálcico (C_3A) menor al 8%.
- Módulo de finura de Blaine moderado de 2600 cm^2/g a 4300 cm^2/g .

El bajo contenido de C_3A y el módulo de finura de Blaine moderado, minimiza la demanda de agua del cemento, lo que permite desarrollar una mejor trabajabilidad a la mezcla. En el caso de cementos con un alto contenido de C_3A y módulo de finura mayor a 4300 cm^2/g , el proceso de hidratación de C_3A es muy rápido, además, aumenta el área superficial de las partículas, lo que conduce a una mayor demanda de agua, una mayor viscosidad y, por lo tanto, limita la reducción de la relación agua/cemento (Wille & Boisvert-Cotulio, 2015).

2.2.2. ARENA

El tamaño de los materiales de relleno generalmente influye en la resistencia a la compresión del UHPC. Por lo regular, la arena se encuentra en mayor proporción con respecto a los otros materiales; así pues, se recomienda una relación de arena/cemento entre 1 a 1.4 y un tamaño de partícula de arena menor a 0.8 mm para facilitar la fluidez de la mezcla en estado fresco (Abbas et al., 2016; Russell & Graybeal, 2013). La elección de los materiales que forman parte del UHPC no debe centrarse únicamente en las proporciones relativas de diferentes tamaños de grano y textura fuerte, sino también en la selección adecuada de materiales con propiedades físicas y químicas adecuadas (Alsalmán, Dang, Prinz, et al., 2017).

Los agregados silíceos son uno de los ejemplos de agregados fuertes y químicamente estables. Una variedad de agregados finos constituidos en su mayoría de sílice, incluidos cuarzo, piedra caliza y basalto, pueden ser apropiados para su uso en el desarrollo de UHPC (Graybeal, 2019). Las proporciones adecuadas darán como resultado una mezcla más densa y compacta, con una menor demanda de agua y menos espacios libres entre partículas.

2.2.3. REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO (HRWR)

Los UHPC se caracterizan por tener una relación W/B muy baja con el objetivo de lograr una alta resistencia a la compresión. Uno de los componentes principales que permite alcanzar una trabajabilidad deseada en la mezcla fresca, son los de aditivos HRWR fabricados a base de polímeros de policarboxilatos según la norma ASTM C494 (Alsalmán, Dang, & Micah Hale, 2017; Sobuz et al.,

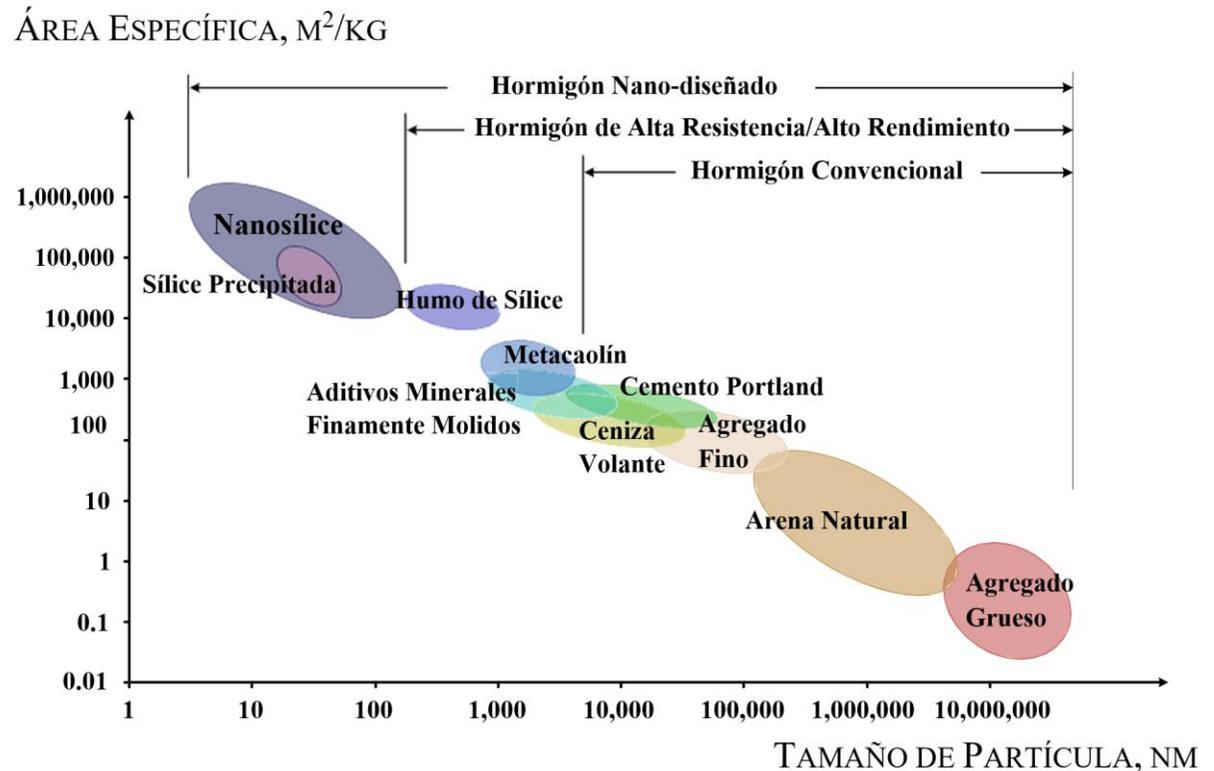


Figura 11. El tamaño de partícula y la escala de superficie específica relacionada con los materiales del hormigón, Fuente: adaptado de Sanchez & Sobolev (2010).

2016). La cantidad de HRWR depende significativamente de la compatibilidad entre los componentes de la mezcla. La adición gradual o retardada mejora la dispersión del aditivo en la mezcla y por ende, la trabajabilidad del UHPC (Abbas et al., 2016).

El consumo de HRWR depende de la superficie específica del cemento. La demanda requerida de HRWR para la mezcla, aumenta con el contenido de C_3A y el módulo de finura de Blaine; en breves rasgos, la superficie específica total de C_3A induce gran parte de la demanda agua y HRWR (C. Wu et al., 2018). Además, es importante considerar que el uso de HRWR atrapa aire durante el proceso de mezclado, lo que también aumenta la porosidad de la matriz de hormigón endurecido.

El aumento de HRWR en grandes cantidades ocasiona que el tiempo de fraguado del UHPC pueda extenderse, generando un efecto negativo en la resistencia a la compresión y un efecto mínimo en el Módulo de elasticidad (Alsaman, Dang, Prinz, et al., 2017). Una solución a este problema es emplear un aditivo acelerante con el propósito de reducir el tiempo de fraguado. El aditivo acelerante dispersa las partículas de cemento en agua, acelera la reacción y disminuye los tiempos de fraguado del hormigón (Alsaman, Dang, & Micah Hale, 2017).

2.2.4. FIBRAS DE ACERO

La naturaleza de falla de los UHPC es frágil; la incorporación de fibras de acero (rectas o deformadas) puede remediar este carácter explosivo y mejorar la capacidad a flexión y el rendimiento del UHPC (Alsaman, Dang, & Micah Hale, 2017). La eficiencia de la fibra está influenciada por el tipo de

fibra, la geometría, la fracción de volumen, la dispersión y la orientación. En general la proporción óptima de fibra en volumen es normalmente el 2% del volumen del total de UHPC (Abbas et al., 2016; Russell & Graybeal, 2013). La fibra de acero más común en aplicaciones UHPC es una fibra recta de 0,2 mm de diámetro y 13 mm de longitud con una resistencia a la tracción mínima especificada de 2000 MPa (Graybeal, 2019).

La incorporación de fibras de acero según Alsaman, Dang, & Micah Hale (2017) presenta los siguientes beneficios:

- Aumenta la resistencia a tracción del hormigón.
- Aumenta la ductilidad del hormigón.
- Aumenta la rigidez y módulo de elasticidad.
- Disminuye la contracción autógena.
- Tiene un efecto mínimo positivo en la resistencia última a compresión del hormigón.
- Controla la apertura y propagación de las microfisuras.

2.2.5. MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS (SCM)

Los SCM se utilizan para reemplazar parcialmente el componente de cemento en el hormigón. Entre algunos ejemplos de SCM que se han considerado para su inclusión en las formulaciones de UHPC se tienen: cenizas volantes, cemento de escoria, humo de sílice, metacaolín, polvo de piedra caliza y recientemente nanomateriales. Aunque los SCM varían en origen, propiedades físicas y químicas, todos exhiben propiedades puzolánicas y/o cementicias (Panesar, 2019).

El uso de SCM puede mejorar eficazmente las propiedades frescas, mecánicas y de transporte del hormigón y su durabilidad a largo plazo. Más allá de las ventajas deseables asociadas a su desempeño, su incorporación también está motivada por su capacidad para reducir las cargas ambientales del hormigón relacionadas con el uso de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la eliminación de desechos y el agotamiento de los recursos naturales (Panesar, 2019).

HUMO DE SÍLICE (SF)

El SF, es una de los SCM más utilizados en la producción de UHPC debido a sus excelentes propiedades físicas y químicas que permite lograr una alta resistencia a la compresión y gran durabilidad. Este beneficio se debe a que el SF acelera las reacciones puzolánicas que producen Silicato de Calcio Hidratado (CSH), y llena los vacíos en la matriz de la pasta (Abbas et al., 2016). Es importante destacar que los HPC usualmente limitan el contenido de SF a valores menores al 10% en masa respecto al cemento, mientras que los UHPC pueden contener porcentajes mucho más altos (20% al 30%) de SF con bajo contenido de carbono (menor al 0.5%) con el objetivo de mejorar el rendimiento mecánico (Nilsson, 2018).

Aunque la cantidad de SF es mucho menor que la del cemento, su superficie específica en la formulación de UHPC es aproximadamente dos veces mayor que la del cemento (ver Figura 11). El SF es el factor principal para determinar los requisitos de agua y HRWR por su gran superficie específica. La incorporación de SF adicional disminuye la demanda de agua y consecuentemente requiere más



Figura 12. Agua potable convencional, Fuente: Depositphotos (2020).



Figura 13. Reductor de Agua de Alto Rango, Fuente: Sika USA (2020).



Figura 14. Humo de Sílice, Fuente: Greco (2020).



Figura 15. Cemento Hidráulico, Fuente: UCEM (2020).



Figura 16. Arena de Sílice Fina, Fuente: Comipez (2020).



Figura 17. Nanotubos de Carbono, Fuente: Nanjing XFNANO Materials Tech Co. (2020a).



Figura 18. Nanosíllice, Fuente: Nanjing XFNANO Materials Tech Co. (2020b).

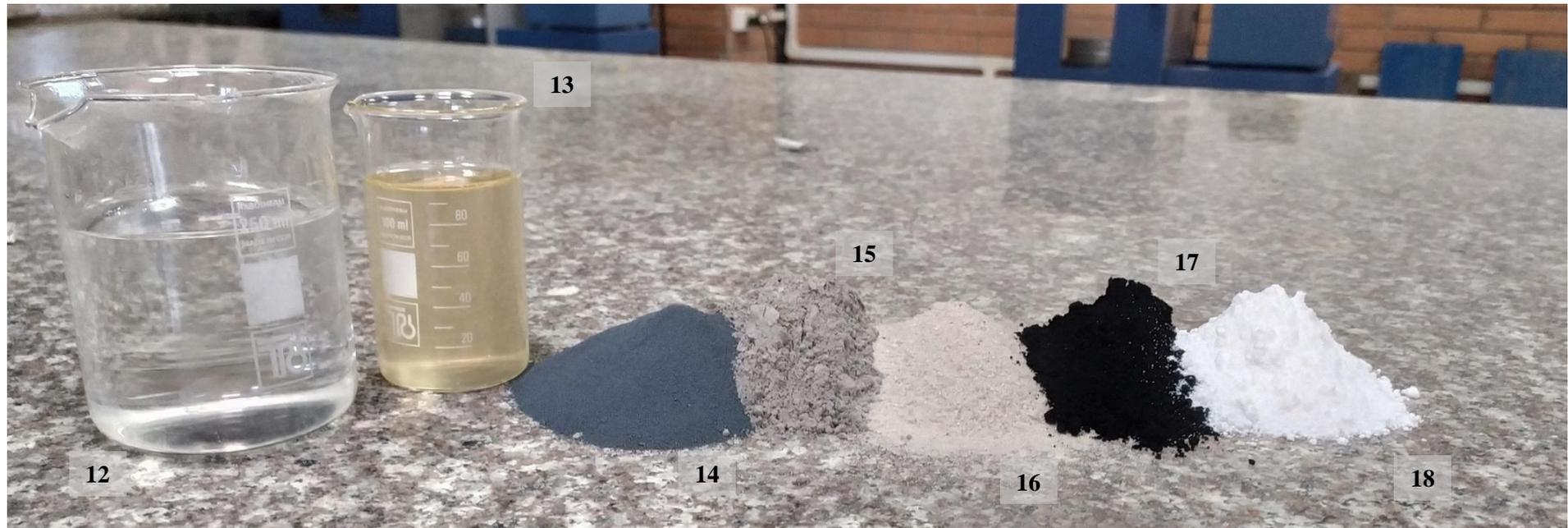


Figura 19. Materiales utilizados en laboratorio: 12) Agua Potable, 13) HRWR, 14) Humo de Sílice, 15) Cemento, 16) Arena de Sílice, 17) Nanotubos de Carbono, 18) Nanosíllice.

HRWR para que la mezcla de concreto sea trabajable (C. Wu et al., 2018).

2.3. NANOTECNOLOGÍA

Según el Programa Federal National Nanotechnology Initiative (2020) de los Estados Unidos, se establece que la nanotecnología es la comprensión y el control de la materia a nanoescala, es decir, en dimensiones entre aproximadamente 1 y 100 nanómetros, donde fenómenos únicos permiten aplicaciones novedosas a diferentes ramas de investigación. La nanotecnología, que abarca la ciencia, la ingeniería y la tecnología a nanoescala, implica la obtención de imágenes, la medición, el modelado y la manipulación de la materia a esta escala de longitud.

Mediante el control de la materia en la nanoescala, la nanotecnología reúne procesos y técnicas que se utilizan para investigar, diseñar y fabricar materiales, dispositivos y sistemas. Permite la gestión de características como el tamaño del material, la forma, la morfología, la composición química y la configuración molecular para la mejora o el desarrollo de nuevas propiedades de procesos y productos.

Se espera que las aplicaciones de las nanotecnologías impacten prácticamente en todos los aspectos de la vida y permitan avances drásticos en la comunicación, la salud, la fabricación, los materiales y las tecnologías basadas en el conocimiento (ISO, 2015a).

2.3.1. NANOMATERIALES

La normativa ISO/TS 80004-2:2015 (2015b) describe como nanomaterial al material con cualquier dimensión externa en la nanoescala o con estructura interna o estructura de superficie en la nanoescala. Este término genérico incluye nanoobjetos y materiales nanoestructurados. Los nanoobjetos son piezas discretas de material con una, dos o tres dimensiones externas en la nanoescala, donde la segunda y tercera dimensión externas son ortogonales a la primera dimensión y entre sí. Los materiales nanoestructurados son el resultado de la composición de partes constituyentes interrelacionadas en las que una o más de esas partes es una región a nanoescala (una región está definida por un límite que representa una discontinuidad en las propiedades).

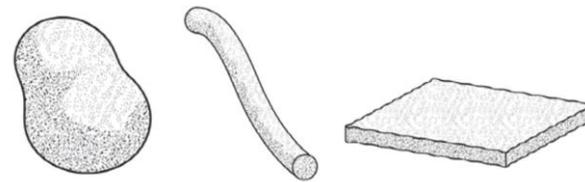


Figura 20. De izquierda a derecha: a) Nanopartícula, b) Nanofibra y c) Nanopláca, Fuente: ISO (2015b).

Para el estudio actual se considera solamente dos de las tres formas básicas de nano-objetos que se pueden observar en la Figura 20. En la imagen de la izquierda se esquematiza una nanopartícula la cual posee sus tres dimensiones externas y ortogonales; la imagen central muestra una idealización de lo denominado como nanofibras y nanotubos, puesto que dos de sus tres dimensiones son externas y una es excesivamente grande referente a las otras dos.

Una serie de otros parámetros, además del tamaño y la forma, también son intrínsecos a la

función y los fenómenos exhibidos por los nanoobjetos. Estos parámetros incluyen composición, morfología, estructura cristalina y características de la superficie, que pueden tener una gran influencia en los fenómenos clave a nanoescala que exhiben los nanoobjetos (ISO, 2015b).

NANOPARTÍCULAS: NANOSÍLICE (NS)

El Nanosílice (NS) o Nano Dióxido de Sílice (SiO_2) se enmarca en esta división por su carácter discreto en tres dimensiones. Su síntesis es variada mediante el método de precipitación (Jal et al., 2004), método sol-gel (Hassan et al., 2014), método térmico (Assefi et al., 2015), entre otros .

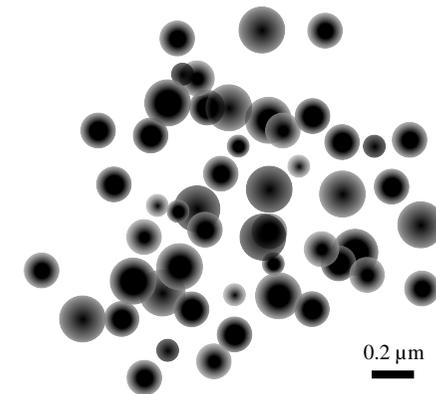


Figura 21. Esquematización de nanopartículas de sílice bajo TEM (Microscopio Electrónico de Transmisión).

Durante las últimas décadas se ha logrado grandes desarrollos en el hormigón mediante la aplicación de partículas extremadamente finas como el humo de sílice. Actualmente, el NS que presenta tamaño hasta 1000 veces menores, permite rellenar los nanoespacios, mejorando el empaquetamiento de la matriz. Evita la segregación y presenta un hormigón más cohesivo en la fase fresca. Tiene

propiedades acelerantes sobre la hidratación del Silicato Tricálcico (C_3S), y acelera la formación de gel Silicato de Calcio Hidratado (Sobolev, 2016).

NANOFIBRAS: NANOTUBOS DE CARBONO (CNT)

Una nanofibra puede ser un nanoobjeto con dos dimensiones externas en la nanoescala y la tercera dimensión significativamente mayor; la dimensión más grande no está necesariamente en la nanoescala. De esta definición se pueden obtener otras familias de nanofibras como: Nanorods (nanofibras sólidas) o Nanotubos (nanofibras huecas) (ISO, 2015b).

Sanjeev et al. (2012) define a los CNT como estructuras tubulares formadas por una o más capas de láminas de grafito (grafeno). El grafito es una hoja plana formada por capas de átomos de carbono unidos en un patrón hexagonal.

Los CNT pueden presentar dos variaciones en su estructura según el número de paredes que lo conforman. En la Figura 22, se observa un esquema de un Nanotubo de Carbono de Pared Simple (SWNT) y un Nanotubo de Carbono de Pared Múltiple (MWNT). El presente documento estudia solamente los MWNT.

De acuerdo a los diámetros de rango nanométrico y las altas relaciones de aspecto de los MWNT, se puede mejorar potencialmente la resistencia a la compresión de los UHPC y el comportamiento de unión de las fibras de acero (Wille & Loh, 2010). La ventaja de utilizar CNT en UHPC es mejorar la capacidad a flexión, tensión y compresión (Janković et al., 2019). Múltiples estudios han informado sobre la mejora de las propiedades mecánicas y la durabilidad de los materiales de construcción

reforzados con CNT. Los CNT también tienen una excelente conductividad eléctrica, que no se han explotado completamente en materiales de construcción (Jung et al., 2020).

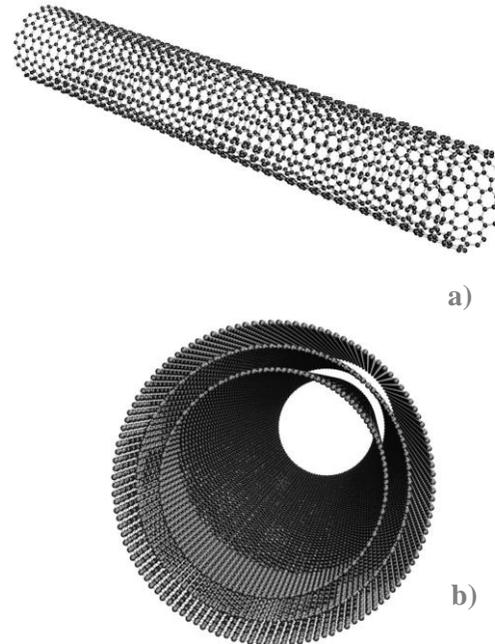


Figura 22. Esquematización de los tipos de Nanotubos de Carbono: a) Pared Simple (SWNT) y b) Pared múltiple (MWNT), Fuente: The Royal Society (2004)

Es necesario considerar su tendencia a aglomerarse consecuente a las fuerzas de Van der Waals actuantes entre nanotubos. Por este motivo, autores proponen añadir los MWNT en solución acuosa a la mezcla de hormigón o, en otros casos, previamente dispersarla por vibraciones sónicas (Sanjeev et al., 2012).

2.4. REGÍMENES DE CURADO

El régimen de curado comprende el ambiente en el cual la muestra completa su proceso de hidratación. Las propiedades del UHPC dependen de los regímenes de curado a los que son sometidos; influye directamente en las propiedades mecánicas del UHPC (Alsalman, Dang, & Micah Hale, 2017).

La aplicación de un régimen de curado bajo temperatura controlada ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre 24 a 48 horas) incrementa la resistencia a la compresión del UHPC hasta 30 MPa en comparación con muestras curadas bajo temperatura ambiente durante 28 días (Janković et al., 2019). Se puede considerar una manera eficiente de aprovechar las bondades de los UHPC y optimizar costos en prefabricados.

2.5. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS

2.5.1. COMPRESIÓN SIMPLE

La resistencia a la compresión simple es una de las propiedades mecánicas más medidas del hormigón. Es un parámetro que regularmente está involucrado en el diseño de estructuras. Se realiza de acuerdo con la Norma ASTM C39 para muestras cilíndricas y la Norma ASTM C109 para muestras cúbicas.

FACTOR DE FORMA

El cilindro es el espécimen empleado para el desarrollo del ensayo a compresión del hormigón en nuestro medio, mientras que, el cubo es el espécimen de ensayo a compresión más utilizado en algunas partes de Europa (Graybeal, 2006).

El factor de forma hace referencia al valor que se utiliza para obtener la resistencia de un cilindro a partir de la resistencia de un cubo o viceversa. Para el caso del hormigón convencional dicho valor es aproximadamente 0,82 y aumenta hacia 1.0 a medida que aumenta la resistencia del hormigón (Shafieifar et al., 2017).

2.5.2. TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL

La resistencia a la tracción se utiliza para estimar la carga bajo la cual se producirá el agrietamiento. Esta prueba es cada vez más popular debido a su facilidad de ejecución bajo las especificaciones técnicas de la Norma ASTM C 496. Esta prueba, mide indirectamente la resistencia a la tracción del concreto comprimiendo un cilindro a través de una línea de carga aplicada a lo largo de su longitud.

2.5.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad se mide a través de métodos de prueba de compresión estandarizados a un cilindro de acuerdo a las especificaciones técnicas de la Norma ASTM C469.

El módulo de elasticidad del hormigón representa la rigidez de este material ante una carga impuesta. Es uno de los valores más importantes en el diseño de estructuras de hormigón reforzado, puesto que influye de manera determinante en las deflexiones. Tiene como principio la aplicación de carga estática y de la correspondiente deformación unitaria producida.

2.5.4. VELOCIDAD DE PULSO

El método de medición de pulso ultrasónico es una alternativa de ensayo no destructivo, el cual se realiza bajo las especificaciones técnicas de la Norma ASTM C597. Permite obtener valores representativos de la velocidad de la onda sobre el hormigón, y detectar posibles fisuras, oquedades o problemas en la masa bruta. También es un parámetro para aproximar la resistencia a compresión de la muestra.

2.5.5. ENSAYO DE FLUIDEZ

El ensayo de fluidez se determina de manera indirecta la trabajabilidad de una mezcla. Se realiza acuerdo con las especificaciones técnicas de la Norma ASTM C1437. Este método de prueba está diseñado para usarse con morteros que exhiben un comportamiento entre plástico y fluido (Russell & Graybeal, 2013).

2.6. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (LCA)

El Análisis del ciclo de vida (LCA) es una evaluación sistemática que determina el impacto ambiental y los recursos consumidos de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida, es decir, desde que se obtiene las materias primas hasta su fin de vida (Sameer et al., 2019). Se realiza de acuerdo con la Norma ISO 14040 – 2006.

El hormigón es el segundo material más utilizado a nivel mundial después del agua (Naqi et al., 2019) y se dice que la producción de cemento representa alrededor del 7% del total de emisiones antropogénicas de CO₂ (Dong, 2018). Por lo tanto, uno de los desafíos clave de sustentabilidad para las próximas décadas es diseñar y producir hormigón con

menos clínker (componente más contaminante), y por ende, menos CO₂ liberado (Yu et al., 2014).

Se han adoptado combustibles alternativos y sustituciones para el clínker con el fin de disminuir la huella de carbono. Una tecnología emergente llamada UHPC radica en el uso inteligente de los componentes del hormigón, el cual presenta resistencias muy superiores y cantidades menores de material en obra. Sin embargo, la práctica de construcción actual y los códigos y estándares de diseño no permiten la aplicación completa de estos materiales novedosos. Los desafíos para su uso extendido se deben generalmente a la falta de herramientas cuantitativas para evaluar el desempeño estructural, la sostenibilidad y los impactos ambientales a largo plazo (Dong, 2018).

Sameer et al. (2019) enuncia que los UHPC podrían proporcionar una vida útil más larga sin costosas medidas de mantenimiento en comparación con los hormigones convencionales, aunque están sujetos a un proceso de producción que consumen mucha energía y requieren un tiempo de mezcla relativamente más largo. Además, proporciona una evaluación ambiental integral desde la cuna a la tumba (LCA), para el UHPC en comparación con hormigones convencionales en términos de huella de carbono, huella de material y huella hídrica (ver Figura 92).

2.6.1. HUELLA DE CARBONO

La huella de carbono refiere a la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) acompañada dentro de la cadena de proceso del ciclo de vida de un



producto cuantificado en kg de CO₂ equivalentes (Sameer et al., 2019).

2.6.2. CONSUMO DE ENERGÍA

El consumo energético se determina de manera similar a la huella de carbono, representa toda energía directa o indirecta necesaria dentro del ciclo de vida de un producto cuantificada en Megajoules (MJ) (Bonamente et al., 2014).

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

El presente capítulo especifica las características de los materiales utilizados, así como los métodos al momento de la realización de las mezclas en fresco, moldeo de muestras, proceso de curado, ensayos de especímenes y los parámetros no cumplidos según los estándares ASTM y normativas vigentes.

3.1. MATERIALES

3.1.1. CEMENTO HIDRÁULICO

Cemento Hidráulico Guapán Tipo HE suministrado por la Unión Cementera Nacional UCEM. Cumple con la norma ASTM C1157 (INEN 2380). El Cemento Guapán Portland Puzolánico Tipo IP cumple con la Norma ASTM C595 (INEN 490). En nuestro medio nacional, es común encontrar varias marcas y tipos de Cementos Hidráulicos en general (Tipo GU, HE, etc.) así como Cementos Hidráulicos Compuestos (Tipo IP) que muchas veces se los interpreta como Cementos Portland; con escasas excepciones se puede conseguir Cemento Portland según ASTM C150 a precios relativamente elevados por sus costos de importación. A pesar de que varias características del cemento utilizado no cumplen con los parámetros recomendados por la literatura revisada, los resultados son muy alentadores. Las propiedades físicas y químicas se muestran en la Tabla 4 y Tabla 5.

3.1.2. ARENA DE SÍLICE FINA

Como componente pétreo libre de impurezas se considera solamente Arena Colma Fina a base de cuarzo (SiO₂) suministrada por Sika Ecuatoriana S.A. Su granulometría se encuentra entre el Tamiz 40 y el

Tamiz 200. Posee una densidad de 1,6 g/cm³ a 20 °C (Sika Ecuatoriana S.A., 2019).

Tabla 2. Granulometría Arena Colma Fina.

Descripción: Arena Colma Fina		
Tamiz	Ab. T. (mm)	% Pasante
#4	4.750	100.0
#8	2.360	100.0
#16	1.180	100.0
#30	0.600	92.1
#50	0.300	52.7
#100	0.150	7.9
#200	0.075	0.8

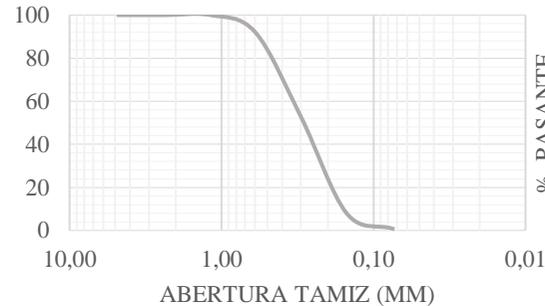


Figura 23. Granulometría Arena Colma Fina.

Tabla 3. Propiedades de Arena Colma Fina.

Ensayo	Resultados
Gravedad Específica [g/cm ³]	2.43
Gravedad Específica SSS [g/cm ³]	2.46
Gravedad Específica Aparente [g/cm ³]	2.44
Absorción [%]	0.52
Masa Unitaria Suelta [g/cm ³]	1.32
Masa Unitaria Compactada [g/cm ³]	1.58

3.1.3. HUMO DE SÍLICE

Entre los SCM que se incorporan a la fase cementante, se incluye SikaFume de Sika Ecuatoriana S.A. Es una adición en polvo fino, color gris, con base en microsílíce que cumple con la Norma ASTM C1240. El SF permite aumentar las resistencias mecánicas y químicas de hormigones y morteros endurecidos, mejora las características de la matriz del hormigón, disminuyendo la porosidad y creando mediante su reacción con la cal libre, una estructura densa y resistente al ataque de aguas y ambientes agresivos. No contiene cloruros. Posee una densidad de 2.0 g/cm³ (Sika Ecuatoriana S.A., 2020).

3.1.4. REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO

Para reducir la cantidad de agua hasta las relaciones W/C recomendadas, se utilizó el HRWR ViscoCrete 4100 proveído por Sika Ecuatoriana S.A. Es un aditivo reductor de agua de alto rango e hiperplastificante, a base de polímeros policarboxilatos. Cumple todos los requerimientos de la Norma ASTM C494. Posee una densidad aproximada de 1.1 g/cm³ a 20 °C (Sika Ecuatoriana S.A., 2015).

3.1.5. AGUA

El Agua incorporada fue del sistema de Abastecimiento de Agua Potable de la ciudad de Cuenca. Cumple con la NTE INEN 1108.



Tabla 4. Propiedades del Cemento Guapán Compuesto Pozolánico Tipo IP, Fuente: adaptado de Ficha Técnica Cemento Guapán Pozolánico IP.

Descripción: Cemento Compuesto Pozolánico Guapán Tipo IP

Propiedades Químicas			Propiedades Físicas		
PROPIEDAD	UNIDAD	RESULTADO	PROPIEDADES	UNIDAD	RESULTADO
Óxido de Silicio SiO ₂	%	33.25	Módulo de finura	cm ² /g	4600
Óxido de Aluminio Al ₂ O ₃	%	8.04	Retenido en 45 µm (T. N° 325)	%	2.85
Óxido de Hierro Fe ₂ O ₃	%	2.73	Contracción en Autoclave	%	0.0044371
Óxido de Calcio CaO	%	45.57	Fraguado Inicial	min	165
Óxido de Magnesio MgO	%	1.05	Fraguado Final	min	213
Óxido de Azufre SO ₃	%	2.45	Contenido de aire en mortero	%	6.38
Pérdida por Calcinación	%	4.79	Densidad	g/cm ³	2.77
Puzolana: Retenido 45 µm (T. N° 325)	%	12.8			
Índice de Actividad. Pozolánica	%	87.4			

Tabla 5. Propiedades del Cemento Hidráulico Guapán HE, Fuente: adaptado de Ficha Técnica Cemento Guapán HE.

Descripción: Cemento Hidráulico Guapán Tipo HE

Propiedades Químicas			Propiedades Físicas		
PROPIEDAD	UNIDAD	RESULTADO	PROPIEDADES	UNIDAD	RESULTADO
Óxido de Silicio SiO ₂	%	27.20	Módulo de finura	cm ² /g	6030
Óxido de Aluminio Al ₂ O ₃	%	5.45	Retenido en 45 µm (T. N° 325)	%	1.12
Óxido de Hierro Fe ₂ O ₃	%	2.81	Contracción en Autoclave	%	0.003961
Óxido de Calcio CaO	%	52.00	Fraguado Inicial	min	128
Óxido de Magnesio MgO	%	1.08	Fraguado Final	min	181
Óxido de Azufre SO ₃	%	3.30	Contenido de aire en mortero	%	5.80
Pérdida por Calcinación	%	3.32	Densidad	g/cm ³	2.95



Figura 24. Cemento Hidráulico Guapán Tipo HE, Unión Cementera Nacional UCEM.



Figura 25. Arena Fina Colma, Sika Ecuatoriana S.A.



Figura 26. Humo de Sílice SikaFume, Sika Ecuatoriana S.A.

