

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**DESARROLLO DE CONCRETO DE ULTRA ALTO
COMPORTAMIENTO, UTILIZANDO ARCILLA VITRIFICADA COMO
SUSTITUTO DE AGREGADO Y DEL MATERIAL CEMENTANTE**

Por

ANA LUISA MUÑOZ ESPINOZA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN
INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

JUNIO 2025



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Facultad de Ingeniería Civil, UANL

Presente.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **"DESARROLLO DE CONCRETO DE ULTRA ALTO COMPORTAMIENTO, UTILIZANDO ARCILLA VITRIFICADA COMO SUSTITUTO DE AGREGADO Y DEL MATERIAL CEMENTANTE"**, que presenta la **M. C. ANA LUISA MUÑOZ ESPINOZA**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTORA EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

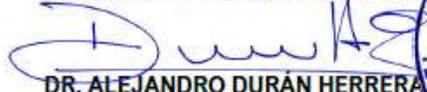
Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

"Alere Flammam Vderitatis",

Ciudad Universitaria, 21 de mayo de 2025


DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA

Evaluador



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455

81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx

2025/Mayo/4

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“DESARROLLO DE CONCRETO DE ULTRA ALTO COMPORTAMIENTO, UTILIZANDO ARCILLA VITRIFICADA COMO SUSTITUTO DE AGREGADO Y DEL MATERIAL CEMENTANTE”**, que presenta la **M. C. ANA LUISA MUÑOZ ESPINOZA**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTORA EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **(APROBADO)**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,


DR. LUCIO GUILLERMO LÓPEZ YÉPEZ

Evaluador



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Cd. Universitaria a 2025/05/19

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

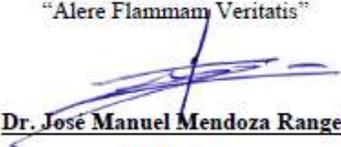
Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“DESARROLLO DE CONCRETO DE ULTRA ALTO COMPORTAMIENTO, UTILIZANDO ARCILLA VITRIFICADA COMO SUSTITUTO DE AGREGADO Y DEL MATERIAL CEMENTANTE”**, que presenta la **M. C. ANA LUISA MUÑOZ ESPINOZA**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTORA EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**. Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,
“Alere Flamman Veritatis”


Dr. José Manuel Mendoza Rangel

Evaluador

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



FECHA: 2025/Mayo/02

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es "DESARROLLO DE CONCRETO DE ULTRA ALTO COMPORTAMIENTO, UTILIZANDO ARCILLA VITRIFICADA COMO SUSTITUTO DE AGREGADO Y DEL MATERIAL CEMENTANTE", que presenta la M. C. ANA LUISA MUÑOZ ESPINOZA, como requisito parcial para obtener el grado de DOCTORA EN INGENIERÍA, del programa DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dr. Carlos Enrique Castillo Linton

Evaluador

Mayo 16, 2025

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es "DESARROLLO DE CONCRETO DE ULTRA ALTO COMPORTAMIENTO, UTILIZANDO ARCILLA VITRIFICADA COMO SUSTITUTO DE AGREGADO Y DEL MATERIAL CEMENTANTE", que presenta la M. C. ANA LUISA MUÑOZ ESPINOZA, como requisito parcial para obtener el grado de DOCTORA EN INGENIERÍA, del programa DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,



Dr. Hugo Bolio Arceo
Evaluador



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE PROFESOR

NOMBRE: ANA LUISA MUÑOZ ESPINOZA

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO TESIS PI OTRO

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:
DESARROLLO DE CONCRETO DE ULTRA ALTO COMPORTAMIENTO, UTILIZANDO ARCILLA VITRIFICADA COMO SUSTITUTO DE AGREGADO Y DEL MATERIAL CEMENTANTE.

RECOMENDACIONES ADICIONALES:

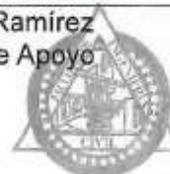
REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APAREZCAN EN LA TESIS IMPRESA

*Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Nombre y firma de quien corrigió:

Arq. Ramón Longoria Ramírez
Asesor Profesional de Apoyo

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Ciudad Universitaria, 10 de abril de 2025



SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P.P. 66456
Tels: (81) 14424400 ext. 4448 | 63294000 ext. 7216, 7234
correo electrónico: spf.fic@uanl.mx

Clave: FOR-SPF-14; Revisión: 02; Página 1 de 1

**DESARROLLO DE CONCRETO DE ULTRA ALTO
COMPORTAMIENTO, UTILIZANDO ARCILLA VITRIFICADA COMO
SUSTITUTO DE AGREGADO Y DEL MATERIAL CEMENTANTE**

Aprobación de la Tesis

**Director FIC-UANL
Dr. Alejandro Durán Herrera**

**Codirector FIC-UANL
Dr. Lucio Guillermo López Yépez**

**Evaluador 1. Evaluador FIC-UANL
Dr. Jose Manuel Mendoza Rangel**

**Evaluador 2. Evaluador Externo
Dr. Carlos Enrique Castillo Linton**

**Evaluador 3. Evaluador Externo
Dr. Hugo Bolio Arceo**

**Subdirector de Posgrado e Investigación
Dr. Gerardo Fajardo San Miguel**

AVISO DERECHOS DE AUTOR

DERECHOS RESERVADOS©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta Tesis está protegido, el uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material contenido que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde se obtuvo mencionando al autor o autores.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todos los que me apoyaron en diversas etapas de mi proyecto, a todos los que este trabajo de investigación me dio oportunidad de conocer y de compartir experiencias y aprendizajes.

Agradezco profundamente a Dios que me permitió llegar a cumplir este objetivo de vida y que me ha dado la fortaleza de continuar y de culminar esta etapa de mi vida.

Agradezco el apoyo brindado por CEMEX para la realización de esta fase de formación y muy especialmente al Ing. Homero Ramírez quien en todo momento me apoyo para realizar mis estudios y además me facilito el tiempo para asistir a la Universidad.

Especialmente quiero agradecer a mis compañeros del Laboratorio Central y de Planta Hidalgo por sus apoyo y acompañamiento en el desarrollo experimental de este proyecto Julio Mendoza, Carmen Arvizu, Lila López, Jorge Montoya, Gerardo Velázquez, Steve Alfaro, Miguel Gómez, Julio Espinoza, Armando Martínez, Julio Moreno, Alonso Cazares, sin su apoyo no lo hubiera logrado.

No puedo dejar de agradecerle al Dr. Alejandro Durán mi Asesor, porque me escuchó y ayudó a llevar a cabo mi deseo de estudiar un Doctorado, por su guía, paciencia y dedicación en mi formación durante estos años de desarrollo del proyecto, por apoyarme con su equipo de trabajo en el Instituto de Ingeniería Civil para realizar el concreto y evaluarlo.

Agradezco a mi Coasesor el Dr. Lucio López, por su paciencia y seguimiento, sus sugerencias y correcciones y más importante, el seguimiento a mis avances para lograr concluirlo y que por fin llego.

Gracias a mis Padres por su motivación continua, apoyo moral y comprensión por mis ausencias.

Especialmente quiero agradecerles a mi Esposo y mi Hijo, porque me han apoyado y motivado en esta fase que sabíamos que no sería fácil y principalmente les agradezco por ser comprensivos por tantos y tantos fines de semana que no estuvimos juntos para poder concluir mi estudio Doctoral. Javier te agradezco especialmente por alentarme cuando en muchos momentos sentía que no podría seguir, Helio gracias por ser mi motivo y mi apoyo.

DEDICATORIA

A mis Padres que desde que inicie mis estudios me han motivado, me han acompañado y han confiado en mí.

Ana María Espinoza Gallardo

José Luis Muñoz Hernández

A mi Hijo quien es mi fuerza y motivación para seguir en este camino que es la vida.

Helio Yoltic Carmona Muñoz

A mi compañero de vida, quien me impulso y motivo para que realizara un Doctorado, ha comprendido que esta labor no sería fácil y además me brindo todas las ayudas para poder llevar a cabo este objetivo de vida.

Muchas gracias, Javier.

Francisco Javier Carmona Aguilar

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. IMPACTO AMBIENTAL POR LA FABRICACIÓN DE CONCRETO	4
1.2. GENERACIÓN DE ARCILLAS VITRIFICADAS Y POLVOS DE CALIZA EN MÉXICO.....	6
1.3. PRINCIPIOS TEÓRICOS PARA LA PRODUCCIÓN DEL CONCRETO DE ULTRA ALTO COMPORTAMIENTO	7
1.4. MATERIALES PARA PREPARAR CONCRETO DE ULTRA ALTO COMPORTAMIENTO	12
1.5. PROPIEDADES DEL CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO	13
1.6. PREPARACIÓN DEL CONCRETO DE ULTRA ALTO COMPORTAMIENTO	16
CAPÍTULO 2	18
GENERALIDADES	18
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2.2. JUSTIFICACIÓN.....	19
2.3. HIPOTESIS.....	20
2.4. OBJETIVOS.....	21
CAPÍTULO 3	22
MÉTODO EXPERIMENTAL	22
3.1. FASE 1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	23
3.2. FASE 2. PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES	27
3.3. FASE 3. SELECCIÓN Y DOSIS ÓPTIMA DEL ADITIVO CON EL CEMENTO A UTILIZAR DURANTE LA INVESTIGACIÓN.	29
3.4. FASE 4. DISEÑO DEL EMPAQUETAMIENTO ÓPTIMO, UTILIZANDO EL MODELO MODIFICADO DE ANDREASEN Y ANDERSEN.....	32
3.5. FASE 5. DETERMINACIÓN DE SUSTITUCIÓN ÓPTIMA DE MICROSÍLICE POR ARCILLA VITRIFICADA.	34
3.6. FASE 6. DETERMINACIÓN DE SUSTITUCIÓN ÓPTIMA DE CEMENTO POR ARCILLA VITRIFICADA.....	35
3.7. FASE 7. DETERMINACIÓN DE SUSTITUCIÓN ÓPTIMA DEL AGREGADO CALIZO POR AGREGADO DE ARCILLA VITRIFICADA.	36
3.8. FASE 8. EVALUACIÓN DE LOS UHPC'S EN ESTADO FRESCO.	37
3.9. FASE 9. EVALUACIÓN DE LOS UHPC'S EN ESTADO ENDURECIDO.....	39
CAPÍTULO 4	48
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
4.1 FASE I. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES A UTILIZAR	48
4.2 FASE 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS Y CEMENTANTES PREPARADOS, ADITIVOS Y FIBRAS.....	59
4.3. FASE 3. DETERMINACIÓN DE DOSIS ÓPTIMA DEL ADITIVO	60
4.4. FASE 4. DISEÑO DEL EMPAQUETAMIENTO ÓPTIMO DE LOS COMPONENTES PARTICULADOS.....	64
4.5. FASE 5. DETERMINACIÓN DE SUSTITUCIÓN ÓPTIMA DE MICROSÍLICE POR ARCILLA VITRIFICADA.	66
4.6. FASE 6. DETERMINACIÓN DE SUSTITUCIÓN ÓPTIMA DE CEMENTO POR ARCILLA VITRIFICADA.....	67
4.7. FASE 7. DETERMINACIÓN DE SUSTITUCIÓN ÓPTIMA DE AGREGADO CALIZO POR AGREGADO DE ARCILLA VITRIFICADA.	68
4.8. FASE 8. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DE LOS UHPC'S.	71
4.9. FASE 9. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO DE LOS UHPC'S.	75
4.10. ESTIMACIÓN DEL CO ₂ INCORPORADO	102

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
REFERENCIAS CONSULTADAS	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de los diseños de los concreto de ultra alto comportamiento (1999-2025)	16
Tabla 2. Listado de ensayos realizados a los materiales para preparar los UHPC's	24
Tabla 3. Procedimiento de mezclado y determinación del tiempo de escurrimiento	31
Tabla 4. Diseño de mezclas para preparar UHPC y optimizar la sustitución de microsilice	35
Tabla 5. Diseño de mezclas para preparar UHPC y optimizar la sustitución.....	36
Tabla 6. Diseño de UHPC para optimizar la sustitución de agregado calizo	36
Tabla 7. Caracterización química del cemento	48
Tabla 8. Análisis mineralógico del cemento.....	49
Tabla 9. Caracterización física del cemento	52
Tabla 10. Análisis químico de la arcilla vitrificada	53
Tabla 11. Análisis mineralógico de la arcilla vitrificada	54
Tabla 12. Resultado de la actividad puzolánica de la arcilla vitrificada	55
Tabla 13. Resultado de la actividad puzolánica de la arcilla vitrificada	56
Tabla 14. Análisis Químico de la microsilice	57
Tabla 15. Fases mineralógicas de la microsilice	57
Tabla 16. Resultado de la actividad puzolánica de la microsilice	58
Tabla 17. Propiedades de los agregados y cementantes	59
Tabla 18. Composición en masa de los UHPC diseñados	70
Tabla 19. Extensibilidad y pérdida de consistencia de los UHPC's diseñados	71
Tabla 20. Resultados del peso volumétrico y contenido de aire	73
Tabla 21. Tiempos de fraguado por penetración de los UHPC-C y UHPC-G	74
Tabla 22. Resistencias a la compresión de los UHPC's sin y con fibras.....	76
Tabla 23. Módulo estático de elasticidad de los UHPC's diseñados	78
Tabla 24. Índice de tenacidad para varios tipos de concretos [88–90].....	84
Tabla 25. Determinación de espacios vacíos de los UHPC's diseñados	87
Tabla 26. Comparativa de contenido de aire vs espacios vacíos	87
Tabla 27. Resultados de resistividad eléctrica superficial de los UHPC's diseñados.....	88
Tabla 28. Valores indicados para la penetración del Ion cloruro vs resistividad eléctrica superficial	88
Tabla 29. Resultados de Resistividad eléctrica uniaxial de los UHPC's diseñados	91
Tabla 30. Resultados de la penetración del Ion cloruro vs Resistividad Uniaxial	91
Tabla 31. Resistencia al ataque por sulfatos de los UHPC's (método acelerado).....	96
Tabla 32. Pérdida de peso de los UHPC's por el ataque químico por ácido al 5%.....	98
Tabla 33. Pérdida de peso de los UHPC's por el ataque químico por ácido al 10%	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tendencia del comportamiento en las emisiones de CO ₂ del 2018 al 2050	1
Figura 2. Metodología experimental	23
Figura 3. Equipo de Fluorescencia de Rayos-X, Marca PANalytical, modelo Zetium 2.4 de 4kW.	25
Figura 4. Equipo de Difractómetro de Rayos-X, Marca PANalytical, modelo Empyrean.....	25
Figura 5 Analizador de tamaño de partícula, marca Malvern, modelo Mastersizer 2000	25
Figura 6. Determinación de sólidos en aditivos (a) peso del crisol, (b) peso inicial y (c) peso final	26
Figura 7. Determinación de la densidad de los aditivos con picnómetro	27
Figura 8. Triturador de quijadas	28
Figura 9. Triturador de quijadas	28
Figura 10. Molino de bolas.....	28
Figura 11. Molino de disco.....	28
Figura 12. Batidora UNIVEX	29
Figura 13. Cono para determinar el tiempo de escurrimiento	30
Figura 14. Determinación del tiempo de escurrimiento	30
Figura 15. Comportamiento del tiempo de escurrimiento en función de la dosificación del aditivo	31
Figura 16. Equipo Ro-Tap para granulometría	33
Figura 17. Procedimiento de mezclado	34
Figura 18. Minicono de revenimiento	38
Figura 19. Medición de extensibilidad	38
Figura 20. Vaso de volumen conocido para la determinación de peso volumétrico y.....	38
Figura 21. Llenado de moldes para tiempo de fraguado.....	39
Figura 22. Penetración con diferentes agujas para determinar el tiempo de fraguado	39
Figura 23. Moldes de bronce para preparar cubos de 2” por 2”	40
Figura 24. Prensa Hidráulica, marca Tony Technik, cap. Max. 200 toneladas	40
Figura 25. Especímenes de los diseños de concreto de ultra alto comportamiento sin fibras y con fibras para determinación de módulo de Young	41
Figura 26. Especímenes de los diseños de concreto de ultra alto comportamiento sin fibras y con fibras para determinación de módulos de flexión.....	42
Figura 27. Equipo para determinar el módulo de Flexión en vigas.....	42
Figura 28. Especímenes de los diseños de concreto de ultra alto comportamiento sin fibras y con fibras, para determinar en espacios vacíos (empaquetamiento).....	43
Figura 29. Equipo Resipod Proceq para determinación de resistividad superficial	43
Figura 30. Equipo Resipod Proceq para determinar resistividad uniaxial (bruta)	44
Figura 31. Especímenes preparados para la determinación de contracción autógena	45
Figura 32. Especímenes sometidos a ataque por sulfatos	46
Figura 33. Equipo para determinar la expansión de ataque por sulfatos. (Comparador de Longitudes) .	46
Figura 34. Ataque ácido a los UHPC’s, (a) UHPC-C, (b) SFR-UHPC-C, (c) UHPC-G y (d) SFR-UHPC-G	47
Figura 35. Especímenes después de 3 semanas de ataque con H ₂ SO ₄ al 5%.....	47
Figura 37. Análisis mineralógico del Cemento utilizado.....	50
Figura 38. Análisis mineralógico por DRX de la fase sólida del cemento	51

Figura 39. Análisis mineralógico por DRX para la fase líquida del cemento	51
Figura 40. Análisis mineralógico por DRX de la arcilla vitrificada	54
Figura 41. Análisis mineralógico de la arcilla vitrificada con cuantificación de fases	55
Figura 42. Análisis mineralógico por DRX de la microsíllice	58
Figura 43. Determinación de densidad de las fibras de acero.....	60
Figura 44. Curvas de la determinación de dosis óptima de aditivos en cemento.....	61
Figura 45. Curvas de determinación de dosis óptima del aditivo 5 con 5 microsíllices.	62
Figura 46. Curvas de la determinación de dosis óptima del aditivo 6 con 5 microsíllices.	63
Figura 47. Mezclado de cementantes con evidencia de homogeneidad	63
Figura 48. Mezclado de cementantes con evidencia de segregación	63
Figura 49. Distribución granulométrica de los materiales para producir los UHPC's.....	64
Figura 50. Distribución granulométrica del empaquetamiento óptimo para el UHPC-C.....	65
Figura 51. Distribución granulométrica del empaquetamiento óptimo del UHPC-G.....	65
Figura 52. Desarrollo de resistencias y extensibilidad de los UHPC's de la Fase 5.....	67
Figura 53. Desarrollo de resistencias y extensibilidad de los UHPC's de la Fase 6.....	68
Figura 54. Desarrollo de resistencias y extensibilidad de los UHPC's de la Fase 7.....	69
Figura 55. Pérdida de extensibilidad con el tiempo.	72
Figura 56. (a) Desarrollo de la resistencia a compresión para mezclas de UHPC-C, SFR-UHPC-C, UHPC-G y SFR-UHPC-G; (b) aumento de la resistencia a la compresión atribuido a la presencia de microfibras de acero; y (c) aumento/disminución de la resistencia a la compresión resultante de las sustituciones de arcilla vitrificada por cemento, microsíllice, polvo de caliza y agregado.	76
Figura 57. Desarrollo de la deformación por flexión de vigas de hormigón reforzado con fibras, mostrando la importante capacidad de post-agrietamiento atribuible a la presencia de microfibras de acero.	80
Figura 58. Límites de proporcionalidad resistencias residuales y coeficientes de variación para tres probetas.	82
Figura 59. Índices de tenacidad acumulados (Unid arb = unidades adimensionales).....	84
Figura 60. Ajustes lineales de la tenacidad acumulada.	85
Figura 61. Desarrollo de la resistividad eléctrica superficial de los UHPC's diseñados.....	90
Figura 62. Desarrollo de resistividad eléctrica uniaxial de los UHPC's diseñados.....	92
Figura 63. Contracción autógena de los UHPC-C y UHPC-G	94
Figura 64. Expansión de los UHPC's por el ataque con sulfatos a 52 semanas (1 año).	97
Figura 65. Pérdida de peso por el ataque químico por ácido al 5% a los UHPC's	98
Figura 66. Pérdida de peso por el ataque químico por ácido al 10% a los UHPC's.....	100

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global ha provocado que diversas áreas de investigación se enfoquen arduamente en desarrollar tecnologías innovadoras para disminuir las emisiones contaminantes que están impactando el medio ambiente de nuestro planeta. El calentamiento global es causado principalmente por la generación de gases de efecto invernadero, entre ellos el dióxido de Carbono (CO₂). Este gas es generado en su mayoría por la actividad humana y los procesos industriales.

Si continuamos con el ritmo de vida actual, es decir, el poco cuidado al medio ambiente, la tendencia seguirá con este crecimiento exponencial del contenido de CO₂ en la atmosfera. En la figura 1 se muestra la tendencia del comportamiento del incremento del CO₂ hasta el 2025, en donde se prevé que las emisiones mundiales de dióxido de Carbono aumenten a unos 43.08 mil millones de toneladas métricas, en comparación con 35.30 millones de toneladas métricas de dióxido de Carbono en 2018, considerando que en el 2018 se presentaron las más altas emisiones de CO₂, debido a una economía fuerte y condiciones climáticas extremas, es decir, cuando los veranos con olas de calor intensas, se incrementa la demanda de aires acondicionados y los duros inviernos, el uso de calefactores. Esto debido al cambio climático.



Figura 1. Tendencia del comportamiento en las emisiones de CO₂ del 2018 al 2050

Nota 1: (<https://www.statista.com/statistics/263980/forecast-of-global-carbon-dioxide-emissions/>)

Uno de los procesos industriales con una contribución significativa en las emisiones de CO₂ en la atmósfera, es la fabricación de cemento el cual es el responsable de entre el 5% y 8% del total de la generación de emisiones antropogénicas [1-3], estas emisiones son el resultado de los tres principales procesos que se llevan a cabo durante la producción de cemento: la molienda de materias primas, la calcinación del clínker y la molienda de cemento. Por cada tonelada de cemento que se produce, se generan aproximadamente 0.56 Toneladas de CO₂, siendo la calcinación la que genera el 40% de la emisión de CO₂ por la descomposición de la caliza en óxido de calcio y dióxido de carbono (CO₂), y el resto por la quema de combustibles y consumo de energía eléctrica.

El concreto es el principal material de construcción principalmente utilizado en el mundo y uno de sus principales componentes es el cemento. En 1824 Joseph Aspdin después de años de realizar pruebas de mezclas de calizas, arcillas y carbón calcinados a alta temperatura, desarrollo el primer cemento artificial y lo patentó en conjunto con James Parker y le llamaron Cemento Portland. El concreto es preparado, mezclando grava, arena con cemento y agua, siendo el cemento el aglomerante de los materiales particulados cuando éste reacciona con el agua. Posteriormente en 1849, se creó el concreto reforzado mediante la adición de un refuerzo metálico, para favorecer la ductilidad y la resistencia.

La tecnología del concreto no evoluciono de forma relevante por más de un siglo hasta que en la década de los 80's, con el desarrollo de los superplastificantes, se obtuvieron matrices cementantes de alta fluidez y relaciones agua-cemento muy bajas (inferiores a 0.25). La industria de la construcción con concreto produjo una primera generación de concretos, que por su desempeño superior en términos de fluidez, consistencia, resistencia mecánica y durabilidad fueron denominados concretos de alto desempeño (HPC por sus siglas en inglés, 1980), este desarrollo fue gracias al potencial de estos aditivos y fueron la base para el desarrollo de una tecnología con un desempeño aún mayor respecto al HPC, los llamados concretos de ultra alto comportamiento, nombrados de aquí en adelante como UHPC (por sus siglas en inglés, 1990), tecnología que requiere una resistencia mínima a la compresión de 120 MPa a 28 días, con desempeños en términos de durabilidad, ductilidad y tenacidad muy superiores a los de concretos convencionales [4], particularidad que se atribuye a su densa microestructura y consecuente baja porosidad [5]. Normalmente, estos concretos se producen con una relación

agua/cemento baja (inferior a 0,25) y están compuestos de cemento (800 a 1,100 kg/m³), áridos finos de sílice (escorias, cenizas volantes, vidrio molido, arena), microsílíce (8 a 10% en masa con relación al peso del cemento), aditivos y microfibras de acero [6, 7]. Alsalman et al, recomiendan no utilizar agregados gruesos en estos concretos porque pueden causar grietas o micro fisuras que afectan la zona de transición intersticial entre el agregado grueso y la matriz cementante, disminuyendo así la durabilidad del UHPC [7]. Debido a las bajas relaciones agua/cemento utilizadas en sus formulaciones, las investigaciones sugieren que los materiales cementantes no reaccionan completamente durante las reacciones de hidratación, por lo tanto, una importante fracción de los materiales cementantes permanecerán como rellenos en la matriz, lo que conlleva a altos costos ecológicos y económicos. [1, 6, 7, 8-12]. Este aspecto ha sido identificado por la industria y la comunidad científica internacional como un área de oportunidad para introducir residuos industriales o materiales cementantes suplementarios en reemplazo principalmente del cemento, con el fin de reducir tanto los costos económicos como los costos ecológicos de estos concretos [1, 5, 8, 12-15]. En este sentido, también es importante destacar que, al reducir la dosificación de cemento en estos concretos, estamos contribuyendo a una mayor reducción del CO₂ incorporado al UHPC, ya que la producción de cemento emite una alta concentración de CO₂ como se explicó anteriormente.

Por otro lado, también con el objetivo de complementar los esfuerzos para reducir la huella de carbono atribuida al concreto, se están realizando importantes esfuerzos a nivel internacional para reducir la explotación de los recursos naturales necesarios para la producción de cemento y concreto mediante la búsqueda de residuos industriales o subproductos como cenizas de cáscara de arroz, cenizas volantes, polvo de vidrio molido y escoria granulada de alto horno para ser utilizados como materiales cementantes suplementarios en el concreto[13, 16-19]. Debido a su disponibilidad en la corteza terrestre, en las últimas décadas han concentrado un número importante de trabajos de investigación orientados a evaluar la incorporación de arcillas calcinadas en la producción de cemento [20, 21], así como residuos de la industria cerámica cuando se utilizan como un sustituto de los agregados en concretos convencionales y de alta resistencia [14, 22, 23]. Debido a sus importantes contribuciones al empaquetamiento y densificación de la matriz cementante, así como a la durabilidad, durante las últimas tres décadas se han publicado diversos artículos sobre el efecto de diferentes agentes cementantes suplementarios sobre el comportamiento elástico, reológico y mecánico, así como su desempeño

en durabilidad cuando se incorporan estos materiales en un concreto de ultra alto comportamiento (UHPC), [13, 15, 17, 24-26].

1.1. Impacto ambiental por la fabricación de concreto

Para la fabricación de concreto en el mundo, se estima un flujo de materiales de 20 a 25 Gt [1]. Además del cemento utilizado para la fabricación de concreto, los agregados son la mayor proporción en la formulación, estos altos consumos de agregados, en su mayoría son de origen natural, razón por la que en las últimas décadas las investigaciones se han encaminado a encontrar materiales sustitutos [13, 14, 17, 22, 23] y que estos materiales sustitutos sean residuos industriales. El consumo de residuos industriales es esencial para el medioambiente, debido a que favorece el reúso y/o reciclaje de residuos, disminución en el envío de dichos residuos a confinamiento y muy importante, disminución en el consumo de materiales naturales.

Por otro lado, en los últimos años la industria cementera ha incorporado a su proceso diversos materiales (subproductos) que le permiten disminuir las emisiones de CO₂ por tonelada de cemento producido y en el caso de la producción de concreto, además de obtener concretos que sean más durables, se tiene como objetivo que demanden la menor cantidad de cemento. En este contexto se continua la investigación de nuevos materiales para preparar concretos sustentables mediante el uso de subproductos o residuos industriales y que dichos materiales puedan sustituir el consumo de cemento en las formulaciones del concreto [2, 3, 5, 15, 18-21].

En los últimos años las investigaciones se han orientado en la búsqueda de materiales que sean capaces de proveer propiedades similares al cemento y con estos materiales cementantes lograr la preparación de concretos, dentro de los materiales investigados se cuenta con subproductos de otras industrias tales como: la ceniza volante, la escoria de alto horno, vidrio molido, demolición de construcción, residuos cerámicos, entre otros, cabe mencionar que en la actualidad varios de estos materiales se utilizan para mejorar las propiedades de los concretos producidos, como en la investigación de Msheer Hassan et al, quienes utilizaron vidrio molido para sustituir la microsílíce en la formulación de un concreto de alto desempeño, obteniendo mejor resistencia al fuego que la que presentó el concreto de alto desempeño diseñado con microsílíce [27]. N. Randl et al, proponen el uso de escoria granulada o ceniza volante como sustitutos de cemento hasta un 45%, sin degradar las propiedades mecánicas y parámetros de

trabajabilidad [5], sin embargo, el estudio realizado por Chong Wang et al, indican que es posible utilizar tanto escoria granulada, como ceniza volante y además finos de caliza, utilizando en la preparación de un concreto de ultra alto comportamiento un 50% de cemento, 10% de ceniza volante, 20% de escoria y 20% de finos de caliza, logrando las más altas resistencias de 175.8 MPa a 90 días y 182.9 MPa a 365 días [28].

Los materiales que aún no se utilizan en la fabricación de concretos y que están en investigación hoy día son los residuos de la industria cerámica, estos residuos se generan en las fábricas de pisos cerámicos, losetas, residuos de vidrios, vajillas de porcelana y sanitarios. La investigación realizada por Derricl J. Anderson et al, quienes utilizaron residuos de pisos cerámicos de 3 tipos, encontrando que es posible sustituir el agregado natural por estos residuos con cambios mínimos en las propiedades mecánicas [29]. En el estudio realizado por F. Pacheco et al, muestra que es factible remplazar un 20% de cemento por residuo cerámico mejorando su durabilidad, aunque disminuyeron las resistencias y cuando sustituyeron el residuo cerámico por arena no se afectaron dichas resistencias [30], sin embargo, la investigación realizada por Khuram Rashid et al, determinaron que el concreto con mejor desempeño respecto a sus resistencias a la compresión e impacto ambiental, se logró al sustituir el 30% de agregado natural por residuo cerámico [31]. Cuando se utilizó residuo cerámico procedente de la fabricación de vajillas, Salman Siddique et al, determinaron que es factible utilizarlo como agregado para producir un concreto durable, resiliente y presenta resistencia a la penetración del ion cloruro [32]. En Irán, Zahra Keshavarz, et al, determinaron que el uso de residuos de porcelana como remplazo del agregado mejora las resistencias hasta un 41% respecto a la referencia y que los residuos de cerámica roja logran incrementar las resistencias en un 29% en el diseño de un concreto tradicional [33] y para un concreto de ultra alta resistencia, se investigó por parte de Zegardlo Bartosz et al, la sustitución de residuo cerámico como agregado fino y grueso, obteniendo resistencias arriba del 24.74% y 34.75% a la tensión respecto al concreto referencia [34].

En la extensa revisión bibliográfica que se realizó para demostrar la pertinencia y necesidad de este trabajo, se identificó que los materiales más utilizados en sustitución del cemento en la producción de UHPC son cenizas volantes, escoria granulada de alto horno, cenizas de cascarilla de arroz y polvos de vidrio, pero no se identificaron investigaciones que

utilicen arcilla vitrificada, es decir, un material que ha sido sinterizado al punto de la vitrificación, con propiedades hidráulicas y que es subproducto de otro proceso. Los resultados reportados en este trabajo muestran el potencial de una arcilla vitrificada como una opción viable para reemplazar el cemento y la microsílíce en la producción de un concreto de ultra alto comportamiento, sin demeritar sus propiedades como la consistencia en estado fresco, la permanencia de la consistencia y la durabilidad, así como la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad estático, módulo de rotura y resistencias a la flexión residuales después de la primera fisura. Por otro lado, la sustitución del cemento, la microsílíce y la arena/polvo de piedra caliza por arcilla vitrificada conduce a una reducción significativa del CO₂ incorporado.

1.2. Generación de arcillas vitrificadas y polvos de caliza en México.

En México, un residuo industrial que por su composición química y mineralógica representa una opción viable para su aprovechamiento en la formulación de concretos hidráulicos a base de cemento portland, son las arcillas vitrificadas. En 2017, la generación de estos residuos y otros como vidrio, arenas, materiales de demolición, entre otros, alcanzaron las 120,128 toneladas por día [35], las cuales fueron consideradas como residuos sólidos municipales y fueron enviadas a vertederos. Con el objetivo de contribuir a la optimización de nuevas formulaciones del UHPC, en este proyecto se sustituyeron varios de sus ingredientes por arcilla vitrificada con el fin de reducir su costo económico y ecológico, así como su impacto negativo en la sostenibilidad, lo que también reducirá positivamente la presencia de partículas menores a 10 micras en el aire que se respira en las poblaciones aledañas a los bancos de agregados, debido a que en muchos casos, se encuentran por encima de los límites permitidos por la normativa urbanística, provocando consecuentemente problemas de salud a la población de las grandes ciudades.

En México se cuenta con diversas industrias que durante su proceso generan arcillas vitrificadas y en Nuevo León existen empresas que generan este tipo de materiales que son subproductos industriales. Partiendo de la última información estadística reportada del 2017 y tomando como base la generación diaria de 120,128 toneladas por día y que del total de los residuos generados le corresponden un 0.46% de materiales como las arcillas vitrificadas, se obtiene que por año se generaron en México 43,846 miles de toneladas de residuos sólidos urbanos solo en ese año y en función de la fracción de arcillas vitrificadas, se obtienen 201,695

toneladas por año de estos materiales. Podemos mencionar que como referencia en 2012 se generaron 187,783 Ton/año [35, 36], estas 2 referencias indican que en 5 años el incremento de residuos de este tipo es del 7.4%.

Por otro lado, durante el proceso de producción de agregados, se generan polvos que son capturados por colectores instalados en los trituradores, estos polvos en el caso de Monterrey y su zona metropolitana son de caliza y debido a su finura no es viable incorporarlos en sus productos finales, por lo tanto, el generador menciona que estima obtener 2.5 kilos de polvos de caliza por tonelada de agregado producido.