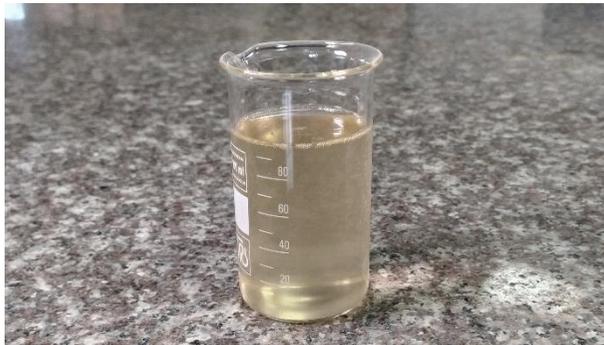


Figura 27. Reductor de Agua de Alto Rango ViscoCrete 4100, Sika Ecuatoriana S.A.



Figura 28. Nanosílice, Nanjing XFNANO Materials Tech Co.



Figura 29. Nanotubos de Carbono, Nanjing XFNANO Materials Tech Co.

3.1.6. NANOMATERIALES: NANOSÍLICE (NS) Y NANOTUBOS DE CARBONO (CNT)

NANOSÍLICE

Nanodióxido de Sílice (SiO₂) producido y exportado por Nanjing XFNANO Materials Tech Co., Ltd. Este nanopolvo contiene muchos aniones hidroxilos (OH⁻) en la superficie que exhiben una alta capacidad de retención de agua (Nanjing XFNANO Materials Tech Co., 2018).

Tabla 6. Propiedades de Nanosílice, Fuente: Nanjing XFNANO Materials Tech Co. (2018)

Descripción: Nanodióxido de Sílice		
Propiedad	Unidad	Resultado
Pureza	%	99.00
Diámetro promedio de partícula	nm	20.00
Superficie Específica (BET)	m ² /g	145 a 160

NANOTUBOS DE CARBONO

Nanotubos de Carbono de Pared Múltiple (MWNT) de grado industrial producido y exportado por Nanjing XFNANO Materials Tech Co., Ltd. Consisten en múltiples capas laminadas (tubos concéntricos) de átomos de carbono que son fabricados mediante el Método de deposición química en fase de vapor (CVD); mediante este método, los nanomateriales generados son unidimensionales con alta resistencia, módulo y conductividad, flexibilidad, conductividad térmica, termoestabilidad y resistencia a la corrosión (Nanjing XFNANO Materials Tech Co., 2017).

Tabla 7. Propiedades de Nanotubos de Carbono de Pared Múltiple, Fuente: Nanjing XFNANO Materials Tech Co. (2017)

Descripción: Nanotubos de Carbono de Pared Múltiple, Grado Industrial		
Propiedad	Unidad	Resultado
Diámetro Externo	nm	>50
Diámetro Interno	nm	5 a 15
Longitud de Tubo	um	10 a 20
Contenido de Carbono	%	95
Superficie Específica	m ² /g	>60
Densidad Aparente	g/cm ³	0.19
Densidad Compactada	g/cm ³	2.10
Conductividad	S/cm	>100

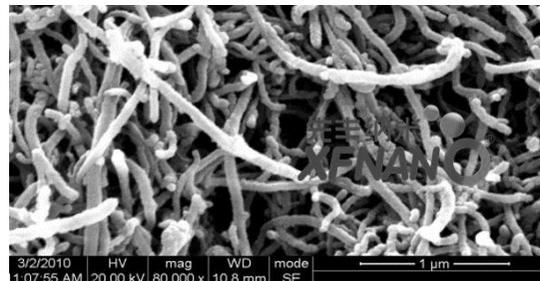
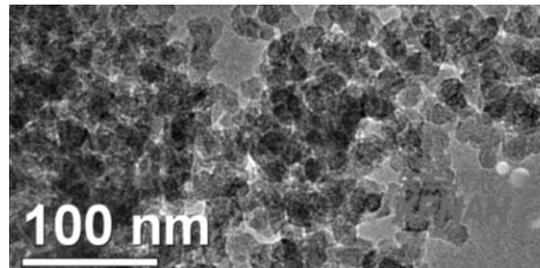


Figura 30. a) Imagen SEM de NS, Fuente: Nanjing XFNANO Materials Tech Co. (2018) y b) Imagen SEM de CNT, Fuente: Nanjing XFNANO Materials Tech Co. (2017).

3.2. PLANIFICACIÓN

Se ensayaron 389 especímenes cúbicos de 50 mm de arista y 71 cilindros de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura en donde se distinguen las siguientes Etapas:

ETAPA A: ENSAYOS EN LABORATORIO

FASE I: Ensayos Preliminares

Se ensayaron 117 especímenes cúbicos en un rango de edad de 6 a 15 días.

- a) Obtención de los materiales y caracterización.
- b) Prueba de dosificaciones preestablecidas sin adición de nanomateriales.
 - Mezcla en batidora para especímenes cúbicos de arista de 50 mm.
 - Variaciones en diferentes proporciones de Cemento Hidráulico HE, SF, SFS, HRWR, Agua.
 - Curado a temperatura ambiente de especímenes.

FASE II: Elaboración de Muestra Maestra.

Se ensayaron 119 especímenes cúbicos en un rango de edad de 1 a 90 días.

- a) Ajustes y aplicación de dosificación para la MM.
 - Mezcla en batidora para especímenes cúbicos de arista de 50 mm y especímenes cilíndricos de diámetro 100 mm y altura 200 mm.
 - Ensayo de Fluidez según ASTM C1437.

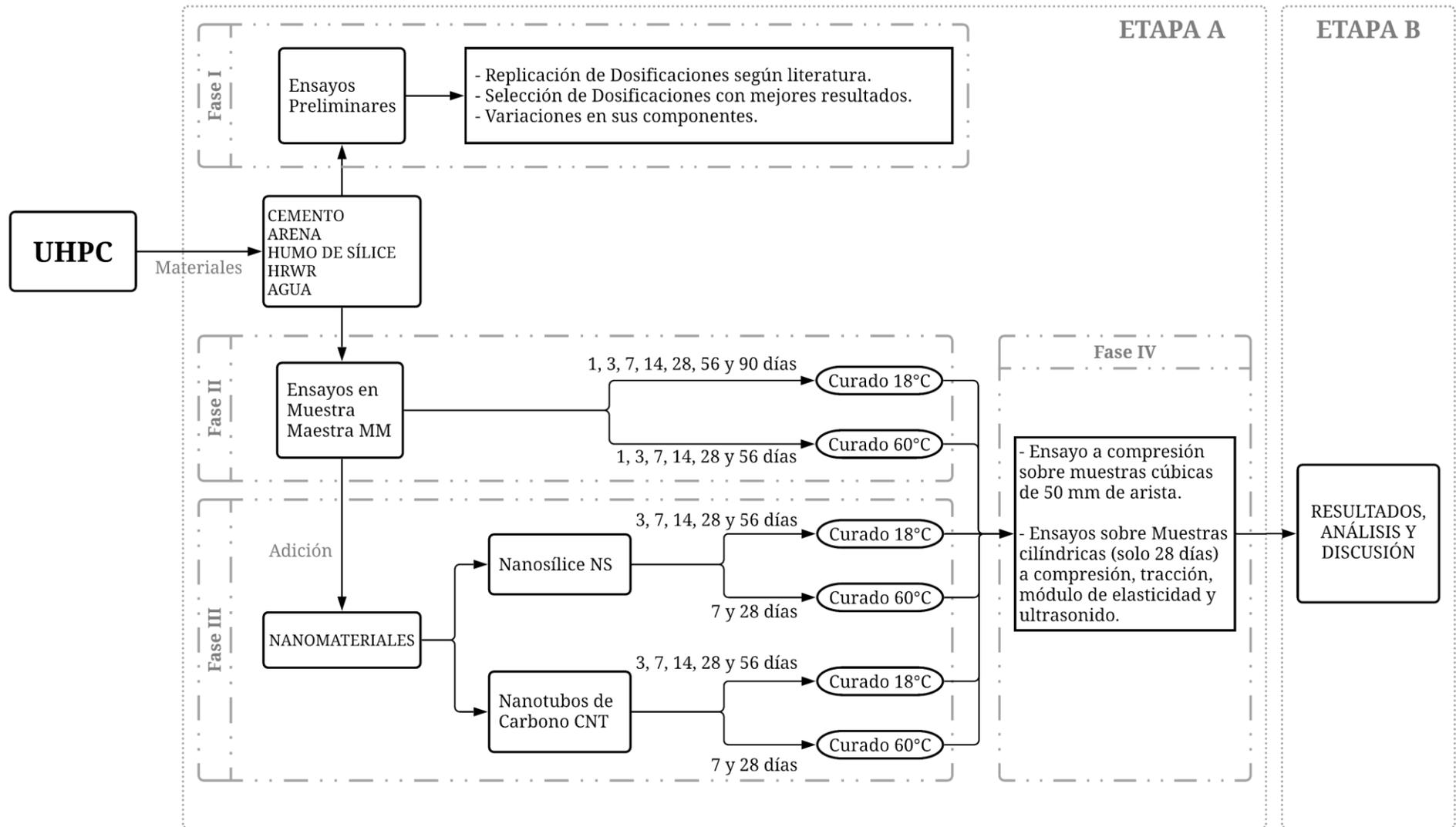


Figura 31. Diagrama de Planificación.



- Curado a temperatura ambiente de MM para especímenes cúbicos a 1, 3, 7, 14, 28, 56 y 90 días.
- Curado a temperatura ambiente de MM para especímenes cilíndricos durante 28 días.
- Curado a temperatura controlada (60°C) durante las primeras 48 horas de MM para especímenes cúbicos a 3, 7, 14, 28 y 56 días.
- Curado a temperatura controlada (60°C) durante las primeras 48 horas de MM para especímenes cilíndricos a 28 días.

FASE III: Aplicación de Nanomateriales.

Se ensayaron 153 especímenes cúbicos en un rango de edad de 3 a 56 días.

- a) Aplicación de Nanosílice y Nanotubos de Carbono.
 - Mezcla en batidora para especímenes cúbicos de arista de 50 mm y especímenes cilíndricos de diámetro 100 mm y altura 200 mm.
 - Ensayo estándar para la fluidez de mortero según ASTM C1437.
 - Curado a temperatura ambiente para especímenes cúbicos a 3, 7, 14, 28 y 56 días.
 - Curado a temperatura ambiente para especímenes cilíndricos durante 28 días.
 - Curado a temperatura controlada (60°C) durante las primeras 48 horas para especímenes cúbicos a 7 y 28 días.
 - Curado a temperatura controlada (60°C) durante las primeras 48 horas para especímenes cilíndricos a 28 días.

FASE IV: Pruebas destructivas y no destructivas.

- a) Pruebas de resistencia mecánica en hormigón endurecido.
 - Ensayo a Compresión Simple para especímenes cúbicos de arista de 50 mm según ASTM C109 y especímenes cilíndricos de diámetro 100 mm y altura 200 mm según ASTM C39.
 - Ensayo a Tracción por Compresión Diametral para especímenes cilíndricos de diámetro 100 mm y altura 200 mm según ASTM C496.
 - Ensayo de Módulo de Elasticidad para especímenes cilíndricos de diámetro 100 mm y altura 200 mm según ASTM C469.
 - Ensayo de Velocidad de Pulso a través de hormigón para especímenes cilíndricos de diámetro 100 mm y altura 200 mm según ASTM C597.

ETAPA B: RESULTADOS Y ANÁLISIS

- a) Análisis de resultados.
 - Validación o rechazo de hipótesis realizadas.
 - Comparación de resultados.
 - Análisis de sostenibilidad.
 - Proyección de resultados.

3.3. EQUIPOS

Los equipos nombrados a continuación corresponden con los descritos por las normativas que se detallan. Cada equipo posee herramientas e instrumentos que se nombran en cada normativa y no en el presente documento.

3.3.1. FABRICACIÓN Y MOLDEO DE ESPECÍMENES

Los siguientes equipos cuentan con certificantes de grado internacional según las normativas correspondientes.

BATIDORA HOBART C-100T (SOILTEST CT-350) Y HOBART N-50

Estas batidoras certificadas para uso en mezcla de morteros, cumple con la norma ASTM C305. Poseen una capacidad de 5 y 9.5 L respectivamente y una potencia de 0.25 Hp con 3 velocidades de mezclado.

BALANZA OHAUS EXPLORER

Balanza con calibración automática y precisión hasta la céntima de gramo.

MOLDE PARA ESPECÍMENES CÚBICOS DE 50 MM DE ARISTA

Moldes de orientación paralela de acero inoxidable. Cumple con Normas ASTM C87, C91, C109, C141, C267, C311, C472, C617, C618, C1073.

MOLDE PARA ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE 100 MM DE DIÁMETRO Y 200 MM DE ALTURA

Cilindros de acero según la norma ASTM C39.

MESA DE FLUIDEZ ELE SOILTEST CT-20

Mesa de operación manual de 10 pulgadas; cumple con Norma ASTM C230.

3.3.2. CURADO DE ESPECÍMENES

Debido a que no se contó con un cuarto de temperatura y humedad relativa controlada según las normas ASTM C109 y ASTM C192, las muestras



Figura 32. Batidora Hobart N-50, Fuente: Manual de Usuario.



Figura 33. Balanza Ohaus Explorer, Fuente: Manual de Usuario.



Figura 34. Molde especímenes cúbicos de 50 mm, Fuente: Ficha Técnica.



Figura 35. Molde cilíndrico de 10 x 20 cm, Fuente: Ficha Técnica.



Figura 36. Mesa de Flujo ELE C-50, Fuente: ELE Soiltest.



Figura 37. Baño de Agua Humboldt H1390, Fuente: Manual de Usuario.



Figura 38. Prensa Shimatzu Concreto 2000X, Fuente: Manual de Usuario.



Figura 39. Instrumento Ultrasónico TICO, Fuente: Manual de Usuario.

fueron selladas durante sus primeras 24 horas de endurecimiento sin permitir su contacto con el ambiente, posteriormente pasaron a sus respectivas piscinas de curado.

PISCINA DE CURADO TEMPERATURA AMBIENTE

Piscina de curado del Laboratorio de Geomática y Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería. No cuenta con control de temperatura. Según

mediciones realizadas, la temperatura promedio se encuentra en 18°C.

PISCINA DE CURADO TEMPERATURA CONTROLADA

Adecuación de la piscina de curado del Laboratorio de Geotecnia y Bioclimática de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo mediante el aislamiento de paredes y cubierta. Conjuntamente se instalaron dos niquelinas para mantener una temperatura estable de 60 °C durante 2 semanas.

BAÑO DE AGUA HUMBOLDT H-1390

Brinda control de temperatura automatizado en toda la unidad desde temperatura ambiente hasta 180 ° F (82 ° C), con una precisión de ± 0.1%

3.3.3. ENSAYOS SOBRE MUESTRAS ENDURECIDAS

PRENSA SHIMATZU CONCRETO 2000X

Esta máquina de ensayos de compresión puede realizar varios tipos de ensayos de forma segura y eficiente a una alta capacidad sin causar fractura explosiva (falla de la muestra) en UHPC. Capacidad de 40 a 2000 kN.

INSTRUMENTO ULTRASÓNICO TICO

El aparato mide la velocidad de pulso en el hormigón dentro de las especificaciones de la Norma ASTM C 597. Posee una resolución de hasta 0.1 μ s, transductores de 54 KHz y una tasa de 3 pulsos por segundo.

3.4. DOSIFICACIONES

La realización del presente trabajo de investigación recopiló algunas dosificaciones para la elaboración de UHPC. La reproducción y variación de estas dosificaciones según los materiales disponibles en el país permitió encontrar algunas posibles candidatas como MM. En la Tabla 10 se sintetizan algunas dosificaciones trabajadas.

Tabla 8. Dosificaciones para cada variación de nanomaterial.

MATERIALES	MM	NS-1	NS-2	NS-3	CNT-5	CNT-25	CNT-45
Cemento Hidráulico	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Arena Fina	1.432	1.432	1.432	1.432	1.432	1.432	1.432
Humo de Sílice	0.325	0.325	0.325	0.325	0.325	0.325	0.325
Reductor de Agua	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041
Agua	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237
Nanomaterial	0.000	0.010	0.020	0.030	0.0005	0.0025	0.0045

Valores referenciales respecto al peso de cemento

Es claro que siempre existirá una variabilidad de los resultados obtenidos por los investigadores y empresas dedicadas a esta rama, teniendo en cuenta que la materia prima, disponibilidad y costos son distintos en cada región. No obstante, mediante las metodologías y recomendaciones que exponen varios autores, se logró conseguir resultados satisfactorios en la fabricación y desarrollo de UHPC.

La replicación de la dosificación ACI 1996 presento los mejores resultados; mantiene una de las relaciones óptimas de materiales y un balance más rentable que otras.

3.4.1. MUESTRA MAESTRA Y MUESTRAS CON NANOMATERIALES

La MM se considera como la referencia comparativa para la implementación de nanomateriales en sus diferentes porcentajes. La MM fue ensayada varias veces para observar cambios en sus propiedades frescas y endurecidas. Una vez comprobada la estabilidad de la mezcla, se procedió a realizar las muestras finales e incorporar NS y CNT.

La dosificación ACI 1996 fue probada bajo variaciones previas antes de convertirse en la

dosificación MM. Se disminuyó la relación W/C y aumentó la cantidad de aditivo HRWR (Ver Tabla 12). Finalmente, luego de percibir la variación en resistencia y las implicaciones de manejar relaciones HRWR/C altas con relaciones W/B muy bajas como se muestra en la Tabla 11, se optó por definir a la dosificación ACI96-A como la MM (Ver Tabla 9).

Tabla 9. Dosificación de Muestra Maestra (MM).

MATERIALES	MM*	% PESO TOTAL**
Cemento Hidráulico	1.000	32.96 %
Arena Fina	1.432	47.20 %
Humo de Sílice	0.325	10.71 %
HRWR	0.041	1.33 %
Agua	0.237	7.80 %

*Valores referenciales respecto al peso de cemento

**Valores referenciales respecto al peso total de la mezcla

Los porcentajes de incorporación de nanomateriales se establecieron según valores típicos y recomendados en la literatura investigada:

- Nanosílice se incorporará en 1%, 2% y 3% en relación peso/peso (p/p) respecto al cemento.
- Nanotubos de Carbono se incorporarán en 0.05%, 0.25% y 0.45% en relación p/p respecto al cemento (Ver Tabla 8).

3.5. PROCESO

Azmee & Sahfiq (2018) recolectan cuatro principios básicos sobre el diseño de UHPC que conducen a una resistencia a la compresión muy alta:

Tabla 10. Dosificaciones de diferentes empresas y autores, Fuente: adaptado de Azmee & Shafiq, (2018); Russell & Graybeal (2013)

MATERIALES	FHWA 2018	ACI 1996	ACI 2009	DUCTAL®	CRC®	COR-TUF®	CEMTEC®	BSI®	DURA®
Cemento Portland ¹	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Arena Fina	0.970	1.432	0.967	1.433	0.920	0.967	0.490	0.962	1.000
Cuarzo Molido ²	0.277	0.300	0.277	0.296	0.250	0.277	-	-	-
Humo de Sílice	0.390	0.325	0.389	0.324	0.250	0.389	0.255	0.152	0.247
Reductor de Agua	0.018	0.027	0.017	0.043	0.011	0.017	0.042	0.036	0.042
Acelerador	-	-	-	0.042	-	-	-	-	-
Agua	0.209	0.280	0.208	0.153	0.190	0.208	0.171	0.189	0.220
Fibras de Acero	0.313	0.200	0.310	0.219	0.270	0.310	0.817	0.210	0.190

Valores referenciales respecto al peso de cemento

Tabla 11. Dosificaciones base según variaciones a ACI 1996: Relaciones peso/peso respecto al cemento.

MATERIALES	ACI 1996	ACI96-A	ACI96-B	ACI96-C
Cemento	1.000	1.000	1.000	1.000
Arena Fina	1.432	1.432	1.432	1.432
Humo de Sílice	0.325	0.325	0.325	0.325
HRWR	0.027	0.041	0.054	0.068
Agua	0.280	0.237	0.222	0.215

Valores referenciales respecto al peso de cemento

Tabla 12. Dosificaciones base según variaciones a ACI 1996: Relaciones peso/peso respecto al cementante (Cemento y Humo de Sílice).

MATERIALES	ACI 1996	ACI96-A	ACI96-B	ACI96-C
Cementante (C+SF)	1.000	1.000	1.000	1.000
Arena Fina	1.081	1.081	1.081	1.081
HRWR	0.020	0.031	0.041	0.051
Agua	0.211	0.179	0.168	0.162

Valores referenciales respecto al peso total del cementante

¹ En la región no es común conseguir Cemento Portland según la norma ASTM C150 (INEN 152).

² En ninguna dosificación trabajada se incorporó Cuarzo Molido (Harina de Sílice); se priorizaron materiales.



- Minimizar la porosidad del compuesto optimizando la mezcla granular a través de una amplia distribución de clases de tamaño de partículas y reduciendo la relación W/B.
- Mejora de la microestructura mediante el tratamiento térmico posterior al fraguado para acelerar la reacción puzolánica del SF y aumentar las propiedades mecánicas.
- Mejora de la homogeneidad al eliminar el agregado grueso; disminución de los efectos mecánicos por su heterogeneidad.
- Aumento del comportamiento dúctil al agregar una fracción de volumen adecuada de pequeñas fibras de acero.

La adición de fibras (acero o vidrio) no se tomó en cuenta. Se fijó obtener una matriz suficientemente resistente con buenas características de trabajabilidad en estado fresco y cumplir con las condicionantes de UHPC. Se plantea marcar un camino sólido para futuras investigaciones.

Se presenta a continuación tres medidas importantes para una mezcla a pequeña escala:

- Evitar volatilidad de las partículas en la premezcla y durante periodos de mezclado con altas revoluciones.
- Entrega de la energía necesaria en las tres etapas de mezclado.
- Control de las condiciones climáticas al momento de realizar la mezcla.

La evaporación de agua con relaciones W/C tan bajas, la poca humedad en el ambiente y al calor generado por los largos tiempos de mezcla, pueden ser determinantes en las características finales del hormigón y su trabajabilidad.

El procedimiento de mezclado se subdivide en tres etapas:

- Premezclado: Adición de la fase seca de la mezcla (Materiales Cementicios, Agregados y Fillers).
- Adición de Líquidos y Nanomateriales: Contiene a todas las fases líquidas (Agua, HRWR, etc.); posteriormente se incorporan los nanomateriales.
- Mezclado Energético y Moldeo: La mezcla pasa por varios estados antes de presentar una consistencia fluida; luego es moldeada en sus respectivos moldes.

La Figura 40 presenta una línea de tiempo resumida sobre el proceso de mezclado; se describen tiempos promedios y cambios en la velocidad de la batidora. La Figura 41 presenta la simbología utilizada y un código QR de enlace multimedia con el proceso grabado en laboratorio.

3.5.1. ETAPA 1: PREMEZCLADO ADICIÓN DE MATERIAL SECO

- Se pesan todos los materiales en recipientes acordes al tipo y cantidad.
- Se humedece todos los equipos y herramientas que estarán en contacto con la mezcla.
- Se incorpora primero la Arena de Sílice Fina, luego el Cemento, y por último el Humo de Sílice.

Es importante verificar la velocidad de evaporación sobre las superficies y con especial énfasis sobre el bowl y la paleta de la batidora. Debido a que son superficies que están en contacto directo durante todo el periodo de premezcla y mezcla, su capacidad de adsorber y evaporar agua es alta. Un procedimiento utilizado por los autores para

contrarrestar estos procesos fue humedecer la superficie del bowl y agitarlo hasta verificar visualmente alguna zona en proceso de secado natural; inmediatamente se agrega la arena.

MEZCLADO EN SECO

- Se coloca el bowl y la paleta e inmediatamente se cubre con una tapa o un material no absorbente.

El objetivo es evitar la pérdida de partículas volátiles en el premezclado. Se utilizaron fundas plásticas que funcionaron efectivamente como cubierta; el material perdido fue mínimo. Se recomienda mantener cubierto el bowl durante todo el proceso de mezclado y moldeo.

- Se enciende la batidora en velocidad 1 (Ver ASTM C305) y se premezcla durante 2 minutos (ver Figura 42).

El tiempo de premezclado puede ser optimizado, sin embargo, se siguieron las recomendaciones dadas por la FHWA (Graybeal, 2006; Haber et al., 2018).

3.5.2. ETAPA 2: ADICIÓN DE LÍQUIDOS Y NANOMATERIALES

PREMEZCLADO DE AGUA Y ADITIVOS

- Se combinan todos los elementos líquidos y se agrega el 80% a la mezcla seca en el minuto 2 en un rango de 30 segundos.
- Se mezcla hasta los 5 minutos (ver Figura 43).

Algunos autores recomiendan agregar solamente el 50% del HRWR combinado con agua, luego de un minuto agregar el 50% restante y finalmente luego de otro minuto incorporar acelerante (si es el caso).

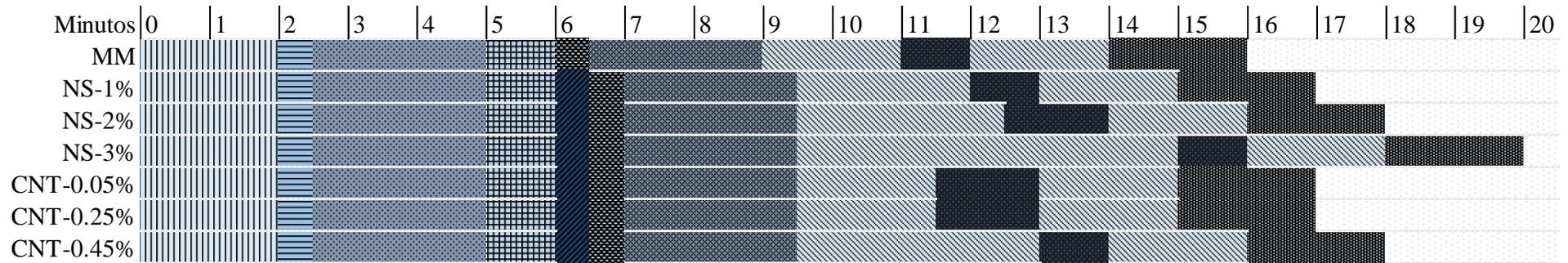


Figura 40. Línea de Tiempo del Procedimiento de Mezclado.

Figura 41. Simbología del Procedimiento de Mezclado y código QR de enlace multimedia.

ETAPA	VELOCIDAD BATIDORA	SIMB.	DETALLE
PREMEZCLADO	1	Vertical lines	Adición de Material seco y Mezclado
ADICIÓN LIQ. Y NANO.	1	Horizontal lines	Adición del 80% de la fase líquida
	1	Diagonal lines (top-left to bottom-right)	Mezclado hasta los 5 minutos
	0	Grid pattern	Limpieza de bowl y paleta
	0	Dark diagonal lines (top-right to bottom-left)	Adición de Nanomateriales
	1	Dark grid pattern	Adición del 20% remanente de fase líquida
	1	Diagonal lines (bottom-left to top-right)	Mezclado a baja revoluciones
MEZCLA ENERG.	2	Diagonal lines (top-left to bottom-right)	Mezclado a medianas revoluciones
	1	Dark horizontal lines	Mezclado a bajas revoluciones: Gránulos brillosos
	2	Diagonal lines (bottom-left to top-right)	Mezclado a medianas revoluciones: Pasta
MOLDEO	3	Dark grid pattern	Mezclado a altas revoluciones: Mezcla fluida
	0	Light grid pattern	Fin de Mezclado

	MM Muestra Maestra
	NS Nanosilice incorporado
	CNT Nanotubos de Carbono incorporado

Usualmente si se utiliza cemento de resistencias altas a edades tempranas (Tipo HE o Tipo III), no se suele incorporar acelerantes a la mezcla.

LIMPIEZA DEL BOWL Y PALETA

➤ En el minuto 5, se apaga la batidora, se limpian el material adherido a las paredes del bowl a lo largo de un minuto.

La apariencia de la mezcla en este punto debe ser semejante a un polvo levemente húmedo.

ADICIÓN DE NANOMATERIALES Y REMANENTE DE FASE LÍQUIDA

Las mezclas preliminares y la MM no presentan incorporación de nanomateriales; directamente se adiciona el remanente de la fase líquida y se bate hasta el minuto 9.

➤ Con la batidora apagada se agrega cuidadosamente el nanomaterial.



Figura 42. Premezclado de Cemento, Humo de Sílice y Arena.



Figura 43. Mezcla con el 80% de la fase líquida.



Figura 44. Mezcla con adición de Nanomaterial.



Figura 45. Mezcla con el 100% de adición de la fase líquida.



Figura 46. Mezcla húmeda.



Figura 47. Formación de grumos.



Figura 48. Formación de masa.



Figura 49. Masa poco fluida.



Figura 50. Masa semifluida.



Figura 51. Mezcla fluida.

No se define una única manera para adicionar los nanomateriales. Algunos autores proponen disolverla en la fase líquida; en este caso, existe el riesgo, en mezclas a pequeña escala, de que parte importante de material se quede pegado al recipiente.

- En un rango de 30 segundos, se deberá agregar el nanomaterial, cubrir el bowl y encender la batidora.
- Los siguientes 30 segundos, se batirá el material y el nanomaterial (tiempo de mezclado 7 minutos, ver Figura 44)
- Finalmente se agrega el 20% de agua restante.

Hasta este punto, el tiempo de mezcla no sobrepasará los 8 minutos (ver Figura 45).

3.5.3. ETAPA 3: MEZCLADO ENERGÉTICO Y MOLDEO

Desde este punto, los tiempos de mezcla empiezan a variar en función de la viscosidad. La energía necesaria impartida variará según la cantidad de nanomaterial agregado y la consistencia y fluidez especificada.

Al repetir cualquier mezcla (en condiciones ambientales similares), las variaciones bajo la misma dosificación no deberían variar ± 15 segundos. Si existen anomalías, se recomienda verificar la fluidez.

CAMBIO DE VELOCIDAD 1 A VELOCIDAD 2

- Entre el minuto 9 y 10 de mezcla, se cambia de velocidad 1 a velocidad 2 (ver ASTM C305).

La intención es aumentar la energía de mezclado para que actúe el HRWR como hiperplastificante.

Dentro del periodo de 2 a 5 minutos (de 11 a 15 minutos de tiempo de mezclado) todas las mezclas pasarán por cuatro fases. Las fases se presentan como estados visuales y tangibles en el cambio de consistencia y estructura de la mezcla:

- Polvo levemente húmedo (ver Figura 46): Aparentemente, la mezcla no presenta ninguna señal de desarrollo de fluidez.

Se puede realizar una prueba práctica para conocer el estado verdadero de la mezcla. Se amasa con los dedos una pequeña porción y se verifica si existe plasticidad.

- Formación de pequeños gránulos brillosos (ver Figura 47): Entre 1 a 3 minutos (10 y 13 minutos de tiempo de mezclado), la mezcla empieza a mostrar pequeñas partículas brillosas.

Los gránulos presentan una superficie húmeda, efecto del HRWR que empieza su acción.

- Formación de gránulos de mayor tamaño (ver Figura 48): La masa empieza a resistir ante el movimiento.

Se recomienda disminuir la velocidad.

- Formación de pedazos de masa semiblanda (ver Figura 49): En este punto el tiempo de mezclado será de 11 a 15 minutos.

Es conveniente bajar a velocidad 1 como se especifica en el siguiente punto.

CAMBIO DE VELOCIDAD 2 A VELOCIDAD 1

- Este cambio es necesario solamente si la batidora no tiene la suficiente energía para continuar el proceso de mezclado. Normalmente fluctúa entre 1 a 2 minutos hasta alcanzar una consistencia fluida suficiente.

CAMBIO DE VELOCIDAD 1 A VELOCIDAD 2

- Con una fluidez visible (ver Figura 50 y Figura 51), se incrementa a velocidad 2 durante 2 minutos más.

En este punto, el tiempo de mezclado será entre 13 y 18 minutos.

CAMBIO DE VELOCIDAD 2 A VELOCIDAD 3

- Finalmente, se sube a velocidad 3 durante 2 minutos más. En este punto, el tiempo de mezclado oscilará entre 15 y 20 minutos para presentar la fluidez deseada (ver Figura 51).

FIN DEL MEZCLADO

- Se apaga la mezcladora, se retira la cubierta y paleta.
- Se procede inmediatamente con la prueba de fluidez según ASTM C1437 y el respectivo moldeo de muestras según normativas ASTM C109 y ASTM C192.

3.5.4. ENDURECIMIENTO DE ESPECÍMENES

- Moldeados los especímenes, pasarán a un ambiente sellado y húmedo durante 24 horas.
- Se desencofran las muestras y se someten al régimen de curado predeterminado.

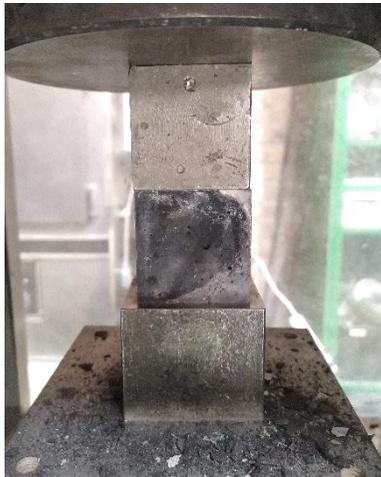


Figura 52. Espécimen cúbico de 50 mm de arista bajo ensayo a compresión simple.



Figura 53. Espécimen cilíndrico bajo ensayo a compresión simple.

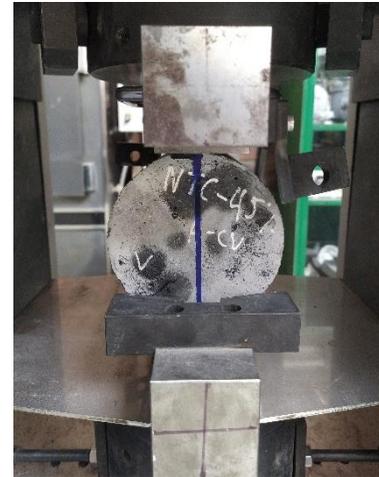


Figura 54. Espécimen cilíndrico bajo ensayo a tracción por compresión diametral.