1.3. Principios teóricos para la producción del concreto de ultra alto comportamiento

El concreto de ultra alto comportamiento es el más prometedor de los concretos y se ha desarrollado más intensamente en la última década. Esta nueva generación de concreto se basa en 4 principios teóricos: la reducción en la porosidad, mejora en la microestructura, mayor homogeneidad e incremento en la tenacidad [8].

Por otro lado, en cuanto a las propiedades del concreto de ultra alto comportamiento, se definen resistencias a la compresión superiores a los 150 MPa a 28 días [37-39], mejores propiedades de durabilidad [37, 39-41], resistencias a la tensión, flexión y mayor ductilidad [9, 38-41], además presenta una extraordinaria resistencia a la agresividad ambiental [39, 40] y un largo ciclo de vida [39] manejando relaciones bajas agua / cemento, menores a 0.25 [41].

El concreto de ultra alto comportamiento esta formulado con materiales cementantes e inertes como el cemento, escoria granulada, ceniza volante, finos de caliza, microsilice, agregados ya sean arenas sílicas, arenas de río o calizas, aditivos superfluidificantes o superreductores de agua, y fibras sintéticas o metálicas. Una consideración fundamental para mejorar el desempeño del concreto de ultra alto comportamiento, es la optimización del empaquetamiento de cada componente.

Para la fabricación de un concreto de ultra de alto comportamiento Shi et al y Azmee et al, sugieren tomar en cuenta los siguientes principios [42, 43], que permiten un mejor desempeño:

- a) Reducción de la porosidad.
- b) Empaquetamiento de los componentes.
- c) Reducción de relación agua/cementantes.
- d) Mejora en la microestructura.
- e) Mejora en la homogeneidad.
- f) Incremento en la Tenacidad.

1.3.1 Reducción de la porosidad

La estructura y forma del poro juega un papel importante en el comportamiento de resistencia y dureza. La distribución del poro, así como el tamaño y forma son importantes, sin embargo, es difícil considerar todos los parámetros mencionados, mejorando la densidad del concreto mediante el empaquetamiento, se logra disminuir los espacios vacíos en la matriz cementante y mejora el contacto entre las partículas que lo constituyen. También la porosidad se reduce al reducir la relación agua cementante, mediante el uso de aditivos o adicionando materiales muy finos [12, 42-44].

1.3.2 Empaquetamiento de los componentes

Los concretos de ultra alto comportamiento se caracterizan por tener una alta densidad de su matriz cementante, proveyendo de altas resistencias y excelente durabilidad, comparado con los concretos convencionales. Para obtener una matriz densa del UHPC; el empaquetamiento de los materiales particulados es esencial y para ello se cuenta con varios modelos que se han dividido en modelos discretos y modelos continuos. Los modelos discretos se refieren a la consideración de que las partículas tienen un tamaño específico y los modelos continuos asumen que todos los tamaños de partícula pueden representarse en una distribución de tamaño de partícula (DTP) [45].

La primera propuesta de Larrard and Sedran [44] fue un modelo de densidad de empaquetamiento lineal (MDEL) en el que se consideró la clase y tamaño de los materiales, sin embargo, este modelo estuvo limitado por que no se podría obtener una relación entre la proporción de los materiales y la densidad de la matriz porque es de naturaleza lineal. Posteriormente tras la introducción del índice de compactación K , que evalúa la diferencia entre

un empaquetamiento ideal y un empaquetamiento aleatorio, le llamaron Modelo de solido suspendido (MSS) [42, 44]. En base a este modelo MSS, Larrard propuso el modelo de empaquetamiento compresible (MEC) y la introducción de un índice de compactación. Fennis-Huijiben [44] mejoró el modelo MEC introduciendo la interacción de la aglomeración de las partículas, obteniendo el modelo de empaquetamiento compactación-interacción (MECI), todos estos modelos corresponden a los modelos discretos.

Dentro de los modelos continuos, se tiene el Modelo de Fuller-Thomson quienes propusieron las curvas de gradación para la densidad máxima, conocidas como la curva ideal de Fuller, posteriormente Andreassen trabajó en la distribución de tamaño de partícula para el empaquetamiento teniendo un enfoque continuo y propuso la ecuación de Andreassen para el empaquetamiento ideal [45].

Andreassen considero que las partículas más pequeñas serían infinitesimalmente pequeñas. Dinger y Funk reconocieron que las partículas más finas en materiales reales tienen un tamaño finito y modificaron la ecuación de Andreassen considerando el tamaño mínimo de partícula en la distribución [45]. Posteriormente, se desarrolló un modelo modificado de la ecuación de Andreassen, al que se le llama modelo modificado de Andreassen y Andersen y tiene la siguiente ecuación:

$$P(D) = \frac{D^q - D^q_{min}}{D^q_{max} - D^q_{min}} \quad (1)$$

Donde:

P (D): es una fracción del total de solidos que son menores que el tamaño D,

D: es el tamaño de partícula en micrómetros

D máx.: es el tamaño máximo de partícula en micrómetros

D mín.: es el tamaño mínimo de partículas en micrómetros

q: es el módulo de distribución.

El exponente “q” en la ecuación puede variar de 0.21 a 0.37, depende de la trabajabilidad requerida. Si el exponente aumenta, significa un aumento en los materiales gruesos, y si

disminuye, la cantidad de materiales finos incrementa. El valor del exponente “q”, indica la fracción más fina que puede incorporarse a la mezcla. Dado que la demanda de agua y la capacidad de retención de agua de la mezcla dependen del volumen de finos, este exponente proporciona una base razonable para elegir la cantidad de agua y de los agentes modificadores de la reología, como lo son los aditivos que se añadirán al UHPC [11, 12, 43, 45].

Otro de los modelos continuos es el modelo de Rosin-Rammler el cual demostró que los diámetros característicos de las distribuciones granulométricas de los componentes del concreto se describen adecuadamente mediante la D' de la ecuación de Rosin-Rammler [45], que se escribe a continuación:

$$R(D) = \exp\left(\frac{-D}{D'}\right)^n \quad (2)$$

Donde:

$R(D)$ = la fracción residual (porcentaje pasante)

D = diámetro

D' = diámetro característico

n = constante, varía de 1.04 - 4, usualmente entre 1 y 2.

En el presente trabajo de investigación se aplicó el modelo de Andreasen & Andersen modificado.

1.3.3 Reducción de la relación agua/cementante

Para este tipo de concretos, la relación agua/cemento es primordial, por ello, el hecho de disminuir la demanda de agua para la mezcla con los cementantes promueve la disminución de poros y como resultado se incrementan las resistencias. Para este efecto el uso de aditivos superplastificantes puede reducir significativamente la demanda de agua y además se promueve la trabajabilidad del concreto. Para un concreto de ultra alto comportamiento se buscan relaciones agua/cemento de 0.14 a 0.25 [1, 5-12, 46, 47], mientras que para los concretos convencionales se manejan típicamente relaciones de agua/cemento de 0.40 a 0.50. La determinación del mejor aditivo que permita la mayor reducción en la demanda de agua es crítica para poder producir un concreto de ultra alto comportamiento de alta fluidez [42, 46, 47].

1.3.4 Mejoramiento de la microestructura

La microestructura del concreto de ultra alto comportamiento es densa y uniforme, debido al empaquetamiento de los materiales particulados, las fases de hidratación y reacciones puzolánicas y la mejora de la zona de transición intersticial entre los agregados y la matriz cementante. La microestructura interna de un UHPC está compuesta de las partículas de clinker de cemento que no lograron hidratarse por la baja relación agua cemento, de los agregados finos, así como los productos de hidratación como el C-S-H (gel de tobermorita). El manejo de relaciones bajas agua/cemento y las reacciones de hidratación entre la Ca(OH)_2 (portlandita) y la mezcla de minerales reactivos, que consumen la mayoría del Ca(OH)_2 y lo transforma en C-S-H, la zona intersticial se observa tan densa como la matriz. Una estructura homogénea, permite un mejor desempeño del concreto de ultra alto comportamiento [12, 13, 42].

1.3.5 Mejoramiento de la homogeneidad

En la producción de concretos convencionales, los agregados en su mayoría por su tamaño poseen una mayor dureza que la pasta de cemento y son el soporte del concreto y durante los procesos de hidratación del cemento puede provocar grietas por las diferencias en las propiedades mecánicas y térmicas de los componentes, el tamaño de la grieta es proporcional al tamaño del agregado, por esta razón las investigaciones muestran que el utilizar agregados finos con menor diferencia en sus tamaños de partícula durante la producción del UHPC, se mejora la homogeneidad de los componentes y mejora su empaquetamiento [12, 42, 48].

1.3.6 Incremento de la tenacidad

La tenacidad es una medida de la capacidad de un material para absorber la energía y es utilizada como una característica de la habilidad para la resistencia a la fractura. El concreto es típicamente quebradizo, con una baja resistencia a la tensión, a la resistencia a la tracción y la capacidad de deformación y tenacidad a la fractura, para mejorar estas propiedades en el concreto, se adicionan fibras reforzando el concreto para que la carga sea enviada a través de la interfaz de las fibras y la matriz cementante. Shi et al. y Wang et al., mencionan en sus investigaciones que la excelente resistencia al impacto y la tenacidad de los UHPC son atribuidas al uso de fibras en su formulación [42, 48].

1.4. Materiales para preparar concreto de ultra alto comportamiento

Cemento: preparar un concreto de ultra alto comportamiento se utilizan típicamente entre 800 y 1,000 kg/m³ de cemento [6, 11, 49], cabe mencionar que el alto consumo de cemento impacta en los altos costos, el calor de hidratación y la estabilidad volumétrica [42]. El cemento para utilizarse en la formulación del concreto de ultra alto comportamiento debe seleccionarse basándose en su demanda de agua, tener preferentemente las siguientes propiedades: bajo álcali (menor a 0.6%), una superficie específica de 3,500 a 4,000 cm²/g y contenido de C₃A menor a 8%, esto favorecerá la reducción en la demanda de agua, y por consecuencia disminuirá la formación de etringita y el calor de hidratación. El cemento debe presentar buena trabajabilidad y compatibilidad con los aditivos, no debe presentar fraguado falso [46].

Microsílice: también conocido como humo de sílice, es un material inorgánico, conformado por partículas esféricas con un diámetro de 0.2 micras y no cristalinas, como consecuencia tiene propiedades puzolánicas, este material se obtiene industrialmente, durante la producción de silicio metálico y de ferrosilicio. La microsílice es un componente crítico en la producción del concreto de ultra alto comportamiento, este material juega un rol importante en el comportamiento, debido a su alto contenido de SiO₂ amorfo y la habilidad de incrementar la densidad por empaquetamiento de las partículas en la matriz [46, 47]. La cantidad recomendada de uso de este material en el concreto varía de 20 a 35% del cemento [6-8, 10-12], sin embargo, se ha limitado su consumo, por la presencia de partículas de carbón sin quemar y en el concreto la superficie tiene color negro, provocando problemas estéticos [42].

Polvos de caliza: el uso de este material en la formulación del concreto tiene varias ventajas, reduce el costo del concreto y las emisiones de CO₂, posee un efecto de nucleación en las reacciones de hidratación inicial que acelera la hidratación del cemento. Por otro lado, el uso de este material permite rellenar los espacios vacíos y como consecuencia incrementa el empaquetamiento y la densidad de la matriz [15], además mejora la trabajabilidad del concreto e investigaciones realizadas han determinado que los polvos de caliza tienen un efecto positivo en la generación de gel de tobermorita (C – S – H) [42]. El

uso de polvos de caliza permite el incremento de las resistencias iniciales y disminuye las resistencias tardías porque este material no tiene propiedades puzolánicas.

Agregados: en el caso del concreto de ultra alto comportamiento, la forma, la textura de la superficie y la composición mineralógica debe ser considerada para el diseño, ya que estas influyen en el agua requerida para realizar la mezcla y como consecuencia la calidad resistente de los concretos [46, 47]. Los agregados utilizados son regularmente la arena sílica con un diámetro menor a los 6.0 mm [5-10].

Aditivo superplastificante: para la preparación de concreto de ultra alto comportamiento, se utilizan principalmente los policarboxilatos [5-12, 46, 47, 49], debido a que permite manejar relaciones menores de agua/cemento y mantener la trabajabilidad. Para optimizar el concreto de ultra alto comportamiento es necesario realizar pruebas de compatibilidad y una vez que se determine el aditivo más adecuado, se debe definir la dosis óptima del mismo.

Fibra: las fibras son usadas para reforzar la matriz de los UHPC, mejorando sus resistencias a la propagación de grietas, mejorando la resistencia a la tensión y a la fractura [46, 47]. Las más usadas son las fibras de acero y de carbón debido a que favorecen la resistencia a la tensión. Algunos ejemplos de otras fibras utilizadas son las de asbesto, de acrílico, poliéster, polietileno, polipropileno, etc. [42, 50].

1.5. Propiedades del concreto de ultra alto desempeño

Las propiedades que lo definen como un concreto de ultra alto comportamiento son:

Trabajabilidad: este parámetro es la clave para la colocación del concreto fresco. El concreto de ultra alto comportamiento fluido, debe ser preparado con cemento que tenga una buena combinación del nivel de C_3A , la superficie específica o blaine, el contenido de álcalis (N_2O y K_2O) y de SO_3 . Por otro lado, los trabajos de investigación mencionan que el uso de microsílíce en la formulación de los UHPC puede mejorar la trabajabilidad con una sustitución del 10 al 20% del cemento [12, 47, 48].

Resistencia a la compresión, tensión y flexión: estas propiedades son las más importantes en los concretos de ultra alto comportamiento, las resistencias a la compresión pueden variar desde 120 hasta 200 MPa, la resistencia a la tensión mayor a los 20MPa y la de flexión mayor a los 30 MPa, estas dependen de la composición del concreto de ultra alto comportamiento, tipo de fibra utilizada y tipo de curado [12, 46, 47].

Resistencia al impacto: el concreto de ultra alto comportamiento sin fibras es muy frágil, sin embargo, el adicionarle fibras de acero de un 2% a 5% en volumen del concreto, puede incrementar la resistencia a la tensión, a la flexión y reducir su fragilidad [12].

Contracción: la contracción es causada por la pérdida de agua, ya sea por evaporación o por algún cambio químico durante las reacciones de hidratación de los materiales cementantes o por carbonatación, las anteriores son las principales causas de agrietamiento del concreto. La reducción en la relación agua/cemento y la incorporando fibras y aplicando un curado caliente, puede decrecer la contracción por secado del concreto [12, 46].

Resistencias al agrietamiento: el agrietamiento del concreto afecta la integridad y durabilidad de la estructura del concreto, por lo tanto, es importante evaluar la resistencia al agrietamiento del concreto y se puede mejorar al adicionar fibras en la formulación de este [12, 48].

Resistividad eléctrica: la determinación tradicional de la durabilidad (penetración de ion cloruro) en los UHPC es complicada por 2 factores, el primero es porque posee una matriz densa con muy baja porosidad y segundo por la presencia de altos volúmenes de fibras de refuerzo, la selección del método para evaluar la durabilidad de los UHPC requiere que el método genere resultados que indiquen con anticipación la durabilidad del material, es por ello que en los últimos años, la determinación de la resistividad eléctrica a ganado popularidad por cuatro razones, la primera es una determinación rápida y no destructiva. Segundo, la resistividad eléctrica se determina con un equipo sencillo y no requiere entrenamiento. Tercero, muestra una fuerte correlación con la durabilidad y cuarto, puede ser aplicada para determinar las propiedades de los materiales utilizados en modelos de

ingeniería y conocer su vida útil [51]. La resistividad eléctrica se determina de 2 formas, una es la resistividad eléctrica superficial que se mide sobre la longitud del espécimen y la otra es resistividad eléctrica uniaxial o de bulk, esta determinación es rápida, se realiza midiendo el paso de corriente entre sus caras superior e inferior del espécimen. La evaluación de la resistividad del concreto es con el espécimen saturado en agua, la determinación es no destructiva, indicando la permeabilidad al paso de la corriente eléctrica en el espécimen y el resultado obtenido, esta referenciado a la resistencia a la penetración de iones cloruro, aplicando la determinación correspondiente con la norma aplicable.

Contracción autógena: la contracción autógena es el fenómeno que se produce cuando reacciona el cemento con el agua e inicia la hidratación generando una reducción del volumen, es atribuida a la desecación interna y la contracción química durante la hidratación. Un valor típico de contracción autógena para un UHPC es mayor a 800 millonésimas ($\mu\epsilon$), la reducción de la contracción autógena especialmente a edades iniciales se debe fundamentalmente a 4 mecanismos que controlan el desarrollo de la contracción autógena [12]:

- ✓ Grado de hidratación.
- ✓ Reducción en la velocidad de humedad relativa interna.
- ✓ Conteniendo el cambio de volumen.
- ✓ Fuerzas internas para la compensación de la tensión inducida por contracción.

Resistencia al ataque químico: las estructuras de UHPC expuestas a ambientes marinos sufren de ataque químico, tal como ataque por cloruros o por sulfatos, produciendo corrosión y delaminado del concreto. Existen diferentes causas que provocan la alteración de las capas del concreto, tales como la carbonatación, ataque por magnesio, y ataque por sulfatos con la formación de yeso. El concreto de ultra alto comportamiento debido a su estructura densa, pueden pasar meses o años para mostrar evidencias de ataques químicos, por ello los UHPC son una buena opción para ser utilizados en ambientes marinos agresivos [12].

1.6. Preparación del Concreto de ultra alto comportamiento

El diseño del concreto de ultra alto comportamiento varía en función de los materiales a utilizar, la relación agua cemento a controlar y resistencias objetivo. Dentro de las investigaciones realizadas para evaluar las diferentes propiedades del concreto de ultra alto comportamiento se encontraron los siguientes diseños base, es decir, de concretos de ultra alto comportamiento utilizados como referencias en las evaluaciones realizadas. En la tabla 1 se presentan dichos proporcionamientos.

Tabla 1. Resumen de los diseños de los concreto de ultra alto comportamiento (1999-2025)

Componentes y especificaciones de preparación	MM Reda et al, 1999 [10]	R. Yu et al, 2014 [11]	N Randl et al, 2014 [1]	E. Ghafari et al, 2016 [5]	A. Alsalman et al, 2017 [7]	J. F. Burroughs. et al, 2017 [6]	Z. Wu et al, 2017 [8]	A. Alsalman et al, 2017 [9]	J. Du et al, 2021, Ductal [12]	K. Chi et al, 2025 [52]
Cemento/Cementante* (kg/m ³)	1040	870	729	692	712	800	792	1365*	712	925
Microsilice (kg/m ³)	310	223	124	166	231	311	264	273	231	130
Agregado grueso (kg/m ³)	800	1073	833	900	1020	774	1056	647	1020	963
Agregado fino (kg/m ³)	---	---	397	200	211	222	---	---	211	---
Agua (L)	240	178	200	191	109	166	173	---	109	230
Aditivo (kg/m ³)	27	45	30	36	31	14	21	30	31	26
Tipo de Cemento	Tipo I	Tipo I	Tipo III	Tipo I	Tipo II	Tipo H	Tipo II	Tipo II	---	Tipo V
Tipo de Agregado fino	Arena Ottawa	Microsilice	Arena	Arena	Arena	Arena	Arena	Arena	Arena	Arena
Fibras de acero (kg/m ³)	---	---	155	194	156	---	156	---	156	160
Tamaño del agregado (mm)	4.0-6.0	< 2.0	1.0-5.0	< 6.0	< 5.0	< 5.0	< 2.4	< 4.0	---	---
Tipo de Curado	Agua Caliente	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal/ Calor	Calor/ Vapor	Normal	Normal	Agua Caliente
Relación Agua/Cementante	0.18	0.20	0.23	0.22	0.20	0.15	0.18	0.20	0.15	0.25
Resistencias (MPa)	140	120	166	150	110	193	150	136	149	162
Compactación	vibración	auto compactación	auto compactación	auto compactación	auto compactación	auto compactación	auto compactación	auto compactación	---	---

Analizando la tabla anterior se definió la propuesta para el inicio de preparación de concretos de ultra alto comportamiento en este proyecto de investigación, el resumen de la tabla 1 se presenta a continuación:

- El consumo de cementante varía de 692-1,365 kg/m³, en promedio de 808 kg/cm³.
- Se han utilizado diferentes tipos de cemento, los más utilizados son los cementos Tipo I y Tipo II.
- La microsilice es otro de los componentes siempre utilizados en los concretos de ultra alto comportamiento, los consumos varían de 166-311 kg/cm³, con un promedio de 230 kg/cm³.

- d) Los aditivos superplastificantes se utilizan en un rango de 14 a 45 kg/m³, utilizando en promedio 29 kg/m³.
- e) Para este tipo de concretos de ultra alto comportamiento, la relación agua cementante es clave, por ello las típicas varían de 0.15 a 0.25, utilizando en promedio 0.20.
- f) Respecto al tipo de agregados utilizados, por lo general consumen arena sílica.
- g) Otro factor no menos importante es el tamaño de los agregados utilizados, siendo estos menores a 6 mm.

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES

2.1. Planteamiento del problema

El crecimiento de la población nos lleva cada día a la necesidad de incrementar el consumo del concreto, siendo el cemento el principal componente y el de mayor costo. El cemento genera la mayor cantidad de CO₂ para su producción y debido a esto, las investigaciones se están enfocando en encontrar materiales que puedan remplazar la cantidad de cemento utilizado, ya sea de forma parcial o total en las formulaciones de los concretos, esto permitirá contar con concretos sustentables que tengan un menor impacto en el medio ambiente [2].

Dentro de las investigaciones realizadas en los últimos años, la industria cementera ha avanzado en la incorporación de subproductos o residuos de otros procesos industriales y los ha incorporado en su proceso de producción con el objetivo de disminuir las emisiones de CO₂ por tonelada de cemento producido, por otro lado en el caso de la producción de concreto, también se utilizan subproductos o residuos de otras industrias para sustituir de forma parcial o total la necesidad de cemento, aunado a la búsqueda de contar con concretos que tengan mayor durabilidad.

De los materiales que se utilizan en la industria de la construcción y que son subproductos de otras industrias se tienen: la ceniza volante, la escoria granulada de alto horno, entre otros. Uno de los residuos o subproductos que presenta resultados prometedores para ser utilizado como sustituto de agregado o de cemento en la formulación de concreto son los residuos de la industria cerámica, como se mencionó anteriormente, D. J. Anderson et al, en su investigación lograron sustituir un residuo cerámico desde un 20% hasta el 100%, con cambios mínimos en las propiedades del concreto producido [29], por otro lado, la investigación de D. M. Kannan. et al, muestran que la sustitución de hasta el 40% de cemento en la formulación de un concreto de alto comportamiento es factible, sin afectar las resistencias a la compresión y con excelentes resultados en durabilidad [2].

En lo referente a la generación de residuos de la industria cerámica y como se mencionó anteriormente, le corresponde el 0.46% del total de los residuos sólidos urbanos, en base al

diagnóstico realizado por la SEMARNAT en 2017, esto corresponde a 201,695 toneladas de residuos de la industria cerámica que se pueden considerar como arcillas vitrificadas [35], cabe mencionar que año con año la cantidad de residuos sólidos urbanos va en incremento.

El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar concretos de ultra alto comportamiento utilizando arcillas vitrificadas como sustituto parcial de cemento y sustituto de los agregados gruesos y finos utilizados en la formulación del concreto de ultra alto comportamiento, por otro lado, la utilización de los polvos de caliza generados durante la producción de agregados, como sustitutos de agregado fino permite disminuir las emisiones de CO₂ por tonelada de UHPC producido, porque los polvos de caliza son un subproducto.

Esta investigación permitirá obtener un concreto de ultra alto comportamiento que no se tiene formulado hoy en día en México, proveyendo mayor durabilidad de este y como consecuencia mayor ciclo de vida. Este concreto de ultra alto comportamiento posee menos emisiones de CO₂ por tonelada de concreto producido, debido al uso de 2 materiales alternativos como la arcilla vitrificada y los polvos de caliza, además de evitar el envío de estos materiales a rellenos sanitarios.

2.2. Justificación

En la actualidad en México como en el resto del mundo, los investigadores se enfocan en obtener concretos verdes, ya se disminuyendo el cemento en las formulaciones y/o reutilizando residuos industriales que eviten el consumo de materiales naturales y como beneficio adicional, disminuir el volumen de disposición de estos residuos en los rellenos sanitarios, por otro lado, las investigaciones en la durabilidad de los concretos, buscan materiales que favorezcan esta característica en las construcciones e incrementen el ciclo de vida del concreto, por lo anterior, nace la necesidad de contar con el diseño de concretos de ultra alto comportamiento preparados con materiales locales en Monterrey N.L. y que puedan incluir en su formulación, el uso de residuos industriales, evitando su envío a rellenos sanitarios.

Es necesario apuntar que en México el mercado de los UHPC aún no dicta la necesidad de este tipo de concretos, esto puede deberse a qué, en México si bien contamos con climas extremos estos son principalmente cálidos que demandan concretos convencionales, sin embargo, los requerimientos actuales en las construcciones de tipo vertical abren la oportunidad

del consumo de este tipo de concretos. Cabe mencionar que las empresas dedicadas a la construcción en México hoy en día ofertan concretos de alta resistencia y la tendencia es a requerir concretos de mayores prestaciones porque los edificios a construir cada vez son más altos.

Partiendo de la necesidad de un UHPC en corto tiempo y el poder contar con la opción comercial de este tipo de concretos, se desarrolló esta investigación para diseñar primeramente un UHPC convencional como referencia y diseñar un UHPC-G (verde) que posea menores emisiones de CO₂ por tonelada de concreto producido.

Los UHPC tienen una durabilidad superior a un concreto convencional y si este UHPC está formulado con altas sustituciones de cemento por arcilla vitrificada (subproducto) y el uso de polvos finos de caliza generados durante la fabricación de agregados, permitirá construcciones más durables y con menor huella de CO₂.

Contar con UHPC abre la posibilidad de construir estructuras más esbeltas de ultra alta resistencias, con ciclos de vida mayores a los del concreto convencional y con una reducción en el impacto ecológico, esto a través del consumo de cementantes y agregados alternativos y promoviendo el reúso de residuos industriales.

2.3. HIPOTESIS

El uso de las arcillas vitrificadas en sustitución del material cementante (cemento y microsilíce) y de los agregados, así como el reúso del polvo de caliza proveniente de la producción de agregados en la fabricación de concretos de ultra alto comportamiento, permitirán establecer formulaciones optimizadas de los concreto sin demeritar las propiedades mecánicas, microestructurales y de durabilidad típicas de estos concretos, contribuyendo a la reducción de la huella ecológica atribuible a las formulaciones convencionales del UHPC.

2.4. OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnica de utilizar arcilla vitrificada en sinergia con polvos de caliza, en la fabricación de concretos de ultra alto comportamiento, sin demeritar sus propiedades de ultra alta resistencia y durabilidad, y que al mismo tiempo conduzca a obtener formulaciones con una menor huella ecológica en relación con formulaciones convencionales de este material.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar física y químicamente de los componentes a utilizar en la producción de los concretos de ultra alto comportamiento, tanto convencionales, como optimizados (cemento, arena, microsílíce, aditivos, arcilla vitrificada y polvos de caliza).
2. Optimizar las proporciones del concreto de ultra alto comportamiento utilizado como referencia.
3. Establecer la combinación óptima de los componentes particulados (cementos más agregados) para maximizar el empaquetamiento, mediante el modelo de Andreasen y Andersen modificado, para potencializar sus propiedades de durabilidad.
4. Determinar la formulación óptima que permita producir un concreto de ultra alto comportamiento con altas sustituciones de arcilla vitrificada y de polvos de caliza proveniente de la producción de agregados sin demeritar las propiedades del concreto producido.
5. Evaluar la durabilidad del concreto de ultra alto comportamiento producido, mediante la resistencia al ataque por sulfatos, resistencia al ataque químico y resistividad eléctrica.

CAPÍTULO 3

MÉTODO EXPERIMENTAL

El presente proyecto de investigación se llevó a cabo en el Instituto de Ingeniería Civil y en un Laboratorio industrial, definiéndose 9 fases de investigación:

- a) Fase 1. Caracterización química, física y mineralógica del cemento, agregado grueso y fino, arcilla vitrificada, microsílíce, fibras de acero y aditivo.
- b) Fase 2. Preparación de los materiales a utilizar con la distribución granulométrica definida para sustituir cementantes y agregado en los UHPC.
- c) Fase 3. Selección y dosis óptima del aditivo con el cemento a utilizar durante la investigación.
- d) Fase 4. Determinación del empaquetamiento granular óptimo de los materiales para el concreto de ultra alto comportamiento convencional (UHPC-C) y de concreto de ultra alto comportamiento verde óptimo (UHPC-G).
- e) Fase 5. Sustitución óptima de microsílíce por arcilla vitrificada.
- f) Fase 6. Sustitución óptima de cemento por arcilla vitrificada.
- g) Fase 7. Sustitución óptima de arena #4 y polvos de caliza por arcilla vitrificada.
- h) Fase 8. Caracterización de los concretos UHPC-C y UHPC-G (sin fibras) y con fibras los SFR-UHPC-C y SFR-UHPC-G.
- i) Fase 9. Evaluación de durabilidad de los concretos UHPC-C y UHPC- G (sin fibras) y con fibras los SFR-UHPC-C y SFR-UHPC-G.

En la figura 2 se presenta la metodología experimental de forma esquemática y se indican las pruebas a realizar a los UHPC diseñados.

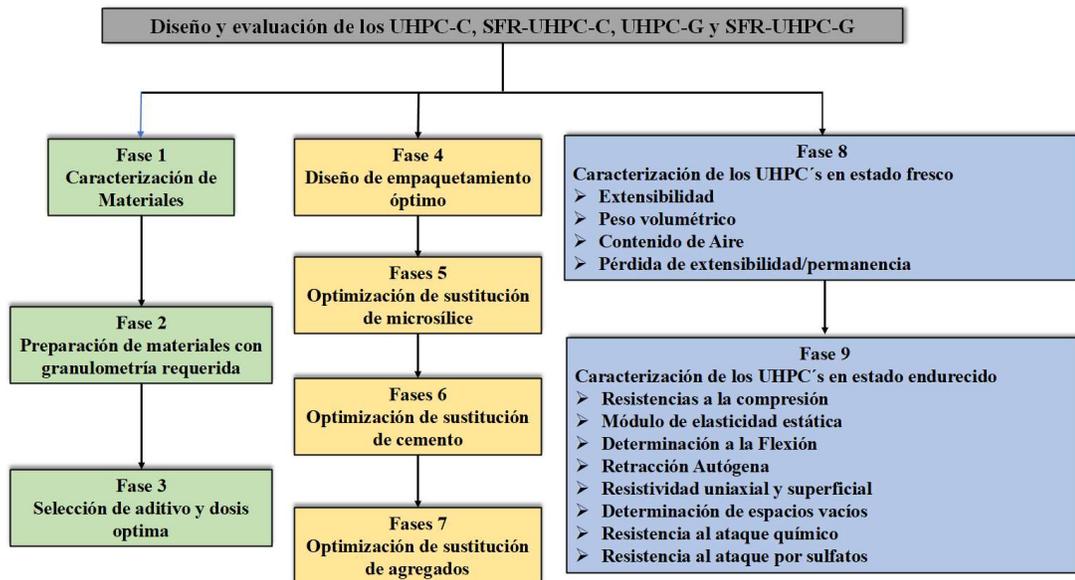


Figura 2. Metodología experimental

3.1. Fase 1. Caracterización de los materiales

En la fase 1 se realizó la caracterización química, física y mineralógica del cemento, el agregado grueso y el fino, la arcilla vitrificada, la microsilíce, las fibras de acero y los aditivos, los métodos utilizados para dichas caracterizaciones fueron bajo normas estandarizadas ASTM, en la tabla 2 se muestra el listado de los ensayos realizados a los materiales para preparar los UHPC's:

Tabla 2. Listado de ensayos realizados a los materiales para preparar los UHPC's

Materiales	Caracterización	Norma Aplicable
Cemento	Composición química	ASTM C 114-24 [53]
	Composición mineralógica	Descrito en punto 3.1
	Densidad	ASTM C 188-17 [54]
	Finura por la malla # 325	ASTM C 430-17 [55]
	Superficie Específica	ASTM C 204-24 [56]
	Expansión en Autoclave	ASTM C 151-23 [57]
	Resistencia a la compresión en morteros	ASTM C109-23 [58]
	Tiempos de fraguado	ASTM C 191-21 [59]
	Distribución de tamaño de partícula	Descrito en punto 3.1
Agregado Fino Arena No. 4 Agregado Fino arcilla vitrificada	Composición química	ASTM C 114-24
	Densidad	ASTM C 128-22 [60]
	Absorción	ASTM C 128-22
	Granulometría	ASTM C 136-19 [61]
Microsilice Arcilla Vitrificada	Composición química	ASTM C 114-24
	Composición mineralógica	Descrito en punto 3.1
	Finura m-325	ASTM C 430-17
	Densidad	ASTM C 188-17
	Índice de actividad puzolánica	ASTM C 311-24 [62]
	Índice de actividad puzolánica microsilice	ASTM C 1240-20 [63]
Aditivo Superplastificante	Contenido de sólidos	Gravimétrico (Punto 3.1)
	Densidad	Gravimétrico (Punto 3.1)
Aditivo Oclisor de aire	Densidad	Gravimétrico (Punto 3.1)
Fibras de acero	Densidad	ASTM C 188-17 (adaptada)

a) Análisis químico:

El análisis químico de los materiales utilizados se realizó en un equipo de Fluorescencia de Rayos-X, Marca PANalytical, modelo Zetium 2.4 de 4kW (ver figura 3), este equipo realiza los análisis semicuantitativos de los materiales en base a patrones de referencia y para la preparación y análisis se aplicó la Norma ASTM C114-24.

b) Analisis mineralógico:

La determinación de la composición mineralógica se realizó a los materiales finamente molidos a un tamaño 100% menor a 75 micras, las mediciones se realizaron en un equipo marca Panalytical modelo Empyrean de difracción de rayos X ($K\text{-}\alpha=1.5405950 \text{ \AA}$) con un generador de 4 kW (máx. 60 kV y máx. 100mA) y un detector PIXCel1D-Medipix3. las muestras fueron escaneadas en un rango de 5° a 80° . Para todos los materiales analizados se aplicó un programa de analisis con duración de 10 minutos, con un avance de a $7.5^\circ/\text{min}$.