Figura 55. Espécimen cilíndrico bajo ensayo de Módulo de Elasticidad.

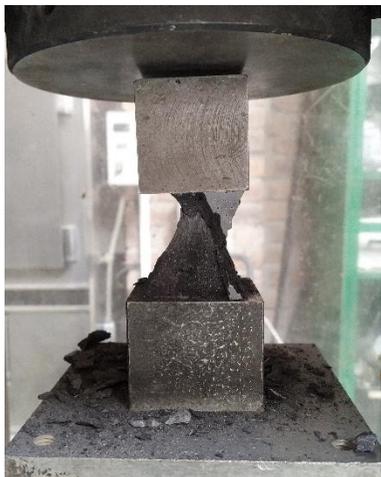


Figura 56. Espécimen cúbico ensayado bajo compresión simple.



Figura 57. Espécimen cilíndrico ensayado bajo compresión simple.



Figura 58. Espécimen cilíndrico ensayado bajo tracción indirecta.



Figura 59. Terminado liso mediante corte de especímenes cilíndricos.

No se proporcionará temperatura a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ debido a la falta de un cuarto de curado normado.

3.5.5. CURADO DE ESPECÍMENES

PISCINA DE CURADO TEMPERATURA AMBIENTE

- Los especímenes pasan a ser sumergidos inmediatamente a la piscina de curado a temperatura ambiente (18°C) hasta su fecha de ensaye.

PISCINA DE CURADO TEMPERATURA CONTROLADA

Los especímenes pasan por un proceso de variación de temperatura progresivo para evitar cualquier inconveniente con la expansión/contracción térmica del hormigón (ver Figura 60).

- Se utiliza el Baño de Agua Humboldt H-1390 hasta alcanzar progresivamente la temperatura de 60°C en un periodo de 2 horas.
- Se trasladan las muestras calientes a la piscina de curado que se encuentra a 60°C .
- Se deja reposar las muestras durante 48 horas.
- Se separan los especímenes de la piscina hacia un recipiente con agua a la misma temperatura; se dejan enfriar progresivamente las muestras durante 12 horas.
- Finalmente se depositan en la piscina de curado a temperatura ambiente hasta su fecha de ensaye.

3.5.6. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS

COMPRESIÓN SIMPLE

- En especímenes cúbicos de 50 mm de arista se continuó con el Procedimiento descrito en la norma ASTM C109 con una velocidad alterna de rotura de 1.0 MPa/s.
- Para muestras cilíndricas, se ensayó según el Procedimiento de la norma ASTM C39 a una tasa de rotura de 0.25 MPa/s.

Las recomendaciones descritas por el FHWA proponen velocidades de rotura mayores, debido a que los ensayos tardan demasiado tiempo en realizarse. Para el ensayo a compresión simple según la ASTM C39 y C109, el FHWA utiliza una tasa de carga de 1 MPa/s en ensayos sobre especímenes cúbicos y cilíndricos. Se especifica que este cambio en la tasa de carga no afecta a las propiedades físicas al momento de ensayar (Graybeal, 2006; Haber et al., 2018; Russell & Graybeal, 2013).

Los ensayos se realizaron sobre la prensa Shimatzu Concreto 2000X. Ninguna muestra fue ensayada bajo recapeo.

En el caso de las muestras cúbicas, se aplicó la carga en las caras perpendiculares a la dirección de compactación. La falta de aditamentos específicos al momento del ensayo produjo algunos resultados atípicos.

Para las muestras cilíndricas, se realizó un pulido/corte de la superficie superior. Las caras no deben presentar imperfecciones al momento del ensayo. Se procedió con el uso de Neoprenos marca Forney Durómetro 60 para las muestras cilíndricas. No son recomendados para cargas mayores a 50 MPa, sin embargo, su uso permitió obtener resultados coherentes y poco dispersos.

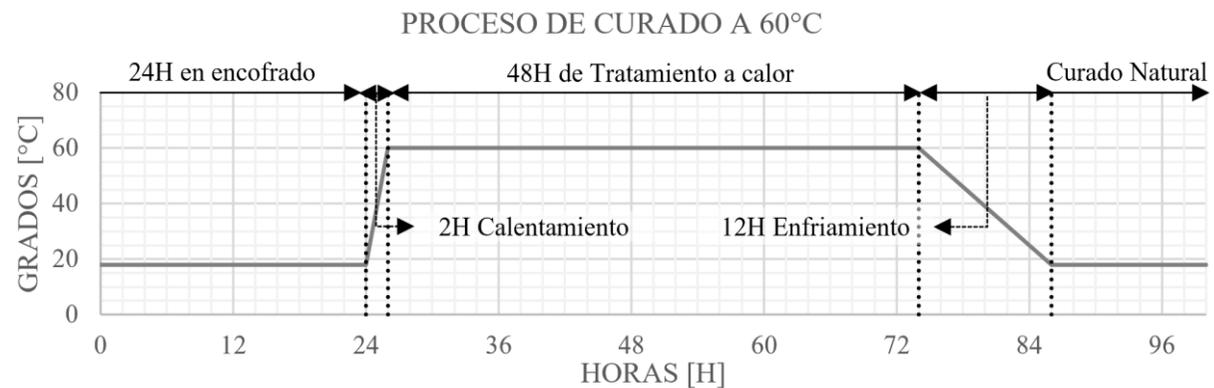


Figura 60. Proceso de curado bajo régimen con irradiación de calor a 60°C .

TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL

- El ensayo se realizó bajo el Procedimiento de la norma ASTM C496. El FHWA recomienda utilizar una carga de 3.4 MPa/min.

Se indica que este aumento en la tasa de carga no debería causar cambios significativos en el comportamiento de los materiales (Graybeal, 2006; Haber et al., 2018). Para este ensayo, se utilizaron los aditamentos específicos de la prensa Shimatzu Concreto 2000X para el ensayo a Tracción por Compresión Diametral.

MÓDULO DE ELASTICIDAD

- Se procedió según la norma ASTM C469 para especímenes cilíndricos moldeados.

Se aplica una tasa de carga de 0.25 MPa/s. Para este ensayo, se utilizaron los aditamentos específicos de la prensa Shimatzu Concreto 2000X para el ensayo de Módulo de Elasticidad.

VELOCIDAD DE PULSO DE ONDA

- En estado saturado superficialmente seco, se procede a ensayar según norma ASTM C597.

Se realizaron tres mediciones por cada muestra. Se utilizó el equipo Ultrasónico TICO. Como material de acople entre los transductores y las caras lisas del cilindro se utilizó gel comercial.

3.5.7. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD

Se implementa la herramienta PaLATE v2.2 e información de literatura consultada para conformar

un análisis de ciclo de vida (LCA). Se analizó el Consumo Energético y la Huella de Carbono correspondiente a la etapa de extracción de materia prima, transporte y producción de UHPC. Adicionalmente, se realiza una comparación entre el uso del UHPC y el hormigón convencional aplicado al diseño de puentes.

Se analizan los costos correspondientes a la MM y mejores dosificaciones de cada implementación de nanomaterial. Se proyectan los beneficios a largo plazo con el uso de UHPC.



Figura 61. Enlace multimedia: Rotura de Espécimen cilíndrico a compresión simple.



Figura 62. Enlace multimedia: Ensayo a tracción por compresión diametral.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primera instancia se estudia el efecto de la reducción del agua y aumento del HRWR bajo una trabajabilidad similar según la Tabla 13. Luego se sintetizan los valores obtenidos en el ensayo a compresión de cubos referente a la MM a 1, 3, 7, 14, 28, 56 y 90 días de edad y se obtienen las curvas de maduración de las muestras curadas a temperatura ambiente (18 °C) y temperatura controlada (60 °C). Posteriormente, se comparan las curvas de maduración de las dosificaciones con adición de nanomaterial. Para temperatura ambiente, se comparan las edades a 3, 7, 14, 28 y 56 días, mientras que para temperatura controlada a 7 y 28 días.

Se evalúan los datos obtenidos con las muestras cilíndricas ensayadas a compresión a los 28 días y se procede a obtener el Factor de Forma mejor ajustado. Paralelamente se toman los datos de tracción, módulo de elasticidad y velocidad de pulso, y se analizan los resultados obtenidos. Por último, se desarrolla un estudio simplificado y referencial sobre los costes de producción y sostenibilidad.

Tabla 13. Dosificaciones base según variaciones a ACI 1996: Relaciones peso/peso respecto al cemento [Repetición].

MATERIALES	ACI 1996	ACI96-A	ACI96-B	ACI96-C
Cemento	1.000	1.000	1.000	1.000
Arena Fina	1.432	1.432	1.432	1.432
Humo de Sílice	0.325	0.325	0.325	0.325
HRWR	0.027	0.041	0.054	0.068
Agua	0.280	0.237	0.222	0.215

Valores referenciales respecto al peso de cemento

4.1. VARIACIONES EN HRWR Y AGUA, Y SUS EFECTOS EN LA RESISTENCIA

Para obtener un panorama claro del potencial de las dosificaciones probadas, todas pasaron por un proceso de replicación y disminución en su relación W/C manejando una fluidez cercana al 100%. En muchos casos, se necesitaban cantidades altas de HRWR (8.0% p/p respecto al cemento), sin embargo, retrasaban el proceso de hidratación del cemento.

Con bases en un debido control del HRWR, se procedió a mantener valores máximos hasta el 6.8%, los cuales, reportaban valores mejorados reduciendo la relación W/C. La Tabla 13 muestra las variaciones realizadas para fijar la muestra MM. Para determinar la resistencia a la compresión se realizaron especímenes cúbicos de 50 mm de arista y se ensayaron bajo las especificaciones técnicas de la Norma ASTM C109.

En la Figura 63, se puede observar una disminución en la resistencia según el incremento de HRWR a pesar de que la relación W/C se reduce. Por

lo tanto, a los 28 y 56 días, la muestra ACI96-A presenta una resistencia de 131 MPa y 147 MPa respectivamente que son aproximadamente un 7% superior a las otras muestras.

Consecuente a la optimización en materiales y un leve retraso en el endurecimiento de los especímenes, se procede a fijar a la dosificación ACI96-A como la dosificación maestra MM.

4.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE SOBRE ESPECÍMENES CÚBICOS

Los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a la compresión realizadas de acuerdo con las especificaciones de la Norma ASTM C109. Se presentan las curvas de maduración para la MM y las muestras según el porcentaje de incorporación de nanosilice y nanotubos de carbono según el tipo de régimen de curado.

4.2.1. MUESTRA MAESTRA

En la Figura 64 se observan los resultados de la resistencia a compresión, tanto para curado a temperatura ambiente (18 °C) y curado a temperatura controlada (60 °C).

Mediante un régimen de curado térmico, la resistencia de la MM a los 28 y 56 días incrementó aproximadamente en un 25% (de 132 MPa a 166 MPa) y 11% (de 149 MPa a 166 MPa) respectivamente respecto al régimen de curado a temperatura ambiente.

CURVAS DE MADURACIÓN - ACI 1996

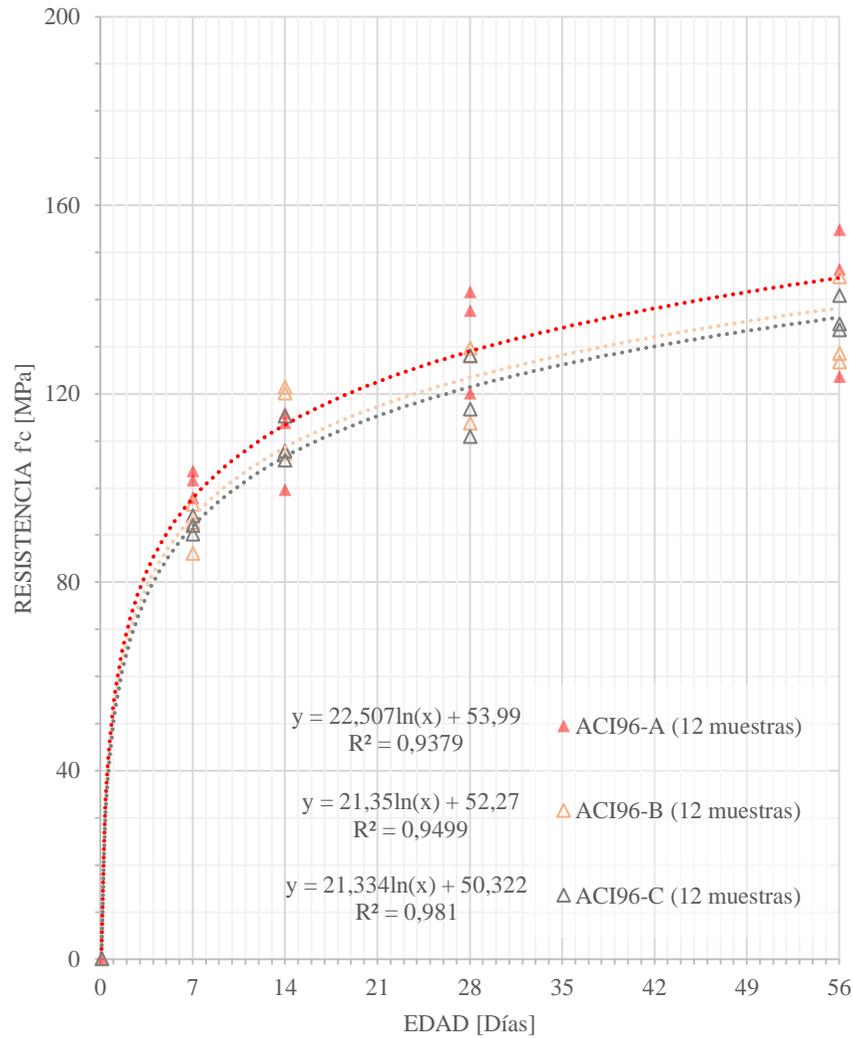


Figura 63. Curvas de maduración, dosificaciones ACI 1996.

CURVAS DE MADURACIÓN MM - 18°C y 60°C

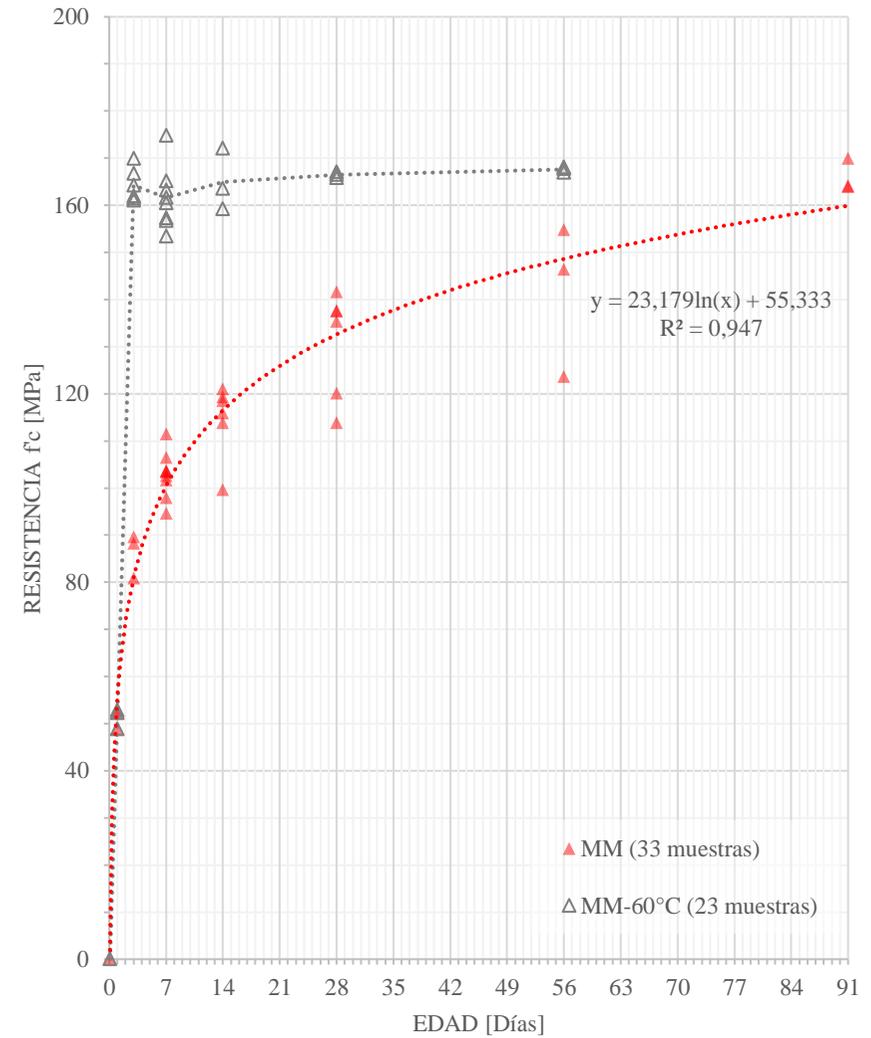


Figura 64. Curvas de maduración Muestra Maestra bajo regímenes de curado a temperatura ambiente (18°C) y temperatura controlada (60°C).

Bajo el régimen de curado térmico la resistencia a los 7 días de la MM es aproximadamente el 97% de la resistencia a los 28 días.

4.2.2. NANOSÍLICE

Los resultados de la resistencia a compresión con la incorporación de NS (p/p a cemento) a la MM, se muestran gráficamente bajo los diferentes regímenes de curado (ver Figura 66 y Figura 67). Se observa que la incorporación de NS en diferentes porcentajes, provoca un incremento de la resistencia a la compresión con respecto a la MM, independientemente del régimen de curado al que fueron sometidas las muestras.

TEMPERATURA AMBIENTE (18 °C)

La resistencia a compresión con la incorporación de NS a la MM presentan un incremento significativo a partir de los 3 días de curado. El NS-2% presenta mejor resistencia sobre los otros dos porcentajes. Se puede destacar que la resistencia es aproximadamente un 10% mayor a la MM a los 28 (132 MPa y 146 MPa respectivamente) y a los 56 días (149 MPa y 164 MPa respectivamente).

TEMPERATURA CONTROLADA (60°C)

Bajo este régimen de curado, la resistencia a la compresión a los 7 días es aproximadamente el 96% de la resistencia que presentan las muestras a los 28 días, por consiguiente, el incremento de la resistencia es lenta a partir de los 7 días (Ver Figura 67).

La resistencia del NS-2% a los 28 días mediante curado térmico fue aproximadamente un 8% superior a la MM, 166 MPa y 178 MPa respectivamente.

4.2.3. EFECTO DEL CONTENIDO DE NS

El incremento de las propiedades mecánicas según Lee et al. (2018) & Yu et al. (2014) se debe a que el NS tiene tres funciones principales en los materiales a base de cemento:

- Efecto de relleno: Optimiza la estructura de los poros y reduce las áreas porosas.
- Efecto de nucleación: Ayuda a producir más productos de hidratación gracias a su gran superficie específica.
- Efecto puzolánico: Acelera el proceso de hidratación.

Por otra parte, según Li et al. (2015) & Yu et al. (2014) la incorporación de NS en exceso no mejora las propiedades mecánicas. El efecto se debe a los siguientes factores:

- Dificulta la dispersión uniforme.
- Aumenta la viscosidad de la mezcla, ocasionando que en las mezclas frescas quede atrapado más aire y la porosidad del hormigón endurecido aumente (ver Figura 65).
- Requiere un mayor consumo de agua que la mayoría de los otros nanomateriales con la misma superficie específica.

4.2.4. NANOTUBOS DE CARBONO

Los resultados de la resistencia a compresión con incorporación de CNT (p/p) a la MM se muestran gráficamente en la Figura 74 y Figura 75. Se puede constatar que la incorporación de CNT en diferentes porcentajes provoca incremento en la resistencia a la compresión con respecto a la MM independientemente del tipo de curado.

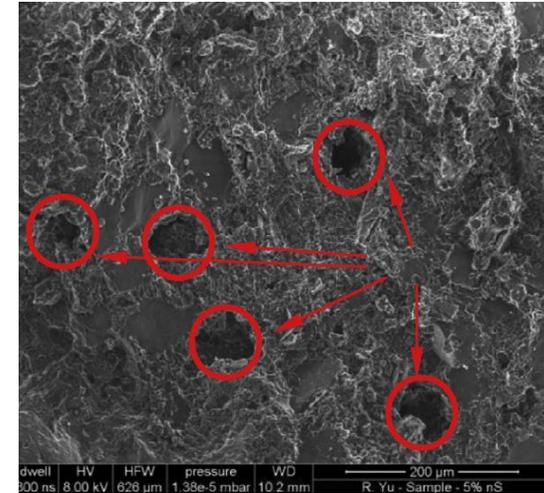


Figura 65. Imagen SEM – Poros en matriz por exceso de Nanosílice, Fuente: Yu et al. (2014)

TEMPERATURA AMBIENTE (18 °C)

En la Figura 74 se observa que todas las muestras con CNT presentan una ganancia de resistencia considerable a partir de los 3 días respecto a la MM. El porcentaje óptimo de incorporación de CNT corresponde al 0.25%.

La resistencia a compresión del CNT-0.25% es aproximadamente un 12% más alta que la observada en la MM a los 28 días (132 MPa y 147 MPa respectivamente) y 56 días (149 MPa y 167 MPa respectivamente).

TEMPERATURA CONTROLADA (60°C)

La Figura 75 señala en todas las muestras, una resistencia a la compresión de aproximadamente el 92% del valor a los 28 días en los primeros 7 días de curado. La ganancia de la resistencia es lenta a partir de los 7 días.

CURVAS DE MADURACIÓN NS

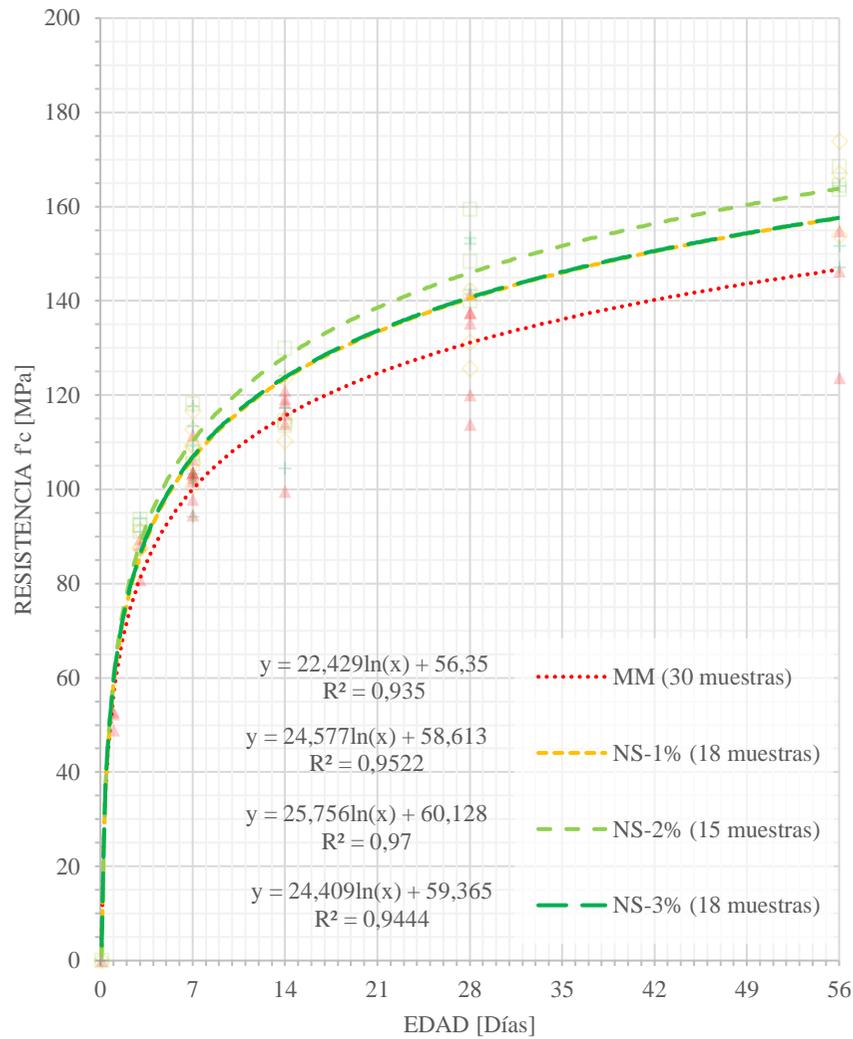


Figura 66. Curvas de maduración con adición de Nanosilíce al 1%, 2% y 3%.

CURVAS DE MADURACIÓN NS - 60°C

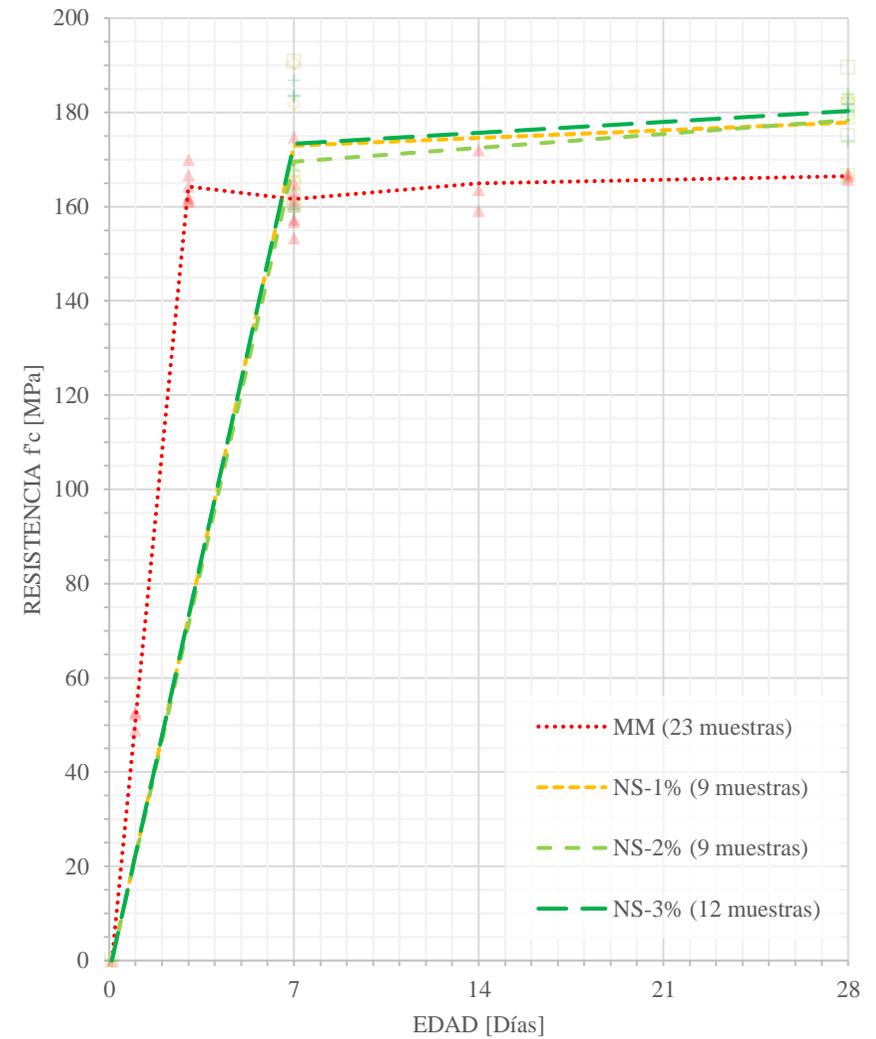


Figura 67. Curvas de maduración con adición de Nanosilíce al 1%, 2% y 3% bajo curado a 60°C.

CURVAS DE MADURACIÓN MM - 18°C y 60°C

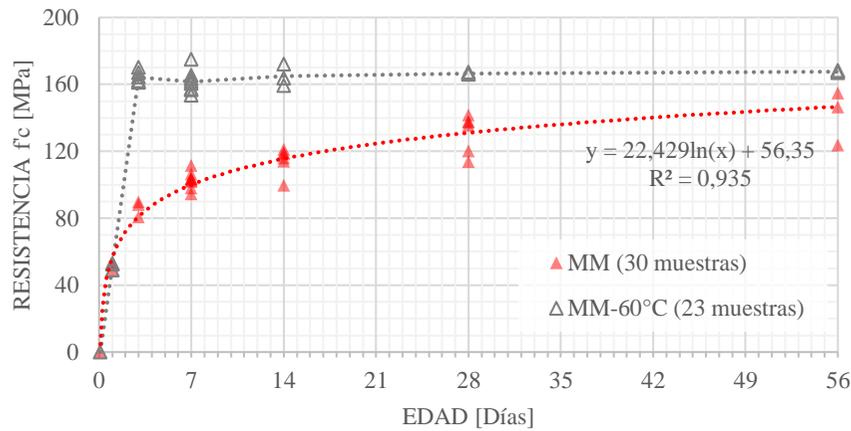


Figura 68. Curvas de maduración de Muestra Maestra bajo regímenes de curado.

CURVA DE MADURACIÓN NS-1% - 18°C y 60°C

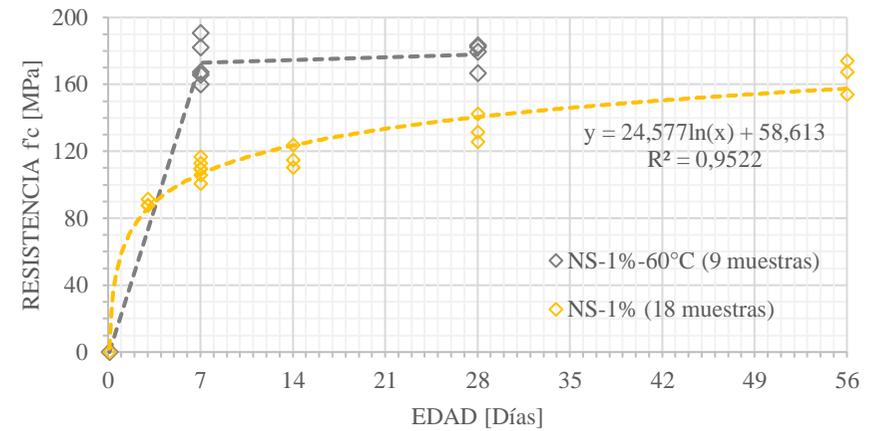


Figura 69. Curvas de maduración en 1% de adición p/p de Nanosílce bajo regímenes de curado.

CURVA DE MADURACIÓN NS-2% - 18°C y 60°C

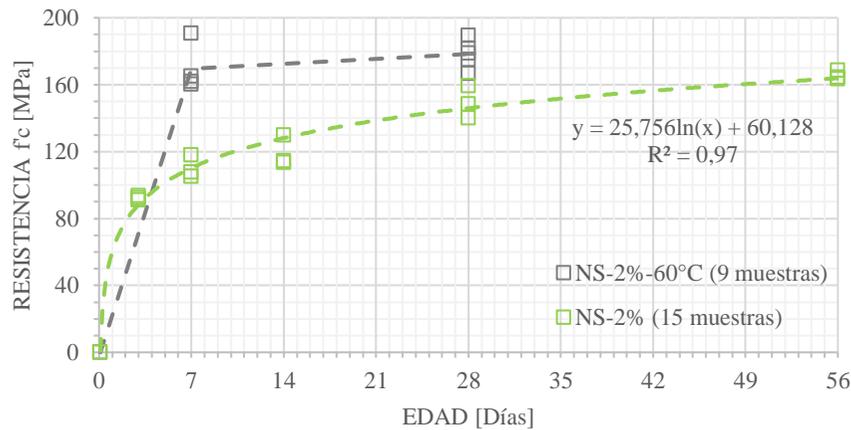


Figura 70. Curvas de maduración en 2% de adición p/p de Nanosílce bajo regímenes de curado.

CURVA DE MADURACIÓN NS-3% - 18°C y 60°C

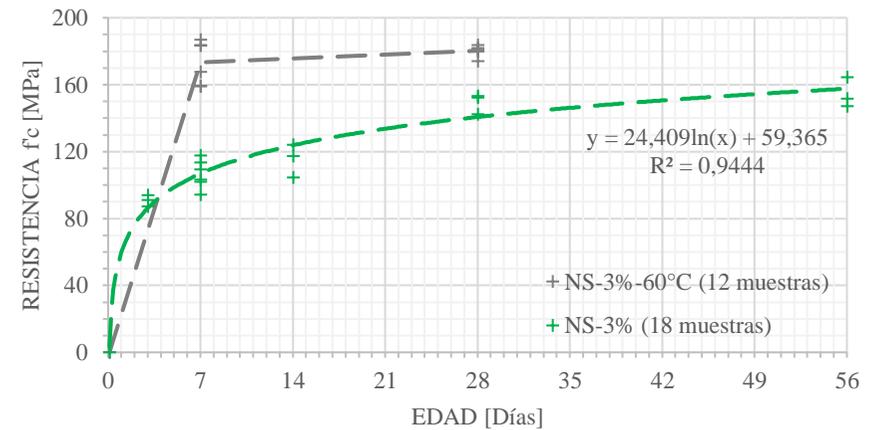


Figura 71. Curvas de maduración en 3% de adición p/p de Nanosílce bajo regímenes de curado.

El CNT-0.25% bajo este régimen de curado tiene una resistencia a compresión aproximadamente un 11% más alta que la observada en la MM (166 MPa y 184 MPa respectivamente) a los 28 días.

4.2.5. EFECTO DEL CONTENIDO DE CNT

El aumento de la resistencia al incorporar CNT puede atribuirse esencialmente al efecto de relleno, nucleación y puenteo proporcionado (Carriço et al., 2018; Jung et al., 2020).

- Efecto de relleno: Relleno de los poros con CNT (espacios entre los productos de hidratación).
- Efecto de nucleación: Su gran superficie específica funciona como sitios de nucleación para el crecimiento de los compuestos del cemento (gel CSH), promoviendo una hidratación más rápida y uniforme de los compuestos del cemento.
- Efecto de puenteo: Minimiza y limita la propagación de microgrietas a través de la matriz y el posterior crecimiento a macroescala (ver Figura 72).

Según Naqi et al. (2019) & Sanjeev et al. (2012) la incorporación de CNT en exceso provoca una reducción en las propiedades mecánicas:

- Se aglomeran alrededor de los granos de cemento dando lugar a una hidratación parcial del cemento y la creación de productos de hidratación con enlaces débiles.
- Forman cúmulos ocasionando que la unión entre los CNT y la matriz no sea muy efectiva. La falta de dispersión uniforme provoca que algunas hebras de CNT se encuentren entrelazadas entre sí y no conectados a la matriz (ver Figura 73).

4.2.6. EFECTO DEL RÉGIMEN DE CURADO

Se sabe que los silicatos tricálcicos (C_3S) y silicatos dicálcicos (C_2S) presentes en el cemento conducen a la formación gel CSH. La formación de CSH es el factor principal para la ganancia de resistencia del hormigón (Prem et al., 2013). La velocidad de hidratación en el curado a temperatura ambiente es lenta, lo que dificulta un desarrollo adecuado de la microestructura de los CSH.

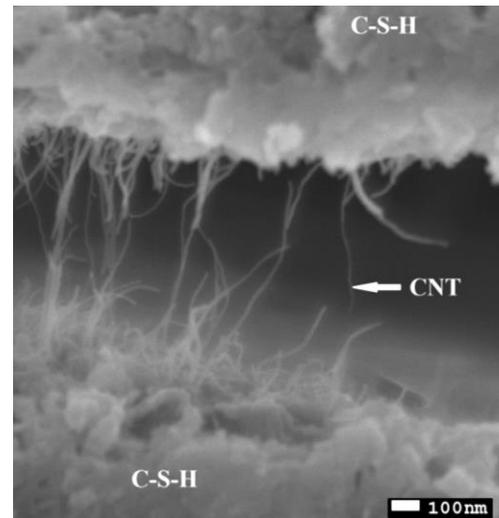


Figura 72. Imagen SEM - Puenteo de microgrietas y rotura de los MWNT en la matriz de una muestra fracturada, Fuente: Abu Al-Rub et al. (2012).

Para garantizar una hidratación más rápida se recurre a someter las muestras de UHPC a un régimen de curado térmico. El propósito es acelerar las reacciones puzolánicas entre el Hidróxido de Calcio (CH) de la hidratación del cemento, SF y SCM utilizados. Se forman CSH adicionales que rellenan los poros pequeños y generan una microestructura más densa; en consecuencia se obtiene un incremento

en las propiedades mecánicas (Esmaeili & Kasaei, 2016; Shen et al., 2019).

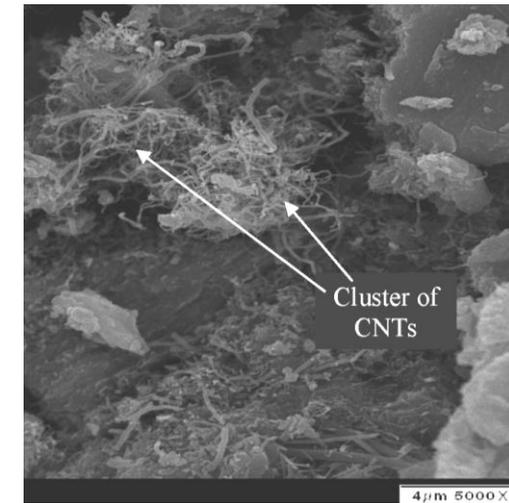
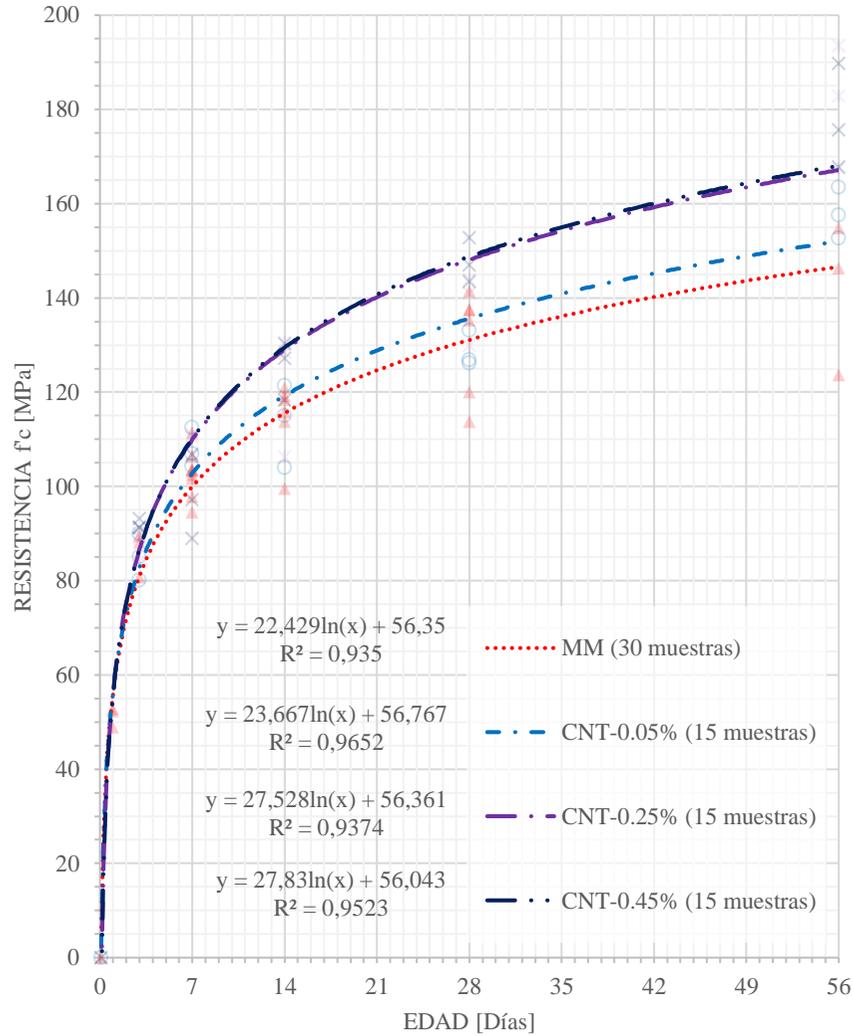


Figura 73. Imagen SEM - Dispersión del 1% de CNT en la matriz de cemento, Fuente: Sanjeev et al. (2012).

Según Prem et al. (Prem et al., 2013), la estructura física y química en el proceso de hidratación, presenta cambios a partir de un régimen de curado térmico de 45 °C. Generalmente el proceso de hidratación bajo un régimen de curado térmico (60 °C a 90 °C) de 24 a 48 horas origina un aumento de la resistencia a la compresión de hasta 30 MPa en comparación con las muestras que estuvieron en curado bajo temperatura ambiente durante 28 días (Janković et al., 2019).

Los resultados experimentales mostraron que el tratamiento térmico de UHPC resultó en una resistencia muy alta en un corto período de tiempo.

CURVAS DE MADURACIÓN CNT



CURVAS DE MADURACIÓN CNT - 60°C

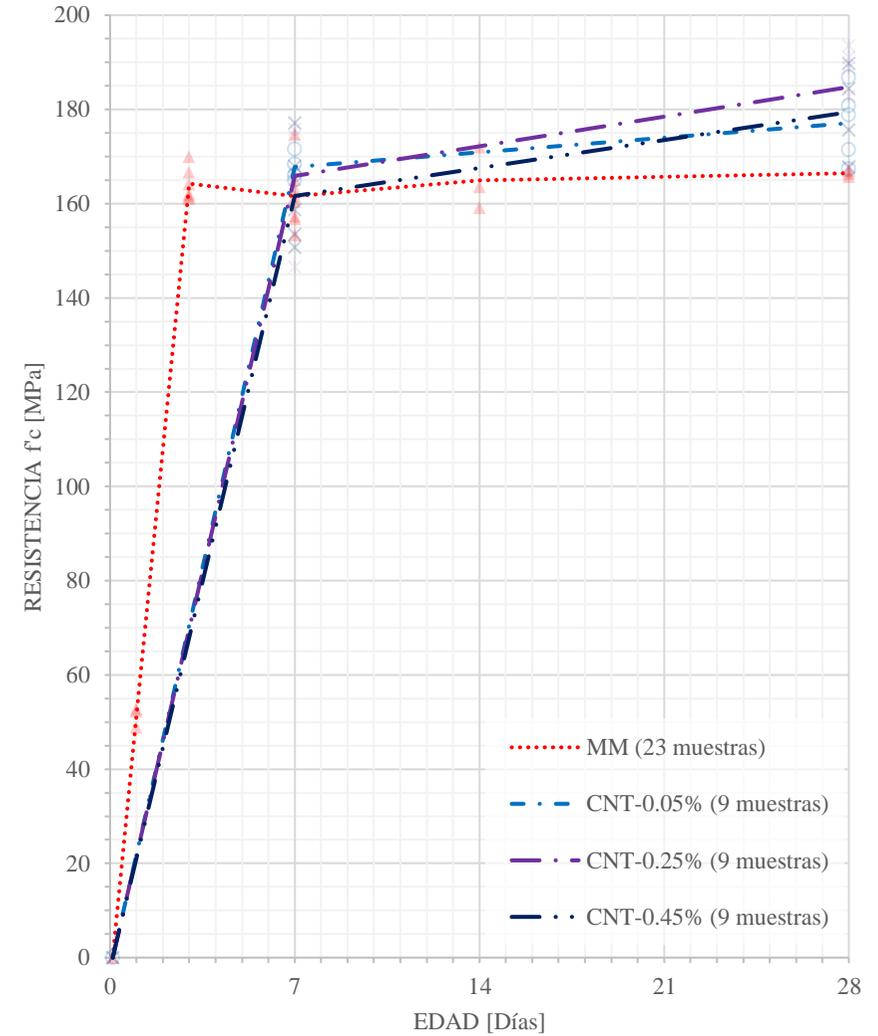


Figura 74. Curvas de maduración con adición de Nanotubos de Carbono al 0.05%, 0.25% y 0.45%. Figura 75. Curvas de maduración con adición de Nanotubos de Carbono al 0.05%, 0.25% y 0.45% bajo curado a 60°C.

CURVAS DE MADURACIÓN MM - 18°C y 60°C

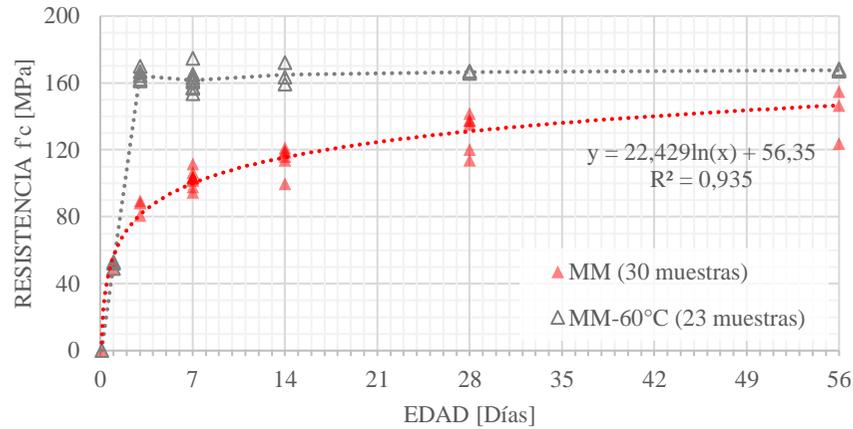


Figura 76. Curvas de maduración de Muestra Maestra bajo regímenes de curado [Repetición].

CURVA DE MADURACIÓN CNT-0.05% - 18°C y 60°C

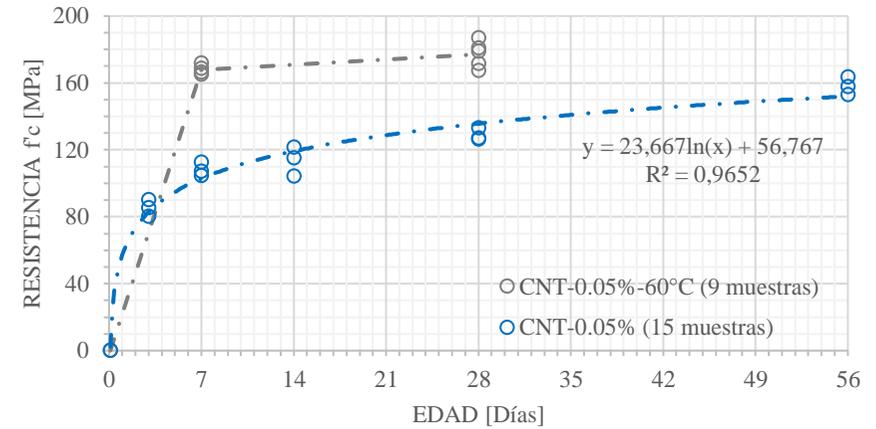


Figura 77. Curvas de maduración en 0.05% de adición p/p de Nanotubos de Carbono bajo regímenes de curado.

CURVA DE MADURACIÓN CNT-0.25% - 18°C y 60°C

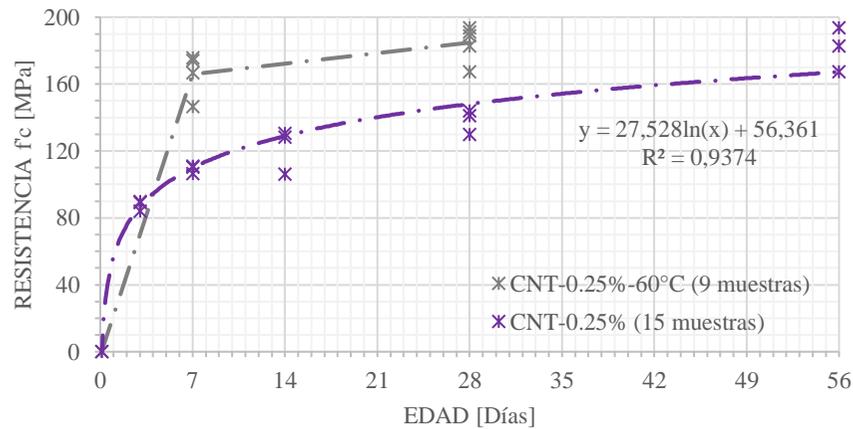


Figura 78. Curvas de maduración en 0.25% de adición p/p de Nanotubos de Carbono bajo regímenes de curado.

CURVA DE MADURACIÓN CNT-0.45% - 18°C y 60°C

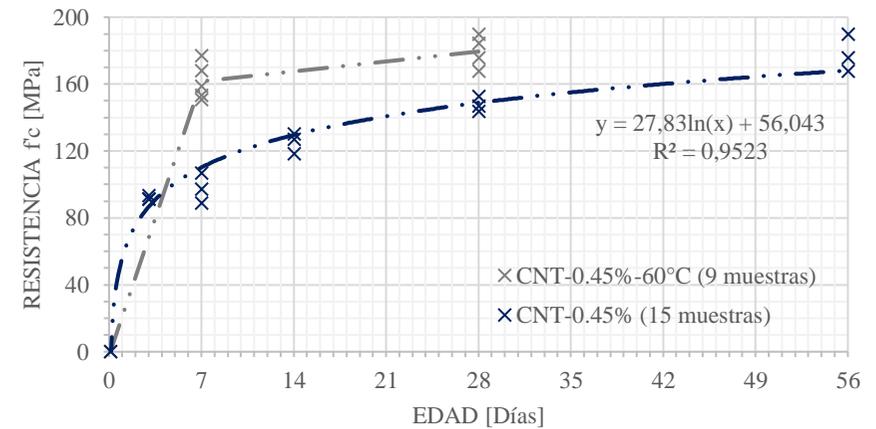


Figura 79. Curvas de maduración en 0.45% de adición p/p de Nanotubos de Carbono bajo regímenes de curado.

RESISTENCIA PROMEDIO A COMPRESIÓN
28 DÍAS - CILINDROS

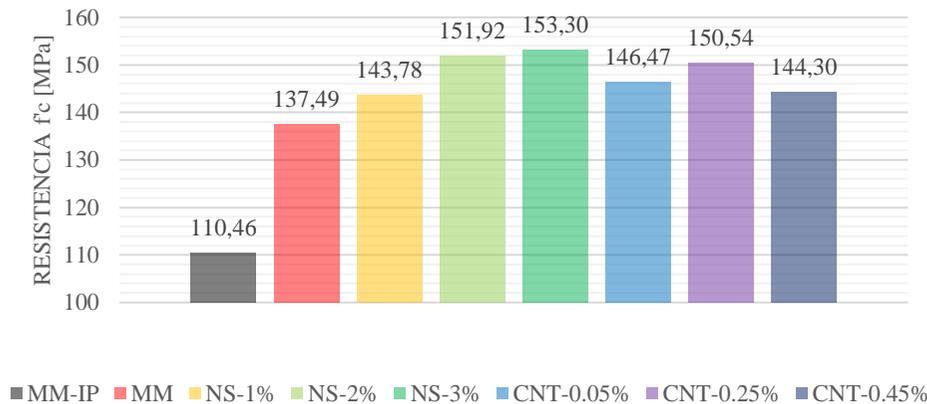


Figura 80. Resistencia promedio a la compresión de cilindros con 28 días de edad bajo curado natural.

RESISTENCIA PROMEDIO A COMPRESIÓN - 60°C
28 DÍAS - CILINDROS

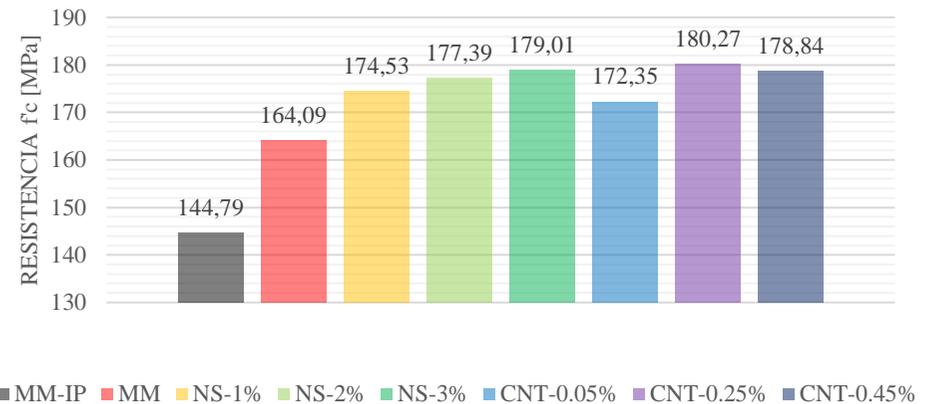


Figura 81. Resistencia promedio a la compresión en cilindros con 28 días de edad bajo curado a 60°C.

La resistencia compresión a los 7 días bajo curado a temperatura controlada aumentó entre el 20% y 30% en comparación con las muestras que se curaron a temperatura ambiente durante 28 días.

4.3. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS Y FACTOR DE FORMA

Se realizaron pruebas de resistencia a compresión a los 28 días en muestras cilíndricas de acuerdo con las especificaciones de la Norma ASTM C39. Los resultados se presentan gráficamente en la Figura 80 y Figura 81 para la MM y las muestras según el porcentaje de incorporación NS y CNT según el régimen de curado. Adicionalmente se realiza este ensayo a la mezcla MM-IP.

MUESTRA MAESTRA

La resistencia promedio de la muestra MM para el curado a temperatura ambiente (18 °C) y temperatura controlada (60 °C) es de 137.49 MPa y 164.09 MPa respectivamente. Someter la MM a un régimen de curado térmico incrementa la resistencia aproximadamente un 19% respecto al curado a temperatura ambiente.

NANOSÍLICE

De acuerdo con los resultados obtenidos en este ensayo se puede verificar el porcentaje óptimo de incorporación de NS es del 2% al igual que en las muestras cúbicas.

La resistencia promedio a compresión del NS-2% bajo un régimen de curado a temperatura controlada (60 °C) incremento aproximadamente un 15 % (de

respecto al régimen de curado a temperatura ambiente (18 °C). Por otra parte, la incorporación del 2% de NS originó una ganancia aproximadamente de un 9% de la resistencia respecto a la muestra MM independientemente del régimen de curado.

NANOTUBOS DE CARBONO

En los resultados obtenidos en este ensayo, se puede ver que el porcentaje óptimo de CNT en la MM es el 0.25% al igual que las muestras cúbicas.

Mediante el curado a temperatura controlada, la resistencia promedio del CNT-0.25% incrementa aproximadamente un 20% respecto a las muestras curadas a temperatura ambiente. La resistencia del CNT-0.25% es aproximadamente un 9% mayor a la resistencia de la MM, independientemente del régimen de curado.

RESISTENCIA PROMEDIO A TRACCIÓN
28 DÍAS - CILINDROS

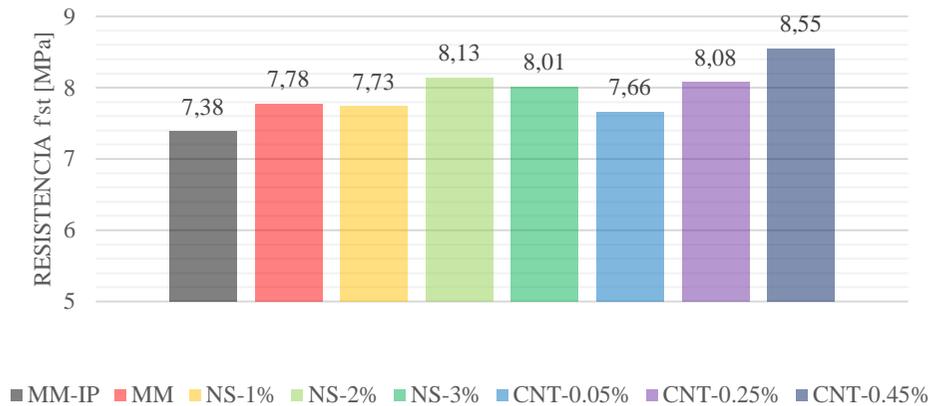


Figura 82. Resistencia promedio a tensión por compresión diametral en cilindros de 28 días de edad.

RESISTENCIA PROMEDIO A TRACCIÓN - 60°C
28 DÍAS - CILINDROS

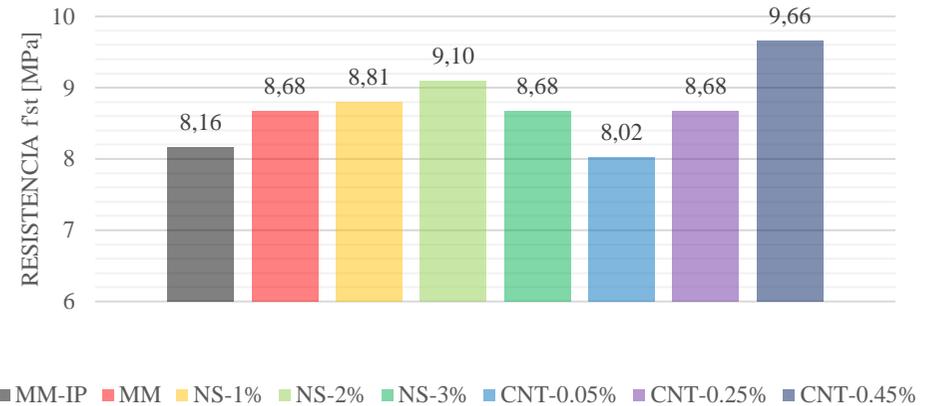


Figura 83. Resistencia promedio a tensión por compresión diametral en cilindros de 28 días de edad bajo curado a 60°C.

MUESTRA MAESTRA IP (MM-IP)

Los resultados a compresión tanto para temperatura ambiente y temperatura controlada son de 110.46 MPa y 144.79 MPa respectivamente. Si bien, los resultados a compresión en el curado a temperatura ambiente no se enmarcan como UHPC, se puede ver que con un régimen de curado térmico se puede lograr resistencias cercanas a los 150 MPa. El curado térmico incrementó la resistencia aproximadamente un 31%.

4.3.1. FACTOR DE FORMA

El tamaño de la muestra tiene una influencia significativa en la resistencia a la compresión, esto se debe probablemente a la mayor probabilidad de encontrar defectos de mayor tamaño en especímenes más grandes (Abbas et al., 2016). En consecuencia, las muestras cúbicas presentan una mayor resistencia

a compresión en comparación con las muestras cilíndricas.

De acuerdo con los resultados a compresión obtenidos tanto para especímenes cúbicos como especímenes cilíndricos el factor forma para las muestras de UHPC desarrolladas en este trabajo corresponde aproximadamente a 1.00.

4.4. RESISTENCIA A TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL

El ensayo de compresión diametral se realizó bajo las especificaciones de la Norma ASTM C496 en muestras de 28 días de edad. Los resultados de este ensayo para la MM y las muestras con la incorporación de NS y CNT se pueden ver gráficamente en la Figura 82 y Figura 83 según el tipo de curado. También se realizó este ensayo a la muestra MM-IP.

La incorporación de NS y CNT en diferentes porcentajes mejora levemente en la resistencia a tracción respecto a la MM. Por otra parte, el régimen de curado aumenta hasta un 10% la resistencia a tracción.

4.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Este ensayo se realizó bajo las especificaciones técnicas de la norma ASTM C469 en especímenes cilíndricos a los 28 días de curado. Los resultados del módulo de elasticidad para la MM y las muestras con la incorporación de NS y CNT se pueden ver en la Figura 84 y Figura 85 según el régimen de curado.

Es importante resaltar que la curva de esfuerzo - deformación por compresión de los UHPC, típicamente muestra una porción elástica lineal entre el 80% - 90% del valor máximo de esfuerzo (Graybeal, 2006). Generalmente los UHPC presentan

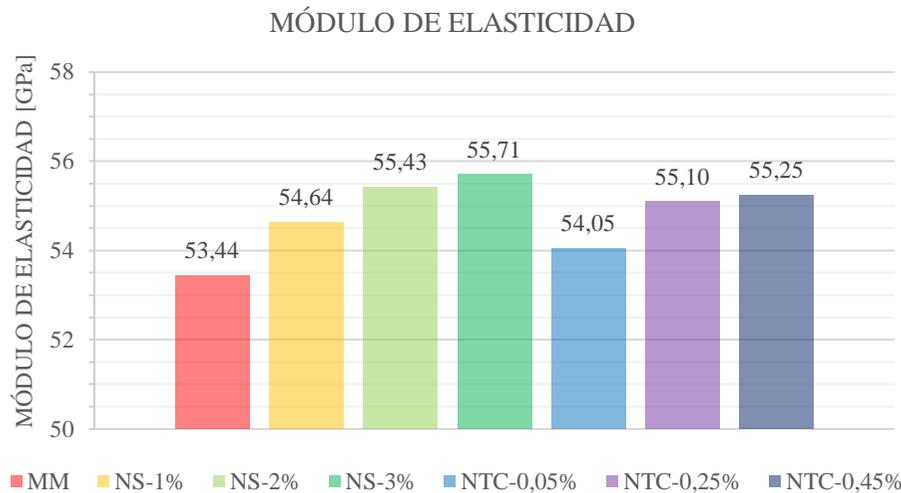


Figura 84. Módulos de elasticidad según dosificación bajo curado natural.

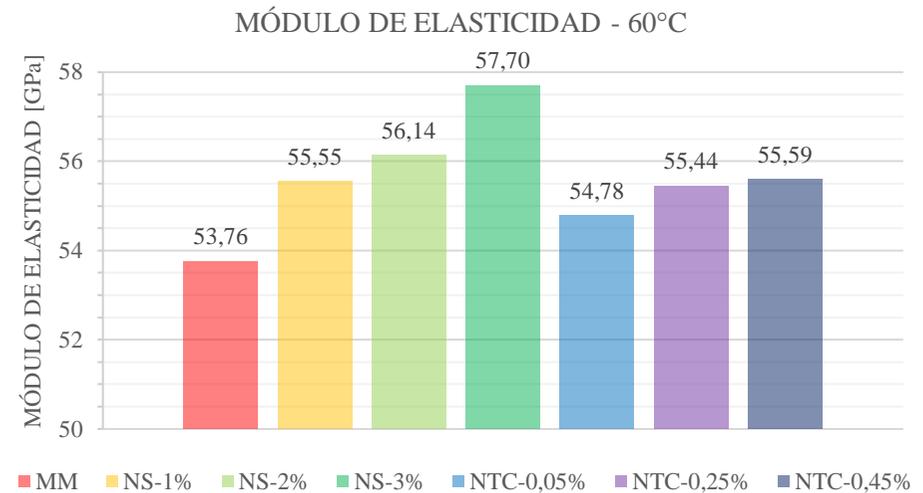


Figura 85. Módulos de elasticidad según dosificación bajo curado a temperatura controlada.

módulos de elasticidad en el rango de 40 GPa a 70 GPa (Haber et al., 2018).

Todas las muestras presentan un módulo de elasticidad superior a 53 GPa, por lo tanto, cumplen con los rangos establecidos para ser UHPC. El tipo de curado no tuvo influencia importante.

Según Abbas et al. (Abbas et al., 2016) en referencia a otras investigaciones, el módulo de elasticidad aumentó significativamente de 57 GPa a 70 GPa cuando las muestras son sometidas a curado a 250 ° C durante 48 horas.

En el caso de emplear microfibras de acero, el módulo de elasticidad incrementa aproximadamente un 7 % con la adición del 2% por volumen de UHPC (Alsalmán, Dang, Prinz, et al., 2017).

4.6. VELOCIDAD DE PULSO

Se ensayó según la Norma ASTM C597 sobre muestras con 28 días de edad; los resultados se muestran en la Figura 86 y Figura 87. Se puede destacar que la velocidad del pulso para las muestras NS-2% y CNT-0.25% son superiores a la de la MM en los dos regímenes de curado.

Tabla 14. Clasificación del hormigón según velocidad de pulso propuesta por Lessli y Chessman, Fuente: adaptado de Solís Carcaño et al. (2004).

VELOCIDAD ULTRASONICA, V [M/S]	CLASIFICACIÓN DEL HORMIGÓN
V > 4575	Excelente
4575 > V > 3660	Bueno
3660 > V > 3050	Cuestionable
3050 > V > 2135	Pobre
V < 2135	Muy Pobre

Todas las muestras presentan una velocidad de pulso superior a 4575 m/s lo que los cataloga como hormigones de excelentes condiciones (ver Tabla 14). Sin embargo, parece que la falta de humedad adecuada en el curado a temperatura controlada conduce a una disminución de los valores de velocidad de pulso (Prem et al., 2013).

4.7. DENSIDAD Y FLUIDEZ

La fluidez de cada mezcla se evaluó con base a la a las especificaciones de la Norma ASTM C 1437. Los resultados se muestran en la Figura 89. Se observa una disminución en la fluidez a medida que se incorpora una cantidad mayor de nanomateriales. La adición de NS y CNT incrementa la demanda de agua incrementa y/o HRWR. La mayoría de las muestras presentaron una fluidez en el rango plástico, excepto el NS-3% y el CNT-0.45%.

VELOCIDAD DE ONDA PROMEDIO POR MEZCLA

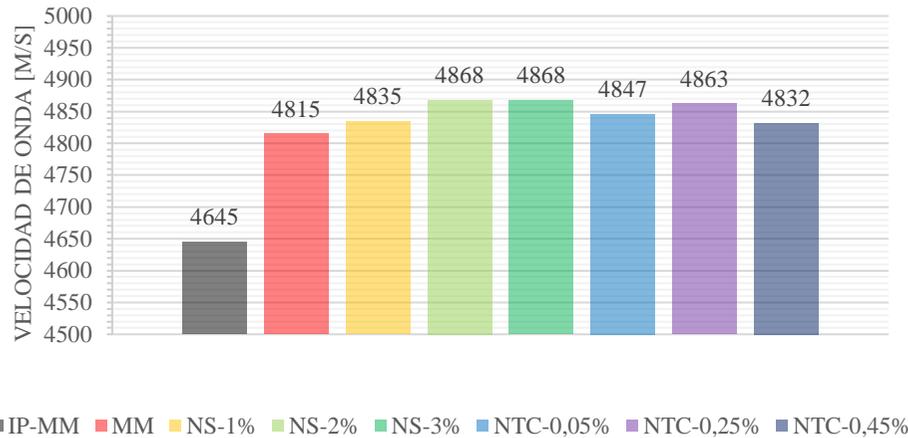


Figura 86. Velocidad de onda promedio por mezcla bajo curado a temperatura ambiente.

VELOCIDAD DE ONDA PROMEDIO POR MEZCLA - 60°C

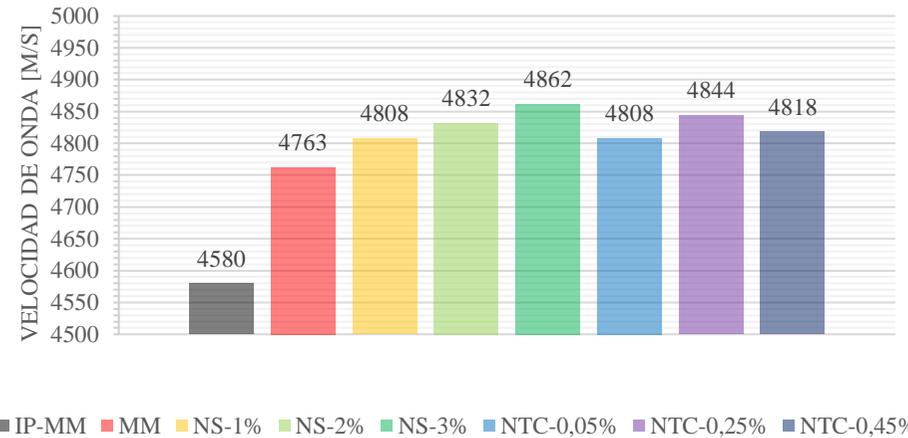


Figura 87. Velocidad de onda promedio por mezcla bajo curado a temperatura controlada.