En las figuras 3 y 4, se presentan los equipos que se utilizaron para la caracterización química y mineralógica de los materiales:

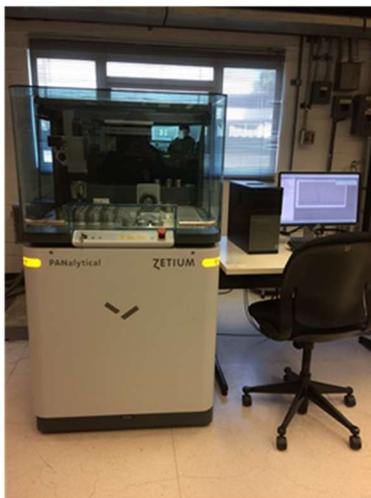


Figura 3 Equipo de Fluorescencia de Rayos-X, Marca PANalytical, modelo Zetium 2.4 de 4kW.



Figura 4. Equipo de Difractómetro de Rayos-X, Marca PANalytical, modelo Empyrean

c) Distribución del tamaño de la partícula:

Los análisis del tamaño de la partícula se realizaron con el equipo Masterzaiser 2000, el cual analiza el tamaño de partícula mediante la medición de la luz dispersa por la difracción laser de la partícula (el ángulo de difracción es inversamente proporcional al tamaño de partícula), cuantificando el volumen de cada tamaño considerando que todas las partículas son esferas, generando una distribución del tamaño de partícula y logrando calcular el porcentaje que está por debajo de cada tamaño definido, tiene un intervalo de análisis de 0.1 micras a 3000 micras. En la figura 5 se muestra el equipo utilizado.



Figura 5 Analizador de tamaño de partícula, marca Malvern, modelo Mastersizer 2000

d) Determinación de contenido de sólidos en los aditivos

El contenido de sólidos se determinó mediante gravimetría, es un método no normalizado que se aplica en el laboratorio para determinar el contenido de sólidos en un líquido, esto se realizó llevando a sequedad el líquido del aditivo, pesando al inicio el contenido del aditivo líquido y después de 24 a 36 horas de secarlo a una temperatura de 110°C, se dejó enfriar y se tomó el peso del sólido que quedó en el crisol, considerando el peso final, el peso constante después del tiempo de sequedad. Para el cálculo del porcentaje de líquido en el aditivo, se realizó la división de la diferencia del peso líquido y peso seco entre el peso líquido y se multiplicó por 100, al valor obtenido se le resta a 100, para determinar el porcentaje de sólidos. En la figura 6 se presentan el crisol y la balanza utilizada para la determinación gravimétrica.

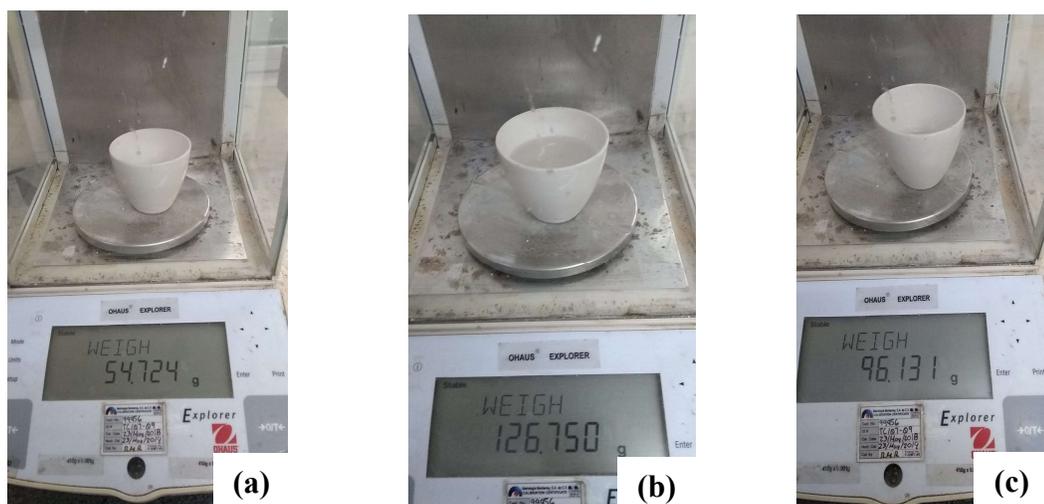


Figura 6. Determinación de sólidos en aditivos (a) peso del crisol, (b) peso inicial y (c) peso final

e) Determinación de densidad de los aditivos:

La densidad de los aditivos se determinó con un picnómetro de 50 mL calibrado a una temperatura de 20 °C. Primeramente se pesó el picnómetro seco y vacío, se registró este peso, posteriormente se colocó el aditivo a evaluar su densidad dentro del picnómetro de forma gradual utilizando una pipeta de 5 mL para evitar la generación de burbujas dentro del picnómetro, una vez que se llenó el picnómetro, se tapó y se limpió el exterior, y se llevó a un baño a 20°C, se dejó el picnómetro el tiempo necesario hasta que se obtuvo peso constante (asegurando que el aditivo también estuviera a 20°C), durante este periodo, se sacaba el

picnómetro, se secaba y se pesaba, una vez teniendo peso constante, se registró el peso para el cálculo de la densidad, aplicando la fórmula de densidad ($\rho = \text{masa} / \text{volumen}$), siendo la masa la diferencia del peso final del picnómetro lleno menos el peso del picnómetro vacío. En la figura 7, se presenta una imagen del picnómetro utilizado para la determinación de densidad (ρ).



Figura 7. Determinación de la densidad de los aditivos con picnómetro

3.2. Fase 2. Preparación de los materiales

La arcilla vitrificada (AV) se preparó para ser utilizada como sustituto de cemento, microsilíce y agregado. Para lograr sustituir la arena #4 se preparó la AV similar en su distribución granulométrica, la distribución de tamaños fue en las mallas de 3/8", 4, 8, 16, 30, 50 y 100, para lograrlo, se redujo su tamaño en un triturador de quijadas (ver figuras 8 y 9) y se prepararon las fracciones en cada malla para lograr la misma distribución que la arena #4, este material en adelante será identificado como AV 950 micras, por tener un $D_{50} = 950$ micras.

Para el agregado fino de la arcilla vitrificada, se molió en un molino de bolas (ver figura 10), buscando una distribución de tamaño de partícula similar a la del polvo de caliza procedente de la producción de agregado, esto se logró moliendo la AV a una finura del 85% en malla-200 (75 micras), en adelante este material será AV 40.7 micras, por tener un $D_{50} = 40.7$ micras.

Por otro lado, para realizar la sustitución de arcilla vitrificada por cemento, fue necesario moler la AV a la finura del cemento, es decir, 96% m-325, es decir, 96% menor a 45 micras,

utilizando un molino de bolas, mostrado en la figura 10, en adelante este material es AV 15.2 micras, por tener un $D_{50}=15.2$ micras.

Para lograr la sustitución de la microsilice por arcilla vitrificada, fue necesario moler el material lo más fino posible, logrando un tamaño $D_{50}=8.40$ micras, este tamaño se logró en un molino de disco, mismo que se muestra en la figura 11, en adelante es AV 8.4 micras.

Los equipos utilizados para la disminución de tamaño de partícula son los siguientes:



Figura 8. Triturador de quijadas



Figura 9. Triturador de quijadas



Figura 10. Molino de bolas



Figura 11. Molino de disco

3.3. Fase 3. Selección y dosis óptima del aditivo con el cemento a utilizar durante la investigación.

3.3.1 Compatibilidad del aditivo con el cemento y su dosis óptima.

Para la determinación de la compatibilidad del aditivo y la dosis óptima del mismo, se definió el siguiente procedimiento en base al método de mezclado indicado en la Norma ASTM C305-20 [64] y utilizando una batidora UNIVEX:

- 1) Se determinaron las densidades y el contenido de sólidos de los aditivos a probar.
- 2) Se realizaron diseños de mezclas de pasta con una relación de agua/cemento de 0.25 y con diferentes porcentajes de dosificación de los aditivos a probar, buscando 2.5 litros de pasta por lote preparado.
- 3) Se modificó el método de mezclado en cuanto a los tiempos a aplicar para lograr la mayor integración del aditivo con el cemento y que reaccionará el cemento con la baja cantidad de agua, y lograr fluidificar la mezcla. Para cada aditivo, se evaluaron 5 diferentes dosis de cada uno de ellos utilizando una batidora UNIVEX (figura 12) y el cono mostrado en las figuras 13 y 14, evaluando el tiempo de escurrimiento y con esta determinación se identificó el aditivo que reacciono mejor con el cemento y la dosis óptima a utilizar.



Figura 12. Batidora UNIVEX



Figura 13. Cono para determinar el tiempo de escurrimiento



Figura 14. Determinación del tiempo de escurrimiento

- 4) El Cono utilizado ayudo a determinar la efectividad de los aditivos y la dosis óptima a utilizar para cada uno de ellos con respecto a la cantidad de cementante, obteniendo el tiempo necesario para que una cantidad de volumen de pasta definido fluyera por el orificio situado en el extremo del cono para ello se tomaron los datos de dosificación del aditivo vs el tiempo que tardo en fluir cada mezcla, los datos obtenidos se graficaron para identificar la dosis óptima, y fue aquella que obtuvo el menor tiempo de escurrimiento y además que mostrara que aun incrementando la cantidad de aditivo, el tiempo ya no disminuía.
- 5) Para definir el aditivo óptimo y su dosis, se probaron 8 aditivos de diferentes marcas, todos son Policarboxilatos de las marcas (Mapei, Master&Builders, GCPAT, Cemex Admixture, Eucomex y Sika).
- 6) En la tabla 3 se presenta el procedimiento de mezclado aplicado por dosificación de aditivo y para cada aditivo:

Tabla 3. Procedimiento de mezclado y determinación del tiempo de escurrimiento

Pasos para mezclado y medición del tiempo de fluidez	
1.	Colocar el agua y aditivo en el tazón de mezclado
2.	Adicionar el cemento
3.	Reposar el cemento en el agua por 30 segundos
4.	Iniciar mezclado en velocidad baja por 1 minuto
5.	Detener el mezclado y bajar el material de las paredes por 1 minuto
6.	Reiniciar el mezclado en velocidad media por 3 minutos
7.	Detener el mezclado y bajar el material de las paredes por 1 minuto
8.	Reiniciar el mezclado en velocidad media por 3 minutos
9.	Detener el mezclado, bajar de las paredes y colocarlo en el cono para la determinación de tiempo de escurrimiento (figura 13)
10.	Llenar hasta la línea indicada el cono
11.	Dejar que la mezcla fluya por el cono y se mide el tiempo que tarda en fluir 1.75L de mezcla
12.	Se recupera el material y se vuelve a mezclar por 1 minuto y se realiza nuevamente los pasos 10 y 11
13.	Se recupera nuevamente el material y se mezcla por 1 minuto y se realizan los pasos 10 y 11
14.	Realizar el promedio de los 3 tiempos obtenidos por cada dosificación de aditivo

En la figura 15, se presenta un ejemplo del comportamiento típico del tiempo de escurrimiento en función de la dosificación del aditivo, para determinar el punto de saturación de aditivo en pastas de cemento.

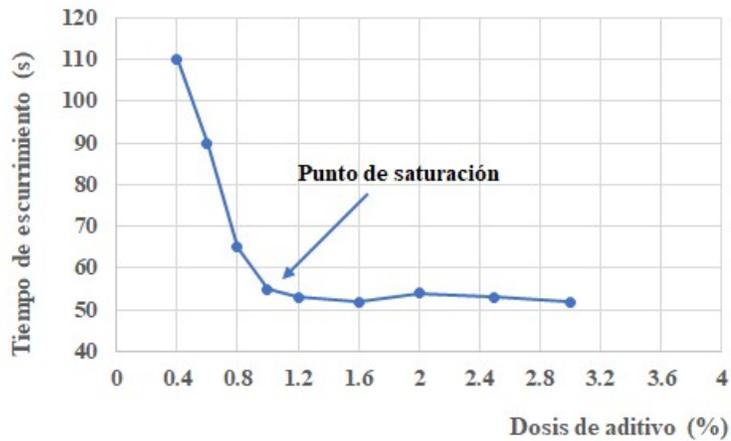


Figura 15. Comportamiento del tiempo de escurrimiento en función de la dosificación del aditivo

3.3.2 Determinación del aditivo y dosis óptima en el cementante (cemento+mícosilice)

Una vez que se determinó el aditivo y su dosis óptima en las pastas de cemento, se seleccionaron 2 de los 8 aditivos, y fueron los que permitieron la mejor fluidificación de las pastas con la menor dosis de aditivo.

Debido a que se tenían diferentes tipos de microsilice, se inició la evaluación de la microsilice que tuviera mejor compatibilidad con los aditivos y el cemento. Para esta etapa se probaron 5 microsílices de diferentes proveedores (Poshell, Euco, GCC y dos de Sika), se prepararon mezclas de 90% cemento con 10% de las diferentes microsílices y se evaluaron con diferentes dosis de los 2 aditivos seleccionados.

Para esta fase del proyecto, se aplicó el mismo procedimiento mostrado en la tabla 3 y se determinó cuál de las microsílices probadas, funcionó mejor con los aditivos previamente seleccionados y también se definió el aditivo y la dosis óptima a utilizar en los posteriores diseños del concreto de ultra alto comportamiento.

3.4. Fase 4. Diseño del empaquetamiento óptimo, utilizando el modelo modificado de Andreasen y Andersen.

Para el diseño del empaquetamiento se utilizó el modelo de empaquetamiento modificado de Andreasen y Andersen (A&A) [65]. El objetivo es obtener la mezcla de los materiales que produzca el concreto más denso (sin espacios en la matriz) para optimizar sus propiedades de durabilidad y altas resistencias, aplicando la siguiente fórmula:

$$P(D) = \frac{D^q - D^{qmin}}{D^{qmax} - D^{qmin}} \quad (1)$$

En base a la recomendación de valores de q entre 0.22 y 0.25 para mezclas con altas cantidades de finos [65], se utilizó una q de 0.25. Para el cálculo de la curva óptima de empaquetamiento se consideraron los tamaños máximos y mínimos de los componentes del concreto de ultra alto comportamiento, y además toda la distribución granulométrica en los siguientes tamaños en micras: 9500, 4750, 2360, 1180, 1000, 600, 400, 325, 300, 200, 170, 150, 100, 88, 74, 63, 53, 50, 45, 44, 37, 32, 25, 24, 20, 12, 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.10.

En las figuras 5 y 16, se muestran los equipos utilizados para los análisis de tamaño de partícula, para los materiales finos el analizador de tamaño de partícula Mastersizer 2000 de la marca Malvern y para los agregados gruesos un Rot-Tap.

A todos los materiales a utilizar para el diseño de los UHPC, se les realizó la determinación de distribución de tamaño de partícula (cemento, microsilice, arena, polvos de caliza, arcilla vitrificada en los diferentes tamaños).



Figura 16. Equipo Ro-Tap para granulometría

Una vez concluida la fase 4, se definió el procedimiento a aplicar para la preparación los concretos de ultra alto comportamiento (UHPC-C convencional y el UHPC-G verde óptimo), ya que hasta esta etapa solo hemos evaluado a los cementantes con el aditivo.

3.4.1 Determinación del procedimiento de preparación del UHPC.

El mezclado del UHPC se realizó partiendo del método de mezclado de la Norma ASTM C305-20 [57], y modificando los tiempos de mezclado buscando una mejor integración del aditivo con los componentes de los UHPC y mejorar la reacción con la baja cantidad de agua utilizada en la formulación.

Para realizar las mezclas se utilizó una batidora Hobart y se realizó el procedimiento mostrado en la figura 17.

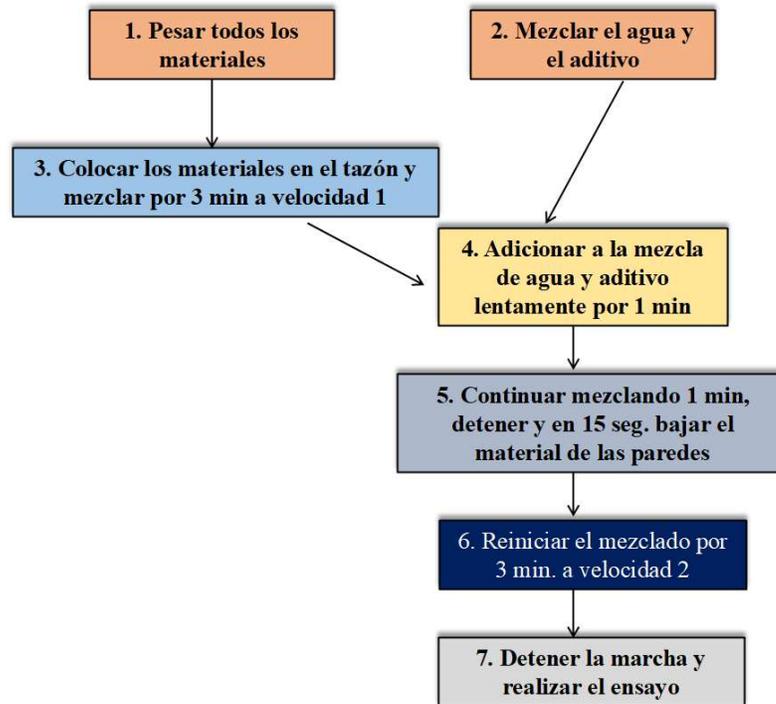


Figura 17. Procedimiento de mezclado

El procedimiento mostrado en la figura 17, se aplicó en la realización de las determinaciones de optimización de las Fases 5, 6, 7 y 8.

3.5. Fase 5. Determinación de sustitución óptima de microsilice por arcilla vitrificada.

La preparación y diseño de mezclas para encontrar la dosis óptima de sustitución de arcilla vitrificada por microsilice se realizó partiendo de las siguientes mezclas de materiales y aplicando el empaquetamiento óptimo de los materiales (Fase 4), así como la dosis óptima de aditivo ya determinado en la Fase 3.

A partir de esta fase, se evaluaron las mezclas en estado fresco para determinar extensibilidad utilizando el mini cono marcado en la norma ASTM C230-20 [66], y midiendo la extensibilidad como lo indica la norma ASTM C1437-20 [67] y el contenido de aire aplicando la norma ASTM-C185-20 [68]. En estado endurecido se determinaron las resistencias a la compresión aplicando la norma ASTM C109-23.

A continuación, en la tabla 4 se presenta el diseño de mezclas para optimizar la cantidad que es viable sustituir de arcilla vitrificada por microsilice. Para la determinación de la cantidad óptima de sustitución, se probaron mezclas en donde se sustituyó la microsilice por la arcilla vitrificada en un 25, 50, 75 y 100 por ciento. Cabe mencionar que la mezcla 1 es el UHPC-C.

Tabla 4. Diseño de mezclas para preparar UHPC y optimizar la sustitución de microsilice por arcilla vitrificada

Identificación	Cemento	Agua/ Cemento	%Microsilice/ %Arcilla Vitrificada	Aditivo óptimo	Arena	Polvos de Caliza
UHPC 1	√	0.25	100 / 0	√	√	√
UHPC 2	√	0.25	75 / 25	√	√	√
UHPC 3	√	0.25	50 / 50	√	√	√
UHPC 4	√	0.25	25 / 75	√	√	√
UHPC 5	√	0.25	0 / 100	√	√	√

Las mezclas se diseñaron partiendo de las densidades de los materiales y tomando como base la preparación de 1000 L de UHPC.

Las mezclas preparadas se utilizaron para determinar la extensibilidad, el peso volumétrico y resistencias a la compresión de los 5 UHPC y poder determinar la sustitución óptima de porcentaje de microsilice por arcilla vitrificada. La mezcla seleccionada como óptima de la Fase 5, es la utilizada en la Fase 6 como base para iniciar la optimización de sustitución del cemento por arcilla vitrificada. El UHPC 1 es el UHPC-C.

3.6. Fase 6. Determinación de sustitución óptima de cemento por arcilla vitrificada.

Las mezclas para la sustitución óptima en porcentaje del cemento por arcilla vitrificada son los diseños de mezclas mostrados en la tabla 5:

Tabla 5. Diseño de mezclas para preparar UHPC y optimizar la sustitución de cemento por arcilla vitrificada

Identificación	Cementante (%Cemento/%Arcilla Vitrificada)	Agua/Cementante	%Microsilice/%Arcilla Vitrificada	Aditivo Óptimo	Arena	Polvos de Caliza
UHPC 6	100	0.25	Óptimo Fase 5	√	√	√
UHPC 7	90/10	0.25	Óptimo Fase 5	√	√	√
UHPC 8	80/20	0.25	Óptimo Fase 5	√	√	√
UHPC 9	70/30	0.25	Óptimo Fase 5	√	√	√
UHPC 10	60/40	0.25	Óptimo Fase 5	√	√	√

De las mezclas preparadas se determinó la extensibilidad, peso volumétrico y resistencia a la compresión y se seleccionó el UHPC que presentó el mejor comportamiento resistente obtenido hasta esta Fase 6, es decir, con proporción óptima de microsilice con arcilla vitrificada y la proporción óptima del cemento con arcilla vitrificada, este UHPC se tomó como partida para el diseño óptimo del UHPC a utilizarse en la Fase 7.

3.7. Fase 7. Determinación de sustitución óptima del agregado calizo por agregado de arcilla vitrificada.

En esta etapa, ya se obtuvieron los UHPC que mejores resultados resistentes ofrecieron en las Fases 5 y 6, y en esta fase se procedió a determinar la sustitución óptima de los agregados calizos (arena #4/polvos de caliza) por agregados (AV 950 micras/AV 40.7 micras) de arcilla vitrificada en diferentes proporciones, cabe mencionar que las mezclas de agregados calizos y de agregados de arcilla vitrificada, mantuvieron su proporción, la cual es adecuada para el mejor empaquetamiento en el UHPC-G (verde óptimo). En la tabla 6 se muestran los diseños de los UHPC a realizar:

Tabla 6. Diseño de UHPC para optimizar la sustitución de agregado calizo por agregado de arcilla vitrificada

Identificación	Cementante (%Cemento/%Arcilla Vitrificada)	Agua/Cementante	%Microsilice/%Arcilla Vitrificada	Aditivo Óptimo	% Agregados Calizos	% Agregados Arcilla Vitrificada
UHPC 11	Óptimo Fase 6	0.25	Óptimo Fase 5	√	100	0
UHPC 12	Óptimo Fase 6	0.25	Óptimo Fase 5	√	80	20
UHPC 13	Óptimo Fase 6	0.25	Óptimo Fase 5	√	70	30
UHPC 14	Óptimo Fase 6	0.25	Óptimo Fase 5	√	60	40

A los UHPC de la tabla 6, se les determinó la extensibilidad, peso volumétrico, el contenido de aire y las resistencias a la compresión, el UHPC con los mejores resultados, será el UHPC-G y que tendrá los proporcionamientos óptimos de sustitución de la arcilla vitrificada en cada una de las Fases 5, 6 y 7. Este UHPC-G será evaluado en conjunto con el UHPC-C diseñado en la Fase 5 y que se identificó como UHPC-1.

3.8. Fase 8. Evaluación de los UHPC's en estado fresco.

Una vez obtenidos los diseños de las proporcionamientos de los concretos de ultra alto comportamiento convencional y verde óptimo, se definió que los concretos se evaluarían sin fibras y utilizando fibras, dichas fibras son de acero Dramix OL 13/0.20 marca Bekaert.

En total se prepararon 4 concretos de ultra alto comportamiento (UHPC-C, UHPC-G, SFR-UHPC-C y SFR-UHPC-G) para la evaluación completa de propiedades en estado fresco y endurecido. Las pruebas realizadas en estado fresco fueron:

- Extensibilidad
- Evaluación de la permanencia a la trabajabilidad
- Peso volumétrico
- Contenido de Aire
- Tiempo de Fraguado

3.8.1 Extensibilidad y evaluación de la permanencia

Las pruebas en estado fresco se iniciaron una vez concluida la etapa de mezclado, el material se vertió en el cono que marca la ASTM C230-20, ver figura 18, y se utilizó como minicono de revenimiento para medir la extensibilidad sin vibración y sin compactación, una vez enrasado el minicono, este se removió y la mezcla comenzó a extenderse (fluir) y cuando se detuvo su movimiento (ejemplo en figura 19), se determinó la extensibilidad (aproximadamente entre 30 y 60 segundos), esta determinación se realizó para cada mezcla preparada para la realización de resistencias a la compresión.

La evaluación a la permanencia de la trabajabilidad se realizó una vez finalizado el mezclado y de determinar la extensibilidad aplicando la norma ASTM C1437-20 sin vibración.

Una vez realizada la medición de la extensibilidad, se recupera la mezcla en el tazón de la mezcladora y se deja reposar por 5 minutos y se reinicia el mezclado por 30 segundos y se vuelve a medir la extensibilidad y así sucesivamente hasta que la extensibilidad se redujera al 50% o bien, que la mezcla ya no fluyera.



Figura 18. Minicono de revenimiento



Figura 19. Medición de extensibilidad

3.8.2 Determinación del peso volumétrico y el contenido de aire

En lo que respecta a la medición del peso volumétrico y el contenido de aire, estas determinaciones se realizaron aplicando el procedimiento descrito en la norma ASTM-C185-20 y utilizando el vaso de volumen conocido mostrado en la figura 20.



Figura 20. Vaso de volumen conocido para la determinación de peso volumétrico y contenido de aire

3.8.3 Determinación del tiempo de fraguado por resistencia a la penetración.

La determinación de tiempo de fraguado se realizó por el método de la resistencia a penetración bajo la norma ASTM C403-23 [69] y únicamente a los UHPC sin fibras para poder evaluar la matriz cementante sin la interferencia de las fibras. Las mediciones se iniciaron cuando la primera aguja presentó resistencia a la penetración y a partir de ese momento se continuaron las pruebas con las diferentes agujas hasta que la resistencia a la penetración fue igual o mayor de 4000 psi. El cálculo de tiempo de fraguado inicial se determinó cuando la resistencia a la penetración fue de 500 psi (3.5MPa) y el tiempo de fraguado final se definió cuando la resistencia a la penetración fue de 4000 psi (27.6MPa). En las figuras 21 y 22, se presentan los moldes utilizados para la determinación del tiempo de fraguado y las marcas de las agujas en los especímenes de concreto de ultra alto comportamiento.



Figura 21. Llenado de moldes para tiempo de fraguado



Figura 22. Penetración con diferentes agujas para determinar el tiempo de fraguado

3.9. Fase 9. Evaluación de los UHPC's en estado endurecido

3.9.1 Determinación de las resistencias a la compresión

La determinación de las resistencias a la compresión se realizó aplicando el procedimiento de la norma ASTM C109-23 y evaluando las resistencias a las edades de 1, 3, 7, 28, 56 y 91 días, este método de ensayo permitió determinar la resistencia a la compresión del cemento hidráulico y de los concretos de ultra alto comportamiento, los resultados se pueden utilizar para determinar la conformidad del cemento respecto a especificaciones normadas para dicho

material y en el caso de los UHPC's, poder determinar si cumplen como concretos de ultra alto comportamiento. En todos los casos se utilizaron moldes de 2 pulgadas para la evaluación resistente.

En la figura 23, se muestran los moldes utilizados para la determinación de las resistencias a la compresión, y en la figura 24 se presenta la prensa hidráulica utilizada para la determinación de las resistencias a las diferentes edades.



Figura 23. Moldes de bronce para preparar cubos de 2" por 2"



Figura 24. Prensa Hidráulica, marca Tony Technik, cap. Max. 200 toneladas

3.9.2 Determinación del módulo de elasticidad estático

Para la determinación del módulo de elasticidad estático o módulo de Young, se prepararon cilindros de 10x20 cm de las 4 mezclas y se evaluó el módulo a 91 días. Este método de ensayo se realizó bajo la Norma ASTM C469-22 [70], proporcionó el valor de la relación del estrés y la tensión y una relación con el esfuerzo longitudinal del concreto endurecido a la edad de prueba, los especímenes se mantuvieron en cuarto de curado. En la figura 25 se muestran los especímenes preparados para la realización de la determinación del módulo de elasticidad estático.



Figura 25. Especímenes de los diseños de concreto de ultra alto comportamiento sin fibras y con fibras para determinación de módulo de Young

3.9.3 Determinación del desempeño a la flexión en vigas de concreto.

Para la determinación de Flexión se prepararon 3 vigas de 15cm por 15 cm por 60 cm de cada UHPC, teniendo en total 12 vigas para su medición. Se realizaron pruebas de flexión a las vigas de los UHPC-C, SFR-UHPC-C, UHPC-G y SFR-UHPC-G. La evaluación se realizó aplicando la Norma ASTM C1609-21 [71], que permite evaluar el comportamiento de la flexión en los concretos, mediante el uso de parámetros derivados de la curva de carga-deflexión.



Figura 26. Especímenes de los diseños de concreto de ultra alto comportamiento sin fibras y con fibras para determinación de módulos de flexión



Figura 27. Equipo para determinar el módulo de Flexión en vigas

3.9.4 Determinación del porcentaje de espacios vacíos en los UHPC's

Para validar el empaquetamiento de los concretos de ultra alto comportamiento preparados, se fabricaron cilindros de 7.5 cm por 15 cm y se aplicó el procedimiento indicado en la Norma ASTM C642-21 [72], el cual indica que, para determinar los espacios vacíos, se debe calcular la densidad y absorción después de haber sometido los especímenes a inmersión y ebullición, posteriormente se aplicaron las fórmulas marcadas en la norma y se obtuvieron los espacios vacíos de cada espécimen a una edad de 91 días de hidratación. En la figura 28 se muestran los especímenes preparados para esta determinación.



Figura 28. Especímenes de los diseños de concreto de ultra alto comportamiento sin fibras y con fibras, para determinar en espacios vacíos (empaquetamiento)

3.9.5 Determinación de la resistividad superficial.

La determinación de la resistividad superficial permite evaluar la resistividad eléctrica de las muestras de concreto de una forma rápida a la resistencia a la penetración de iones cloruro. La resistividad superficial se determinó con un equipo Resipod Proceq bajo la norma AASHTO T358-15 [73]. Las determinaciones se realizaron a los cilindros de concretos preparados de 10cm por 20cm, realizando mediciones a 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 21, 28, 56 y 91 días, dichas mediciones se realizaron cada 90° sobre la superficie de cada cilindro, aplicando 4 puntos de apoyo y el promedio corresponde a la resistividad del cilindro y se promediaran los resultados de 3 cilindros de la misma muestra para obtener el resultado de cada muestra. En la figura 29, se presenta el equipo utilizado y un ejemplo de la medición.



Figura 29. Equipo Resipod Proceq para determinación de resistividad superficial

3.9.6 Determinación de la resistividad uniaxial (bruta).

En el caso de la determinación de la resistividad uniaxial, esta se realizó a los mismos cilindros utilizados para la determinación de la resistividad superficial y el mismo equipo, solo se adecua para la medición de la resistividad uniaxial (figura 30). Para las determinaciones de resistividad uniaxial, se aplicó la norma ASTM C1876-19 [74] y se realizaron a 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 21, 28, 56 y 91 días. La norma indica que el cálculo de resistividad uniaxial se debe calcular aplicando la fórmula siguiente:

$$r = R_{\text{corregida}} A/L \quad (3)$$

r = Resistividad Bruta

R = resistencia eléctrica del cilindro en ohms (lectura equipo)

R corregida = $R/2\pi a$ (a es el espacio entre cada electrodo, para el equipo es de 3.8 cm)

L = longitud del cilindro = 20 cm

A = Área del cilindro ($\pi r^2/2$) = 78.5 cm²



Figura 30. Equipo Resipod Proceq para determinar resistividad uniaxial (bruta)

3.9.7 Determinación de la contracción autógena.

La determinación de la contracción autógena se realizó en base a la norma ASTM C1698-19 [75], el objetivo fue evaluar si la contracción autógena corresponde a los valores ya encontrados en otras investigaciones en materiales como los UIHPC.

Las determinaciones se realizaron desde el fraguado inicial hasta cumplir 25 días de iniciada la hidratación, realizando mediciones diarias. En la figura 31 se presentan los especímenes preparados para la determinación de contracción autógena.



Figura 31. Especímenes preparados para la determinación de contracción autógena

3.9.8 Determinación de la resistencia a los sulfatos

a) Determinación de la resistencia a los sulfatos (método acelerado)

La determinación de resistencia a los sulfatos se realizó preparando 4 barras de 10 pulgadas de longitud de cada UHPC sin fibras y con fibras, y se aplicó lo indicado en la Norma ASTM C452-21 [76]. Las barras se colocaron en el cuarto de curado por 24 horas, se midieron y se inició la exposición de las barras a una solución de sulfato de calcio al 10%, a partir de este momento cada 2 semanas hasta cumplir 8 semanas fueron sometidas a cambio de solución nueva de sulfato de calcio al 10%, almacenando las barras con la solución en un baño maría a 40°C, siendo así un ataque agresivo en corto tiempo, de tal forma que permita conocer la resistencia a los sulfatos en 8 semanas.

b) Determinación de la resistencia a los sulfatos (método a 1 año)

La determinación de la resistencia a los sulfatos de los cuatro concretos de ultra alto comportamiento, fue aplicando la Norma ASTM C1012-24a [77]. Se prepararon 6 barras con una longitud de 10 pulgadas de cada UHPC y comenzó su exposición a una solución de sulfato de sodio a las 24 horas de haber iniciado su reacción de hidratación, y ya fraguadas las barras,

se midió su longitud antes de ser introducidas a la solución de Na_2SO_4 al 0.05%, se midió cada barra y a partir de este día se realizaron mediciones a diferentes edades, llegando hasta 12 meses, que es el tiempo definido por el método para determinar si es o no resistente al ataque por sulfatos. En la figura 32, se presentan los especímenes en proceso de evaluación de su resistencia al ataque por sulfatos y en la figura 33, el comparador de longitudes utilizado para medir el cambio de tamaño de las barras de prueba, este comparador cumple con las especificaciones indicadas en la Norma ASTM C490-21 [78].