DENSIDAD PROMEDIO SEGÚN DOSIFICACIÓN

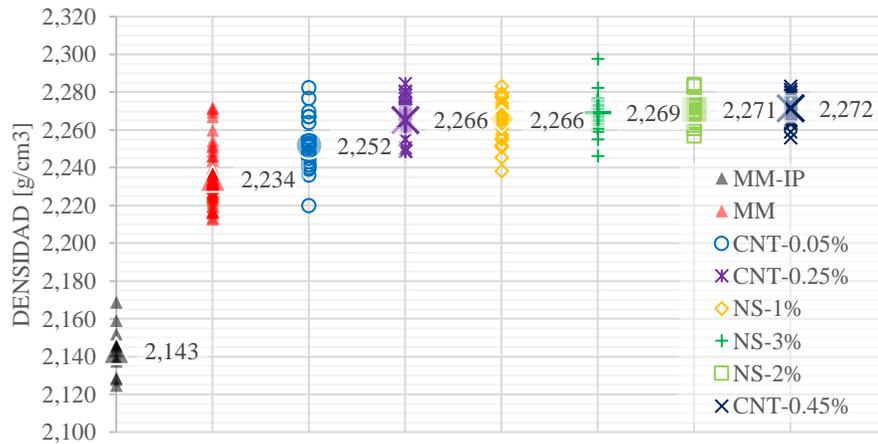


Figura 88. Densidad promedio en estado endurecido según dosificación.

FLUIDEZ PROMEDIO SEGÚN DOSIFICACIÓN

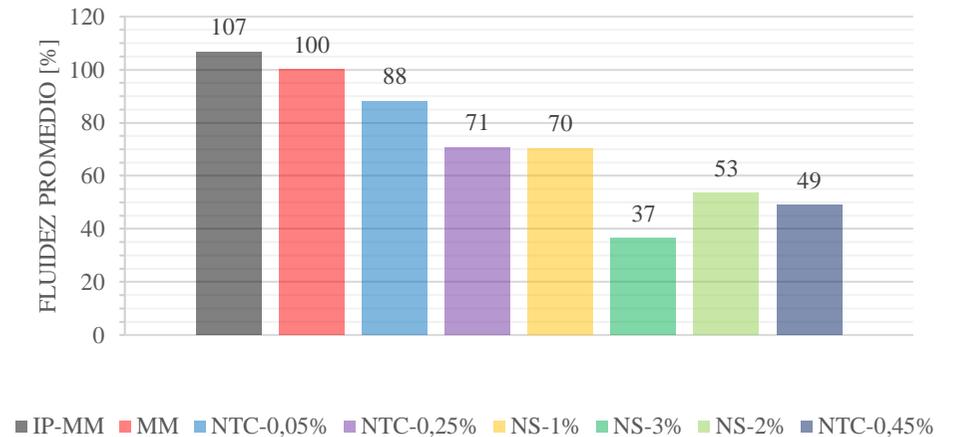


Figura 89. Fluidez promedio en estado fresco según dosificación.

Por último, en la Figura 88 se observa la densidad promedio de las muestras en estado endurecido. Se destaca una relación entre la densidad y fluidez. A mayor fluidez menor densidad y a menor fluidez mayor densidad. Sin embargo, es necesario realizar una mayor cantidad de muestras para corroborar esta información.

4.8. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD Y COSTOS

El presente subcapítulo ejemplificará a breves rasgos las fases de producción de un hormigón convencional (CC) frente a un UHPC, así como su aplicación en el diseño de 2 puentes: diseño basado en CC y diseño híbrido UHPC. Se establecerá énfasis en las fases de extracción de materias primas, transporte de materias primas y proceso de producción (A1-A3) bajo el parámetro de emisiones de Efecto Invernadero (GEI) en CO₂ equivalente (ver Figura 92 y Anexo 8).

Finalmente, se muestra la huella de carbono y la demanda energética para la MM, NS-2% y CNT-0.25% en la etapa de producción, así como un análisis de costos y proyección a largo plazo.

4.8.1. EJEMPLO EXPLICATIVO: LCA A NIVEL DE UNIDAD DE MATERIAL PRODUCIDO

Se diferencia como M3Q y M2Q a los UHPC, premezclado y prefabricado respectivamente, mientras que C35/45 y C50/60 como hormigones convencionales, premezclado y prefabricado respectivamente. La Figura 90 ejemplifica los resultados de la huella de carbono obtenidos por Sameer et al. (2019) mediante un LCA.

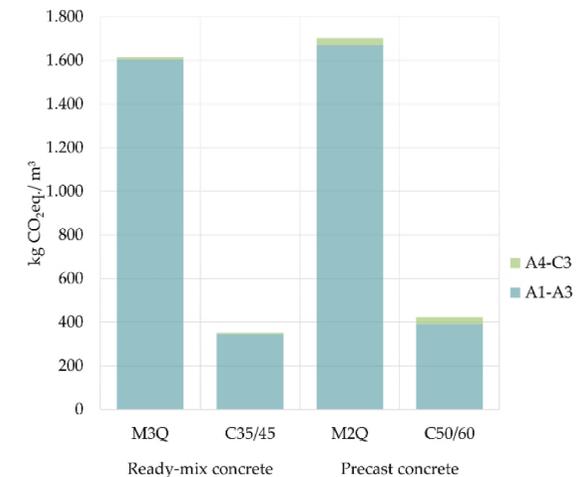
Se verifica que el 90% del impacto ambiental recae en las etapas A1, A2 y A3, correspondientes a la extracción de materias primas, transporte de materias primas y proceso de producción (Sameer et al., 2019).

Al hablar de metro cúbico de producción por cada tipo de hormigón, se observa que los UHPC son sumamente más contaminantes (470% mayor) que los CC. Dong (2018) establece un 250% más contaminante en referencia al CC. En gran parte esto se debe a la inclusión de microfibras y las grandes dosificaciones de cemento (Dong, 2018; Sameer et al., 2019; Stengel & Schießl, 2013) (ver Figura 91).

Las fibras de acero comprenden el componente más costoso y con mayor impacto sobre el medio ambiente de la mezcla total. Para una explicación a detalle, se recomienda realizar la lectura de los documentos escritos por Sameer et al. (2019), Dong (2018) y Stengel & Schießl (2013) quienes detallan a profundidad la aplicación de los UHPC en puentes y comparan los resultados del LCA y LCCA respecto a hormigones convencionales.

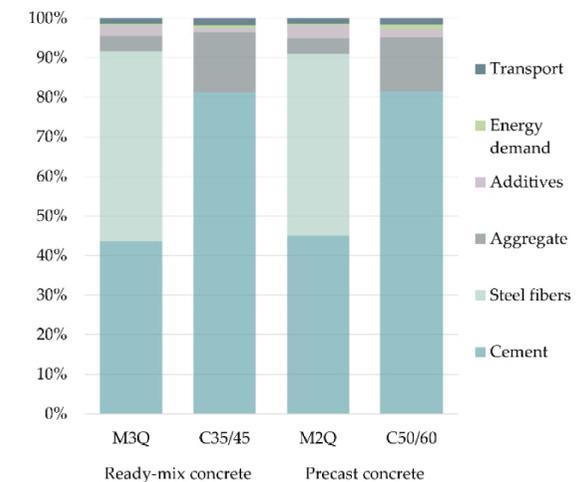
4.8.2. EJEMPLO EXPLICATIVO: LCA A NIVEL DE PROYECTO

A nivel de proyecto, se evidencian cambios sustanciales en el LCA de cada puente. En el Anexo 8 se presenta la constitución a detalle de cada puente en contexto, además, se explican los tipos de hormigones usados y sus componentes. Se diferencia como M3Q y M2Q a los UHPC, premezclado y prefabricado respectivamente, mientras que C35/45 y C50/60 como hormigones convencionales, premezclado y prefabricado respectivamente.



(a) A1-C3 life cycle stages

Figura 90. Huella de carbono del UHPC (M3Q y M2Q) en comparación con el hormigón convencional (C35/45 y C50/60) por m³, Fuente: Sameer et al., (2019).



(b) A1-A3 life cycle stages

Figura 91. Proporción de materiales de la huella de carbono para las etapas del ciclo de vida A1-A3, Fuente: Sameer et al. (2019).

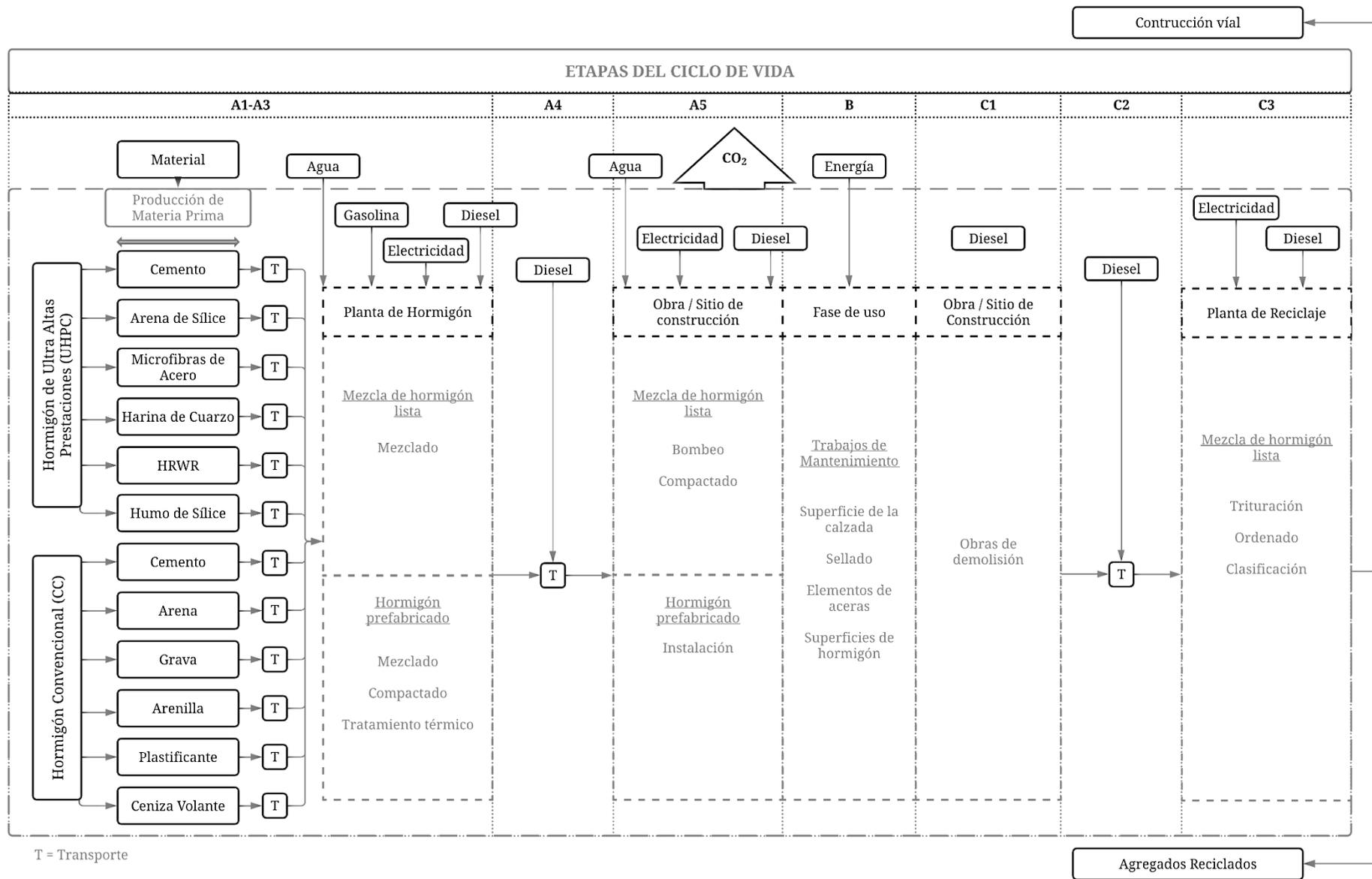


Figura 92. Diagrama de procesos de evaluación del ciclo de vida desde la cuna a la tumba del UHPC y Hormigón Convencional (CC), Fuente: adaptado de Sameer et al. (2019).

La huella de carbono disminuye en un 14 % (40 t CO₂ eq.) cuando se incorpora el uso de UHPC en el diseño híbrido (Sameer et al., 2019). Dong (2018) en su estudio, estable que existe una disminución de hasta 32.5 % en la emisión de CO₂ eq al utilizar secciones prefabricadas para el diseño de puentes. En términos del diseño con hormigón convencional (CC-Design), el 63% de la huella de carbono proviene de las etapas del ciclo de vida A1-A3, mientras que en el puente híbrido UHPC (UHPC-Design) representa el 92% (ver Figura 93). El análisis de las etapas A1-A3 muestra que los procesos de producción de cemento y acero contribuyen principalmente a la huella de carbono del CC-Design y UHPC-Design.

4.8.3. EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA EN LA FASE DE PRODUCCIÓN PARA LAS DOSIFICACIONES MM, NS-2% Y CNT-0.25%.

Mediante la investigación de literatura y el uso de la herramienta PaLATE v2.2 elaborada por la Universidad de California y potenciada por la Universidad de Washington, se logró elaborar un análisis de ciclo de vida básico respecto a las fases de extracción/producción de materias primas, transporte y producción de UHPC para la dosificación MM, NS-

2% y CNT-0.25%. En la Tabla 16 se observan las cantidades de energía necesarias para elaborar una tonelada de cada material y el CO₂ equivalente emanado a la atmósfera como Gas de Efecto Invernadero (GEI). La Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19 muestran la demanda energética y emisión de GEI por cada fase de producción. Se presta énfasis en la cantidad de energía necesaria para la fabricación de Nanotubos de Carbono.

El transporte de las materias primas se estableció desde las fábricas más importantes de producción de aditivos y componentes para hormigones en la provincia del Guayas. Se fijó como punto de producción de UHPC la Cementera Guapán ubicada en la ciudad de Azogues, Cañar. Los nanomateriales se producen en Nanjing, China; se establece importación mediante embarcación desde el puerto de Shanghái hasta Guayaquil.

El Consumo Energético y Huella de Carbono por producción y transporte se obtienen de la base de datos del software PaLATE v2.2 y literatura investigada. La Tabla 19 establece los rendimientos por metro cúbico de UHPC producido, la energía necesaria para la producción y la emanación de GEI por cada equipo. En el Anexo 9 se muestran los resultados de cada dosificación por cada fase descrita.

Tabla 15. Resumen del Consumo Energético y Huella de Carbono de dosificaciones para la elaboración de un metro cúbico de UHPC.

CONSUMO ENERGÉTICO Y HUELLA DE CARBONO
RESUMEN

Dosificación	Curado 18°C		Curado 60°C	
	Energía [MJ]	CO ₂ eq.	Energía [MJ]	CO ₂ eq.
MM	6654.82	1311.24	6759.16	1311.49
NS-2%	6890.91	1334.26	6995.25	1334.51
CNT-0.25%	7575.23	1707.13	7679.57	1707.34

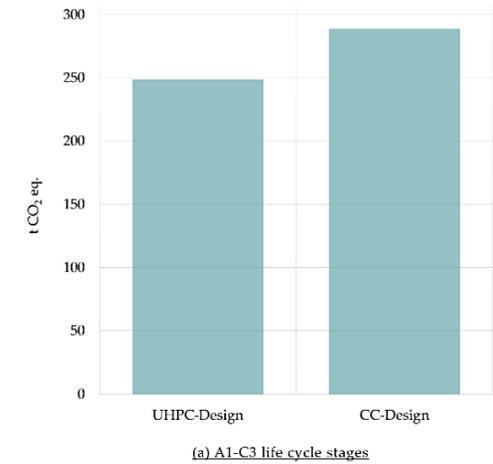


Figura 93. Huella de carbono con Diseño de hormigón convencional (CC-Design) y hormigón convencional mejorado con UHPC (UHPC-Design), Fuente: Sameer et al., (2019).

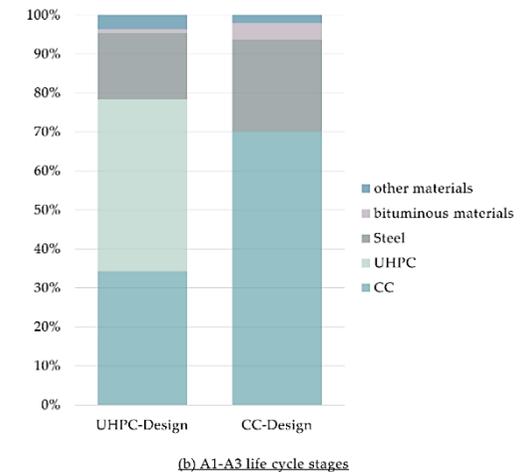


Figura 94. Proporción de materiales de la huella de carbono para las etapas del ciclo de vida A1-A3, Fuente: Sameer et al. (2019).



Tabla 16. Producción de materia prima de UHPC por tonelada.

PRODUCCIÓN DE MATERIA PRIMA POR TONELADA

Material	Energía [MJ]	CO ₂ eq.	Fuente
Arena de Sílice	155.76	10.75	Horvath et al. (2011)
Cemento	5460.24	851.33	Horvath et al. (2011)
HRWR	31838.37	2071.41	Horvath et al. (2011)
Humo de sílice	36	1220	Hossain et al. (2018)
Fibras de acero	5177.88	940.00	Horvath et al. (2011)
Nanosílice	5683.45	845.00	Asadollahfardi et al. (2019)
Nanotubos de Carbono	482000.00	211000.00	Gavankar et al.; Kushnir & Sandén; Trompeta et al., (2015; 2008; 2016)

Tabla 18. Consumo Energético y Huella de Carbono en el transporte de materia prima según dosificación para un metro cúbico de UHPC.

TRANSPORTE DE MATERIA PRIMA A PLANTA POR METRO CÚBICO DE UHPC

Material	Distancia de transporte (km)	Tipo de transporte		Energía [MJ]	CO ₂ eq.
		Camión %	Embarcación %		
Arena de Sílice	208	100	-	309.36	21.34
Cemento	0	-	-	-	-
HRWR	208	100	-	8.86	0.61
Humo de sílice	208	100	-	70.22	4.84
Fibras de acero	220	100	-	59.85	4.13
Nanosílice	17550	3	97	151.57	10.46
Nanotubos de Carbono	17550	3	97	19.06	1.31

Tabla 17. Consumo Energético y Huella de Carbono en la producción de materia prima según dosificación para un metro cubico de UHPC.

PRODUCCIÓN DE MATERIA PRIMA POR METRO CÚBICO DE UHPC

Material	Energía [MJ]	CO ₂ eq.
Arena de Sílice	164.18	11.33
Cemento	4019.17	626.64
HRWR	960.88	62.52
Humo de sílice	11.70	369.50
Fibras de acero	1009.69	183.30
Nanosílice	84.51	12.57
Nanotubos de Carbono	901.34	394.57

Tabla 19. Consumo Energético y Huella de Carbono en la producción en planta de UHPC por metro cúbico, Fuente: Sameer et al. (2019)

PRODUCCIÓN DE UHPC POR METRO CÚBICO

Inclisor de energía	Curado	Curado	Energía [MJ]	CO ₂ eq.
	18°C	60°C		
	UHPC			
	Operación de mezclado			
Electricidad (kWh/m ³)	7.09	7.09	25.50	-
Gasolina (L/m ³)	0.26	0.26	9.04	0.02
Diesel (L/m ³)	0.09	0.09	3.14	0.01
	Compactación			
Electricidad (kWh/m ³)	0.9	0.9	3.24	-
	Tratamiento térmico			
Gasolina (L/m ³)	-	3.00	104.34	0.24

La Tabla 15 muestra un resumen del LCA en la etapa de producción de la MM, NS-2% y CNT-0.25%; la variante NS-2% presenta un incremento del 3.5% en la demanda energética y 1.7% huella de carbono respecto a la MM. La dosificación CNT-0.25% presenta un incremento del 13.8% y 30.1% respectivamente (ver Anexo 9 y Anexo 10).

El aumento en el impacto ambiental al incorporar CNT es notable. Su producción necesita de altas temperaturas y gran energía. Es viable minimizar este parámetro en la producción a gran escala. Sin embargo, una potencial solución a este inconveniente se basa en los estudios realizados por Licht (2017), quien demuestra un método de producción de CNT a base de las emisiones de CO₂ que produce una planta de cemento (ver Anexo 11).

Se denominan plantas C2CNT (Carbono a Nanotubos de Carbono) en donde una cámara específica admite los gases y, mediante un proceso de electrólisis, el CO₂ se transforma en CNT (Licht et al., 2019). Según los métodos que plantean, se puede devolver O₂ a la plata.

En resumen, al proporcionar un impulso económico a la eliminación de dióxido de carbono,

por tonelada de CO₂ evitada, la planta de cemento C2CNT consume \$50 de electricidad, no emite CO₂ y produce \$ 100 de cemento y alrededor de \$ 60 000 de CNT (Stuart Licht, 2017), (ver Anexo 12).

4.8.4. COSTOS

La elaboración de UHPC resulta entre 10 y 20 veces más caro que un hormigón convencional (Abbas et al., 2016; Kang et al., 2018). La principal causa del gran costo se debe a las grandes cantidades de cemento y fibras incorporadas (Dong, 2018; Sameer et al., 2019; Stengel & Schießl, 2013). La contribución de las materias primas al costo total se evidencia en la Figura 95; más del 70% del costo total recae en las microfibras de acero (Stengel & Schießl, 2013) Sin embargo, dependiendo de las fibras que se utilicen (macrofibras/microfibras, resistencia última, etc.) el costo puede ser variable.

En el Anexo 14 se observan cifras de los precios de mercado evaluados en el año 2009 en Europa. Teniendo en cuenta una composición media, el costo de 1 m³ de UHPC al cambio de ese año fue de alrededor de 1160 USD/m³ (Stengel & Schießl, 2013). Dong (2018) establece un costo actual menor

de alrededor de 830 USD/m³ y un costo de hormigón convencional de 100 USD/m³, valor bastante aproximado a los costos nacionales. El Anexo 14 muestra los precios aproximados a granel de los productos utilizados para la elaboración de la dosificación MM, NS-2% y CNT-0.25%; se incluyen tarifas aproximadas de importación.

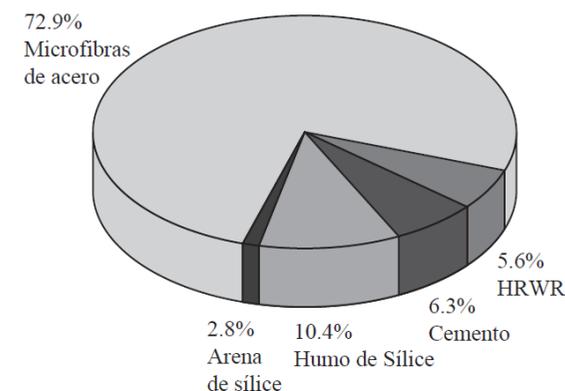


Figura 95. Contribución de materias primas al costo total del UHPC, Fuente: adaptado de Stengel & Schießl (2013).

En la Tabla 20 no se incluye el costo por incorporación de fibras de acero por metro cúbico de

Tabla 20. Costo de materias primas para la elaboración de un metro cúbico de UHPC.

	RELACIÓN	MM [kg/m ³]	COSTO	PORCENTAJE DEL COSTO	NS-2% [kg/m ³]	COSTO	PORCENTAJE DEL COSTO	CNT-0.25% [kg/m ³]	COSTO	PORCENTAJE DEL COSTO
CEMENTO TIPO HE	1.0000	736.08	\$110.41	19.48%	743.37	\$111.51	10.49%	746.01	\$111.90	16.95%
ARENA DE SÍLICE	1.4320	1054.07	\$105.41	18.60%	1064.51	\$106.45	10.01%	1068.28	\$106.83	16.18%
HUMO DE SÍLICE	0.3250	239.23	\$239.23	42.20%	241.60	\$241.60	22.73%	242.45	\$242.45	36.72%
HRWR	0.0410	30.18	\$111.66	19.70%	30.48	\$112.77	10.61%	30.59	\$113.17	17.14%
AGUA	0.2370	174.45	\$0.13	0.02%	176.18	\$0.13	0.01%	176.80	\$0.13	0.02%
NANOSÍLICE	0.0200	-	-	-	14.87	\$490.63	46.15%	-	-	-
NANOTUBOS DE CARBONO	0.0025	-	-	-	-	-	-	1.87	\$85.79	12.99%
TOTAL		2234.00	\$566.83		2271.00	\$1,063.07		2266.00	\$660.27	



UHPC. La adición típica se encuentra entre los 150 kg/m³ y 200 kg/m³ de UHPC. El costo total aumentaría entre \$300.00 y \$500.00 por metro cúbico de UHPC (ver Anexo 15).

La incorporación de NS-2% resulta en un incremento de casi el 90% del costo original del UHPC sin considerar las fibras/microfibras de acero (52% con inclusión de fibras); esto lo hace poco competente frente a los resultados obtenidos con los CNT-0.25%. Por último, la adición de CNT al 0.25%, sin tomar el costo de las fibras de acero, incrementa en un 17%, mientras con la adición de fibras según el Anexo 15 y con un costo total de \$1065 por metro cúbico de UHPC, la variación es del 10%. Además, se puede considerar la implementación de cámaras C2CNT, que producirían directamente CNT y generaría entradas adicionales.

Dong (2018) analiza el coste del ciclo de vida (LCCA) estudiando dos puentes, uno con diseño de hormigón convencional y otro con diseño UHPC. Establece que el costo inicial por el método UHPC aumenta en un 80% el valor del puente, sin embargo, justifica gran parte del gasto mediante el poco o nulo mantenimiento del puente a largo plazo.

Señala que este tipo de estructuras con incorporación de UHPC empieza a ser rentable en proyecciones mayores de 120 años (vida útil de mayor a 150 años). Ejemplifica que, si se utiliza una tasa de descuento monetario, como ejemplo 2% o 4%, el costo anual equivalente comparando con la vida útil media de puentes ordinarios (50 a 75 años) puede ser rentable hasta para proyecciones mínimas de 62 años.

El uso de UHPC en estructuras puede resultar en la reducción del tiempo de construcción y la cantidad de trabajadores; tiene el potencial significativo de mejorar la eficiencia de la construcción y reparación. Al considerar este aspecto, el costo del ciclo de vida del puente UHPC tiene el potencial importante respecto al puente convencional (Dong, 2018), además, si se toma en cuenta la alta resistencia a la corrosión y la durabilidad del UHPC, la estructura UHPC podría tener una ventaja más significativa y especialmente para las estructuras ubicadas en un entorno agresivo.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Con el uso de materiales disponibles en el país y la implementación de nanomateriales, se logró desarrollar dosificaciones de hormigones que cumplen con las propiedades mecánicas de un UHPC de acuerdo con los requerimientos establecidos en las Guías y Normativas internacionales vigentes actualmente.

La caracterización Físico-Mecánica se realizó únicamente para la arena de sílice. Referente al resto de los materiales utilizados, las características fueron proporcionadas por los fabricantes.

Se desarrolló una dosificación maestra a la cual se le incorporaron nanopartículas (NS) y Nanotubos (CNT) en un rango de porcentaje distintos. Se concluyó que la adición de NS en un 2% y CNT en un 0.25% p/p respecto al cemento, presentaron los mejores resultados. Sin embargo, los CNT sobresalen en sus propiedades mecánicas, así como en el costo final por metro cúbico de UHPC.

En función del LCA estudiado, se verifica una disminución de la huella de carbono a nivel de proyecto y un costo/beneficio superior al del CC en proyectos con vida útil mayores a 65 años para UHPC. La adición de NS aumenta levemente la demanda energética (3.5%) y huella de carbono (1.7%), con resistencias mayores, sin embargo, eleva los costos de producción en casi un 90%. Los CNT presentan los mejores resultados en propiedades mecánicas y un mayor costo/beneficio, sin embargo, se evidencia un aumento importante en la demanda

energética (14%) y huella de carbono (31%) con respecto a la MM.

La alta resistencia de estas dosificaciones se atribuye a la relación W/B muy baja (0.18), la exclusión del agregado grueso (reducción de microfisuras) y, por último, a la influencia del SF y los nanomateriales en el proceso de hidratación del UHPC.

La incorporación de un porcentaje óptimo de nanomateriales a la MM marca una influencia positiva en las propiedades mecánicas. El NS posee efectos de relleno, de nucleación y actividad puzolánica. Por otra parte, los CNT sostienen efectos de puenteo, relleno y nucleación. En conclusión, el NS y los CNT rellenan los poros, aceleran el proceso de hidratación del cemento, y mejoran la microestructura del Silicato de Calcio Hidratado, factor principal para la ganancia de resistencia del hormigón.

Se evidencia un aumento drástico en las propiedades mecánicas del UHPC bajo régimen de curado mediante irradiación de calor (48 H a 60 °C + 26 días a 18 °C). La alta temperatura acelera el proceso de hidratación y promueve el efecto puzolánico del SF y el NS, generando microestructuras más densas. Las resistencias a compresión bajo régimen de curado térmico incrementan entre un 20% y 30% a los 28 días de edad en referencia a muestras curadas a temperatura ambiente (28 días a 18 °C). Además, bajo el régimen de curado térmico, se pudo obtener una resistencia a los 7 días de aproximadamente un 92% y 97% de la resistencia última con respecto a los 28 días de curado

bajo el mismo régimen de curado. En otras palabras, en la primera semana de maduración, se presenta casi la resistencia especificada para los 28 días de curado.

La resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad bajo un régimen de curado a temperatura controlada (60 °C), no presentan un incremento significativo.

Bajo el régimen de curado a temperatura ambiente (18 °C), las muestras requieren de alrededor de 56 días para obtener una resistencia entre el 90% y 95% del valor que presentan las muestras a los 3 y 7 días bajo un régimen de temperatura controlada (60 °C). En otras palabras, se necesita más tiempo (más de 60 días) para lograr capacidades similares en el caso de curados a temperaturas naturales.

El ensayo de velocidad de pulso verifica un excelente comportamiento en función de la macroestructura y microestructura. Refleja un carácter alto de durabilidad y baja capacidad de penetración de iones cloruros.

La fabricación de un metro cúbico de UHPC puede resultar a creces más contaminante que un hormigón convencional (entre un 250% y 470% mayor). No obstante, al momento de su aplicación estructural, su uso es capaz de disminuir hasta en un 32% la huella de carbono, además de reducir el tamaño de las secciones y las cantidades de acero de refuerzo.

La aplicación de nanomateriales influye de manera sustancial en el Consumo Energético y Huella de Carbono. El caso más desfavorable responde a la cantidad de energía y emisiones que produce la



fabricación de los MWNT. Sin embargo, los CNT-0.25% resultaron ser indiscutiblemente la mejor opción en adición; posee las mejores propiedades en estado endurecido y un costo referencial por metro cúbico del 10% mayor en comparación con la MM (con incorporación de fibras y/o microfibras).

5.2. RECOMENDACIONES

Al momento realizar los ensayos mecánicos, se recomienda verificar las condiciones de la prensa y sus aditamentos. Algunas veces, el mal posicionamiento de la muestra o pistón puede ocasionar resultados dispersos o atípicos.

Los especímenes cilíndricos UHPC luego de su desmolde, no se encuentran listos para el ensayo a compresión simple. La carga uniforme y paralela en las caras lisas es fundamental para lograr resultados precisos. La alta resistencia de los UHPC no permite el uso de materiales de recapeo, por lo que es necesario pulir/recortar las caras con defectos. El uso de cubos para este tipo de ensayos es más confiable y eficaz; existen 2 pares de caras extra que siempre son aptas, además, el factor de formas casi siempre igual a 1.

Al momento de utilizar una mezcladora (batidora, concretera convencional), se recomienda no sobrepasar el límite del 60 % de la capacidad máxima. La energía necesaria para amasar todo el volumen no podrá ser impartida satisfactoriamente por una batidora común si se llena a su máxima capacidad.

La dispersión uniforme de las nanopartículas en la matriz del hormigón es muy difícil de lograr debido a las fuerzas de Van Der Waals actuantes; las

nanopartículas individuales tienden a adherirse entre sí. Se recomienda utilizar un método de dispersión para aprovechar las capacidades del nanomaterial al máximo.

En el caso de someter las muestras a un régimen de curado con temperatura controlada, se recomienda incrementar/disminuir la temperatura del espécimen progresivamente (alrededor de 20 °C/hora). La ventaja de someter las muestras a un régimen de curado a temperatura controlada (60 °C) radica en las altas resistencias iniciales. Esto facilita que las estructuras de UHPC puedan estar sujetas a cargas de servicio a partir de los 3 primeros días de curado, reduciendo así el tiempo de ejecución de las obras.

Si se desea aumentar significativamente la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad, se recomienda curar con temperaturas mayores a los 60 °C. Se incrementará la cantidad de energía necesaria en el proceso de producción.

El costo de los componentes de UHPC es significativamente más alto que el costo del hormigón convencional. Optimizar las dosificaciones y buscar nuevas materias primas más económicas es de gran importancia para reducir los costos de producción.

La implementación de cámaras C2CTN en las plantas de cemento pueden combatir el aumento de la demanda energética y huella de carbono en UHPC con incorporación de CNT, generando cero emisiones de CO₂ y produciendo MWCT.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, S., Nehdi, M. L., & Saleem, M. A. (2016). Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(3), 271–295. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0157-4>
- Abu Al-Rub, R. K., Ashour, A. I., & Tyson, B. M. (2012). On the aspect ratio effect of multi-walled carbon nanotube reinforcements on the mechanical properties of cementitious nanocomposites. *Construction and Building Materials*, 35, 647–655. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuil-dmat.2012.04.086>
- ACI Committee 239. (2018). *Ultra-high-performance concrete : an emerging technology report (ACI 239R-18)* (ACI).
- Alcaraz, M. J. (2015). *Microestructura del hormigón con adición de nano sílice* [Universidad Politécnica de Cartagena]. <http://repositorio.upct.es/handle/10317/4671?s-how=full>
- Alsaman, A., Dang, C. N., Martí-Vargas, J. R., & Micah Hale, W. (2020). Mixture-proportioning of economical UHPC mixtures. *Journal of Building Engineering*, 27, 100970. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100970>
- Alsaman, A., Dang, C. N., & Micah Hale, W. (2017). Development of ultra-high performance concrete with locally available materials. *Construction and Building Materials*, 133, 135–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuil-dmat.2016.12.040>
- Alsaman, A., Dang, C. N., Prinz, G. S., & Hale, W. M. (2017). Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 153, 918–928. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuil-dmat.2017.07.158>
- Archilovers. (2014). *Onepoto Footbridge | Shwan Alhashimi*. <https://www.archilovers.com/projects/114818/onepoto-footbridge.html>
- Arellano, M. F., & Fierro, J. O. (2019). *Hormigón De Alta Resistencia Con Nanosílice* [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/46906>
- Argos. (2017). *Pasarela peatonal de la Universidad EAFIT/ ARGOS* 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/pasarela-peatonal-universidad-eafit>
- Arora, A., Aguayo, M., Hansen, H., Castro, C., Federspiel, E., Mobasher, B., & Neithalath, N. (2018). Microstructural packing- and rheology-based binder selection and characterization for Ultra-high Performance Concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*, 103, 179–190. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemcon-res.2017.10.013>
- Asadollahfardi, G., Katebi, A., Taherian, P., & Panahandeh, A. (2019). Environmental life cycle assessment of concrete with different mixed designs. *International Journal of Construction Management*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1579015>
- Assefi, M., Davar, F., & Hadadzadeh, H. (2015). Green synthesis of nanosilica by thermal decomposition of pine cones and pine needles. *Advanced Powder Technology*, 26(6), 1583–1589. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2015.09.004>
- Association Française de Génie Civil AFGC. (2002). *French Interim Recommendations of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC)* (French Ass).
- Azmeem, N. M., & Shafiq, N. (2018). Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00197>
- Bache, H. H. (1981). *Densified cement ultra-fine particle-based materials*.
- Bacuilima, A. R., & Guillén, W. P. (2019). *Diseño de una mezcla de hormigón de alta resistencia y su comportamiento en una viga de hormigón armado sometida a cargas de flexión*



- [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32377>
- Bonamente, E., Merico, M. C., Rinaldi, S., Pignatta, G., Pisello, A. L., Cotana, F., & Nicolini, A. (2014). Environmental Impact of Industrial Prefabricated Buildings: Carbon and Energy Footprint Analysis Based on an LCA Approach. *Energy Procedia*, 61, 2841–2844. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.319>
- Cabrera, M. I. (2018). Utilización de los concretos de alta resistencia y concretos celulares en la industria de la construcción ecuatoriana, clasificados por sectores: vivienda, electricidad, gas/petróleo, salud y educación. *INGENIO*, 1(1 SE-), 15–30. <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/article/view/159>
- Cariço, A., Bogas, J. A., Hawreen, A., & Guedes, M. (2018). Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 164, 121–133. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.221>
- Castro, J. D., & Ojeda, G. L. (2019). *Diseño y elaboración de hormigones especiales de alto desempeño* [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/33600>
- Comipez. (2020). *Recrea el fondo de arena fina y clara con ¡¡ ARENA DE SILICE !!* <https://www.comipez.com/arena-decorativa/782-arena-de-silice.html>
- Coninsa. (2017). *Puente peatonal EAFIT*. <https://www.coninsa.co/blog/puente-peatonal-eafit>
- Cornejo A., L. (2015). *La revolución Nanotecnológica en los nuevos materiales. Un reto tecnológico para el siglo XXI* (Universida). https://www.nuevastecnologiasymateriales.com/wp-content/uploads/edd/2015/06/Revolucion_Nanotecnologica.pdf
- Depositphotos. (2020). *Grifo de agua imágenes de stock, fotos grifo de agua | descargar en Depositphotos®*. <https://sp.depositphotos.com/stock-photos/grifo-de-agua.html?qview=9157618>
- Dong, Y. (2018). Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 167, 414–425. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.037>
- Esmaeili, & Kasaei. (2016). *Effect of Different Curing Regimes on Strength and Transport Properties of UHPC Containing Recycled Steel Tire Wires as Micro Steel Fibers*.
- Gavankar, S., Suh, S., & Keller, A. A. (2015). The Role of Scale and Technology Maturity in Life Cycle Assessment of Emerging Technologies: A Case Study on Carbon Nanotubes. *Journal of Industrial Ecology*, 19(1), 51–60. <https://doi.org/10.1111/jiec.12175>
- Graybeal, B. A. (2006). *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete* (I. PSI (ed.)).
- Graybeal, B. A. (2019). *Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections : [technote]* (D. United States. Federal Highway Administration. Office of Research and Technology (ed.)).
- Greco. (2020). *Specialty Construction Chemicals & Materials | Greco-Asia Malaysia Singapore Bangladesh, Indonesia, Vietnam*. <https://greco-asia.com/construction-chemicals-products/>
- Guinness World Records. (2010). *Burj Khalifa: El edificio más alto del mundo | Guinness World Records*. <https://www.guinnessworldrecords.es/records/hall-of-fame/burj-khalifa-tallest-building-in-the-world>
- Haber, Z. B., De la Varga, I., Graybeal, B. A., Nakashoji, B., & El-Helou, R. (2018). *Properties and Behavior of UHPC-Class Materials*.
- Hassan, A. F., Abdelghny, A. M., Elhadidy, H., & Youssef, A. M. (2014). Synthesis and characterization of high surface area nanosilica from rice husk ash by surfactant-free sol-gel method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 69(3), 465–472. <https://doi.org/10.1007/s10971-013-3245-9>
- Horvath, A., Pacca, S., Masanet, E., & Canapa, R.

- (2011). *PaLATE v2.2 (2.0)*. Greenroads.
- Hossain, M. U., Poon, C. S., Dong, Y. H., & Xuan, D. (2018). Evaluation of environmental impact distribution methods for supplementary cementitious materials. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 82, pp. 597–608). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.048>
- ISO. (2015a). ISO/TS 80004-1:2015 Nanotechnologies — Vocabulary — Part 1: Core Terms. In *ISO/TS 80004:2015 Nanotechnologies — Vocabulary* (ISO).
- ISO. (2015b). ISO/TS 80004-2:2015 Nanotechnologies — Vocabulary — Part 2: Nanoobjects. In *ISO/TS 80004:2015 Nanotechnologies — Vocabulary* (ISO).
- Jal, P. K., Sudarshan, M., Saha, A., Patel, S., & Mishra, B. K. (2004). Synthesis and characterization of nanosilica prepared by precipitation method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 240(1–3), 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.03.021>
- Janković, K., Bojović, D., & Stojanović, M. (2019). Influence of nanoparticles on the strength of ultra-high performance concrete. *Nanotechnology in Eco-Efficient Construction*, 13–42. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102641-0.00002-5>
- Japanese Society of Civil Engineers. (2009). *Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structure (Draft)*.
- Jung, M., Lee, Y., Hong, S.-G., & Moon, J. (2020). Carbon nanotubes (CNTs) in ultra-high performance concrete (UHPC): Dispersion, mechanical properties, and electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE). *Cement and Concrete Research*, 131, 106017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106017>
- Kang, S.-H., Hong, S.-G., & Moon, J. (2018). Importance of drying to control internal curing effects on field casting ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 108, 20–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.008>
- KLM. (2020). *KLM Guía de viajes - MuCEM: el museo más bello de Marsella*. <https://www.klm.com/destinations/es/es/article/mucem-marseilles-most-beautiful-museum>
- Kushnir, D., & Sandén, B. A. (2008). Energy Requirements of Carbon Nanoparticle Production. *Journal of Industrial Ecology*, 12(3), 360–375. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00057.x>
- Landázuri, P. S., & Vásconez, W. M. (2019). *Análisis experimental de las propiedades físico-mecánicas de un hormigón de alta resistencia elaborado con partículas de nanosilíce* [Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/20126>
- Lee, N. K., Koh, K. T., Kim, M. O., & Ryu, G. S. (2018). Uncovering the role of micro silica in hydration of ultra-high performance concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*, 104, 68–79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.11.002>
- Li, W., Huang, Z., Cao, F., Sun, Z., & Shah, S. P. (2015). Effects of nano-silica and nano-limestone on flowability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete matrix. *Construction and Building Materials*, 95, 366–374. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuilmat.2015.05.137>
- Licht, S., Liu, X., Licht, G., Wang, X., Swesi, A., & Chan, Y. (2019). Amplified CO2 reduction of greenhouse gas emissions with C2CNT carbon nanotube composites. *Materials Today Sustainability*, 6, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100023>
- Licht, Stuart. (2017). Co-production of cement and carbon nanotubes with a carbon negative footprint. *Journal of CO2 Utilization*, 18, 378–389. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.02.011>
- Lightgalleries. (2020). *Greule*. http://cdn.lightgalleries.net/4bd5ec11d961e/images/Greule_091009_0096_MIF-2.jpg
- Loopnet. (2020). *505 N Lake Shore Dr, Chicago, IL 60611 - Retail for Sale | LoopNet.com*. <https://www.loopnet.com/Listing/505-N-Lake-Shore-Dr-Chicago-IL/18126974/>



- Nanjing XFNANO Materials Tech Co. (2017). *TDS: Industrial grade MWCNTs 50 nm*.
- Nanjing XFNANO Materials Tech Co. (2018). *TDS: Nano Silicon Dioxide XFI 03*.
- Nanjing XFNANO Materials Tech Co. (2020a). *Amazon.com: Polvo de nanotubos de carbono multipared de grado industrial (MWCNT) 2.2 lbs-Envío prioritario del mismo día: Industrial & Scientific*. https://www.amazon.com/-/es/nanotubos-multipared-industrial-2-2-lbs-Envío-prioritario/dp/B07SS2K12W/ref=sr_1_11?__mk_es_US=ÅMÅŽŃ&dchild=1&keywords=xfnano&qid=1610831389&sr=8-11
- Nanjing XFNANO Materials Tech Co. (2020b). *Ultrapure 99% Silicon Dioxide Nanoparticles 20nm Nano Silica SiO2 Powder-Same Day Priority Shipping: Amazon.com: Industrial & Scientific*. https://www.amazon.com/-/es/Nanopartículas-silicio-investigación-científica-prioritario/dp/B07SC19RXH/ref=sr_1_20?currency=USD&dchild=1&ie=UTF8&keywords=xfnano&language=en_US&qid=1610831389&sr=8-20
- Naqi, A., Abbas, N., Zahra, N., Hussain, A., & Shabbir, S. Q. (2019). Effect of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the strength development of cementitious materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 1203–1211. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.09.006>
- National Nanotechnology Initiative. (2020). *What It Is and How It Works | nano.gov*. <https://www.nano.gov/nanotech-101/what>
- Nilsson, L. (2018). *Development of UHPC concrete using mostly locally available raw materials: Vol. Independen*.
- Panesar, D. K. (2019). 3 - Supplementary cementing materials. In S. B. T.-D. in the F. and R. of C. (Second E. Mindess (Ed.), *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* (pp. 55–85). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00003-4>
- Portland Cement Association. (2019). *Ultra-High Performance Concrete*.
- Prem, P. R., Bharatkumar, B. H., & Iyer, N. R. (2013). Influence of curing regimes on compressive strength of ultra high performance concrete. *Sadhana*, 38(6), 1421–1431. <https://doi.org/10.1007/s12046-013-0159-8>
- RdConcrete. (2020). *UHPC: a living reality - RDC*. <https://rdconcrete.com/uhpc-a-living-reality/>
- Reches, Y. (2018). Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives. *Construction and Building Materials*, 175, 483–495. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuil-dmat.2018.04.214>
- Russell, H. G., & Graybeal, B. A. (2013). *Ultra-high performance concrete : a state-of-the-art report for the bridge community*. (I. Henry G. Russell (ed.)).
- SADEV. (2013). *Special parts for structural support, Jean Bouin stadium - SADEV Architectural Systems*. <https://www.sadev.com/projects/special-parts-for-structural-support-jean-bouin-stadium/>
- Sameer, H., Weber, V., Mostert, C., Bringezu, S., Fehling, E., & Wetzels, A. (2019). *Environmental Assessment of Ultra-High-Performance Concrete Using Carbon, Material, and Water Footprint*. <https://doi.org/10.3390/ma12060851>
- Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060–2071. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuil-dmat.2010.03.014>
- Sanjeev, K., Prabir, K., Sunil, M., & Sanjay, M. (2012). Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes on Mechanical Strength of Cement Paste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(1), 84–91. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000350](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000350)
- Shafieifar, M., Farzad, M., & Azizinamini, A. (2017). Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 156, 402–411. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuil-dmat.2017.08.170>

- Shen, P., Lu, L., He, Y., Wang, F., & Hu, S. (2019). The effect of curing regimes on the mechanical properties, nano-mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, *118*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2019.01.004>
- Shin, H.-O., Yoo, D.-Y., & Lee, J.-H. (2018). Development of 300 MPa ultra-high-strength mortar through a special curing regime. *Construction and Building Materials*, *171*, 312–320. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.134>
- Sika Ecuatoriana S.A. (2015). *Hoja Técnica de Producto, Sika ViscoCrete 4100*.
- Sika Ecuatoriana S.A. (2019). *Arena Colma, Ficha de Datos de Seguridad*.
- Sika Ecuatoriana S.A. (2020). *Hoja Técnica de Producto, SikaFume*.
- Sika USA. (2020). *Sika® ViscoCrete®-4100*. <https://usa.sika.com/en/construction-productcategories/concrete/concrete-admixtures/water-reduction/high-range-waterreducers/sika-viscocrete-4100.html>
- Sobolev, K. (2016). Modern developments related to nanotechnology and nanoengineering of concrete. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, *10*(2), 131–141. <https://doi.org/10.1007/s11709-016-0343-0>
- Sobuz, H. R., Visintin, P., Mohamed Ali, M. S., Singh, M., Griffith, M. C., & Sheikh, A. H. (2016). Manufacturing ultra-high performance concrete utilising conventional materials and production methods. *Construction and Building Materials*, *111*, 251–261. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuil-dmat.2016.02.102>
- Solís Carcaño, R. G., Moreno, É. I., & Castillo Pak, W. R. (2004). Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. *Ingeniería*, *8*(2), 41–52.
- Stengel, T., & Schießl, P. (2013). Life cycle assessment (LCA) of ultra high performance concrete (UHPC) structures. In *Eco-Efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies* (pp. 528–564). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9780857097729.3.528>
- Structurae. (2020). *Millau Viaduct Toll Gate (Millau, 2004)* | *Structurae*. <https://structurae.net/en/structures/millau-viaduct-toll-gate>
- The Royal Society. (2004). *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties* (The Royal Society). https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2004/9693.pdf
- Trompeta, A. F., Koklioti, M. A., Perivoliotis, D. K., Lynch, I., & Charitidis, C. A. (2016). Towards a holistic environmental impact assessment of carbon nanotube growth through chemical vapour deposition. *Journal of Cleaner Production*, *129*, 384–394. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.044>
- UCEM. (2020). *Cemento Guapán | UCEM - Unión Cementera Nacional*. <https://www.ucem.com.ec/categoria-producto/cemento-guapan/>
- Wille, K., & Boisvert-Cotulio, C. (2015). Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, *86*, 33–43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuil-dmat.2015.03.087>
- Wille, K., & Loh, K. J. (2010). Nanoengineering Ultra-High-Performance Concrete with Multiwalled Carbon Nanotubes. *Transportation Research Record*, *2142*(1), 119–126. <https://doi.org/10.3141/2142-18>
- Wu, C., Li, J., & Su, Y. (2018). 1 - Introduction. In C. Wu, J. Li, & Y. B. T.-D. of U.-H. P. C. A. B. Su (Eds.), *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* (pp. 1–21). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102495-9.00001-3>
- Wu, L., Farzadnia, N., Shi, C., Zhang, Z., & Wang, H. (2017). Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, *149*, 62–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuil-dmat.2017.05.064>
- Yang, L., Shi, C., & Wu, Z. (2019). Mitigation



- techniques for autogenous shrinkage of ultra-high-performance concrete – A review. *Composites Part B: Engineering*, 178, 107456. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107456>
- Yépez, F., & Calderón, F. X. (2014). Diseño de hormigones de alto desempeño: alta resistencia a la compresión, trabajabilidad adecuada y alta resistencia a la erosión - abrasión para obras hidráulicas. *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías*, 6. <https://doi.org/https://doi.org/10.18272/aci.v6i1.162>
- Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2014). Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount. *Construction and Building Materials*, 65, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.063>
- Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2015). Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement and Concrete Composites*, 55, 383–394. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.024>
- Zoontjens. (2014). *La Fondation Louis Vuitton Paris* - Zoontjens. <https://www.zoontjens.co.uk/projects/rooftop-paving/la-fondation-louis-vuitton-paris-france/>

ANEXOS

ANEXO 1. TABLA DE RESULTADOS EN ESPECÍMENES DE 50 MM DE ARISTA CURADOS A TEMPERATURA AMBIENTE (18°C).

DOSIFICACIÓN	LOTE	MUESTRA	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	RESITENCIA [MPa]	RESITENCIA PROMEDIO [MPa]	RESITENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]	FLUIDEZ [%]
				0		0.000		0				
MM	F	1	MM-F1	1	18	48.910			277.10	2.217		
MM	F	2	MM-F2	1	18	52.320	51.347	51.347	277.10	2.217	2.221	100
MM	F	3	MM-F3	1	18	52.810			278.70	2.230		
MM	E	1	MM-E1	3	18	80.820			278.90	2.231		
MM	E	2	MM-E2	3	18	88.190	86.187	88.870	278.10	2.225	2.232	102
MM	E	3	MM-E3	3	18	89.550			279.90	2.239		
MM	A	1	MM-A1	7	18	94.560			277.90	2.223		
MM	A	2	MM-A2	7	18	102.540			277.00	2.216		
MM	A	3	MM-A3	7	18	103.640			276.70	2.214		
MM	A	4-PRE	MM-A4-PRE	7	18	103.370			282.50	2.260		
MM	A	5-PRE	MM-A5-PRE	7	18	111.490	102.790	103.533	283.40	2.267	2.239	98
MM	A	6-PRE	MM-A6-PRE	7	18	106.380			283.90	2.271		
MM	A	7-A3	MM-A7-A3	7	18	103.570			278.80	2.230		
MM	A	8-A3	MM-A8-A3	7	18	97.860			279.70	2.238		
MM	A	9-A3	MM-A9-A3	7	18	101.700			279.10	2.233		
MM	B	1	MM-B1	14	18	118.480			280.80	2.246		
MM	B	2	MM-B2	14	18	120.990			279.80	2.238		
MM	B	3	MM-B3	14	18	119.270	114.673	119.580	279.20	2.234	2.233	101
MM	B	4-A0	MM-B4-A0	14	18	113.850			277.41	2.219		
MM	B	5-A0	MM-B5-A0	14	18	115.880			278.37	2.227		
MM	B	6-A0	MM-B6-A0	14	18	99.570			279.30	2.234		
MM	C	1	MM-C1	28	18	135.320			279.50	2.236		
MM	C	2	MM-C2	28	18	137.490			280.00	2.240		
MM	C	3	MM-C3	28	18	113.820	130.965	136.793	278.22	2.226	2.234	100
MM	C	4-A1	MM-C4-A1	28	18	141.540			279.70	2.238		
MM	C	5-A1	MM-C5-A1	28	18	137.570			279.60	2.237		
MM	C	6-A1	MM-C6-A1	28	18	120.050			278.40	2.227		
MM	D	1	MM-D1	56	18	154.836	141.612	150.588	278.80	2.232	2.232	102



DOSIFICACIÓN	LOTE	MUESTRA	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	RESITENCIA [MPa]	RESITENCIA PROMEDIO [MPa]	RESITENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]	FLUIDEZ [%]
MM	D	2	MM-D2	56	18	146.340			279.80	2.232		
MM	D	3	MM-D3	56	18	123.660			280.00	2.232		
MM	A2	1	MM-A21	90	18	164.160			280.70	2.246		
MM	E/A1	2	MM-E/A12	90	18	163.890	165.983	165.983	280.60	2.245	2.244	98
MM	E/A2	3	MM-E/A23	90	18	169.900			280.20	2.242		
		-		0		0.000		0.000				
NS-1%	E	1	NS-1%-E1	3	18	87.370			279.80	2.238		
NS-1%	E	2	NS-1%-E2	3	18	91.140	88.697	88.697	282.90	2.263	2.253	71
NS-1%	E	3	NS-1%-E3	3	18	87.580			282.20	2.258		
NS-1%	A	1	NS-1%-A1	7	18	100.600			284.70	2.278		
NS-1%	A	2	NS-1%-A2	7	18	109.430			284.30	2.274		
NS-1%	A	3	NS-1%-A3	7	18	116.640			281.90	2.255		
NS-1%	A	4-PRE	NS-1%-A4-PRE	7	18	112.640	109.003	110.410	282.90	2.263	2.270	71
NS-1%	A	5-PRE	NS-1%-A5-PRE	7	18	109.160			283.90	2.271		
NS-1%	A	6-PRE	NS-1%-A6-PRE	7	18	105.550			284.90	2.279		
NS-1%	B	1	NS-1%-B1	14	18	114.520			283.60	2.269		
NS-1%	B	2	NS-1%-B2	14	18	110.300	116.120	123.540	284.90	2.279	2.275	72
NS-1%	B	3	NS-1%-B3	14	18	123.540			284.70	2.278		
NS-1%	C	1	NS-1%-C1	28	18	142.180			283.50	2.268		
NS-1%	C	2	NS-1%-C2	28	18	125.550	132.960	142.180	284.00	2.272	2.269	69
NS-1%	C	3	NS-1%-C3	28	18	131.150			283.20	2.266		
NS-1%	D	1	NS-1%-D1	56	18	167.030			284.70	2.278		
NS-1%	D	2	NS-1%-D2	56	18	153.820	164.907	170.450	283.30	2.266	2.276	70
NS-1%	D	3	NS-1%-D3	56	18	173.870			285.40	2.283		
		-		0		0.000						
NS-2%	E	1	NS-2%-E1	3	18	92.340			282.10	2.257		
NS-2%	E	2	NS-2%-E2	3	18	93.580	92.313	92.313	283.30	2.266	2.263	54
NS-2%	E	3	NS-2%-E3	3	18	91.020			283.10	2.265		
NS-2%	A	1	NS-2%-A1	7	18	118.120			283.30	2.266		
NS-2%	A	2	NS-2%-A2	7	18	107.590	110.340	106.450	284.10	2.273	2.270	57
NS-2%	A	3	NS-2%-A3	7	18	105.310			283.70	2.270		

DOSIFICACIÓN	LOTE	MUESTRA	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	RESITENCIA [MPa]	RESITENCIA PROMEDIO [MPa]	RESITENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]	FLUIDEZ [%]
NS-2%	B	1	NS-2%-B1	14	18	113.540			284.60	2.277		
NS-2%	B	2	NS-2%-B2	14	18	114.560	119.357	114.050	284.60	2.277	2.276	48
NS-2%	B	3	NS-2%-B3	14	18	129.970			284.30	2.274		
NS-2%	C	1	NS-2%-C1	28	18	159.430			284.30	2.274		
NS-2%	C	2	NS-2%-C2	28	18	148.340	149.243	148.340	283.70	2.270	2.274	55
NS-2%	C	3	NS-2%-C3	28	18	139.960			284.70	2.278		
NS-2%	D	1	NS-2%-D1	56	18	164.500			282.80	2.262		
NS-2%	D	2	NS-2%-D2	56	18	168.510	165.550	165.550	284.10	2.273	2.265	53
NS-2%	D	3	NS-2%-D3	56	18	163.640			282.60	2.261		
			-	0		0.000						
NS-3%	E	1	NS-3%-E1	3	18	93.810			282.80	2.262		
NS-3%	E	2	NS-3%-E2	3	18	87.270	90.693	90.693	282.40	2.259	2.262	38
NS-3%	E	3	NS-3%-E3	3	18	91.000			282.90	2.263		
NS-3%	D	1	NS-3%-D1	7	18	94.220			281.90	2.255		
NS-3%	D	2	NS-3%-D2	7	18	101.960			280.80	2.246		
NS-3%	D	3	NS-3%-D3	7	18	117.660	106.678	104.930	285.30	2.282	2.270	37
NS-3%	D	4-PRE	NS-3%-D4-PRE	7	18	109.470			283.50	2.268		
NS-3%	D	5-PRE	NS-3%-D5-PRE	7	18	103.360			283.90	2.271		
NS-3%	D	6-PRE	NS-3%-D6-PRE	7	18	113.400			287.20	2.298		
NS-3%	B	1	NS-3%-B1	14	18	124.130			283.40	2.267		
NS-3%	B	2	NS-3%-B2	14	18	117.350	115.313	120.740	284.50	2.276	2.270	33
NS-3%	B	3	NS-3%-B3	14	18	104.460			283.50	2.268		
NS-3%	A	1	NS-3%-A1	28	18	153.380			283.50	2.268		
NS-3%	A	2	NS-3%-A2	28	18	142.370	149.300	152.765	282.90	2.263	2.268	40
NS-3%	A	3	NS-3%-A3	28	18	152.150			284.20	2.274		
NS-3%	C	1	NS-3%-C1	56	18	147.150			282.90	2.263		
NS-3%	C	2	NS-3%-C2	56	18	164.390	154.393	164.390	284.50	2.276	2.272	34
NS-3%	C	3	NS-3%-C3	56	18	151.640			284.60	2.277		
			-	0		0.000						
CNT-0.05%	E	1	CNT-0.05%-E1	3	18	80.170			281.60	2.253	2.246	91
CNT-0.05%	E	2	CNT-0.05%-E2	3	18	89.990	85.100	87.565	280.20	2.242		



DOSIFICACIÓN	LOTE	MUESTRA	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	RESITENCIA [MPa]	RESITENCIA PROMEDIO [MPa]	RESITENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]	FLUIDEZ [%]
CNT-0.05%	E	3	CNT-0.05%-E3	3	18	85.140			280.40	2.243		
CNT-0.05%	A	1	CNT-0.05%-A1	7	18	112.510			283.40	2.267		
CNT-0.05%	A	2	CNT-0.05%-A2	7	18	107.000	107.967	105.695	283.70	2.270	2.263	96
CNT-0.05%	A	3	CNT-0.05%-A3	7	18	104.390			281.50	2.252		
CNT-0.05%	B	1	CNT-0.05%-B1	14	18	104.000			279.90	2.239		
CNT-0.05%	B	2	CNT-0.05%-B2	14	18	121.470	113.493	118.240	280.00	2.240	2.233	83
CNT-0.05%	B	3	CNT-0.05%-B3	14	18	115.010			277.50	2.220		
CNT-0.05%	D	1	CNT-0.05%-D1	28	18	126.150			280.60	2.245		
CNT-0.05%	D	2	CNT-0.05%-D2	28	18	126.870	128.713	133.120	281.80	2.254	2.249	84
CNT-0.05%	D	3	CNT-0.05%-D3	28	18	133.120			281.00	2.248		
CNT-0.05%	C	1	CNT-0.05%-C1	56	18	152.740			280.20	2.242		
CNT-0.05%	C	2	CNT-0.05%-C2	56	18	163.500	157.957	160.565	281.00	2.248	2.249	88
CNT-0.05%	C	3	CNT-0.05%-C3	56	18	157.630			282.00	2.256		
			-	0		0.000						
CNT-0.25%	E	1	CNT-0.25%-E1	3	18	84.070			282.80	2.262		
CNT-0.25%	E	2	CNT-0.25%-E2	3	18	89.960	87.720	89.545	284.30	2.274	2.272	73
CNT-0.25%	E	3	CNT-0.25%-E3	3	18	89.130			284.80	2.278		
CNT-0.25%	A	1	CNT-0.25%-A1	7	18	110.350			282.60	2.261		
CNT-0.25%	A	2	CNT-0.25%-A2	7	18	110.990	109.287	109.287	283.60	2.269	2.267	72
CNT-0.25%	A	3	CNT-0.25%-A3	7	18	106.520			284.00	2.272		
CNT-0.25%	B	1	CNT-0.25%-B1	14	18	106.300			284.02	2.272		
CNT-0.25%	B	2	CNT-0.25%-B2	14	18	128.470	121.803	129.555	283.76	2.270	2.264	70
CNT-0.25%	B	3	CNT-0.25%-B3	14	18	130.640			281.33	2.251		
CNT-0.25%	C	1	CNT-0.25%-C1	28	18	143.990			283.60	2.269		
CNT-0.25%	C	2	CNT-0.25%-C2	28	18	141.000	138.330	142.495	283.10	2.265	2.266	68
CNT-0.25%	C	3	CNT-0.25%-C3	28	18	130.000			283.00	2.264		
CNT-0.25%	D	1	CNT-0.25%-D1	56	18	167.530			281.10	2.249		
CNT-0.25%	D	2	CNT-0.25%-D2	56	18	193.580	181.317	182.840	281.10	2.249	2.251	71
CNT-0.25%	D	3	CNT-0.25%-D3	56	18	182.840			281.90	2.255		
			-	0		0.000						
CNT-0.45%	E	1	CNT-0.45%-E1	3	18	91.350	91.943	91.943	284.30	2.274	2.274	50

DOSIFICACIÓN	LOTE	MUESTRA	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	RESITENCIA [MPa]	RESITENCIA PROMEDIO [MPa]	RESITENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]	FLUIDEZ [%]
CNT-0.45%	E	2	CNT-0.45%-E2	3	18	93.260			284.80	2.278		
CNT-0.45%	E	3	CNT-0.45%-E3	3	18	91.220			283.80	2.270		
CNT-0.45%	A	1	CNT-0.45%-A1	7	18	89.000			282.00	2.256		45
CNT-0.45%	A	2	CNT-0.45%-A2	7	18	97.180	97.673	97.180	283.70	2.270	2.263	45
CNT-0.45%	A	3	CNT-0.45%-A3	7	18	106.840			282.90	2.263		45
CNT-0.45%	B	1	CNT-0.45%-B1	14	18	130.310			282.40	2.259		
CNT-0.45%	B	2	CNT-0.45%-B2	14	18	118.370	125.290	128.750	284.80	2.278	2.269	52
CNT-0.45%	B	3	CNT-0.45%-B3	14	18	127.190			283.80	2.270		
CNT-0.45%	C	1	CNT-0.45%-C1	28	18	152.770			283.20	2.266		
CNT-0.45%	C	2	CNT-0.45%-C2	28	18	147.060	147.793	149.915	284.16	2.273	2.268	48
CNT-0.45%	C	3	CNT-0.45%-C3	28	18	143.550			283.10	2.265		
CNT-0.45%	D	1	CNT-0.45%-D1	56	18	189.780			284.30	2.274		
CNT-0.45%	D	2	CNT-0.45%-D2	56	18	175.690	177.767	175.690	285.00	2.280	2.276	49
CNT-0.45%	D	3	CNT-0.45%-D3	56	18	167.830			284.30	2.274		
			-	0		0.000						
MM-IP	A	1	MM-IP-A1	7	18	69.020			267.90	2.143		
MM-IP	A	2	MM-IP-A2	7	18	74.060	73.053	75.070	268.40	2.147	2.146	108
MM-IP	A	3	MM-IP-A3	7	18	76.080			268.30	2.146		
MM-IP	B	1	MM-IP-B1	28	18	105.480			269.90	2.159		
MM-IP	B	2	MM-IP-B2	28	18	103.770	102.370	104.625	269.00	2.152	2.160	107
MM-IP	B	3	MM-IP-B3	28	18	97.860			271.10	2.169		
			-	0		0						
ACI96-A	A	1	ACI96-A-A1	7	18	103.570			278.80	2.230		
ACI96-A	A	2	ACI96-A-A2	7	18	97.860	101.043	101.043	279.70	2.238	2.234	98
ACI96-A	A	3	ACI96-A-A3	7	18	101.700			279.10	2.233		
ACI96-A	B	1	ACI96-A-B1	14	18	113.850			277.41	2.219		
ACI96-A	B	2	ACI96-A-B2	14	18	115.880	109.767	114.865	278.37	2.227	2.227	100
ACI96-A	B	3	ACI96-A-B3	14	18	99.570			279.30	2.234		
ACI96-A	C	1	ACI96-A-C1	28	18	141.540			279.70	2.238		
ACI96-A	C	2	ACI96-A-C2	28	18	137.570	133.053	139.555	279.60	2.237	2.234	100
ACI96-A	C	3	ACI96-A-C3	28	18	120.050			278.40	2.227		



DOSIFICACIÓN	LOTE	MUESTRA	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	RESITENCIA [MPa]	RESITENCIA PROMEDIO [MPa]	RESITENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]	FLUIDEZ [%]
ACI96-A	D	1	ACI96-A-D1	56	18	154.836			278.80	2.224		
ACI96-A	D	2	ACI96-A-D2	56	18	146.340	141.612	150.588	279.80	2.224	2.224	102
ACI96-A	D	3	ACI96-A-D3	56	18	123.660			280.00	2.224		
			-	0		0						
ACI96-B	A	1	ACI96-B-A1	7	18	86.110			276.07	2.209		
ACI96-B	A	2	ACI96-B-A2	7	18	92.710	91.777	94.610	276.37	2.211	2.211	96
ACI96-B	A	3	ACI96-B-A3	7	18	96.510			276.80	2.214		
ACI96-B	B	1	ACI96-B-B1	14	18	107.290			279.20	2.234		
ACI96-B	B	2	ACI96-B-B2	14	18	121.340	116.220	120.685	278.20	2.226	2.230	98
ACI96-B	B	3	ACI96-B-B3	14	18	120.030			278.80	2.230		
ACI96-B	C	1	ACI96-B-C1	28	18	129.610			278.00	2.224		
ACI96-B	C	2	ACI96-B-C2	28	18	113.760	123.780	128.790	280.00	2.240	2.231	98
ACI96-B	C	3	ACI96-B-C3	28	18	127.970			278.80	2.230		
ACI96-B	D	1	ACI96-B-D1	56	18	144.730			280.60	2.245		
ACI96-B	D	2	ACI96-B-D2	56	18	126.710	133.310	144.730	280.40	2.243	2.242	96
ACI96-B	D	3	ACI96-B-D3	56	18	128.490			279.90	2.239		
			-	0		0						
ACI96-C	A	1	ACI96-C-A1	7	18	94.000			280.30	2.242		
ACI96-C	A	2	ACI96-C-A2	7	18	90.200	92.043	92.043	279.31	2.234	2.239	100
ACI96-C	A	3	ACI96-C-A3	7	18	91.930			279.92	2.239		
ACI96-C	B	1	ACI96-C-B1	14	18	115.140			280.000	2.240		
ACI96-C	B	2	ACI96-C-B2	14	18	105.880	109.600	106.830	281.300	2.250	2.249	102
ACI96-C	B	3	ACI96-C-B3	14	18	107.780			281.900	2.255		
ACI96-C	C	1	ACI96-C-C1	28	18	128.000			280.90	2.247		
ACI96-C	C	2	ACI96-C-C2	28	18	116.620	118.480	113.720	280.50	2.244	2.246	100
ACI96-C	C	3	ACI96-C-C3	28	18	110.820			280.80	2.246		
ACI96-C	D	1	ACI96-C-D1	56	18	133.480			280.50	2.244		
ACI96-C	D	2	ACI96-C-D2	56	18	140.750	136.343	134.140	281.60	2.253	2.246	98
ACI96-C	D	3	ACI96-C-D3	56	18	134.800			280.10	2.241		

ANEXO 2. TABLA DE RESULTADOS EN ESPECÍMENES DE 50 MM DE ARISTA CURADOS A TEMPERATURA CONTROLADA (60°C).