Figura 32. Especímenes sometidos a ataque por sulfatos



Figura 33. Equipo para determinar la expansión de ataque por sulfatos.
(Comparador de Longitudes)

3.9.9 Determinación al ataque químico con ácido sulfúrico (H₂SO₄) al 5% y 10%.

La determinación del ataque ácido se realizó a los UHPC Convencional sin y con fibras y a los UHPC verde óptimo sin y con fibras, iniciando el ataque químico cuando los especímenes tenían 28 días de haberse fabricado. Para esta determinación se prepararon cubos de 2" por 2" y se sometieron a un ataque de ácido sulfúrico (H₂SO₄). El ataque se llevó a cabo utilizando 2 concentraciones de H₂SO₄, la primera al 5% y se realizó este ataque a los especímenes por 8 semanas, determinando el ataque recibido de la semana 1 a la 8, al otro set de muestras, se sometió a ataque con H₂SO₄ con una concentración del 10% evaluando el ataque recibido, de la semana 4 a la 11. El procedimiento aplicado se ejecutó en base a la Norma ASTM C 267-20 [73]. En la figura 34 se presentan los especímenes sumergidos en solución de ácido sulfúrico al 5% y 10% y en la figura 35 se muestran los especímenes después del ataque ácido.

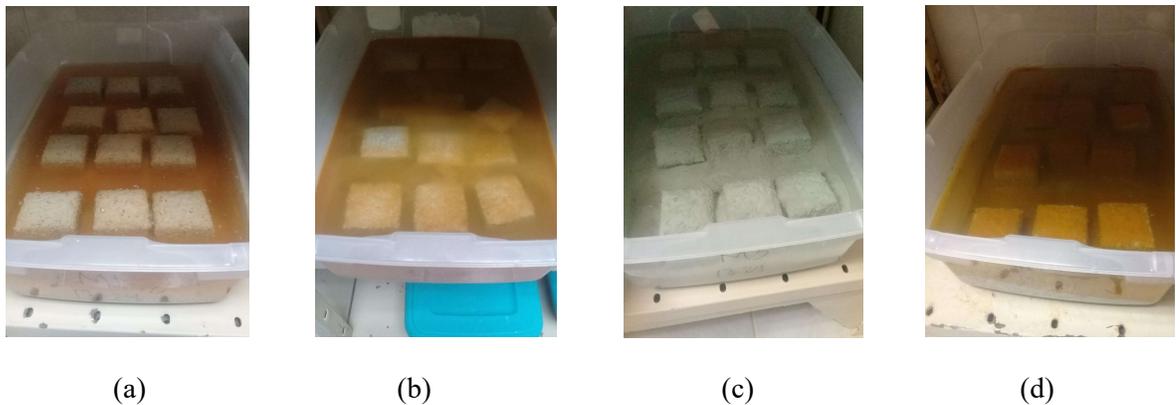


Figura 34. Ataque ácido a los UHPC's, (a) UHPC-C, (b) SFR-UHPC-C, (c) UHPC-G y (d) SFR-UHPC-G

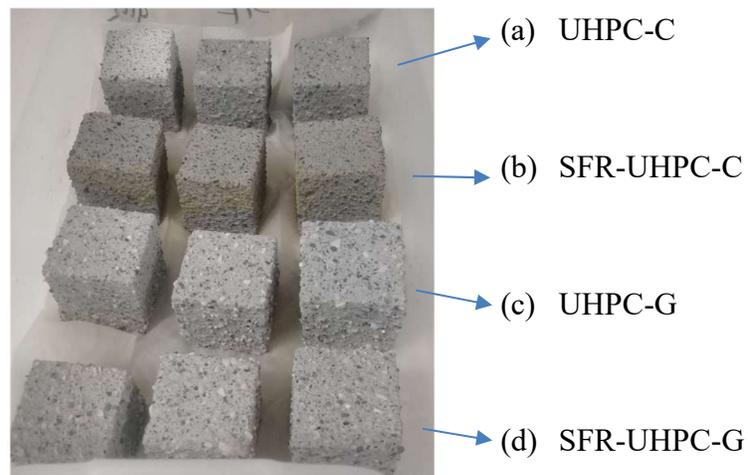


Figura 35. Especímenes después de 3 semanas de ataque con H₂SO₄ al 5%

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Fase I. Caracterización de los materiales a utilizar

4.1.1 Caracterización del cemento

La caracterización química del cemento utilizado en la investigación se analizó en un equipo de fluorescencia de rayos-X (figura 3), y los resultados indican que es un cemento clasificado como Tipo II bajo álcali (TII BA) bajo la norma ASTM C150-24 [80], una de las características especiales de este tipo de cemento es su mediana resistencia al ataque químico por sulfatos.

Tabla 7. Caracterización química del cemento

Compuestos		Cemento (%)
SiO ₂	Dióxido de silicio	20.1
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio	4.6
Fe ₂ O ₃	Óxido de fierro	3.0
CaO	Óxido de calcio	65.1
MgO	Óxido de magnesio	1.0
SO ₃	Trióxido de azufre	4.4
Na ₂ O	Óxido de Sodio	0.21
K ₂ O	Óxido de potasio	0.37
TiO ₂	Óxido de titanio	0.17
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo	0.02
Mn ₂ O ₃	Óxido de manganeso	0.04
CaO (libre)	Cal Libre	1.5
C3S	Silicato tricálcico	65
C2S	Silicato dicálcico	9
C3A	Aluminato tricálcico	7
C4AF	Ferrialuminato tetracálcico	9
PxIg	Pérdida por ignición	3.0
Na ₂ O (totales)	Álcalis totales	0.45

Los resultados de la caracterización química nos indican que el cemento cumple como Cemento Tipo II, debido al contenido de C₃A (Aluminato de Calcio) que es de 7% y la norma indica que máximo es 8%, y respecto a los álcalis se tiene una concentración de álcalis totales

de 0.54%, la norma indica un máximo de 0.60%, cabe mencionar que los álcalis totales se calculan equivalentes a sodio, y se aplica la siguiente fórmula:

$$\%Na \text{ equivalente} = 0.658 * \%K_2O + \% Na_2O \quad (4)$$

La caracterización mineralógica del cemento se realizó a la muestra original de cemento, al residuo de la extracción de las fases aluminosas y al residuo de la extracción de los silicatos, todos los análisis se realizaron en el equipo mostrado en la figura 4.

Las fases identificadas en el cemento son los silicatos tricálcico y dicálcico, el dialuminato y yeso principalmente, dichas fases se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Análisis mineralógico del cemento

Fases Identificadas Cemento	
Harttruita (Alita)	C_3S
Silicato Dicálcico	C_2S
Dialuminato	C_3A
Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Anhidrita	$CaSO_4$
Browmillerita	C_4AF
Cristobalita	SiO_2
Calcita	$CaCO_3$
Cal Libre	CaO Libre

En la figura 37 se muestra el patrón de difracción del cemento, se identificaron las reflexiones de los componentes principales que se indicaron en tabla 8.

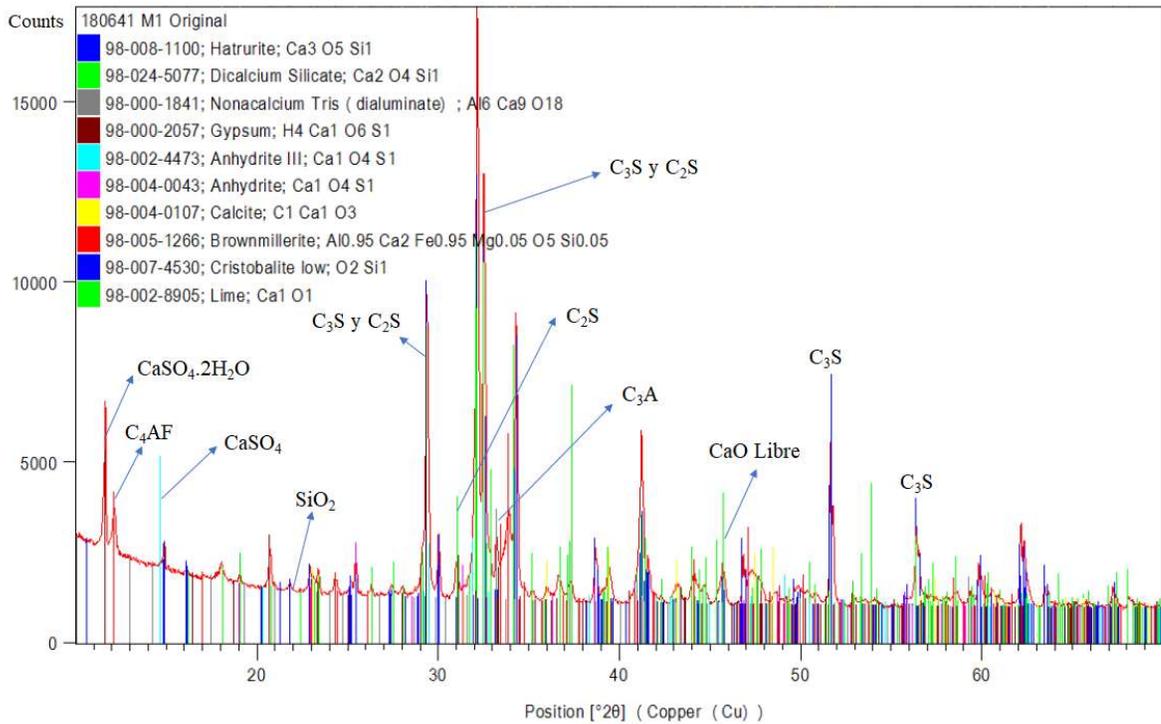


Figura 37. Análisis mineralógico del Cemento utilizado

Debido a las diversas fases que tiene el cemento y que algunas de ellas se encuentran en mayor concentración, es difícil identificar si efectivamente están presentes las fases incluidas en la tabla 8, para ello se realizó el análisis mineralógico separando las fases sólidas (fases silicosas) de la fase líquida (fases aluminosas), y así corroborar las fases presentes e identificar las que se encuentren en menor proporción.

La separación de fases se realizó mediante marchas específicas para la extracción de cada fase sólida y fase líquida, y al material resultante se le realizó el análisis mineralógico.

En la figura 38 se aprecian claramente las reflexiones correspondientes al C₃S Hartruita en azul y las reflexiones correspondientes al C₂S Silicato dicálcico en gris, además se puede observar en las líneas de color rojo y que se encuentra en menor proporción, la presencia de Calcita CaCO₃ y esta fase proviene de la adición de caliza al cemento durante su molienda.

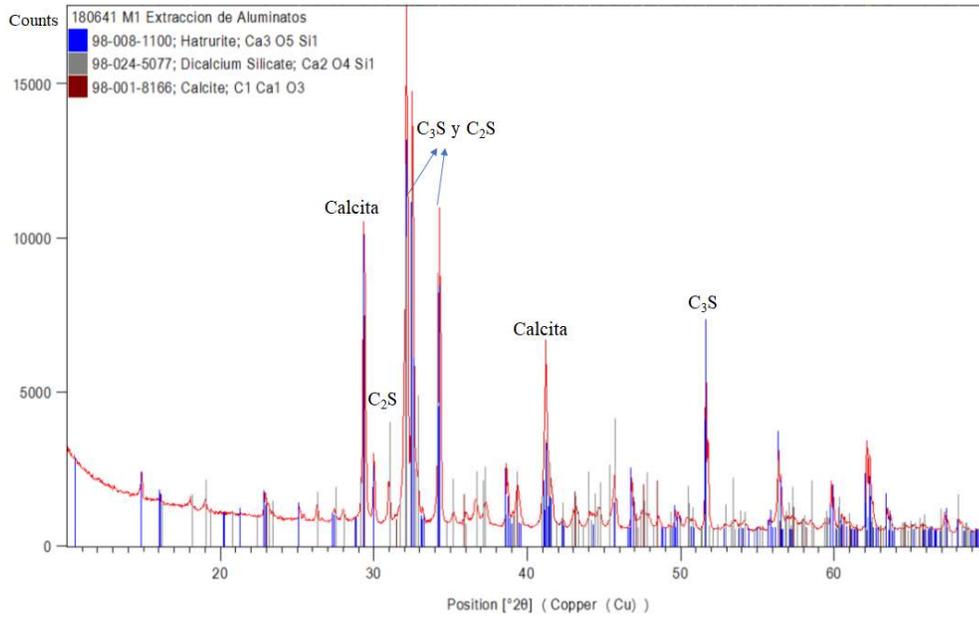


Figura 38. Análisis mineralógico por DRX de la fase sólida del cemento

En el análisis de la fase aluminosa que se presenta en la figura 39, además de confirmar las fases de brownmillerita (C_4AF), el yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), la anhidrita ($CaSO_4$), la cristobalita (SiO_2) y el aluminato tricálcico (C_3A), se identificó el sulfato de potasio (K_2SO_4) que, por estar presente en baja concentración, no se identificó en el análisis mineralógico realizado al cemento.

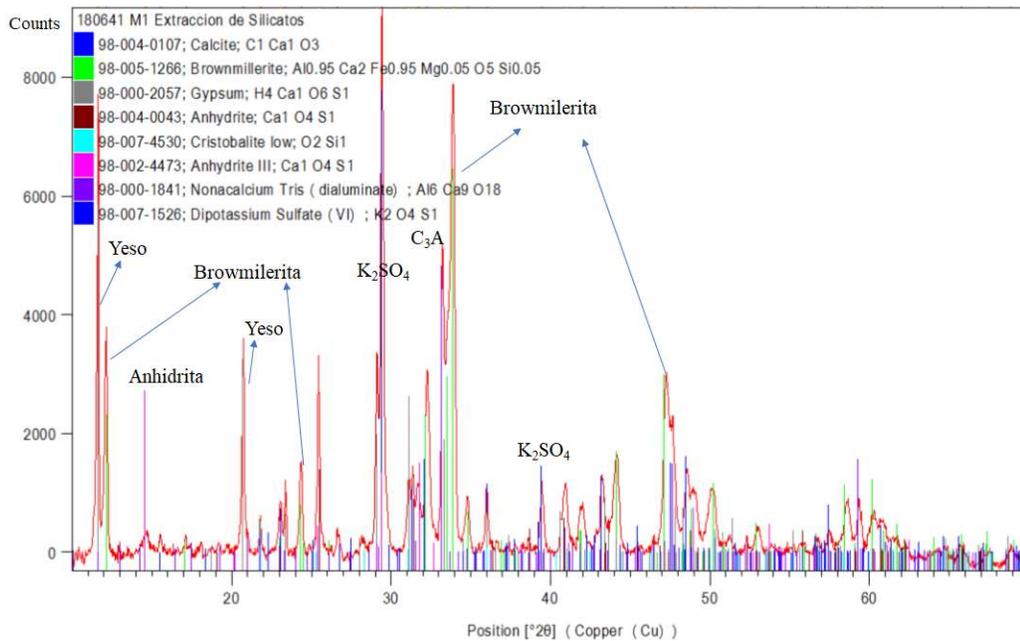


Figura 39. Análisis mineralógico por DRX para la fase líquida del cemento

La caracterización física realizada al cemento se presenta en la tabla 9, en ella se incluyeron los parámetros de finura, tiempos de fraguado, fraguado falso, expansión y resistencias a la compresión.

Tabla 9. Caracterización física del cemento

Parámetros	Unidades	Cemento
Finura m-325	%	94.8
Superficie Especifica	cm ² /g	3600
Densidad	g/cm ³	3.06
Fluidez	%	120
Relación a/c	---	0.485
Resistencias 24H	MPa	15.5
Resistencias 3D	MPa	26.4
Resistencias 7D	MPa	37.1
Resistencias 28D	MPa	42.3
Consistencia Normal	%	25.1
Tiempo de Fraguado Inicial	min	125
Tiempo de Fraguado Final	min	265
Fraguado Falso	%	63
Expansión	%	-0.006
Densidad	g/ml	3.11

En base a la caracterización física del cemento, se puede mencionar que el cemento utilizado para la presente investigación tiene una superficie específica menor a 4000 cm²/g, lo que indica que el área superficial que estará en contacto con el agua durante el proceso de hidratación es bajo y el desarrollo de las resistencias a la compresión será lento y corresponde con el bajo valor de C₃A, que genera poco calor de hidratación y como consecuencia bajas resistencias iniciales, sin embargo, a 28 días tiene resistencias por arriba de los 40 MPa. Otro punto relevante, es que el cemento no presenta fraguado falso y este resultado valida el análisis mineralógico que indica la presencia de yeso principalmente. En los que respecta a la expansión, se observa un resultado negativo que indica contracción y con esto validamos la baja concentración de cal libre (1.5%).

4.1.2 Caracterización de la arcilla vitrificada

La caracterización química de la arcilla vitrificada (en adelante AV), se muestra en la tabla 10, en ella se puede observar que este material está compuesto principalmente por dióxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de sodio (Na_2O) y óxido de potasio (K_2O).

Tabla 10. Análisis químico de la arcilla vitrificada

Compuestos		Arcilla Vitrificada (%)
SiO_2	Dióxido de silicio	68.9
Al_2O_3	Óxido de aluminio	22.3
Fe_2O_3	Óxido de hierro	1.1
CaO	Óxido de calcio	0.9
MgO	Óxido de magnesio	0.2
SO_3	Trióxido de Azufre	0.01
Na_2O	Óxido de Sodio	2.8
K_2O	Óxido de potasio	2.4
TiO_2	Óxido de titanio	0.89
P_2O_5	Pentóxido de fósforo	0.04
ZnO	Óxido de Zinc	0.03
ZrO_2	Óxido de Zirconio	0.32
Co_3O_4	Óxido de Cobalto	0.12
Cr_2O_3	Óxido de Cromo	0.04
V_2O_4	Óxido de Vanadio	0.02
Pxlg	Pérdida por Ignición	0.00

Los resultados sugieren que la arcilla vitrificada, está formada por compuestos silico-aluminosos y esto corresponde con los materiales que se utilizan para la preparación de materiales cerámicos, ya que básicamente utilizan caolines y feldspatos en las formulaciones de este tipo de materiales, los compuestos como Na_2O y K_2O conocidos como álcalis están por arriba del 2% y provienen principalmente de los feldspatos.

La caracterización mineralógica indica que las fases presentes en la arcilla vitrificada son compuestos que tiene el óxido de silicio incluido en su composición, en la tabla 11 se indican los compuestos de este material.

Tabla 11. Análisis mineralógico de la arcilla vitrificada

Fases Identificadas	
Cuarzo	SiO ₂
Mullita	Al _{4,68} Si _{1,31} O _{9,66}
Zircon	ZrSiO ₄
Cristobalita	SiO ₂

En la figura 40 se presenta el patrón de difracción y las reflexiones obtenidas para cada compuesto identificado en la matriz de la arcilla vitrificada.

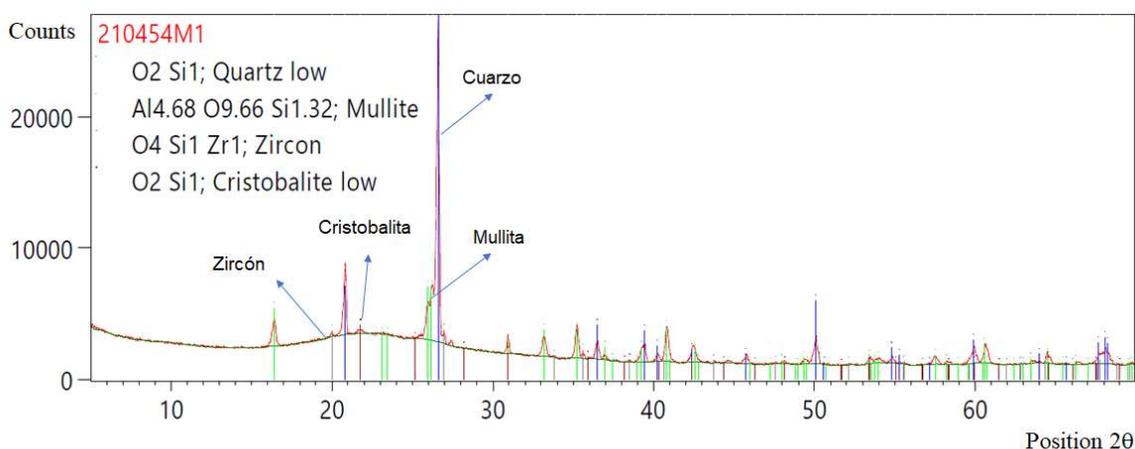


Figura 40. Análisis mineralógico por DRX de la arcilla vitrificada

El resultado del análisis mineralógico indica que la arcilla vitrificada contiene fases cristalinas y también contiene una fase amorfa, esta fase amorfa se identifica por la joroba que presentan el patrón de difracción entre los ángulos 15 y 30, este patrón nos sugiere que al tener fase amorfa el material tiene propiedades puzolánicas. Además de identificar las fases presentes, se determinó el porcentaje de cada una de las fases presentes incluida la fase amorfa. En la figura 41, se presenta el patrón de difracción y la cuantificación de fases presentes en la arcilla vitrificada por Rietveld, observando que el 53% de la muestra es fase amorfa, es decir, esta vitrificada y el resto del material lo conforman las fases cristalinas mostradas en la tabla 11.

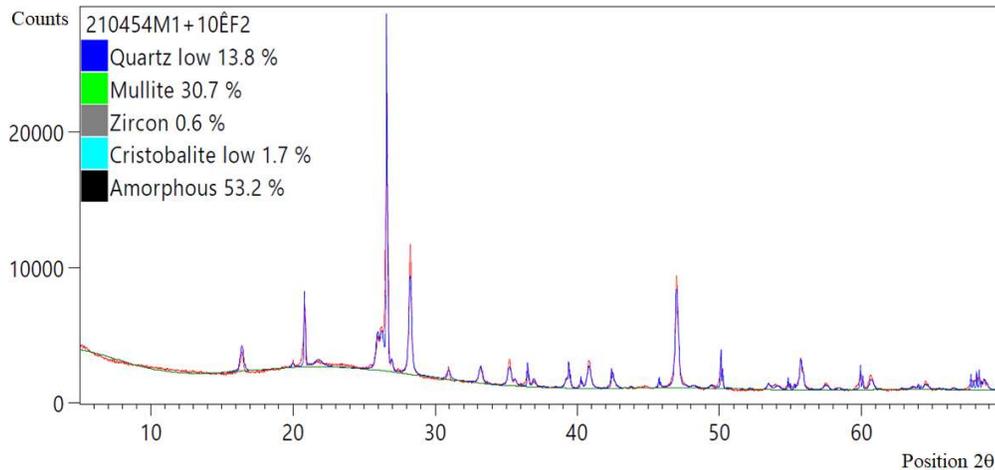


Figura 41. Análisis mineralógico de la arcilla vitrificada con cuantificación de fases

La determinación de la actividad puzolánica de la arcilla vitrificada se realizó tanto a la que sustituyó al cemento (AV 15.2 micras), como a la que sustituyó a la microsílíce (AV 8.4 micras).

En el caso del uso de la arcilla vitrificada que sustituyó al cemento, la determinación se realizó bajo la norma ASTM C311-24, en donde, se sustituyó el 20% del cemento y se determinaron las resistencias a la compresión, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 12 y se compararon con lo indicado en la norma ASTM C618-23 [81], la cual indica que el valor mínimo del índice de actividad puzolánica que debe tener un material para poder sustituir al cemento es de 75% y así considerarse con propiedades puzolánicas, en el caso de la AV 15.2micras el índice de actividad fue de 92%.

Tabla 12. Resultado de la actividad puzolánica de la arcilla vitrificada

Material	Índice de Actividad (%)
Arcilla Vitrificada 15.2 micras	92

Para la sustitución de la microsílíce por la arcilla vitrificada (AV 8.4 micras), se sometió a la determinación de la actividad puzolánica basada en la Norma ASTM C1240-20, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 13 e indican que la AV 8.4 micras, cumple como un material sustituto de la microsílíce, ya que, en base a la norma, tiene una actividad puzolánica de 105, valor indicado como mínimo para este tipo de materiales.

Tabla 13. Resultado de la actividad puzolánica de la arcilla vitrificada sustituto de microsílíce

Material	Índice de Actividad (%)
Arcilla Vitrificada 8.4 micras	105

Los resultados indican que la AV 8.4 micras tiene propiedades puzolánicas y con esta evaluación comprobamos que el porcentaje de fase amorfa identificada por DRX, desarrolla resistencias a la compresión y es factible utilizar este material como sustituto de materiales cementantes, cabe mencionar que la actividad puzolánica también está directamente relacionada con la finura, por lo tanto, si la AV tiene mayor finura, su actividad puzolánica es mayor.

4.1.3 Caracterización de la microsílíce.

La caracterización química de la microsílíce utilizada para la formulación del UHPC-C, se presenta en la tabla 14, y se puede observar que este compuesto principalmente por sílice (SiO_2), óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de potasio (K_2O) y óxido de magnesio (MgO), estos compuestos corresponden con lo esperado para un material procedente de la producción del silicio metálico en un horno de arco eléctrico.

Tabla 14. Análisis Químico de la microsílíce

Compuestos		Microsílíce (%)
SiO ₂	Dióxido de silicio	80.7
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio	0.7
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro	5.0
CaO	Óxido de calcio	0.7
MgO	Óxido de magnesio	2.0
SO ₃	Trióxido de Azufre	0.60
Na ₂ O	Óxido de Sodio	0.78
K ₂ O	Óxido de potasio	3.12
TiO ₂	Óxido de titanio	0.02
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo	0.13
Mn ₂ O ₃	Oxido de Manganeseo	0.24
ZnO	Óxido de Zinc	0.041
Cu ₂ O	Óxido de Cobre	0.029
As ₂ O ₃	Óxido de Arsénico	0.008
Rb ₂ O	Óxido de Rubidio	0.011
SnO ₂	Óxido de Estaño	0.023
SrO	Óxido de Estroncio	0.010
ZrO ₂	Óxido de Zirconio	0.005
Co ₃ O ₄	Óxido de Cobalto	0.022
PbO	Óxido de Plomo	0.008
Cr ₂ O ₃	Óxido de Cromo	0.017
MoO ₃	Óxido de Molibdeno	0.003
Cl	Cloro	0.282
Pxlg	Pérdida por Ignición	5.5

La caracterización mineralógica de la microsílíce indicó que está compuesta por cuarzo y oxido de hierro además de una gran cantidad de fase amorfa. Los compuestos identificados se presentan en la tabla 15.

Tabla 15. Fases mineralógicas de la microsílíce

Fases Identificadas	
Oxido de hierro (III)	Fe ₃ O ₄
Hematita	Fe ₂ O ₃
Cuarzo	SiO ₂
Cuarzo alfa	SiO ₂
Hidruro de Magnesio-Potasio	H ₃ K ₁ Mg ₁

En la figura 42, se muestran las reflexiones obtenidas para cada compuesto identificado en la microsílíce utilizada en la preparación del UHPC-C y SFR-UHPC-C.

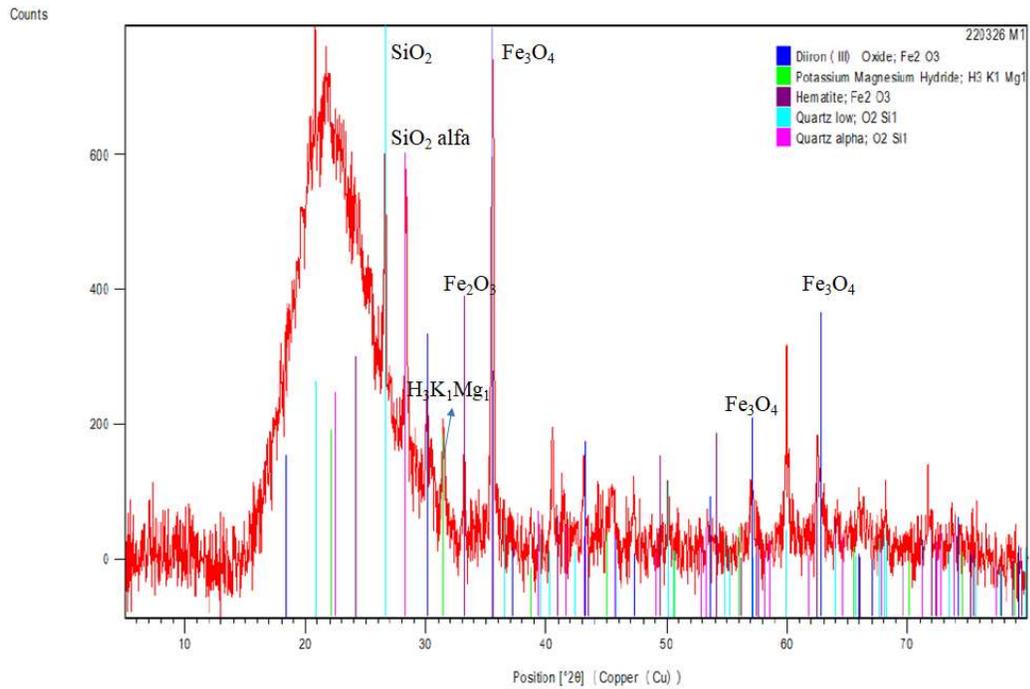


Figura 42. Análisis mineralógico por DRX de la microsilice

La caracterización de la actividad puzolánica para la microsilice se realizó en base a la Norma ASTM C1240-20, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 16 e indican que la microsilice utilizada en la presente investigación, está por debajo del 105 que marca norma, sin embargo, menciona la norma que el valor de 105 puede variar dependiendo del cemento utilizado y el origen de la microsilice.

Tabla 16. Resultado de la actividad puzolánica de la microsilice

Material	Índice de Actividad (%)
Microsilice	97

4.2 Fase 2. Caracterización de los agregados y cementantes preparados, aditivos y fibras

4.2.1 Caracterización física de los agregados y cementantes.

Los agregados utilizados para la formulación de los UHPC's son calizas (arena #4 y polvo de caliza) y la arcilla vitrificada preparada con granulometría similar a la arena #4 (AV 950 micras) y a una finura similar a los polvos de caliza utilizados como agregado fino (AV 40.7 micras). En la tabla 17 se muestran las propiedades físicas de los materiales que se utilizaron para el presente proyecto.

Además de los agregados, en la siguiente tabla se incluyeron las propiedades físicas de los cementantes como la microsílíce y la AV preparada para su uso en la sustitución del agregado grueso y fino, de cemento y de microsílíce. Los datos que se presentan en la tabla 17, son necesarios para los diseños de los concretos de ultra alto comportamiento.

Tabla 17. Propiedades de los agregados y cementantes

Propiedad	Unidades	Cemento	Microsilíce	Arena #4	Polvos Caliza	AV 8.4 micras	AV 15.2 micras	AV 40.7 micras	AV 950 micras
Humedad	%	---	---	0.92	---	---	---	---	0.00
Absorción	%	---	---	1.5	2.10	---	---	1.80	1.20
Densidad	g/cm ³	3.11	2.16	2.65	2.69	2.47	2.49	2.48	2.40
Finura D ₅₀	mm	14	11	950	46.3	8.4	15	41	950

4.2.2 Caracterización del aditivo seleccionado.

Todos los aditivos probados fueron base policarboxilato de diferentes marcas comerciales, una vez definido cuál de ellos se utilizaría, se realizó su caracterización obteniendo una densidad de 1.098 g/ml y el contenido de sólidos es del 50.12%.

4.2.3 Caracterización de las fibras de acero

Las fibras utilizadas para los concretos de ultra alto comportamiento referencia y verde óptimo, son marca Bakaert, fibras Dramix OL 13/0.20 de acero de alambre trefilado en frío de 13 mm de largo y 0.20 mm de grosor. Debido a que requeríamos la densidad de las fibras para su integración en la formulación de los SFR-UHPC, esta se determinó mediante la norma ASTM

C188-17. En la figura 43 se presenta la realización de la determinación de densidad y el resultado obtenido fue de 7.94 g/ml.



Figura 43. Determinación de densidad de las fibras de

4.3. Fase 3. Determinación de dosis óptima del aditivo

4.3.1 Determinación de la dosis óptima del aditivo en cemento

Se evaluaron 8 aditivos en diferentes dosificaciones con el cemento base para el UHPC, con el objetivo de determinar cuál de ellos producía una pasta fluida con una relación a/c de 0.25, así como la dosis de aditivo que requiere el cemento para lograr este efecto. Los resultados indicaron que, de los 8 aditivos probados, solo 3 de ellos lograron fluidificar el cemento con una relación agua/cemento de 0.25. En la figura 44 se presentan los comportamientos de los 3 diferentes aditivos a diferentes dosis, y en las curvas que forman la dosis de aditivo vs el tiempo de escurrimiento, permitiendo identificar las mejores compatibilidades del aditivo con el cemento.

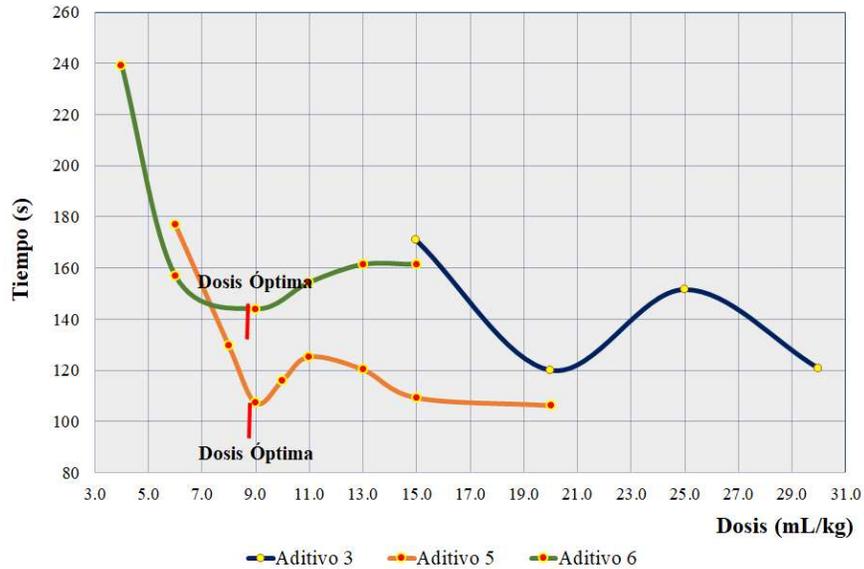


Figura 44. Curvas de la determinación de dosis óptima de aditivos en cemento.

Los resultados de dosis óptima indican que los aditivos 5 y 6 con dosis de 9 mL/kg producen los tiempos más bajos de escurrimiento, el aditivo 5 (110 segundos) y aditivo 6 (145 segundos) mientras que el aditivo 3 requiere altas dosis de aditivo para poder fluidificar el cemento.

Partiendo de la selección de aditivos que presentaron compatibilidad con el cemento, se evaluó la dosis óptima de aditivo utilizando ahora la mezcla de cemento con microsílíce.

4.3.2 Determinación de la dosis óptima del aditivo en los cementantes.

En esta fase se evaluó la dosis óptima de los aditivos seleccionados en el apartado anterior, es decir, los aditivos 5 y 6 con el cementante (cemento + microsílíce) que en todos los casos se evaluó una mezcla de 90% de cemento y 10% de microsílíce. Para esta evaluación, se contaba con 5 microsílíces, por lo que fue necesario evaluar la dosis óptima de los 2 aditivos con las diferentes mezclas de cemento/microsílíce.

En la gráfica que se presenta en la figura 45, se muestra el comportamiento de las mezclas cementantes con las diferentes dosis del aditivo 5 con las 5 diferentes microsíllices.

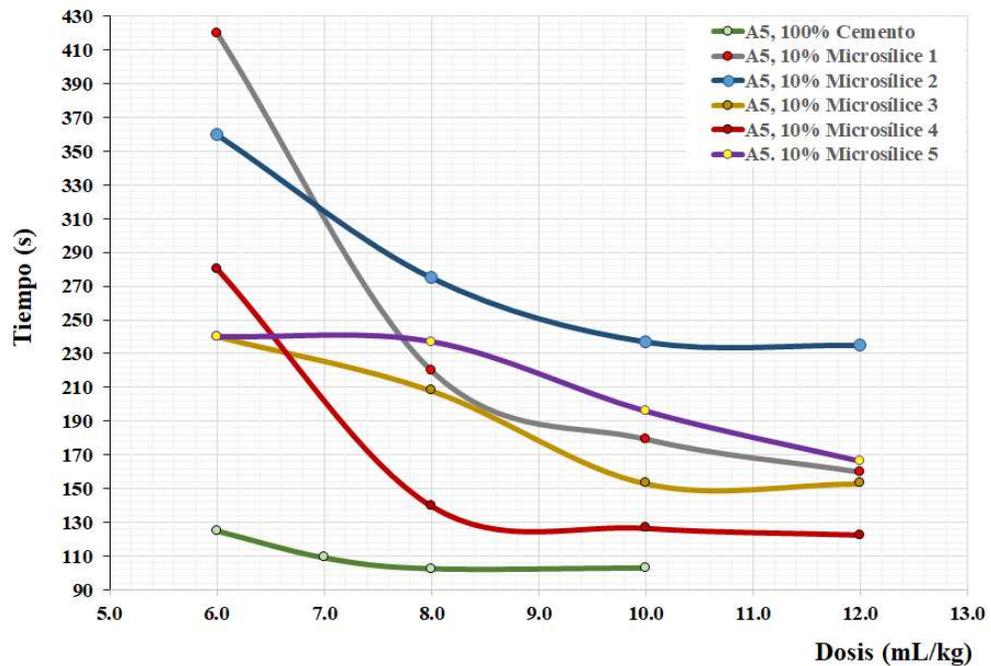


Figura 45. Curvas de determinación de dosis óptima del aditivo 5 con 5 microsíllices.

Los resultados mostrados en la figura 45, indican que este aditivo 5 es compatible con la microsíllice 4, teniendo un tiempo de escurrimiento del material en 128 segundos con una dosis de 9 mL/kg de cementante.

Para la evaluación del aditivo 6 con las mezclas del cemento con las diferentes microsíllices se obtuvieron los resultados que se presentan en la gráfica de la figura 46. En este caso, la mezcla de cementante con microsíllice 4 presenta los menores tiempos de escurrimiento, con un comportamiento típico del incremento en la dosificación de aditivo y una disminución del tiempo de escurrimiento, por otro lado, la mezcla cementante con la microsíllice 2, también presenta tiempos de escurrimiento bajos y con dosis de aditivo de 8 a 10 mL/kg y con el comportamiento típicos de determinación del punto de saturación óptimo del aditivo.

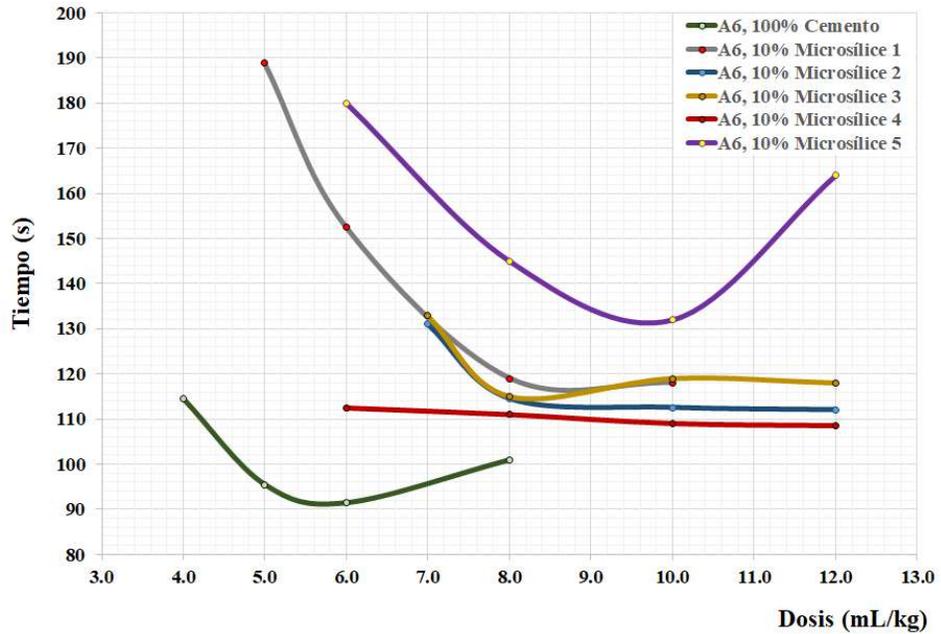


Figura 46. Curvas de la determinación de dosis óptima del aditivo 6 con 5 microsíllices.

Un punto importante aplicado para la definición de la microsíllice a utilizar en el proyecto fue la perfecta integración de la microsíllice y el cemento, ya que, en algunas de las mezclas, se observó que las microsíllices se segregaban, en la figura 47 se muestra una mezcla homogénea y en la figura 48 se muestra cuando se presenta segregación de la microsíllice.



Figura 47. Mezclado de cementantes con evidencia de homogeneidad



Figura 48. Mezclado de cementantes con evidencia de segregación

En base a este estudio, se seleccionó la microsíllice 2, el aditivo 6 y la dosis a utilizar de 9 mL/kg.

4.4. Fase 4. Diseño del empaquetamiento óptimo de los componentes particulados

El diseño del empaquetamiento se realizó aplicando la formula del modelo optimizado de Andreasen y Andersen, para ello fue necesario contar con las distribuciones de tamaño de partícula de los materiales a utilizar en los diseños de los UHPC's. En la figura 49, se presentan las distribuciones de tamaño de todos los materiales utilizados tanto para el UHPC-C como el UHPC-G.

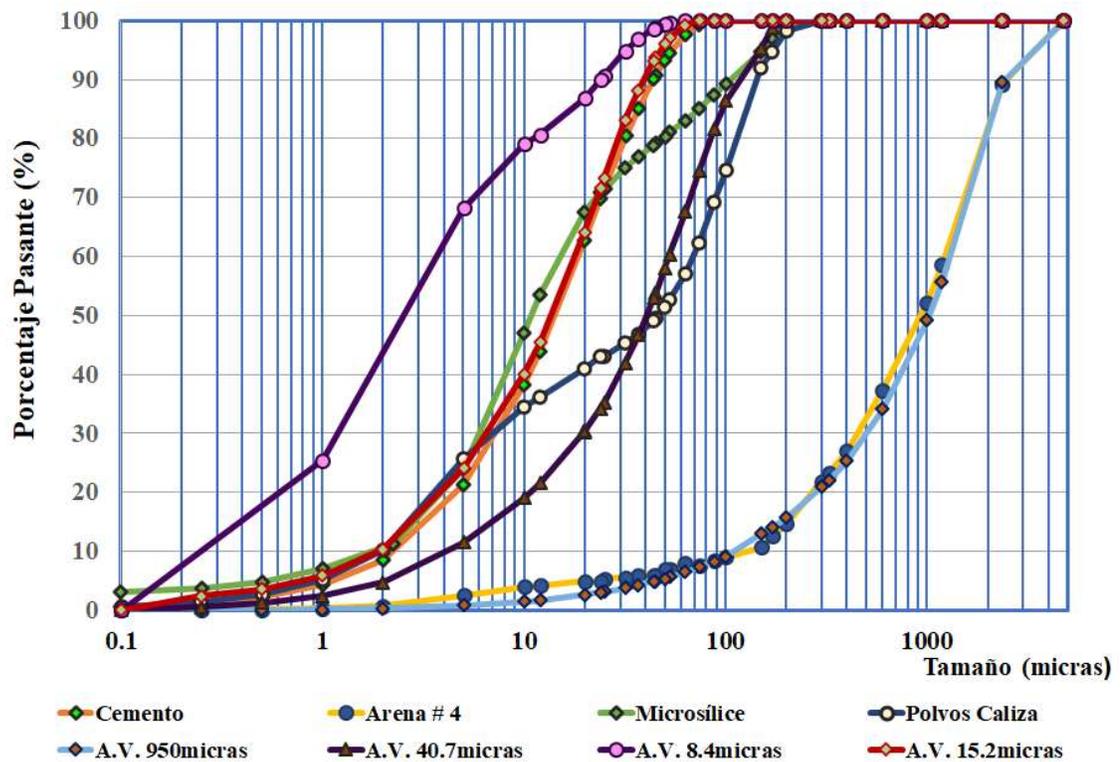


Figura 49. Distribución granulométrica de los materiales para producir los UHPC's

Partiendo de los datos de la distribución de tamaño de partícula de los materiales utilizados para el diseño del UHPC-C y los materiales usados para el UHPC-G, se aplicó la formula del modelo de Andreasen y Andersen (1) obteniéndose las gráficas mostradas en las figuras 50 y 51.

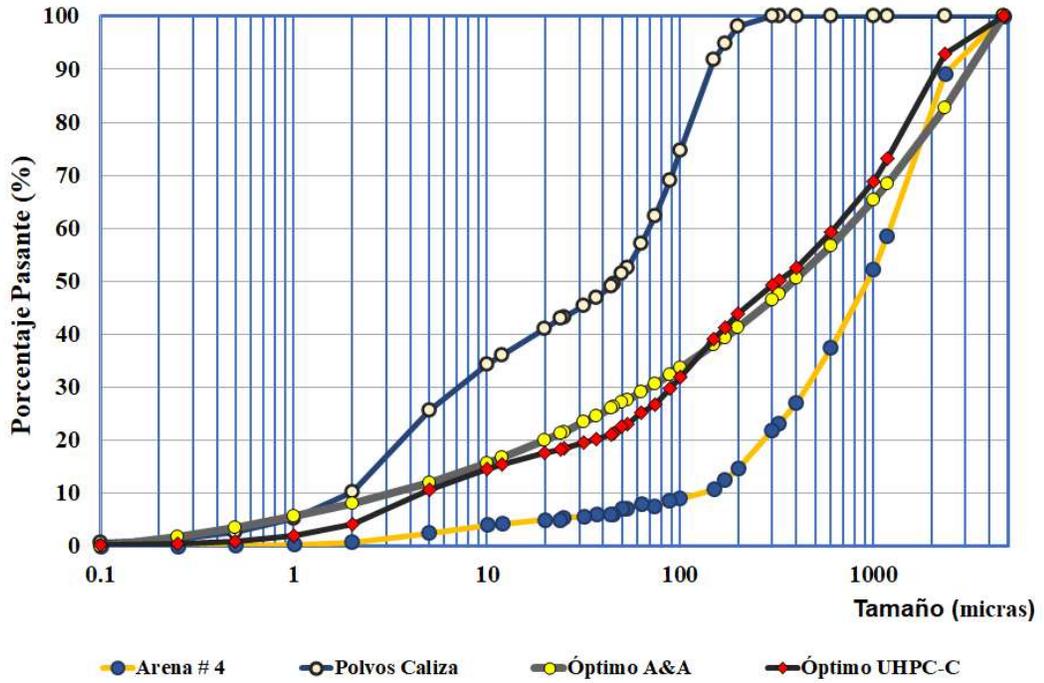


Figura 50. Distribución granulométrica del empaquetamiento óptimo para el UHPC-C

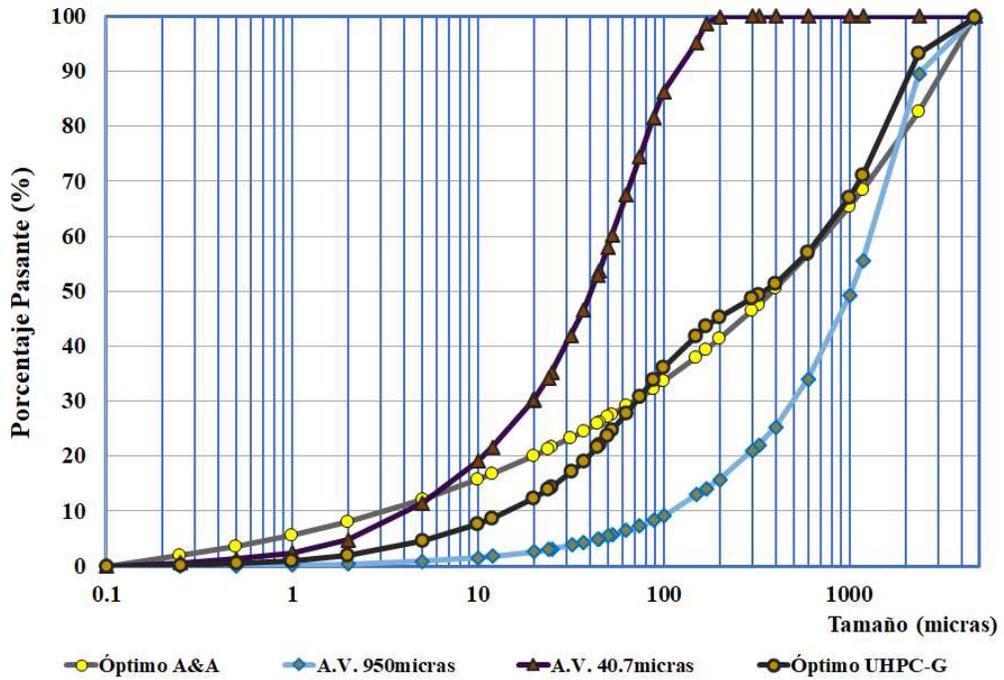


Figura 51. Distribución granulométrica del empaquetamiento óptimo del UHPC-G

Si bien los materiales particulados de caliza y de arcilla vitrificada se ajustaron para obtener distribuciones de tamaño similares, cuando se realizaron las determinaciones de mezclas de los materiales para el empaquetamiento óptimo, se determinó que, en ambos UHPC, las mezclas de los agregados mantenían la misma proporción de materiales gruesos y finos para el empaquetamiento óptimo.

4.4.1 Procedimiento de la preparación de los UHPC's.

Teniendo la mezcla adecuada de los materiales para obtener el mejor empaquetamiento, se definió el procedimiento para realizar las mezclas de todos los UHPC a preparar en la presente investigación.

Si bien el procedimiento de mezclado se describe en la metodología experimental, fue importante asegurar la correcta homogenización de los materiales en seco y una vez que se adicionó el agua y el aditivo, lograr que el aditivo y la baja cantidad de agua permitieran la fluidificación de los concretos de ultra alto comportamiento.

Una vez definido el procedimiento de mezclado, se iniciaron las etapas de optimización.

4.5. Fase 5. Determinación de sustitución óptima de microsílíce por arcilla vitrificada.

Durante la fase 5, el objetivo fue determinar la cantidad de microsílíce que podía ser sustituida por la AV 8.4 micras, para ello se prepararon los concretos de ultra alto comportamiento en los que se fue sustituyendo la microsílíce por la arcilla vitrificada AV 8.4 micras y se evaluó la extensibilidad, contenido de aire y las resistencias a la compresión de cada UHPC. Los resultados de esta fase se presentan en la figura 52, en donde, para lograr la optimización se sustituyó la microsílíce que era el 10% del cementante en el diseño de los UHPC y se sustituyó por diferentes porcentajes de AV 8.4 micras (25%, 50%, 75% y 100%).

Para determinar la factibilidad de sustitución de la microsílíce por AV 8.4 micras, se realizaron resistencias a la compresión de cada formulación de los UHPC a 4 edades (1, 3, 7 y 28 días).

Los resultados de las resistencias a la compresión presentaron valores superiores a los 120MPa en todas las mezclas. El UHPC-1 es el UHPC-C y el UHPC con el mejor resultado vs el UHPC-C es el UHPC-5, en este UHPC-5 se sustituyó el 100% de la microsilice y se obtuvieron resistencias de 131.6MPa. Con estos resultados se puede concluir que es viable la sustitución del 100% de la microsilice por la AV 8.4micras. Un punto relevante es que el UHPC-C tiene un contenido de aire de 4.4% y el UHPC-5 no incluyo aire la mezcla, siendo este de cero en el contenido de aire y la extensibilidad fue de 27 cm para el UHPC-C y la mayor extensión fue para el UHPC-5 con 35 cm.

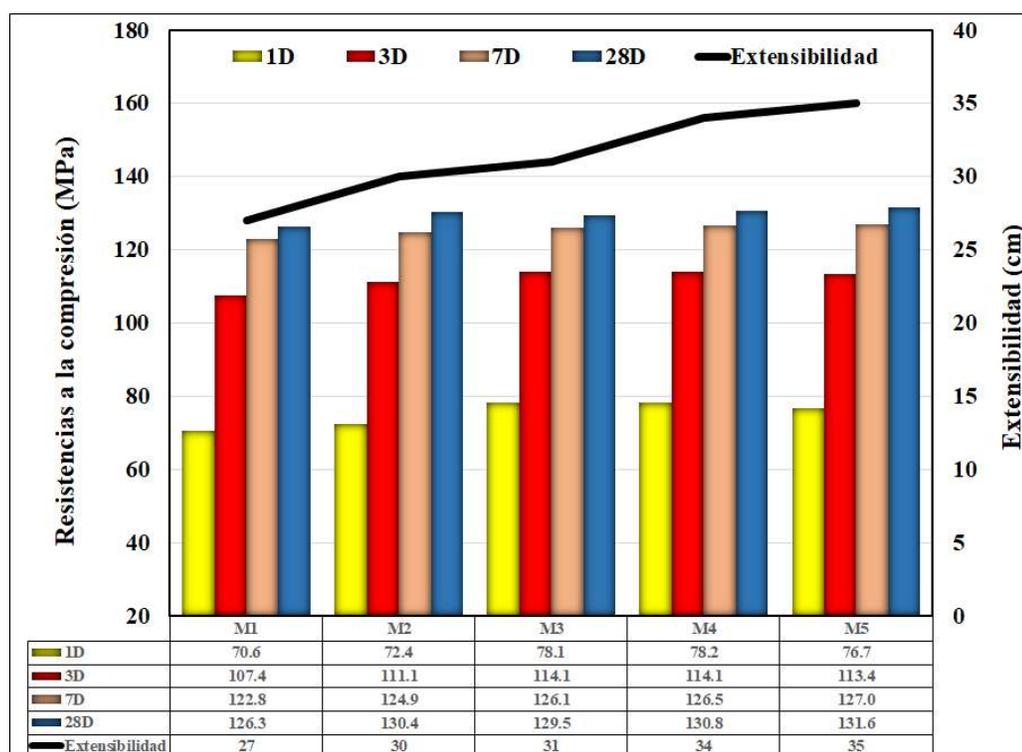


Figura 52. Desarrollo de resistencias y extensibilidad de los UHPC's de la Fase 5.

4.6. Fase 6. Determinación de sustitución óptima de cemento por arcilla vitrificada.

En base a los resultados de la fase 5, que indican que es posible sustituir el 100% de la microsilice, se inició la fase 6, en esta fase se sustituyó el cemento por la arcilla vitrificada AV15.2µm en diferentes porcentajes (10%, 20% 30% y 40%). Se midieron las resistencias a la compresión a 1, 3, 7 y 28 días, extensibilidad y contenido de aire. El UHPC de partida es el diseñado con la sustitución al 100% de la microsilice, en este caso es el UHPC-5. Inicialmente

se tenía considerado sustituir hasta un 50% de cemento, sin embargo, durante la preparación del UHPC-10 no fue posible, porque el UHPC no fluyó.

De esta fase 6, se determinó que el UHPC-8 presentó un contenido de aire de cero y la extensibilidad de 36 cm y una sustitución de cemento del 30%.

En la figura 53, se presentan los resultados de las resistencias y la extensibilidad, es importante mencionar que se lograron resistencias a 28 días de 127 MPa y ligeramente menores a las de UHPC-5 que fueron de 131.6 MPa.

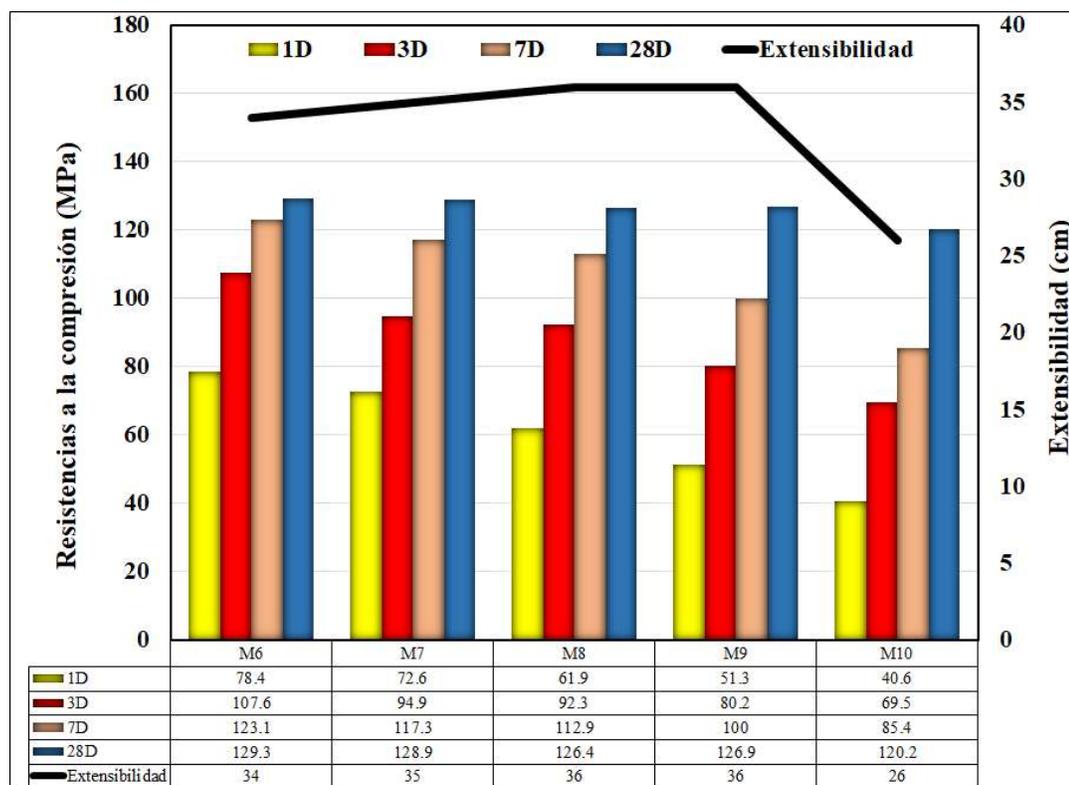


Figura 53. Desarrollo de resistencias y extensibilidad de los UHPC's de la Fase 6.

4.7. Fase 7. Determinación de sustitución óptima de agregado calizo por agregado de arcilla vitrificada.

En esta fase 7, el objetivo fue lograr sustituir la mezcla de agregados calizos por la mezcla de los agregados de la arcilla vitrificada (AV 950 micras y AV 40.7 micras), ambos con el empaquetamiento óptimo. Es importante indicar, que en esta etapa partimos del UHPC óptimo

obtenido en la fase 6 y que fue el UHPC-8 y para la fase 7 se sustituyeron diferentes porcentajes de agregado calizo y polvos de caliza, por el agregado de AV (AV 950 micras y AV 40.7 micras) en un 20%, 30% y 40%.

Durante el desarrollo de la fase 7, se logró sustituir como óptimo el 30% de agregados calizos por los agregados de la arcilla vitrificada (UHPC-12), manteniendo la extensibilidad del UHPC preparado y la resistencia a la compresión, cabe mencionar que al realizar el UHPC preparado con una sustitución del 40% de agregados calizos si bien se logró mezclar, se tornó muy plástica la mezcla y de difícil manejo, por lo tanto, no se pudo considerar adecuada para el UHPC. Los resultados de resistencias indican que es posible sustituir entre un 20 y 40% del agregado calizo por agregado de arcilla vitrificada, mejorando las resistencias con agregado de arcilla vitrificada con respecto al UHPC-8 que fue el UHPC óptimo de la fase 6.

El contenido de aire en todas las muestras fue cero, la extensibilidad se mantuvo en 37 en los UHPC y las resistencias a la compresión de 126 MPa con la sustitución del 30% de agregado, los resultados de esta fase se muestran en la figura 54.

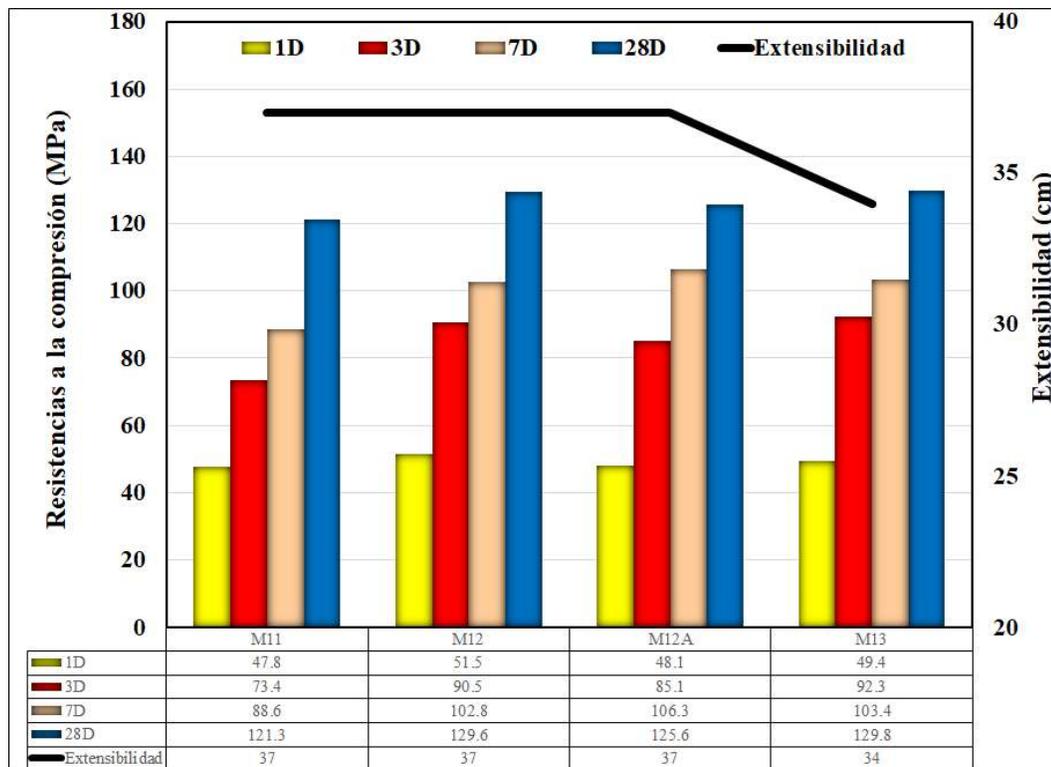


Figura 54. Desarrollo de resistencias y extensibilidad de los UHPC's de la Fase 7.

Los resultados de la fase 7 indica que es factible sustituir el 30% de los agregados calizos por agregado de arcilla vitrificada manteniendo la extensibilidad o trabajabilidad del concreto de ultra alto comportamiento y resistencias a 28 días del orden de 126 MPa, cabe mencionar que el concreto de ultra alto comportamiento verde óptimo (UHPC-G) tiene un comportamiento de alta cohesión entre sus partículas.

Al finalizar la fase 7, se lograron definir los diseños de los UHPC-C y el UHPC-G, es decir, el UHPC-1 (UHPC-C) y el UHPC-12 (UHPC-G), se inició la evaluación completa en estado fresco y endurecido de los UHPC, y para esta evaluación se realizó la inclusión de fibras de acero, definiendo los concretos con fibras como SFR-UHPC-C y SFR-UHPC-G.

En la tabla 18, se presentan las composiciones en porcentaje masico de cada uno de los concretos de ultra alto comportamiento diseñados en este proyecto y que son evaluados en las fases 8 y 9 de la presente investigación.

Tabla 18. Composición en masa de los UHPC diseñados

Componentes	Unidad	UHPC-C	SFR-UHPC-C	UHPC-G	SFR-UHPC-G
Cemento	%	29.2	27.4	21.1	19.8
Microsílice	%	3.3	3.1	0.0	0.0
Agua	%	9.4	8.8	9.5	8.9
Arena # 4	%	37.6	35.3	25.8	24.2
Polvos de Caliza	%	20.2	19.0	13.9	13.0
AV 8.4 micras	%	0.0	0.0	3.4	3.1
AV 15.2 micras	%	0.0	0.0	9.0	8.5
AV 40.7 micras	%	0.0	0.0	5.9	5.6
AV 950 micras	%	0.0	0.0	11.0	10.4
Aditivo 1	%	0.3	0.3	0.3	0.3
Aditivo 2	%	0.05	0.04	0.05	0.05
Fibras	%	0.0	6.1	0.0	6.2
Total	%	100.0	100.0	100.0	100.0

4.8. Fase 8. Caracterización de las propiedades en estado fresco de los UHPC's.

4.8.1 Determinación de la extensibilidad y la pérdida de permanencia.

Una de las propiedades que debe cumplir un concreto de ultra alto comportamiento, es que mantenga su consistencia, de manera que permita ser colocado, y que no se fragüe durante el bombeo de este a la zona de colocación. La fluidez es una característica de gran importancia, ya que refleja la estabilidad de la mezcla para asegurar la ausencia de segregaciones, permitiéndonos garantizar una correcta colocación, un fraguado adecuado y el mejor acabado posible, aspecto muy valorado en aplicaciones arquitectónicas. Para tener una referencia del tiempo que pueden estos concretos de ultra alto comportamiento ser trabajados, se determinó su extensibilidad inicial y el tiempo que se llevó en tener aproximadamente la mitad de la extensibilidad inicial. Los resultados se muestran en la tabla 19.

Tabla 19. Extensibilidad y pérdida de consistencia de los UHPC's diseñados

Concretos	Extensibilidad Inicial (mm)	Extensibilidad Final (mm)	Tiempo (min)
UHPC-C	320	170	140
SFR-UHPC-C	290	160	60
UHPC-G	350	300	90
SFR-UHPC-G	320	290	40

Para alcanzar la fluidez objetivo de 325 ± 25 mm, la dosificación del aditivo superplastificante dio como resultado una fluidez de 320 mm para la mezcla de referencia (UHPC-C) y de 350 mm para el concreto verde (UHPC-G). La dosificación de las fibras dio como resultado una reducción en la fluidez en ambos concretos. Esta reducción se atribuye a la alta concentración de fibras (2% en volumen) y a la alta superficie específica de los filamentos que componen la fibra, ya que son muy finos en comparación con la geometría de las fibras convencionales. En la figura 55, se muestra la pérdida de consistencia (extensibilidad) de los cuatro concretos evaluados en este trabajo con el tiempo y donde vemos que el UHPC-C presenta una pérdida de consistencia más pronunciada que el UHPC-G, así como el hecho de que este UHPC-C permitió la medición de la consistencia incluso hasta 2h:10min después del mezclado, y el UHPC-G solo hasta 1h:35min después del mezclado, lo que se atribuye a dos

factores: la mayor reactividad de los compuestos cementantes (cemento Portland y microsílíce), la alta finura y alta reactividad de la microsílíce. En el caso de los concreto con fibras, se observó que la pérdida de consistencia fue más pronunciada en ambos concretos, y que la medición de esta propiedad fue posible para el SFR-UHPC-C hasta 50 min después del mezclado, y para el SFR-UHPC-G hasta 30 min después del mezclado.

Los resultados mostrados en la figura 55 representan la permanencia de la consistencia para los cuatro concretos, e indican claramente los tiempos después de los cuales ya no fue posible medir la consistencia; en este sentido, los concretos referencia permitieron medir la consistencia hasta una extensibilidad promedio de 160 mm y en el caso de los concretos verdes hasta una extensibilidad promedio de 315 mm. La mayor cohesión exhibida por los resultados de los concretos verdes en la figura 55 se atribuye a que, muy probablemente, todas las fracciones de arcilla vitrificada que se incorporaron en la sustitución de polvo de caliza, arena de caliza, cemento y microsílíce están compuestas por partículas más angulosas, que al mismo tiempo tienen una superficie más rugosa.