DOSIFICACIÓN	LOTE	MUESTRA	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	RESITENCIA [MPa]	RESITENCIA PROMEDIO [MPa]	RESITENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]	FLUIDEZ [%]
				0		0.000	0	0				
MM	F	1	MM-F1-CV	1	60	48.910	51.347	52.565	277.10	2.217		
MM	F	2	MM-F2-CV	1	60	52.320	51.347	52.565	277.10	2.217	2.221	100
MM	F	3	MM-F3-CV	1	60	52.810	51.347	52.565	278.70	2.230		
MM	E	1	MM-E1-CV	3	60	169.960	164.258	163.118	278.70	2.230		
MM	E	2	MM-E2-CV	3	60	161.550	164.258	163.118	279.20	2.234		
MM	E	3	MM-E3-CV	3	60	166.710	164.258	163.118	279.30	2.234	2.242	100
MM	G	4-G	MM-G4-G-CV	3	60	161.100	164.258	163.118	281.10	2.249		
MM	G	5-G	MM-G5-G-CV	3	60	164.230	164.258	163.118	281.40	2.251		
MM	G	6-G	MM-G6-G-CV	3	60	162.000	164.258	163.118	281.80	2.254		
MM	A	1	MM-A1-CV	7	60	157.340	161.595	160.760	278.30	2.226		
MM	A	2	MM-A2-CV	7	60	160.480	161.595	160.760	278.10	2.225		
MM	A	3	MM-A3-CV	7	60	156.770	161.595	160.760	277.50	2.220		
MM	A	4-CIL	MM-A4-CIL-CV	7	60	153.410	161.595	160.760	281.50	2.252	2.243	101
MM	A	5-CIL	MM-A5-CIL-CV	7	60	174.790	161.595	160.760	280.50	2.244		
MM	A	6-CIL	MM-A6-CIL-CV	7	60	163.250	161.595	160.760	279.60	2.237		
MM	A	7-CIL	MM-A7-CIL-CV	7	60	165.120	161.595	160.760	283.70	2.270		
MM	A	8-CIL	MM-A8-CIL-CV	7	60	161.600	161.595	160.760	284.00	2.272		
MM	B	1	MM-B1-CV	14	60	159.210	164.943	159.210	276.60	2.213		
MM	B	2	MM-B2-CV	14	60	172.040	164.943	159.210	278.70	2.230	2.225	98
MM	B	3	MM-B3-CV	14	60	163.580	164.943	159.210	279.10	2.233		
MM	C	1	MM-C1-CV	28	60	165.810	166.467	166.467	278.00	2.224		
MM	C	2	MM-C2-CV	28	60	167.070	166.467	166.467	278.30	2.226	2.224	102
MM	C	3	MM-C3-CV	28	60	166.520	166.467	166.467	277.70	2.222		
MM	D	1	MM-D1-CV	56	60	168.140	167.607	167.340	278.70	2.230		
MM	D	2	MM-D2-CV	56	60	167.710	167.607	167.340	279.90	2.239	2.238	100
MM	D	3	MM-D3-CV	56	60	166.970	167.607	167.340	280.80	2.246		
			--CV	0		0.000	0.000	0.000				
NS-1%	A	1	NS-1%-A1-CV	7	60	181.790	172.938	166.345	281.40	2.251	2.253	70
NS-1%	A	2	NS-1%-A2-CV	7	60	159.770	172.938	166.345	281.50	2.252		



DOSIFICACIÓN	LOTE	MUESTRA	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	RESITENCIA [MPa]	RESITENCIA PROMEDIO [MPa]	RESITENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]	FLUIDEZ [%]
NS-1%	A	3	NS-1%-A3-CV	7	60	167.170	172.938	166.345	280.70	2.246		
NS-1%	A	4-CIL	NS-1%-A4-CIL-CV	7	60	165.520	172.938	166.345	282.70	2.262		
NS-1%	A	5-CIL	NS-1%-A5-CIL-CV	7	60	190.440	172.938	166.345	284.10	2.273		
NS-1%	C	1	NS-1%-C1-CV	28	60	166.540	177.845	181.613	282.00	2.256		
NS-1%	C	2	NS-1%-C2-CV	28	60	179.350	177.845	181.613	282.80	2.262	2.262	69
NS-1%	C	3	NS-1%-C3-CV	28	60	182.400	177.845	181.613	283.50	2.268		
NS-1%	C	4-CIL	NS-1%-C4-CIL-CV	28	60	183.090	177.845	181.613	282.60	2.261		
		--CV		0		0.000	0.000	0.000				
NS-2%	A	1	NS-2%-A1-CV	7	60	160.340	169.538	162.443	283.60	2.269		
NS-2%	A	2	NS-2%-A2-CV	7	60	164.990	169.538	162.443	284.60	2.277	2.277	57
NS-2%	A	3	NS-2%-A3-CV	7	60	190.820	169.538	162.443	285.50	2.284		
NS-2%	A	4-CIL	NS-2%-A4-CIL-CV	7	60	162.000	169.538	162.443	284.40	2.275		
NS-2%	C	1	NS-2%-C1-CV	28	60	166.580	178.358	178.567	283.50	2.268		
NS-2%	C	2	NS-2%-C2-CV	28	60	181.730	178.358	178.567	283.50	2.268		
NS-2%	C	3	NS-2%-C3-CV	28	60	189.510	178.358	178.567	283.60	2.269	2.268	55
NS-2%	C	4-CIL	NS-2%-C4-CIL-CV	28	60	174.970	178.358	178.567	284.10	2.273		
NS-2%	C	5-CIL	NS-2%-C5-CIL-CV	28	60	179.000	178.358	178.567	285.40	2.283		
		--CV		0		0.000	0.000	0.000				
NS-3%	A	1	NS-3%-A1-CV	7	60	183.450	173.350	184.657	283.70	2.270		
NS-3%	A	2	NS-3%-A2-CV	7	60	183.660	173.350	184.657	283.10	2.265		
NS-3%	A	3	NS-3%-A3-CV	7	60	158.930	173.350	184.657	284.60	2.277	2.270	40
NS-3%	A	4-C'	NS-3%-A4-C'-CV	7	60	167.720	173.350	184.657	283.70	2.270		
NS-3%	A	5-C'	NS-3%-A5-C'-CV	7	60	186.860	173.350	184.657	284.40	2.275		
NS-3%	A	6-CIL	NS-3%-A6-CIL-CV	7	60	159.480	173.350	184.657	283.20	2.266		
NS-3%	B	1	NS-3%-B1-CV	28	60	181.750	180.288	181.546	284.50	2.276		
NS-3%	B	2	NS-3%-B2-CV	28	60	180.390	180.288	181.546	284.50	2.276		
NS-3%	B	3	NS-3%-B3-CV	28	60	183.830	180.288	181.546	283.90	2.271	2.274	38
NS-3%	B	4-C'	NS-3%-B4-C'-CV	28	60	174.000	180.288	181.546	283.40	2.267		
NS-3%	B	5-CIL	NS-3%-B5-CIL-CV	28	60	181.770	180.288	181.546	284.10	2.273		
NS-3%	B	6-CIL	NS-3%-B6-CIL-CV	28	60	179.990	180.288	181.546	282.60	2.261		
		--CV		0		0.000	0.000	0.000				

DOSIFICACIÓN	LOTE	MUESTRA	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	RESITENCIA [MPa]	RESITENCIA PROMEDIO [MPa]	RESITENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]	FLUIDEZ [%]
CNT-0.05%	B	1	CNT-0.05%-B1-CV	7	60	168.410	167.803	168.740	285.30	2.282		
CNT-0.05%	B	2	CNT-0.05%-B2-CV	7	60	164.990	167.803	168.740	283.40	2.267	2.275	83
CNT-0.05%	B	3	CNT-0.05%-B3-CV	7	60	171.650	167.803	168.740	284.60	2.277		
CNT-0.05%	B	4-CIL	CNT-0.05%-B4-CIL-CV	7	60	166.160	167.803	168.740	282.00	2.256		
CNT-0.05%	A	1	CNT-0.05%-A1-CV	28	60	186.850	177.090	179.865	281.40	2.251		
CNT-0.05%	A	2	CNT-0.05%-A2-CV	28	60	180.820	177.090	179.865	281.50	2.252		
CNT-0.05%	A	3	CNT-0.05%-A3-CV	28	60	171.470	177.090	179.865	283.00	2.264	2.256	84
CNT-0.05%	A	4-CIL	CNT-0.05%-A4-CIL-CV	28	60	167.400	177.090	179.865	279.50	2.236		
CNT-0.05%	A	5-CIL	CNT-0.05%-A5-CIL-CV	28	60	178.910	177.090	179.865	280.80	2.246		
			--CV	0		0.000	0.000	0.000				
CNT-0.25%	A	1	CNT-0.25%-A1-CV	7	60	174.280	165.893	175.070	281.10	2.249		
CNT-0.25%	A	2	CNT-0.25%-A2-CV	7	60	146.610	165.893	175.070	281.10	2.249	2.251	73
CNT-0.25%	A	3	CNT-0.25%-A3-CV	7	60	175.860	165.893	175.070	281.90	2.255		
CNT-0.25%	A	4-CIL	CNT-0.25%-A4-CIL-CV	7	60	166.820	165.893	175.070	285.00	2.280		
CNT-0.25%	C	1	CNT-0.25%-C1-CV	28	60	167.530	184.760	191.143	285.60	2.285		
CNT-0.25%	C	2	CNT-0.25%-C2-CV	28	60	193.580	184.760	191.143	285.10	2.281		
CNT-0.25%	C	3	CNT-0.25%-C3-CV	28	60	182.840	184.760	191.143	283.90	2.271	2.279	72
CNT-0.25%	C	4-CIL	CNT-0.25%-C4-CIL-CV	28	60	191.010	184.760	191.143	284.20	2.274		
CNT-0.25%	C	5-CIL	CNT-0.25%-C5-CIL-CV	28	60	188.840	184.760	191.143	284.60	2.277		
			--CV	0		0.000	0.000	0.000				
CNT-0.45%	A	1	CNT-0.45%-A1-CV	7	60	153.470	161.640	154.353	283.90	2.271		
CNT-0.45%	A	2	CNT-0.45%-A2-CV	7	60	158.770	161.640	154.353	285.20	2.282		
CNT-0.45%	A	3	CNT-0.45%-A3-CV	7	60	167.950	161.640	154.353	285.40	2.283	2.279	50
CNT-0.45%	A	4-CIL	CNT-0.45%-A4-CIL-CV	7	60	150.820	161.640	154.353	283.00	2.264		
CNT-0.45%	A	5-CIL	CNT-0.45%-A5-CIL-CV	7	60	177.190	161.640	154.353	283.60	2.269		
CNT-0.45%	C	1	CNT-0.45%-C1-CV	28	60	189.780	179.440	187.120	284.30	2.274		
CNT-0.45%	C	2	CNT-0.45%-C2-CV	28	60	175.690	179.440	187.120	285.00	2.280	2.276	52
CNT-0.45%	C	3	CNT-0.45%-C3-CV	28	60	167.830	179.440	187.120	284.30	2.274		
CNT-0.45%	C	4-CIL	CNT-0.45%-C4-CIL-CV	28	60	184.46	179.440	187.120	283.5	2.268		
			--CV	0		0.000	0.000	0.000				
MM-IP	A	1	MM-IP-A1-CV	7	60	139.430	135.610	138.240	266.00	2.128	2.132	105



DOSIFICACIÓN	LOTE	MUESTRA	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	RESITENCIA [MPa]	RESITENCIA PROMEDIO [MPa]	RESITENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]	FLUIDEZ [%]
MM-IP	A	2	MM-IP-A2-CV	7	60	130.350	135.610	138.240	267.40	2.139		
MM-IP	A	3	MM-IP-A3-CV	7	60	137.050	135.610	138.240	266.10	2.129		
MM-IP	C	1	MM-IP-C1-CV	28	60	140.630	146.337	149.190	265.60	2.125		
MM-IP	C	2	MM-IP-C2-CV	28	60	150.400	146.337	149.190	267.20	2.138	2.136	107
MM-IP	C	3	MM-IP-C3-CV	28	60	147.980	146.337	149.190	268.20	2.146		

ANEXO 3. TABLA DE RESULTADOS PROMEDIO EN ESPECÍMENES PRELIMINARES DE 50 MM DE ARISTA CURADOS A TEMPERATURA AMBIENTE (18°C).

DOSIFICACION	VARIACIÓN	RESITENCIA PROMEDIO [MPa]	CURADO	Edad [Días]	DENSIDAD [g/cm ³]	ARENA/C	HUMO/C	HRWR/C	W/C	FLUIDEZ
FHWA 2018	A1	34.358	18°C	8	1.695	0.970	0.390	0.029	0.389	N/D
	B1	44.690	18°C	8	1.782	0.970	0.390	0.018	0.373	N/D
	C1	55.800	18°C	7	1.879	0.970	0.390	0.018	0.295	N/D
	D1	65.450	18°C	7	2.000	0.970	0.390	0.018	0.271	N/D
	A2	98.250	18°C	8	2.192	0.970	0.390	0.044	0.259	MEDIA
	B2	104.100	18°C	9	2.205	0.970	0.390	0.044	0.243	BAJA
	C2	87.370	18°C	9	2.253	0.970	0.390	0.036	0.276	ALTA
	A3	80.560	18°C	7	2.219	0.970	0.390	0.076	0.209	BAJA
	B3	87.670	18°C	7	2.204	0.970	0.390	0.071	0.226	MEDIA
	C3	96.090	18°C	8	2.213	0.970	0.390	0.062	0.242	MEDIA
	D3	103.440	18°C	9	2.205	0.970	0.390	0.080	0.209	MEDIA
	A4	92.350	18°C	8	2.173	0.679	0.390	0.071	0.223	ALTA
	B4	86.400	18°C	8	2.192	0.679	0.390	0.071	0.203	BAJA
	ACI 1996	A1	30.660	18°C	15	1.776	1.432	0.325	0.027	0.345
B1		38.590	18°C	15	1.885	1.432	0.325	0.027	0.309	N/D
C1		95.790	18°C	15	2.073	1.432	0.325	0.027	0.280	N/D
A2		85.870	18°C	8	2.176	1.432	0.325	0.027	0.280	N/D
B2		121.080	18°C	8	2.269	1.432	0.325	0.041	0.241	N/D
C2		109.970	18°C	8	2.211	1.432	0.325	0.041	0.260	N/D
A3		123.590	18°C	11	2.259	1.432	0.325	0.041	0.240	N/D
B3		117.150	18°C	11	2.283	1.432	0.325	0.054	0.224	N/D
C3		111.700	18°C	11	2.261	1.432	0.325	0.068	0.216	N/D
B4		103.450	18°C	6	2.240	1.432	0.325	0.054	0.224	MEDIA
ACI 2009	C4	96.550	18°C	6	2.232	1.002	0.325	0.054	0.208	MEDIA
	D1	81.660	18°C	14	2.193	0.967	0.389	0.017	0.306	N/D
	E1	85.210	18°C	14	2.074	0.967	0.389	0.017	0.293	N/D
	I1	115.750	18°C	14	2.204	0.967	0.389	0.019	0.269	N/D
	J1	94.490	18°C	14	2.220	0.967	0.389	0.019	0.252	N/D



DOSIFICACION	VARIACIÓN	RESITENCIA PROMEDIO [MPa]	CURADO	Edad [Días]	DENSIDAD [g/cm ³]	ARENA/C	HUMO/C	HRWR/C	W/C	FLUIDEZ
DUCTAL	A1	81.630	18°c	180	N/D	1.433	0.324	0.051	0.153	BAJA
	B1	90.880	18°c	180	2.316	1.433	0.324	0.043	0.176	BAJA
	C1	98.820	18°c	180	2.299	1.433	0.324	0.043	0.153	NULA
	D1	5.000	18°c	180	1.952	1.433	0.324	0.043	0.199	NULA
CRC	A1	110.810	18°c	7	2.216	0.920	0.250	0.044	0.210	MEDIA
CEMTEC	A1	100.960	18°c	8	2.219	0.490	0.255	0.042	0.195	BAJA
	B1	105.660	18°c	8	2.197	0.490	0.255	0.050	0.196	MEDIA
	C1	102.730	18°c	7	2.237	0.490	0.255	0.063	0.183	BAJA
	D1	100.500	18°c	7	2.208	0.490	0.255	0.052	0.186	ALTA
	A2	115.250	18°c	10	2.221	0.490	0.255	0.063	0.208	BAJA
B2	93.030	18°c	10	2.136	0.490	0.255	0.063	0.183	ALTA	

ANEXO 4. TABLA DE RESULTADOS EN ESPECÍMENES CILÍNDRICOS CURADOS A TEMPERATURA AMBIENTE (18°C).

DOSIFICACION	LOTE	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	DIAMETRO mm	ALTURA [mm]	COMP /TEN	FUERZA [KN]	RESISTENCIA [MPa]	RESISTENCIA PROMEDIO [MPa]	RESISTENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]
MM	A	MM-A	28	18	101	196	C	1100	137.57	137.487	137.487	3522	2.247	
MM	B	MM-B	28	18	101	196		1090	137.41			3550	2.284	
MM	C	MM-C	28	18	101	195	T	215	6.98	7.511	7.778	3481	2.244	2.254
MM	D	MM-D	28	18	101	196		249	8.02			3510	2.244	
MM	E/A2	MM-E/A2	28	18	101	196	T	233	7.53			3515	2.251	
NS-1%	A	NS-1%-A	28	18	101	194	C	1130	141.32	143.775	143.775	3467	2.241	
NS-1%	C	NS-1%-C	28	18	101	193		1160	146.23			3570	2.337	
NS-1%	B	NS-1%-B	28	18	101	196	T	253	8.14	7.735	7.735	3563	2.273	2.283
NS-1%	D	NS-1%-D	28	18	101	196		227	7.33			3557	2.280	
NS-1%	E	NS-1%-E	28	18	101	196	T	212	6.82			3583	2.286	
NS-2%	A	NS-2%-A	28	18	100	197	C	1200	151.57	151.806	151.922	3580	2.290	
NS-2%	C	NS-2%-C	28	18	101	195		1260	156.65			3556	2.264	
NS-2%	B	NS-2%-B	28	18	101	196	T	242	7.80	8.134	8.134	3588	2.296	2.285
NS-2%	D	NS-2%-D	28	18	101	195		261	8.47			3555	2.295	
NS-2%	E	NS-2%-E	28	18	101	197	C	1170	147.20			3563	2.278	
NS-3%	A	NS-3%-A	28	18	100	197	C	1230	155.36	153.295	153.295	3585	2.294	
NS-3%	B	NS-3%-B	28	18	100	196		1270	160.42			3570	2.298	
NS-3%	C	NS-3%-C	28	18	101	196	T	254	8.17	8.013	8.013	3595	2.293	2.287
NS-3%	D	NS-3%-D	28	18	101	197		244	7.86			3562	2.283	
NS-3%	E	NS-3%-E	28	18	101	197	C	1150	144.11			3562	2.267	
CNT-0.05%	A	CNT-0.05%-A	28	18	101	196	C	1180	146.12	146.468	146.468	3592	2.270	
CNT-0.05%	B	CNT-0.05%-B	28	18	100	195		1160	146.81			3520	2.287	
CNT-0.05%	C	CNT-0.05%-C	28	18	101	193	T	246	8.05	7.663	7.663	3469	2.249	2.273
CNT-0.05%	D	CNT-0.05%-D	28	18	101	196		225	7.28			3549	2.282	
CNT-0.05%	E	CNT-0.05%-E	28	18	101	197	T	234	7.52			3569	2.275	
CNT-0.25%	B	CNT-0.25%-B	28	18	101	196	C	1150	144.68	150.544	150.544	3551	2.282	
CNT-0.25%	C	CNT-0.25%-C	28	18	101	196		1290	161.01			3604	2.294	2.285
CNT-0.25%	A	CNT-0.25%-A	28	18	101	196	T	253	8.18	8.076	8.076	3552	2.280	



DOSIFICACION	LOTE	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	DIAMETRO mm	ALTURA [mm]	COMP / TEN	FUERZA [KN]	RESITENCIA [MPa]	RESITENCIA PROMEDIO [MPa]	RESITENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]
CNT-0.25%	D	CNT-0.25%-D	28	18	101	197		248	7.97			3580	2.287	
CNT-0.25%	E	CNT-0.25%-E	28	18	101	196	C	1160	145.94			3552	2.284	
CNT-0.45%	A	CNT-0.45%-A	28	18	101	196		1150	143.82	144.300	144.300	3558	2.269	
CNT-0.45%	C	CNT-0.45%-C	28	18	101	197	C	1160	145.94			3575	2.285	
CNT-0.45%	B	CNT-0.45%-B	28	18	102	196	T	273	8.71	8.551	8.551	3597	2.260	2.280
CNT-0.45%	D	CNT-0.45%-D	28	18	101	197		261	8.39			3566	2.274	
CNT-0.45%	E	CNT-0.45%-E	28	18	101	197	C	1140	143.14			3615	2.310	
MM-IP	B	MM-IP-B	28	18	101	194	C	878	110.46	110.461	110.461	3384	2.192	2.176
MM-IP	A	MM-IP-A	28	18	101	196	T	229	7.38	7.383	7.383	3379	2.160	

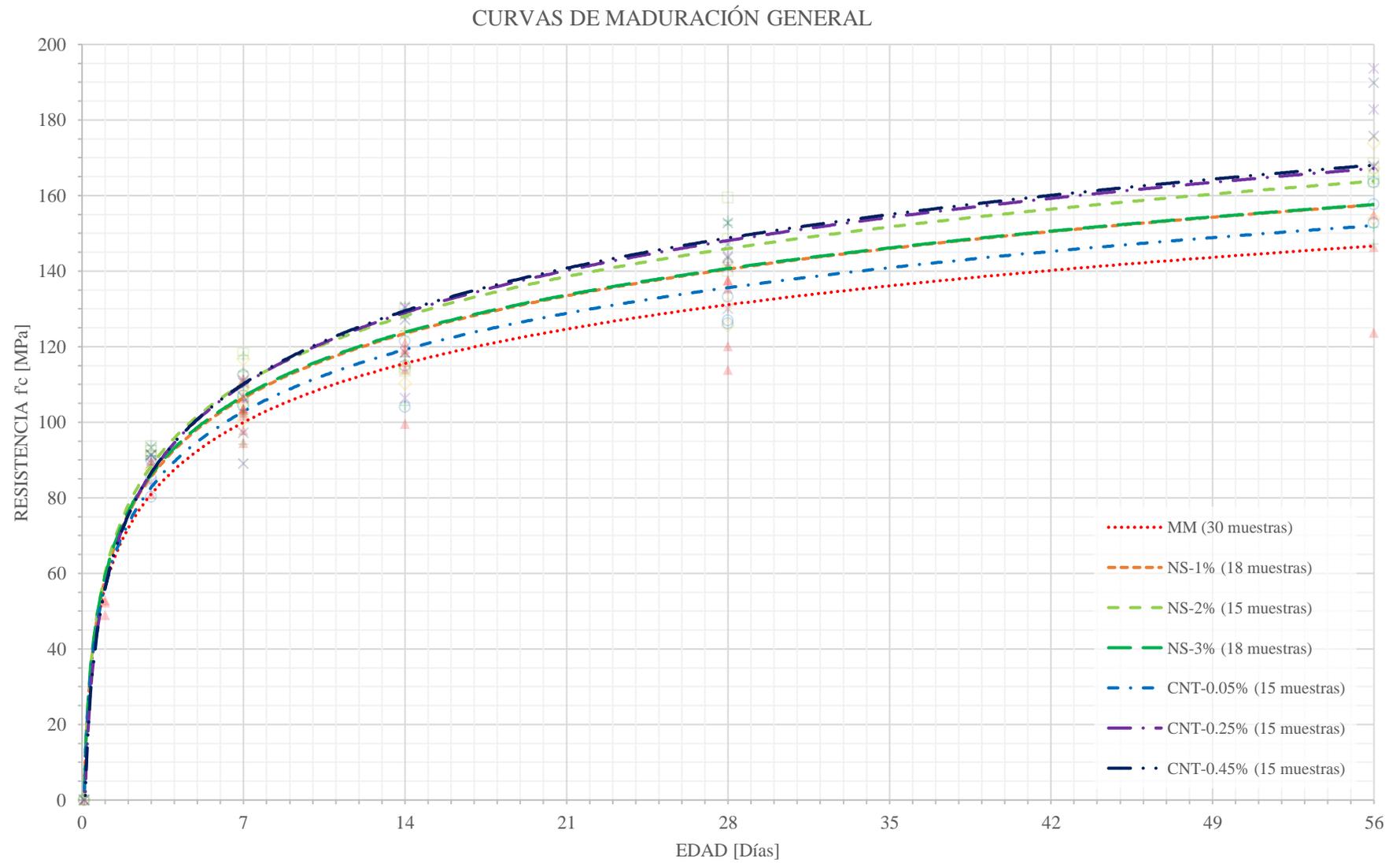
ANEXO 5. TABLA DE RESULTADOS EN ESPECÍMENES CILÍNDRICOS CURADOS A TEMPERATURA CONTROLADA (60°C).

DOSIFICACION	LOTE	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	DIAMETRO [mm]	ALTURA [mm]	COMP / TEN	FUERZA [KN]	RESISTENCIA [MPa]	RESISTENCIA PROMEDIO [MPa]	RESISTENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]
MM	A	MM-A-CV	28	60	100	196	C	1390	175.57	164.094	164.094	3542	2.278	
MM	B	MM-B-CV	28	60	101	196		1190	149.71			3503	2.246	
MM	C	MM-C-CV	28	60	101	196	T	97	3.12	7.541	8.680	3502	2.231	
MM	D	MM-D-CV	28	60	101	196		300	9.69			3516	2.259	2.249
MM	E	MM-E-CV	28	60	101	194	C	1330	166.99			3471	2.245	
MM	F	MM-F-CV	28	60	101	197	T	278	8.92			3525	2.243	
MM	G	MM-G-CV	28	60	101	196	T	262	8.44			3512	2.242	
NS-1%	B	NS-1%-B-CV	28	60	101	196	C	1390	174.53	169.969	174.528	3575	2.290	
NS-1%	D	NS-1%-D-CV	28	60	101	195		1320	165.41			3541	2.276	2.273
NS-1%	A	NS-1%-A-CV	28	60	101	195	T	268	8.68	8.806	8.806	3526	2.269	
NS-1%	C	NS-1%-C-CV	28	60	101	194		274	8.93			3482	2.256	
NS-2%	A	NS-2%-A-CV	28	60	101	197	C	1410	176.34	176.865	177.392	3565	2.264	
NS-2%	D	NS-2%-D-CV	28	60	101	196		1410	177.39			3522	2.267	2.267
NS-2%	B	NS-2%-B-CV	28	60	101	195	T	281	9.10	8.331	9.101	3538	2.273	
NS-2%	C	NS-2%-C-CV	28	60	101	196		235	7.56			3544	2.263	
NS-3%	B	NS-3%-B-CV	28	60	101	197	C	1420	178.30	179.007	179.007	3618	2.309	
NS-3%	D	NS-3%-D-CV	28	60	101	197		1400	176.13			3562	2.277	
NS-3%	A	NS-3%-A-CV	28	60	101	197	T	281	8.96	8.681	8.681	3547	2.232	2.275
NS-3%	C	NS-3%-C-CV	28	60	101	196		261	8.40			3561	2.273	
NS-3%	C'	NS-3%-C'-CV	28	60	101	197	C	1460	182.59			3588	2.284	
CNT-0.05%	A	CNT-0.05%-A-CV	28	60	102	197	C	1400	173.02	163.647	163.647	3567	2.241	
CNT-0.05%	C	CNT-0.05%-C-CV	28	60	101	196		1370	171.68			3544	2.268	2.256
CNT-0.05%	B	CNT-0.05%-B-CV	28	60	101	192	T	345	11.35	9.686	8.024	3459	2.257	
CNT-0.05%	D	CNT-0.05%-D-CV	28	60	101	195		247	8.02			3498	2.257	
CNT-0.25%	B	CNT-0.25%-B-CV	28	60	101	197	C	1430	180.27	176.426	180.266	3568	2.286	
CNT-0.25%	D	CNT-0.25%-D-CV	28	60	101	196		1380	172.59			3594	2.292	2.278
CNT-0.25%	A	CNT-0.25%-A-CV	28	60	101	196	T	281	9.04	8.680	8.680	3555	2.264	



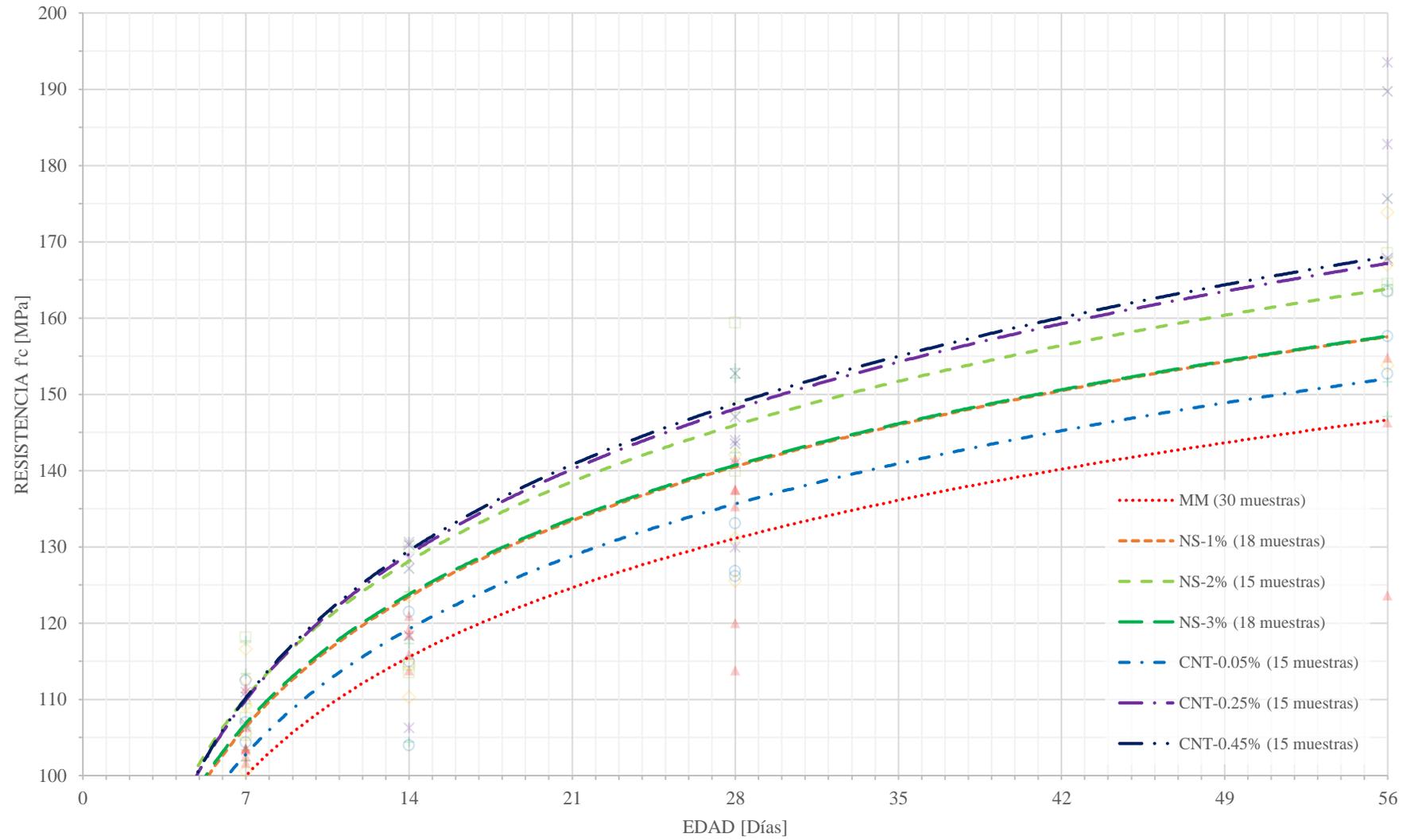
DOSIFICACION	LOTE	CÓDIGO	EDAD [Días]	CURADO [°C]	DIAMETRO mm	ALTURA [mm]	COMP / TEN	FUERZA [KN]	RESISTENCIA [MPa]	RESISTENCIA PROMEDIO [MPa]	RESISTENCIA PRM. CORR. [MPa]	MASA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]	DENSIDAD PROM. [g/cm ³]
CNT-0.25%	C	CNT-0.25%-C-CV	28	60	101	195		257	8.32			3536	2.270	
CNT-0.45%	A	CNT-0.45%-A-CV	28	60	101	196	C	1430	178.84	174.970	178.840	3560	2.274	2.273
CNT-0.45%	C	CNT-0.45%-C-CV	28	60	101	197		1360	171.10			3553	2.275	
CNT-0.45%	B	CNT-0.45%-B-CV	28	60	101	195	T	309	10.01	9.658	9.658	3540	2.278	2.265
CNT-0.45%	D	CNT-0.45%-D-CV	28	60	101	196		289	9.30			3550	2.265	
MM-IP	A	MM-IP-A-CV	28	60	101	193	C	1160	144.79	144.786	144.786	3334	2.157	2.163
MM-IP	B	MM-IP-B-CV	28	60	101	193	T	249	8.16	8.164	8.164	3328	2.169	

ANEXO 6. CURVAS DE MADURACIÓN GENERAL PARA ESPECÍMENES DE 50 MM DE ARISTA BAJO CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE (18°C).