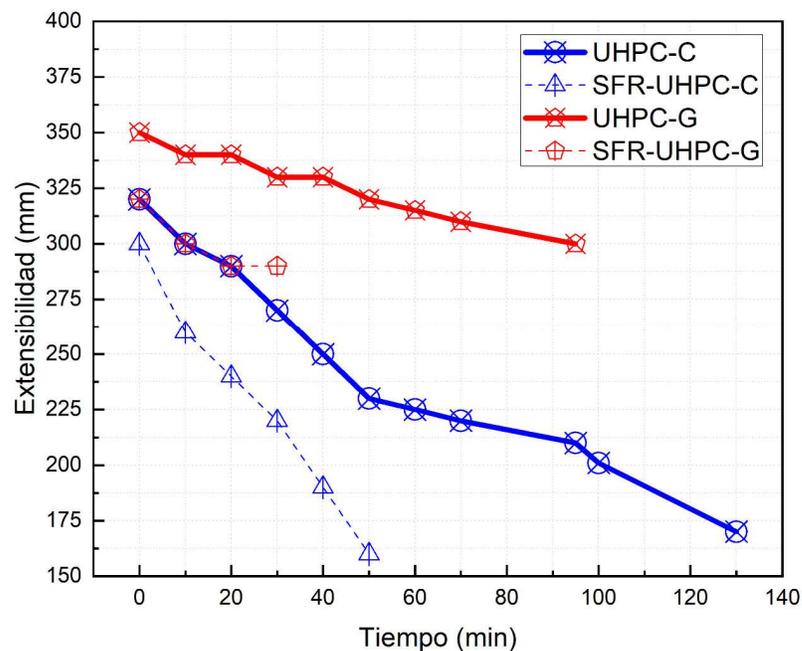


Figura 55. Pérdida de extensibilidad con el tiempo.

4.8.2 Determinación del peso volumétrico y el contenido de aire.

Desde el punto de vista del estado fresco del concreto, los pesos volumétricos de los concretos convencionales (UHPC-C y SFR-UHPC-C), presentan valores en promedio de 2,500 kg/m³, por otro lado, los concretos verdes (UHPC-G y SFR-UHPC-G), tienen en promedio 2,400 kg/m³. La diferencia de 100kg/cm³ se debe a la menor densidad de las distintas fracciones de la arcilla vitrificada en relación con los ingredientes sustituidos en el proceso de optimización del concreto verde (arena caliza, polvo de caliza, cemento y microsíllice). Los contenidos de aire sugieren una mejora en la densificación del concreto verde debido al empaquetamiento proporcionado por las distribuciones de tamaño de partícula de las diferentes fracciones de arcilla vitrificada utilizadas en la optimización del UHPC-G, ya que para los concretos convencionales (UHPC-C y SFR-UHPC-C) los contenidos de aire estuvieron entre 3.24 y 3.22%, y para los concretos verdes (UHPC-G y SFR-UHPC-G) los contenidos de aire fueron de 2.29 y 1.50%, respectivamente. En términos de densificación, la presencia de fibras no tuvo efecto sobre el concreto convencional, pero sí sobre el concreto verde, ya que resultó en una disminución del contenido de aire en un 0.79%, lo que se atribuye a una mayor viscosidad/cohesión percibida a simple vista para el concreto verde en comparación con el concreto convencional, lo que aparentemente resultó en una menor cantidad de vacíos en la interfase matriz de fibrocemento y, en consecuencia, una menor cantidad de aire atrapado. Los resultados obtenidos del peso volumétrico y contenido de aire se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Resultados del peso volumétrico y contenido de aire

Concretos	Peso Volumetrico (kg/m³)	Contenido de Aire (%)
UHPC-C	2458	3.2
SFR-UHPC-C	2565	3.2
UHPC-G	2377	2.3
SFR-UHPC-G	2465	1.5

4.8.3 Determinación de los tiempos de fraguado por resistencia a la penetración

Para aplicaciones prácticas, es deseable que los UHPC mantengan su alta fluidez durante el tiempo de colocación y acomodo del concreto dentro del encofrado, y que los tiempos de fraguado permitan realizar estas operaciones de la mejor forma posible sin afectar al desarrollo de las propiedades mecánicas, microestructurales y arquitectónicas. En este sentido, los tiempos de fraguado de los concretos diseñados, no fueron muy diferentes a los obtenidos para un concreto convencional, con tiempos de fraguado inicial de 3 h:52 min para el concreto convencional (UHPC-C) y 3 h:17 min para el concreto verde (UHPC-G), así como tiempos de fraguado final de 5 h:02 min y 5 h:08 min, respectivamente, lo que indica que se dispone de tres horas para su colocación y fraguado. Sin embargo, esto no es así ya que, como podemos observar en la figura 52, debido a la velocidad de pérdida de consistencia, las mezclas de referencia solo proporcionarían un periodo de unos 20 min para realizar estas actividades adecuadamente, y en el caso de los concretos verdes, este periodo podría extenderse hasta 40 min, tiempos razonables para la industria de los prefabricados.

En la tabla 21 se presentan los resultados de tiempos de fraguado de los concretos de ultra alto comportamiento diseñados y evaluados.

Tabla 21. Tiempos de fraguado por penetración de los UHPC-C y UHPC-G

Concretos	Inicial (hh:mm)	Final (hh:mm)
UHPC-C	03:52	05:02
UHPC-G	03:17	05:08

4.9. Fase 9. Determinación de las propiedades en estado endurecido de los UHPC's.

4.9.1 Resistencias a la compresión

De acuerdo con la norma estándar para colar y probar especímenes de UHPC, que se detalla en ASTM C1856 [82], para que el concreto sea clasificado como UHPC, debe tener una resistencia a la compresión mínima de 120 MPa a 28 días [4, 13]. El desarrollo de la resistencia a la compresión para los cuatro concretos evaluados en este trabajo, para edades que varían de 1 a 91 días, se muestra en la tabla 22 y la figura 56 (a). Las pendientes que aparecen en la tabla 22 para cuatro ventanas de tiempo diferentes, son indicativas de qué tan activa es la reacción de hidratación del cemento a edades tempranas y qué tan significativa es la reacción puzolánica de la arcilla vitrificada a edades posteriores. Los cuatro concretos de ultra alto comportamiento superan los 120 MPa con respecto a las resistencias obtenidas a la edad de 28 días en curado estándar, y las resistencias de los concretos convencional aumentaron en un 11% (UHPC-C) y un 6.6% (SFR-UHPC-C) a la edad de 91 días. Para los concretos de ultra alto comportamiento verde, estos incrementos fueron significativamente mayores, con valores del 27% (UHPC-G) y 33% (SFR-UHPC-G), lo que se puede atribuir a la reacción puzolánica de la arcilla vitrificada, aspecto que también se ilustra claramente con el aumento promedio de resistencia de los concretos de ultra alto comportamiento verde (UHPC-G y SFR-UHPC-G) entre las edades de 7 y 28 días, con incrementos de resistencias de 1.4 y 1.2 MPa/día, respectivamente, cabe mencionar que los cuatro UHPC mostraron ganancias de resistencia similares entre 1 y 7 días (8.8 a 10.0 MPa/día). Para los UHPC-G, el aumento significativo de resistencia debido a la actividad puzolánica de la arcilla vitrificada es claramente evidente para los siguientes tres períodos de tiempo: entre 1 y 7 días, entre 7 y 91 días, y entre 28 y 91 días, cuando el desarrollo de resistencia de los UHPC-G fue de 20 a 55%, de un 85 a un 212% y de un 225 a un 438% superior, respectivamente, al de los concretos convencionales.

Aunque no existe un punto preciso de separación entre el concreto de alta resistencia y el concreto de resistencia normal, el American Concrete Institute define el concreto de alta resistencia como aquel que posee una resistencia a la compresión superior a 41.4 MPa a los 28 días, resistencia que los cuatro concretos de alto comportamiento evaluados en este trabajo presentan este valor antes de 1 día. Este aspecto es de gran importancia para la industria de los

prefabricados, ya que el ciclo de reutilización de los moldes sería muy corto, característica que resulta muy atractiva para este sector de la industria.

Tabla 22. Resistencias a la compresión de los UHPC's sin y con fibras

Concretos	Resistencias a la compresión (MPa) [Desviación Estándar]						Pendiente (m, en MPa/día)			
	1 d	3 d	7 d	28 d	56 d	91 d	1-7 d	7-28 d	7-91 d	28-91 d
UHPC-C	59 [0.6]	93 [1.1]	119 [0.7]	138 [8.0]	150 [5.9]	153 [1.4]	10.00	0.90	0.41	0.24
SFR-UHPC-C	75 [6.6]	104 [1.3]	130 [0.6]	151 [0.1]	165 [2.3]	161 [2.1]	9.20	1.00	0.37	0.16
UHPC-G	45 [0.6]	78 [2.5]	98 [4.5]	128 [4.9]	153 [4.7]	162 [4.2]	8.80	1.40	0.76	0.54
SFR-UHPC-G	55 [0.1]	86 [2.5]	108 [1.3]	134 [4.2]	161 [1.3]	178 [1.1]	8.80	1.20	0.83	0.70

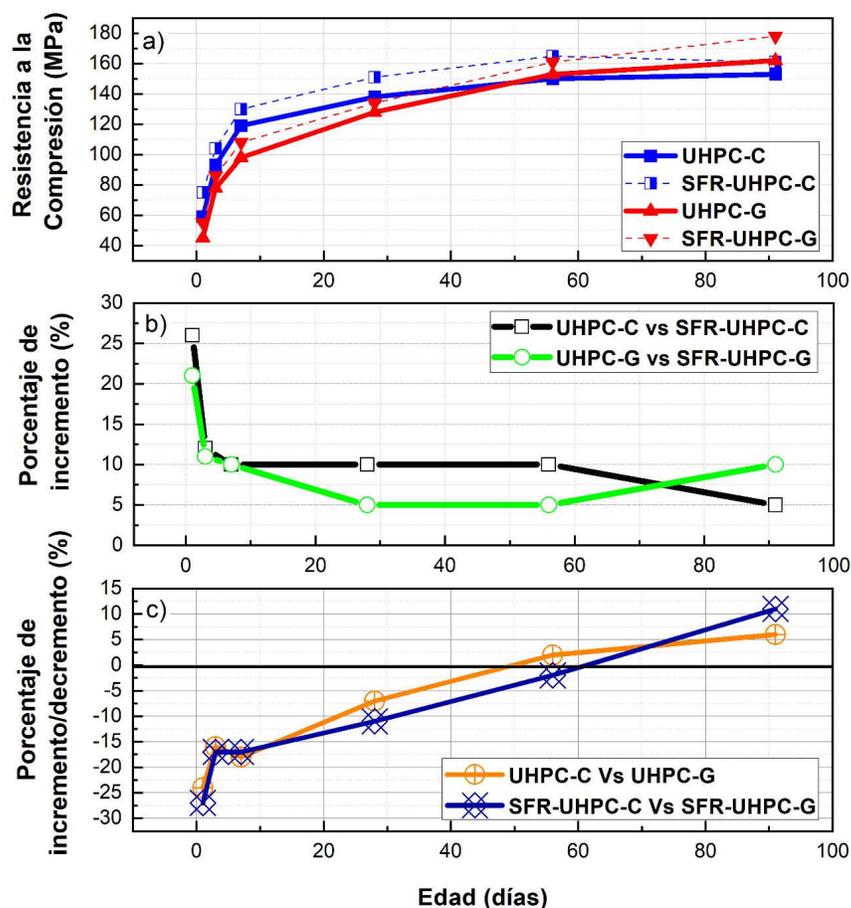


Figura 56. (a) Desarrollo de la resistencia a compresión para mezclas de UHPC-C, SFR-UHPC-C, UHPC-G y SFR-UHPC-G; (b) aumento de la resistencia a la compresión atribuido a la presencia de microfibras de acero; y (c) aumento/disminución de la resistencia a la compresión resultante de las sustituciones de arcilla vitrificada por cemento, microsíllice, polvo de caliza y agregado.

Para las diferentes edades en las que se determinó experimentalmente la resistencia a la compresión, los valores utilizados para construir las dos gráficas que aparecen en la figura 56(b), se obtuvieron calculando el porcentaje de incremento/reducción atribuible exclusivamente a la presencia de las fibras, que se obtuvieron mediante las siguientes ecuaciones: $[(UHPC-C) - (SFR-UHPC-C/UHPC-C)] \times 100$, cuyos resultados se representan mediante la curva negra, y $[(UHPC-G) - (SFR-UHPC-G/UHPC-G)] \times 100$, cuyos resultados se representan mediante la curva verde. De igual forma, en la figura 56(c) se muestra el porcentaje de incremento/reducción atribuible exclusivamente a la influencia en las reacciones de hidratación y/o puzolánicas de la arcilla vitrificada, que se obtuvieron con las siguientes ecuaciones: $[(UHPC-C) - (UHPC-G/UHPC-C)] \times 100$, cuyos resultados están representados por la curva naranja, y $[(SFR-UHPC-C) - (SFR-UHPC-G/SFR-UHPC-C)] \times 100$, cuyos resultados están representados por la curva azul.

Como se puede observar en la figura 56(b), para los concretos convencional y verde, a la edad de 1 día, la incorporación de fibras de acero originó ganancias significativas en términos de resistencia a la compresión, con incrementos del 27% (SFR-UHPC-C vs. UHPC-C) y del 22% (SFR-UHPC-G vs. UHPC-G), ganancia que al cabo de 7 días se mantuvo entre el 5 y el 10% (SFR-UHPC-G vs. UHPC-G).

La figura 56(c) ilustra el efecto de la arcilla vitrificada como reemplazo de arena caliza, polvo de caliza, cemento y microsílíce, en los porcentajes resultantes del proceso de optimización. En esta figura, se aprecia claramente que hubo una ganancia de resistencia a la edad de 1 día (24–27%) y que, para el intervalo de tiempo entre 3 y 58 días, la ganancia de resistencia para los concretos verdes fue más agresiva con relación a los concretos convencionales, superando a partir de los 50–58 días la resistencia de los concretos convencionales, para concluir con incrementos de 6% (UHPC-G) y 11% (SFR-UHPC-G) a la edad de 91 días. En comparación con los concretos convencionales, la tendencia ascendente en la resistencia a la compresión de los concretos verdes se atribuye a la reactividad puzolánica y a la alta dureza de la arcilla vitrificada [15, 83].

4.9.2 Módulo de elasticidad estático a la edad de 91 días

Los módulos estáticos de elasticidad para los concretos convencionales sin y con fibras (UHPC-C y SFR-UHPC-C) fueron 34.7 y 33.5 GPa, y para los concretos verde sin y con fibras fueron 39.7 y 35.2 GPa, respectivamente. Comparando estos resultados, se observó que los concretos verdes sin fibra y con fibra mostraron resultados superiores a los concretos convencionales en 15.0 y 5.0%, respectivamente, lo que podría atribuirse al mejor empaquetamiento granular sugerido por el menor contenido de aire, a un mejor enlace debido a la morfología angular de las partículas de arcilla vitrificada, y a la actividad puzolánica de este material. Los resultados también muestran que para el concreto convencional, la presencia de fibras origina una reducción de 3.4% en el módulo de elasticidad y de 11.3% para el concreto verde, lo cual se atribuye a que la capacidad de adhesión de la matriz cementante que se debilita en la interfase entre la matriz y la superficie de las fibras, ya que la superficie de los filamentos es lisa. En el caso del concreto verde, la reducción es más significativa, ya que, en el concreto verde, la matriz cementante tiene un potencial cementante más débil en comparación con la matriz cementante del concreto convencional, debido al mayor potencial cementante del cemento y la microsílíce en comparación con las fracciones de arcilla vitrificada con las que se reemplazaron estos materiales en el concreto verde. Los resultados obtenidos son consistentes con los resultados reportados previamente para el módulo de elasticidad estático para concretos de ultra alto comportamiento, entre 30.0 y 45.9 GPa [9, 83, 84].

En la tabla 23 se presentan los resultados obtenidos de los cuatro concretos de ultra alto comportamiento diseñados.

Tabla 23. Módulo estático de elasticidad de los UHPC's diseñados

UHPC-C (GPa)	SFR-UHPC-C (GPa)	UHPC-G (GPa)	SFR-UHPC-G (GPa)
34.7	33.5	39.7	35.2

4.9.3 Determinación del desempeño a la flexión de vigas de concreto

Módulo de ruptura, resistencias residuales post-fisuración e índices de tenacidad.

Para los concretos sin fibras, el módulo de rotura medio para el concreto convencional (UHPC-C) fue de 5.2 MPa y de 5.1 MPa para el concreto verde (UHPC-G). Estos resultados son la media de tres probetas que, tras ser desmoldadas 24 horas después de su fabricación, se mantuvieron en condiciones estándar de curado hasta su edad de ensayo a los 28 días. Como parámetro de la incertidumbre en las medidas, los coeficientes de variación resultaron en valores de 21% y 18%, respectivamente.

Las resistencias residuales post-fisuración se determinaron mediante ensayos de flexión de las vigas fibro-reforzadas, que en su preparación fueron ranuradas con sierra de diamante en el centro de la viga, según el procedimiento descrito en la UNE-EN 14651-2007 [85], para la cual se midieron los valores de carga y los correspondientes desplazamientos progresivos de apertura de grieta (CMODs), con lo que posteriormente se calcularon los correspondientes desplazamientos/deflexiones mediante la ecuación $\delta = 0,85\text{CMOD} + 0,04$, prevista en dicha norma, donde δ = desplazamientos/deflexiones en milímetros.

A) Comportamiento post – agrietamiento.

En la industria de la construcción, el concreto hidráulico es un material que actualmente puede diseñarse para resistencias a la compresión de entre 20 y 200 MPa, o superiores. Esta propiedad particular es una de las fortalezas del material para las múltiples aplicaciones en las que se utiliza; sin embargo, una de sus mayores debilidades es su resistencia a la tracción, que muchas veces se contrarresta utilizando barras de acero, barras de FRP y fibras metálicas o sintéticas. Debido a la alta resistencia del UHPC, su matriz cementante ofrece una adherencia mucho mejor con todos estos refuerzos, por lo que se optimiza el desempeño del refuerzo, como es el caso de las fibras en el UHPC, beneficio que se puede observar claramente en la figura 57.

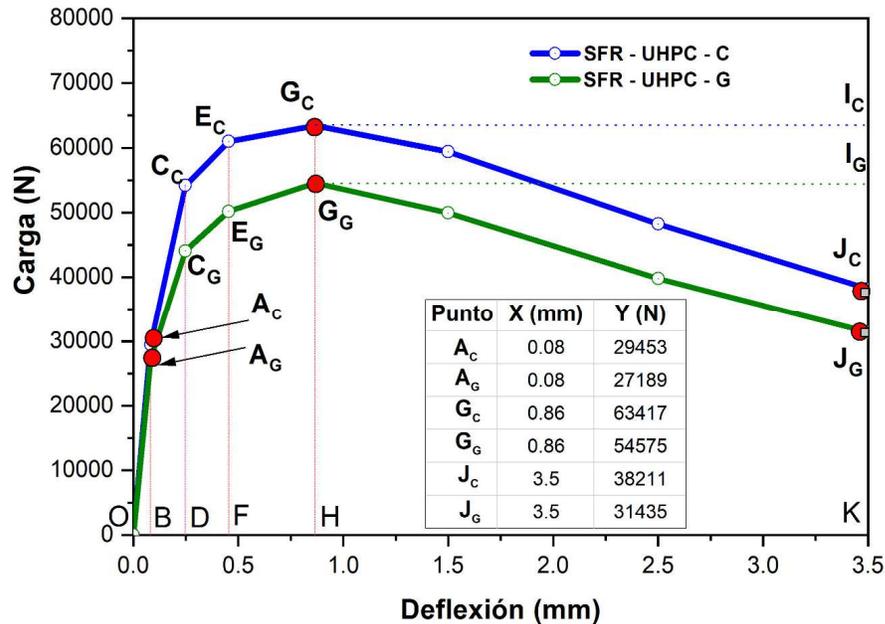


Figura 57. Desarrollo de la deformación por flexión de vigas de hormigón reforzado con fibras, mostrando la importante capacidad de post-agrietamiento atribuible a la presencia de microfibras de acero.

En la etapa de las tensiones residuales que se presenta después de que el concreto presenta la primera fisura, se pueden observar dos tipos de comportamiento, el conocido como ablandamiento por deformación, que es típico en los concretos convencionales reforzados con fibras, y el conocido como endurecimiento por deformación, que es típico en los concretos de alta resistencia [86]. La fractura mecánica involucrada en estos comportamientos depende de varios factores propios de las fibras, como el tipo de fibra, el volumen dosificado, la relación del aspecto y la adherencia de la fibra a la matriz cementante. En este sentido, dado que los concretos estudiados en este trabajo de investigación son concretos de ultra alto comportamiento, en la sección de carga-deflexión presentado gráficamente en la figura 57, como resultado del ensayo de flexión de las vigas, los concretos fibro-reforzados SFR-UHPC-C y SFR-UHPC-G exhiben un claro endurecimiento por deformación (segmentos AC-GC y AG-GG, respectivamente), seguido de un claro ablandamiento por deformación (segmentos GC-JC y GG-JG, respectivamente).

Durante el endurecimiento por deformación ($0.08 \text{ mm} \leq \delta \leq 1.0 \text{ mm}$, segmentos AC-GC y AG-GG, respectivamente), las tensiones de tracción actuantes superan la resistencia a la

fisuración de la matriz cementante del concreto, dando lugar a la aparición de múltiples microfisuras, hasta alcanzar el umbral de deflexión de 0.87 mm, a partir del cual empieza a perderse la adherencia entre los filamentos fibrosos presentes en la superficie de la fisura y la matriz cementante, dando lugar a una disminución progresiva de la capacidad de carga y a la aparición de una fisura principal localizada, que en nuestro caso fue inducida por la ranura practicada en el centro de cada viga [86].

Las tres etapas claramente diferenciadas en la figura 57, ilustran el beneficio en términos de ductilidad al que conduce la incorporación de las fibras de acero utilizadas en esta investigación: Etapa I—aparición de la primera grieta (puntos AC y AG), Etapa II—endurecimiento por deformación (etapa entre los puntos A y G), y Etapa III—ablandamiento por deformación (etapa entre los puntos G y J). Para todas estas etapas, el concreto convencional con fibras (SFR-UHPC-C) exhibe el mejor desempeño, lo que se atribuye exclusivamente a una mejor capacidad de adherencia entre la matriz cementante y el área superficial de las fibras. Para estas tres etapas, el concreto verde reforzado con fibras (SFR-UHPC-G) muestra reducciones de 7.69%, 13.94% y 17.69%, en comparación con SFR-UHPC-C. Este menor rendimiento se atribuye al hecho de que la matriz cementante del concreto verde posee una menor capacidad de adhesión en comparación con la matriz cementante del concreto convencional.

B) Límites de proporcionalidad y esfuerzos de la primera grieta

Para los concretos reforzados con fibras (SFR-UHPC-C y SFR-UHPC-G), las resistencias a la tracción por flexión o límites de proporcionalidad (LOPs) se midieron mediante ensayos de flexión de vigas ranuradas con carga central. Los LOPs correspondientes a la aparición de la primera fisura y al final de las Etapas II y III, que corresponden a las resistencias residuales al final de las etapas de deformación por endurecimiento y ablandamiento por deformación, respectivamente, se muestran en la figura 58. En esta figura podemos notar que las reducciones reportadas en términos de carga en la Sección del Comportamiento Post-Fisura corresponden a las siguientes reducciones: 2.8, 2.91 y 1.45 MPa en términos de resistencia a flexión. Como parámetro de la incertidumbre de medida para las resistencias correspondientes a la aparición de la primera grieta, los coeficientes de variación resultaron en valores entre el 16% y el 31% para SFR-UHPC-C, y entre el 20% y el 46% para SFR-UHPC-G. Como podemos observar, los coeficientes de variación presentan valores muy altos y varían significativamente entre ellos, lo

que se atribuye principalmente a la distribución de los filamentos de fibra en la matriz cementante, y a la orientación de los filamentos y la cantidad de fibra en el plano de falla donde se localiza la grieta inducida.

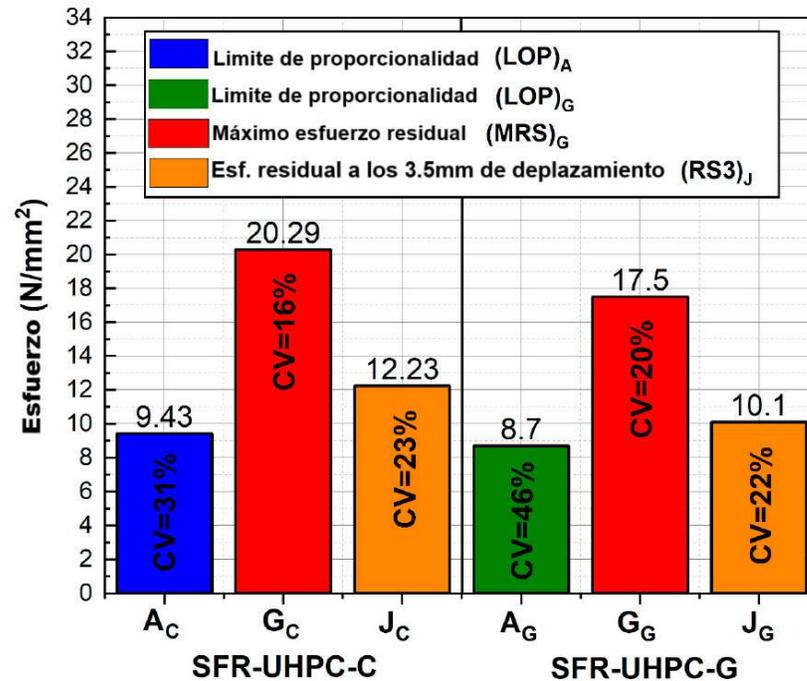


Figura 58. Límites de proporcionalidad resistencias residuales y coeficientes de variación para tres probetas.

Para ambos concretos, la figura 58 ilustra el gran beneficio de la incorporación de las fibras, ya que en la etapa de deformación por endurecimiento (LOPG), la presencia de las fibras condujo a un aumento significativo en la resistencia residual en comparación con las obtenidas para la primera grieta (LOPA); los valores de 10.86 MPa (115.16%) y 8.80 MPa (101.15%), para los concretos SFR-UHPC-C y SFR-UHPC-G, respectivamente, aumentan de manera que a pesar de reducirse durante la etapa de ablandamiento por deformación (LOPJ), la tensión residual se mantiene por encima de las tensiones correspondientes a la primera grieta (LOPA) en 2.80 MPa (29.69%) y 1.40 MPa (16.09%). Los resultados presentados en este gráfico ilustran también las reducciones provocadas por la sustitución de arcilla vitrificada por las diferentes fracciones de cemento, microsílíce, polvo de caliza y agregado de caliza, las cuales fueron de 7.74% para la aparición de la primera grieta, 13.75% para el final de la etapa de deformación por endurecimiento y 17.42% para el final de la etapa ablandamiento por deformación.

C) Índices de tenacidad a la flexión

La tenacidad del concreto de cemento se puede dividir en tenacidad a la flexión, tenacidad al impacto y tenacidad a la fractura. En el caso de la tenacidad a la flexión, la resistencia del material a la rotura representa la energía absorbida, que se denomina tenacidad a la flexión, siendo el área bajo la curva de carga-deflexión para el prisma de concreto sometido a una prueba de flexión de cuatro puntos. Esta energía puede mostrar hasta qué punto el concreto reforzado con fibras puede soportar las condiciones de carga hasta romperse. En consecuencia, la energía adicional que se debe consumir para provocar el desprendimiento o la rotura de las fibras mejora la tenacidad y el comportamiento posterior al pico (ablandamiento por deformación) de la matriz [87].

Para los concretos reforzados con fibras en este trabajo, la tenacidad a la flexión se determinó cuantificando el área bajo la curva esfuerzo-deformación obtenida a través de ensayos de flexión en vigas, y también se determinaron los índices de tenacidad. Estos índices de tenacidad se definen como la relación entre la capacidad de absorción de energía en la etapa residual, con respecto a la energía absorbida en la etapa de pre-fisuración (aparición de la primera grieta). En esta investigación, para caracterizar los concretos reforzados con fibras, se calcularon los índices de tenacidad I_5 , I_{10} e I_{20} , que de acuerdo con ASTM C1018-97 [88] corresponden a los números obtenidos al dividir el área hasta una deflexión de 3, 5.5 y 10.5 veces la deflexión de la primera fisura por el área hasta la primera fisura, y el índice de tenacidad última I_r , correspondiente a una deflexión de 3.5 mm.

En la figura 59 se observa que en todos los casos los índices de tenacidad para los concretos SFR-UHPC-C y SFR-UHPC-G son muy similares o prácticamente iguales. Considerando para ambos concretos valores promedio de 6.0, 15.5 y 34.0, para los índices de tenacidad I_5 , I_{10} e I_{20} , se puede observar que estos son superiores a los valores máximos reportados en la tabla 24 (5.7, 12.9 y 29.0, respectivamente), lo que en términos de tenacidad a flexión indica que los efectos sinérgicos de las fibras y la matriz cementante utilizados en este trabajo son congruentes con los reportados en trabajos anteriores, además de presentar una mayor capacidad de absorción de energía bajo cargas de flexión. Para este trabajo, la deformación correspondiente a I_r (3.5 mm) representa 43.75 veces la deformación a la que se presentó la primera grieta (0.08 mm); Si bien esta deformación es probablemente demasiado

elevada para la funcionalidad y operación de un edificio, la tenacidad media a flexión (I_{10}) muestra una capacidad residual de absorción de energía de flexión un 223,53% superior a la media para I_{20} , aspecto que sin duda contribuye a mejorar la seguridad estructural de un edificio de concreto.

Tabla 24. Índice de tenacidad para varios tipos de concretos [88–90].

Materiales	Índice de Tenacidad (Unid-Arb)			
	I_5	I_{10}	I_{20}	I_r
Concreto simple	1	1	1	N.A.
Material plástico-elástico (M-P-E)	5	10	20	N.A.
Concreto fibra reforzado (CFR)	1–6	1–12	1–25	N.A.
UHPC	5.1–5.7	11.4–12.9	20.6–29.0	N.A.
SFR-UHPC-C	6.7	16.5	34.0	109.0
SFR-UHPC-G	6.2	14.9	34.2	110.8

N.A. No aplica

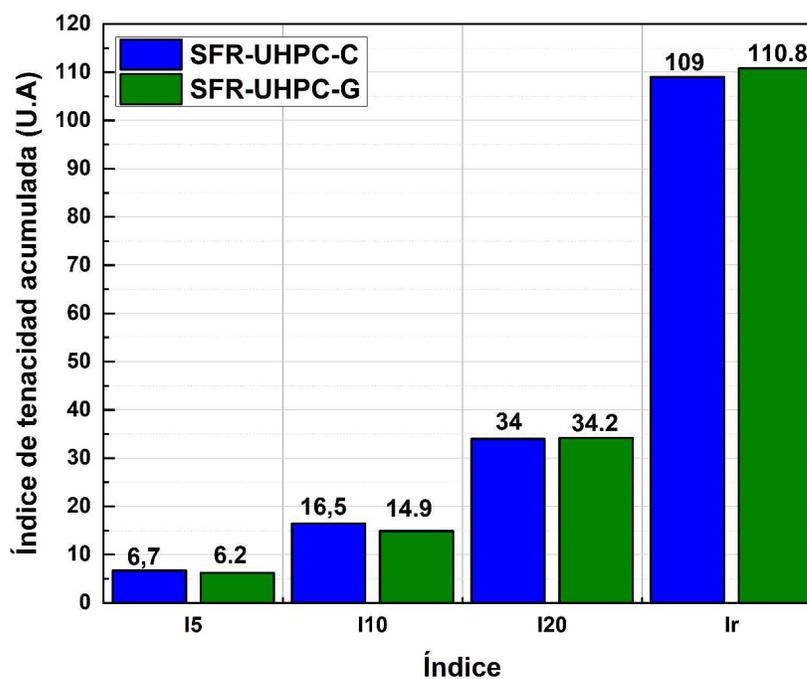


Figura 59. Índices de tenacidad acumulados (Unid arb = unidades adimensionales)

Los resultados reportados en la figura 59, fueron utilizados para establecer las regresiones lineales presentadas en la figura 60, las cuales pueden ser de gran utilidad en la práctica, ya que,

para un proyecto en particular, ofrecen al usuario la posibilidad de estimar la tenacidad a flexión acumulada para una deflexión máxima permisible. Las regresiones lineales presentadas en esta gráfica indican un mayor desarrollo de tenacidad a flexión acumulada de 2.054 Joules/mm de deflexión para el concreto SFR-UHPC-C con respecto al concreto SFR-UHPC-G. Para una deflexión de 1 mm, se han reportado valores de tenacidad acumulada en el rango de 31 a 39 Joules [91], los cuales son congruentes con los obtenidos para los concretos evaluados en este trabajo, 39.14 Joules para el concreto SFR-UHPC-C y 36.31 Joules para el concreto SFR-UHPC-G. Si bien los resultados e indicadores de incertidumbre reportados en este trabajo fueron obtenidos para ensayos experimentales de laboratorio, estos nos exhortan a utilizar arcilla vitrificada a escala industrial en un sector con controles muy estrictos que podría ser el más beneficiado en primera instancia, la industria de prefabricados de concreto. Al transferirlos, se espera que las diferencias con relación a los resultados e indicadores de incertidumbre sean mínimas o despreciables.

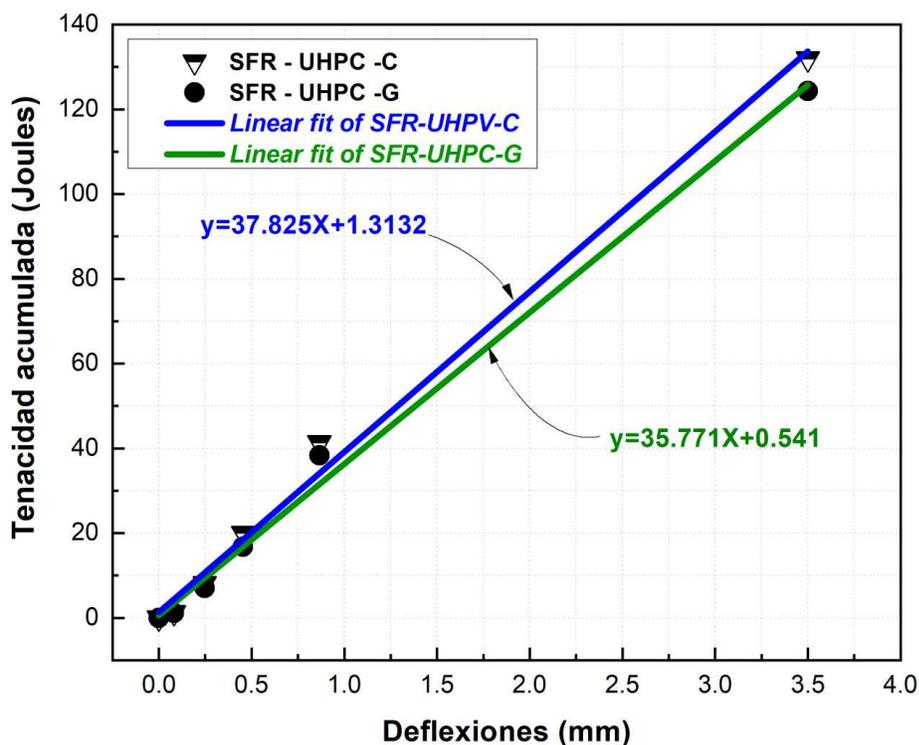


Figura 60. Ajustes lineales de la tenacidad acumulada.