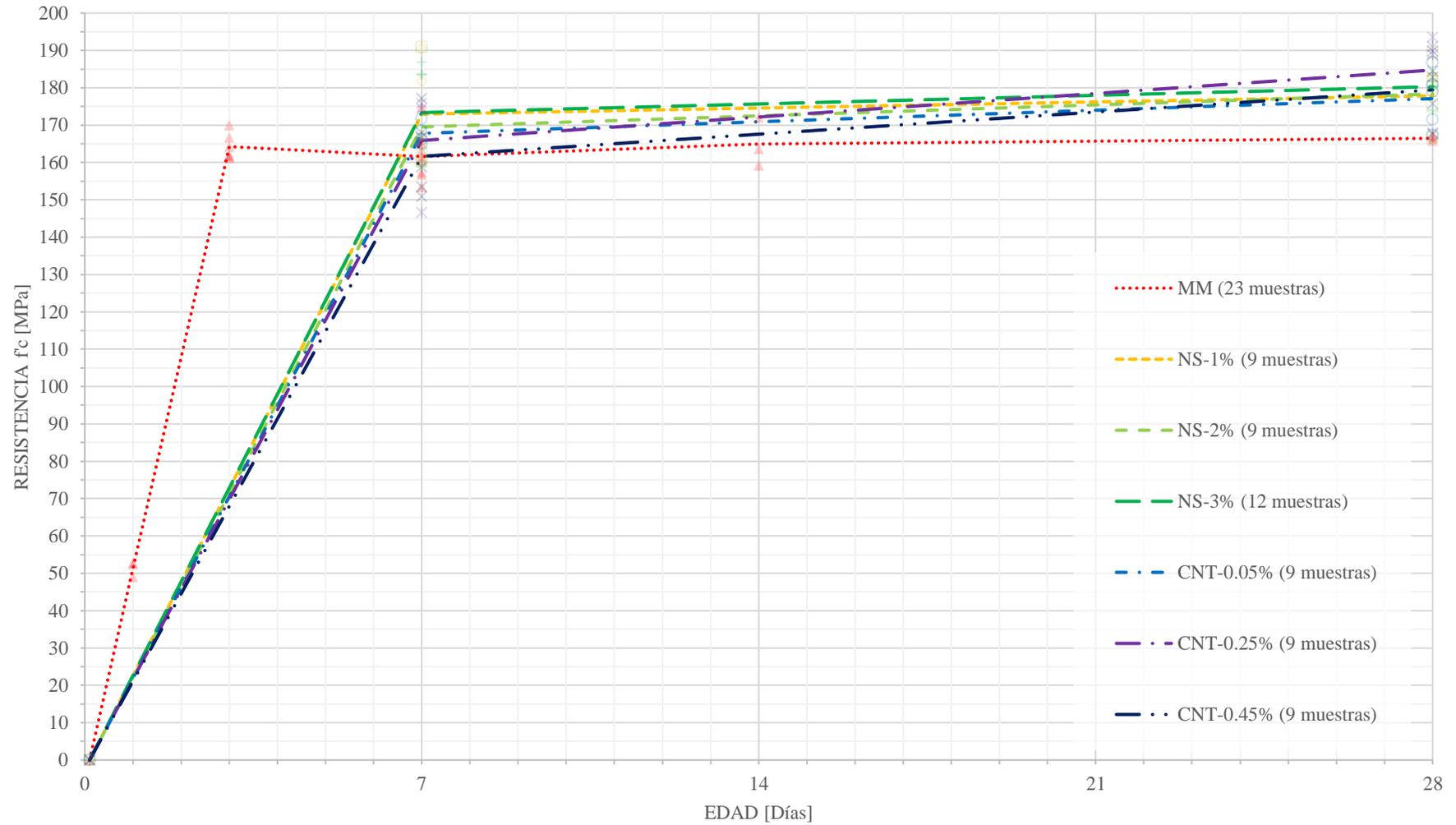


CURVAS DE MADURACIÓN GENERAL [ACERCAMIENTO]



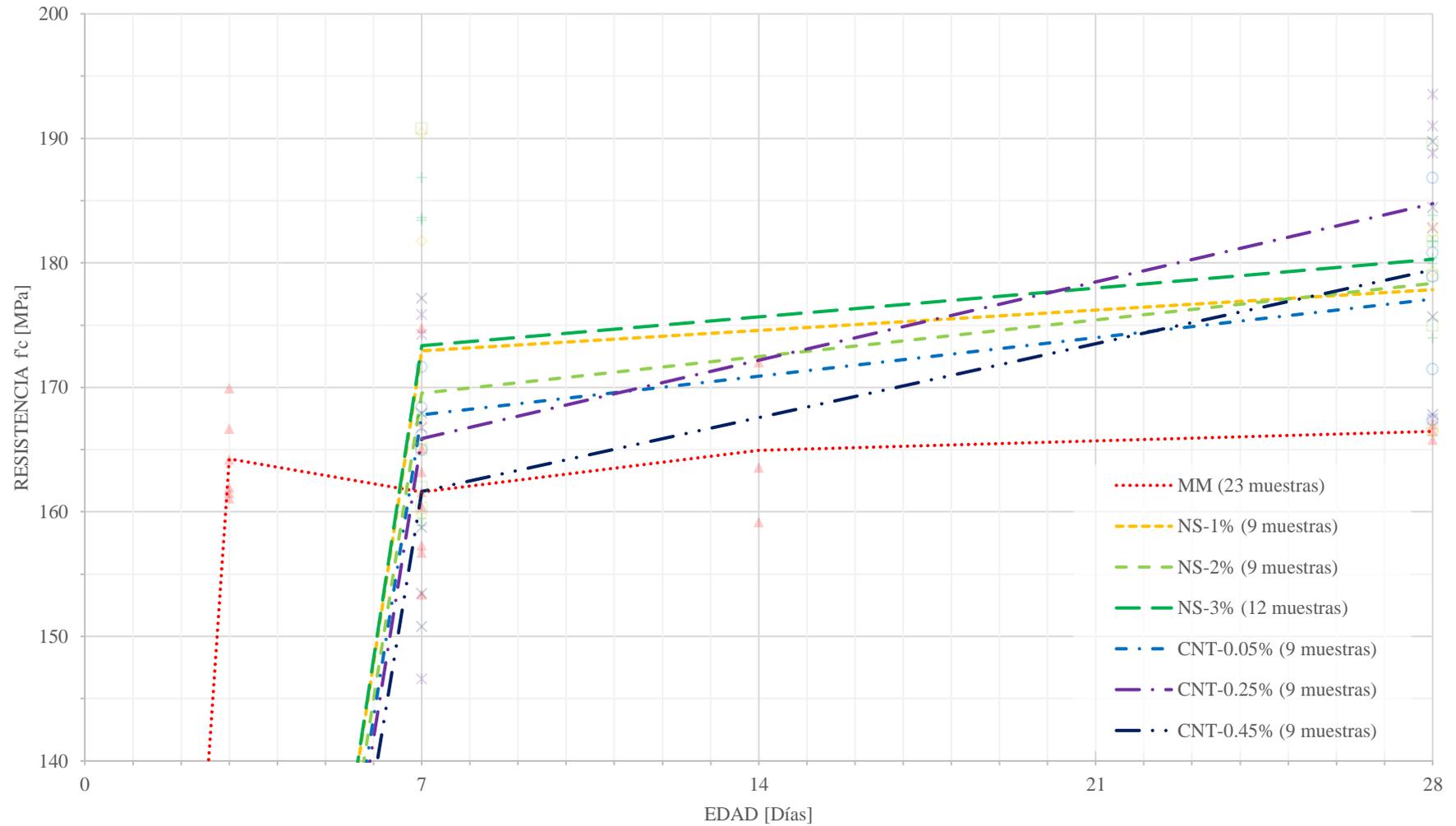
ANEXO 7. CURVAS DE MADURACIÓN GENERAL PARA ESPECÍMENES DE 50 MM DE ARISTA BAJO CURADO A TEMPERATURA CONTROLADA (60°C).

CURVAS DE MADURACIÓN GENERAL - 60°C





CURVAS DE MADURACIÓN GENERAL - 60°C



ANEXO 8. TABLAS INFORMATIVAS REFERENTES AL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (LCA): EJEMPLO DE PUENTES.

MEZCLAS DE REFERENCIA DE HORMIGÓN CONVENCIONAL (CC) Y HORMIGÓN DE ULTRA ALTO RENDIMIENTO (UHPC), FUENTE: SAMEER ET AL. (2019).

MATERIAL	UNIDAD	UHPC		CC	
		PREMEZCLADO	PREFABRICADO	PREMEZCLADO	PREFABRICADO
		M3Q	M2Q	C35 / 45	C50 / 60
Cemento / CEM I 52.5 R-HS / NA (SR 3)	kg/m ³	775	832	-	-
Cemento / CEM II / A	kg/m ³	-	-	356	405
Arena de cuarzo	kg/m ³	946	975	-	-
Arena	kg/m ³	-	-	640	654
Grava	kg/m ³	-	-	806	827
Arena	kg/m ³	-	-	362	371
Agua	kg/m ³	183	166	165	141
Polvo de cuarzo	kg/m ³	193	207	-	-
Humo de sílice	kg/m ³	164	135	-	-
Ceniza voladora	kg/m ³	-	-	47	25
Superplastificante	kg/m ³	23,50	29,40	-	-
Plastificante	kg/m ³	-	-	1,80	4.6
Microfibras de acero	kg/m ³	192	192	-	-
Total	kg/m ³	2476,50	2536.4	2377.8	2427.6



TIPOS DE TRANSPORTE Y DISTANCIAS DE LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN, FUENTE: SAMEER ET AL. (2019).

Material	Distancia de transporte (km)	Tipo de transporte		
		Camión%	Tren %	Embarcación %
Arena; Grava; Arena	39	88	1,90	10.1
Cemento	106	79,90	8,90	11.2
Ceniza voladora	100	100	-	-
Plastificantes	100	100	-	-
Arena de cuarzo; Polvo de cuarzo	150	100	-	-
Humo de sílice	700	100	-	-
Fibras de acero	230	100	-	-

ENERGÍA REQUERIDA EN LA ETAPA A3 DEL CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN DE 1 m³, FUENTE: SAMEER ET AL. (2019).

Portador de energía	UHPC		CC	
	Premezclado M3Q	Prefabricado M2Q	Premezclado C35 / 45	Prefabricado C50 / 60
		Operación de mezcla y planta		
Electricidad (kWh/m ³)		7.09		4.43
Aceite combustible (L/m ³)			0,26	
Diesel			0,09	
		Compactación de prefabricados de hormigón		
Electricidad (kWh /m ³)	-	0,90	-	0,90
		Tratamiento térmico de prefabricados de hormigón		
Aceite combustible (L/m ³)	-	3,00	-	

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LAS DOS OPCIONES DE DISEÑO DEL PUENTE, FUENTE: SAMEER ET AL. (2019).

Elemento de estructura de puente	Diseño UHPC	Cantidad	Diseño CC	Cantidad
Pilares y soporte intermedio con 5 pilares simples	C35 / 45	25,00 m ³	C35 / 45	40,00 m ³
	Acero de refuerzo	6,50 toneladas	Acero de refuerzo	27,00 toneladas
Soporte sobre los 5 pilares individuales intermedios	Bisagras de hormigón con UHPC fundido en obra (M2Q)	1,10 m ³	-	-
	Hormigón prefabricado C50 / 60	180,00 m ³	Hormigón prefabricado C50 / 60	142,00 m ³
Vigas principales (longitudinales)	Acero de refuerzo + pretensado	54,80 toneladas	Acero de refuerzo + pretensado	33,00 toneladas
	Masilla de poliuretano	0,12 toneladas	C35 / 45	119,00 m ³
	M3Q	7,00 m ³	-	-
	M3Q	20,50 m ³	Resina epóxica	0,56 toneladas
Sellando	-	-	Arena de cuarzo	0,84 toneladas
	-	-	Láminas de betún	3,09 toneladas
	Asfalto vertido	1,73 toneladas	Asfalto vertido	56,45 toneladas
Superficie de la carretera	Asfalto de masilla de piedra (SMA)	28,80 toneladas	-	-
	Material de unión	0,09 toneladas	Material de unión	0,16 toneladas
	Virutas de alta calidad (0/5)	0,90 toneladas	Áridos (2/5), (5/8)	1,95 toneladas
Elementos de acera	Resina epóxica	1,24 toneladas	-	-
	M2Q	33,00 m ³	Hormigón premezclado C25 / 30	59,00 m ³

FRECUENCIA DE REEMPLAZOS NECESARIOS PARA LOS TRABAJOS DE MANTENIMIENTO DURANTE LA FASE DE USO DEL PUENTE, FUENTE: SAMEER ET AL. (2019).

RENOVACIÓN

ELEMENTO	Diseño UHPC (Número)	Diseño CC (número)
Superficie de la carretera	4	4
Sellando	-	4
Elementos de acera	-	2
Superficie de hormigón	-	2



ANEXO 9. TABLAS DE CONSUMO ENERGÉTICO Y HUELLA DE CARBONO EN LA ETAPA DE PRODUCCIÓN DE UHPC SEGÚN DOSIFICACIÓN POR METRO CÚBICO PRODUCIDO.

CONSUMO ENERGÉTICO Y HUELLA DE CARBONO EN LA ETAPA DE PRODUCCIÓN DE UHPC BAJO DOSIFICACIÓN DE MUESTRA MAESTRA (MM) POR METRO CÚBICO PRODUCIDO.

Fase	Curado 18°C		Curado 60°C	
	Energía [MJ]	CO ₂ eq.	Energía [MJ]	CO ₂ eq.
Materia Prima	6165.62	1280.29	6165.62	1280.29
Transporte	448.29	30.93	448.29	30.93
Producción	40.92	0.03	145.26	0.27
TOTAL	6654.82	1311.24	6759.16	1311.49

CONSUMO ENERGÉTICO Y HUELLA DE CARBONO EN LA ETAPA DE PRODUCCIÓN DE UHPC BAJO DOSIFICACIÓN DE NANOSÍLICE AL 2% (NS-2%) POR METRO CÚBICO PRODUCIDO.

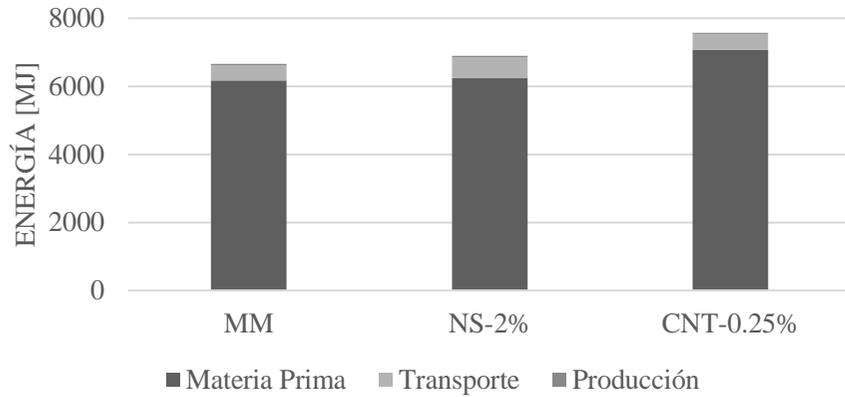
Fase	Curado 18°C		Curado 60°C	
	Energía [MJ]	CO ₂ eq.	Energía [MJ]	CO ₂ eq.
Materia Prima	6250.13	1292.85	6250.13	1292.85
Transporte	599.86	41.38	599.86	41.38
Producción	40.92	0.03	145.26	0.27
TOTAL	6890.91	1334.26	6995.25	1334.51

CONSUMO ENERGÉTICO Y HUELLA DE CARBONO EN LA ETAPA DE PRODUCCIÓN DE UHPC BAJO DOSIFICACIÓN DE NANOTUBOS DE CARBONO AL 0.25% (CNT-0.25%) POR METRO CÚBICO PRODUCIDO.

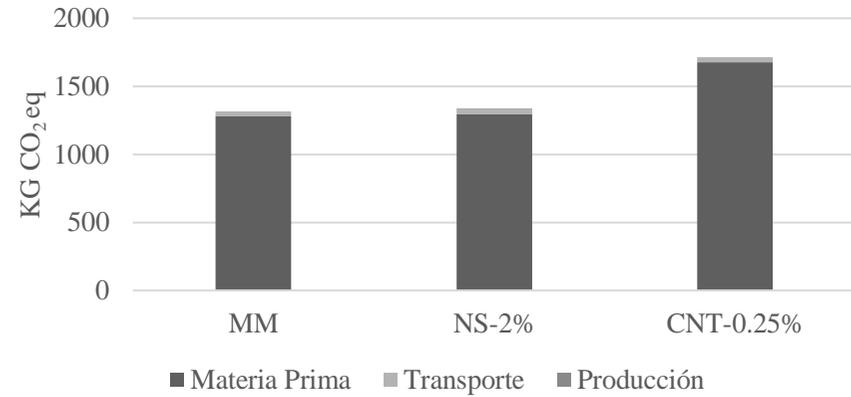
Fase	Curado 18°C		Curado 60°C	
	Energía [MJ]	CO ₂ eq.	Energía [MJ]	CO ₂ eq.
Materia Prima	7066.96	1674.86	7066.96	1674.86
Transporte	467.35	32.24	467.35	32.24
Producción	40.92	0.03	145.26	0.24
TOTAL	7575.23	1707.13	7679.57	1707.34

ANEXO 10. RESUMEN DE CONSUMO ENERGÉTICO Y HUELLA DE CARBONO EN LA ETAPA DE PRODUCCIÓN DE UHPC SEGÚN DOSIFICACIÓN POR METRO CÚBICO PRODUCIDO.

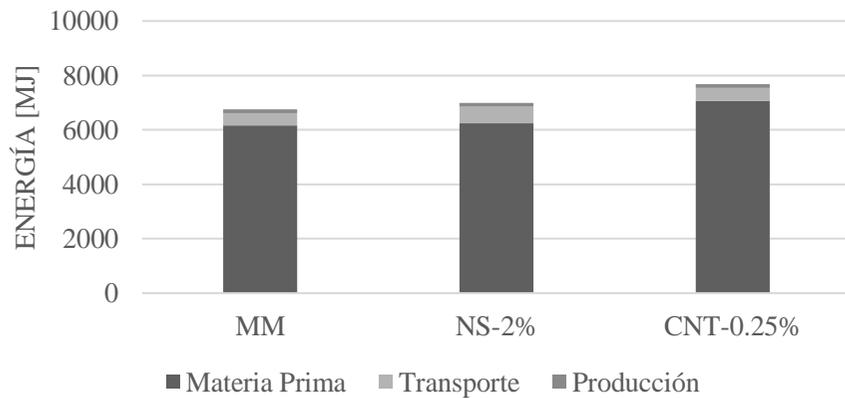
RESUMEN DEMANDA ENERGÉTICA CURADO 18°C



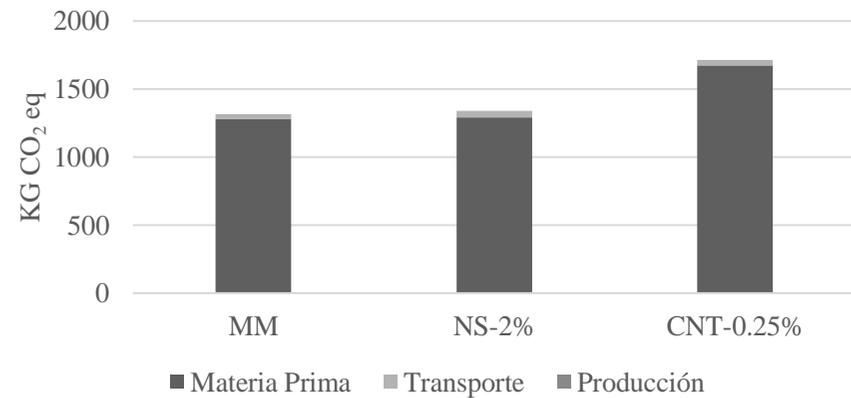
RESUMEN HUELLA DE CARBONO CURADO A 18°C



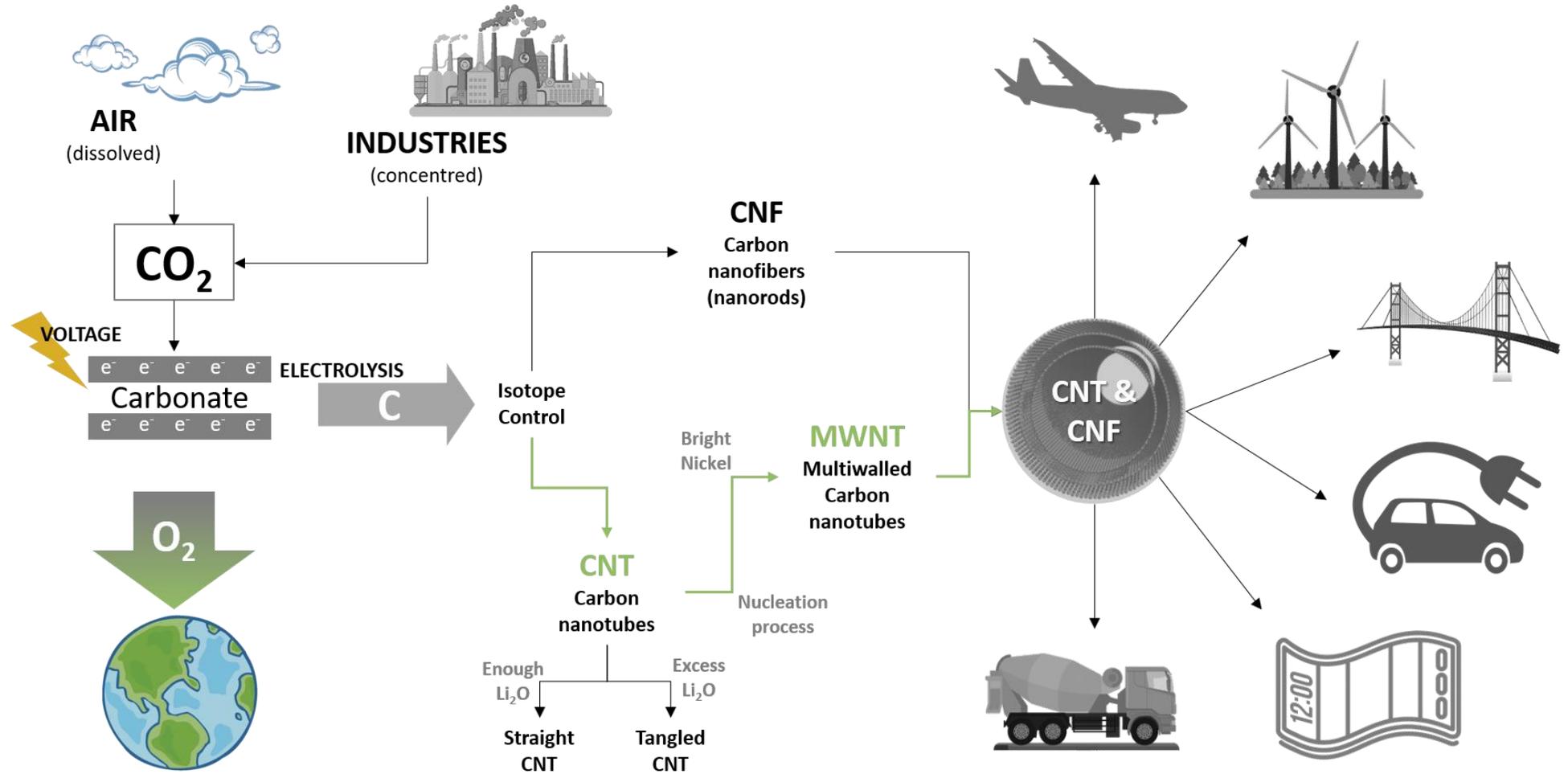
RESUMEN DEMANDA ENERGÉTICA CURADO > 60°C



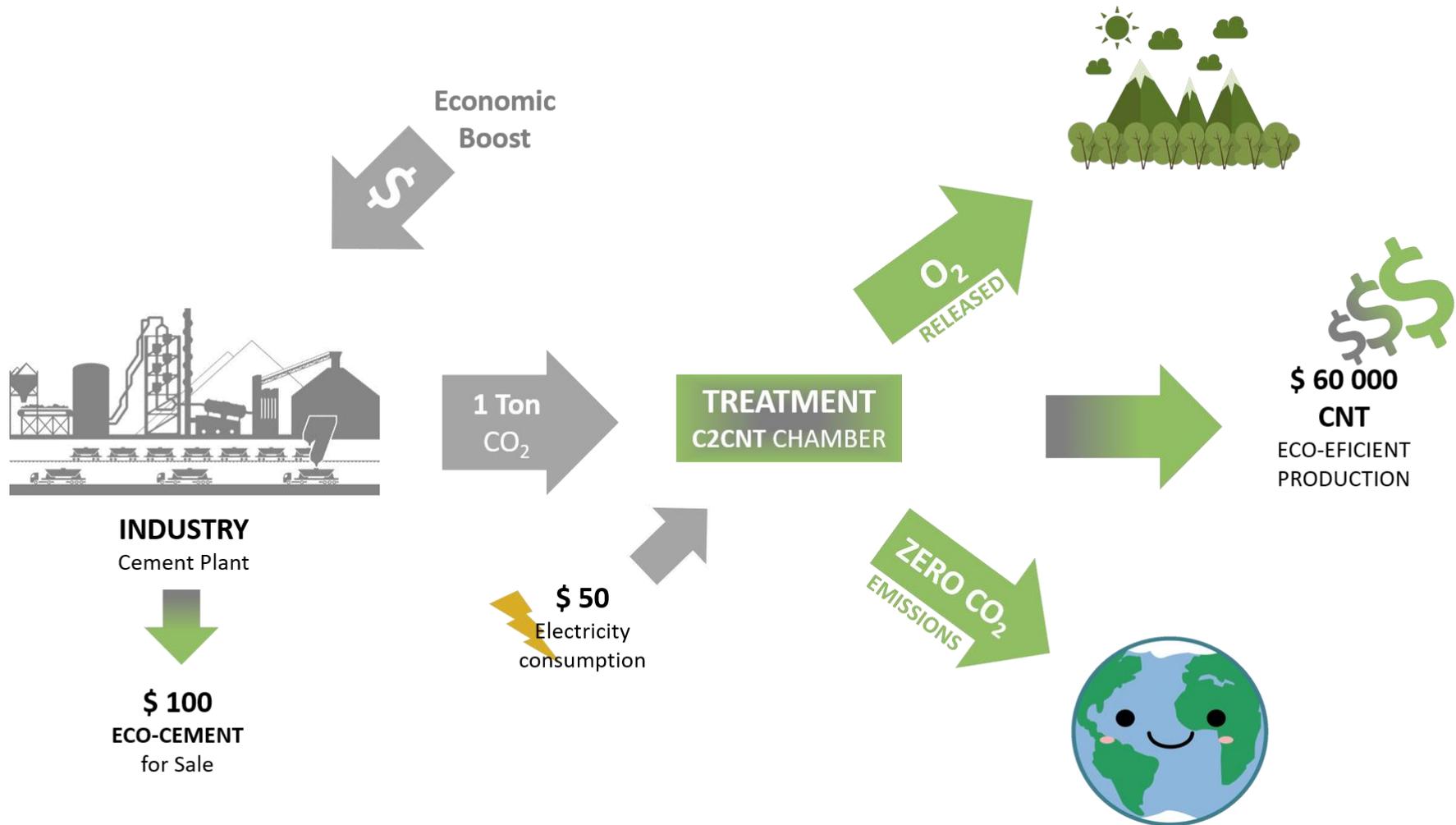
RESUMEN HUELLA DE CARBONO CURADO > 60°C



ANEXO 11. DIAGRAMA SIMPLIFICADO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CNT MEDIANTE ELECTRÓLISIS EN UNA PLANTA DE CEMENTO C2CNT.



ANEXO 12. DIAGRAMA DEL PROCESO ECOLÓGICO DE FABRICACIÓN DE CNT Y CEMENTO, MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE CÁMARAS C2CNT.



**ANEXO 13. PRECIOS REFERENCIALES DE COMPONENTES TÍPICOS EN UHPC SEGÚN EL MERCADO EUROPEO EN EL AÑO 2009.**

PRECIOS EN EL MERCADO EUROPEO 2009
(USD*/TON), FUENTE: STENGEL & SCHIEBL (2013)

CEMENTO PORTLAND	\$97.78
HUMO DE SÍLICE	\$698.45
CUARZO MOLIDO FINO	\$76.83
CUARZO MOLIDO MUY FINO	\$104.77
POLVO DE PIEDRA CALIZA FINA	\$41.91
POLVO DE PIEDRA CALIZA MUY FINA	\$55.88
ARENA DE SÍLICE	\$36.32
HRWR (PCE)	\$2,095.35
MICROFIBRAS DE ACERO (0.15 MM)	\$3,492.25
FIBRAS DE ACERO (0.40 MM)	\$2,514.42

*Cambio al año 2009

ANEXO 14. PRECIOS REFERENCIALES DE COMPONENTES DE UHPC ENSAYADOS SEGÚN EL MERCADO ECUATORIANO.

PRECIOS REFERENCIALES EN EL MERCADO ECUATORIANO

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO + IMP
CEMENTO TIPO HE	TON	\$150.00
ARENA DE SÍLICE	TON	\$100.00
HUMO DE SILICE	TON	\$1,000.00
HRWR	TON	\$3,700.00
AGUA	TON	\$0.72
NANOSÍLICE	TON	\$33,000.00
NANOTUBOS DE CARBONO	TON	\$46,000.00
FIBRAS DE ACERO	TON	\$2,500.00

ANEXO 15. PRECIOS REFERENCIALES DE LAS DOSIFICACIONES AJUSTADO CON FIBRAS DE ACERO.

	RELACIÓN	MM [kg/m ³]	COSTO	PORCENTAJE DEL COSTO	NS-2% [kg/m ³]	COSTO	PORCENTAJE DEL COSTO	CNT-0.25% [kg/m ³]	COSTO	PORCENTAJE DEL COSTO
CEMENTO TIPO HE	1.0000	736.16	\$110.42	11.43%	743.37	\$111.51	7.60%	746.01	\$111.90	10.51%
ARENA DE SÍLICE	1.4320	1054.18	\$105.42	10.91%	1064.51	\$106.45	7.26%	1068.28	\$106.83	10.03%
HUMO DE SILICE	0.3250	239.25	\$239.25	24.76%	241.60	\$241.60	16.48%	242.45	\$242.45	22.77%
HRWR	0.0410	30.18	\$111.68	11.56%	30.48	\$112.77	7.69%	30.59	\$113.17	10.63%
AGUA	0.2370	174.47	\$0.13	0.01%	176.18	\$0.00	0.00%	176.80	\$0.13	0.01%
NANOSÍLICE	0.0200	-	-	-	14.87	\$490.63	33.46%	-	-	-
NANOTUBOS DE CARBONO	0.0025	-	-	-	-	-	-	1.87	\$85.79	8.06%
FIBRAS DE ACERO	0.2170	159.75	\$399.37	41.33%	161.31	\$403.28	27.50%	161.88	\$404.71	38.00%
TOTAL		2394.00	\$966.27		2432.31	\$1,466.23		2427.88	\$1,064.98	