4.9.4. Durabilidad

El principal objetivo de los UHPC es que sean durables, que mantengan su estructura sin un deterioro significativo en la calidad del concreto. Las estructuras de concreto pueden estar sometidas directamente o pueden ser expuestas a condiciones ambientales severas que no pueden evitarse como: la penetración de agua, al ataque químico, corrosión del acero, reacciones álcali agregado, ciclos de hielo y deshielo, así como la carbonatación [47]. La clave del UHPC es que posee una estructura densa, baja porosidad y resistencias altas desde edades iniciales, ofreciendo un matriz cementante de alta durabilidad, esta propiedad es la que provee una larga vida al concreto, sin embargo, durante el proceso de hidratación y con la baja relación a/c, se pueden producir pequeñas fisuras que afectan esta característica, por ello, en esta investigación incluimos diferentes ensayos al concreto en estado endurecido para determinar la durabilidad de los UHPC's propuestos, las evaluaciones realizadas a los concretos son:

- a) Determinación de los espacios vacíos
- b) Determinación de la resistividad superficial
- c) Determinación de la resistividad uniaxial (bruta)
- d) Determinación de la contracción autógena
- e) Determinación del ataque químico por ácido sulfúrico al 5% y 10%

4.9.4.1. Determinación de los espacios vacíos de los UHPC's

Los UHPC's son concretos que se caracterizan por tener una matriz cementante densa, y para comprobarlo, realizamos la determinación de espacios vacíos de los concretos después de 91 días de haberlos preparado, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 25 y muestran valores de espacios vacíos del 3.0% y 3.3% en los concretos de ultra alto comportamiento convencionales sin y con fibras, para el caso de los concretos de ultra alto comportamiento verdes sin y con fibras, los valores obtenidos fueron de 1.4% y 1% respectivamente, esto indica que la matriz de los UHPC-G y SFR-UHPC-G son más densos que los UHPC-C y el SFR-UHPC-C, siendo 50% menor los espacios vacíos del UHPC-G vs UHPC-C y en el caso del SFR-UHPC-G tiene 70% menos espacios vacíos que el SFR-UHPC-C.

Tabla 25. Determinación de espacios vacíos de los UHPC's diseñados

Concretos	Estacios vacios (%)
UHPC-C	3.0
SFR-UHPC-C	3.3
UHPC-G	1.4
SFR-UHPC-G	0.6

Si bien los resultados obtenidos se consideran bajos, se compararon con la determinación de contenido de aire realizada a los concretos en estado fresco y se presentan en la tabla 26, comparativamente los resultados son similares para los UHPC-C y SFR-UHPC-C, y en el caso de los UHPC-G y SFR-UHPC-G son mayores los contenidos de aire vs los espacios vacíos y con respecto al UHPC-SFR-UHPC-C son menores. Estos resultados indican que las matrices de los concretos son densas, con valores de contenido de aire y espacios vacíos máximos de 3.3%.

Tabla 26. Comparativa de contenido de aire vs espacios vacíos

Concretos	Contenido de Aire (%)	Estacios vacios (%)
UHPC-C	3.2	3.0
SFR-UHPC-C	3.2	3.3
UHPC-G	2.3	1.4
SFR-UHPC-G	1.5	0.6

Investigaciones realizadas para concretos de alto comportamiento, indican que para ese tipo de matrices los espacios vacíos fueron del orden del 10 al 15% [92] y a estos concretos también les determinaron la resistividad superficial máxima de 150 Kohm-cm, este valor se comparará con los resultados obtenidos en los concretos diseñados en este proyecto.

4.9.4.2. Determinación de la resistividad eléctrica superficial.

La resistividad eléctrica superficial se evaluó a 1, 3, 7, 14, 21, 28, 56 y 91 días, los resultados se presentan en la tabla 27. Los resultados obtenidos indica que conforme va incrementando el tiempo de preparación, la resistividad superficial incrementa esto indica que

con el paso del tiempo se van cerrando los poros y la resistividad al paso de la corriente se incrementa. Para determinar si los valores obtenidos indican que el concreto es durable, se compararon los resultados obtenidos con los valores proporcionados por la norma, la cual relaciona los valores de resistividad superficial con la resistencia a la penetración de los iones cloruro en los concretos, los datos de referencia indicados en la Norma AASHTO T 358-15 se presentan en la tabla 28.

Tabla 27. Resultados de resistividad eléctrica superficial de los UHPC's diseñados

Edad	UHPC-C (kΩ-cm)	SFR-UHPC-C (kΩ-cm)	UHPC-G (kΩ-cm)	SFR-UHPC-G (kΩ-cm)
1 día	7	7	5	2
3 días	14	5	8	3
7 días	43	11	22	6
14 días	104	26	41	11
21 días	149	35	68	21
28 días	172	39	103	48
56 días	263	63	282	232
91 días	282	69	359	303

Tabla 28. Valores indicados para la penetración del Ion cloruro vs resistividad eléctrica superficial

Penetración Ion Cloruro ASTM C 1202	Resultados de Resistividad Superficial AASHTO T 358
	Cilindro 10 cm por 20 cm kΩ-cm
Alto	< 12
Moderado	12 - 21
Bajo	21 - 37
Muy bajo	37 - 254
Despreciable	> 254

Partiendo de que los datos indicados en la norma, las determinaciones se realizaron 28 días después de preparado el concreto y comparando los resultados de los UHPC's vs los datos indicados en la tabla 27, se tiene que el UHPC-C a 28 días posee una resistividad superficial de 172 kΩ-cm y en base a la tabla 28 en la que menciona que con ese valor de resistividad, la penetración de ion cloruro es muy baja, en el caso del SFR-UHPC-C a 28 días, este posee 39 kΩ-cm y si bien es menor la resistividad vs el UHPC-C, está dentro del rango considerado como muy bajo. Por otro lado, la matriz del UHPC-G posee una resistividad superficial de 103 kΩ-

cm, quedando también dentro del rango de muy baja penetración al ion cloruro y el SFR-UHPC-G con 48 kΩ-cm si bien más bajo que el UHPC-G, también está en el rango de muy baja penetración al ion cloruro. Se puede concluir que todos los concretos poseen muy baja penetración a los iones cloruro.

Considerando los resultados obtenidos a 91 días los UHPC-C, UHPC-G y el SFR-UHPC-G, de 282 kΩ-cm, 359 kΩ-cm y 303 kΩ-cm respectivamente, se observa que estos valores son superiores a los 254 kΩ-cm indicados como mínimos en la tabla 28 para considerarse como despreciable al ataque por iones cloruro. Para el caso del SFR-UHPC-C debido al contenido de fibras y la distribución de estas en el concreto durante el endurecimiento, causa conducción eléctrica entre ellas y como consecuencia indica menor resistividad que los otros UHPC's preparados, este comportamiento lo mencionan Viet Huy Le et al. [93], indicando que las fibras metálicas que se utilizaron pueden propiciar la conducción eléctrica y se ha observado mayormente este efecto en fibras de 13mm, similares a las utilizadas en este proyecto.

En la figura 61, se presentan los resultados de una gráfica, mostrando el desarrollo de la resistividad Superficial de los concretos de ultra alto comportamiento formulados y probados, lo relevante de la información es que a partir de los 7 días de preparados los concretos, el desarrollo de la resistividad comienza a incrementar y al llegar a los 28 días se potencializa aún más. El UHPC-C (línea azul), muestra un desarrollo constante de la resistividad de 7 días y hasta 56 días y de 56 días a 91 días la pendiente cambia, es decir, pareciera que el desarrollo de resistividad disminuye su velocidad, en cambio cuando a este concreto le agregamos fibras (SFR-UHPC-C), se observa un pobre desarrollo de resistividad con respecto al UHPC-C, este comportamiento lo relacionamos con el acomodo de las fibras en la estructura del concreto, que permitieron un mayor paso de la corriente.

Los concretos UHPC-G (línea roja) y SFR-UHPC-G (línea verde) presentan un desarrollo similar y paralelo, siendo el de mayor la resistividad el UHPC-G, comprobando que los concretos que tienen fibras de acero en su estructura puede indicar que la matriz del concreto no es durable, pero no es por la matriz propia del concreto, si no la conducción de electricidad que se presenta por la cercanía de las fibras en las matrices de los UHPC con fibras.

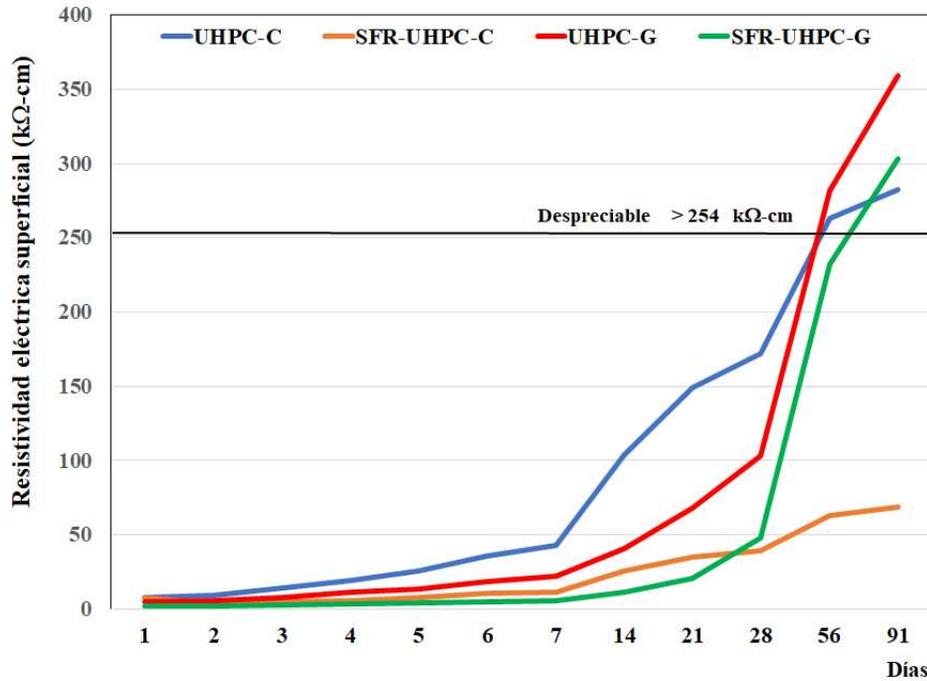


Figura 61. Desarrollo de la resistividad eléctrica superficial de los UHPC's diseñados.

4.9.4.3. Determinación de la resistividad eléctrica uniaxial o bruta.

La determinación de la resistividad eléctrica uniaxial es una prueba no destructiva y determina la resistencia que tiene un elemento al paso de la energía eléctrica, basándose en el principio del paso de corriente a través de los poros que posee un elemento en una solución de agua. Es importante mencionar que la medición de la resistividad se ve modificada cuando la matriz del concreto tiene fibras de acero, ya que estas favorecen el paso de la corriente. En la tabla 29, se presentan los resultados de la evaluación realizada a 1, 3, 7, 14, 21, 28, 56 y 91 días.

Tabla 29. Resultados de Resistividad eléctrica uniaxial de los UHPC's diseñados

Edad	UHPC-C (kΩ-cm)	SFR-UHPC-C (kΩ-cm)	UHPC-G (kΩ-cm)	SFR-UHPC-G (kΩ-cm)
1 día	4	2	3	1
3 días	9	3	5	3
7 días	25	7	15	8
14 días	55	15	29	17
21 días	79	21	47	25
28 días	94	33	57	38
56 días	141	41	132	60
91 días	140	48	171	74

Los resultados obtenidos se compararon con los indicados en la norma AASTHO TP 119-15 (2017) [94], en donde se indica la relación de los valores de resistividad eléctrica uniaxial con los valores indicados para la resistencia a la penetración de iones cloruro. En la tabla 30 se muestran los valores indicados en la norma de la correlación que existe del parámetro de penetración del ion cloruro con el valor de resistividad uniaxial.

Tabla 30. Resultados de la penetración del Ion cloruro vs Resistividad Uniaxial

Penetración Ion Cloruro ASTM C 1202	Resultados de Resistividad Uniaxial AASHTO TP 119
	kΩ-cm
Alto	< 5.2
Moderado	5.2 - 10.4
Bajo	10.4 - 20.8
Muy bajo	20.8 - 207
Despreciable	> 207

Comparando los resultados de resistividad eléctrica uniaxial obtenidos de los UHPC's diseñados con los valores mencionados en la tabla 30, los valores indican que en todos los casos los concretos de ultra alto comportamiento diseñados tienen muy baja penetración al ion cloruro, observándose que los 4 UHPC's tienen valores en 20.8 y 207 kΩ-cm., un dato relevante es que los SFR-UHPC-C y SFR-UHPC-G tienen los valores más bajos de 33 kΩ-cm y 38 kΩ-cm respectivamente, y aun quedando en la clasificación de muy baja penetración al ion cloruro.

En la figura 62 se presentan los resultados a todas las edades evaluadas de la resistividad eléctrica uniaxial y se observa que los UHPC's sin fibras, presentan mayor resistividad hasta 91 días, y el UHPC-G mostro un valor mayor de resistividad uniaxial vs el UHPC-C. Por otro lado, se identificó que la matriz del UHPC-G después de 56 días continúa incrementando su resistividad con respecto a la matriz del UHPC-C, este comportamiento se le atribuye a que la arcilla vitrificada utilizada para la sustitución de cemento, microsílíce y agregado, es una puzolana y esta continúa desarrollando resistencias aún después de 56 días.

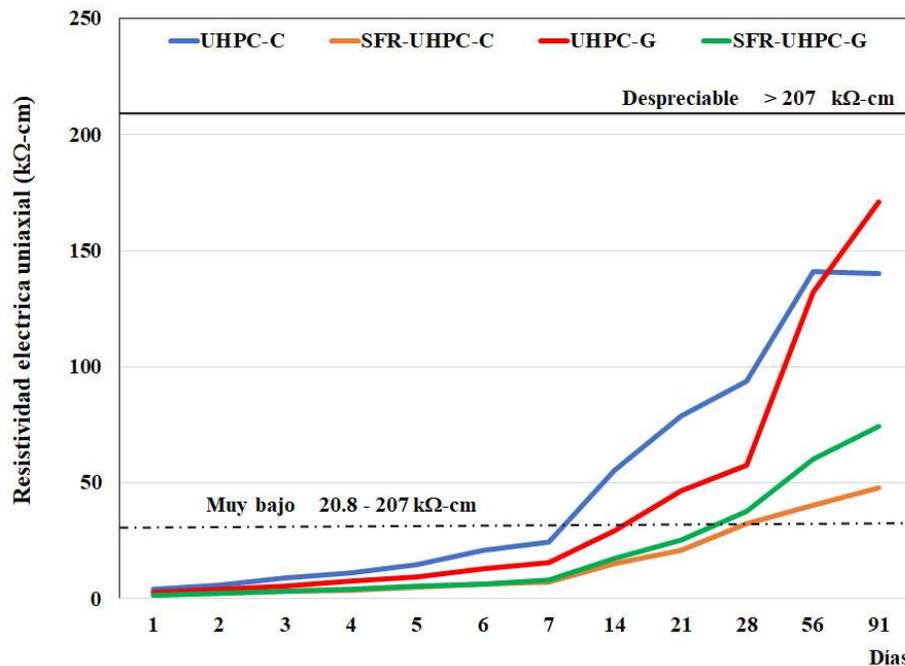


Figura 62. Desarrollo de resistividad eléctrica uniaxial de los UHPC's diseñados.

4.9.4.4. Determinación de la contracción autógena

La contracción autógena es un problema en los UHPC's debido a los altos consumos de cemento y la baja relación agua cementantes de los concretos (a/c). La contracción autógena es el decremento en el volumen de los componentes del cemento a nivel macroscópico por los compuestos de hidratación que se están formando, las investigaciones sugieren que una de las primeras causas de este problema es el desarrollo de la tensión superficial en los capilares muy finos de la matriz cementante por una ineficiente cantidad de agua en la matriz del concreto para que el material cementante se hidrate completamente [46].

Los resultados de contracción autógena para cada uno de los concretos de ultra alto concreto tanto convencional sin fibras y el verde sin fibra, se presentan en la tabla 31.

Tabla 31. Contracción autógena del UHPC-C y del UHPC-G

Edad (días)	UHPC-C		UHPC-G	
	Millonésimas ($\mu\epsilon$)	Porcentaje	Millonésimas ($\mu\epsilon$)	Porcentaje
0.5	-343.0	52.9	145.0	-54.3
2	-449.2	69.2	-20.2	7.6
3	-456.7	70.4	-51.5	19.3
15	-579.5	89.3	-220.7	82.6
19	-631.6	97.3	-256.6	96.1
25	-649.0	100.0	-267.1	100.0

Los resultados mostrados en la tabla 31, evaluados desde 0.5 días hasta 25 días después del fraguado final, indican que el UHPC-C presenta una contracción autógena del 53% a los 0.5 días del total medido a los 25 días (100%). La primera pendiente está constituida de los días 0 a 2, obteniendo una contracción de -449.16 $\mu\epsilon$ con un aumento del 20% respecto a los 0.5 días. Para la segunda pendiente, en un intervalo de 2 a 19 días, el aumento de la contracción es de un 27%, por lo que la tendencia de la contracción a partir de la edad a 2 días comienza a estabilizarse. En este punto, a los 19 días, se tiene un 97% del total de la contracción. Desde el día 20 hasta el final de la prueba a los 25 días, los cambios en la pendiente no fueron significativos, lográndose estabilizar a partir del día 21 con un valor de contracción máxima de -649 $\mu\epsilon$ (100%).

Para el UHPC-G la contracción sufrida a los 0.5 días, en realidad fue una expansión, a este proceso se le conoce como hinchamiento, observándose valores positivos de contracción autógena de 145 $\mu\epsilon$, lo cual refiere una expansión de aproximadamente el 50% del valor de contracción total a 25 días, en tan solo 0.5 días. A los 2 días, los valores de contracción se encuentran cercanos a CERO, es decir, el punto de transición entre la expansión y contracción. A partir de este punto, el UHPC-G presenta 3 pendientes de contracción del día 2 al día 3, se observa un aumento en la contracción cercano al 12%, obteniendo un total de 19% al tercer día. La segunda pendiente está conformada entre los días 3 y 19, en este periodo se observa el mayor incremento en la contracción, llegando a un porcentaje del 96%, lo que significa un aumento del 77%. Por último, de la edad de 19 días y hasta los 25 días, se observa tendencia a la

estabilización, comprobándolo con un incremento de 4% en 6 días, llegando a un valor de -267.1 $\mu\epsilon$, lo que corresponde al 100% de la contracción del UHPC-G. En la figura 63 se presentan las curvas de contracción autógena de los UHPC-C y UHPC-G.

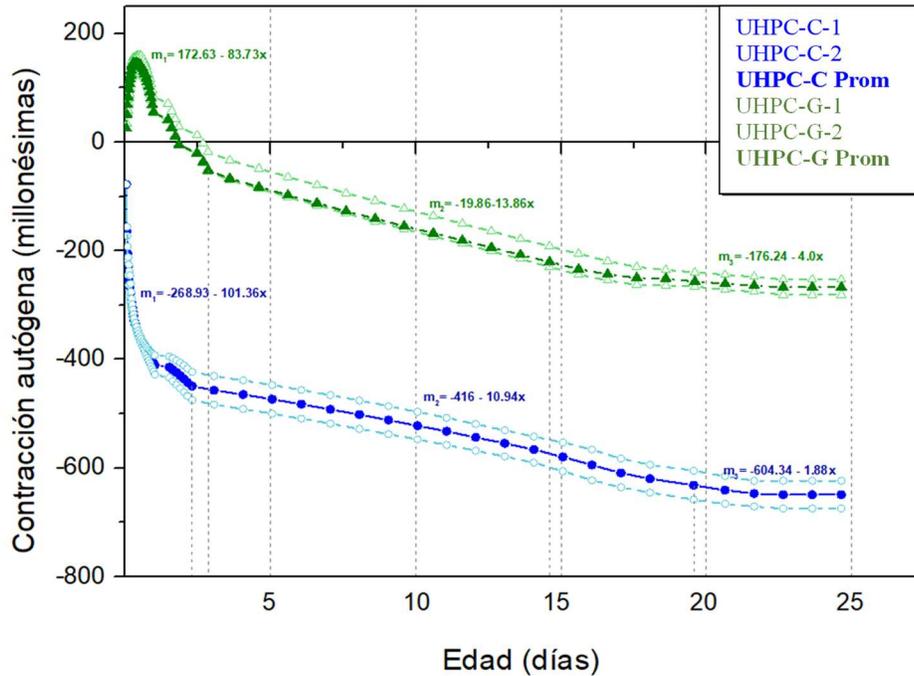


Figura 63. Contracción autógena de los UHPC-C y UHPC-G

Análisis comparativo

Como se puede observar en los resultados de contracción autógena, la sustitución del cemento, la microsílíce y los agregados por la arcilla vitrificada modifica significativamente el efecto de la contracción autógena del UHPC. La principal diferencia entre estos los UHPC-C y UHPC-G se presenta a los 0.5 días, donde el UHPC-C desarrolla más del 50% del valor total de su contracción, mientras que el UHPC-G exhibe un fenómeno de expansión, debido a que la arcilla vitrificada no requiere la misma cantidad de agua que el UHPC-C, por lo tanto, el UHPC-G tiene disponible mayor cantidad de agua libre para reaccionar con los cementantes. A los 2 días después del fraguado final, el UHPC-C presenta una contracción de 70%, mientras que el UHPC-G presenta un 8% de la contracción total. A partir de este día 2, ambos concretos presentan pendientes casi lineales, en el caso del UHPC-C busca la estabilidad con un aumento

del 29% de la contracción autógena del día 2 al día 25, y para el UHPC-G el aumento es del 88.5%. Si bien, la comparación del incremento respecto al valor total de la contracción de ambas mezclas parece excesivo, en la gráfica se puede observar una similitud en las segundas pendientes, y esto se debe a que el UHPC-C presentó un aumento de $-182 \mu\epsilon$, mientras que el UHPC-G obtuvo un aumento de $-236 \mu\epsilon$. La diferencia se debe a que el valor total de contracción, donde el UHPC-C a 25 días tuvo una resultante de $-649 \mu\epsilon$, el UHPC-G redujo su contracción autógena a $-267.07 \mu\epsilon$, es decir, que el uso de la arcilla vitrificada vs el uso de cemento, microsílíce y agregados calizos, redujo los valores de contracción en un 41%.

El resultado de la contracción autógena para el UHPC-C está dentro de los valores que se mencionan en diferentes investigaciones que son del orden de -600 a $-1000 \mu\epsilon$ [24, 95], en los proyectos de investigación en donde sustituyen el cemento por escoria, fly ash y material reciclado de coral, disminuyen la contracción autógena, siendo esta menor, logrando valores desde -400 a $-600 \mu\epsilon$ [5, 40, 96], en el caso del UHPC-G obtuvimos valores de $-267 \mu\epsilon$, menores a los mencionados, esto indica que el uso de la arcilla vitrificada mejoro la contracción autógena y esto promueve la durabilidad del UHPC-G.

4.9.4.5. Determinación de resistencia al ataque por sulfatos

- Método acelerado

Los resultados de la determinación de la resistencia al ataque por sulfatos de los UHPC diseñados se presentan en la tabla 31, los concretos fueron sometidos al método acelerado indicado en la Norma ASTM C452-21, en donde además de realizar la determinación a 14 días como lo marca la norma, se continuo la evaluación de su resistencia a los sulfatos hasta la semana 8. Los resultados de expansión a los sulfatos a los 14 días (2 semanas) fue de 0.000% de expansión por ataque para los 4 UHPC's.

Tabla 31. Resistencia al ataque por sulfatos de los UHPC's (método acelerado)

Semana	UHPC-C (%)	SFR-UHPC-C (%)	UHPC-G (%)	SFR-UHPC-G (%)
2	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.014	0.011	0.014	0.010
6	0.014	0.011	0.014	0.010
8	0.014	0.011	0.014	0.010

En los datos mostrados en la tabla 31, se observa que los UHPC-C y UHPC-G presentan los mismos valores de expansión hasta la semana 8, y cuando se les añaden las fibras el SFR-UHPC-C presenta una reducción en la expansión del 21% con respecto al UHPC-C, y en el caso del SFR-UHPC-G también se presenta una reducción en la expansión del 29% con respecto al UHPC-G, cabe mencionar que los resultados obtenidos indican que los 4 UHPC's diseñados, son resistentes al ataque por sulfatos tomando como base que el valor máximo permitido en la norma ASTM C150-24 para un cementos altamente resistente a los sulfatos es de 0.04% de expansión.

- Método tradicional a los 12 meses.

La determinación de la resistencia al ataque por sulfatos, se realizaron únicamente a las matrices cementantes, es decir, a los concretos de ultra alto comportamiento sin fibras (UHPC-C y UHPC-G), con el objetivo de determinar su resistencia al ataque por iones sulfato. La determinación se realizó en base a la norma ASTM C1012-24a, este método concluye el resultado después de 12 meses de haber sometido los especímenes al ataque por sulfatos y en base al valor obtenido se puede definir si los UHPC son resistentes a los sulfatos, denotando así su durabilidad.

En la figura 64 se presentan de forma gráfica del desarrollo de la expansión durante 52 semanas (12 meses) de los 2 UHPC evaluados, en dicha gráfica se puede observar que: de la semana 4 a la 36 se mantiene la expansión, y a partir de la semana 36 a la 52 se observa un incremento, obteniéndose una expansión final del UHPC-C de 0.032% y para el UHPC-G de 0.036%. La Norma ASTM C595-24 [97] indica que para mostrar que el espécimen es resistente a los sulfatos, el valor máximo permitido es de 0.10% a los 12 meses y hace una mención que

cuando la expansión a los 6 meses es máxima 0.05%, se considera este material altamente resistente a los sulfatos, en el caso de los UHPC-C y UHPC-G los valores obtenidos a 12 meses son menores a los indicados para 6 meses, por lo tanto, se puede concluir que las matrices de los UHPC-C y del UHPC-G son durables.

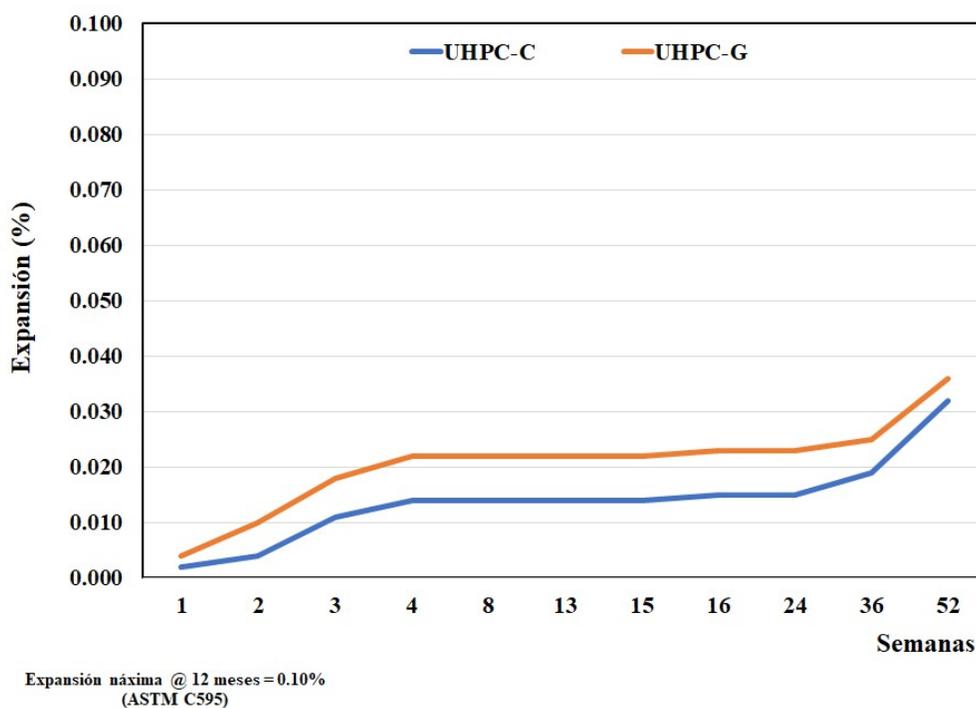


Figura 64. Expansión de los UHPC's por el ataque con sulfatos a 52 semanas (1 año).

4.9.4.6. Determinación del ataque químico por ácido al 5% y 10%.

- Ataque químico con ácido sulfúrico al 5%.

Otra de las determinaciones realizadas para evaluar la durabilidad de los concretos de ultra alto comportamiento, fue mediante un ataque con ácido sulfúrico en dos concentraciones, al 5% y al 10%. Del ataque ácido con una concentración al 5% a los UHPC-C, SFR-UHPC-C, UHPC-G y SFR-UHPC-G se observó en los cubos atacados con la solución ácida, una degradación y se evaluó mediante la pérdida de peso de cada uno de los cubos sometidos al ataque con respecto a su peso inicial. Los resultados de la pérdida de peso obtenidos por la degradación de los UHPC se presentan en la tabla 32.

Tabla 32. Pérdida de peso de los UHPC's por el ataque químico por ácido al 5%

Semana	UHPC-C	SFR-UHPC-C	UHPC-G	SFR-UHPC-G
	% Pérdida de Peso			
4	8.7	9.5	12.2	15.0
6	24.0	23.9	20.2	23.8
9	25.7	24.7	35.0	32.3
11	26.4	24.1	36.1	34.7

En la figura 65 se representan gráficamente los resultados obtenidos del ataque químico y se puede observar que el UHPC-C (línea azul) presentó una pérdida de peso máxima del 26.4% a las 11 semanas de ataque químico y el SFR-UHPC-C (línea roja) de 24.7% a las 9 semanas de ataque químico, esto sugiere que la matriz del SFR-UHPC-C resiste el ataque químico en un 7% más con respecto al UHPC-C. Para la matriz del UHPC-G (línea naranja) se presenta la mayor pérdida de peso a las 11 semanas de ataque químico llegando a un 36.1% y el SFR-UHPC-G también presenta la mayor pérdida de peso a las 11 semanas, siendo este de un 34.7%, estos datos sugieren que con fibras es más resistente al ataque químico en un 5% respecto al UHPC-G.

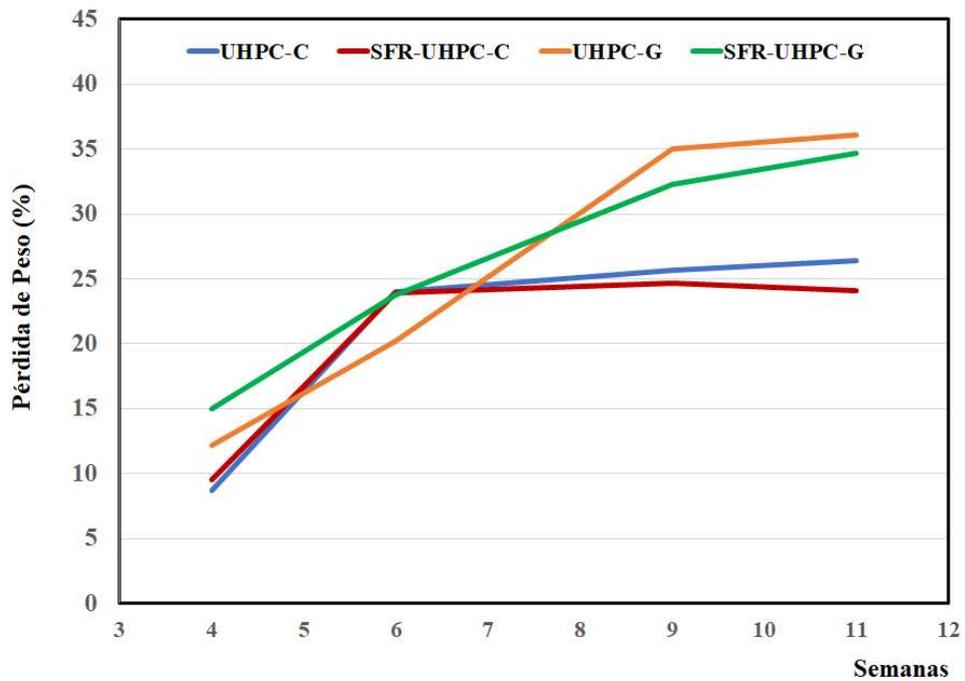


Figura 65. Pérdida de peso por el ataque químico por ácido al 5% a los UHPC's

Comparando los UHPC's sin fibras y con fibras, se puede mencionar que los resultados indican que el UHPC-C y SFR-UHPC-C, presentan una mayor resistencia al ataque de ácido sulfúrico al 5% después de 11 semanas, con una diferencia de pérdida en peso del 10% menor en la matriz de los UHPC-G y del SFR-UHPC-G. Otro punto relevante es que los concretos con fibras, tanto el convencional como el verde óptimo, son más resistentes al ataque químico que las matrices sin fibras.

- Ataque químico con ácido sulfúrico al 10%.

Las muestras sometidas al ataque químico con ácido sulfúrico al 10% presentan un comportamiento similar a las 4 semanas, en la semana 6 se ve un incremento significativo en el porcentaje de pérdida en peso y a partir de la semana 6 hasta la semana 11 prácticamente la pérdida de peso se mantiene. En la tabla 33 se muestran los resultados de pérdida en peso de los UHPC's evaluados.

Tabla 33. Pérdida de peso de los UHPC's por el ataque químico por ácido al 10%

Semana	UHPC-C	SFR-UHPC-C	UHPC-G	SFR-UHPC-G
	% Pérdida de Peso			
4	10.5	8.1	11.4	13.3
6	17.9	17.3	33.8	29.6
9	18.1	16.5	33.8	30.1
11	18.3	16.9	35.1	28.6

Analizando los resultados, podemos mencionar que el UHPC-C presenta una pérdida de peso máxima a las 11 semanas 18.3% y este concreto con fibras SFR-UHPC-C en la semana 6, presenta su máxima pérdida que fue del 17.3% y a 11 semanas la pérdida de peso fue del 16.9%, siendo más resistente el SFR-UHPC-C en un 7.6% respecto al UHPC-C a 11 semanas. Para los UHPC-G y SFR-UHPC-G se muestra una menor resistencia al ataque químico con H₂SO₄, siendo el mayor ataque de la semana 4 a la semana 6, el UHPC-G es el concreto que presentó una menor resistencia al ataque químico de los 4 UHPC's diseñados, mostrando una pérdida de peso del 35.1% en la semana 11, y para el SFR-UHPC-G la mayor pérdida fue en la semana 9, teniendo una pérdida de peso del 30.1%, estos datos indican que el SFR-UHPC-G presentó

mejor resistencias al ataque químico un 18.5% menor que el UHPC-G a las 11 semanas. Comparando las matrices de los UHPC sin fibras (UHPC-C vs UHPC-G), se observa que el UHPC-G presenta menos resistencia al ataque ácido, teniendo una pérdida de peso 16.8% mayor que el UHPC-C, del mismo modo, comparando el SFR-UHPC-C con el SFR-UHPC-G, se identifica que el SFR-UHPC-G presenta menor resistencia al ataque químico en un 11.7% con respecto al SFR-UHPC-C. En la figura 66 se observan las gráficas del desarrollo del ataque químico con el tiempo para los 4 concretos de ultra alto comportamiento evaluados.

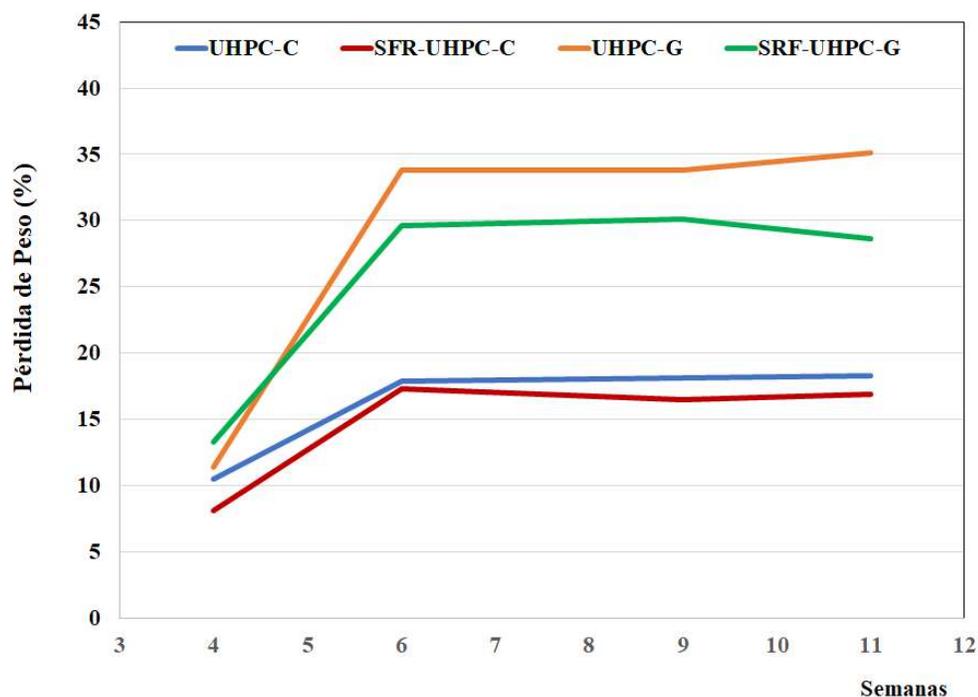


Figura 66. Pérdida de peso por el ataque químico por ácido al 10% a los UHPC's

Comparativamente el ataque químico por ácido sulfúrico en las 2 concentraciones del 5% y del 10%, presentan comportamientos similares de los que podemos mencionar que:

- 1) La matriz cementante de UHPC-C y SFR-UHPC-C son más resistentes al ataque químico por ácido sulfúrico que los UHPC-G y SFR-UHPC-G.
- 2) En todos los concretos de ultra alto comportamiento se observa una fuerte pérdida en el peso a las 6 semanas de estar recibiendo el ataque químico con ácido al 5% y al 10%.
- 3) Al ser sometidos los UHPC's a la solución ácida de 5% de ácido sulfúrico, presentaron una mayor pérdida de peso que cuando se atacaron con una solución del

10% de ácido sulfúrico. Este comportamiento puede deberse a que a mayor concentración de iones sulfatos en la solución, pudieron reaccionar con las fases de hidratación de los componentes presentes en los concretos de ultra alto comportamiento diseñados.

- 4) De las dos matrices cementantes de los concretos de ultra alto comportamiento, la que menos resistió el ataque ácido fue la matriz del UHPC-G, ya que con el ataque ácido tanto al 5% como al 10% a las 11 semanas presentó una pérdida de peso 36.1% y 35.1% respectivamente, lo relevante es que aun con 10% la pérdida de peso es similar que con el 5%.
- 5) Comparando los resultados obtenidos con otras investigaciones como la de Koenig & Dehn [98], en donde realizaron ataque ácido a concretos de ultra alto comportamiento con ácido sulfúrico diluido, obteniendo perdidas de peso desde 3% hasta 8.2% después de 8 semanas de ataque, estos valores son menores a los obtenidos en la presente investigación, una de las diferencias principales es el tipo de agregado utilizado, en la investigación de Koenig & Dehn utilizaron arena que mineralógicamente es cuarzo y una grava basáltica a diferencia de este proyecto que utilizamos arena de carbonato de calcio y la arcilla vitrificada (silico-aluminato), cabe mencionar que el carbonato de calcio y el silicato de aluminio, al entrar en contacto con el ácido sulfúrico, se descompone formando sulfato de calcio, dióxido de carbono y agua. En el caso del cuarzo no lo disuelven los ácidos como el sulfúrico. Por otro lado, contamos con la referencia del ataque ácido a un concreto convencional [95] en donde se muestra que este tipo de concreto sometido al ataque ácido con ácido sulfúrico al 5%, a las 4 semanas ha perdido el 13.5% y a las 12 semanas el 31%, utilizando un agregado silico aluminoso (granito), en el presente proyecto utilizamos la arcilla vitrificada para la formulación de los concretos de ultra alto comportamiento verdes, siendo esta un silico aluminato, similar al granito y presentando pérdida de masa del orden del 30%.
- 6) En base a los resultados obtenidos, las matrices con las que diseñamos los UHPC's no presentan resistencia al ataque químico.

4.10. Estimación del CO₂ incorporado

En el diseño de futuros materiales de construcción, además de priorizar propiedades de ingeniería como la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la ductilidad y la tenacidad, es fundamental optimizar su huella de carbono para que el material contribuya a aumentar su impacto positivo en la sostenibilidad de las actividades antropogénicas relacionadas con el proyecto de construcción. En este sentido, la tabla 34 se presenta una estimación comparativa del CO₂ incorporado para los UHPC evaluados en este trabajo. Estas estimaciones se obtuvieron al sumar los resultados obtenidos para cada material, multiplicando la masa con la que este participa en la proporción de la mezcla por su correspondiente CO₂ incorporado. Los resultados indican que la sustitución de cemento, microsílíce, polvo de piedra caliza y arena de piedra caliza por arcilla vitrificada condujo a una reducción significativa de 170.32 kg de CO₂/m³ del total de CO₂ incorporado, lo que representa una reducción del 27.2% para el UHPC-G y del 20.2 % para el SFR-UHPC-G.

Tabla 34. Estimación del CO₂ incorporado para los UHPC evaluados

Materiales	CO ₂ Incorporado (E _{CO₂}) [kgCO ₂ /kg]	UHPC-C emisiones CO ₂ kgCO ₂ /m ³	SFR-UHPC-C emisiones CO ₂ kgCO ₂ /m ³	UHPC-G emisiones CO ₂ kgCO ₂ /m ³	SFR-UHPC-G emisiones CO ₂ kgCO ₂ /m ³	Referencias
Aditivo superplastificante	0.720	5.7	5.5	5.7	5.6	[95]
Cemento	0.830	598	598	418	413	[100]
Microsilíce	0.000	0.0	0.0	---	---	[100]
AV (D ₅₀ =8.4 micras)	0.040	---	---	3.2	3.2	[101]
AV (D ₅₀ =15.2 micras)	0.040	---	---	8.6	8.5	[101]
AV (D ₅₀ =40.7 micras)	0.020	---	---	2.5	2.5	[101]
AV (D ₅₀ =950 micras)	0.003	---	---	0.7	0.7	[101]
Agregado (D ₅₀ =950 micras)	0.002	1.7	1.7	1.2	1.2	[100]
Polvo caliza (D ₅₀ =46.3 micras)	0.017	8.0	7.8	5.6	5.5	[100]
Agua	0.000	0.1	0.1	0.1	0.1	[100]
Aditivo oclisor	0.086	0.1	0.1	0.1	0.1	[100]
Fibras de acero	1.490	0.0	230.8	0.0	232.6	[95]
Total (kgCO₂/m³)		613.1	843.6	446.1	673.3	

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo, se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

1. En comparación con los materiales sustituidos en el UHPC-C y SFR-UHPC-C, los UHPC-G y SFR-UHPC-G mostraron mayor cohesión en las pruebas de pérdida de extensibilidad, lo que se atribuye a que, en sus diferentes fracciones, la arcilla vitrificada está compuesta por partículas con mayor número de aristas angulares y una superficie más rugosa. A pesar de ello, los UHPC-G y SFR-UHPC-G mostraron una menor pérdida de extensibilidad, lo que se atribuye a la mayor reactividad de los compuestos cementantes (cemento Portland y AV) y a la alta finura de la microsílíce en los UHPC-C y SFR-UHPC-C.
2. Según el ACI, tras 24 horas de envejecimiento, todos los concretos elaborados en este estudio, pueden clasificarse como de alta resistencia a la compresión, ya que todos presentaron resistencias superiores a los 41.4 MPa. Este aspecto es de gran importancia para la industria de prefabricados, ya que el ciclo de reutilización de los moldes sería muy corto, una característica muy atractiva para este segmento de la industria. Por otro lado, los UHPC-C y SFR-UHPC-C pueden clasificarse como UHPC a partir de los 9 y 5 días de envejecimiento, respectivamente, y los UHPC-G y SFR-UHPC-G a partir de los 23 y 17 días, respectivamente, ya que a partir de estas edades alcanzaron una resistencia de 120 MPa.
3. La dosificación de 2 % de microfibras de acero en volumen, produjo incrementos significativos en la resistencia a la compresión a la edad de 1 día, con incrementos de 27% para el UHPC-C y del 22% para el UHPC-G, incrementos que de los 7 a los 91 días se mantuvieron entre 5 y 10%.
4. La sustitución del cemento Portland por la arcilla vitrificada, presentó una menor resistencia a la compresión hasta los 56 días de edad, a partir de esta edad, la resistencia de los UHPC-G y SFR-UHPC-G fue superior a la de los UHPC-C y SFR-UHPC-C, con incrementos del 6 % y el 11 % a los 91 días. La actividad puzolánica de la arcilla vitrificada también condujo a un incremento en el módulo de elasticidad de los UHPC-C y SFR-

UHPC-C del 15 % y el 5 %, respectivamente. Los incrementos en las resistencias a edades posteriores se atribuyen a la actividad puzolánica y a la alta dureza de la arcilla vitrificada.

5. Para los UHPC reforzados con fibra, y para las tres etapas identificadas en las curvas de carga-deflexión (aparición de la primera fisura, endurecimiento por deformación y ablandamiento por deformación), el SFR-UHPC-G mostró reducciones del 7.69 %, 13.94% y 17.69 %, en comparación con el SFR-UHPC-C. Este menor rendimiento se atribuye a que la matriz cementante del SFR-UHPC-G tiene una menor capacidad de adherencia.
6. Los límites proporcionales (LOP) para SFR-UHPC-C y SFR-UHPC-G ilustran el gran beneficio de la incorporación de fibras de acero, ya que en la etapa de endurecimiento por deformación (LOPG) la presencia de las fibras condujo a incrementos significativos en la resistencia residual, en comparación con los obtenidos para la primera fisura (LOPA); 10.86 MPa (115.16%) y 8.80 MPa (101.15%), para los SFR-UHPC-C y SFR-UHPC-G respectivamente, incremento que a pesar de reducirse durante la etapa de ablandamiento por deformación (LOPJ), la tensión residual se mantiene por encima de las tensiones correspondientes a la primera fisura (LOPA) en 2.80 MPa (29.69%) y 1.40 MPa (16.09%). Estos también ilustran las reducciones ocasionadas por la sustitución del cemento, microsílíce, polvo de caliza y agregado de caliza, por arcilla vitrificada, que fueron del 7.74% para la aparición de la primera grieta, 13.75% para el final de la etapa de endurecimiento por deformación y 17.42% para el final de la etapa de ablandamiento por deformación.
7. Las regresiones lineales establecidas para los desarrollos de tenacidad a flexión acumulada indican que la sustitución de cemento, microsílíce, polvo de piedra caliza y agregado de piedra caliza, por arcilla vitrificada, conduce a una reducción de la deflexión en el concreto verde (SFR-UHPC-G) de 2,054 Joules/1 mm.
8. Los resultados de las evaluaciones para determinar la Durabilidad de los concretos, indican que los UHPC-C, SFR-UHPC-C, UHPC-G y SFR-UHPC-G, tienen altas resistividades tanto superficial como axial y en ambas determinaciones los concretos presentan baja permeabilidad a los iones cloruro a la edad de 28 días, y un punto relevante

es que los UHPC-G y SFR-UHPC-G con el tiempo continúan incrementando la resistividad tanto la superficial como la uniaxial y no así con los UHPC-C y SFR-UHPC-C, esto se debe a que la arcilla vitrificada utilizada en los UHPC-G y SFR-UHPC-G, es una puzolana y sigue reaccionando después de 28 días.

9. Lo referente a los datos obtenidos de la contracción autógena, son atractivos porque a menor contracción, menores micro fisuras y la matriz del UHPC-G presenta una contracción menor y se le atribuye a que la arcilla vitrificada utiliza menor cantidad de agua de reacción para la hidratación con respecto al cemento.
10. La evaluación de los concretos en su resistencia al ataque por sulfatos indican que los cuatro UHPC'S diseñados, son altamente resistentes a los sulfatos, con valores muy bajos con respecto a lo indicado por la norma. Y en el caso de la evaluación de su resistencia al ataque químico con H_2SO_4 , el UHPC-C y SFR-UHPC-C presentan menor pérdida de peso que los UHPC-G y SFR-UHPC-G, sugiriendo que la matriz del concreto de ultra alto comportamiento verde es menos resistente que la matriz convencional, cabe mencionar que el ataque recibido por los concretos fue agresivo con soluciones al 5% y 10% de H_2SO_4 .
11. Los resultados de este trabajo evidencian la viabilidad técnica de una arcilla vitrificada para su uso en la producción de concreto de ultra alto comportamiento (UHPC), incorporándola como sustituto del cemento (30%), la microsílíce (100%) y los polvos y arena de caliza (30%), sin afectar sus propiedades en estado fresco, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad estático, la resistencia a la flexión ni las resistencias residuales a la flexión post-fisuración, y permitiendo reducciones significativas en las estimaciones del CO_2 incorporado.
12. La sustitución de cemento, microsílíce, polvo de caliza y arena de caliza por arcilla vitrificada, reduce significativamente el CO_2 incorporado en el material en 167.2 kg de CO_2/m^3 , lo que representa una reducción del 27.5 % para el UHPC-G y del 19.8 % para el SFR-UHPC-G.

Conclusión General

Lo resultados del presente proyecto de investigación permitieron obtener el diseño de un concreto de ultra alto comportamiento formulado con materiales tradicionales y locales, y a su vez se evidencia la viabilidad técnica de una arcilla vitrificada específica para utilizarse en la producción de concreto de ultra alto comportamiento (UHPC), incorporándola como sustituto del cemento (30%), de la microsilice (100%) y los agregados calizos (30%), sin afectar las propiedades en estado fresco, la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad estático, la resistencia a la flexión ni las resistencias residuales a la flexión post-fisuración, así como mostrando alta resistencias al ataque por sulfatos y sugiriendo que posee baja penetración a los iones cloruro, con el beneficio de reducciones significativas en las estimaciones del CO₂ incorporado.

REFERENCIAS CONSULTADAS

- [1] N. Randl, T. Steiner, S. Ofner, E. Baumgartner, and T. Mészöly, 2014 “Development of UHPC mixtures from an ecological point of view,” *Constr Build Mater*, vol. 67, no. PART C, pp. 373–378, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.102>.
- [2] D. M. Kannan, S. H. Aboubakr, A. S. EL-Dieb, and M. M. Reda Taha, 2017, “High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement,” *Constr Build Mater*, vol. 144, pp. 35–41, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.115>.
- [3] E. Lasseguette et al., 2019, “Chemical, microstructural and mechanical properties of ceramic waste blended cementitious systems,” *J Clean Prod*, vol. 211, pp. 1228–1238, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.240>.
- [4] “Applications of Cement - Portland Cement Association.” Accessed: Sep. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.cement.org/cement-concrete/applications-of-cement/>
- [5] E. Ghafari, S. A. Ghahari, H. Costa, E. Júlio, A. Portugal, and L. Durães, 2016, “Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high-performance concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 127, pp. 43–48, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.123>.
- [6] J. F. Burroughs, J. Shannon, T. S. Rushing, K. Yi, Q. B. Gutierrez, and D. W. Harrelson, 2017, “Potential of finely ground limestone powder to benefit ultra-high-performance concrete mixtures,” *Constr Build Mater*, vol. 141, pp. 335–342, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.073>.
- [7] A. Alsalman, C. N. Dang, and W. Micah Hale, 2017, “Development of ultra-high-performance concrete with locally available materials,” *Constr Build Mater*, vol. 133, pp. 135–145, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.040>.
- [8] Z. Wu, C. Shi, and W. He, 2017, “Comparative study on flexural properties of ultra-high-performance concrete with supplementary cementitious materials under different curing regimes,” *Constr Build Mater*, vol. 136, pp. 307–313, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.052>.
- [9] A. Alsalman, C. N. Dang, G. S. Prinz, and W. M. Hale, 2017, “Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high-performance concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 153, pp. 918–928, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.158>.

- [10] M. M. Reda, N. G. Shrive, and J. E. Gillott, 1999, “Microstructural investigation of innovative UHPC”, *Cem. Concr. Res.* vol. 29, no. 3, pp. 323–329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00225-7).
- [11] R. Yu, P. Spiesz, and H. J. H. Brouwers, 2014, “Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC),” *Cem Concr Res*, vol. 56, pp. 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.002>.
- [12] J. Du, W. Meng, K. H. Khayat, Y. Bao, P. Guo, Z. Lyu, A. Abu-obeidah, H. Nassif, H. Wang, 2021, “New development of ultra-high-Performance concrete (UHPC),” *Composites Part B* 224. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>.
- [13] N. A. Soliman and A. Tagnit-Hamou, 2017, “Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC,” *Constr Build Mater*, vol. 145, pp. 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.187>.
- [14] S. A. Zareei, F. Ameri, N. Bahrami, P. Shoaee, H. R. Musaei, and F. Nurian, 2019, “Green high strength concrete containing recycled waste ceramic aggregates and waste carpet fibers: Mechanical, durability, and microstructural properties,” *Journal of Building Engineering*, vol. 26, p. 100914. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2019.100914>.
- [15] S. Park, S. Wu, Z. Liu, and S. Pyo, 2021, “The Role of Supplementary Cementitious Materials (SCMs) in Ultra High Performance Concrete (UHPC): A Review,” *Materials* 2021, Vol. 14, Page 1472, vol. 14, no. 6, p. 1472. <https://doi.org/10.3390/ma14061472>.
- [16] H. T. Le and H. M. Ludwig, 2016, “Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete,” *Mater Des*, vol. 89, pp. 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.120>.
- [17] V. W. Y. Tam, M. Soomro, and A. C. J. Evangelista, 2018, “A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017),” *Constr Build Mater*, vol. 172, pp. 272–292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>.
- [18] S.S. Mousavi, C. Bhgaraju, C. Ouellet-Plamondon, 2021, “Clay as a Sustainable Binder for concrete-A review”, *Construction Materials*, 1, pp 134–168. <https://doi.org/10.3390/constrmater1030010>.
- [19] W. M. Hou, P. K. Chang, and C. L. Hwang, 2004, “A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag,” *Cem Concr Res*, vol. 34, no. 4, pp. 615–622. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.10.007>.

- [20] R. Jaskulski, D. Józwiak-Niedzwiedzka and Y. Yakymchko, “Calcined clay as supplementary cementitious material”, *Materials* 2020, 13, 4734. <https://doi.org/10.3390/ma13214734>.
- [21] K. Scrivener, F. Martirena, S. Bishnoi, and S. Maity, 2018, “Calcined clay limestone cements (LC3),” *Cem Concr Res*, vol. 114, pp. 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>.
- [22] A. Halicka, P. Ogrodnik, and B. Zegardlo, 2013, “Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate,” *Constr Build Mater*, vol. 48, pp. 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.063>.
- [23] S. Subaşı, H. Öztürk, and M. Emiroğlu, 2017, “Utilizing of waste ceramic powders as filler material in self-consolidating concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 149, pp. 567–574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.180>.
- [24] M. Ding, R. Yu, Y. Feng, S. Wang, F. Zhou, Z. Shui, X. Gao, Y. He, L. Chen. 2021, “Possibility and advantages of producing an ultra-high performance concrete (UHPC) with ultra-low cement content,” *Construction and Building Materials*, vol. 273. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122023>.
- [25] G. Hernández-Carrillo, A. Durán-Herrera, and A. Tagnit-Hamou, 2022, “Effect of Limestone and Quartz Fillers in UHPC with Calcined Clay,” *Materials* 2022, Vol. 15, Page 7711, vol. 15, no. 21, p. 7711. <https://doi.org/10.3390/ma15217711>.
- [26] G. Kravanja, A.R. Mumtaz, and S. Kravanja, 2024, “A Comprehensive Review of the Advances, Manufacturing, Properties, Innovations, Environmental Impact and Applications of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC),” *Buildings* 2024, Vol. 14, Page 382, vol. 14, no. 2, p. 382. <https://doi.org/10.3390/buildings14020382>.
- [27] M.H. Ali, Y.Z. Dinkha, J.H. Haido. 2017, “Mechanical properties and spalling at elevated temperature of high performance concrete made with reactive and waste inert powders”, *Engineering Science and Technology and International Journal* 20 536-541. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.12.004>.
- [28] C. Wang, C. Yang, F. Liu, C. Wan, X. Pu. 2012, “Preparation of ultra-high-performance concrete with common technology and materials”. *Cement and concrete composites* 34, 538-544. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.005>.

- [29] D. J. Anderson, S. T. Smith, F. T.K. Au. 2016, “Mechanical properties of concrete utilizing waste ceramic as coarse”, Construction and building materials 117 pag. 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.153>.
- [30] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali. 2010, “Reusing ceramic waste in concrete”, Construction and building materials 24, 832-838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>.
- [31] K. Rashid, A. Razzaq, M. Ahmad, T. Rashid, S. Tariq, 2017, “Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate”, Construction and Building Materials 154, 829-840. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.219>.
- [32] S. Siddique, S. Chaudhary, S. Shrivastava, T. Gupta, 2019, “Sustainable utilization of ceramic waste in concrete: Exposure to adverse conditions”, Journal of Cleaner Production 210, 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.231>.
- [33] Z. Keshavarz, D. Mostofinejad, 2019, “Porcelain and red ceramic waste used as replacements for coarse aggregate in concrete” 195, 218-230. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.033>.
- [34] Z. Bartosz, S. Maciej, O. Pawel, 2016 “Ultra-High strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic waste-The method of production and interfacial transition zone”, Construction and building materials 122, 736-742. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.112>.
- [35] Diagnostico básico para la Gestión Integral de Residuos, primera edición, mayo 2020, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en México. Disponible: www.gob.mx/inecc.
- [36] Diagnostico Básico para la Gestión Integral de los residuos 2012, Semarnat. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/Documentos/Ciga/libros2009/CD001408.pdf>
- [37] Z. Li. 2016, “Drying shrinkage prediction of paste containing meta-kaolin and ultrafine fly ash for developing ultra-high-performance concrete." Materials today communications 6 , 74-80. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.01.001>
- [38] N.A. Soliman, A. Tagnit-Hamou*. 2017 “Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap.” Construction and Building Materials 139, 374-383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.084>

- [39] I. Ferdosian, A. Camões. 2017, “Eco-efficient ultra-high-performance concrete development by means of response surface methodology.” *Cement and concrete Composites* 84, 146-156. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.019>
- [40] X. Wanga, R. Yu, Z. Shui, Q. Song, Z. Zhanga. 2017, “Mix design and characteristics evaluation of an eco-friendly Ultra-high Performance concrete incorporating recycled coral based materials”. *Journal and Cleaner Production* 165, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.096>
- [41] W. Meng, K. Henri Khayat*. 2017, “Improving flexural performance of ultra-high-performance concrete by rheology control of suspending mortar.” *Composites part B117*, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.019>.
- [42] C. Shi*, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, Z. Fang, 2015, “A review on ultra high-performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design”, *Construction and Building Materials* 101 pag. 741-751. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>.
- [43] N.M. Azmee, N. Shafiq. 2018, “Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications”, *Case Studies in Construction Materials* 9, e00197. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00197>.
- [44] X. Wang, R. Yu, Q Song, Z. Shui, Z. Liu, S. Wu. 2019, “Optimized design of ultra-high-performance concrete (UHPC) with a high wet packing density”. *Cement and Concrete Research* 126. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105921>.
- [45] S. Kumar V., M. Santhanam. 2003 “Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review”, *The Indian Concrete Journal*, https://www.researchgate.net/publication/286840879_Particle_packing_theories_and_their_application_in_concrete_mixture_proportioning_A_review.
- [46] R. Ullah, Y. Qiang, J. Ahmad, N. Ivanovich Vaton, M. A. El-Shorbagy, 2022, “Ultra-High-Performance-Concrete (UHPC): A State-of-the-Art Review”. *Materials* 15, 4131. <https://doi.org/10.3390/ma15124131>.
- [47] [86] M. A. Bajaber, I.Y. Hakkeem, 2021, “UHPC evolution, development, and utilization in construction a review”, *Journal of Materials Research and Technology* 10: 1058-1074. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.051>.

- [48] D. Wang, C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, Z. Huang, Z. Fang. 2015, “A review on ultra-high-performance concrete: Part II. Hydration microstructure and properties”, *Construction and Building Materials* 96, pag.368-377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095>.
- [49] Ch. Schröfl, M. Gruber, J. Plank*. 2012, “Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra high-performance concrete (UHPC)”, *Cement and Concrete Research* 42, 1401-1408. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.08.013>.
- [50] M.I. Khan, Y. M. Abbas, G. Fares. 2017, “Review of high and ultrahigh performance cementitious composites incorporating various combination of fibers and ultrafines”, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* 29, 339-347. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.03.006>.
- [51] TECHBRIEF, 2022, “Electrical Resistivity testing to rapidly assess the durability of UHPC-Class Materials”, FHWA Publication No.: FHWA-HRT-21-095. <https://doi.org/10.21949/1521681>.
- [52] K. Chi, J. Li, R. Shao, C. Wu. 2025, “Experimental study on dynamic characterization of ultra-high-performance concrete (UHPC) after cryogenic freeze-thaw cycles”, *Cement and Concrete Composites* 160. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106011>.
- [53] Norma ASTM C114-24 2024, Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [54] Norma ASTM C188-17 2017, Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [55] Norma ASTM C430-24 2024, Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μm (No. 325) Sieve. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [56] Norma ASTM C204-24 2024, Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).

- {57] Norma ASTM C151-23 2023, Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- {58] Norma ASTM C109-23 2023, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50 mm [2 in.] Cube Specimens). ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [59] Norma ASTM C191-21 2021, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [60] Norma ASTM C128-22 2023, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [61] Norma ASTM C136-19 2020, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [62] Norma ASTM C311-24 2024, Standard Test Methods for Sampling and Testing Coal Ash or Natural Pozzolans for Use in Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [63] Norma ASTM C1240-20 2020, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [64] Norma ASTM C305-20 2020, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [65] Hernández Carrillo Guillermo, 2016, Tesis de Maestría “Desarrollo de Concreto de Ultra Alto Desempeño con agregados calizos del área metropolitana de Monterrey, México.
- [66] Norma ASTM C230-20 2020, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).

- [67] Norma ASTM C1437-15 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2020. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [68] Norma ASTM C185-20 Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2020. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [69] Norma ASTM C403-23 Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2023. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [70] Norma ASTM C469-22 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2022. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [71] Norma ASTM C1609-24 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2024. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [72] Norma ASTM C642-21 2022, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [73] Norma AASHTO T 358-15 2015, Surface Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, D.C. 20001.
- [74] Norma ASTM C1876-19 2023, Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Bulk Conductivity of Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [75] Norma ASTM C1698-19 2019, Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [76] Norma ASTM C452-21 2021, Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [77] Norma ASTM C1012-24a 2024, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.

- [78] Norma ASTM C490/C490M-21 2021, Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [79] Norma ASTM C267-20 2020, Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [80] Norma ASTM C150-24 2024, Standard Specification for Portland Cement. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [81] Norma ASTM C618-23 2023, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [82] Norma ASTM C1856-17 Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High-Performance Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2017. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [83] H.R. Sobuz; P. Visintin; M.S. Mohamed Ali; M. Singh; M.C. Griffith; A.H. Sheikh. 2016, “Manufacturing ultra-high performance concrete utilising conventional materials and production methods”. *Constr. Build. Mater.* 111, 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.102>.
- [84] D. Choi; K. Hong; M. Ochirbud; D. Meiramov; P. Sukontaskuul. 2023, “Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) and Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) with Recycled Sand”. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 2023, 17, 67. (2023). <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00631-2>.
- [85] Norma UNE-EN 14651:2007+A1:2008; Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of pro-portionality (LOP), residual). UNE Normalización Española. Available online: www.une.org (accessed on).
- [86] S. W. Choi; J. Choi; S.C. Lee. 2019, “Probabilistic Analysis for Strain-Hardening Behavior of High-Performance Fiber-Reinforced Concrete”. *Materials* 12, 2399. <https://doi.org/10.3390/ma12152399>.
- [87] S. Hamoush; T. Abu-Lebdeh; T. Cummins. 2010, “Deflection behavior of concrete beams reinforced with PVA micro-fibers”. *Constr. Build. Mater.* 24, 2285–2293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.027>.

- [88] Norma ASTM C1018-97 1997, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [89] Y. Li; E. H. Yang; K. H. Tan. 2020, “Flexural behavior of ultra-high performance hybrid fiber reinforced concrete at the ambient and elevated temperature”. *Constr. Build. Mater.* 250, 118487. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118487>.
- [90] I. Ferdosian; A. Camões. 2021, “Mechanical performance and post-cracking behavior of self-compacting steel-fiber reinforced eco-efficient ultra-high-performance concrete”. *Cem. Concr. Compos.* 121, 104050. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104050>.
- [91] O. Zaid; S. R. Z. Hashmi; M. H. El Ouni; R. Martínez-García; J. de Prado-Gil; S. E. A. S. Yousef. 2023, “Experimental and analytical study of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete modified with egg shell powder and nano-silica”. *J. Mater. Res. Technol.* 24, 7162–7188. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.240>.
- [92] Rivera Torres Jorge Maurilio, 2018, Tesis “Effect of minerals admixtures on high-performance concrete: C-S-H formation and physical and mechanical properties”. UANL-FIC.
- [93] V. Huy Le, D. Anh Do, M. Van Nguyen, K. Thac. 2023, “Compressive and electrical resistivity properties of UHPC containing different steel fibers”, *XAY DUNG* 11.
- [94] Norma AASHTO T 119-15 2017, Electrical Resistivity of a Concrete Cylinder Tested in a Uniaxial Resistance Test. American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, D.C. 20001.
- [95] H. Tran, L. Sorelli, O. Ahmat Hisseine, D. Bouchard, V. Brial, T. Sanchez, D. Conciatori, C. Ouellet-Plamondon, 2023, “Development of sustainable ultra-high performance concrete recycling aluminum production waste”. *Construction and Building Materials*, volume 371, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130212>.
- [96] C. Yalçinkaya, H. Yazici, 2017, “Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures”, *Construction and Building Materials* 144. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.198>.

- [97] Norma ASTM C595/595M-24 2024, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. Available online: www.astm.org (accessed on).
- [98] A. Koenig, F. Dehn, 2015, “Acid Resistance of Ultra High-Performance Concrete (UHPC)”, ResearchGate. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-17088-6_41.
- [99] P. S. N. Raju, P. Dayaratnam, 2003, “Durability of Concrete Exposed to Dilute Sulphuric Acid”, Building and Environment, volume 19, Issue 2, 1954, pages 75-79. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(84\)90032-5](https://doi.org/10.1016/0360-1323(84)90032-5).
- [100] B. Chiaia, A. Fantili, A. Guerini, G. Volpatti, D. Zampini, 2014, “Eco-mechanical index for structural concrete”. Construction and Building Materials, volumen 67, Part C, 30, Pages 386-392. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.090>.
- [101] A.L. Vélez, V. G. Mena, 2020, “Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento” Ecuador. Ambiente *Construido Porto Alegre*, 20, 611–625. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300448>.